

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**KORIŠTENJE MORSKE VODE KAO IZVOR TOPLINSKE ENERGIJE NA  
PRIMJERU BOLNICE DR. MARTIN, ROVINJ**

Diplomski rad

Bruno Jurković

N363

Zagreb, 2022.

Sveučilište u Zagrebu

Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

KORIŠTENJE MORSKE VODE KAO IZVOR TOPLINSKE ENERGIJE NA PRIMJERU  
BOLNICE DR. MARTIN, ROVINJ

BRUNO JURKOVIĆ

Diplomski rad je izrađen na: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U priobalnom području postoji veliki potencijal za implementaciju sustava dizalice topline s morskom vodom kao izvor toplinske energije. U takvim sustavima morska voda se u zimskom periodu koristi kao izvor toplinske energije za grijanje, a u ljetnom periodu morska voda služi kao spremnik za uklonjenu toplinu iz prostora zgrade. U ovom radu prikazan je princip rada dizalice topline s morskom vodom i načini zahvata morske vode (direktni i uz pomoć zdenca). Napravljena je analiza slučaja bolnice u Rovinju u kojoj je prikazana važnost poznavanja hidrogeoloških parametara vodonosnika za učinkovit rad sustava dizalice topline koji koristi zdence za proizvodnju morske vode. U računalnom programu „AquiferTest“ provedene su simulacije proizvodnje vode s ciljem određivanja sniženja razine vode u zdencima za različite količine protoka, te je za svaki protok određena količina toplinske energije koja se može pridobiti iz morske vode.

Ključne riječi: dizalica topline, zahvat morske vode, hidrogeološki parametri, „AquiferTest“

Diplomski rad sadrži: 65 stranica, 37 slika, 10 tablica i 31 referenca

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta,  
Pierottijeva 6, Zagreb

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

Komentorica: Dr. sc. Marija Macenić

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

Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNF

Datum i mjesto obrane: 16.09.2022, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb

Master's Thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

UTILIZATION OF SEA WATER AS A SOURCE OF THERMAL ENERGY – THE CASE  
OF ST. MARTIN'S HOSPITAL IN ROVINJ

BRUNO JURKOVIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

In the coastal area, there is great potential for the implementation of a heat pump system with seawater as a source of thermal energy. In such systems, seawater is used as a source of thermal energy for heating in winter, while in summer the heat from the building is stored in seawater. This thesis presents the working principles of heat pump system with seawater and seawater intake methods (directly and water well). The importance of knowing the hydrogeological parameters for the efficient operation of the heat pump system is shown in the case study of the hospital in Rovinj. In "AquiferTest" software, a simulation of water production is made to determine the drawdown of the water level in the production wells for different flow regimes, and for each flow the amount of heat energy that can be extracted from seawater was calculated.

Keywords: seawater heat pump, seawater intake, hydrogeological parameters, "AquiferTest"

Thesis contains: 65 pages, 10 tables, 37 figures and 31 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Full Professor Tomislav Kurevija, PhD  
Marija Macenić, PhD

Reviewers: Full Professor Tomislav Kurevija, PhD  
Associate Professor Borivoje Pašić, PhD  
Associate Professor Luka Perković, PhD

Date and place of defense: September 16, 2022, Faculty of Mining, Geology and Petroleum  
Engineering, University of Zagreb

## SADRŽAJ

<b>I. POPIS SLIKA</b> .....	I
<b>II. POPIS TABLICA</b> .....	III
<b>III. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA</b> .....	IV
<b>VI. POPIS KORIŠTENIH KRATICA</b> .....	V
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. DIZALICE TOPLINE</b> .....	2
2.1. Pregled stanja korištenja dizalica topline u Europi .....	4
<b>3. DIZALICE TOPLINE S MORSKOM VODOM KAO IZVOR TOPLINE (SWHP)</b> ....	8
3.1. Direktni zahvat morske vode.....	9
3.2. Zahvat morske vode zdencima .....	11
3.3. Potencijal sustava dizalice topline na morsku vodu na području hrvatske obale.....	13
3.4. Primjeri primjene sustava dizalice topline s morskom vodom u svijetu i u RH .....	15
<b>4. HIDROGEOLOŠKA SVOJSTVA VODONOSNIKA</b> .....	18
4.1. Koeficijent uskladištenja.....	20
4.2. Hidraulička vodljivost.....	23
4.3. Transmisivnost .....	25
4.4. Pokusna proizvodnja.....	26
<b>5. IZVEDBA ZDENACA ZA SUSTAV DIZALICE TOPLINE BOLNICE DR. MARTIN HORVAT, ROVINJ – STUDIJA SLUČAJA</b> .....	34
5.1. Opis lokacije.....	34
5.2. Geološka građa šireg područja .....	35
5.3. Klimatske značajke .....	38
5.4. Konstrukcija eksploatacijskih zdenaca .....	39
<b>6. ANALIZA PODATAKA POKUSNOG CRPLJENJA KORIŠTENJEM RAČUNALNOG SOFTWARE „AQUIFERTEST“</b> .....	44
6.1. Analiza testa s konstantnom količinom protoka .....	44
6.2. Analiza <i>step</i> testa.....	46
<b>7. ANALIZA RADA PROIZVODNIH I UTISNIH ZDENACA ZA SLUČAJ SUSTAVA DIZALICE TOPLINE BOLNICE DR. MARTIN HORVAT, ROVINJ</b> .....	50
7.1. Scenarij dva proizvodna i dva utisna zdenca .....	50

7.2. Scenarij jedan proizvodni i dva utisna zdenca. ....	56
7.3. Utjecaj parametra transmisivnosti na proizvodnju vode iz vodonosnika. ....	59
<b>8. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>62</b>
<b>9. LITERATURA</b> .....	<b>63</b>

## I. POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Shema sustava dizalice topline .....	2
<b>Slika 2-2.</b> Postotni udio obnovljivih izvora energije u krajnjoj potrošnji u Europi .....	5
<b>Slika 2-3.</b> Broj novoinstaliranih jedinica dizalica topline u jednoj godini .....	6
<b>Slika 2-4.</b> Sveukupan broj instaliranih jedinica dizalica topline .....	7
<b>Slika 3-1.</b> Načini zahvata morske vode .....	9
<b>Slika 3-2.</b> Skica sustava direktnog zahvata morske vode .....	10
<b>Slika 3-3.</b> Prikaz podvodnog usisa morske vode .....	11
<b>Slika 3-4.</b> Shema potpovršinskog zahvata morske vode pomoću zdenca .....	12
<b>Slika 3-5.</b> Temperatura mora i zraka tijekom godine u Zadru .....	14
<b>Slika 3-6.</b> Temperatura mora i zraka tijekom godine u Splitu .....	14
<b>Slika 3-7.</b> Sustav dizalice topline u gradu Stockholmu .....	15
<b>Slika 3-8.</b> Sustav dizalice topline ugrađen u stambenoj zgradi u Splitu .....	17
<b>Slika 3-9.</b> Sustav dizalice topline u Dubrovniku .....	17
<b>Slika 4-1.</b> Shema otvorenog i zatvorenog vodonosnika .....	19
<b>Slika 4-2.</b> Shematski prikaz proizvedene vode za otvoreni (a) i zatvoreni vodonosnik (b) .....	23
<b>Slika 4-3.</b> Prikaz raspona vrijednosti hidrauličke vodljivosti za pojedine stijene .....	24
<b>Slika 4-4.</b> Shematski prikaz hidrauličke vodljivosti i transmisivnosti .....	26
<b>Slika 4-5.</b> Prikaz mjerenja sniženja pri konstantnoj proizvodnji i povrata razine .....	28
<b>Slika 4-6.</b> Polulogaritamski dijagram sniženja u ovisnosti o vremenu .....	30
<b>Slika 4-7.</b> Dijagram step testa .....	32
<b>Slika 5-1.</b> Prikaz katastarske čestice bolnice u Rovinju .....	35
<b>Slika 5-2.</b> Geološka karta Istre .....	37
<b>Slika 5-3.</b> Dijagram temperature zraka i padalina grada Rovinja .....	38
<b>Slika 5-4.</b> Dijagram temperature mora kod Rovinja .....	39
<b>Slika 5-5.</b> Smještaj zdenaca u odnosu na bolnicu .....	40
<b>Slika 5-6.</b> Tehnički i litološki profil zdenca B-1 .....	41
<b>Slika 6-1.</b> Dijagram vrijeme-sniženjem dobiven konstant testom za zdenac B-1 .....	45
<b>Slika 6-2.</b> Dijagram step-testa za zdenac B-1 .....	47
<b>Slika 6-3.</b> Grafički prikaz specifičnog sniženja u ovisnosti o protoku $q$ za zdenac B-1 .....	48

<b>Slika 7-1.</b> Graf sniženja u zdencima za režim proizvodnje 6 + 6 l/s u trajanju od 30 dana.....	52
<b>Slika 7-2.</b> Radijus utjecaja proizvodnje od 12 l/s na sniženje vodnog lica.....	54
<b>Slika 7-3.</b> Graf sniženja za maksimalni dopušteni protok. ....	55
<b>Slika 7-4.</b> Graf sniženja u zdencima za režim jednog proizvodnog zdenca. ....	57
<b>Slika 7-5.</b> Graf sniženja pri maksimalnom dopuštenom protoku.....	58
<b>Slika 7-6.</b> Prikaz odnosa dostupne toplinske/rashladne energije i protoka uz pretpostavljene tipične vrijednosti $COP_h=4,2$ i $COP_c=4,7$ . ....	59
<b>Slika 7-7.</b> Graf sniženja u zdencima pri sniženoj vrijednosti transmisivnosti. ....	60
<b>Slika 7-8.</b> Graf sniženja u zdencima pri povišenoj vrijednosti transmisivnosti. ....	61

## II. POPIS TABLICA

<b>Tablica 4-1.</b> Tipične vrijednosti specifičnog prinosa za pojedine vrste stijena.....	21
<b>Tablica 4-2.</b> Podaci o specifičnoj retenciji za neke vrste stijena .....	21
<b>Tablica 4-3.</b> Tipične vrijednosti koeficijenta uskladištenja za pojedine vrste stijena.....	22
<b>Tablica 5-1.</b> Koordinate zdenaca .....	39
<b>Tablica 5-2.</b> Podaci o litološkom profilu zdenaca .....	42
<b>Tablica 5-3.</b> Tehnička konstrukcija zdenca .....	43
<b>Tablica 6-1.</b> Rezultati parametara vodonosnika izračunati u računalnom programu „AquiferTest“ za zdenac B-1 .....	45
<b>Tablica 6-2.</b> Rezultati hidrogeoloških parametara dobiveni obradom podataka pokusne proizvodnje u programu „AquiferTest“ .....	46
<b>Tablica 6-3.</b> Parametri zdenaca dobiveni obradom podatka pokusne proizvodnje u programu „AquiferTest“ .....	49
<b>Tablica 7-1.</b> Ulazni podaci za proračun sniženja u programu „AquiferTest“ .....	51



### III. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

OZNAKA	ZNAČENJE	SI JEDINICA
$H$	Ukupna toplinska snaga sustava	kW
$E$	Uložena snaga za rad kompresora	kW
$G$	Toplinska energija dobivena iz protoka vode	kW
$Q$	Protok vode	l/s
$\rho_w$	Gustoća vode	Kg/l
$\rho$	Gustoća fluida	kg/m <sup>3</sup>
$\Delta T$	Razlika temperature vode	K
$C_p$	Specifični kapacitet vode	J/kg/K
$C$	Ukupan učinak hlađenja	kW
$S$	Specifični prinos vodonosnika	/
$V_g$	Volumen proizvedene vode	m <sup>3</sup>
$V$	Volumen pornog prostora	m <sup>3</sup>
$K$	Hidraulička vodljivost	m/s
$T$	Transmisivnost	m <sup>2</sup> /s
$s$	Sniženje razine vode u zdencu	m

#### IV. POPIS KORIŠTENIH KRATICA

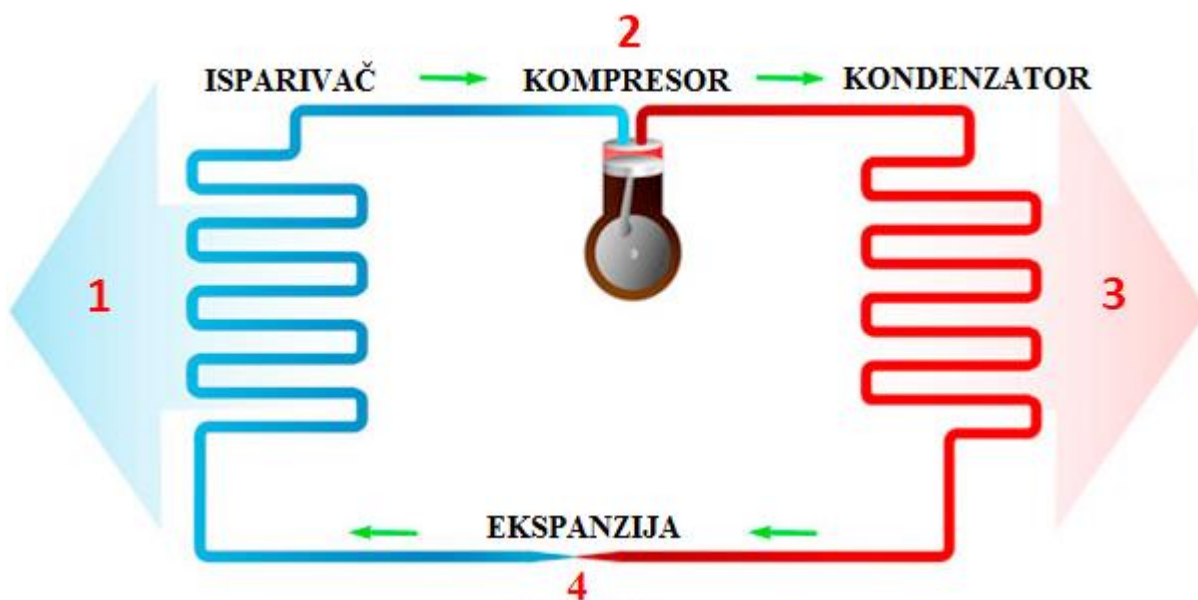
<b>KRATICA</b>	<b>ZNAČENJE</b>
COP	Toplinski množitelj (engl. <i>Coefficient of performance</i> )
SWHP	Dizalice topline s morskom vodom (engl. <i>Seawater heat pump</i> )

## 1. UVOD

S brzim razvojem društvene ekonomije, onečišćenje okoliša i energetske krize postale su sve ozbiljnije, snažno utječući i prijeteći normalnom životu ljudi. Mnoge ljudske aktivnosti temelje se na izgaranju fosilnih goriva i većina zemalja ovisi o fosilnim gorivima (nafta, plin i ugljen) da bi zadovoljile potrošnju za energijom. Potrošnja za energijom globalno raste te se time pojačava trend porasta emisija CO<sub>2</sub>. Stoga globalno zatopljenje postaje sve veći prioritet svjetske politike i energetska tranzicija predstavlja okosnicu borbe protiv klimatskih promjena. Europska unija ima za cilj razviti održiv, konkurentan, siguran i dekarboniziran energetska sustav do 2050. u skladu s Direktivom 2012/27/EU. Glavni ciljevi Europske unije su smanjenje emisija stakleničkih plinova, povećanje korištenja obnovljivih izvora energije te poboljšanje energetske učinkovitosti. Za postizanje održivog razvoja, obnovljivi izvori energije postali su primarni energetska izbor. Grijanje i hlađenje u sektoru zgradarstva i industrije čine polovicu potrošnje energije u EU-u. Prema podacima Eurostata za 2020. godinu, 77% grijanja i hlađenja još uvijek se proizvodi iz fosilnih goriva, dok se samo 23% proizvodi iz obnovljivih izvora energije. Iz toga proizlazi da su u Europi, kao i u gotovo svim drugim dijelovima svijeta, uporabom obnovljivih izvora energije može dati važan doprinos održivom, sigurnijem, pouzdanijem i stabilnijem energetska gospodarstvu. Jedno od rješenja koje bi moglo biti posebno primjenjivo na Hrvatsku zbog duge obale, odnosi se na sustave dizalica topline s morskom vodom (engl. *Seawater heat pump, SWHP*). To su sustavi koji iskorištavaju toplinska energija mora u svrhu grijanja i hlađenja. Morska voda zahvaća se direktno uz pomoć cijevi položenih u more ili proizvodnjom iz zdenca na obali. U slučaju sustava dizalice topline s zdencima, za učinkovit rad cjelokupnog sustava SWHP potrebno je poznavati hidrogeološka svojstva mikrolokacije kako bi se pravilno dizajnirao sustav.

## 2. DIZALICE TOPLINE

Dizalice topline pripadaju sustavima koji iskorištavaju obnovljivu energiju u svrhu grijanja, hlađenja i pripreme potrošne tople vode u sektoru zgradarstva i industrijskih procesa. Osnovni princip rada ovakvih sustava je da preuzimaju toplinsku energiju s jednog mjesta (izvor topline) te ga predaju ponoru topline na drugom mjestu tj. dizalica topline „pumpa“ toplinsku energiju iz spremnika niske temperature u visokotemperaturni spremnik uz pomoć rada kompresora. Uz termin dizalice topline mogu još naći izrazi toplinska pumpa ili toplinska crpka. Dizalice topline primjenjuju se u svim razmjerima, od malih sustava za grijanje manjih zgrada pa sve do sustava koji služe za grijanje i hlađenje gradskih naselja. Prijenos toplinskog toka suprotan je termodinamičkom toplinskom toku od više na nižu temperaturu, stoga je za rad sustava dizalice topline odnosno kompresora potrebno uložiti električnu energiju. Shema sustava dizalice topline prikazan je na slici 2-1.



**Slika 2-1.** Shema sustava dizalice topline (Ünlü, 2019)

Glavni dijelovi dizalice topline su isparivač, kompresor, kondenzator i prigušni elementi te radna tvar čija je uloga prijenos toplinske energije kroz sustav. Za vrijeme kružnog procesa radna tvar mijenja agregatna i toplinska stanja kako bi omogućila izmjenu toplinske energije s

toplinskim izvorom i toplinskim ponorom. Četiri su različite promjene stanje radne tvari kružnog procesa: isparavanje (1), kompresija (2), kondenzacija (3) i ekspanzija (4). Proces započinje kompresijom radne tvari koja je u plinovitom stanju niske temperature i niskog tlaka. U kompresoru se uz pomoć uložene električne energije radnoj tvar podiže tlak i temperatura. Zatim visokotlačni i visokotemperaturni fluid odlazi u kondenzator gdje predaje toplinu okolini uz promjenu agregatnog stanja iz plinovitog u tekuće. Visokotlačna tekućina zatim prolazi kroz ekspanzijski ventil, koji snižava tlak i temperaturu fluida. Radna tvar na kraju ulazi u isparivač gdje preuzima toplinsku energiju od izvora topline uz promjenu faze iz tekuće u plinovitu i proces ponovno počinje.

Učinkovitost dizalice topline ili toplinski množitelj (engl. *Coefficient of performance – COP*) definiran je kao odnos ukupne topline koju sustav dizalice topline isporučuje i količine električne energije potrebne za pogon kompresora. Jednadžba za izračun COP-a pojedinog sustava dizalice topline u režimu grijanja je sljedeća (Banks, 2012):

$$COP_H = \frac{H}{E} \quad (2-1)$$

gdje su:

$H$ - ukupna toplinska snaga sustava, (kW),

$E$ - uložena snaga za rad kompresora, (kW).

Veća vrijednost toplinskog množitelja rezultira većom učinkovitošću sustava, manju potrošnju energije, a time i niže operativne troškove. Na primjer, ako dizalica topline koristi 1 kW električne energije za prijenos 3 kW toplinske energije, COP bi bio 3. Veličina  $H$  predstavlja ukupnu toplinsku energiju s kojom sustav dizalice topline raspolaže. Sastoji se od toplinske energije dobivene iz protoka vode ( $G$ ) i toplinske energije dobivene radom kompresora dizalice topline ( $E$ ). Količina toplinske energije dobivena proizvodnjom podzemne vode računa se prema sljedećem izrazu:

$$G = Q * \rho * \Delta T * C_p \quad (2-2)$$

gdje su:

$G$ - pridobiva toplinska energija iz vode, (kW),

$Q$  – protok vode, (l/s),

$\rho_w$  – gustoća vode, (kg/l),

$\Delta T$  – pad temperature vode prolaskom kroz isparivač, (K),

$C_p$ - specifični kapacitet vode, (4187 J/kg/K).

Stoga, ukupna toplinska energija sustava dizalice topline koja se koristi u režimu grijanja dana je sljedećim izrazom:

$$H = G + \frac{H}{COP_H} = \frac{Q \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot C_p}{1 - \frac{1}{COP_H}} \quad (2-3)$$

U režimu hlađenja  $COP_C$  je definiran sljedećim izrazom:

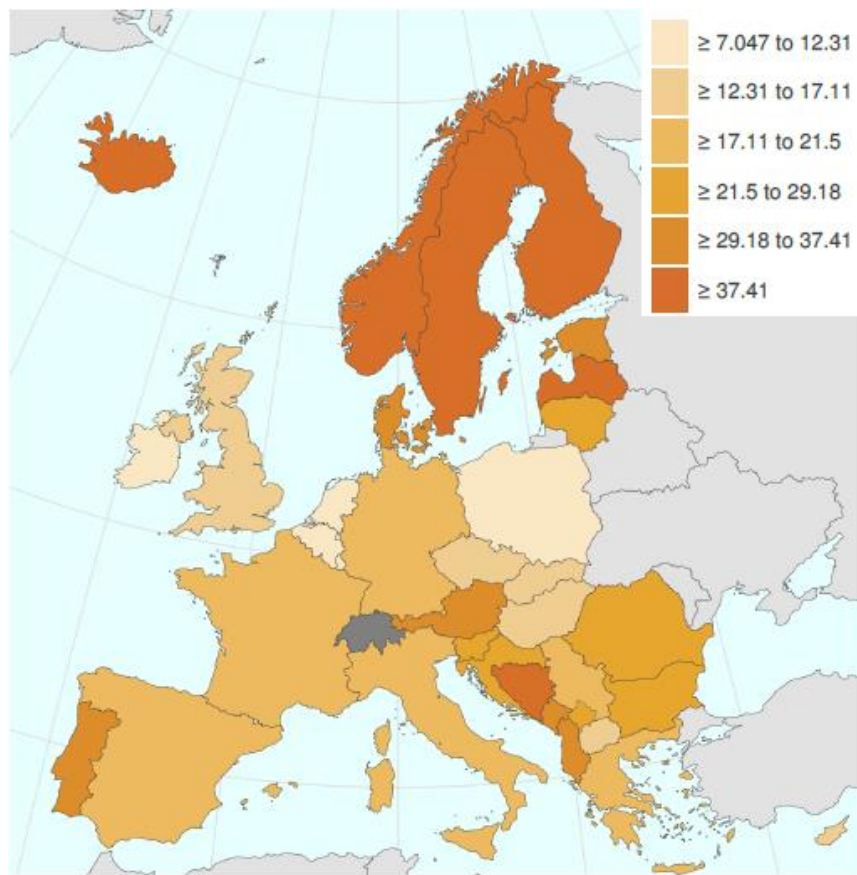
$$COP_C = \frac{C}{E} \quad (2-4)$$

gdje  $C$  predstavlja učinak hlađenja (kW), odnosno količinu topline uklonjenu iz prostora zgrade i predanu podzemnoj vodi, a  $E$  ukupna snaga za rad kompresora (kW). S obzirom da se radom kompresora stvara toplinska energija i nju je potrebno pohraniti uz toplinsku energiju iz objekta. Stoga je u slučaju hlađenja iz objekta moguće pohraniti manje toplinske energije nego što dizalica topline može predati objektu u režimu grijanja kada je toplinska energija nastala radom kompresora korisna. Izraz za ukupni učinak hlađenja glasi (Banks, 2012):

$$C = \frac{Q \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot C_p}{1 + \frac{1}{COP_C}} \quad (2-5)$$

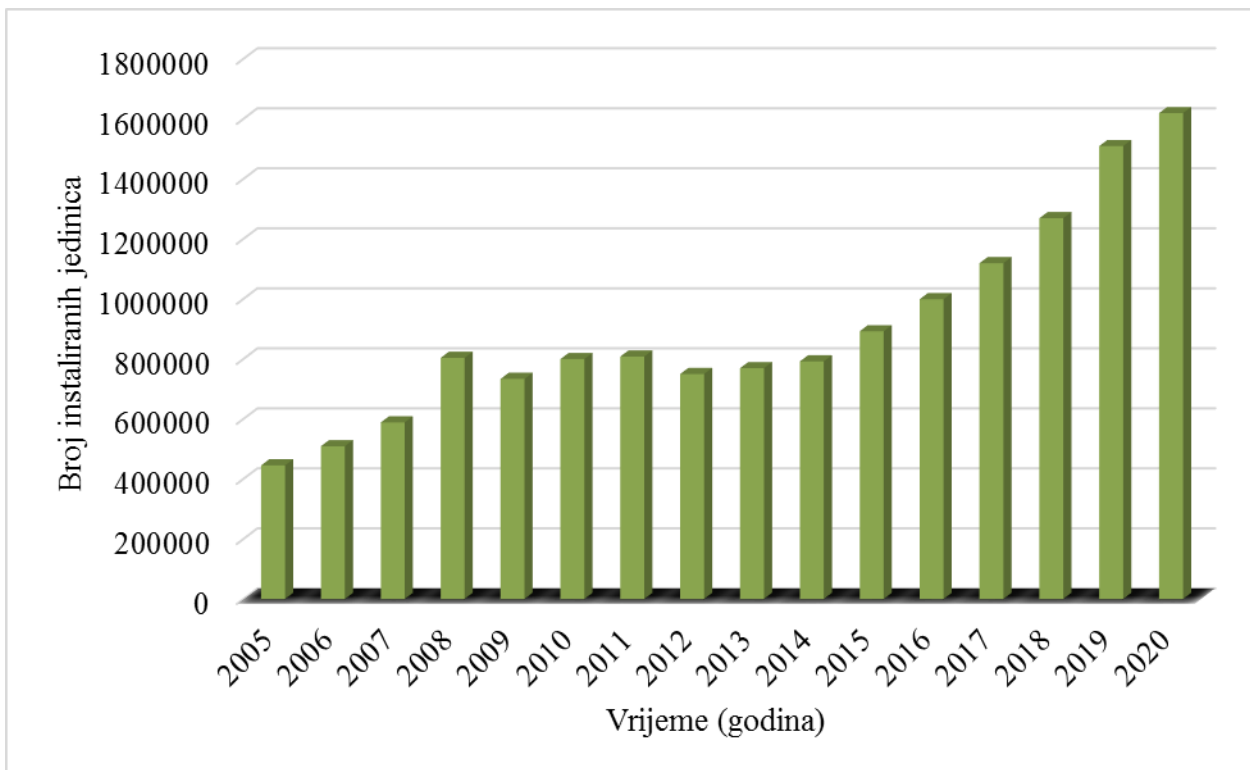
## 2.1. Pregled stanja korištenja dizalica topline u Europi

Udio obnovljivih izvora energije u bruto finalnoj potrošnji energije u Europi je u stalnom porastu te je iznosio 22,2% u 2020., u usporedbi s 9,6% u 2004. godini (prema podacima Eurostat, 2021). Najviše prednjače nordijske zemlje, što se vidi na slici 2-2.



**Slika 2-2.** Postotni udio obnovljivih izvora energije u krajnjoj potrošnji u Europi (Eurostat, 2021)

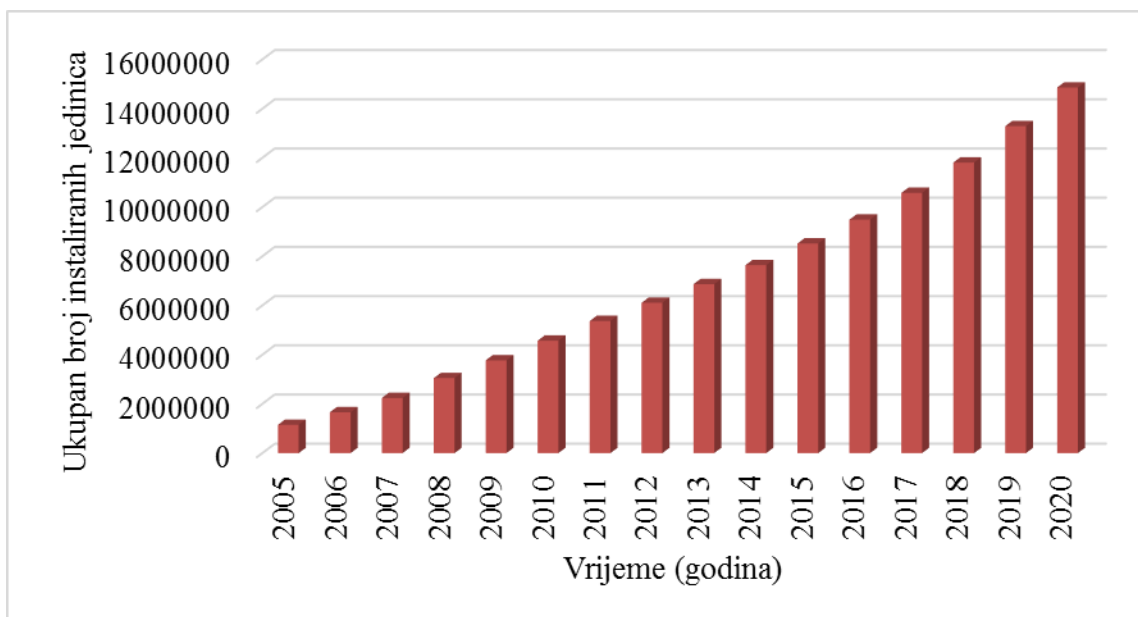
U zadnjem desetljeću zabilježen je stalni rast broja instaliranih sustava dizalica topline u Europi. Europsko udruženje za dizalice topline (EHPA, 2021.) navodi godišnji porast od 7 % u 2020. godini. Na slici 2-3. uočava se trend porasta broja ugrađenih sustava dizalica topline posljednjih nekoliko godina te je u 2020. godini instalirano rekordnih 1,62 milijuna jedinica diljem Europe.



**Slika 2-3.** Broj novoinstaliranih jedinica dizalica topline u jednoj godini (EHPA, 2021)

Uz pretpostavku očekivanog životnog vijeka od cca. 20 godina, trenutni sveukupni broj europskih dizalica topline iznosi oko 14,86 milijuna jedinica što je vidljivo iz podataka prikazanih na slici 2-4. Stavljajući to u perspektivu postojećih između 115 i 130 milijuna stambenih zgrada u Europi, tržišni udio sustava dizalica topline u fondu zgrada iznosi oko 12%.(EHPA, 2021.)





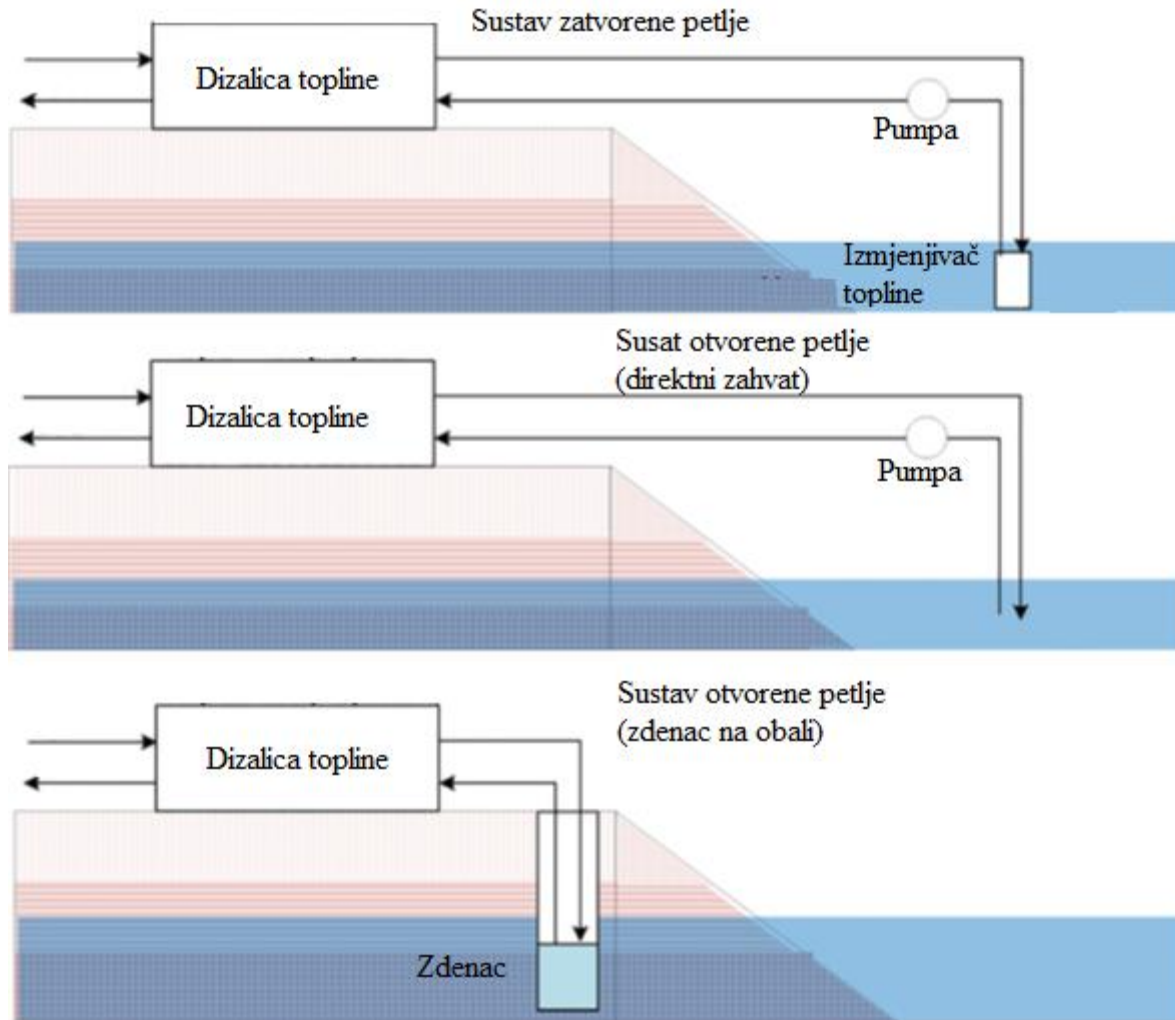
**Slika 2-4.** Sveukupan broj instaliranih jedinica dizalica topline (EHPA, 2021)

Ukupno gledano, od 1996. godine instalirano je gotovo 14,86 milijuna jedinica dizalica topline. To iznosi instalirani toplinski kapacitet od 128,7 GW. Sve ugrađene dizalice topline proizvode 252,6 TWh korisne energije, od čega je 160,2 TWh obnovljive energije. Njihovom uporabom uštedeno je 204,8 TWh konačne i 93,11 TWh primarne energije. Također, doprinijele su uštedi emisija stakleničkih plinova od 41,07 Mt (EHPA, 2021).

### **3. DIZALICE TOPLINE S MORSKOM VODOM KAO IZVOR TOPLINE (SWHP)**

Dizalica topline s morskom vodom (SWHP) je sustav u kojem se iskorištava potencijal energije mora kao izvora i ponora topline. Ovaj sustav radi na istom principu kao i prethodno opisani sustav dizalice topline. U režimu grijanja dizalica topline (SWHP) koristi toplinsku energiju morske vode za grijanja ili pripremu potrošne tople vode, dok ljeti SWHP koristi morsku vodu kao spremnik topline iz prostora zgrade. Sustavi dizalice topline koje upotrebljavaju morsku vodu kao izvor toplinske energije su instalirani u mnogim zemljama diljem svijeta, posebno u nordijskim zemljama gdje su takve instalacije u velikim razmjerima s kapacitetom od nekoliko stotina kilovata ili čak megavata.

Prema izvedbi sustava dizalice topline na morsku vodu razlikuju se otvoreni i zatvoreni sustavi. Zatvorena izvedba se sastoji od cijevne petlje položene u morsku vodu. Cijev u ovom sustavu ima ulogu direktnog izmjenjivača topline između morske vode i radne tvari unutar cijevi (polietilen glikol). Otvoreni sustav direktno crpi morsku vodu i dijeli se na dva tipa ovisno o zahvatu morske vode (slika 3-1.): direktni zahvat morske vode i zahvat morske vode proizvodnim zdencem.



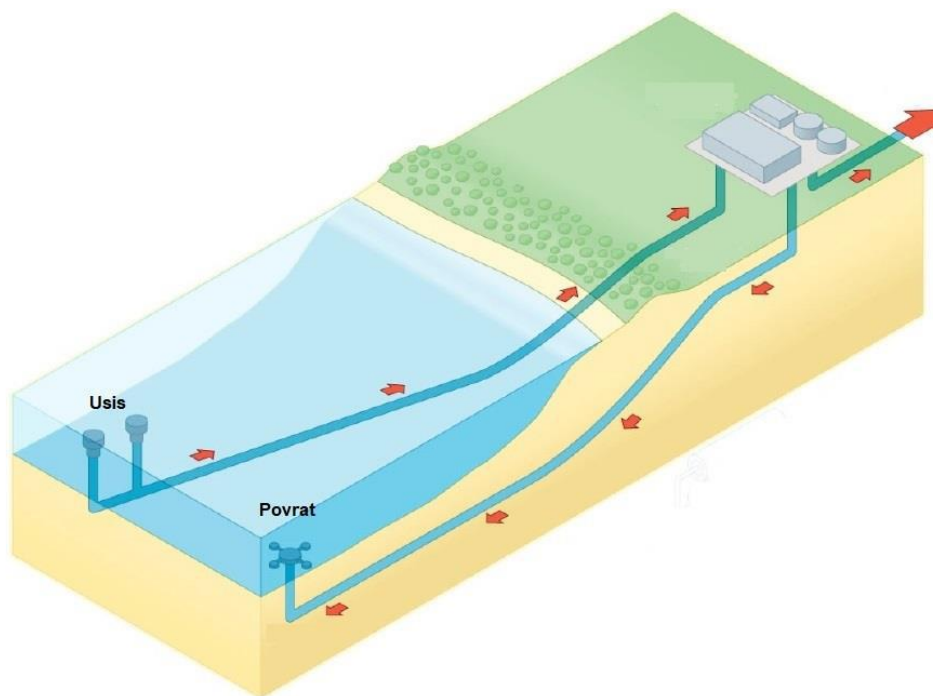
**Slika 3-1.** Načini zahvata morske vode (Su et al., 2020)

Primarna svrha sustava za unos morske vode je osigurati pouzdan izvor morske vode u odgovarajućoj količini te odgovarajuće kvalitete i temperature kako bi se osigurao zadovoljavajući rad sustava dizalice topline.

### 3.1. Direktni zahvat morske vode

Sustav direktnog zahvata morske vode nalazi se na određenoj udaljenosti od obale gdje se iz dubine mora crpi morska voda do dizalice topline kroz cjevovod spojen na pumpnu stanicu na kopnu. Glavne komponente sustava su usisni otvor, cjevovodi koji vode morsku vodu do

izmjenjivača na obali, crpka i difuzor koji miješa iskorištenu vodu s morskom vodom pri povratku. Za odabir točne lokacije zahvata morske vode treba uzet u obzir kretanje morskih struja (plima i oseka) i promet morskih plovila (Mitchell i Spitler, 2013) .

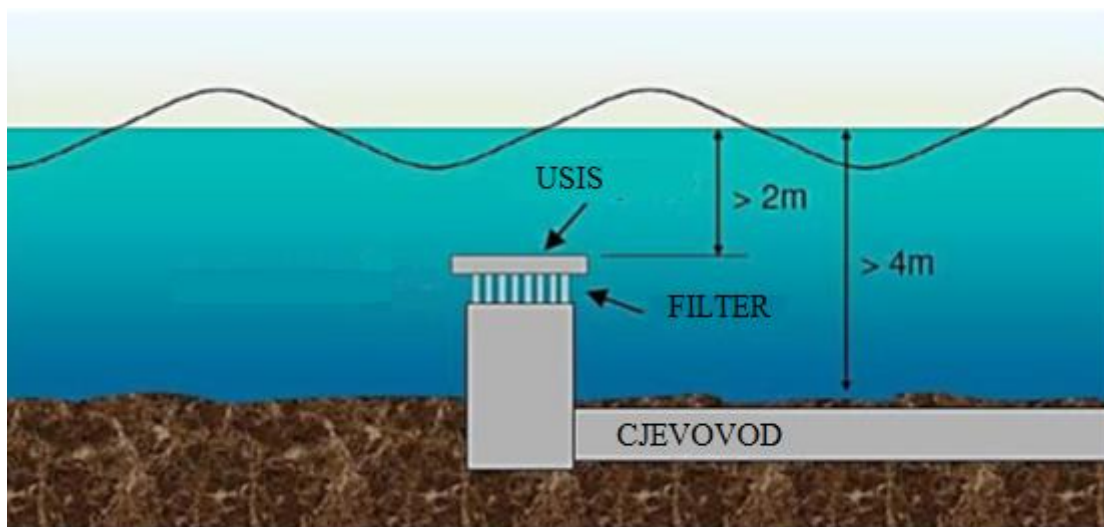


**Slika 3-2.** Skica sustava direktnog zahvata morske vode (WateReuse Association, 2011)

Pošto se radi o morskoj vodi vrlo je bitno da je sva oprema koja je u dodiru sa slanom vodom napravljena od materijala otpornog na koroziju (nehrđajući čelik ili titan) ili ima neki drugi oblik zaštite od korozije. Preporučuje se korištenje polietilenskih cijevi visoke gustoće za cjevovode zbog svoje fleksibilnosti, izdržljivosti, visoke toplinske i korozivne otpornosti (Harinath i Mohan, 2016)

Važno je definirati potrebnu zaštitu (filter) od ulaska nečistoća u sustav, posebno u slučaju izravnog unosa morske vode. Usis treba postaviti nekoliko metara ispod površine mora gdje su površinski utjecaji na temperaturu vode manji, također usis vode ne smije biti postavljen ni previše blizu morskog dna kako bi se izbjeglo povlačenje pijeska, mikroorganizama i drugih stvari koji mogu naštetiti djelotvornosti sustava (slika 3-3.). Brzina usisa morske vode ne smije

biti prevelika ( $<0,15\text{m/s}$ ) kako ne bi došlo do povlačenja riba ili drugih morskih organizama (Mitchell i Spitler, 2013).



**Slika 3-3.** Prikaz podvodnog usisa morske vode (Shokrgozar, 2018)

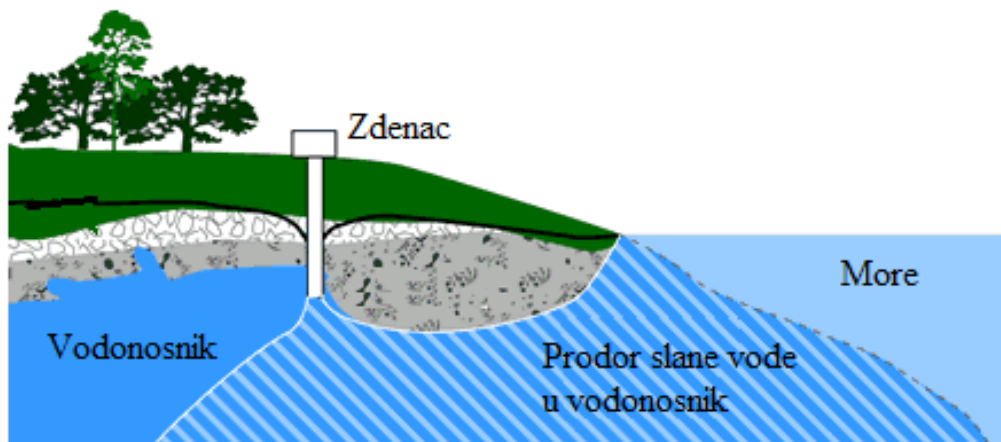
Kako bi se uopće mogao ugraditi ovaj sustav u more i koristiti morsku vodu u energetske svrhe potrebno je imati dozvolu za korištenje pomorskog dobra. Prema zakonu o pomorskom dobru, koncesiju izdaje lokalna, županijska ili državna vlast za posebnu upotrebu pomorskog dobra definiranjem veličine morske površine u metrima kvadratnim na određeni period trajanja, ovisno o važnosti projekta (Zakon o pomorskom dobru i morskim lukama, NN 158/2003, 2003).

### 3.2 Zahvat morske vode zdencima

Potpovršinski zahvati su oni u kojima se voda proizvodi iz vodonosnika pomoću zdenca na obali (slika 3-4.). Podzemna voda koju proizvodimo na ovaj način može bit morska voda, slatka voda ili mješavina slane i slatke vode, tj. bočata voda. Pogodnost lokacije utvrđuje se bušenjem ispitnih bušotina (pieziometar) i provođenjem detaljnog hidrogeološkog istraživanja radi utvrđivanja hidrogeoloških karakteristika vodonosnika.

Zdenac je bušotina koja se sastoji od zaštitnih cijevi, filter kolone i šljunčanog zasipa te se oprema potopnom pumpom od nehrđajućeg čelika, za proizvodnju vode. Promjer i dubina

bušotine ovise o karakteristikama vodonosnika i potrebnom protoku vode za učinkovit rad dizalice topline.



**Slika 3-4.** Shema potpovršinskog zahvata morske vode pomoću zdenca (WaterReuse Association, 2011)

Morska voda prikupljena podzemnim zahvatima prirodno se prethodno obrađuje sporom filtracijom kroz geološku strukturu. Kao takva, proizvedena voda obično sadrži niske razine krutih tvari, ulja, prirodnih organskih zagađivača i vodenih organizama. Voda proizvedena na ovakav način često je nižeg saliniteta od morske vode, što smanjuje mogućnost nastanka i razvoja korozije (Missimer et al., 2015).

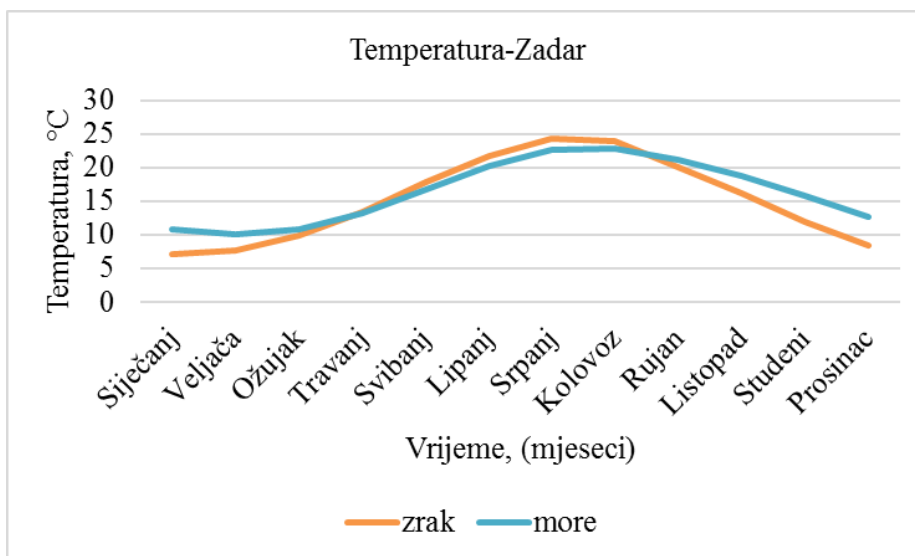
U istraživačkom radu Xin et al. (2018), uspoređen je sustav direktnog zahvata morske vode sa sustavom dizalice topline koji crpi vodu iz zdenca na obali. Prosječna temperatura tijekom zime za direktni zahvat morske vode iznosila je 5,83 °C, a 12,85 °C za vodu iz zdenca. Toplinski množitelj u prosjeku je iznosio 2,9 za direktni sustav, odnosno 4,6 za indirektni sustav. Studija je pokazala da je sustav dizalice topline s zdencom pouzdaniji, stabilniji i energetski učinkovitiji u odnosu na direktnu metodu zahvata morske vode. Morska voda crpljena iz podzemlja zasigurno će doživjeti neke sezonske temperaturne varijacije, ali one će biti daleko manje izražene nego što bi to bio slučaj izravnim unosom iz mora. U kasnijem dijelu rada bit će detaljnije obrađen primjer sustava dizalice topline koji koristi zdenac za proizvodnju podzemne vode.

Što se tiče zakona i propisa u Republici Hrvatskoj prema Zakonu o vodama, morska voda proizvedena iz zdenca na obali se zakonski smatra podzemnom vodom te bi samim time ulazila pod regulativu Hrvatskih voda i za njeno crpljenje se plaća naknada od 0,1 HRK/m<sup>3</sup> zahvaćene vode (Zakon o vodama, NN 153/2009).

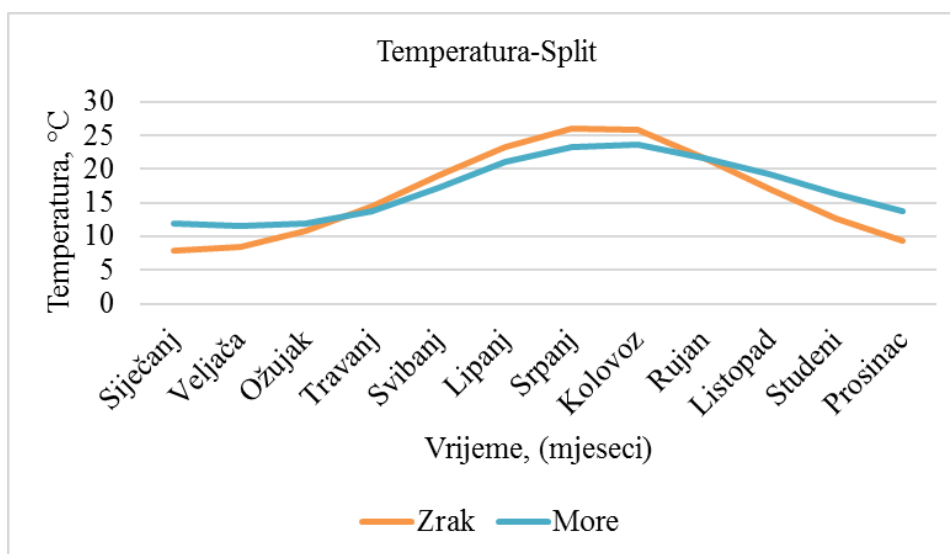
### 3.3. Potencijal sustava dizalice topline na morsku vodu na području hrvatske obale

Temperatura morske vode jedan je od najvažnijih parametara za korištenje ovog sustava dizalice topline. Ako temperatura morske vode nije konstantna tijekom cijele godine, a pogotovo ako je ljeti more pretoplo, a zimi prehladno, sustav dizalice topline neće biti efikasan. Stoga, važno je proučiti temperature morske vode na različitim lokacijama kako bi se utvrdila ekonomska isplativost ugradnje dizalice topline na morsku vodu. Temperature izvora topline određuju koeficijent učinkovitosti (COP). Zbog toga bi u slučaju sličnih temperatura zraka i morske vode, koeficijenti učinkovitosti dizalice topline koja koristi zrak i dizalice topline koja koristi morsku vodu bili slični, što znači da bi zračne dizalice topline bile bolja ekonomska opcija jer nema troškova vezanih za sustav zahvata morske vode.

Temperature hrvatskog dijela Jadranskog mora značajno ovise o temperaturama zraka, tijekom ljetnog razdoblja dolazi do zagrijavanja Jadrana, dok se zimi hladi. Površinska temperatura mora najniža je u veljači i ožujku, a najviša u kolovozu. Na sljedećim slikama prikazane su prosječne mjesečne temperature mora i zraka za grad Zadar (slika 3-5.) i Split (slika 3-6.)



**Slika 3-5.** Temperatura mora i zraka tijekom godine u Zadru (prema podacima DHMZ-a, 2021)



**Slika 3-6.** Temperatura mora i zraka tijekom godine u Splitu (prema podacima DHMZ-a, 2021)

Na grafovima se primjećuje sniženje temperature mora tijekom zimskog perioda na 10 do 13 °C ovisno o lokaciji, dok se ljeti površinska temperatura kreće između 22 i 25 °C. Temperatura mora u odnosu na temperaturu zraka je veća zimi i manja ljeti što daje veliku prednost sustavu dizalice topline s morskom vodom u usporedbi sa sustavom koji koristi zrak kao izvor topline.



Za učinkovit rad sustava bitna je stabilnost temperature izvora topline, a temperatura morske vode je relativno stabilna, pogotovo ako je zahvat morske vode na većoj dubini ili iz zdenca na obali.

Zgrade s najvećim potencijalom implementacije sustava dizalice topline s morskom vodom su hoteli koji su općenito vrlo blizu mora i imaju velike potrebe za hlađenjem i grijanjem. Mogu se uzeti u obzir i stambene zgrade i zgrade javne namjene to jest povijesne zgrade koje su najčešće dio starih gradskih jezgri koje se nalaze u neposrednoj blizini mora. Takve zgrade su uglavnom stare i potrebno ih je obnoviti. Kako većina gradova na hrvatskoj obali nema sustave centralnog grijanja, veliki broj hotela i zgrada javnih namjena koriste lož ulje za grijanje. Stoga, na hrvatskoj obali postoji veliki potencijal za ugradnju SWHP sustava.

#### 3.4. Primjeri primjene sustava dizalice topline s morskom vodom u svijetu i u RH

Implementacija sustava dizalice topline na morsku vodu započela je 1970-ih i 1980-ih godina diljem svijeta. Zemlje sjeverne Europe su u samom vrhu po broju instaliranih sustava. Najveće svjetsko SWHP postrojenje nalazi se u Švedskoj s ukupnim kapacitetom sustava od 180 MW, te se koristi za sustav daljinskog grijanja i hlađenja cijele jedne gradske četvrti u Stockholmu (slika 3-7.). U režimu grijanja iskorištava toplinu mora i na +2 °C koja se zahvaća na dubini od 15 metara. Učinak grijanja je 256 MW te pokriva 60 % potreba za toplinskom energijom grada. Temperatura vode u daljinskom sustavu grijanja je oko 80°C. Sustav se koristi i za daljinsko hlađenje (Heat, 2014).



**Slika 3-7.** Sustav dizalice topline u gradu Stockholmu (Heat, 2014)

Grad Drammen u Norveškoj od 2011. koristi morsku vodu za opskrbu gradskog grijanja. Tri velike dizalice topline ukupne snage 13,5 MW izvlače toplinu iz obližnjeg fjorda, čija je morska voda tijekom cijele godine na dubini od 18 metara oko osam stupnjeva. Dizalice topline mogu isporučiti temperaturu do 90 °C. Dizalice topline godišnje daju 67 GWh grijanja, pokrivajući potrebe oko 6000 domova i trenutno 63 % gradskih potreba za daljinskim grijanjem (Ayub, 2016).

Hoteli, stambene zgrade i zgrade javne namjene u Hrvatskoj počeli su implementirati dizalice topline za grijanje i za hlađenje, no uglavnom su ugrađene zračne dizalice topline, iako ima par primjera sustava dizalice topline s morskom vodom. Jedan od primjera sustava dizalice topline s morskom vodom nalazi se u Poreču u sklopu hotela Parentium. Sustav je pušten u rad 2014. godine i koštao je 15 milijuna kuna. Godišnje se proizvede 383 MWh energetske snage za hlađenje i 340 MWh toplinske energije koja se koristi za grijanje prostora hotela, potrošne tople vode i bazena. Zahvat morske vode izveden je kao sustav zdenaca na obali (2 proizvodna i 4 utisna) dubine 40 metara gdje je kapacitet protoka 280 m<sup>3</sup>/h i temperatura bočate vode 12-15°C. Sezonski faktor učinkovitost sustava je preko 5,0 (SCOP) te ostvari uštede od 150 000 kn na godišnjoj razini (Coastenergy Project, 2020).

Sustav SWHP instaliran je 2008. godine u stambenoj zgradi prostora 520 kvadratnih metara u Splitu (slika 3-8.). Toplinska energija mora koristiti se za hlađenje, grijanje i pripremu tople vode. Morska voda, prosječne temperature 13 °C, zahvaća se obalnim zdencima (proizvodni i utisni). Projekt je izrazito učinkovit (COP=5.5) zahvaljujući izvrsnim kvalitetama niskoenergetske zgrade. Sustav je u potpunosti automatiziran (Seadrion Project, 2018).



**Slika 3-8.** Sustav dizalice topline ugrađen u stambenu zgradu u Splitu (Seadrion Project, 2018a).

Još jedan primjer implementacije sustava dizalice topline nalazi se u Kneževom dvoru u Dubrovniku (slika 3-9.). To je kulturno zaštićena građevina iz 14. stoljeća koja uključuje muzej, gradsku vijećnicu, kazalište i kino. Uvrštena je na UNESCO-v popis svjetske baštine i na njemu nije dopuštena moderna rekonstrukcija. Radovi su financirani iz projekta SEADRION te je ukupna cijena investicije oko 3 milijuna kuna. Ugrađeno je šest toplinskih pumpi ukupne snage 430kW za iskorištavanje toplinske energije morske vode i omogućavanje grijanja i hlađenja. Cilj projekta je ugradnja sustava dizalice topline i promicanje korištenja morske vode kao obnovljivog izvora energije (Seadrion Project, 2018).

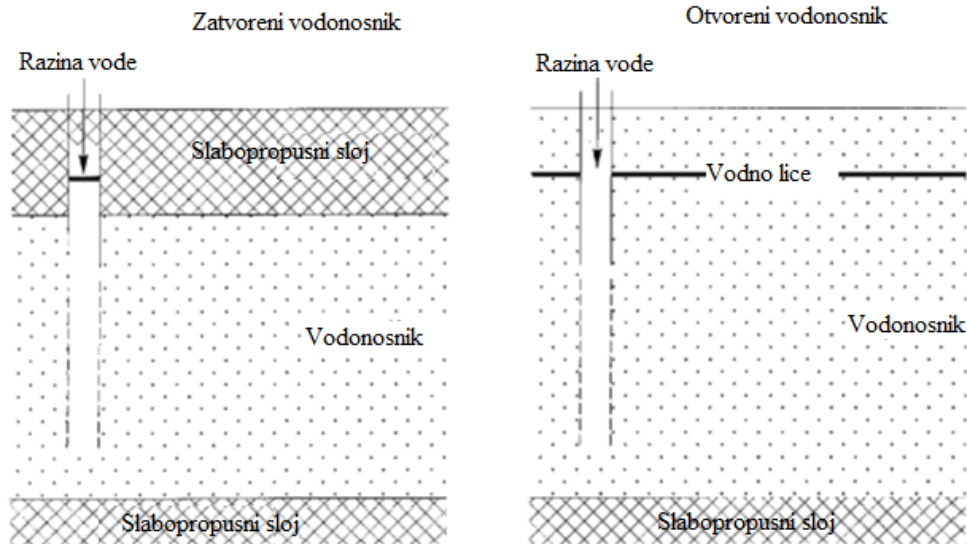


**Slika 3-9.** Sustav dizalice topline u Dubrovniku (Seadrion Project, 2018b)

#### 4. HIDROGEOLOŠKA SVOJSTVA VODONOSNIKA

Za projektiranje sustava dizalice topline koje koriste podzemnu vodu kao izvor toplinske energije potrebno je imati detaljno saznanja o lokalnom hidrogeološkom području. Veoma važna stavka pri dizajniranju dizalice topline je vodonosnik iz kojeg će se voda eksploatirati uz pomoć potopne pumpe implementirane u eksploatacijski zdenac. Sustav dizalice topline za svoj optimalni rad zahtjeva dostatnu opskrbu vodom određene temperature i kvalitete. Stoga prije ugradnje sustava potrebno je provesti hidrogeološka istraživanja s ciljem određivanja hidrogeoloških parametara vodonosnika.

Vodonosnik ili akvifer je zasićeno ležište, formacija ili više formacija koje sadrže vodu u ekonomski prihvatljivim količinama (Driscoll, 1995). Da bi geološka formacija bila vodonosnik mora sadržavati pore ili šupljine koji su ispunjeni vodom. Te šupljine moraju biti dovoljno velike da omoguće protjecanje vode prema zdencu. Veličina i ukupni broj pora u formaciji znatno se razlikuju ovisno o vrsti čestica od kojih su izgrađene stijene te geološkoj i kemijskoj povijesti nastanka stijene. Vodonosnik je obično ograničen s nepropusnim i slabopropusnim slojevima. Nepropusni slojevi (engl. *aquiclude*) ne propuštaju značajnu količinu vode, te imaju ulogu donje ili gornje granice vodonosnika (Slika 4-1.). Mogu imati sposobnost sporog upijanja (apsorbiranja vode). Slabopropusni slojevi (engl. *aquitards*) su oni iz kojih se voda ne može proizvoditi u ekonomskim isplativim količinama, ali imaju sposobnost procjeđivanja (Slika 4-1.). U stvarnosti, iz svih je formacija moguće proizvesti određenu količinu vode.



**Slika 4-1.** Shema otvorenog i zatvorenog vodonosnika (Delleur, 2006)

Vodonosnici se svrstavaju u dvije kategorije: otvoreni (engl. *unconfined*) i zatvoreni (engl. *confined*) vodonosnik.

Zatvoreni vodonosnik se definira kao potpuno zasićena propusna formacija koja se pojavljuje između dva nepropusna sloja. U takvim vodonosnicima tlak je obično veći od atmosferskog tlaka i stoga, kada bi se izradio zdenac kroz gornji nepropusni sloj vodonosnika, voda u zdencu bi se uzdigla do određene razine iznad samog vrha vodonosnika. Ova razina vode naziva se piezometrijska ili potencijala razina. Hidrostatski tlak kod zatvorenog vodonosnika ponekad je dovoljan da uzrokuje dovoljan porast razine vode da ona istječe iz zdenca, bez crpke. Takvi zdenci ili bunari se nazivaju arteškim.

Za razliku od zatvorenih vodonosnika, otvoreni vodonosnici su djelomično zasićeni vodom te nemaju gornji nepropusni sloj, već je podzemna voda u izravnom kontaktu s atmosferom kroz otvorene porne prostore tla ili stijene iznad. Ta se razina podzemne vode još naziva i vodno lice. Dubina podzemne vode varira ovisno o čimbenicima kao što su topografija, geologija, godišnja doba i utjecaji plime i oseke, te količine vode koja se crpi iz vodonosnika (Delleur, 1999). Otvoreni vodonosnici općenito se nadopunjuju površinskom vodom koja se infiltrira izravno kroz tlo iznad samog vodonosnika. Temeljno svojstvo vodonosnika je da provodi i skladišti

vodu. Sposobnost vodonosnika da to učini opisuje se kroz nekoliko parametara, kao što su hidraulička vodljivost, transmisivnost i koeficijent skladištenja.

#### 4.1. Koeficijent uskladištenja

Sposobnost geološke formacije da skladišti vodu kvantificira se njenom poroznošću. Poroznost uzorka vodonosnika definirana je kao omjer između njegovog ukupnog volumena pora i ukupnog volumena uzorka.. Poroznost prema tome predstavlja količinu vode koju vodonosnik može sadržavati, ali ne pokazuje koliko će vode vodonosnik proizvesti. Prilikom proizvodnje vode iz zasićenog sloja, oslobodit će se samo dio volumena vode sadržane u porama. Količina vode koju se može uskladištiti, odnosno proizvesti iz vodonosnika naziva se specifični prinos za otvorene vodonosnike, odnosno koeficijent uskladištenja za zatvorene vodonosnike. (Driscoll, 1995)

Specifični prinos (engl. *Specific yield*) se može prikazati kao omjer volumena vode koja se proizvede dreniranjem iz zasićenog poroznog vodonosnika pod utjecajem gravitacije i ukupnog volumena pornog prostora, pri jediničnom sniženju vodnog lica.

$$S = \frac{V_g}{V} \quad (4-1)$$

gdje su: S – specifični prinos

$V_g$ - volumen proizvedene vode, ( $m^3$ ),

$V$ - volumen pornog prostora, ( $m^3$ ).

Specifični prinos primarno ovisi o veličini pora stijene ili tla, a zatim i o količini pora u stijeni. Vrijednosti tipičnih specifičnih prinosa za različite stijene prikazane su u tablici 4-1.

**Tablica 4-1.** Tipične vrijednosti specifičnog prinosa za pojedine vrste stijena (Walton, 1970)

<b>Sedimenti</b>	<b>Specifični prinos %</b>
Glina	1-10
Pijesak	10-30
Šljunak	15-30
Šljunak i pijesak	15-25
Pješčenjak	5-15
Šepl	0,5-5
Vapnenac	0,5-5

Uz specifični prinos veže se i termin specifična retencija. Odnosi se na volumen vode koji ostane u vodonosniku nakon gravitacijskog dreniranja. Zbog molekularnih i kapilarnih privlačnih sila dio vode zadržava se u porama. Suma specifičnog prinosa i specifične retencije jednaka je poroznosti vodonosnika. Što je manja prosječna veličina zrna, to je veći postotak specifične retencije (tablica 4-2.)

**Tablica 4-2.** Podaci o specifičnoj retenciji za neke vrste stijena (Tang et al., 2017)

<b>Sediment</b>	<b>Veličina zrna (mm)</b>	<b>Specifična retencija (%)</b>
Krupni pijesak	2-0,5	1,57
Srednji pijesak	0,5-0,25	1,6
Pijesak	0,25-0,1	2,73
Silt	0,1-0,002	4,75
Glina	<0,002	44,85

Specifični prinos, odnosno koeficijent uskladištenja je znatno manji za zatvorene vodonosnike jer se ne drenira tijekom proizvodnje, već se voda pridobiva prvenstveno kompakcijom

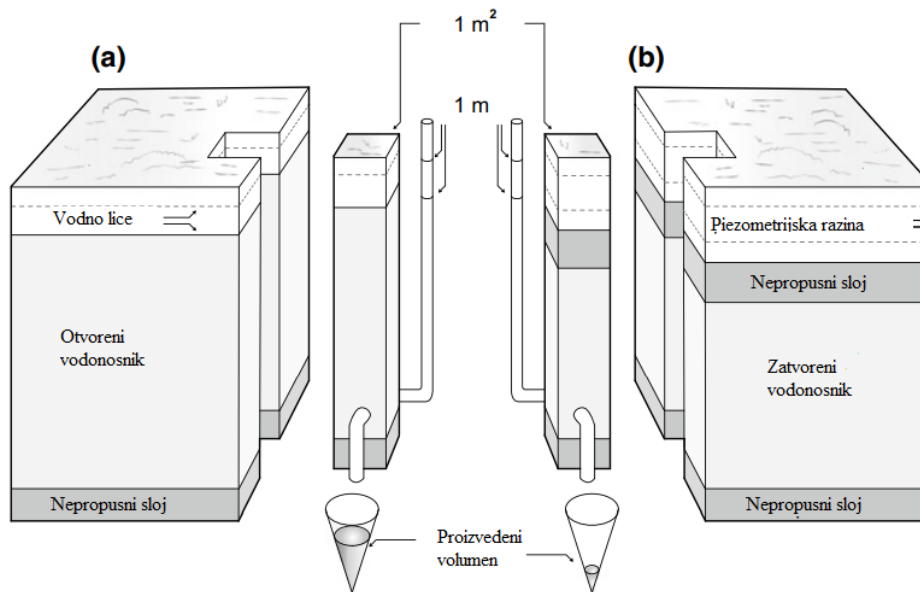
vodonosnika i ekspanzijom vode prilikom proizvodnje. Iako se tijekom proizvodnje tlak smanjuje, vodonosniku se ne smanjuje volumen. Tipični koeficijenti uskladištenja za zatvorene vodonosnike prikazani su u tablici 4-3.

**Tablica 4-3.** Tipične vrijednosti koeficijenta uskladištenja za pojedine vrste stijena (Sethi i Molfetta, 2019)

Tip stijene	Koeficijent skladištenja ( $m^{-1}$ )
Glina	$1.0 \cdot 10^{-3} - 4.9 \cdot 10^{-4}$
Rastresit pijesak	$1.0 \cdot 10^{-3} - 4.9 \cdot 10^{-4}$
Kompaktni pijesak	$2.0 \cdot 10^{-4} - 1.3 \cdot 10^{-4}$
Frakturirana stijena	$6.9 \cdot 10^{-5} - 3.3 \cdot 10^{-6}$
Tvrda stijena	$< 3.3 \cdot 10^{-6}$

Slika 4-2. shematski prikazuje razliku u količini proizvedene vode za jednako smanjenje vodnog lica otvorenog vodonosnika i piezometrijske razine zatvorenog vodonosnika





**Slika 4-2.** Shematski prikaz proizvedene vode za otvoreni (a) i zatvoreni vodonosnik (b) (Sethi i Molfetta, 2019)

#### 4.2. Hidraulička vodljivost

Hidraulička vodljivost,  $K$ , definiše se kao protok vode kroz jediničnu površinu poprečnog presjeka stijene pri jediničnom hidrauličkom gradijentu, pri određenoj temperaturi. Ima fizičku dimenziju brzine, pa se u SI-sustavu mjeri u m/s. Hidraulička vodljivost poznata je i kao koeficijent propusnosti te se može dovesti u vezu s intrizičnom propusnosti preko sljedeće jednačbe:

$$K = \frac{\rho g k}{\mu} \quad (4-2)$$

Gdje su:

$K$ - hidraulička vodljivost, m/s,

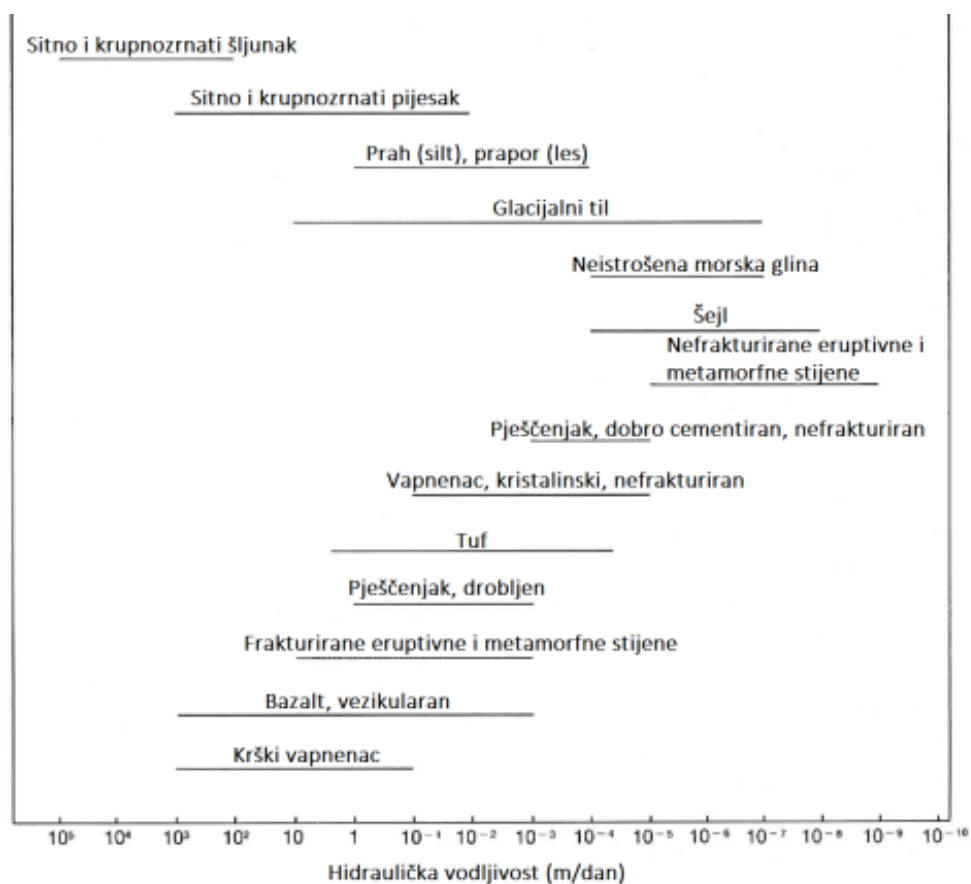
$\mu$  - dinamička viskoznost, Pa s,

$\rho$  – gustoća fluida, kg/m<sup>3</sup>,

$g$  – ubrzanje sile teže,  $m/s^2$ ,

$k$  -propusnost,  $m^2$ .

Nekoliko faktora utječe na vrijednost hidrauličke vodljivosti: poroznost, raspodjela veličine čestica, oblik i raspored čestica, gustoća vode, temperatura i viskoznost. Općenito, porozne stijene koje sadrže krupna, jednolična i glatka zrna imaju veliku vrijednost hidrauličke vodljivosti. Također što je zasićenje vodom veće, to je veća hidraulička vodljivost. Viša temperatura rezultira manjim koeficijentom viskoznosti, odnosno većom hidrauličkom vodljivošću (odnos hidrauličke vodljivosti i viskoznosti vode je obrnuto proporcionalan) (Tang et al., 2017). Raspon hidrauličke vodljivosti se kreće obično u granicama od 0,5 do 200 m/dan (Driscoll, 1986). Na Slici 4-3 prikazane su vrijednosti hidrauličkih vodljivosti za tipične vodonosnike.



**Slika 4-3.** Prikaz raspona vrijednosti hidrauličke vodljivosti za pojedine stijene (Driscoll, 1986)

### 4.3. Transmisivnost

Iako je hidraulička vodljivost važan parametar za definiranje kapaciteta protoka vode, sama hidraulička vodljivost nije dovoljna za definiranje produktivnosti vodonosnika. Jasno je da, s obzirom na istu hidrauličku vodljivost, vodonosnik debljine 100 m može dati mnogo veći protok od one debljine 10 m. Stoga je potrebno uvesti svojstvo koje uzima u obzir i hidrauličku vodljivost i debljinu vodonosnika. Ova vrijednost je transmisivnost,  $T$ , i definira se kao količina vode koja protječe kroz poprečni presjek jedinične širine i debljine ( $b$ ) uz jedinični hidraulički gradijent, odnosno produkt hidrauličke vodljivosti i debljine zasićenog dijela vodonosnika. Ako se hidraulička vodljivost može smatrati konstantnom duž cijele debljine vodonosnika, onda se transmisivnost prikazuje preko sljedeće jednadžbe:

$$T = K * b \quad (4-3)$$

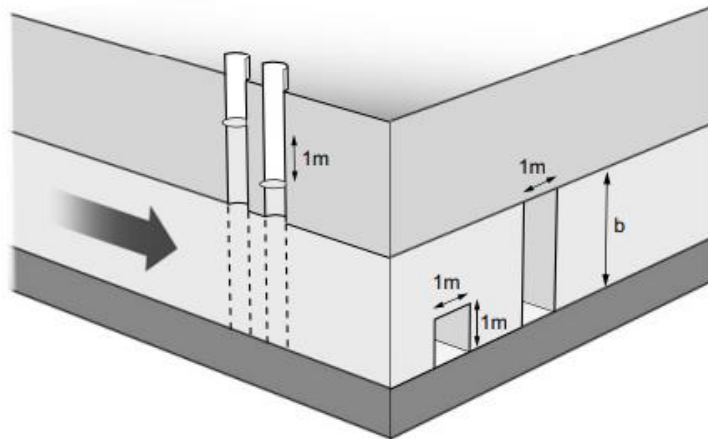
Gdje su:

$T$  – transmisivnost,  $m^2/s$ ,

$K$ - hidraulička vodljivost,  $m/s$ ,

$b$  – debljina vodonosnika,  $m$ .

Vrijednost transmisivnosti vodonosnika obično je između  $10^{-1}$  i  $10^{-5}$   $m^2/s$  (Sethi i Molfetta, 2019). Slika 4-4. naglašava razliku između hidrauličke vodljivosti i transmisivnosti s praktičnog stajališta.



**Slika 4-4.** Shematski prikaz hidrauličke vodljivosti i transmisivnosti (Sethi i Molfetta, 2019)

Transmisivnost i koeficijent uskladištenja definiraju hidrauličke karakteristike vodonosnih formacija. Transmisivnost ukazuje na to koliko će vode proteći kroz formaciju, a koeficijent uskladištenja ukazuje na količinu vode koja se može proizvesti. Određivanjem ova dva koeficijenta mogu se približno odredit (Driscoll, 1986.):

- sniženje razine vode u vodonosniku na različitim udaljenostima od proizvodnog zdenca;
- sniženje razine vode u zdenca u bilo kojem trenutku, nakon početka proizvodnje;
- efikasnost zdenca,
- sniženje razine vode u vodonosniku ovisno o protoku.

Najprecizniji način određivanja navedenih parametara vodonosnika je uz pomoć podataka dobivenih tijekom pokusne proizvodnje.

#### 4.4. Pokusna proizvodnja

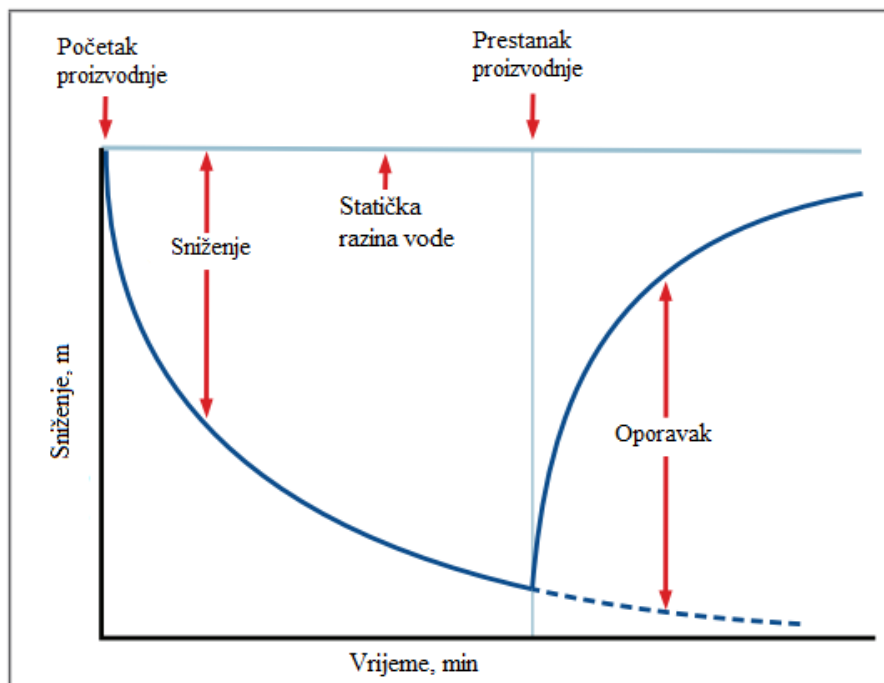
Pokusno crpljenje je terenski test u kojem se iz zdenca proizvodi voda kontroliranim protokom, a pad razine vode, to jest sniženje, se mjeri u jednom ili više okolnih zdenaca ili piezometra i također u samom proizvodnom zdenca. Rezultati mjerenja se zatim koriste za određivanje hidrauličkih parametara vodonosnika, procjenu efikasnosti samog zdenca, definiranje dopuštenog sniženja, itd. Prije izvođenja pokusnog crpljenja na terenu, potrebno je izraditi

temeljiti plan provođenja ispitivanja. Pravilno planiranje uključuje projektiranje ispitivanja, nabavu i pripremu terenske opreme za mjerenje i kontrolu protoka, određivanje mjesta lokacije zbrinjavanja proizvedene vode i trajanje ispitivanja. Testovi crpljenja mogu trajati od nekoliko sati do dana ili čak tjedana, ovisno o svrsi ispitivanja, ali standardni testovi crpljenja obično traju 24 do 72 sata (Delleur, 2006). Uobičajene vrste testova koje se provode u praksi su sljedeće

- Test s konstantnom proizvodnjom (engl. *Constant-rate test*)
- Test s promjenjivom količinom proizvodnje, *step test* (engl. *Step-drawdown tests*)
- Test oporavka (engl. *Recovery test*)

### **Test konstante proizvodnje**

Tijekom trajanja testa s konstantnom proizvodnjom, bilježi se ostvareno sniženje u zdencu i piezometru u određenim vremenskim intervalima. Nakon što je pokusna proizvodnja završila, slijedi test oporavka u kojem se mjeri povrat razine vode u zdencu i piezometru u određenim vremenskim intervalima. Ta mjerenja mogu poslužiti kao kontrolni podaci. Podaci se zatim ucrtavaju u dijagram vrijeme-sniženje ili sniženje-udaljenost preko kojih se određuju transmisivnost i koeficijent uskladištenja. Pomoću dobivenih podataka moguće je predvidjeti performanse vodonosnika za različite količine protoka vode. Na slici 4-5. prikazan je karakterističan graf za test konstantne proizvodnje.



**Slika 4-5.** Prikaz mjerenja sniženja pri konstantnoj proizvodnji i povrata razine ([https://wwwguide\\_to\\_conducting\\_pumping\\_tests](https://wwwguide_to_conducting_pumping_tests), 2021)

Jedna od široko primijenjenih metoda određivanja parametara vodonosnika je Theisova metoda tipskih krivulja, koja se temelji na jednadžbi za proizvodnju vode kod neustaljenog protoka.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (4-4)$$

Gdje su:

s - sniženje, m,

Q - protok, m<sup>3</sup>/dan,

T - transmisivnost vodonosnika, m<sup>2</sup> /dan,

W(u) - eksponencijalni integral ili funkcija zdenca.

Varijabla u je definirana sljedećim izrazom:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (4-5)$$

Gdje su :

$r$  – udaljenost zdenca od točke mjerenja, m,

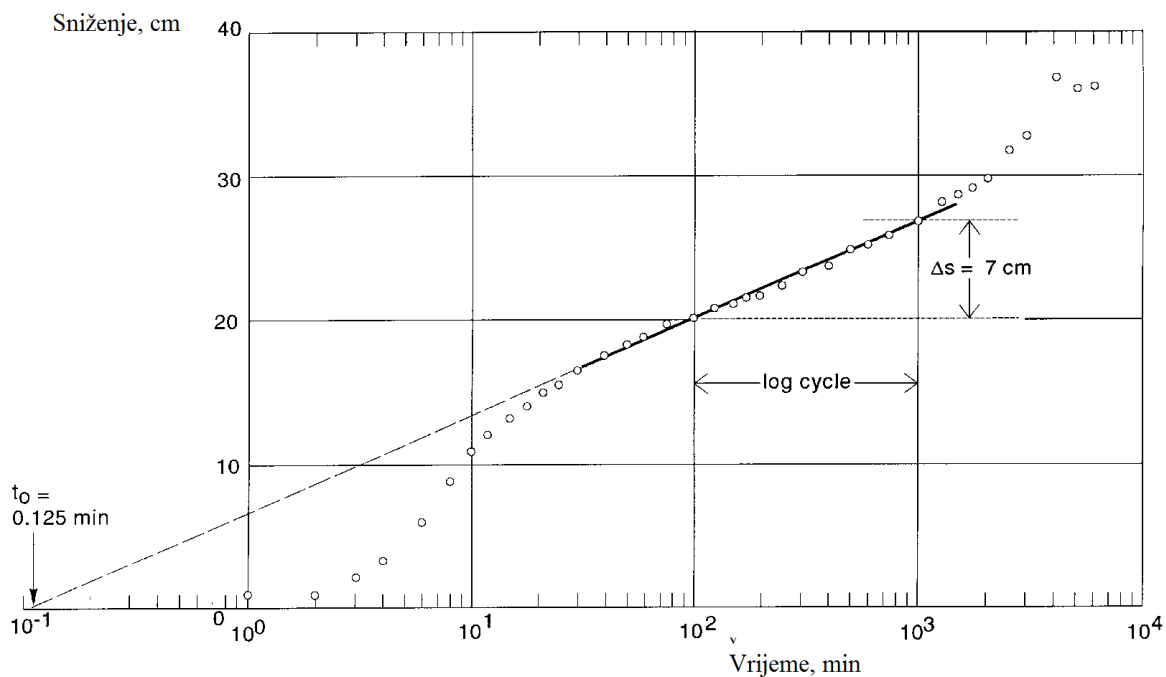
$S$  – koeficijent skladištenja, (bezdimenzionalan),

$T$  - transmisivnost vodonosnika,  $m^2$  /dan,

$t$  – vrijeme trajanja proizvodnje, dan.

Rezultati sniženja dobiveni testom proizvodnje se ucrtavaju na logaritamski dijagram te se ucrtana krivulja pokušava što bolje poklopiti s tipskom krivuljom funkcije zdenca  $W(u)$ . Na temelju koordinata podudaranja dobije se vrijednost eksponencijalnog integrala  $W(u)$  te se uz pomoć Theisove jednadžbe izračuna vrijednost transmisivnosti, odnosno koeficijenta skladištenja.

Češće korištena metoda za proračun parametara vodonosnika je Cooper-Jacob metoda (Cooper i Jacob, 1946). To je modificirana Theisova metoda koja vrijedi u slučaju male vrijednosti varijable  $u$ . U tom se slučaju eksponencijalna funkcija  $W(u)$  može zamijeniti jednostavnijim logaritamskim izrazom. Varijabla  $u$  ovisi proporcionalno o udaljenosti zdenca od točke mjerenja i obrnuto proporcionalno vremenu trajanja proizvodnje. Ovim načinom se jednostavnije dođe do vrijednosti parametara transmisivnosti i koeficijenta skladištenja, jer ne treba koristiti postupak podudaranja tipskih krivulja. Rezultati proizvodnje ucrtavaju se na polulogaritamski dijagram i aproksimiraju se pravcem (slika 4-6.).



**Slika 4-6.** Polulogaritamski dijagram sniženja u ovisnosti o vremenu. (Delleru, 1999)

Pomoću nagiba pravca i podataka o proizvodnji koeficijent transmisivnosti računa se preko sljedećeg izraza:

$$T = \frac{2,3 Q}{4 \pi \Delta s} \quad (4-6)$$

Gdje su :

T – transmisivnost, (m<sup>2</sup>/dan),

Q – količina protok, (m<sup>3</sup>/dan),

Δs – razlika sniženja za jedan logaritamski ciklus, (m).

Također uz pomoć dijagrama pravca vrijeme-sniženje može se dobit i koeficijent uskladištenja. Potrebno je odrediti presjecište pravca, odnosno odrediti vrijeme t<sub>0</sub> u kojem je sniženje jednako nuli. Koeficijent uskladištenja računamo prema sljedećem izrazu:



$$S = \frac{2,25 T t_0}{r^2} \quad (4-7)$$

Gdje su:

S - koeficijent uskladištenja, (-),

T – transmisivnost, (m<sup>2</sup> /dan),

t<sub>0</sub> - presjecište pravca i apscise kada je sniženje jednako nuli, (dani),

r - udaljenost od proizvodnog zdenca do piezometra gdje se očitava sniženje, m.

Također, mjerenja zabilježena tijekom testa oporavka mogu se koristiti za određivanje hidrauličkih parametara vodonosnika, odnosno da potvrde rezultate dobivene analizom testa konstante proizvodnje. Podaci testiranja se unesu na polulogaritamski dijagram vremena i sniženja te se očit razlika sniženja za jedan logaritamski ciklus. Izraz za transmisivnost tada glasi:

$$T = \frac{2,3Q}{4\pi\Delta s'} \quad (4-8)$$

Gdje su:

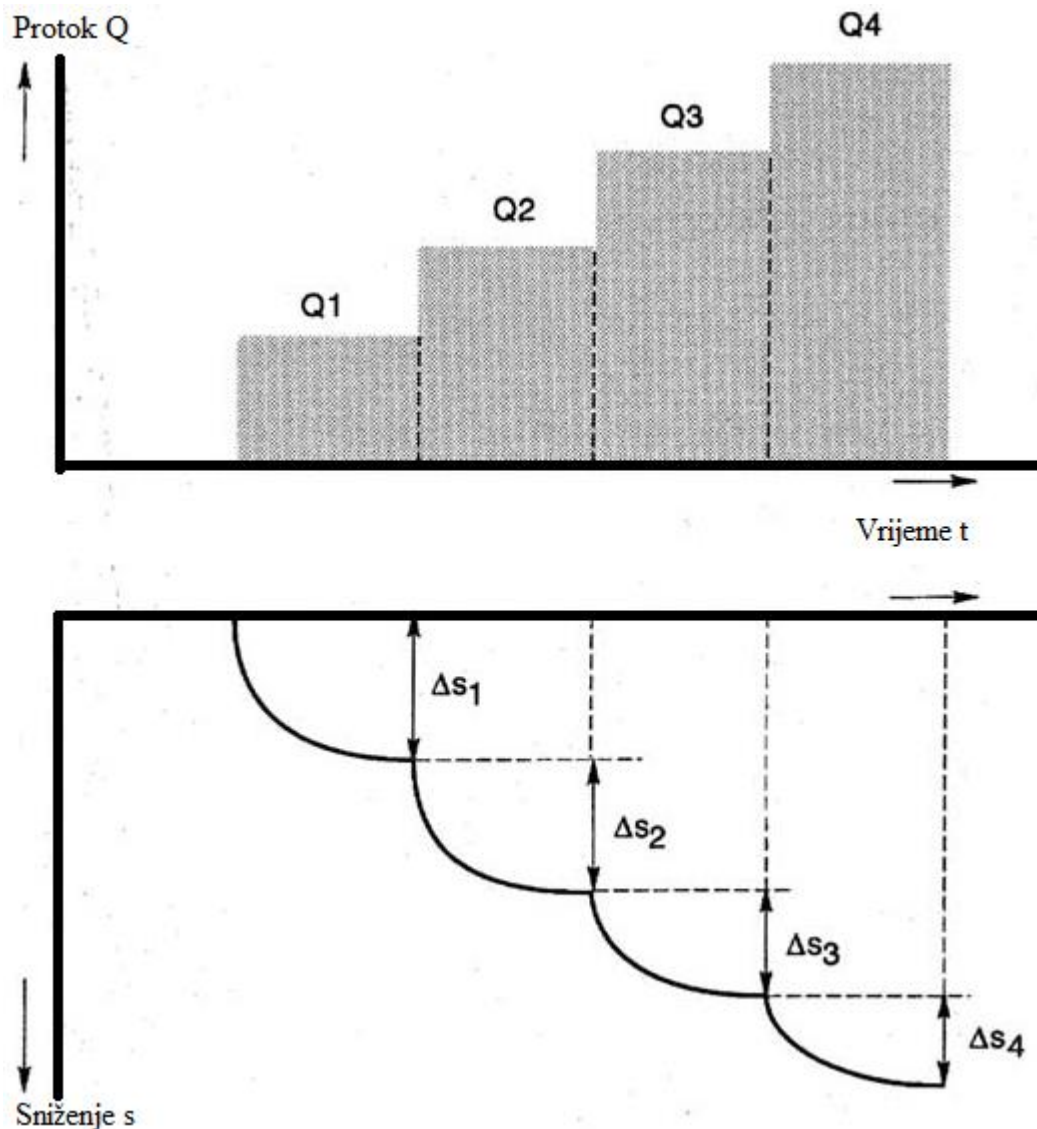
T – transmisivnost, (m<sup>2</sup> /dan),

Q – količina protoka, (m<sup>3</sup> /dan),

Δs' – razlika zaostalog sniženja za jedan logaritamski ciklus (m).

### ***Step test***

*Step test*, kao i prethodna dva testa može se koristiti za određivanje hidrauličkih parametara vodonosnika, ali se puno češće koristi za definiranje efikasnosti zdenca. Test se provodi u nekoliko koraka ispitivanjem jednog zdenca u kojem se proizvodi voda pri konstantnom protoku sve dok se sniženje unutar zdenca ne stabilizira. Protok crpljenja se zatim poveća i zdenac se crpi dok se sniženje još jednom ne stabilizira (slika 4-7.). Taj se proces ponavlja kroz najmanje tri koraka, koji bi svi trebali biti otprilike jednakog trajanja (Delleur, 2006).



**Slika 4-7.** Dijagram step testa (Delleur, 2006)

Step test je razvio Jacob (1947) kako bi proučio utjecaj protoka  $Q$  na sniženje  $s$  u proizvodnom zdencu izbušenom u vodonosniku. Te je predložio sljedeći izraz za sniženje u zdencu:

$$s = BQ + CQ^2 \quad (4-9)$$

gdje je  $BQ$  laminarna komponenta koji uzima u obzir linearne gubitke vodonosnika, dok je  $CQ^2$  turbulentna komponenta i predstavlja nelinearne gubitke u samom zdencu, koji se uglavnom mogu pripisati konstrukcijskim karakteristikama zdenca (Driscoll, 1986). U praksi se pokazalo da ovaj izraz nije uvijek točan, jer  $BQ$  komponenta može uključivati i sniženje u

zdenca, a isto tako  $CQ^2$  komponenta može uključivati gubitke u vodonosniku. Zbog toga proračun efikasnosti dobiven rezultatima mjerenja *step testom* sadrži pogrešku.

Parametri B i C lako se određuju grafičkom metodom. Dijeljenjem navedene jednadžbe zdenca (4-9) s protokom  $Q$  dobiva se linearna jednadžba čije je grafičko rješenje pravac  $s/Q = B + CQ$ . Izraz  $s/Q$  se naziva specifično sniženje. Nagib pravca predstavlja parametar  $C$ , a  $B$  je presjecište pravca s ordinatom.

Step testom se određuje specifični kapacitet zdenca  $Q/s$  za različite količine protoka. Ovaj parametar govori koliko vode zdenac daje po jednom metru sniženja te je koristan za određivanje optimalne proizvodnje. Preuređenjem jednadžbe (4-9) dobije se izraz koji pokazuje pad specifičnog kapaciteta zdenca porastom proizvodnje, uz prisutnost turbulentnog toka.

$$\frac{Q}{s} = \frac{1}{CQ+B} \quad (4-10)$$

Parametar koji se također može proračunati iz step testa je omjer sniženja u vodonosniku (laminarna komponenta) i ukupnog sniženja:

$$L_p = \frac{BQ}{BQ+CQ^2} \quad (4-11)$$

$L_p$  predstavlja postotak ukupnog sniženja kojem je uzrok laminarni protok. Ovaj izraz se često pogrešno koristi za izračunavanje učinkovitosti zdenca. Stvarna učinkovitost zdenca se određuje kao omjer realnog i teoretskog specifičnog kapaciteta.

## **5. IZVEDBA ZDENACA ZA SUSTAV DIZALICE TOPLINE BOLNICE DR. MARTIN HORVAT, ROVINJ – STUDIJA SLUČAJA**

U svrhu korištenja sustava grijanja i hlađenja za specijalnu bolnicu za ortopediju i rehabilitaciju "Martin Horvat" u Rovinju planira se ugraditi sustav dizalice topline na morsku vodu. Zahvat morske vode, u ovom slučaju boćate vode, izveden je kao sustav zdenaca na obali. Za potrebe korištenja vode za rad dizalica topline izbušena su četiri istražno-eksploatacijska zdenca. Zdenci se nalaze u krugu same bolnice te su dva predviđena za proizvodnju podzemne vode, a druga dva za njeno utiskivanje. Nakon izrade i opremanja izbušenih zdenaca provedena je pokusna proizvodnja kako bi se odredili parametri vodonosnog sloja i efikasnost zdenca.

### **5.1. Opis lokacije**

Bolnica se nalazi u gradu Rovinju, na zapadnoj obali Istre. Spada među starije ortopedsko rehabilitacijske ustanove, a izgrađena je 1888. godine u doba Austro-ugarske monarhije i još se od tada koristi u zdravstvene svrhe. Geografski je smještena na poluotoku Muccia te je gotovo sa svih strana okružena morem. Katastarski broj čestice je 2495/1, u potpunom vlasništvu Istarske županije. Površina čestice iznosi 162039 m<sup>2</sup> (slika 5-1.).



**Slika 5-1.** Prikaz katastarske čestice bolnice u Rovinju (<https://www.katastar.hr>, 2021)

## 5.2. Geološka građa šireg područja

Istarski poluotok smješten je u dinarskom krškom području karakteristične geomorfološke građe pretežno sastavljeno od karbonatnih stijena (slika 5-2.). Za ovaj tip stijene je karakteristična velika propusnost, što rezultira ograničenim količinama površinskih voda, ali s druge strane u krškom podzemlju dolazi do stvaranja značajnih vodonosnika. Zapadni i jugozapadni dio istarskog poluotoka poznata je pod nazivom crvena Istra zbog boje tla bogatog mineralima željeza (hematit i getit). Prema osnovnoj geološkoj karti, područje grada Rovinja spada u kategoriju karbonatnih stijena. Litološku građu uglavnom čine naslaga gornjo-jurskih dolomita ( $J_3^2$  ili  $J_3^3$ ) i slojeviti vapnenci kredne starosti ( $K_1^{1-2}$ ) s vodonosnicima dobre propusnosti. Vapnenačka stijenska podloga ima pukotinsko-kaveronozni tip poroznosti te relativno veliku upojnost i vodopropusnost. Propusnost varira zavisno o intenzitetu tektonske oštećenosti i karstifikaciji. Prirodni pokrivač (crvenica) ima pretežno glinoviti sastav i međuzrnski tip poroznosti te je mala upojnost i vodopropusnost. Za područje same

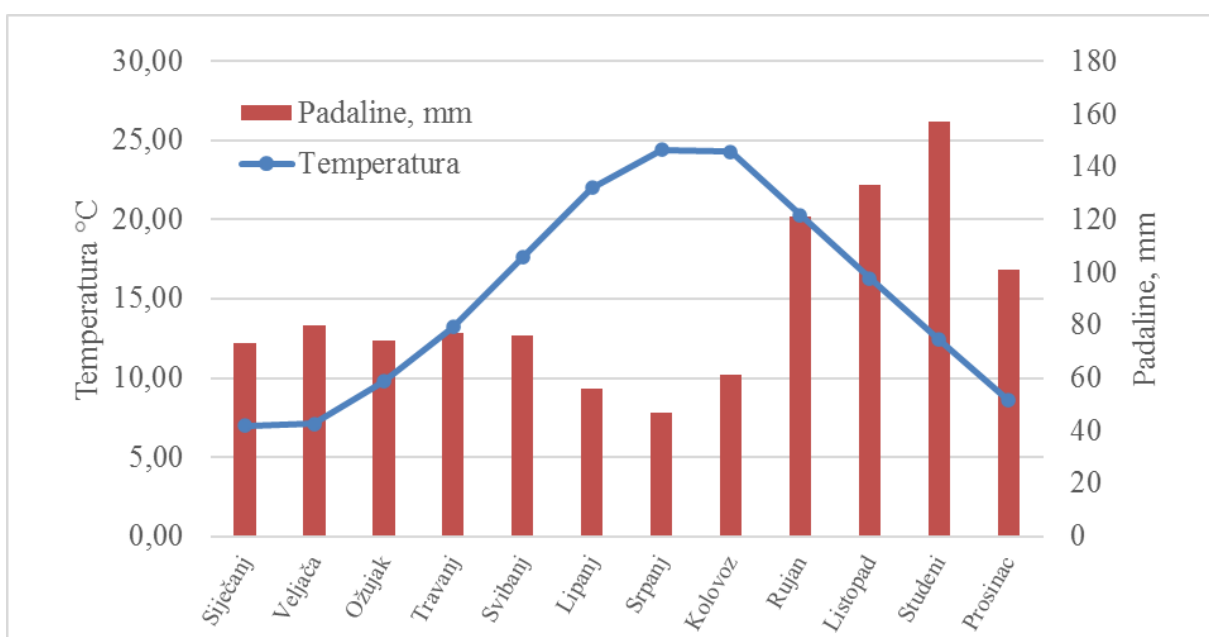
mikrolokacije karakteristične su dvije vrste naslaga koje se međusobno izmjenjuju u vertikalnom smjeru. To su Lim vapnenci i Muča vapnenci (naziv dobio po poluotoku na kojem se nalazi bolnica). Lim naslage su pretežito debelo uslojene (30–80 cm). Svijetlo-žute su boje i jednolike strukturne građe. Muča vapnenci su definirani kao ooidno-bioklastični vapnenci i uglavnom se javljaju unutar Lim jedinice kao leće debljine desetak metara. S obzirom na strukturu stijene, Muča vapnenci su izrazito raznovrsnog sastava sedimentnog materijala. Oba tipa stijene karakterizira visoka poroznost (Sošić et al., 2017).



Slika 5-2. Geološka karta Istre (Sošić et al., 2017)

### 5.3. Klimatske značajke

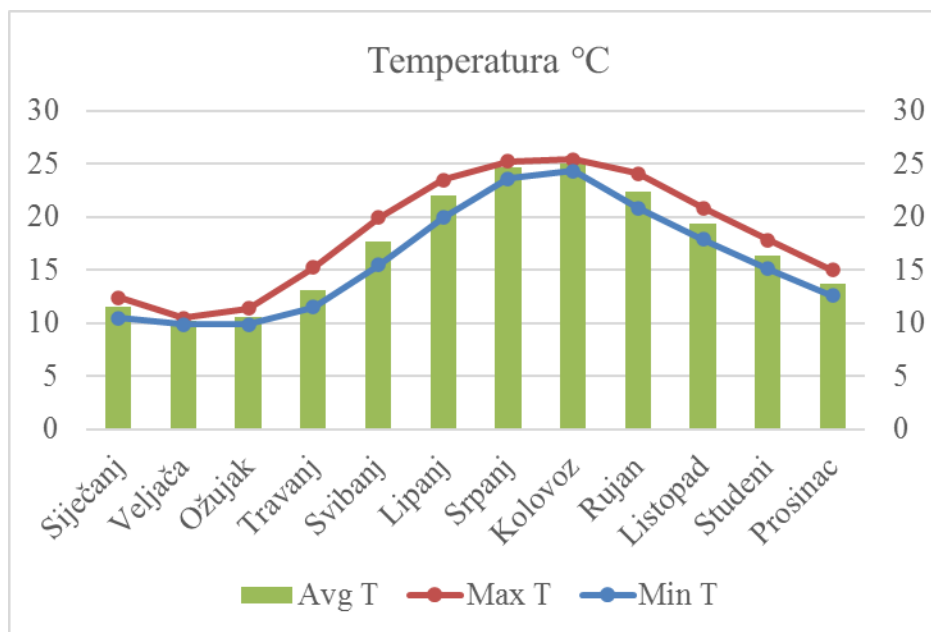
Za područje Grada Rovinja karakteristična je sredozemna klima, to jest umjereno topla vlažna klima s toplim ljetom. Na slici 5-3. prikazane su prosječne vrijednosti temperature i padalina po mjesecima za područje grada Rovinja. Srednja temperatura na godišnjoj razini iznosi 15,6 °C, a godišnja količina padalina 1056 mm. U mjesecu srpnju zabilježeno je najmanje padalina (47 mm), dok je studeni mjesec s najviše padalina (157 mm). Najtopliji mjesec u godini je srpanj s prosječnom temperaturom zraka od 24,4 °C. Siječanj je najhladniji mjesec s prosječnom temperaturom od 7 °C.



**Slika 5-3.** Dijagram temperature zraka i padalina grada Rovinja (<https://en.climate-data.org>, 2021)

Prosječna godišnja temperatura mora kod grada Rovinja iznosi 17,20 °C. U kolovozu je more najtoplije s prosječnom mjesečnom temperaturom od 25 °C. Dok je u veljači najhladnije more s temperaturom od 10,2 °C. Na slici 5-4. su prikazane prosječne mjesečne temperature mora za cijelu godinu te najniža i najveća zabilježena temperatura mora po mjesecima. Zbog blizine mora i vrlo dobre podzemne komunikacije s morem, temperatura mora će tijekom godine utjecati na temperaturu vode koja se crpi iz zdenaca.





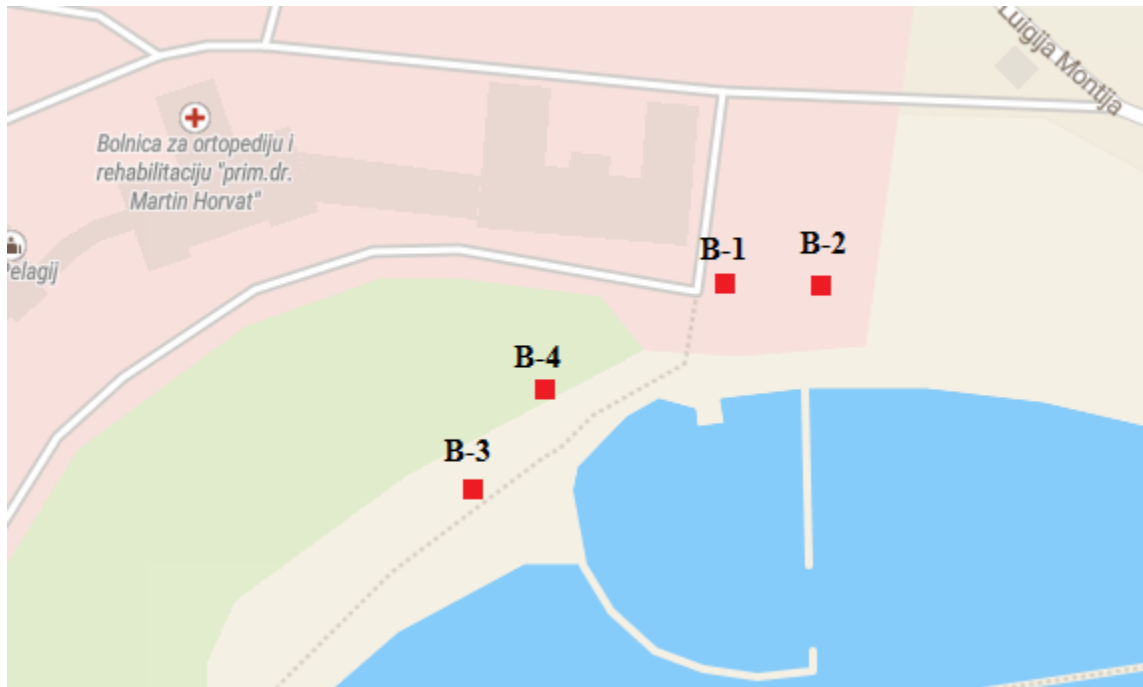
**Slika 5-4.** Dijagram temperature mora kod Rovinja (<https://en.climate-data.org>, 2021)

#### 5.4. Konstrukcija eksploatacijskih zdenaca

U sklopu vodoistražnih i vodozahvatnih radova na terenu su izbušena dva eksploatacijska zdenca (B-3, B-4) i dva upojna zdenca (B-1, B-2) odnosno četiri istražne bušotine. Na slici 5-6. prikazan je raspored lokacija sva četiri zdenca u odnosu na zgradu bolnice, a u tablici 5-1. prikazane su geografske koordinate zdenaca.

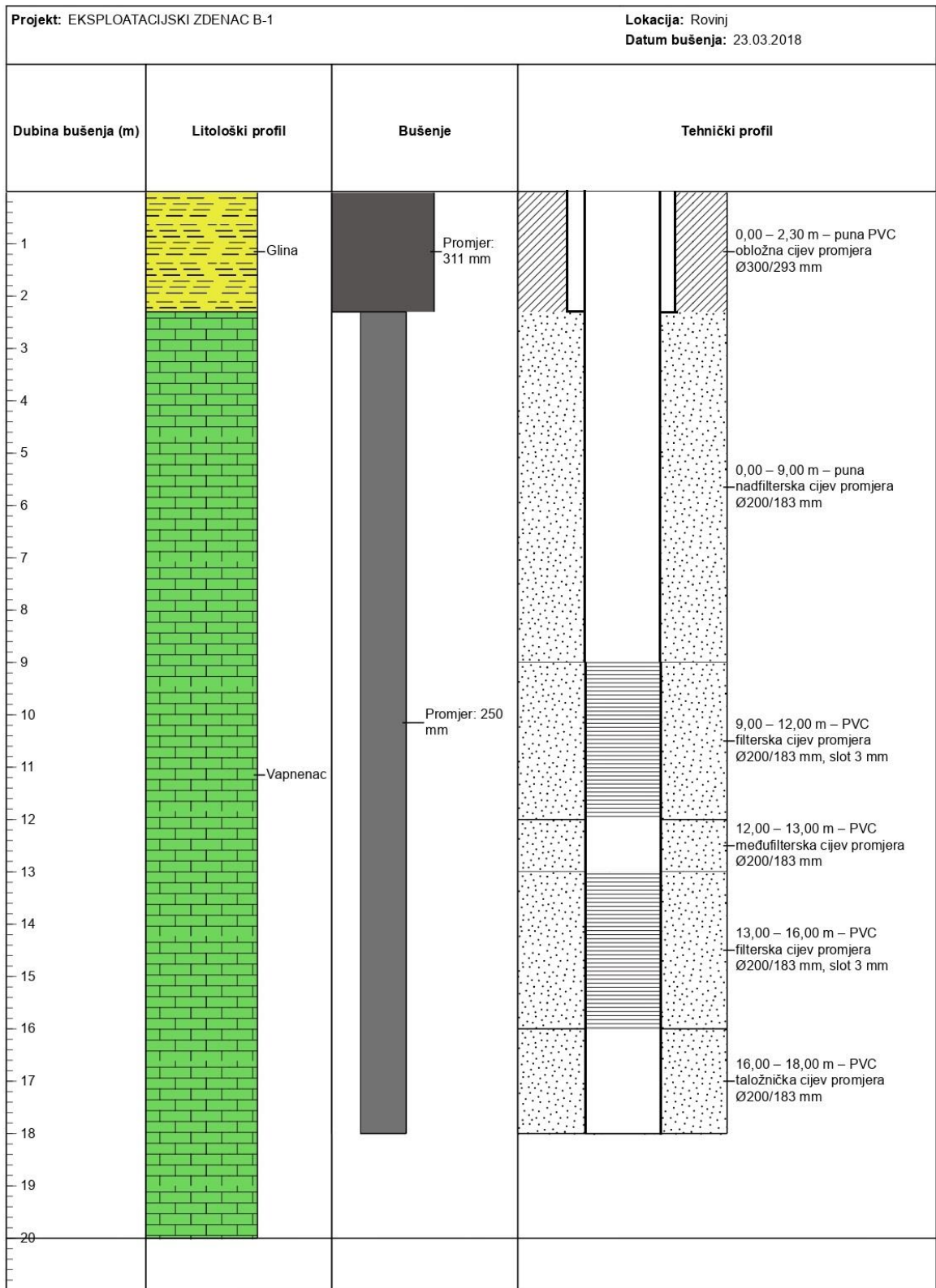
**Tablica 5-1.** Koordinate zdenaca (HTRS96)

Objekt	Koordinate sonde (istok)	Koordinate sonde (sjever)
B-1	274.561	4.999.362
B-2	274.578	4.999.361
B-3	274.506	4.999.321
B-4	274.515	4.999.338



**Slika 5-5.** Smještaj zdenaca u odnosu na bolnicu

Bušenje istražno eksploatacijskih zdenaca izvedeno je udarno-rotacijskim načinom bušenja uz iznošenje nabušenog materijala komprimiranim zrakom. Zdenci su izvedeni dvama profilima. Do kompaktne stijene (maksimalno 3,0m) profilom  $\varnothing = 311\text{mm}$ , nakon čega je u bušotinu ugrađena obložna PVC cijev promjera  $\varnothing = 300\text{mm}$ , a do konačne dubine bušenja od 18,0m promjerom  $\varnothing = 250\text{mm}$ . Tijekom bušenja obavljeno je i jezgrovanje. Na slici 5-6. prikazan je tehnički i litološki profil zdenca B-1.



Slika 5-6. Tehnički i litološki profil zdenca B-1

Zdenci B-2, B-3 i B-4 imaju isti tehnički profil kao i zdenac B-1, a litološki profil im se razlikuje samo u dubini površinskog pokrova (Tablica 5-2.). Jezgre izbušenih naslaga potvrđuju geološku građu istražnog područja. Površinski pokrov je od slojeva gline, a kompaktna stijena je karbonatnog tipa, odnosno vapnenac.

**Tablica 5-2.** Podaci o litološkom profilu zdenaca

<b>Objekt</b>	<b>Interval, m</b>	<b>Litološki opis</b>
<b>B-1</b>	0,0-2,3	Humus, smeđe boje
	2,3-18,0	Vapnenac
<b>B-2</b>	0,0-1,5	Humus, smeđe boje
	1,5-18,0	Vapnenac
<b>B-3</b>	0,0-3,0	Humus, smeđe boje
	3,0-18,0	Vapnenac
<b>B-4</b>	0,0-3,0	Humus, smeđe boje
	3,0-18,0	Vapnenac

Nakon završetka bušačkih radova, počinju radovi opremanja zdenca. Tehnička konstrukcija istražno-eksploatacijskih zdenaca sastoji se od pune PVC cijevi promjera  $\varnothing = 200$  mm, debljine stjenka 6,5mm. Filter cijev je od istog materijala sa slotiranim otvorom veličine 2,0 mm, promjera  $\varnothing = 200$  mm. Taložnik se ugrađuje na dno zdenca i služi za taloženje sitnih čestica ukoliko ih ima. Raspored tehničke konstrukcije zdenca prikazan je u tablici 5-3. Ovaj raspored vrijedi za sve eksploatacijske zdence.

**Tablica 5-3.** Tehnička konstrukcija zdenca

Dubina, m	Ugradnja	Promjer, mm
0-2,3	Obložna PVC cijev	300
0-9	Puna PVC nadfilterska cijev	200/183
9-12	PVC filterska slotirana cijev (slot 2,0mm	200/183
12-13	PVC međufilterska cijev	200/183
13-16	PVC filterska slotirana cijev (slot 2,0mm	200/183
16-18	PVC taložnička cijev	200/183

Završetkom ugradnje tehničke konstrukcije u prostor između filterskih cijevi i stijenke bušotine potrebno je položiti šljunčani zaspi do dubine od najmanje dva metra iznad filterske sekcije. Granulacijski sastav šljunka određuje se temeljem granulometrijskih karakteristika vodonosnog sloja i otvora slota filterske sekcije. U ovom slučaju šljunčani zasip ugrađen je do dubine od 3 metra granulacijskog promjera 4 do 8 milimetra, a iznad njega do površine terena glineni tampon. Iznad šljunka potrebno je ugraditi glineno-bentonitni čep od kvalitetne gline do površine terena kako bi se spriječila infiltracija oborina i potencijalnih onečišćivača u vodonosnik. Prije samog testiranja zdenaca, zdenca je potrebno očistiti od sitnih čestica koji mogu naštetiti radu potopne pumpe. Čišćenje se obavlja metodom „air-lift“ uz pomoć kompresora, gdje se uz pomoć komprimiranog zraka iz zdenca izbacuju čestice.

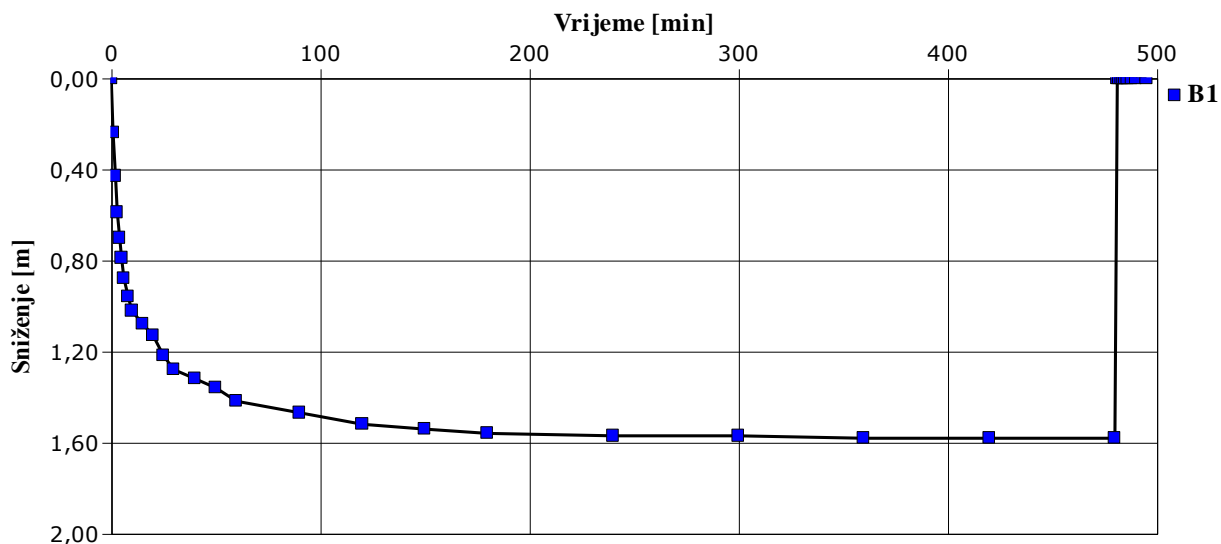
## **6. ANALIZA PODATAKA POKUSNOG CRPLJENJA KORIŠTENJEM RAČUNALNOG SOFTWARE „AQUIFERTEST“**

U svrhu određivanja hidrogeoloških parametara vodonosnika i efikasnosti zdenaca provedeno je pokusno crpljenje za sva četiri zdenca (B-1, B-2, B-3, B-4). Pokusno crpljenje sastojalo se od testa u koracima, tj. „step-test“ i testa s konstantom količinom protoka. Tijekom trajanja testa, konstanto se bilježio pad razine vode u zdencu. Za izvođenje pokusnog crpljenja korištena je dubinska pumpa s kojom je izvedeno i osvajanje zdenaca. Za analizu i interpretaciju podataka dobivenih pokusnim crpljenjem korišten je računalni program „AquiferTest“ tvrtke Waterloo Hydrogeologic.

U nastavku rada prikazani su rezultati mjerenja i analiza dobivenih podataka za sva četiri zdenca.

### **6.1 Analiza testa s konstantnom količinom protoka**

Pokusno crpljenje na zdencu B-1 metodom s konstantom količinom protoka od  $Q = 12$  l/s provedeno je u trajanju od 8 sati. Pad razine podzemne vode u zdencu registriran je samo u proizvodnom zdencu, također je i nakon prestanka proizvodnje registriran povrat razine vode. Početna razina vode u zdencu (statička razina vode) prije početka mjerenja iznosila je 2,88m, mjereno od površine. Na slici 6-1. prikazan je dijagram sniženja u odnosu na vrijeme trajanja proizvodnje. U početku trajanja mjerenja potrebno je češće mjeriti dinamičku razinu vode jer su u tom periodu razlike u sniženju najveće, kao što se vidi na grafu. Nakon 3 sata trajanja proizvodnje, sniženje se stabiliziralo te se nije drastično mijenjalo do kraja izvođenja testa. Zadnje registrirano sniženje mjereno od početne statične razine vode iznosilo je 1,58 metara. Nakon prestanka crpljenja pratio se i povratak razine vode u zdencu, gdje je zabilježen trenutni povratak razine vode na početnu statičku razinu.



**Slika 6-1.** Dijagram vrijeme-sniženjem dobiven konstant testom za zdenac B-1

Na temelju podataka mjerenja izračunati su parametri vodonosnika u računalnom programu „AquiferTest“. Hidraulička provodljivost i transmisivnost izračunate su Theisovom metodom, odnosno Cooper-Jacob metodom. Prikaz rezultata nalazi se u tablici 6-1.

**Tablica 6-1.** Rezultati parametara vodonosnika izračunati u računalnom programu „AquiferTest“ za zdenac B-1

	Korištena metoda	Zdenac	T [m <sup>2</sup> /d]	K [m/d]	S
1	Theis	B1	$6,31 \times 10^2$	$3,50 \times 10^{-1}$	$5,00 \times 10^{-1}$
2	Cooper Jacob	B1	$5,82 \times 10^2$	$3,23 \times 10^{-1}$	$5,00 \times 10^{-1}$
Prosječna vrijednost			$6,06 \times 10^2$	$3,37 \times 10^{-1}$	$5,00 \times 10^{-1}$

Rezultati dobiveni Theis i Cooper-Jacob metodom su skoro identični. Konačna vrijednost transmisivnosti i hidrauličke vodljivosti za zdenac B-1 uzeta je prosječna vrijednost dobivenih rezultata te iznosi za transmisivnost  $T = 606 \text{ m}^2/\text{dan}$  i hidrauličku vodljivost  $K = 33,7 \text{ m}/\text{dan}$ . Ako se usporedi dobivena vrijednost hidrauličke vodljivosti zdenca B-1 sa rezultatima hidrauličkih vrijednosti karakterističnih vodonosnika iz literature (Slika 4-3. poglavlje 4.)

potvrđuje se da je riječ o krškim vodonosnicima (vapnenac). Izračunat je i koeficijent uskladištenja te su obje metode dale istu vrijednost od 0,5.

Isti postupak proveden je za ostala tri zdenca B-2, B-3, i B-4. Konačni rezultati hidrogeoloških parametara za sva četiri zdenca dobiveni obradom podataka testa s konstantnom količinom protoka prikazani su u tablici 6-2.

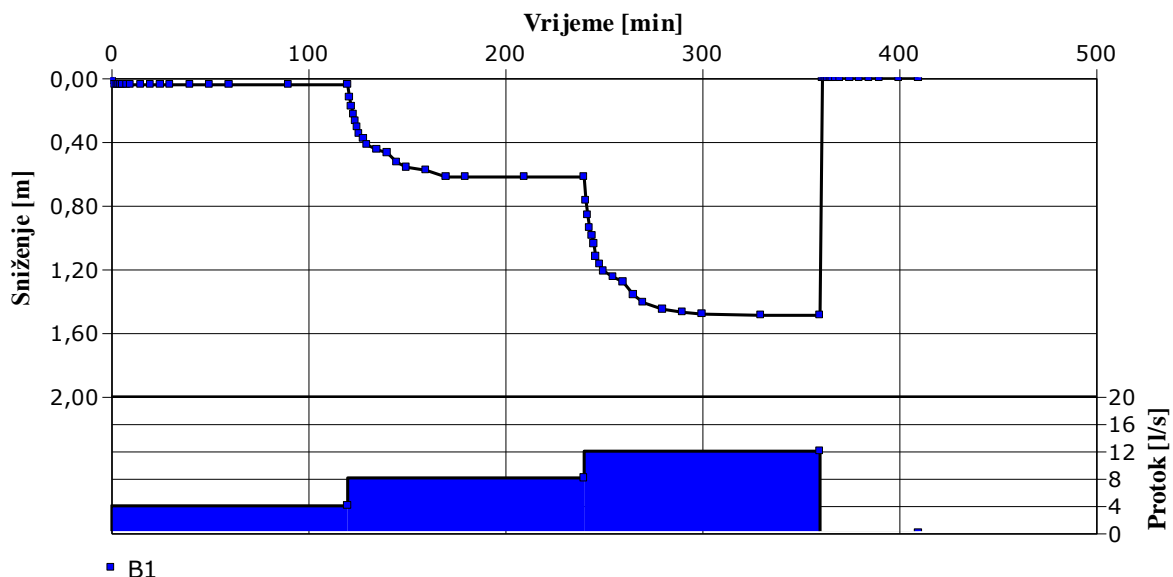
**Tablica 6-2.** Rezultati hidrogeoloških parametara dobiveni obradom podataka pokusne proizvodnje u programu „AquiferTest“

	<b>Transmisivnost, T (m<sup>2</sup>/dan)</b>	<b>Hidraulička vodljivost, K (m/dan)</b>	<b>Koeficijent uskladištenja, S</b>
<b>B-1</b>	606,00	33,70	0,50
<b>B-2</b>	147,00	8,14	0,28
<b>B-3</b>	368,00	20,40	0,75
<b>B-4</b>	221,00	12,30	0,14
<b>Prosječna vrijednost</b>	335,50	18,64	0,42

## 6.2 Analiza *step* testa

Za određivanje parametara zdenca B-1 proveden je *step* test u tri koraka s tri različite količine crpljenja ( Q1 = 4,0 l/s, Q2 = 8,10 l/s , Q3 = 12 l/s) u trajanju od dva sata po koraku. Rezultati mjerenja sniženja registrirani tijekom trajanja testa prikazani su grafički na slici 6-3.

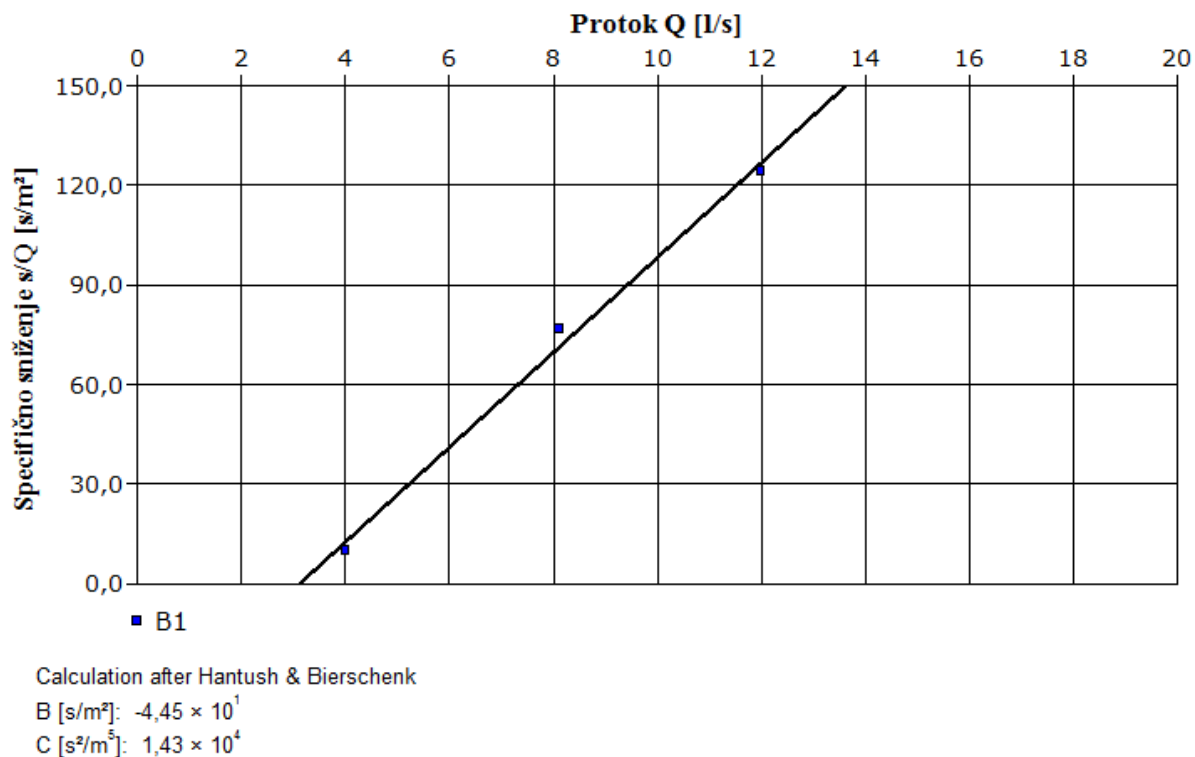




**Slika 6-2.** Dijagram step-testa za zdenac B-1

Dijagram je karakterističnog stepeničastog oblika na kojem se jasno vide prijelazi s jednog režima protoka na drugi u vidu pada dinamičke razine vode. U prvom koraku, gdje je protok  $Q_1 = 4,0$  l/s, nema značajnijeg pada razine vode, zanemarivih 4 cm u odnosu na statičku razinu vode 2,88 m. Za ostala dva koraka zabilježeno je sniženje od 0,62 m za protok  $Q_2 = 8,1$  l/s, odnosno 1,49 m za protok  $Q_3 = 12,0$  l/s. Nakon prestanka proizvodnje razina podzemne vode se trenutno vratila na početnu statičku razinu.

Analizom dobivenih podataka mjerenja u računalnom programu izračunati su parametri zdenca B i C. Sniženje u vodonosnom sloju karakterizira parametar B ( $s/m^2$ ), a sniženje u zdencu parametar C ( $s^2/m^5$ ). Slika 6-3. prikazuje graf specifičnog sniženja  $s/Q$  u ovisnosti o protoku Q preko kojeg su izračunati parametri B i C.



**Slika 6-3.** Grafički prikaz specifičnog sniženja u ovisnosti o protoku Q za zdenac B-1

Za parametar laminarnog gubitka izračunata je vrijednost  $B = -45,5 \text{ s/m}^2$ , a za parametar turbulentnog gubitka  $C = 1,43 \cdot 10^4 \text{ s}^2/\text{m}^5$ . Temeljem proračunatih parametara može se zapisati jednačina zdenca B-1:  $s = -44,5 Q + 1,43 \cdot 10^4 Q^2$  (Q je u  $\text{m}^3/\text{s}$ ). Ova jednačina prikazuje ovisnost sniženja razine vode u zdencu i protoka proizvodnje. Na primjer, za protok od  $Q = 10 \text{ l/s}$  ( $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ ) sniženje će iznositi  $s = 98,5$  centimetara.

Pokusno crpljenje u koracima izvršeno je i na ostalim zdencima B-2, B-3, i B-4. Parametri zdenca zajedno s jednačinom sniženja za svaki pojedini zdenac prikazani su u tablici 6-3.

**Tablica 6-3.** Parametri zdenaca dobiveni obradom podatka pokusne proizvodnje u programu „AquiferTest“

<b>Zdenac</b>	<b>B (s/m<sup>2</sup>)</b>	<b>C (s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>)</b>	<b>Jednadžba sniženja</b>
<b>B-1</b>	-44,5	14300	$s = -44,5 * Q + 14300 * Q^2$
<b>B-2</b>	-552	624000	$s = -552 * Q + 624000 * Q^2$
<b>B-3</b>	-266	96900	$s = -266 * Q + 96900 * Q^2$
<b>B-4</b>	-576	502000	$s = -576 * Q + 502000 * Q^2$

## **7. ANALIZA RADA PROIZVODNIH I UTISNIH ZDENACA ZA SLUČAJ SUSTAVA DIZALICE TOPLINE BOLNICE DR. MARTIN HORVAT, ROVINJ**

U ovom poglavlju bit će prikazano nekoliko scenarija, odnosno predikcija vezano za protok proizvedene podzemne vode za potreba rada sustava dizalice topline. Određivanje optimalnog protoka crpljenja vode ključan je korak za učinkovit rad cjelokupnog sustava dizalice topline zajedno s sustavom eksploatacijskih zdenaca za proizvodnju podzemne vode. Protok vode od vodonosnika do dizalice topline treba bit dostatan tijekom vršnih opterećenja rada dizalice topline tokom cijele godine. Na temelju podatak o energetske potreba određene građevine projektira se adekvatni protok vode. Protok crpljenja podzemne vode utječe na dizajn konstrukcije proizvodnog zdenca i odabir i smještaj potopne crpke u zdencu. Crpku je potrebno ugraditi dovoljno duboko kako bi osigurali da prilikom velike proizvodnje, sniženje razine vode u zdencu neće zahvatiti potopnu crpku i samim time ugroziti rad crpke, posljedično i cijelog sustava dizalice topline.

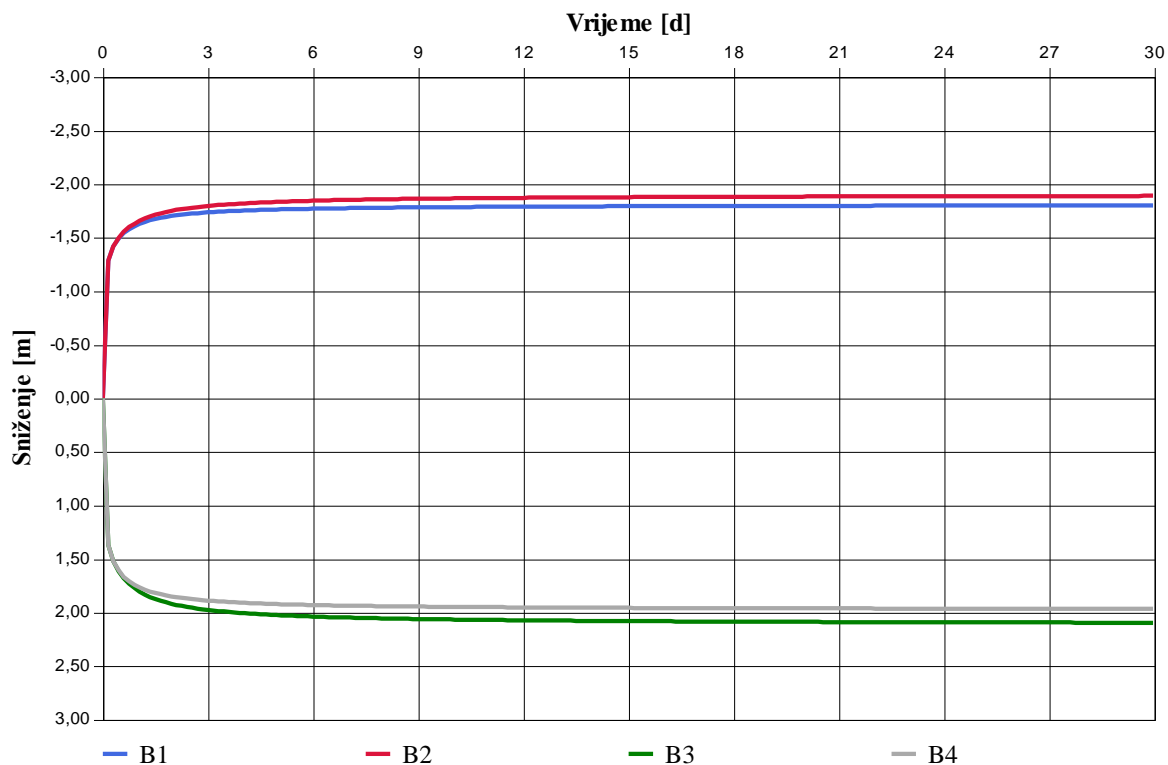
### **7.1. Scenarij dva proizvodna i dva utisna zdenca**

Za slučaj bolnice u Rovinju prema strojarskom projektu, potrebna je proizvodnja od 12 l/s kako bi se zadovoljile energetske potrebe. Podzemna voda bi se proizvodila iz dva eksploatacijska zdenca B-3 i B-4, dok bi se povratna voda utiskivala u zdence B-1 i B-2. U računalnom programu „AquiferTest“ napravljen je scenarij ovog slučaja kako bi se odredilo sniženje u ovisnosti o protoku proizvedene vode. Za što preciznije predviđanje potrebno je dobro poznavati hidrogeološka svojstva vodonosnika i imati informacije o konstrukcijskoj izvedbi zdenca i lokaciji zdenca. U tablici 7-1. prikazani su ulazni podaci koji su korišteni u ovom slučaju. Za parametre transmisivnosti i koeficijent uskladištenja uzete su prosječne vrijednosti:  $T = 335,5 \text{ m}^2/\text{dan}$  i  $S = 0,42$ , koje su dobivene analizom podataka pokusnog crpljenja iz prethodnog poglavlja. Statička razina vode varira ovisno o zdencu i kreće se od 2,0 m do 2,9 m, mjereno od vrha zdenca.

**Tablica 7-1.** Ulazni podaci za proračun sniženja u programu „AquiferTest“

Dubina zdenca	18 m
Duljina filter kolone	7 m
Promjer filter kolone	200/183 mm
Promjer bušotine	250 mm
Debljina vodonosnika	18 m
Transmisivnost	335,50 m <sup>2</sup> /dan
Koeficijent uskladištenja	0,42
Statička razina vode	2,0-2,9 m

Kako bi se zadovoljila potrebna ukupna proizvodnja od 12 l/s zamišljeno je da se po 6 l/s proizvodi iz dva eksploatacijskih zdenca (B-3 i B-4) i ista tolika količina bi se utiskivala u utisne zdenca (B-1 i B-2). U programu je napravljena simulacija proizvodnje s ovakvim uvjetima u trajanju od 30 dana bez zaustavljanja kako bi se odredilo sniženje u zdencima. Na slici 7-1. prikazani su grafički rezultati simulacije.



**Slika 7-1.** Graf sniženja u zdencima za režim proizvodnje 6 + 6 l/s u trajanju od 30 dana.

Iz grafa se vidi da sniženje najviše raste tijekom prvih 72 sata proizvodnje, a zatim dolazi do opadanja porasta sniženje te se ustali na vrijednosti od 2 metra za zdenac B-4, odnosno 2,1 metar za zdenac B-3. Prema projektu predviđena ugradanja potopne crpke je na dubini od 12 do 13 metara za proizvodne zdence. Uzimajući u obzir statičku razinu vode koja varira od 2 do 2,9 metara ovisno o zdencu, uz faktor sigurnosti od 3 metra, maksimalno dopušteno sniženje iznosi cca 6 metara. Što znači za ovaj slučaj da je u dozvoljenim granicama sniženja te sustav zadovoljava uvjete proizvodnje. U utisnim zdencima dolazi do porasta razine vode od 1,7 metara za zdenac B-1 i 1,8 metara za zdenac B-2. S obzirom da je statička razina vode u zdencu B-1 2,9 metara, a u zdencu B-2 2,5 metara, neće doći do prelijevanja vode iz zdenca.

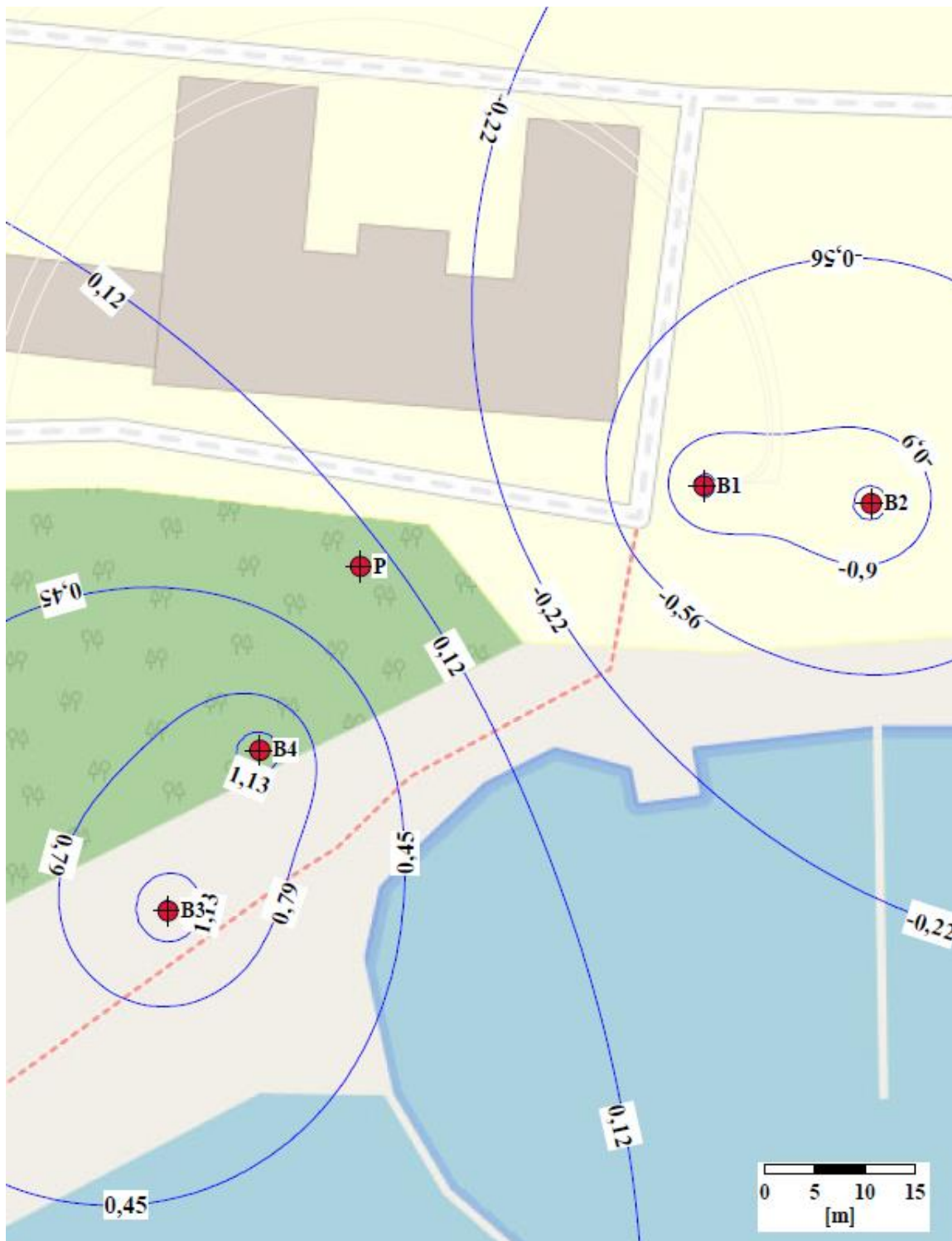
S eneretskog stajališta za ovaj slučaj određena je toplinska energija koju je moguće pridobiti iz proizvedene vode iz zdenca pri protoku  $Q=12$  l/s (G) uz pretpostavku da sustav radi u režimu  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ .

$$G = Q * \rho * \Delta T * C_p = 12 * 1 * 5 * 4,187 = 251,2 \text{ kW}_t$$

Uz prosječni  $COP_H$  od 4,2 za SWHP sustave (Xin et al., 2018) ukupna raspoloživa toplinska energija sustava dizalice topline u režimu grijanja iznosi:  $H = G / (1 - 1/COP_H) = 329,7 \text{ kW}_t$ . Od toga je 251,2 kWt pridobiveno proizvodnjom vode iz zdenaca (G), a 78,5 kWt toplinske energije otpada na rad kompresora (E).

U režimu hlađenja, količina toplinske energije koja se može ukloniti iz objekta iznosi:  $C = G / (1 + 1/COP_C) = 207,1 \text{ kW}_t$ , uz pretpostavku da je  $COP_C=4,7$  (Xin et al., 2018). Toplinska snaga rada kompresora dizalice topline iznosi:  $E = G - C = 251,2 - 207,1 = 44,1 \text{ kW}_t$ .

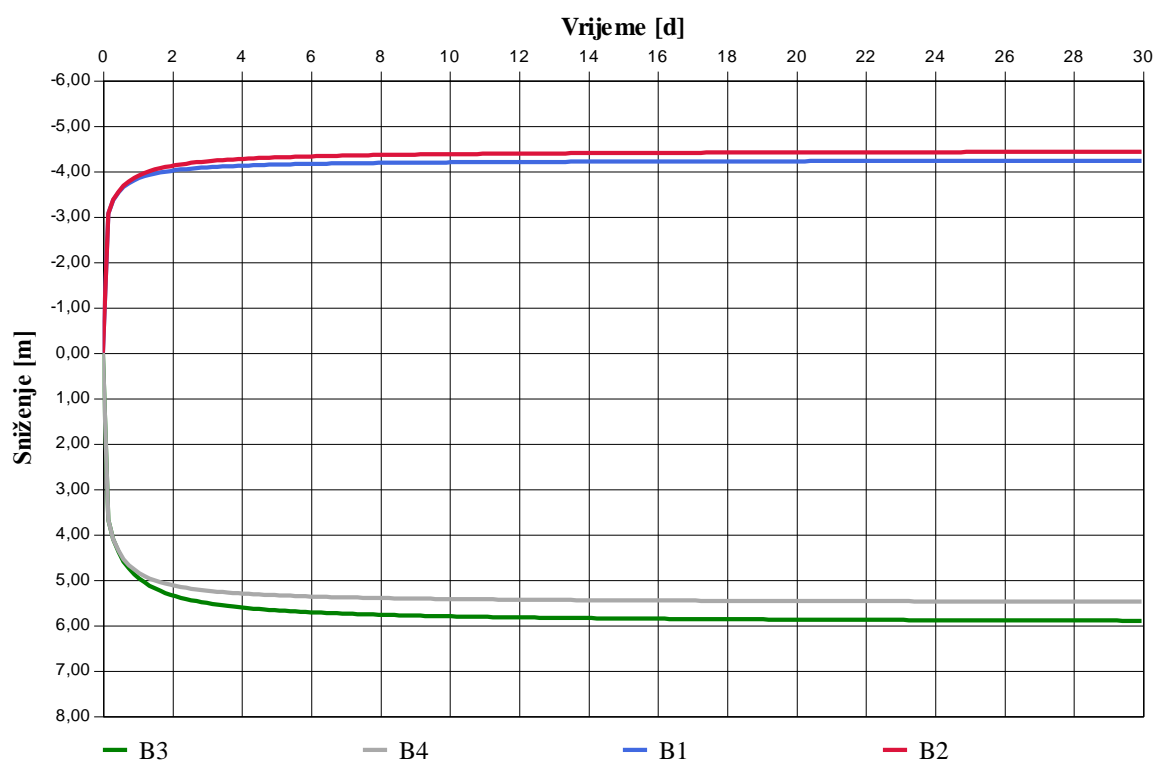
U računalnom programu napravljen je prikaz utjecaja proizvodnje na sniženje razine podzemne vode na široj lokaciji oko zdenaca (Slika 7-2.). Iz slike se može vidjeti međusobni utjecaj proizvodnih i utisnih zdenaca s obzirom na udaljenost. Sniženje u zdencu i oko zdenca B-4 je manje u odnosu na zdenac B-3 zbog bliže lokacije s obzirom na utisne zdence. Isto tako u zdencu B-1 je manje povišenje razine vode u odnosu na B-2 jer je bliže proizvodnim zdencima. Iz ovog se zaključuje da su zdenci hidraulički povezani te da dolazi do interferencije među njima.



Slika 7-2. Radijus utjecaja proizvodnje od 12 l/s na sniženje vodnog lica.



Za ovaj slučaj u programu je određena maksimalna proizvodnja uz uvjet maksimalnog dopuštenog sniženja od 6 metara u zdencu. Na slici 7-3. prikazan je graf sniženja za sva četiri zdenca gdje je proizvodnja podzemne vode iznosila 15 l/s za zdenca B-3 i B-4 u trajanju od 30 dana. Ista količina vode se utiskivala u bušotine B-1 i B-2. Iz grafa se vidi da nakon 19 dana neprestane proizvodnje sniženje u zdencu B-3 iznosi 6 metara dok je u zdencu B-4 5,5 metara. Porast razine vode u utisnim bušotinama je znatno iznad statičke razine vode, što bi značilo da bi se voda izlivala iz zdenca na površinu. Da se to ne dogodi potrebno je koristit pumpe koje bi utiskivale vodu nazad u vodonosnik. Treba uzet u obzir da je u ovom predviđanju proizvodnja podzemne vode od 30 l/s (15 + 15 l/s) trajala 30 dana bez prekidanja kako bi se ispitale mogućnosti zdenaca, te da u stvarnom slučaju vjerojatno neće doći do takve situacije.



**Slika 7-3.** Graf sniženja za maksimalni dopušteni protok.

Toplinska energija koju je moguće pridobiti proizvodnjom vode iz zdenca pri protoku od 30 l/s (G), uz pretpostavku da sustav radi u režimu  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ , iznosi:

$$G = Q * \rho * \Delta T * C_p = 30 * 1 * 5 * 4,187 = 628,1 \text{ kW}_t$$

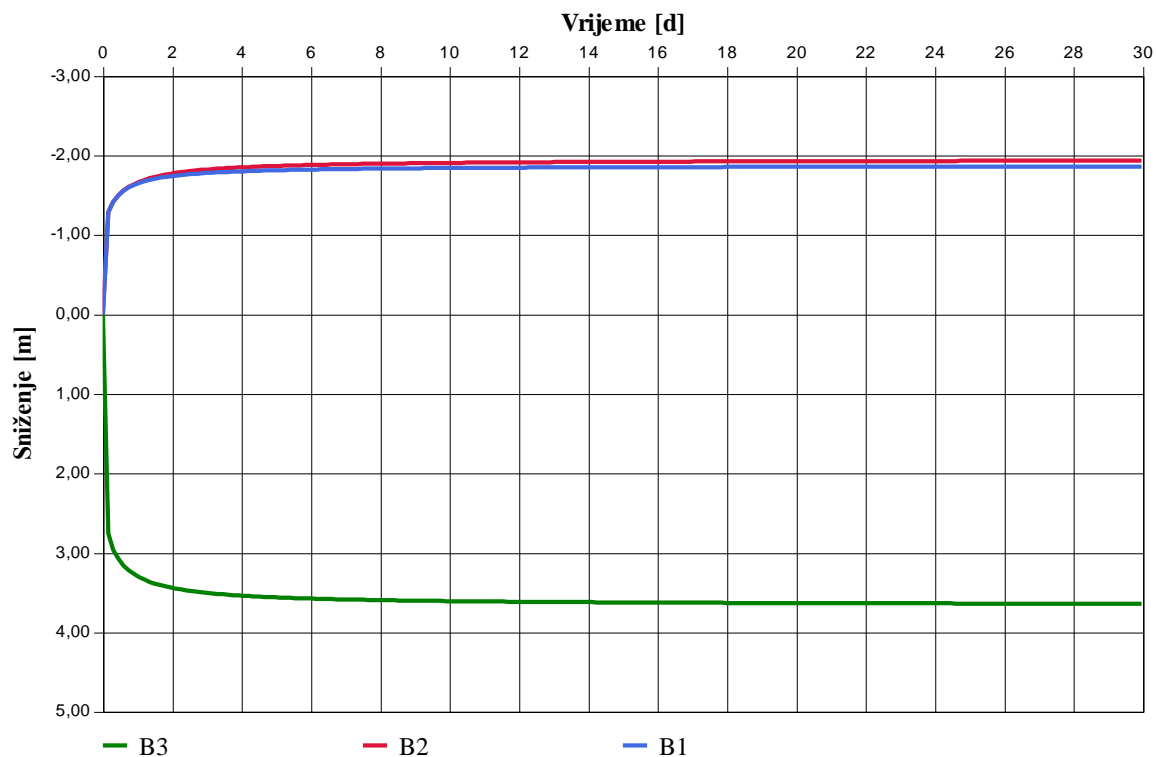
Uz prosječni COP<sub>H</sub> od 4,2 za SWHP sustave (Xin et al., 2018) ukupna raspoloživa toplinska energija sustava dizalice topline u režimu grijanja iznosi:  $H = G / (1 - 1 / COP_H) = 824,3 \text{ kW}_t$ . Od toga je 628,1 kWt pridobiveno proizvodnjom vode (G), a 196,2 kWt toplinske energije otpada na rad kompresora (E).

U režimu hlađenja, količina toplinske energije koja se može ukloniti iz objekta iznosi:  $C = G / (1 + 1 / COP_C) = 517,9 \text{ kW}_t$ , uz pretpostavku da je COP<sub>C</sub>=4,7 (Xin et al., 2018). Toplinska snaga rada kompresora dizalice topline iznosi:  $E = G - C = 628,1 - 517,9 = 110,2 \text{ kW}_t$ .

Veći protok podzemne vode kroz sustav dizalice topline znači i veću učinkovitost dizalice topline, to jest veću izlaznu toplinsku snagu. Ipak, povećanjem protoka povećava se i energija potrebna za rad potopne crpke. Stoga, povećanjem protoka proizvodnje podzemne vode povećava se COP cjelokupnog sustava dizalice topline zajedno sa sustavom potopne crpke do točke u kojoj daljnjim povećanjem protoka rezultira većom potrošnjom energije uloženu na rad crpke u odnosu na toplinsku snagu dobivenu radom dizalice topline. Za optimalnu učinkovitost potrebno je uravnotežiti snagu rada potopne crpke s radom dizalice topline (Chiasson, 2016).

## 7.2. Scenarij jedan proizvodni i dva utisna zdenca.

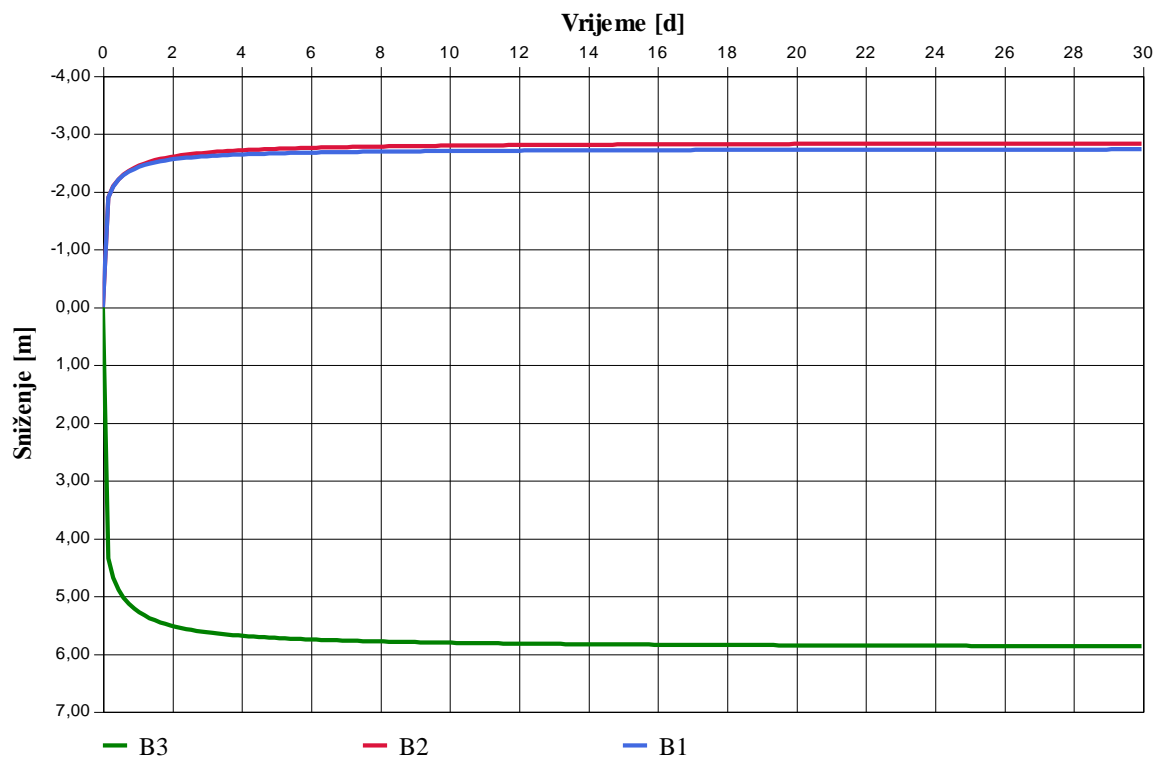
Tijekom životnog ciklusa dizalice topline postoji mogućnost da će doći do kvara potopne crpke u jednom od zdenaca, odnosno da je potreban obaviti redovni servis u zdencu. U tom slučaju proizvodnja podzemne vode iz tog zdenca nije moguća te je taj nedostatak vode potrebno nadoknaditi proizvodnjom iz drugog zdenca, kako bi se osigurao učinkovit rad sustava dizalice topline. U računalnom programu napravljena je predikcija ovoga slučaja. Iz zdenca B-3 proizvodnja vode iznosi 12 l/s, a zdenac B-4 je zatvoren. Zdenci B-1 i B-2 se koriste za utiskivanje vode nazad u vodonosnik pri protoku od 6 l/s za svaki zdenac, identično kao u prvom scenariju. Simulirana proizvodnja trajala je 30 dana bez prestanka. Na slici 7-4. dan je graf sniženja u zdencu B-3 pri proizvodnji od 12 l/s.



**Slika 7-4.** Graf sniženja u zdencima za režim jednog proizvodnog zdenca.

Rezultati simulacije pokazuju da ostvareno sniženje u zdencu B-3 nakon konstante proizvodnje u trajanju od 7 dana iznosi oko 3,6 metara te se do kraja simulacije ne mijenja drastično. Ovo sniženje ne premašuje maksimalno dozvoljeno sniženje od 6 metara, što znači da i u slučaju proizvodnje podzemne vode pri protoku od 12 l/s iz samo jednog zdenca, sustav će raditi učinkovito i energetske potrebe zgrade bit će zadovoljene. Povišenje razine vode u utisnim zdencima je oko 1,9 metara i manje je od statičke razine vode, što znači da nema izlijevanja vode iz zdenaca.

Kao za prethodni scenarij i u ovome je provedena simulacija proizvodnje u trajanju od 30 dana kako bi se odredila maksimalna proizvodnja, uz uvjet da se ne probije granica maksimalnog dozvoljenog sniženja u iznosu od 6 metara. Metodom pokušaja i pogrešaka došlo se do protoka od 18 l/s. Pri tom protoku sniženje u zdencu B-3 nakon 30 dana trajanja proizvodnje iznosi oko 6 metara kao što je prikazano na grafu (slika 7-5.). Povišenje razine vode u utisnim zdencima je značajno te će trebati koristiti pumpe za utiskivanje vode nazad u vodonosnik.



**Slika 7-5.** Graf sniženja pri maksimalnom dopuštenom protoku.

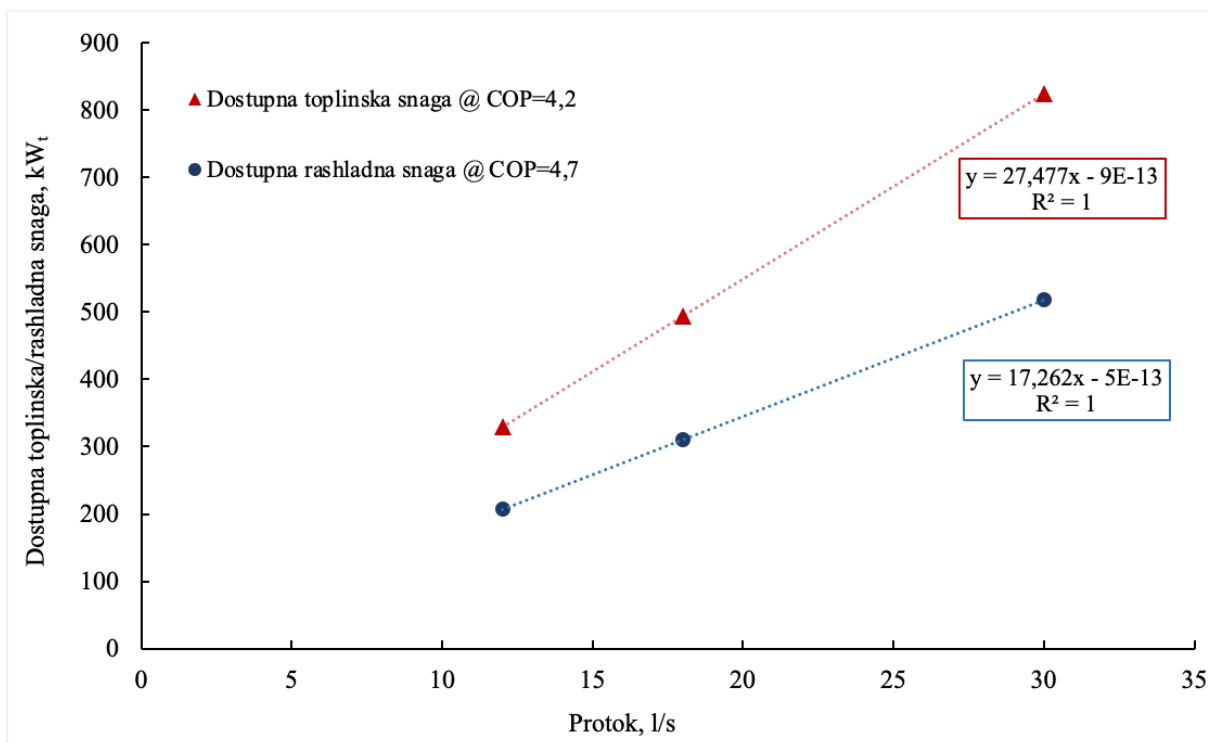
I za ovaj slučaj također je napravljen energetski proračun. Toplinska energija koju je moguće pridobiti iz proizvedene vode iz zdenca pri protoku  $Q=18$  l/s (G), uz pretpostavku da sustav radi u režimu  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ , iznosi:

$$G = Q * \rho * \Delta T * C_p = 18 * 1 * 5 * 4,187 = 376,8 \text{ kW}_t$$

Uz prosječni  $\text{COP}_H$  od 4,2 za SWHP sustave (Xin et al., 2018) ukupna raspoloživa toplinska energija sustava dizalice topline u režimu grijanja iznosi:  $H = G / (1 - 1/\text{COP}_H) = 494,6 \text{ kW}_t$ . Od toga je 376,8 kWt pridobiveno proizvodnjom vode (G), a 117,8 kWt toplinske energije otpada na rad kompresora (E).

U režimu hlađenja, količina toplinske energije koja se može ukloniti iz objekta iznosi:  $C = G / (1 + 1/\text{COP}_C) = 310,7 \text{ kW}_t$ , uz pretpostavku da je  $\text{COP}_C=4,7$  (Xin et al., 2018). Toplinska snaga rada kompresora dizalice topline iznosi:  $E = G - C = 251,2 - 207,1 = 66,1 \text{ kW}_t$ . Na

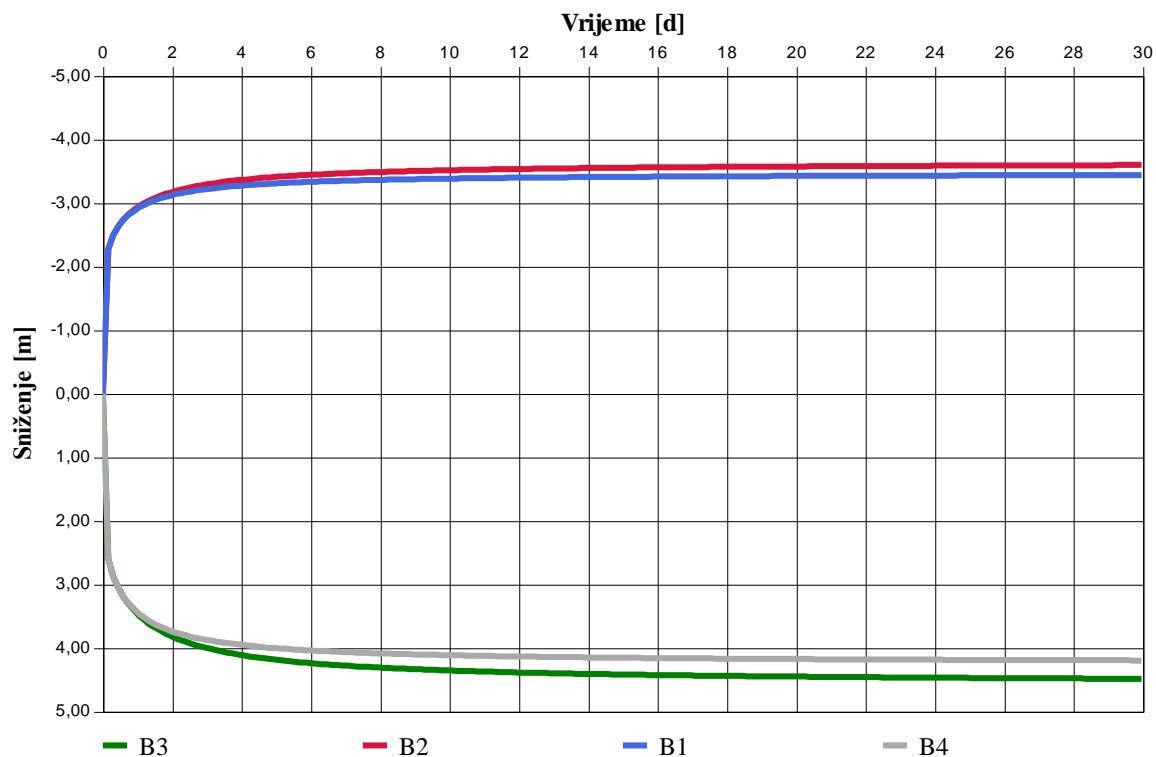
slici 7-6. prikazani su odnosi protoka i dostupne toplinske, odnosno rashladne energije, za opisani slučaj korištenja podzemne bočate vode.



**Slika 7-6.** Prikaz odnosa dostupne toplinske/rashladne energije i protoka uz pretpostavljene tipične vrijednosti  $COP_H=4,2$  i  $COP_C=4,7$ .

### 7.3. Utjecaj parametra transmisivnosti na proizvodnju vode iz vodonosnika.

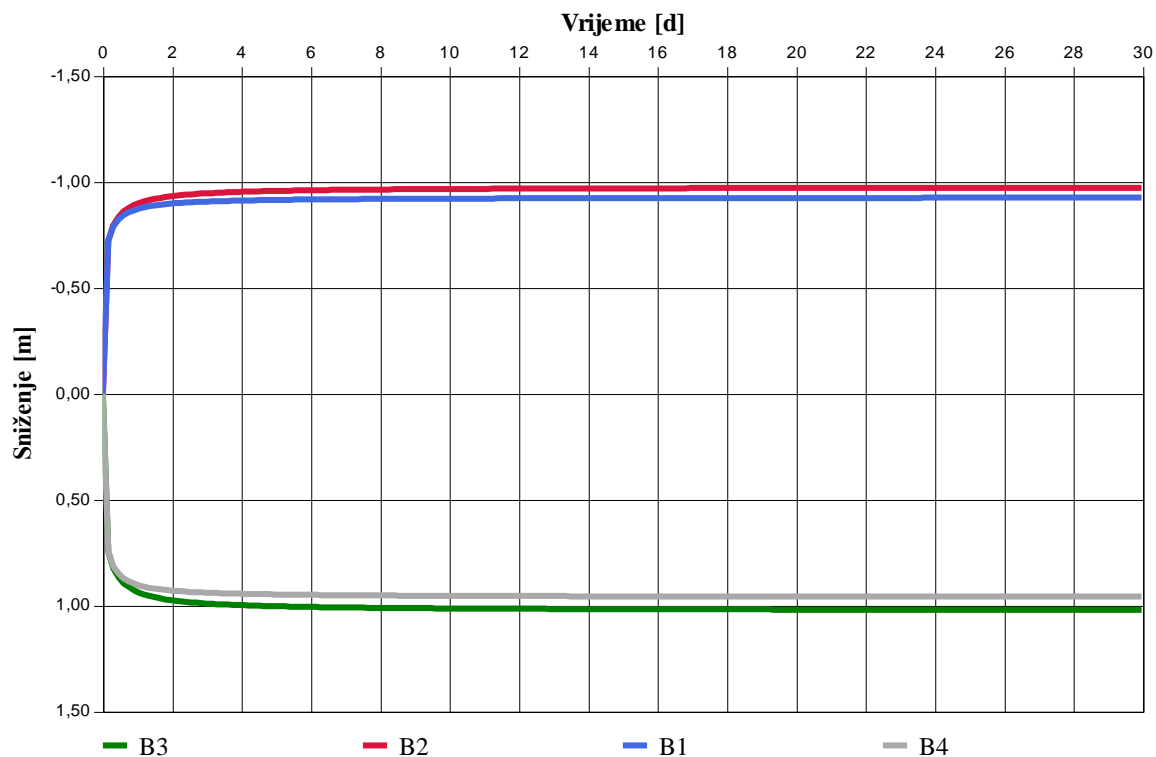
U računalnom programu „AquiferTest“ napravljena je i analiza utjecaja parametra transmisivnosti na proizvodnju podzemne vode iz vodonosnika. U analizi je korištena izvedba od četiri zdenca (2 proizvodna i 2 utisna) kao u prvom slučaju. Svi ulazni podaci su isti kao u prvom slučaju, osim transmisivnosti. Za analizu je pretpostavljena upola manja transmisivnost i dvostruko veća, u odnosu na stvarni slučaj gdje je transmisivnost iznosila 335,5 m<sup>2</sup>/dan. Na sljedećim grafovima prikazane su krivulje sniženja za pojedini slučaj.



**Slika 7-7.** Graf sniženja u zdencima pri sniženoj vrijednosti transmisivnosti.

Pri protoku od 12 l/s (6 + 6 l/s) sniženje u zdencima B-3 i B-4 očitano s grafa (slika 7-7.) iznosi 4,2 metra odnosno 4,5 metra, znatno više u odnosu na stvarni slučaj, ali i dalje u dopuštenim granicama te bi ovaj slučaj zadovoljio energetske potrebe zgrade.

Na slici 7-8. prikazan je graf sniženja za slučaj povećane transmisivnosti. Sniženje u proizvodnim zdencima je otprilike 1 metar za zdenac B-3 te nešto manje sniženje za zdenac B-4. S obzirom na niska sniženja može se pretpostaviti da bi za ovaj slučaj proizvodnja iz samo jednog zdenca protokom od 12 l/s bila više nego moguća.



**Slika 7-8.** Graf sniženja u zdencima pri povišenoj vrijednosti transmisivnosti.

Uspoređujući dva prethodna grafa sniženja, može se uočiti razlika u vremenu potrebnom da se sniženje ustali. Za slučaj niže transmisivnosti potrebno je otprilike 10 dana za ustaljenje, dok u drugom slučaju sniženje se ustali nakon 3 dana konstante proizvodnje. Ovo je direktno povezano s vodopropusnim svojstvima vodonosnika. Zbog veće transmisivnosti, veća je brzina dotjecanja vode iz vodonosnika u proizvodni zdenac te posljedično tome prije dolazi do ustaljenog protoka vode, odnosno količina vode koja utječe u zdenac jednaka je količini vode koja se proizvode iz zdenca. Na ovom primjeru pokazana je važnost poznavanja hidrogeoloških svojstava ležišta za projektiranje sustava dizalice topline.

## 8. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu prikazan je sustav dizalice topline koji koristi morsku vodu kao izvor toplinske energije te načini zahvata morske vode. Detaljnije je obrađen zahvat morske vode uz pomoć zdenaca na obali, odnosno važnost određivanja i poznavanja hidrogeoloških parametara vodonosnika za pravilnu i učinkovitu implementaciju sustava dizalice topline. Za slučaj bolnice u Rovinju, gdje je predviđena implementacija sustava dizalice topline na morsku vodu uz pomoć zdenaca na obali, obavljeno je pokusno crpljenje sa svrhom određivanja hidrogeoloških parametara (transmisivnost i koeficijent uskladištenja). U računalnom programu „AquiferTest“ izračunati su parametri, te su također napravljena dva scenarija simulacije proizvodnje podzemne boćate vode. Prvi scenarij predstavlja slučaj koji bi se koristio u stvarnosti (2 proizvodna zdenca i 2 utisna zdenca), dok se u drugom scenariju koristi samo jedan proizvodni zdenac. Za oba scenarija određeni su maksimalni mogući protoci uz uvjet dopuštenog sniženja razine vode u zdencu. Također je napravljena i energetska analiza za svaki protok kako bi se odredila dostupna toplinska energija za režim hlađenja i grijanja. Prema strojarskom programu potrebno je osigurati protok od 12 l/s za energetske potrebe zgrade bolnice. Pri tom protoku sniženje razine vode u proizvodnim zdencima za prvi scenarij je oko 2 metra, dok je za drugi scenarij sniženje veće s obzirom da se proizvodi ista količina vode iz samo jednog zdenca te iznosi oko 3.6 metra. Oba scenarija su u ispod maksimalnog dozvoljenog sniženja od 6 metara. Ukupna raspoloživa toplinska energija sustava dizalice topline pri protoku od 12 l/s u režimu grijanja iznosi:  $H = 329,7 kW_t$ . Od toga je 251,2 kWt pridobiveno proizvodnjom vode iz zdenaca, a 78,5 kWt toplinske energije otpada na rad kompresora. U režimu hlađenja, količina toplinske energije koja se može ukloniti iz objekta iznosi:  $C = 207,1 kW_t$ .

Glavni cilj energetske tranzicije je spriječiti klimatske promjene smanjenjem emisija stakleničkih plinova i osigurati energetske neovisnost povećanjem udjela korištenja obnovljivih izvora energije. Stoga, sustavi dizalice topline imaju veliku ulogu u tom planu, a SWHP sustavi mogu značajno doprinijeti implementaciji i korištenju morske, boćate i podzemne vode na energetski prihvatljiv način u priobalnim područjima.



## 9. LITERATURA

1. AYUB, Z., 2016. World's largest ammonia heat pump (14 MWh) for district heating in Norway—a case study. *Heat Transfer Engineering*, 37(3-4), 382-386.
2. BANKS, D., 2012. *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling*. John Wiley & Sons.
3. CHIASSON, A. D., 2016. *Geothermal heat pump and heat engine systems: Theory and practice*. John Wiley & Sons.
4. COOPER JR, H. H., JACOB, C. E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 27(4), 526-534.
5. DELLEUR, J. W., 2006. *The handbook of groundwater engineering*. CRC press.
6. DRISCOLL, F. G., 1986. *Groundwater and wells*. St. Paul.
7. HARINATH, Y. V., MOHAN, T. K., 2016. Design, construction and erection of seawater intake system to establish a biofouling test facility. *Aquacultural Engineering*
8. HEAT, P. N., 2014. Värtan Ropsten—The largest sea water heat pump facility worldwide, with 6 Unitop 50FY and 180 MW total capacity.
9. JACOB, C. E., 1947. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 112(1), 1047-1064
10. MISSIMER, T. M., JONES, B., MALIVA, R. G. (Eds.), 2015. *Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-Osmosis Desalination Facilities: Innovations and Environmental Impacts*. Springer.
11. MITCHELL, M. S., SPITLER, J. D., 2013. Open-loop direct surface water cooling and surface water heat pump systems—A review. *HVAC&R Research*, 19(2), 125-140.
12. NARODNE NOVINE br. 153/2009. *Zakon o vodama*. Zagreb: Narodne novine d.d.
13. NARODNE NOVINE br. 158/2003. *Zakon o pomorskom dobru i morskim lukama*. Zagreb: Narodne novine d.d.
14. SEADRION PROJECT, 2018. *Fostering Diffusion of Heating & Cooling Technologies Using the Seawater Heat Pump in The Adriatic-Ionian Region* brochure.
15. SETHI, R., DI MOLFETTA, A., 2019. *Groundwater Engineering: A Technical Approach to Hydrogeology, Contaminant Transport and Groundwater Remediation*. Springer.

16. SHOKRGOZAR, H. R., 2018. *Alternatives for sea water intake at shores with low Slope*.
17. SOŠIĆ, M., BIBULIĆ, S., BENČIĆ, A., GRAKALIĆ, D., KRESINA, S., POKRAJAC, K., 2017. Elaborat zaštite okoliša: *Komunalna luka San pelagio i plaža valruia u Rovinju*. Studio KAPPO d.o.o., Rovinj.
18. SU, C., MADANI, H., LIU, H., WANG, R., PALM, B., 2020. Seawater heat pumps in China, a spatial analysis. *Energy Conversion and Management*, 203, 112240.
19. TANG, Y., ZHOU, J., YANG, P., YAN, J., & ZHOU, N., 2017. *Groundwater engineering*. Springer Singapore.
20. ÜNLÜ, A., CARUS, E., GÖRGÜLÜ, A., 2019. Water heat pump application with double stage back injection. *Procedia Computer Science*, 158, 68–73.
21. WALTON, W. C., 1970. Groundwater resource evaluation. *McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering (USA) eng*.
22. WATEREUSE ASSOCIATION., 2011. Overview of Desalination Plan Intake Alternatives. *White Paper*
23. XIN, J., LIN, D., HAIWEN, S., 2018. *Large-area seepage and heat transfer model of beach well infiltration intake system for seawater source heat pump*. *Energy and Buildings*, Volume 158, pp. 1593-1601.

Internet izvori:

24. COASTENERGY PROJECT, 2020. Blue Energy in ports and coastal urban areas, URL: <https://www.italy-croatia.eu> (20.1.2022)
25. DRŽAVNA GEODETSKA UPRAVA, 2022. URL: <https://www.katastar.hr> (20.4.2022)
26. DRŽAVNI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD, 2021. Srednje mjesečne vrijednosti i ekstremi, Temperatura zraka, Split, URL: [https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_podaci&param=k1&Grad=split\\_marjan](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci&param=k1&Grad=split_marjan) (5.3.2022)
27. DRŽAVNI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD, 2021. Srednje mjesečne vrijednosti i ekstremi, Temperatura zraka, Zadar, URL: [https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_podaci&param=k1&Grad=zadar](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci&param=k1&Grad=zadar) (5.3.2022)

28. GUIDE TO CONDUCTING PUMPING TESTS, 2021, URL:  
[https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/water-wells/guide\\_to\\_conducting\\_pumping\\_tests.pdf](https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/water-wells/guide_to_conducting_pumping_tests.pdf) (15.4.2022)
29. MARKET REPORT 2021. EHPA., 2021, URL: <https://www.ehpa.org/market-data/market-report-2021/> (18. 11. 2021)
30. RENEWABLE ENERGY STATISTICS, EUROSTAT, 2021, URL:  
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares>, (11.12.2021)
31. TEMPERATURE GRADA ROVINJA, 2022, URL: <https://en.climate-data.org>, (4.3.2022)

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod naslovom „Korištenje morske vode kao izvor toplinske energije na primjeru bolnice dr. Martin, Rovinj“ izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



---

Bruno Jurković



KLASA: 053-01/22-01/177  
URBROJ: 251-70-12-22-2  
U Zagrebu, 08.09.2022.

**Bruno Jurković, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 053-01/22-01/177, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 05.09.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### KORIŠTENJE MORSKE VODE KAO IZVOR TOPLINSKE ENERGIJE NA PRIMJERU BOLNICE DR. MARTIN, ROVINJ

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Prof.dr.sc. Tomislav Kurevija nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentoricu Dr.sc. Marija Macenić.

Mentor:

(potpis)

Prof.dr.sc. Tomislav Kurevija

(titula, ime i prezime)

Komentorica:

(potpis)

Dr.sc. Marija Macenić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)



Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)