**Končni elaborat za
zajem plitve
geotermalne energije
za FFA:**

sistem geosond

INVESTITOR**Univerza v Ljubljani, Fakulteta za farmacijo**
Aškerčeva cesta 7, 1000 Ljubljana**SODELUJOČI****IRGO Consulting d.o.o.**
Slovenčeva 93
SI-1000 Ljubljana

PROJEKTANT

IRGO Consulting, d.o.o.,
Slovenčeva 93, SI-1000 Ljubljana
dr. Vladimir Vukadin, univ.dipl.inž.geol. (direktor)



POOBLAŠČENI INŽENIR

dr. Jože Ratej, univ.dipl.inž.geol.

TERENSKÉ PREISKAVE, SPREMLJAVA IZVEDBE TESTNE GEOSONDE

Melhior Pregl, univ.dipl.inž.geol.

David Narat, univ.dipl.inž.geol.

Boštjan Ivačič

Anže Napotnik, univ.dipl.inž.rud. in geoteh.

TERENSKA IZVEDBA TRT POIZKUSA

GeoZS, Dimičeva 14, 1000 Ljubljana



Kazalo

1. UVOD	7
1.1 Izrazi in standardi	8
1.2 Namen izdelave numeričnega modela	9
1.3 Funkcija modela	9
1.4 Splošne geološke in hidrogeološke razmere	11
1.5 Vodonosni sistem	11
1.5.1 Hidrogeološka zgradba območja	12
1.5.2 Dinamika nihanja nivojev podzemne vode	15
1.5.3 Smer toka podzemne vode	17
1.6 Hidrološke in toplotne meje	18
1.7 Hidravlične in toplotne lastnosti sistema	20
1.8 Točkovni elementi modela	20
1.9 Vodna bilanca	21
2. TEST TOPLOTNEGA ODZIVA (TRT)	22
2.1 Izvedba TRT poizkusa	22
2.2 Rezultati TRT poizkusa	24
2.2.1 Analitično vrednotenje TRT s standardnimi metodami	25
2.2.2 Inverzno numerično vrednotenje TRT	26
3. OPIS KODE MODELA	28
3.1 Predpostavke in omejitve	28
3.2 Način izračuna	28
3.3 Vpliv predpostavk in omejitev na model	29
4. IZDELAVA MATEMATIČNEGA MODELA	30
4.1 Prostorska domena modela	30
4.2 Hidravlični in toplotni parametri (po izvedbi terenskih preiskav)	31
4.3 Točkovni elementi modela	33
4.4 Robni pogoji	35
4.5 Kalibracijske točke in cilji kalibriranja	35
4.6 Numerični parametri in parametri strojne opreme	35
5. KALIBRACIJA NUMERIČNEGA MODELA	36
6. SIMULACIJA ODVZEMA TOPLOTE	37
6.1 Rezultati porazdelitve nivoja podzemne vode v prostoru	38
6.2 Dimenzioniranje polja geosond	40

6.3	Izračun termičnega vpliva pri predvidenem odvzemu toplote	45
6.3.1	Dolgoročna sposobnost vira za zagotavljanje toplote	46
6.3.2	Prostorsko spreminjanje temperature podzemne vode	48
6.4	Vpliv na podeljene vodne pravice.....	51
7.	VPLIV NA TRANSMISIVNOST VODONOSNIKA	54
8.	ZAKLJUČEK	56

Slike

Slika 1	Obravnavana lokacija bodoče fakultete (rumena puščica)	7
Slika 2	Izhodiščna mreža geosond za optimizacijo z analitičnim modelom.	9
Slika 3	Osnovi elementi modela: zgornja plast predstavlja teren, ki se prične vzpenjati proti Rožniku; osrednja ločilna plast med zgornjim in spodnjim vodonosnikom je zgornja siva plast na sliki, meja spodnjega vodonosnika in permokarobnske podlage je srednja siva plast, dno modela je spodnja siva plast; z rdečo so označene lokacije geosond in vodnjakov.	10
Slika 4	Karta obravnavanega območja, z rdečo prikazana lokacija predvidenih fakultet.....	11
Slika 5	Geološka karta severnega dela Ljubljanskega Barja (vir: Osnovna geološka karta, List Kranj). Legenda: C,P: karbon, spodnji perm- plasti peščenjaka, meljevca, skrilavca in konglomerata; P: srednji perm-rdeč peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat; ostalo jezerski in barjanski sedimenti, ki prekrivajo aluvialne sedimente.	13
Slika 6	Dno aluvialnih sedimentov na obravnavanem območju - črna črta označuje rob numeričnega modela. V osrednjem delu je podlaga Rožnika, poglobitvi v kamninski podlagi sta vzdolž doline Glinščice proti Dravljam na zahodu ter Ljubljanska vrata na vzhodu Rožnika. Na jugozahodnem delu je vidna Viška terasa.....	14
Slika 7	Prerez vzdolž toka v dolini Glinščice, na levi strani Glince, na desni Vič. Tok v zgornjem vodonosniku (rdeče polje) je od Severozahoda proti jugovzhodu, v spodnjem vodonosniku (oker barva) pa v obratni smeri.	14
Slika 8	Nivoji podzemne vode na obravnavani lokaciji (v spodnjem vodonosniku sta vrtini FFA-P2 in FS-P2 ter izven lokacije še Pz-1/18, medtem ko ostale vrtine kažejo nivo v zgornjem vodonosniku).....	15
Slika 9	Nivoji podzemne vode na obravnavani lokaciji in časovna ekstrapolacija na podlagi piezometra OP-12 (VO-KA).....	16
Slika 10	Karta gladin podzemne vode v zgornjem vodonosniku.....	17
Slika 11	Karta gladin podzemne vode v spodnjem vodonosniku na ožjem območju.	18
Slika 12	Območje modela s prikazanimi hidrostatskimi tlaki (oranžna puščica prikazuje območje fakultet; odebeljena bela črta prikazuje piezometrično gladino podzemne vode.	19
Slika 13	Lokaciji testnih geosond.....	22
Slika 14	Vgradnja opreme za izvedbo poizkusov (levo FS, desno FFA)	23
Slika 15	Stabilizacija med predčrpavanjem kaže na rahlo zniževanje temperature na obeh lokacijah (levo FS, desno FFA)	23
Slika 16	Rezultat TRT preizkusa na FS-124	24
Slika 17	Rezultat TRT preizkusa na FFA-51	24
Slika 18	Prilagajanje analitične računske krivulje k izmerjenim vrednostim za efektivno toplotno prevodnost (brez upoštevanja advekcije in konvekcije) za FS-124	25
Slika 19	Prilagajanje analitične računske krivulje k izmerjenim vrednostim za efektivno toplotno prevodnost (brez upoštevanja advekcije in konvekcije) za FFA-51	25

Slika 20 Prilaganje numerične računske krivulje k izmerjenim vrednostim za efektivno toplotno prevodnost (z upoštevanjem advekcije in konvekcije) za FS-124.....	26
Slika 21 Prilaganje numerične računske krivulje k izmerjenim vrednostim za efektivno toplotno prevodnost (z upoštevanjem advekcije in konvekcije) za FFA-51.....	27
Slika 22 Prikaz površja terena in podlage ter naklona kontakta kvartarnih plasti in podlage vodonosnika ter prepustnosti posameznih plasti.....	30
Slika 23 Gladina podzemne vode (zelena ploskev) v zgornjem in spodnjem vodonosniku z označeno ploskvijo podlage spodnjega vodonosnika	30
Slika 24 Porazdelitev toplotnih in fizikalnih parametrov modela (toplotna prevodnost, volumska kapaciteta toplote, poroznost).....	32
Slika 25 Porazdelitev prepustnosti v območju spodnjega vodonosnika, kalibrirano z vrednotenjem TRT preizkusa (povišana prepustnost v osrednjem delu doline Glinščice).....	32
Slika 26 Letni profil toplotne moči fakultet FFA in FS [kW] in potrebne zmogljivosti zajetja pri odgovarjajočem COP	34
Slika 27 Prikaz simuliranih geosond in vodnjakov znotraj modela (FS in FFA).....	34
Slika 28 Prikaz robnih pogojev modela.....	35
Slika 29 Primerjava merjenih (x-os) in z modelom izračunanih (y-os) vrednosti nivojev podzemne vode (levo podatki za spodnji vodonosnik, desno za zgornji vodonosnik).....	36
Slika 30 Rezultat porazdelitve nivojev v zgornjem vodonosniku. V izrezu zgoraj: Potek nivoja vzdolž tokovnic od Glinč preko območja fakultet in naprej proti Rožni dolini	38
Slika 31 Rezultat porazdelitve nivojev v spodnjem vodonosniku. V izrezu zgoraj: Potek nivoja vzdolž tokovnic od Viča preko območja fakultet in naprej proti Dravljam	39
Slika 32 Vzdolžni prerez po dolini Glinščice. Voda v zgornjem vodonosniku (rdeče območje) teče proti jugovzhodu, voda v spodnjem vodonosniku (oker) pa proti severozahodu.....	39
Slika 33 Situacija predvidenih geosond za FS in FFA	40
Slika 34 Osnovna obremenitev [MWh] za FFA.....	42
Slika 35 Razvoj temperature hladiva brez upoštevanja vršnih obremenitev za FFA.	43
Slika 36 Časovna razporeditev povprečne temperature hladiva na geosondah v odvisnosti od odvzema toplote (hkratna raba FFA in FS).	46
Slika 37 Razporeditev opazovalnih točk v geosferi.	47
Slika 38 Časovna razporeditev temperature na opazovalnih točkah v geosferi v osrednjih delih posameznega polja geosond FFA in FS.	47
Slika 39 Situacija prostorske razporeditve spremembe temperature $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$ po 3 letih obratovanja (levo zelena linija zgornji vodonosnik, desno modra linija spodnji vodonosnik). ...	48
Slika 40 Situacija prostorske razporeditve spremembe temperature $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$ po 10 letih obratovanja (levo zelena linija zgornji, desno modra linija spodnji vodonosnik).	49
Slika 41 Situacija prostorske razporeditve temperature $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$ po 25 letih obratovanja (levo modra linija zgornji vodonosnik, desno oranžna linija spodnji vodonosnik).	49
Slika 42 Prostorska razporeditev spremembe temperature v sedimentih, kamnini in podzemni vodi v odvisnosti od predvidenega odvzema toplote po 3 letih obratovanja. Vpliv je omejen na neposredno okolico geosond.....	49
Slika 43 Prostorska razporeditev spremembe temperature v sedimentih, kamnini in podzemni vodi v odvisnosti od predvidenega odvzema toplote po 10 letih obratovanja. Vpliv se širi le v zgornjem vodonosniku skladno s tokom podzemne vode, v spodnjem je širjenje minimalno. ...	50
Slika 44 Prostorska razporeditev spremembe temperature v sedimentih, kamnini in podzemni vodi v odvisnosti od predvidenega odvzema toplote po 25 letih obratovanja. Vpliv se razširja ca 150 m proti severozahodu v spodnjem in ca 600 m proti jugovzhodu v zgornjem vodonosniku.	50



Slika 45 Prostorsko razširjanje toplotne anomalije zaradi rabe toplote na FFA in FS, kot je podana v IdP, z lokacijami drugih registriranih vodnih virov za rabo podzemne vode za pridobivanje toplote (spremembo $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ predstavlja izoterma št 10).	52
Slika 46 Sprememba temperature zaradi rabe, definirane v IdP, v zgornjem vodonosniku na območjih obravnavanih vodnih dovoljenj v 25 letih delovanja (vpliv je manjši od 1°C).	52
Slika 47 Prostorsko razširjanje toplotne anomalije zaradi rabe toplote na FFA in FS na podlagi optimizacije v PZI, z lokacijami drugih registriranih vodnih virov za rabo podzemne vode za pridobivanje toplote. svetlo modra linija označuje spremembo $\Delta T = 1^\circ\text{C}$	53
Slika 48 Sprememba temperature zaradi rabe, definirane v PZI, v zgornjem vodonosniku na območjih obravnavanih vodnih dovoljenj v 25 letih delovanja (vpliv je manjši od $0,5^\circ\text{C}$).	53
Slika 49 Razporeditev geosond in pilotov na območju FFA in FS.....	54

Preglednice

Preglednica 1 Statistike nihanja nivoja podzemne vode	16
Preglednica 2 Lokaciji obeh tesnih geosond	22
Preglednica 3 Parametri izvedbe TRT z začetnim in končnim časom izvedbe	23
Preglednica 4 Uporabljene vrednosti hidravličnih in toplotnih parametrov (poševno natisnjene vrednosti so ocenjene; tlak +/- označuje obe nezasičeni in zasičeni coni)	31
Preglednica 5 Predvidena raba energije in obremenitev na vir za FS z upoštevanim COP	33
Preglednica 6 Raba energije in obremenitev na vir za FFA z upoštevanim COP	33
Preglednica 7 Glavne lastnosti predvidenih geosond	41
Preglednica 8 Temperature hladiva [$^\circ\text{C}$] ob koncih posameznih mesecev za izbrana leta obratovanja za FFA.....	43
Preglednica 9 Dopustna raba energije in obremenitev na vir za FFA z upoštevanim COP pri 150 geosondah s ocenjenim trajanjem vršne rabe ter ocenjenimi razmerji med mesečnimi rabami (natisnjeno poševno).....	44
Preglednica 10 Podeljene vodne pravice za pridobivanje toplote (maj 2022)	51
Preglednica 11 Globine, razporeditev in število geosond in pilotov ter vpliv na transmisivnost.....	55

1. UVOD

Za potrebe rabe plitve geotermalne energije smo izdelali načrt zajema na podlagi računskih analiz termičnega odziva podtalja s hidrogeološkim numeričnim modelom toka podzemne vode in prenosa toplote ter z analitičnim modelom za optimizacijo polja geosond, kot ju predstavljamo v nadaljevanju. Na dveh sosednjih območjih se hkrati načrtujeta podobna, a investicijsko ločena posega Fakultete za farmacijo (v nadaljevanju FFA) in Fakultete za strojništvo (v nadaljevanju FS). Zaradi medsebojnih vplivov, kot je bilo pokazano že v Idejnem elaboratu, se obdelujeta obe lokaciji hkrati.

Na lokaciji so bile izvedene geološke in hidrogeološke preiskave ter na testnih geosondah še preiskave toplotnih parametrov za potrebe zajema toplote.

Na obravnavanem območju pod slabo prepustnim glinastim prekrovom nastopata dva srednje do dobro prepustna aluvialna vodonosnika, ki sta odložena nad permokarbonsko podlago.

Struktura in vsebina tega poročila je skladna z ASTM D 5718-95 (2000) in z njim povezanimi ASTM standardi za poročanje o izdelavi hidrogeološkega modela. Namen standarda je zagotavljati sledljivost podanega izračuna.

Natančneje je sama tehnična rešitev vrtnja vrtin za objekte za zajem toplote (geosonde), vgradnja in cementacija podana v ločenih načrtih.



Slika 1 Obravnavana lokacija bodoče fakultete (rumena puščica).



1.1 Izrazi in standardi

»Geotermična sonda (= geosonda)« je krožna cevna napeljava, lahko koaksialna, lahko v obliki črke enojni U (simplex) ali dvojni U (duplex), vgrajena v izkop ali vrtino. Cevi geosonde so zapolnjene s prenosnikom toplote, ki tako kroži v zaprtem sistemu cevi, napeljanih v izkopu ali vrtini. Prenosnik toplote pri tem izmenjuje z okolico toploto, ki se nato uporablja za gretje ali hlajenje [SIA , str. 7].

»Prenosnik toplote« (EK, 2013: »sredstvo za prenos toplote«, ZRud-1: »nosilec za odvzem toplotne energije«) je v splošnem mešanica tekočin, odporna proti zmrzovanju, ali voda, ki kroži v ceveh (npr. geosonde) in prenaša toplotno energijo iz okolice v toplotno črpalko [SIA 384/6, str. 7].

»Hladivo« je posebna snov, ki kroži v toplotni črpalki in se upari že pri nižjih temperaturah (npr. 0 °C–35 °C), tako da lahko s spremembo svojega agregatnega stanja prenese toploto iz okolice v ogrevalni sistem. Hladivo v uparjalniku odvzame toploto prenosniku toplote iz okolice in se upari. Uparjeno hladivo nato potuje skozi kompresor, kjer se mu zaradi vložene mehanike dela-kompresije zvišata tlak in temperatura. V kondenzatorju nato uparjeno hladivo kondenzira in pri tem odda toploto v ogrevalni sistem. Utekočinjeno in ohlajeno hladivo nato potuje skozi dušilni ventil, kjer ekspanzira na nižji tlak in gre od tam nazaj v uparjalnik.

»Zapolnitev (snov zapolnitve)« je material za zapolnitev praznega prostora med cevmi geosonde in steno vrtine [SIA 384/6, str. 9].

Uporabljeni viri in standardi:

- DIERSCH, H.-J., 2014: FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg.
- ASTM Standard D 5718-95 (Reapproved 2000) Standard Guide for Documenting a Ground-Water Flow Model Application. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.08.
- ASTM Standard D 5880-96 (Reapproved 2000) Standard Guide for Subsurface Flow and Transport Modeling. Annual Book of ASTM Standards
- ASTM Standard D 5609-94 (Reapproved 2002) Standard Guide for Defining Boundary Conditions in Ground-Water Flow Modeling. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.08.
- ASTM Standard D 5610-94 (Reapproved 2002) Standard Guide for Defining Initial Conditions in Ground-Water Flow Modeling. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.08
- ASTM Standard D 5981-96 (Reapproved 2002) Standard Guide for Calibrating a Ground-Water Flow Model Application. Annual Book of ASTM Standards
- ASTM Standard D 5490-93 (Reapproved 2002) Standard Guide for Comparing Ground-Water Flow Model Simulations to Site-Specific Information. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.08
- ASTM Standard D 5611-94 (Reapproved 2002) Standard Guide for Conducting a Sensitivity Analysis for a Ground-Water Flow Model Application. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.08
- ASTM Standard D 6033-96 (Reapproved 2002) Standard Guide for Describing the Functionality of a Ground-Water Modeling Code. Annual Book of ASTM Standards



1.2 Namen izdelave numeričnega modela

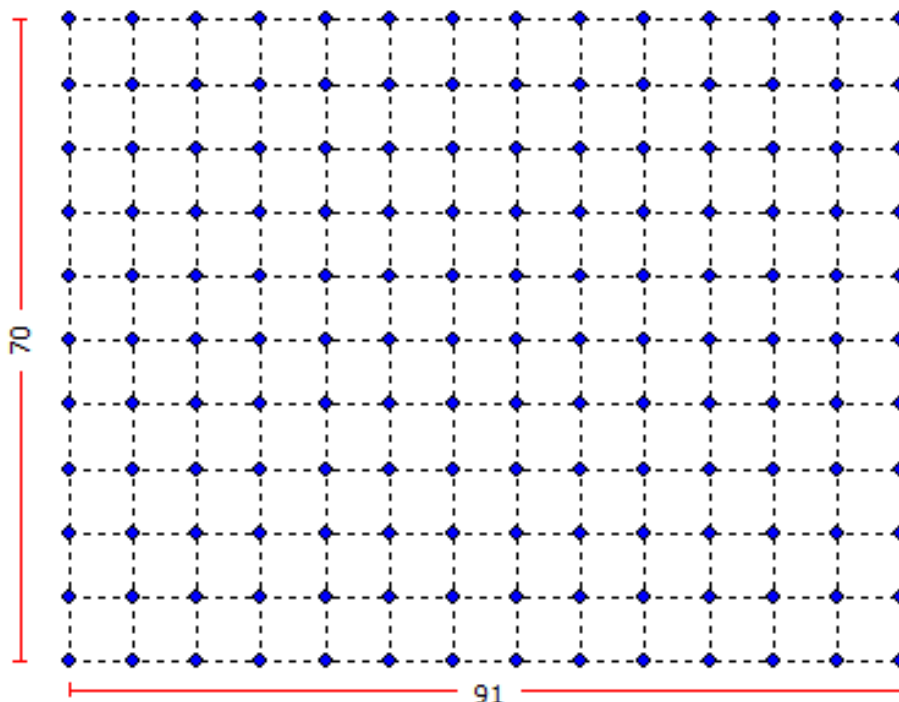
Pri zajemu geotermalne energije za potrebe ogrevanja in hlajenja objektov FFA se bo porozni medij prekrova / vodonosnika / podlage odzval na ciklično izkoriščanje termalne energije pri dani toplotni moči do 1,1 MW (ogrevanje) in 1,1 MW (hlajenje).

Namen izdelave analitičnega modela optimizacije polja geosond je preverba možnih razporeditev, števila in globin geosond pri hkratnem sledenju temperature hladiva pri dani predvideni zasnovi dvojne U zanke.

Namen izdelave numeričnega matematičnega modela je določitev velikosti odziva pri predvidenem številu in lokacijah geosond, trajnostne vzdržnosti sistema in podajanja smernic pri projektiranju sistema. Pri modeliranju se zasleduje različne cilje, med drugim preprečevanje zamrzovanja sedimentov in kamnin, idr.

1.3 Funkcija modela

Izračuni z analitičnim modelom so zasnovani na način številnejših poenostavljenih hitrih izračunov zajema/ponikanja toplote v območju s prevladujočim konduktivnim prenosom toplote. Na dani lokaciji gre zaradi s preiskavami ugotovljenega toka podzemne vode za konzervativni pristop, ki pa daje prvo računsko oceno potrebnega števila geosond na podlagi izmerjenih toplotnih podatkov. Cilj tega dela preračunov je določiti konfiguracijo geosond, preko katere bo mogoče odvzemati /ponikati želene količine toplote ob hkratnem izogibanju pogostim neželenim pojavom.

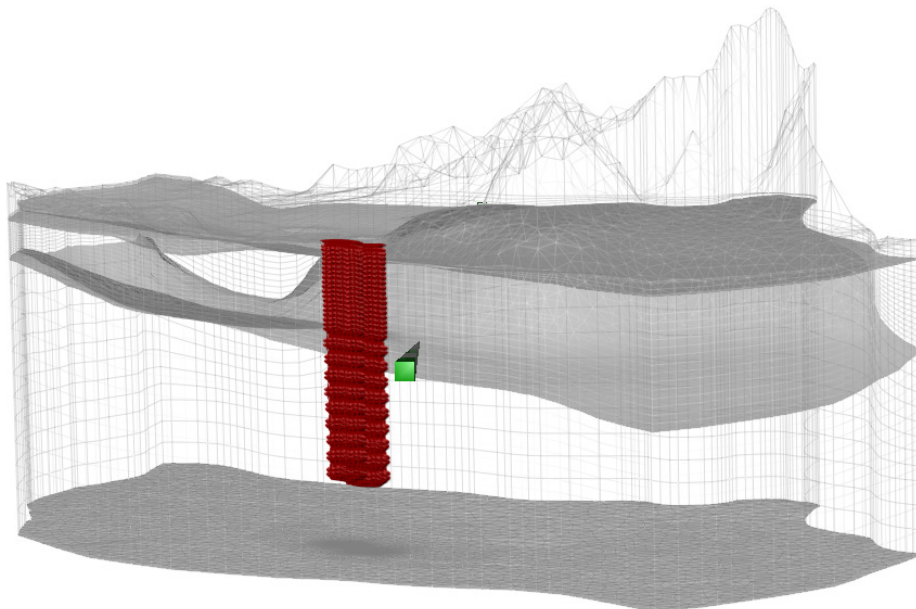


Slika 2 Izhodiščna mreža geosond za optimizacijo z analitičnim modelom.

Hidrogeološki numerični model pa ob konduktivnem prenosu toplote izračunava še tok podzemne vode in prenos toplote (z advekcijo in konvekcijo) v obeh kvartarnih meljasto peščeno prodnatih vodonosnikih, glinenem prekrovu, vmesni zaporni plasti med vodonosnikoma in permokarbonski podlagi na območju fakultet. Simulirani so vsi najpomembnejši procesi, ki vplivajo na dinamiko toka podzemne vode in prenosa toplote v hidrogeološko relevantni okolici objekta:

1. napajanje plastovitih heterogenih in anizotropnih sedimentov s strani kvartarnih vodonosnikov gorvodno (iz smeri Glinč v zgornjem in iz smeri Viča v spodnjem aluvialnem vodonosniku) ter
2. vnos zaledne podzemne vode v model s konstantno temperaturo ob hkratnem odzemanju / ponikanju toplote preko geosond / vodnjakov.

Zaradi pomanjkanja podatkov niso simulirani: hidravlični in termični odnos Glinščice in vodonosnika in sezonska spremenljivost nivojev in temperature podzemne vode v kvartarnem vodonosniku. Zaradi slabe prepustnosti krovnih glinastih plasti prav tako ni vključena analiza napajanja iz padavin. Za navedene procese, ki niso vključeni sicer ocenjujemo, da imajo rezultate modela glede na njegov namen zanemarljiv vpliv.



Slika 3 Osnovi elementi modela: zgornja plast predstavlja teren, ki se prične vzpenjati proti Rožniku; osrednja ločilna plast med zgornjim in spodnjim vodonosnikom je zgornja siva plast na sliki, meja spodnjega vodonosnika in permokarbonske podlage je srednja siva plast, dno modela je spodnja siva plast; z rdečo so označene lokacije geosond in vodnjakov.

Za potrebe simuliranja spreminjanja temperature v podtalju na območju objekta smo tako izdelali model prostorskega razširjanja termičnih motenj, ki so posledica odzema / ponikanja toplote. V tem izračunu smo vrednotili naslednje parametre:

- obratovanje danega števila, globine in konfiguracije geosond,
- časovni razvoj spreminjanja temperature v podtalju glede na ocenjeno dinamiko odzema / ponikanja toplote

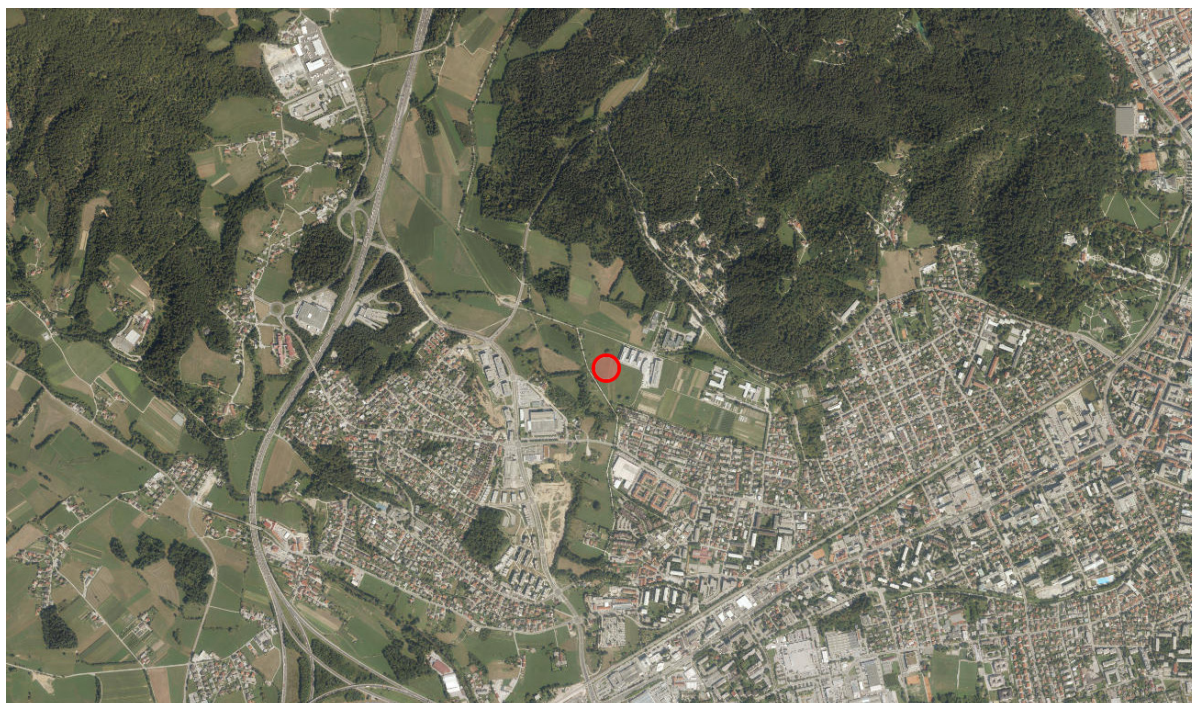
Na podlagi teh ugotovitev so izdelane tudi usmeritve projektantu za izdelavo načrta izvedbe geosond/vodnjakov ter spremljajočih preizkusov.



1.4 Splošne geološke in hidrogeološke razmere

Obravnavano površje območja predstavlja glineni prekriv, pod katerim se nahajajo srednje do dobro prepustni kvartarni sedimenti v zgornjem vodonosniku, ki predstavljajo odprt do občasno lokalno zaprt vodonosnik in so odloženi na vmesno zaporno plast gline. Ta ločuje zgornji in spodnji aluvialni vodonosnik, ki je odložen na permokarbonsko podlago iz glinastih skrilavcev in kremenovih peščenjakov. Permokarbonska podlaga na lokaciji je ugotovljena na 55 m pod koto terena na obeh lokacijah testnih geosond.

Gre za blago padajoč teren, ki se od severozahoda proti jugovzhodu razprostira vzdolž doline Glinščice, na severovzhodni strani je obdan s hribovjem Rožnika, proti jugu pa se rahlo dvigne Viška terasa, preden se teren ponovno spusti na osrednji del Ljubljanskega Barja. Večji del širšega obravnavanega območja, ki ga prikazuje Slika 4, predstavlja obrobje urbane poselitve.



Slika 4 Karta obravnavanega območja, z rdečo prikazana lokacija predvidenih fakultet

1.5 Vodonosni sistem

V nadaljevanju so opisane hidrogeološke razmere, relevantne za tok podzemne vode in zajem toplote. Hidrogeološke razmere lahko opredelimo kot hidrodinamsko kompleksne, litološko heterogene in anizotropne, prav tako je raznolika smer in hitrost toka podzemne vode in sicer tako lateralno, kot tudi po različnih plasteh.

Obdelovan vodonosni sistem se že izkorišča tako za izrabo toplote, kot tudi za oskrbo prebivalstva s pitno vodo. Lokacija se tako nahaja v vodovarstvenem območju virov pitne vode in sicer vodni vir Brest, ki je zaščiten z državno uredbo o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnikov Ljubljanskega barja in okolice Ljubljane (Uradni list RS, št. 115/07, 9/08 –



popr., 65/12 in 93/13). Posamezni elementi rabe vode, ki se nahajajo v vplivnem območju posega, so podani pri rezultatih numerične analize.

1.5.1 Hidrogeološka zgradba območja

Modeliran porozni medij predstavlja severni del Ljubljanskega barja in je sestavljen iz več hidrogeoloških enot z zelo različnimi hidravličnimi in toplotnimi lastnostmi. Natančnejši litološki popisi raziskovalnih vrtin na območju so podani v predhodnih hidrogeoloških poročilih, v nadaljevanju podajamo relevanten izvleček za potrebe izdelave modela.

Glineni prekrov in zgornji vodonosnik

Pod ca 1m debelim glinenim prekrovom se na ožjem obravnavanem območju podzemna voda nahaja v aluvialnih plasteh t.i. zgornjega vodonosnika, ki sestoji in dobro graduiranega proda z meljem in peskom. Debelina zgornjega vodonosnika znaša v povprečju 8,8 m in se giblje od 7 do 9,8 m na ožjem območju fakultet. Hidrodinamsko gre za odprt vodonosnik z občasnimi lokalnimi prehodi v zaprtega.

Vmesna zaporna glinena plast

Zgornji vodonosnik je odložen za plast sive puste gline, ki v hidrogeološkem smislu deluje kot zaporna plast, na kateri se voda v zgornjem vodonosniku nahaja kot viseča podzemna voda. Debelina glinene plasti znaša v povprečju 2,5 m, v prostoru pa se giblje med 0,9 in 3,5m.

Spodnji vodonosnik

Pod glino se nahaja najprej od 0,4 do 3,6 m debela plast nezasičenega drobnozrnatega glinastega peska, pod njo pa debelejša zaporedje srednje prepustnih zameljenih in zaglinjenih prodov. V prodnih plasteh t.i. spodnjega vodonosnika gladina podzemne vode niha prosto v odvisnosti od pretežno podzemnega napajanja s strani Ljubljanskega Barja. Debelina spodnjega vodonosnika na ožjem območju lokacije še ni poznana, ocenjujemo jo na 35 - 45 m, oziroma do globine med 50 in 60 m pod terenom.

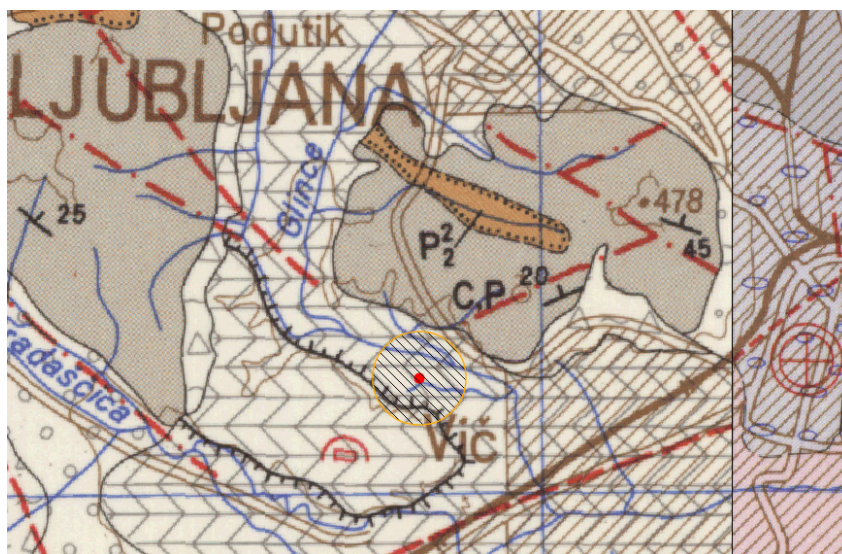
Kamninska podlaga

Podlago spodnjega vodonosnika tvorijo permokarbonske kamnine, predvidoma glinasti skrilavci in kremenov peščenjak.

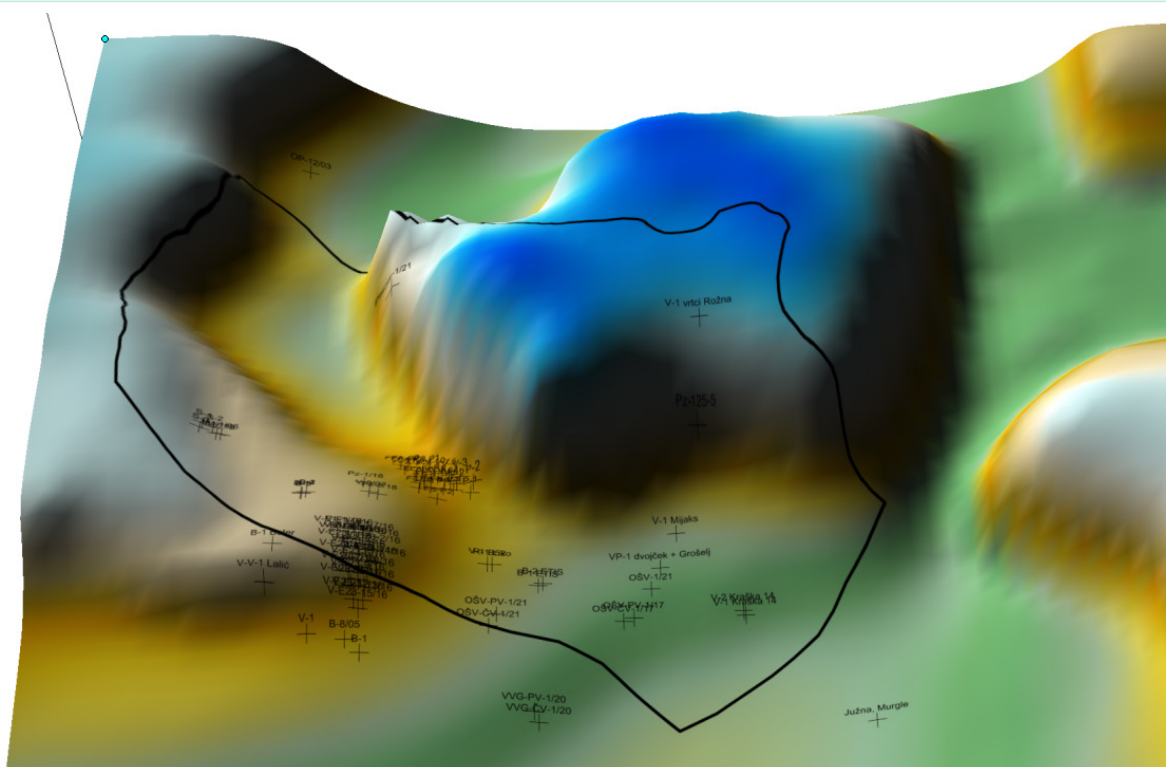
Na širšem obravnavanem območju je za potrebe simuliranja toka podzemne vode in zajeta toplote pomembna še vloga Viške terase na jugu. Na njej je zaporedje zgoraj navedenih plasti zelo podobno, pri čemer pa se nekoliko razlikujejo predvsem debeline posameznih plasti. Tako se največja razlika opazi pri debelini zgornjega visečega vodonosnika, ki tu znaša le še v povprečju nekaj več kot 1 m, največ pa 3 m, pri čemer pa na mestih povsem izklinja. Po drugi strani se spodnji vodonosnik začne že na okoli 6 m pod terenom za razliko od ~13 m pod terenom v dolini Glinščice na območju fakultet. Ta razmerja kažejo na verjetno odlaganje sedimentov ob sočasnem relativnem pogrezanju današnje doline Glinščice vzdolž preloma (Slika 5 in Slika 6).

Zaradi relativne razlike v višinah med Viško teraso in dolino Glinščice se na prehodu podzemna voda v zgornjem vodonosniku preliva iz terase v dolino, prav tako pa zaradi vmesnih zapornih plasti voda v spodnjem vodonosniku teče skozi njih s povišanim hidravličnim gradientom.

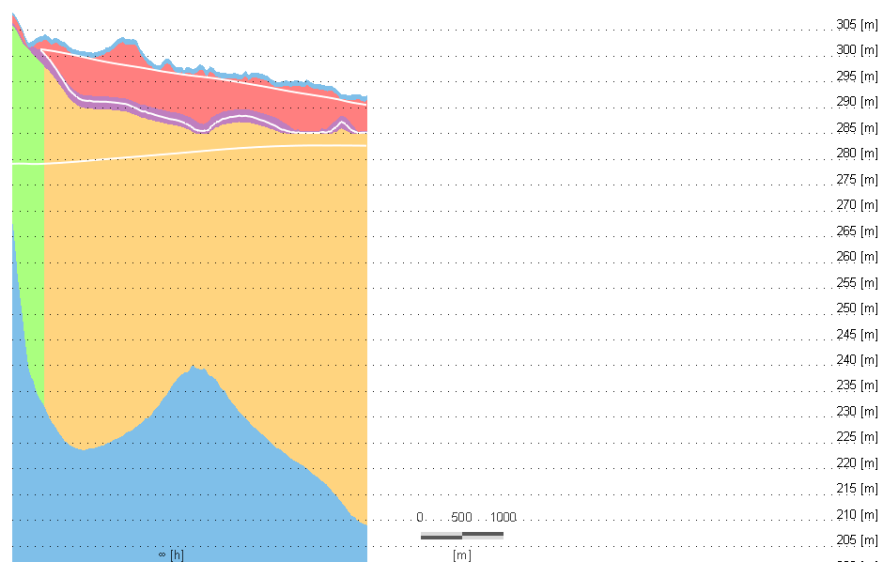
Dana hidrogeološka zgradba je privedla do pojava toka podzemne vode v dveh vodonosnikih v praktično nasprotni smeri, pri čemer se voda v zgornjem visečem vodonosniku pretaka od Glinca proti Rožni dolini in ljubljanskim vratom (območje med Rožnikom in grajskim hribom), v spodnjem pa od Viča proti Dravljam in naprej na Ljubljansko polje. Predstavljen hidrodinamski pojav je prikazan tudi na spodnji sliki kot rezultat simulacije vzdolž doline Glinščice.



Slika 5 Geološka karta severnega dela Ljubljanskega Barja (vir: Osnovna geološka karta, List Kranj). Legenda: C,P: karbon, spodnji perm- plasti peščenjaka, meljevca, skrilavca in konglomerata; P: srednji perm-rdeč peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat; ostalo jezerski in barjanski sedimenti, ki prekrivajo aluvialne sedimente.



Slika 6 Dno aluvialnih sedimentov na obravnavanem območju - črna črta označuje rob numeričnega modela. V osrednjem delu je podlaga Rožnika, poglobitvi v kamninski podlagi sta vzdolž doline Glinščice proti Dravljam na zahodu ter Ljubljanska vrata na vzhodu Rožnika. Na jugozahodnem delu je vidna Viška terasa.



Slika 7 Prerez vzdolž toka v dolini Glinščice, na levi strani Glince, na desni Vič. Tok v zgornjem vodonosniku (rdeče polje) je od Severozahoda proti jugovzhodu, v spodnjem vodonosniku (oker barva) pa v obratni smeri.

Na severovzhodu se vse prepustne aluvialne plasti, kakor tudi vmesna zaporna plast izklinjajo ob Rožniku, ki je sestavljen iz permokarbonskih slabo prepustnih kamnin.

1.5.2 Dinamika nihanja nivojev podzemne vode

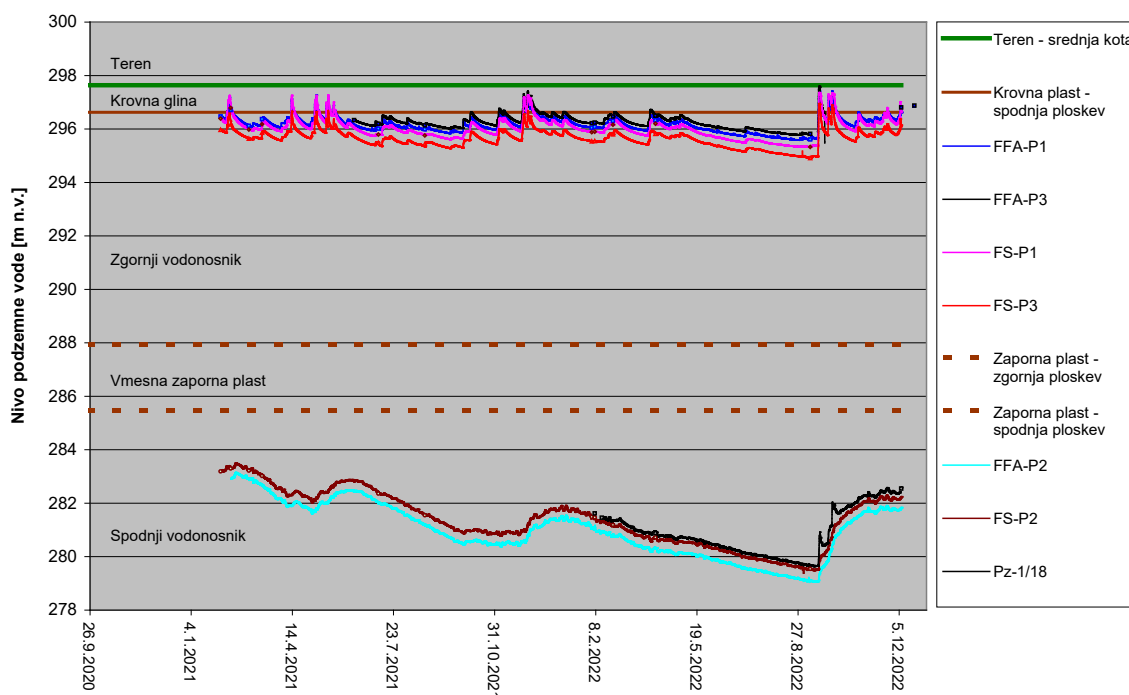
Dinamika nihanja nivojev je podana na podlagi rezultatov zveznih meritev v piezometrih na lokaciji fakultet FFA in FS ter razpoložljivih okoliških meritev. Prikazana je dinamika ločeno za zgornji in spodnji vodonosnik (Slika 8). Prav tako je podlagi podatkov VO-KA Ljubljana in piezometra OP-12 preko sintetičnega diagrama izdelana časovna ekstrapolacija nivojev v spodnjem vodonosniku (Slika 9).

Podzemna voda se v zgornjem visečem vodonosniku nahaja na koti med 295,3 in 297,6 m.n.v. (praktično na koti terena), pri čemer v prevladujočem stanju nivo ne doseže spodnje ploskve krovne glinene plasti, nad njo se povzpne le v času visokih nivojev in s tem preide v zaprt hidrodinamski režim. Iz dosedanjih podatkov monitoringa je razvidno, da se tak prehod pojavi za obdobje od 1 do 7 dni, nato se nivo ponovno spusti pod krovno plast.

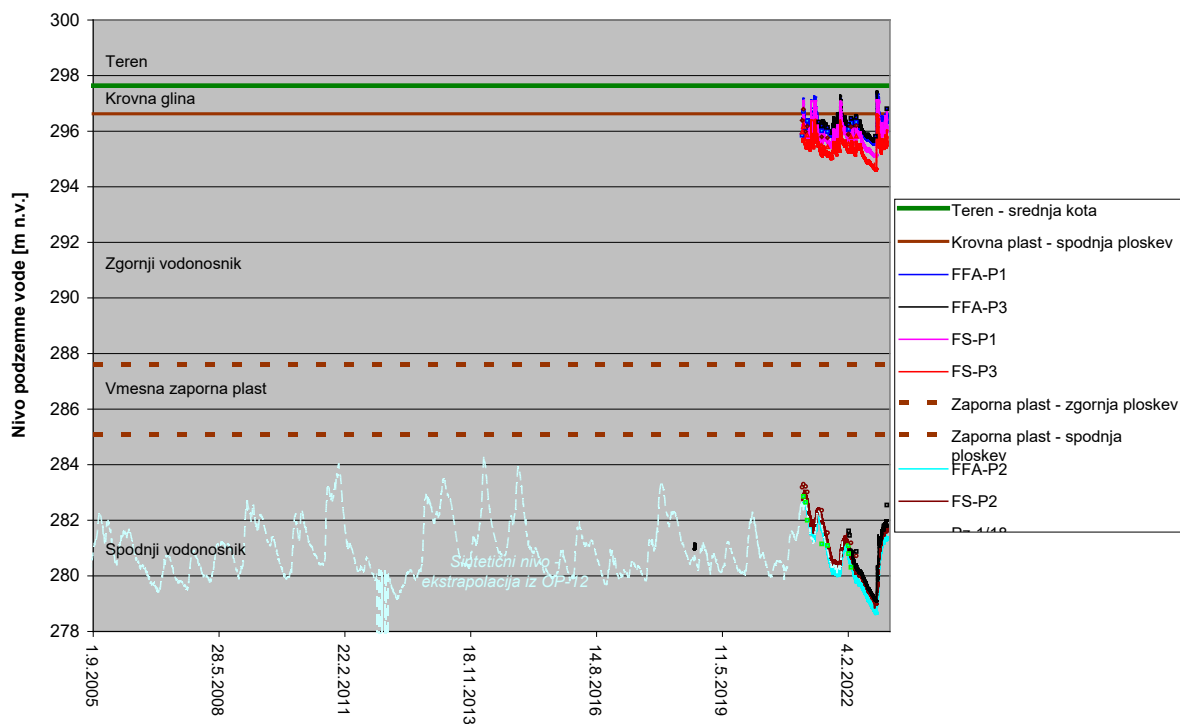
V spodnjem vodonosniku se je v času meritev na lokaciji podzemna voda gibala med 280,2 in 283,5 m n.v. (Slika 8), če pa upoštevamo še ekstrapolacijo na podlagi OP-12 pa lahko interval nihanja ocenimo vsaj na območje med 279,8 in 284,8 m n.v. V vsakem primeru se podzemna voda v spodnjem vodonosniku nahaja v odprtem hidrodinamskem režimu, saj tudi v visokih vodnih stanjih ne doseže vmesne zaporne plasti (Slika 9).

V vmesni zaporni plasti se hidrostatski tlak znižuje od zgornjega dela plasti proti spodnjemu in sicer od tlaka, ki odgovarja nivoju v zgornjem vodonosniku, proti tlaku, ki je enak 0, v spodnjem delu plasti. Smer toka v tej plasti je v splošnem vertikalna in usmerjena navzdol.

Nihanje nivoja podzemne vode v permokarbonskih (PC) kamninah ni merjeno, ocenjujemo pa, da je do relevantnih analiziranih globin srednji tlak v PC kamninah nekoliko višji od srednjega piezometričnega tlaka v spodnjem vodonosniku, pri čemer pa je amplituda nihanja precej nižja.



Slika 8 Nivoji podzemne vode na obravnavani lokaciji (v spodnjem vodonosniku sta vrtini FFA-P2 in FS-P2 ter izven lokacije še Pz-1/18, medtem ko ostale vrtine kažejo nivo v zgornjem vodonosniku).



Slika 9 Nivoji podzemne vode na obravnavani lokaciji in časovna ekstrapolacija na podlagi piezometra OP-12 (VO-KA).

	Minimum	Maksimum	Mediana	Povprečje	Razpon
FFA-P1	295,58	297,28	296,12	296,14	1,70
FFA-P3	295,78	297,43	296,23	296,25	1,65
FS-P1	295,32	297,28	295,97	295,98	1,96
FS-P3	294,91	296,69	295,63	295,61	1,78
FS-P2	278,21	283,51	281,29	281,07	5,30
FFA-P2	279,04	283,15	280,86	280,97	4,11
Pz-1/18	280,28	281,71	280,79	280,89	1,43
OP-12	278,21	280,87	279,45	279,41	2,66

Preglednica 1 Statistike nihanja nivoja podzemne vode

1.5.3 Smer toka podzemne vode

Smer toka podzemne vode je na obravnavanem območju različna za zgornji in spodnji vodonosnik. Tako je v zgornjem vodonosniku tok usmerjen od severozahoda proti jugovzhodu, pri čemer znaša gradient med $2,5 \times 10^{-3}$ in $3,7 \times 10^{-3}$ [-]. Smer toka v zgornjem vodonosniku je glede na razpoložljive podatke iz Rožne doline, Brda in Viča (iz sicer različnih obdobj) generalno skladen s smerjo Glinščice. Pri tem odnos podzemne in površinske vode na območju ni detajlno kvantificiran, saj se na območju sistematično merijo zgolj nivoji podzemne vode. Za potrebe modela ocenjujemo, da je nivo površinske vode tu blizu nivoja podzemne vode.

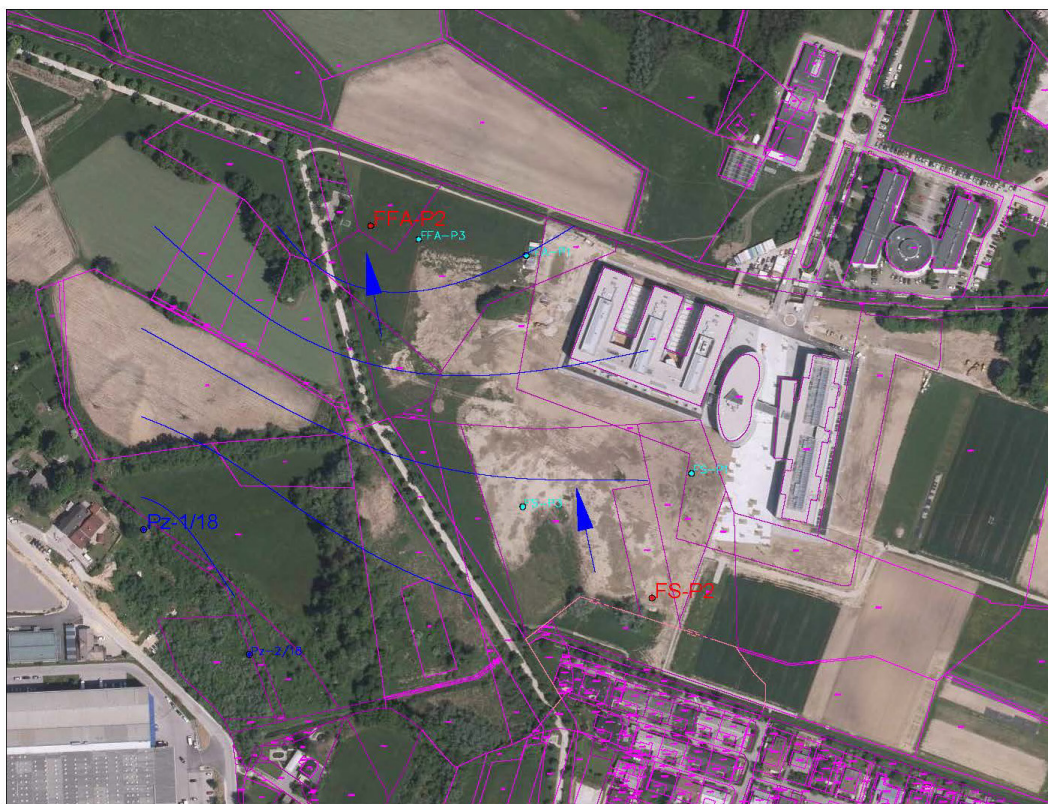


Slika 10 Karta gladin podzemne vode v zgornjem vodonosniku.

Podzemna voda iz Ljubljanskega Barja se v Ljubljansko polje steka tako zahodno vzdolž doline Glinščice, kot vzhodno od Rožnika skozi Ljubljanska vrata med Rožnikom in grajskim hribom. Smer toka v spodnjem vodonosniku je tako na obravnavanem območju od jugovzhoda proti severozahodu. Tok je vzdolž poglobitve, ki sovпада z dolino Glinščice, in je torej usmerjen obratno od toka Glinščice in podzemne vode v zgornjem vodonosniku. Pri tem znaša gradient med $1,3 \times 10^{-3}$ na ožjem območju in $8,3 \times 10^{-4}$ [-] dolvodno od fakultet proti Dravljam. Vzhodno od Rožnika je gradient v spodnjem vodonosniku ca $3,4 \times 10^{-3}$ [-].

Matematična interpolacija nivojev v spodnjem vodonosniku brez upoštevanja hidrogeološke zgradbe kaže lokalno nekoliko popačeno sliko in navidezen odtok primarno proti severu. Ob upoštevanju prepustnosti sedimentov na lokaciji Pz-1/18 zahodno od fakultet, ki je za red velikosti nižja od prepustnosti na lokaciji fakultet, ter ob upoštevanju napajanja iz Viške terase pa je mogoče sklepati, da je potrebno nivo v vrtini Pz-1/18 jemati v kontekstu hidrogeološke zgradbe. Generalna smer toka v spodnjem vodonosniku tako ne more bistveno odstopati od

usmerjenosti sedimentov spodnjega vodonosnika in njihovih robov, torej vzdolž doline Glinščice.



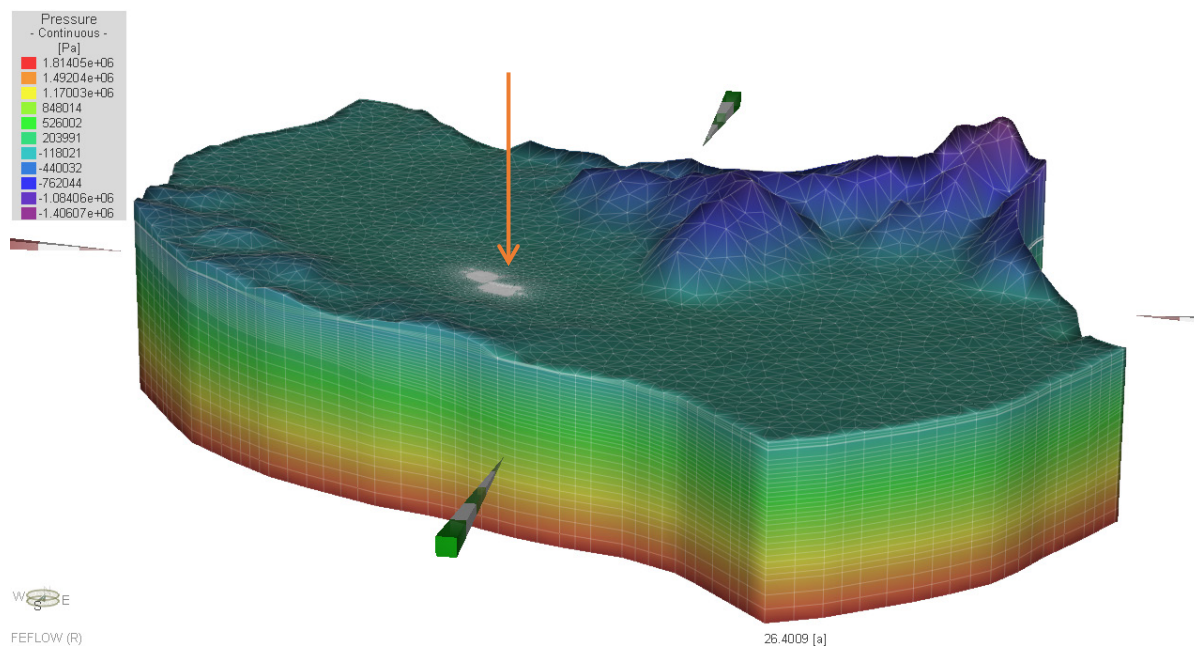
Slika 11 Karta gladin podzemne vode v spodnjem vodonosniku na ožjem območju.

Tok podzemne vode je simuliran preko vodonosnikov kot horizontalen, v permokarbonski podlagi pa se lahko javlja različno velika vertikalna komponenta toka pod vplivom gravitacijskih tokov.

1.6 Hidrološke in toplotne meje

V nadaljevanju podajamo glavne hidrološke in toplotne meje modela, pri čemer so podane tako pozitivne hidrogeološke in toplotne meje (zunanji rob modela gorvodno), kot negativne hidrološke meje (v manjši meri globlje ležeča podlaga vodonosnika), medtem ko so linijske meje (geosonde, vodnjaki) zaradi načina obdelave v programski kodi (discrete feature element) podane v poglavju 1.8 Točkovni elementi modela.

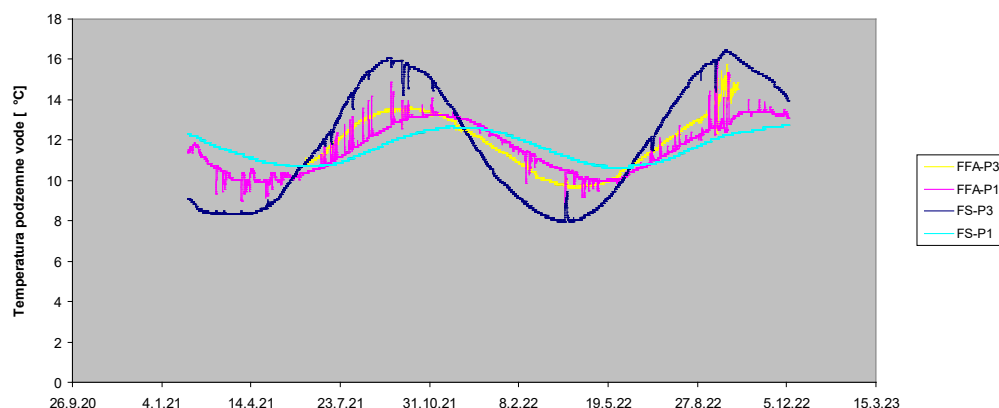
Predvideni objekti se nahajajo med Viško teraso in vzpetino Rožnika v dolini Glinščice. Ker eventualna hidravlična, posebej pa toplotna omejenost z Glinščico ni gotova, je model razširjen na primerno lateralno oddaljenost od ustvarjene temperaturne motnje in poteka po tokovnici podzemne vode v kvartarnem vodonosniku. Prav tako je model razširjen proti jugovzhodu in severozahodu do znanih nivojev na podlagi razpoložljivih podatkov.



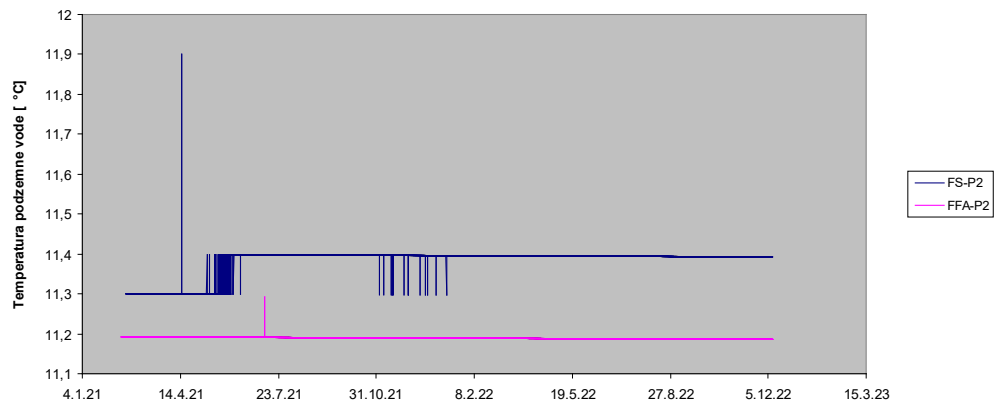
Slika 12 Območje modela s prikazanimi hidrostatskimi tlaki (oranžna puščica prikazuje območje fakultet; odebeljena bela črta prikazuje piezometrično gladino podzemne vode).

Povprečna temperatura zraka na obravnavanem območju znaša 12,1°C (postaja Bežigrad, obdobje zadnjih 10 let), medtem ko je izmerjena temperatura podzemne vode med prvim letom opazovalnega monitoringa znašala za:

- zgornji vodonosnik (slika spodaj):
 - povprečna temperatura v 2021/22 znaša 12,0°C;
 - amplituda nihanja temperature znaša 2°C na FS-P1, 3,3° v FFA-P1 (tudi za 6,2°, če upoštevamo kratkotrajna zatekanja s površja ali iz Glinščice), 4° v FFA-P3 ter 8,1 °C v FS-P3.
 - Pri tem se najvišja temperatura pojavi ob različnih časih in sicer konec septembra v FS-P3, v prvi polovici oktobra v FFA-P3, v začetku novembra v FFA-P1 ter v začetku decembra v FS-P1.



- Spodnji vodonosnik (slika spodaj):
 - Temperatura znaša 11,35°C na gorvodni FS-P2 in 11,2 °C na dolvodni FFA-P2
 - Temperatura je praktično nespremenljiva skozi celotno sezono, nihanje je, če izvajamo eno anomalijo na FS-P2, znotraj 0,1 °C.



- Temperatura v permokarbonskih kamninah je ocenjena kot konstantna za potrebe izračuna ter enaka temperaturi v spodnjem vodonosniku (zanemarjen temperaturni gradient oz. zemeljski toplotni tok).

Zgoraj navedene toplotne razmere smo v modelu upoštevali kot konstantno vhodno temperaturo 11°C, kar merodajno odraža stanje v spodnjem vodonosniku in permokarbonskih kamninah, ki po debelini predstavljata pretežni del izkoriščanih plasti, za zgornji vodonosnik pa privzeta vrednost predstavlja konzervativno oceno z vidika potreb ogrevanja.

1.7 Hidravlične in toplotne lastnosti sistema

Vhodni parametri sedimentov na območju so za prepustnost meljasto peščeno prodnatih in glinenih kvartarnih plasti povzeti po rezultatih terenskih preiskav, medtem ko so za permokarbonske kamnine ocenjeni.

Toplotni parametri so bili testirani na dveh testnih geosondah (pon ena na FFA in ena na FS), rezultate podaja poglavje 2.

Končne uporabljene vrednosti parametrov prikazuje Preglednica 4, poglavje 4.2.

1.8 Točkovni elementi modela

Po pregledu razpoložljivih evidenc ugotavljamo, da na obravnavanem območju danes ni točkovnih elementov, iz katerih bi v sistem dotekala ali iz njega odtekala podzemna voda ali toplota in ki bi vplivali na stanje na lokaciji fakultet.

Bodoči točkovni elementi so:

- geosonde, ki hidravlično minimalno vplivajo na vodonosnik, intenzivno pa odzemajo in ponikajo toploto.

Delno na tok podzemne vode v začetnem obdobju po vgradnji pa tudi na temperaturo podzemne vode vplivajo predvideni piloti. Zaradi velike razdalje med njimi je bil učinek zmanjšanja transmisivnosti v tej simulaciji zanemarjen, prav tako je bil zanemarjen vpliv ohlajanja pilotov ob strjevanju cementa.



Vpliv pilotov in geosond na transmisivnost vodonosnika za potrebe ugotavljanja skladnosti z zahtevami vodovarstvene uredbe prikazuje poglavje 7.

1.9 Vodna bilanca

Na območju fakultet predstavljajo vhodne komponente vodne bilance permokarbonskega vododržnika dotoki vode iz okoliških zaledij oz. vzpetin, izhodne pa kvartarni sedimenti jugovzhodno od območja za zgornji vodonosnik in severozahodno od območja za spodnji vodonosnik. Dotoke v kvartarne sedimente predstavljajo tudi napajanje iz padavin, manjših vodotokov iz Rožnika, ter antropogeni faktorji, kot je puščanje kanalizacije.

Odtok in dotok toplote je skozi geosonde in vodnjake ter iz zaledja za simuliranje izmerjenega naravnega toplotnega stanja podzemne vode.

2. TEST TOPLOTNEGA ODZIVA (TRT)

V idejni fazi je bil izveden izračun na podlagi tabeliranih literaturnih vrednosti toplotnih parametrov, v nadaljevanju pa smo na 2 poizkusnih geosondah izmerili še toplotni odziv za boljšo karakterizacijo podtalja na obravnavanem območju. Vsi nadaljnji izračuni, izvedeni v tej fazi, so tako opravljeni na podlagi kalibriranega modela podtalja. S testom toplotnega odziva (TRT oz. thermal response test) smo ugotavljali efektivne toplotne parametre, ki predstavljajo kompozitne vrednosti, ki so posledica tako toplotnih parametrov podtalja, toka podzemne vode, lastnosti geosonde in načina izvedbe testa. V nadaljevanju je opisan potek izvedbe testa ter njegova obdelava, ki upošteva tako kondukcijski kot konvekcijski prenos toplote.

2.1 Izvedba TRT poizkusa

Test toplotnega odziva podtalja je bil izveden na dveh testnih geosondah in sicer po eni na območju FS in eni na območju FFA, pri čemer sta bili lokaciji izbrani na način, da bi predstavljali čim bolj ustrezno izhodišče za interpolacijo celotnega ožjega obdelovanega območja fakultet. Lokacijo in koordinate obeh testnih geosond podajata spodnja slika in tabela. Obe testni geosondi sta locirani na način, da ustrezata končnemu predvidenemu rastru geosond, in ju je mogoče vklopiti v končno rabo energije plitve geotermije.



Slika 13 Lokaciji testnih geosond

Preglednica 2 Lokaciji obeh testnih geosond

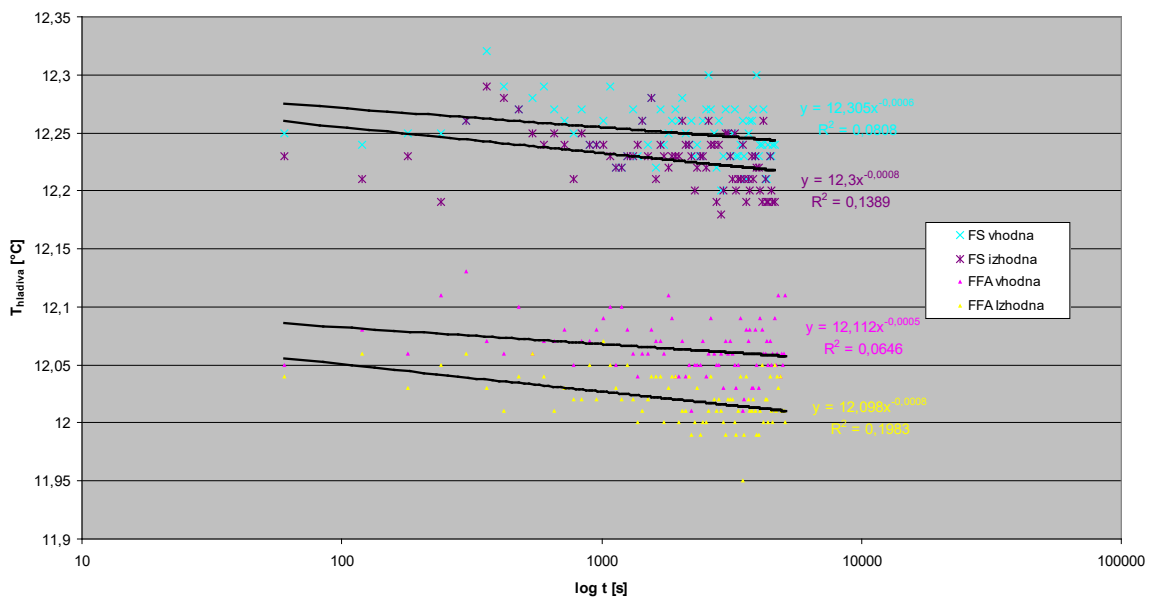
Ime	GK X	GK Y	Globina [m]	Premer [m]	Premer cevi dvojna U zanka [mm]	Proizvajalec sonde
FS-124	100727	459202	148	0.152	32	TOTRA plastika PE 100-GT150
FFA-51	100893	459039	148	0.152	32	Frank GmbH PE 100

Poizkusa sta bila izvedena med 11. 10. 2022 in 17. 10. 2022 v dveh vrtinah, v katerih sta nameščeni geosondi z dvojnimi U cevmi.



Slika 14 Vgradnja opreme za izvedbo poizkusov (levo FS, desno FFA)

Pred izvedbo testov toplotnega odziva sta obe vrtini skupaj z delovno tekočino (voda) mirovali minimalno 5 dni, tako da je bila temperaturna stabilizacija dosežena pred izvedbo testa. S predčrpanjem je bilo sicer še ugotovljeno manjše zniževanje temperature, kot prikazuje spodnji diagram, a je bilo zniževanje temperature zadosti omejeno ($<0,05 \text{ }^\circ\text{C}/\log_{10}t$), da smo lahko nadaljevali z izvedbo TRT poizkusa.



Slika 15 Stabilizacija med predčrpanjem kaže na rahlo zniževanje temperature na obeh lokacijah (levo FS, desno FFA)

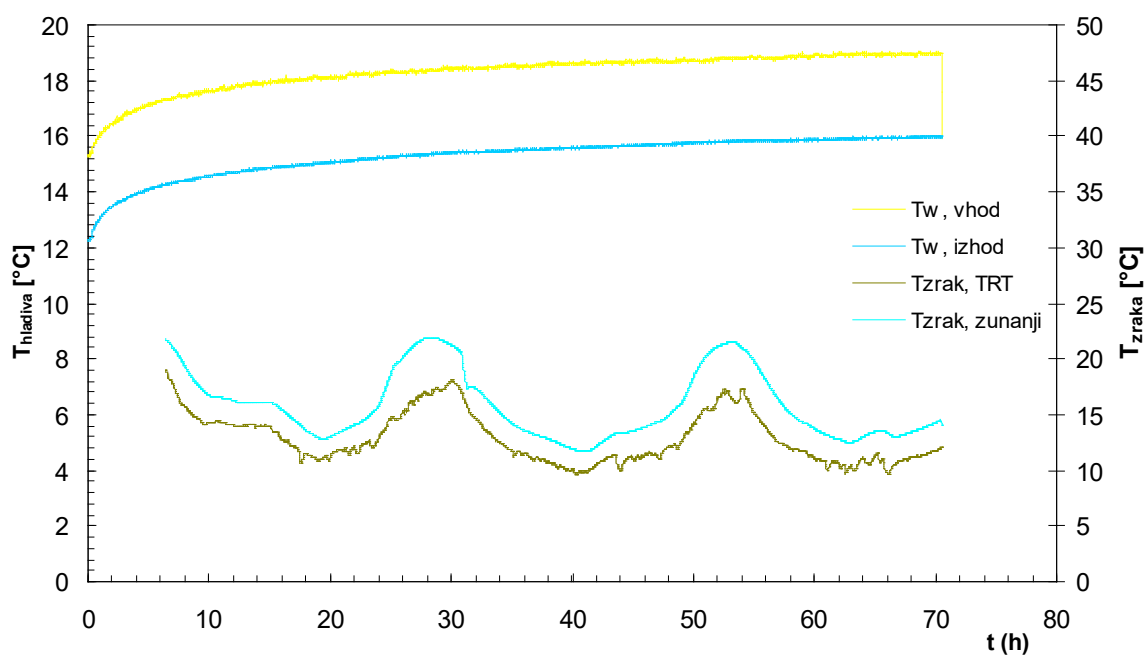
Med izvedbo obeh TRT se je tlak v sistemu ustalil na 2,0-2,2 bara, kar je optimalna vrednost popolnoma napolnjenega sistema. Parametri testa so prikazani v spodnji preglednici. S trajanjem poizkusa 70 ur je zagotovljena zadostna dolžina po VDI 4640 (2020).

Preglednica 3 Parametri izvedbe TRT z začetnim in končnim časom izvedbe

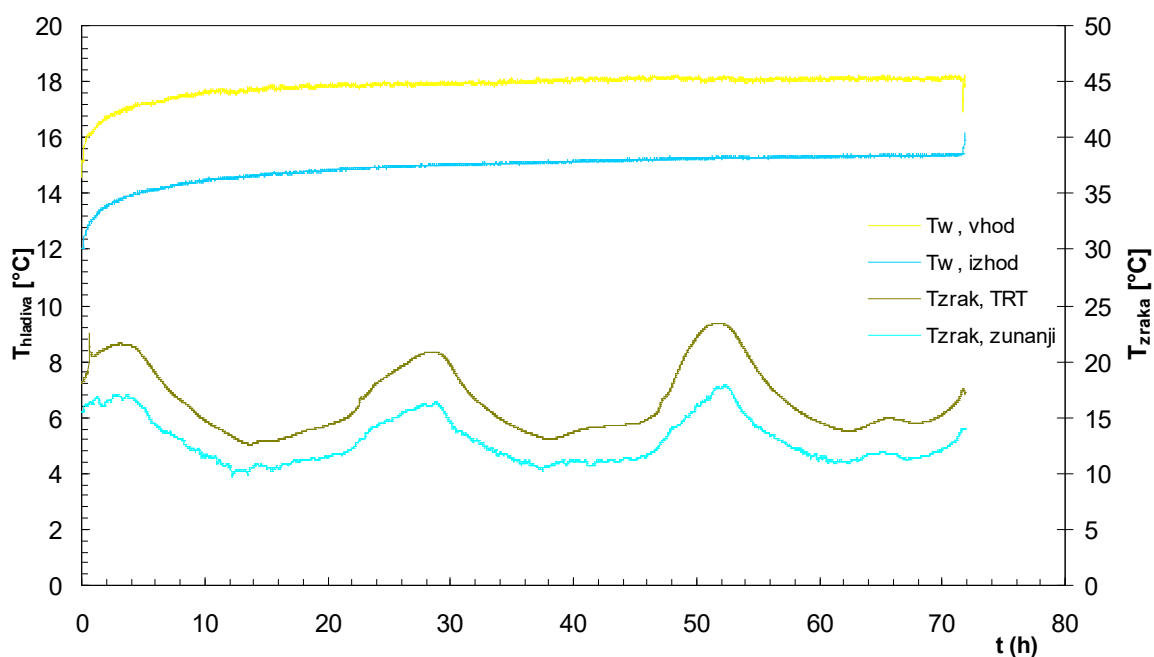
Ime	Pretok [l/s]	Toplotna moč [kW]	Začetek TRT	Konec TRT
GS-FS-124	0,32	4,0	11.10.22 9:19	14.10.22 9:18
GS-FFA-51	0,39	4,7	14.10.22 11:04	17.10.22 12:30

2.2 Rezultati TRT poizkusa

Rezultate poizkusa podajamo za obe lokaciji, saj vplivata na porazdelitev toplotnih parametrov na širšem obravnavanem območju. Rezultate prikazujeta spodnja diagrama, pri čemer so označeni časovni razvoji temperature hladiva na vhodu in izhodu iz geosonde ter temperature zraka zunaj in znotraj zaboja z opremo.



Slika 16 Rezultat TRT preizkusa na FS-124



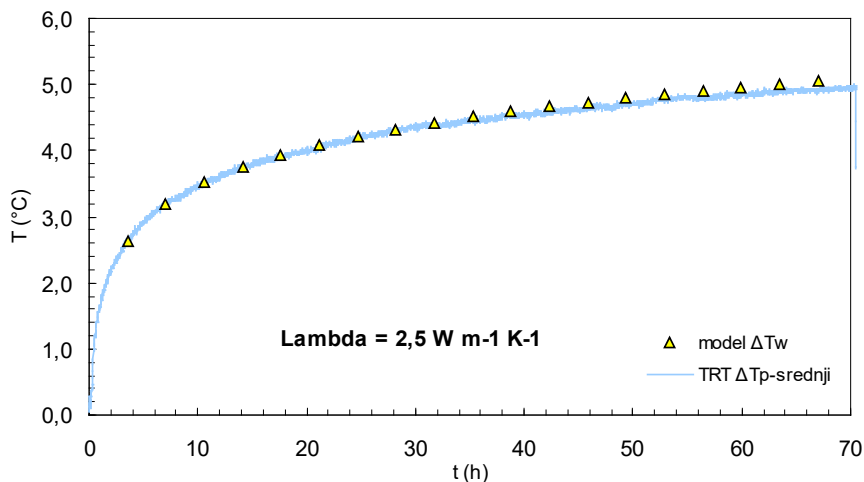
Slika 17 Rezultat TRT preizkusa na FFA-51



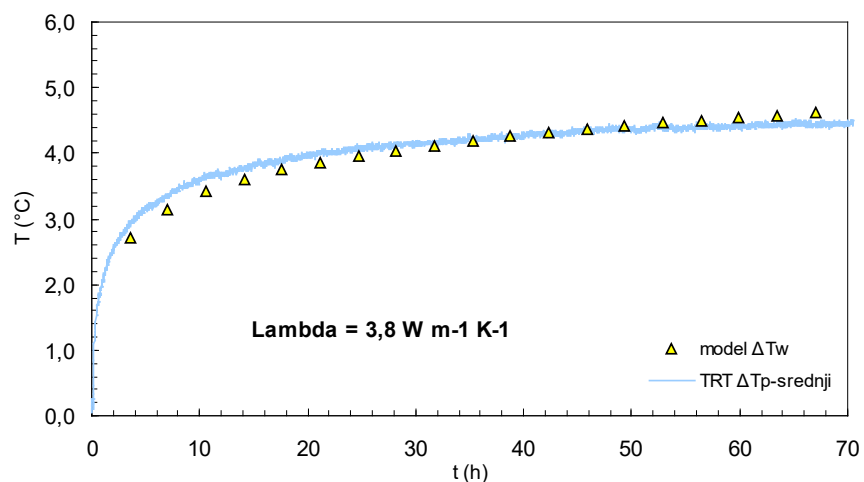
2.2.1 Analitično vrednotenje TRT s standardnimi metodami

Standardne analitične obdelave TRT poizkusov omogočajo hitro vrednotenje parametrov ob predpostavki, da na območju poizkusa prevladuje kondukcijski prenos toplote. Pri tem vrednotenje toplotnih parametrov ni enoznačno, saj je odziv na toplotno stimulacijo odvisen tako od lastnosti podtalja (toplotna prevodnost, volumska kapaciteta toplote), kot tudi od lastnosti geosonde (toplotna upornost). V nadaljevanju podajamo analitično obdelavo TRT poizkusa s hkratnim vrednotenjem toplotnih parametrov podtalja in lastnosti geosonde s prilagajanjem računskih krivulj k dobljenim terenskim meritvam (po Raymond et al).

Na ta način smo določili *povprečno efektivno toplotno prevodnost brez upoštevanja konvekcije*, kar daje v primeru FS/FFA vrednosti, višje od realnih vrednosti *povprečne toplotne prevodnosti*. Na območju zgornjega, predvsem pa spodnjega vodonosnika imamo namreč opravka s tokom podzemne vode, ki prenaša toploto tudi s konvekcijo in advekcijo, ki je v danem primeru ne moremo zanemariti. Iz tega razloga je bil TRT poizkus obdelan tudi z inverznim numeričnim modelom, kot je prikazano v naslednjem podpoglavju.



Slika 18 Prilagajanje analitične računske krivulje k izmerjenim vrednostim za efektivno toplotno prevodnost (brez upoštevanja advekcije in konvekcije) za FS-124

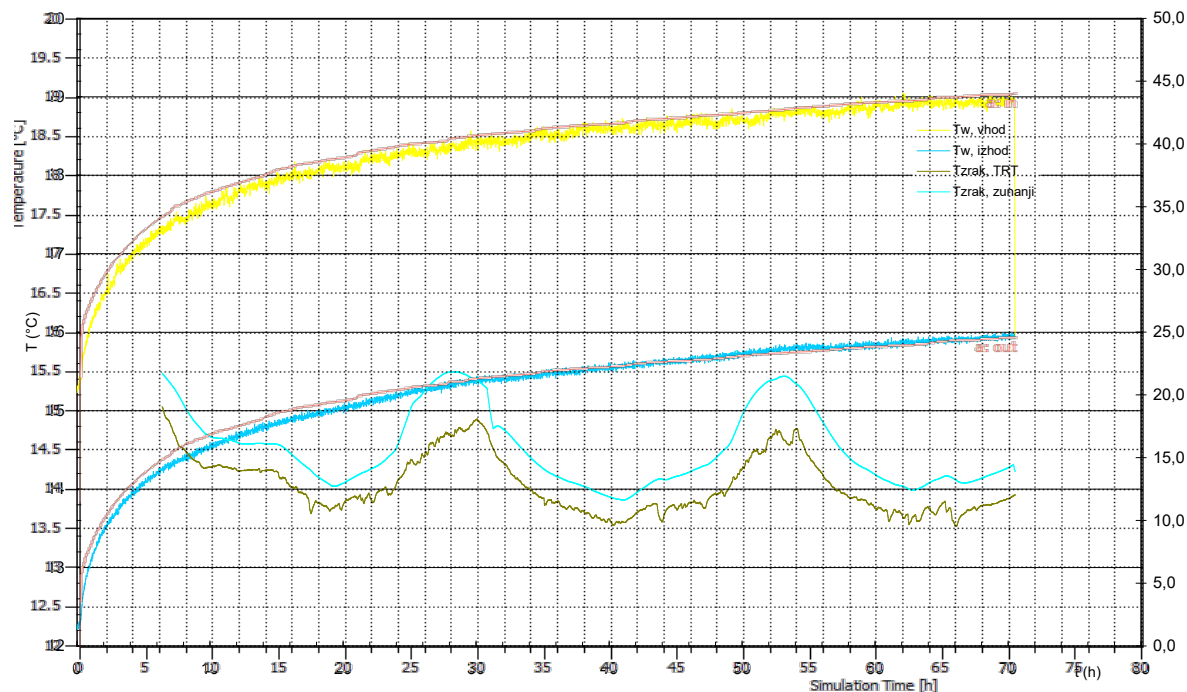


Slika 19 Prilagajanje analitične računske krivulje k izmerjenim vrednostim za efektivno toplotno prevodnost (brez upoštevanja advekcije in konvekcije) za FFA-51

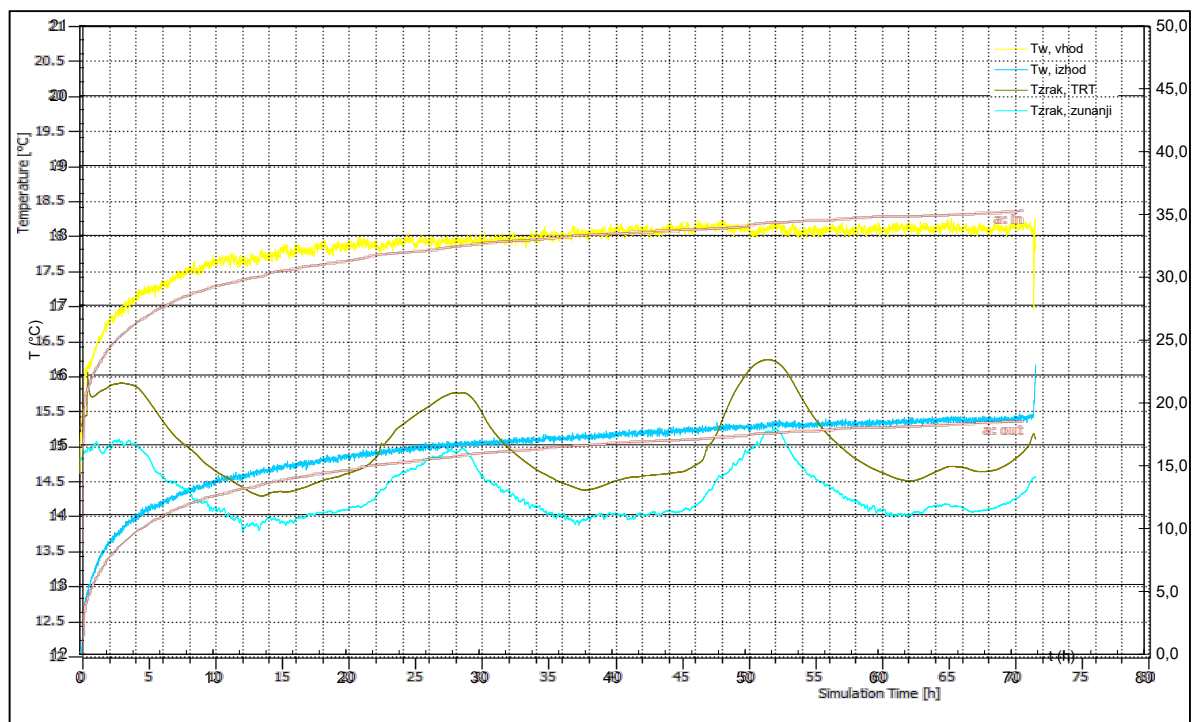
2.2.2 Inverzno numerično vrednotenje TRT

Numerični hidrogeološki model smo uporabili za inverzno modeliranje z namenom vrednotenja izvedenih TRT poizkusov, pri čemer so bili upoštevani tudi učinki adveksijskega prenosa toplote. S tem smo dobili realnejšo sliko prispevka posamezne vrste transporta toplote, kar omogoča končno kalibracijo modela, kot prikazuje poglavje 5. Pri inverznem modeliranju smo izhajali iz poteka razvoja temperature hladiva, kot prikazuje diagram v poglavju 2.2 ter ga primerjali s potekom iz modela. Ob tem smo spreminjali toplotne prevodnosti najdebelejše zajete plasti, permokarbonskih kamnin, ter ločeno še za oba peščeno meljasta prodna vodonosnika; volumsko kapaciteto toplote permokarbonskih plasti; koeficient prepustnosti vodonosnika, s čemer smo vplivali na pretok toka podzemne vode skozi območje testne geosonde; toplotno prevodnost cementacije geosonde, s čemer smo simulirali vpliv same geosonde na potek poizkusa.

Na območju FS se izkaže, da je za ustrezno ujemanje z dobljenimi razvojem temperatur hladiva med testom potrebno minimalno prilagoditi začetno temperaturo ($10,6^{\circ}\text{C}$), medtem ko ostali toplotni in hidrogeološki parametri ustrezno opisujejo postavljen model. Na območju FFA je razviden večji učinek advekcije, ki pojasni bolj položno krivuljo odziva. Prav tako je verjetna večja toplotna prevodnost cementacije kot posledica izpiranja cementa iz posameznih delov geosonde, najverjetneje na stiku ob iztekanju vode iz zgornjega v spodnji vodonosnik. Poleg začetne temperature sta bila tako prilagojena tudi koeficient prepustnosti ter toplotna prevodnost cementa za FFA-51. Slednje kaže na to, da bo pri izvedbi preostalih geosond posebno pozornost posvetiti prav cementaciji, kot je podano v zaključku.



Slika 20 Prilaganje numerične računske krivulje k izmerjenim vrednostim za efektivno toplotno prevodnost (z upoštevanjem advekcije in konvekcije) za FS-124



Slika 21 Prilagajanje numerične računske krivulje k izmerjenim vrednostim za efektivno toplotno prevodnost (z upoštevanjem advekcije in konvekcije) za FFA-51

Za nadaljnje modeliranje so bile tako uporabljene vrednosti toplotnih in hidrogeoloških parametrov, kot prikazuje Preglednica 4.



3. OPIS KODE MODELA

Numerični hidrogeološki in toplotni model je bil izdelan z numeričnim orodjem FEFLOW - Finite Element simulation system for subsurface Flow preko grafičnega vmesnika, izdelovalca DHI WASY GmbH. FEFLOW predstavlja standardno orodje za modeliranje toka podzemne vode, transporta snovi in prenosa toplote in je bil za evaluacijo obravnavanega problema izbran zaradi dolge zgodovine uspešne uporabe kode ter njene verifikacije (med drugim (Trefry & Muffels, 2007)). Temelji na metodi končnih elementov, kar mu daje fleksibilnost pri opisu kompleksnih geometrij ob sicer nekoliko višji porabi procesorskih in pomnilniških zmogljivosti. Izdelan model tako zajema vse predpostavke in omejitve, ki so vezane na numerično kodo FEFLOW, ki so predstavljene v Diersch (2014).

Analični model za optimizacijo polja sond je bil postavljen v okolju Earth Energy Designer (EED, Blomberg et al., 2015) na podlagi izmerjenih terenskih parametrov. Model temelji na metodologiji po Claesson, Eskilson in Hellström preko vrednotenja konfiguracij geosond s t.i. g-funkcijami ter izračuna z numeričnim (SBM) modelom.

3.1 Predpostavke in omejitve

V izdelanem modelu je predpostavljeno, da ima podzemna voda konstantno dinamično viskoznost in gostoto, z izjemo učinka vzgona (gravitacije). Primarne osi anizotropije vodoprepustnosti so skladne z osmi koordinatnega sistema.

Ker gre v obravnavanem primeru za tok podzemne vode, katere stopnja mineraliziranosti v relevantnem času niha zanemarljivo in ker je v izračunih upoštevana zgolj vertikalna anizotropija, prav tako pa ni prisotnih razpok, lahko ugotovimo, da je uporabljena koda modela v celoti skladna z razmerami na terenu.

3.2 Način izračuna

Tridimenzionalni tok podzemne vode konstantne gostote skozi porozni medij je opisan z naslednjo parcialno diferencialno enačbo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

kjer je:

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} vrednosti vodoprepustnosti vzdolž x, y, in z osi koordinatnega sistema;

h tlak;

W je volumski specifični pretok na enoto volumna in predstavlja mesta izviranja/ponikanja vode, pri čemer je $W < 0.0$ za tok iz podzemnega sistema in $W > 0.0$ za tok v podzemni sistem;

S_s koeficient elastičnega uskladiščenja poroznega medija;

t čas.

V splošnem imajo lahko S_s , K_{xx} , K_{yy} in K_{zz} spremenljive vrednosti v prostoru ($S_s = S_s(x,y,z)$, $K_{xx} = K_{xx}(x,y,z)$, itd.), W pa je lahko spremenljiv tako v prostoru, kot po času ($W=W(x,y,z,t)$). Enačba (1) opisuje tok podzemne vode v neravnovesnih pogojih v heterogenem in anizotropnem mediju. Enačba (1) skupaj s specifikacijo toka in/ali tlaka na robovih podzemnega sistema ter



specifikacijo začetnih pogojev sestavlja matematično predstavitev sistema toka podzemne vode.

Rešitev zgornje enačbe podaja $h(x,y,z,t)$ predstavlja stanje, pri katerem odvodi h v prostoru in času, vstavljeni v enačbo (1) izpolnijo enačbo ter začetne in robne pogoje. Časovno spremenljiva prostorska porazdelitev h tako daje sistem toka, pri čemer podaja tako energijo toka, kot tudi uskladiščenje v poroznem mediju, zato jo lahko uporabimo pri izračunih smeri in pretoka podzemne vode. Analitična rešitev zgornje enačbe je možna le v izjemno enostavnih sistemih, zato se pri izračunu FEFLOW poslužuje metode končnih elementov, pri kateri je kontinuiran sistem predstavljen kot zbir diskretnih točk v prostoru in času, parcialni odvodi pa so nadomeščeni z razlikami v tlakih v teh točkah. Tako dobimo sistem simultanih linearnih enačb, ki jih rešimo z iterativno metodo, da dobimo za vsak časovni korak ob izpolnjevanju konvergenčnega kriterija približek k vrednosti, ki bi ga dala analitična rešitev parcialne diferencialne enačbe toka.

Izračun transporta toplote temelji na enačbi

$$S_0 \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{q} + Q, \text{ kjer je } \mathbf{q} = -\mathbf{K} \cdot (\nabla h + \mathbf{\kappa} \mathbf{e}) \text{ in } \mathbf{K} = \frac{\rho^f \mathbf{g}}{\mu^f} \mathbf{k}$$

pri čemer so:

- S_0 specifično uskladiščenje kot posledica stisljivosti poroznega medija;
- \mathbf{q} flux toka (Darcyjeva "hitrost");
- Q točkovni viri in ponori vode;
- \mathbf{K} vodoprepustnost;
- $\mathbf{\kappa}$ učinek vzgona;
- \mathbf{e} gravitacijski enotski vektor;
- \mathbf{k} tenzor intrinzične prepustnosti;
- ρ^f gostota tekočine;
- \mathbf{g} gravitacija;
- μ^f dinamična viskoznost tekočine.

Pri tem je upoštevano ohranjanje energije tako za tekočino, kot za porozni medij:

$$c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T - \rho^f c^f \mathbf{q} T) + H$$

pri čemer so:

- T temperatura;
- c_v skupna volumska kapaciteta;
- λ toplotna prevodnost;
- c^f volumska kapaciteta vode;
- H točkovni viri in ponori toplote.

3.3 Vpliv predpostavk in omejitev na model

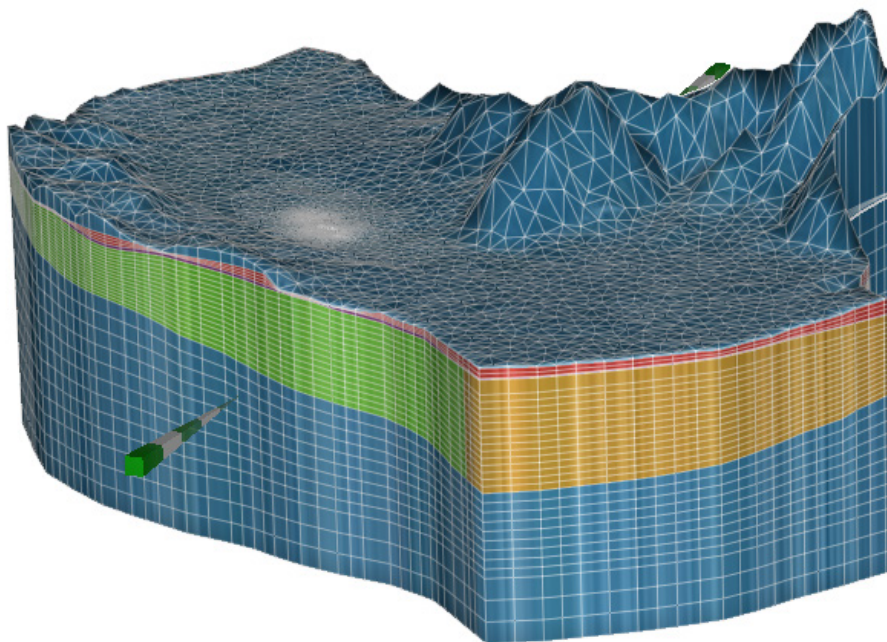
Ker obravnavani problem ne zajema modeliranja sistema, pri katerem so primarne osi anizotropije nagnjene glede na koordinatni sistem (tak primer so lahko npr. razpoke) in ker lahko tok podzemne vode, ki je posledica razlik v gostotah podzemne vode, zanemarimo, lahko vpliv poenostavitve in predpostavk, ki so zajete v uporabljeni kodi, ocenimo kot zanemarljiv.



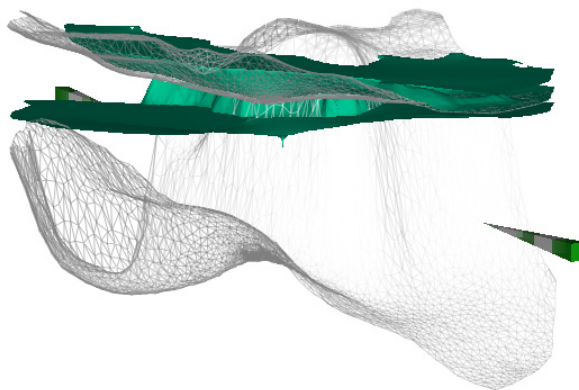
4. IZDELAVA MATEMATIČNEGA MODELA

4.1 Prostorska domena modela

V numerični hidrogeološki model smo zajeli širše območje okoli bodočega zajema in ponikanja toplote za FFA in FS, kot prikazuje Slika 4. Tako je spodnja meja modela horizontalna, zgornja temelji na modelu reliefa Lidar. Slika 22 prikazuje površje in podlago modeliranega območja ter kontakte med modeliranimi kvartarnimi plastmi in podlage, kot so uporabljene v modelu.



Slika 22 Prikaz površja terena in podlage ter naklona kontakta kvartarnih plasti in podlage vodonosnika ter prepustnosti posameznih plasti



Slika 23 Gladina podzemne vode (zelena ploskev) v zgornjem in spodnjem vodonosniku z označeno ploskvijo podlage spodnjega vodonosnika

Velikost končnih elementov (trikotniška mreža) znaša od 0.46 m do >50 m na območjih, ki so najbolj oddaljena od lokacije. Glede na različne debeline uporabljenih hidrogeoloških plasti so bile v posamezne plasti dodane računske plasti. Tako ima končni model skupno 33 računskih plasti, porazdeljenih v 5 hidrogeoloških enotah. Skupno število 3D elementov znaša 2.0 milijona, število vozlišč pa 1.04 milijona.

4.2 Hidravlični in toplotni parametri (po izvedbi terenskih preiskav)

Glede na rezultate črpalnih poizkusov so ovrednoteni koeficienti prepustnosti za zgornji in spodnji vodonosnik, medtem ko so vrednosti ocenjene za preostale hidrogeološke enote. V vseh hidrogeoloških enotah so bile določene enovite hidrogeološke lastnosti znotraj posamezne plasti. Toplotne prevodnosti in volumske kapacitete toplote za posamezne plasti v heterogeni hidrogeološki zgradbi so bile povzete po tabeliranih vrednostih, povprečne vrednosti pa preverjane s standardnimi TRT preizkusi v dveh testnih geosondah.

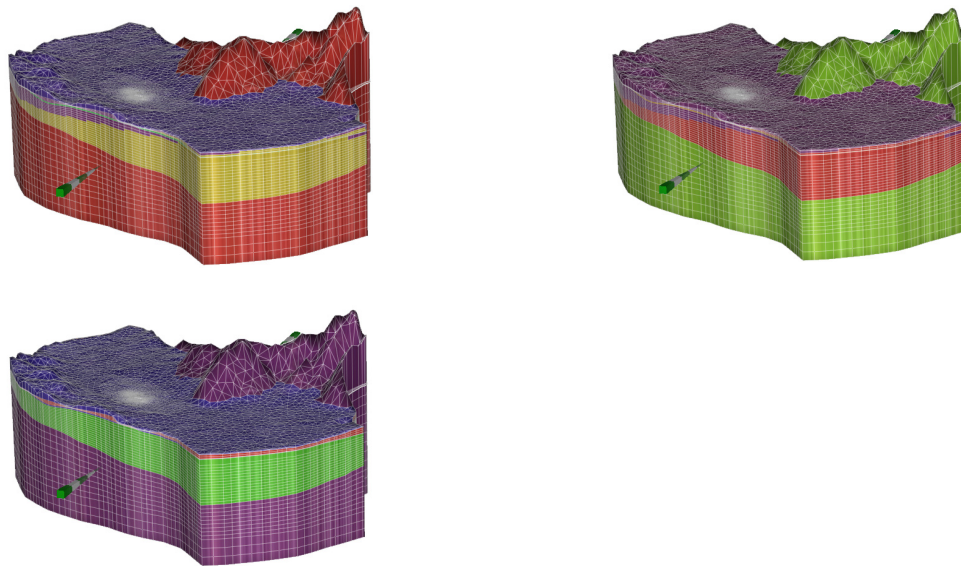
Preglednica 4 Uporabljene vrednosti hidravličnih in toplotnih parametrov (poševno natisnjene vrednosti so ocenjene; tlak +/- označuje obe nezasičeni in zasičeni coni)

Plast	Debelina	K	Poro znos t	Gostota ρ	Volumska kapaciteta toplote C_w	Toplotna prevodnost * λ_w
	[m]	[m/s]	[-]	[t/m ³]	[MJ m ⁻³ K ⁻¹]	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
Krovna glina	1	1×10^{-7}	0,03	1,9	1,5	0,6
Zgornji vodonosnik - nezasičena cona	Var (tlak -)	1×10^{-3}	0,15	2,1	1,5	0,4
Zgornji vodonosnik - zasičena cona	Var (tlak +)				2,41	1,86
Ločilna plast	2,5	1×10^{-9}	0,03	2,1	2,3	1,4
Spodnji vodonosnik - nezasičena cona	Var (tlak -)	$1,6-5 \times 10^{-4}$ (1×10^{-5})	0,1	2,1	1,5	0,4
Spodnji vodonosnik - zasičena cona	(tlak +)				2,41	1,86
Podlaga	Var	1×10^{-7}	0,01	2,5	2,15	2,17

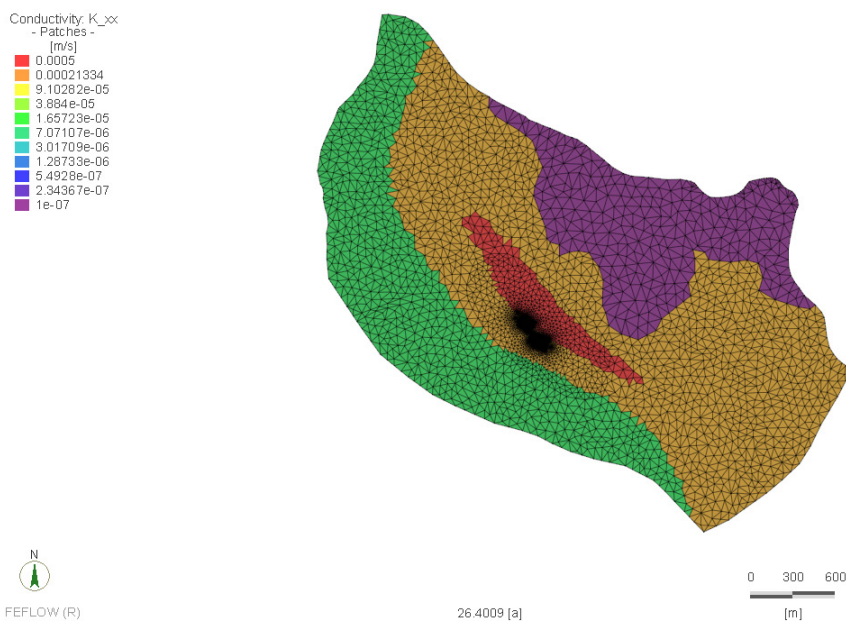
*povprečne vrednosti toplotnih parametrov potrjene s TRT testi

Prepustnost sedimentov je različna v različnih smereh, anizotropijo smo ob pomanjkanju drugih podatkov ocenili s faktorjem 10.

Poleg terenskih preiskav je bila prepustnost v modelu interpretirana tudi na podlagi geološke strukture, torej relativne poglobitve doline Glinščice glede na Viško teraso in posledični učinek strmejših vmesnih slabše prepustnih plasti, ki ovirajo napajanje s terase. Območje južnega dela modela je na tem stiku opredeljeno za okoli velikostni red nižjo prepustnostjo, kakršna je bila izmerjena na sosednji parceli v vrtini Pz-1/18 (1×10^{-5} m/s), območju osrednjega dela doline Glinščice v spodnjem vodonosniku pa je bil na podlagi vrednotenja TRT preizkusov povišan koeficient prepustnosti na 5×10^{-4} m/s kot prikazuje spodnja slika.



Slika 24 Porazdelitev toplotnih in fizikalnih parametrov modela (toplotna prevodnost, volumnska kapaciteta toplote, poroznost)



Slika 25 Porazdelitev prepustnosti v območju spodnjega vodonosnika, kalibrirano z vrednotenjem TRT preizkusa (povišana prepustnost v osrednjem delu doline Glinščice)

4.3 Točkovni elementi modela

V model so bil vključeni tudi točkovni elementi, katerih vloga v modelu je odvzeti ali dodajati toploto v sistem v eni X,Y točki modela preko določene dolžine vzdolž Z-osi. Gre za geosonde v fazi izkoriščanja plitve geotermalne energije, torej v napovednih izračunih modela in kot take predstavljajo rezultat celotnega modeliranja. Posledično je magnituda odvzema / ponikanja toplote iz posamezne geosonde sicer vhodni podatek, katerega vzdržnost se preverja z opazovanjem morebitnih neželenih pojavov (presežni vplivi, zmrzovanje). Geosonde so bile locirane v vozlišča elementov.

Pri obravnavi geosond so upoštevane predvidene globine 150 m, grelna števila $COP_{FFA} = 4,52$ (3,38 za hlajenje) ter $COP_{FS} = 4,2$, toplotno moč [kW] pa prikazuje spodnja slika. Za lažjo predstavbo sta podani obe toplotni moči, torej za FFA in FS. Pri tem letni profil izhaja iz poslanih podatkov s strani projektantov strojnih inštalacij, katere je posodobil glede na rezultate idejnega elaborata zajema plitve geotermalne energije.

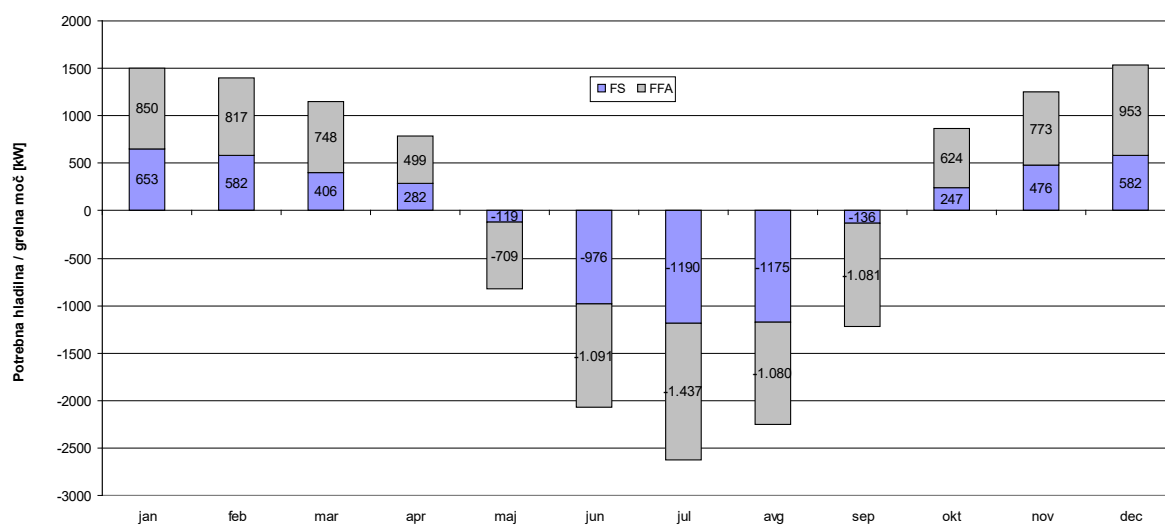
Preglednica 5 Predvidena raba energije in obremenitev na vir za FS z upoštevanim COP

Mesec	Obremenitev na vir [kW]	Raba energije [MWh]	Vršna raba [kW]	Trajanje vršne rabe [h]
Januar	653	152	1118	8
Februar	582	122	1006	6
Marec	406	95	894	2
April	282	63	894	1
Maj	-119	-24	-896	2
Junij	-976	-197	-1793	4
Julij	-1190	-244	-1793	4
Avgust	-1175	-241	-1793	4
September	-136	-27	-1076	2
Oktober	247	58	559	1
November	476	107	838	4
December	582	135	1118	8
<i>SKUPAJ ogrevanje</i>		732		
<i>SKUPAJ hlajenje</i>		733		

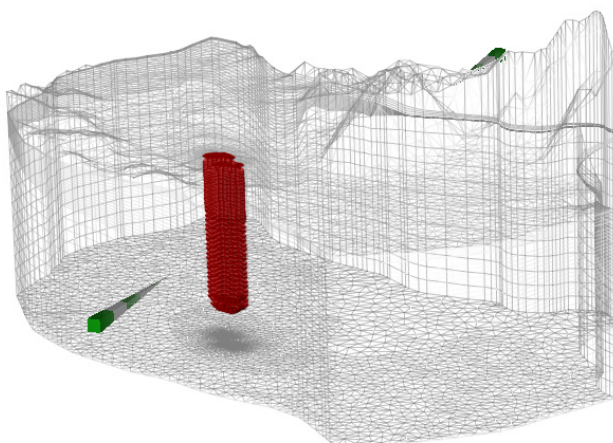
Preglednica 6 Raba energije in obremenitev na vir za FFA z upoštevanim COP

Mesec	Obremenitev na vir [kW]	Raba energije [MWh]
Januar	850	197
Februar	817	172
Marec	748	175
April	499	112
Maj	-709	-155
Junij	-1.091	-241
Julij	-1.437	-322

Mesec	Obremenitev na vir [kW]	Raba energije [MWh]
Avgust	-1.080	-242
September	-1.081	-239
Oktober	624	146
November	773	175
December	953	221
SKUPAJ ogrevanje		626
SKUPAJ hlajenje		848



Slika 26 Letni profil toplotne moči fakultet FFA in FS [kW] in potrebne zmogljivosti zajetja pri odgovarjajočem COP



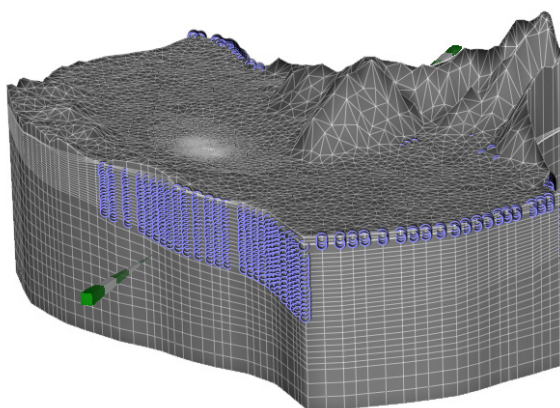
Slika 27 Prikaz simuliranih geosond in vodnjakov znotraj modela (FS in FFA)



4.4 Robni pogoji

V model so bili vključeni naslednji robni pogoji, kot prikazuje tudi Slika 28. Robni pogoji so skladni s stopnjo poznavanja hidrogeoloških razmer in privzetih konzervativnih predpostavk, prikazanih v okviru konceptualnega modela. Model je z ožjega območja fakultet razširjen proti jugovzhodu in severozahodu do znanih nivojev podzemne vode in sicer:

- zgornji vodonosnik: na severozahodu 302 m n.v. in na jugu 290.5 m n.v. V izračunu je kot izhodiščna kota podzemne vode uporabljena prostorsko spremenljiva kota, ki je rezultat začetne iteracije modela pri stacionarnih hidrodinamskih pogojih.
- v spodnjem vodonosniku: na jugu 284 m n.v., na severozahodu 278,63 m n.v. na podlagi piezometra OP-12 ter 280.8 m n.v. na severovzhodu na podlagi meritev na območju Tobačne. Kljub temu, da je nivo ponekod podan na cm natančno, je dejanska negotovost decimetrskega velikostnega razreda.



Slika 28 Prikaz robnih pogojev modela

Zaradi konzervativnega pristopa k izračunu in uniformnih hidravličnih polj tako v zgornjem, kot v spodnjem vodonosniku nihanje nivojev podzemne vode ni simulirano, temveč so podana prevladujoča hidrološka stanja.

4.5 Kalibracijske točke in cilji kalibriranja

Kalibracija je bila izvedena za hidravlične kazalnike in sicer merjene nivoje podzemne vode na območju obeh fakultet. Ločeno je bila izvedena kalibracija za spodnji vodonosnik (FS-P2 in FFA-P2) in ločeno za zgornji vodonosnik (FS-P1, FS-P3, FFA-P1 in FFA-P3).

Kalibracija na toplotne parametre je bila izvedena na podlagi rezultatov TRT poizkusov.

4.6 Numerični parametri in parametri strojne opreme

Uporabljeni numerični parametri so naslednji:

- Equation System Solver: PCG - Preconditioned conjugate-gradient method

- Time stepping: Restricted, First Order Accurate, Adams-Bashforth/Trapezoid rule (AB/TR) predictor-corrector
- Režim vodonosnika: Free Surface: unconfined (phreatic); unconstrained head
- Error tolerance 1×10^{-4} (Euclidian L2 integral (RMS) norm; maximum number of iterations per time step: 1; No Upwinding)
- Velocity Approximation: Frolkovic-Knabner improved consistent velocity approximation
- Mesh smoothing Method: Laplacian operator; Iterations: 10

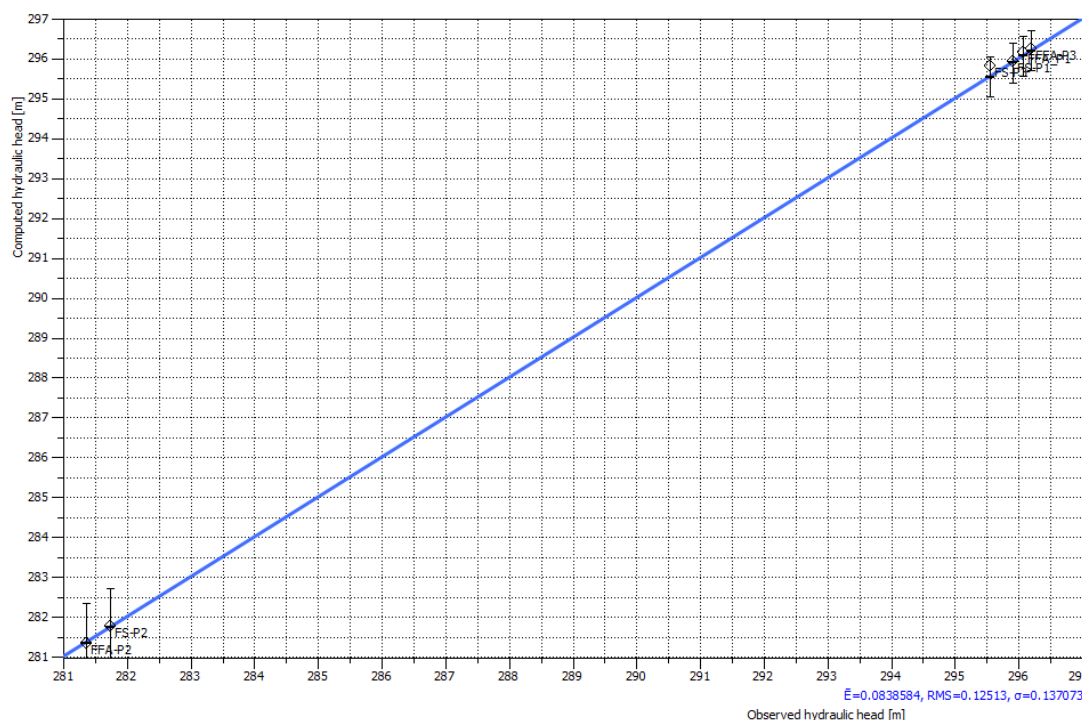
Za izračune je bila uporabljena naslednja strojna in druga oprema:

- Procesor: Intel®Core™ i7-4790 CPU @ 3.60 GHz, 8 GB RAM
- OS Windows 7 Professional 64-bit ver 2009, SP1

5. KALIBRACIJA NUMERIČNEGA MODELA

Pri modelu kot kalibracijski element upoštevamo tok zahodno od Rožnika ter nivoje podzemne vode v zgornjem in spodnjem vodonosniku. Simulirano stacionarno stanje toka podzemne vode v obeh vodonosnikih kaže na ustrezno ujemanje z merjenimi prevladujočimi vrednostmi, kot je podano v nadaljevanju.

V spodnjem vodonosniku znaša izračunan srednji hidravlični gradient $1,24 \times 10^{-3}$, kar odraža stanje na ožjem območju fakultet v spodnjem vodonosniku, kjer je na podlagi meritev ocenjen na $1,3 \times 10^{-3}$. Razlika v nivojih med FFA-P2 in FS-P2 znaša v naravi 0,384 m, v modelu pa 0,385 m.



Slika 29 Primerjava merjenih (x-os) in z modelom izračunanih (y-os) vrednosti nivojev podzemne vode (levo podatki za spodnji vodonosnik, desno za zgornji vodonosnik).



Zgornja slika prikazuje ujemanje izmerjenih in simuliranih nivojev v obeh vodonosnikih na ožji lokaciji fakultet. Pri tem so desno zgoraj podani intervali meritev in srednje vrednosti nivojev v zgornjem vodonosniku, v levem spodnjem delu diagrama pa intervali in srednje vrednosti meritev v spodnjem vodonosniku. Modra črta označuje referenčno linijo z naklonom 1 in izhodiščem 0 ($x = y$).

Na podlagi opravljenih TRT poizkusov so bili potrjeni povprečni toplotni parametri, na podlagi česa so bili ovrednoteni parametri za posamezno plast. Dopolnjena je bila vrednost hitrosti toka podzemne vode preko koeficienta prepustnosti v osrednjem delu doline Glinščice za spodnji vodonosnik, kot prikazuje Slika 25. Prilagajanje rezultatov terenskega preizkusa in numeričnega modela prikazujeta Slika 20 in Slika 21.

6. SIMULACIJA ODVZEMA TOPLOTE

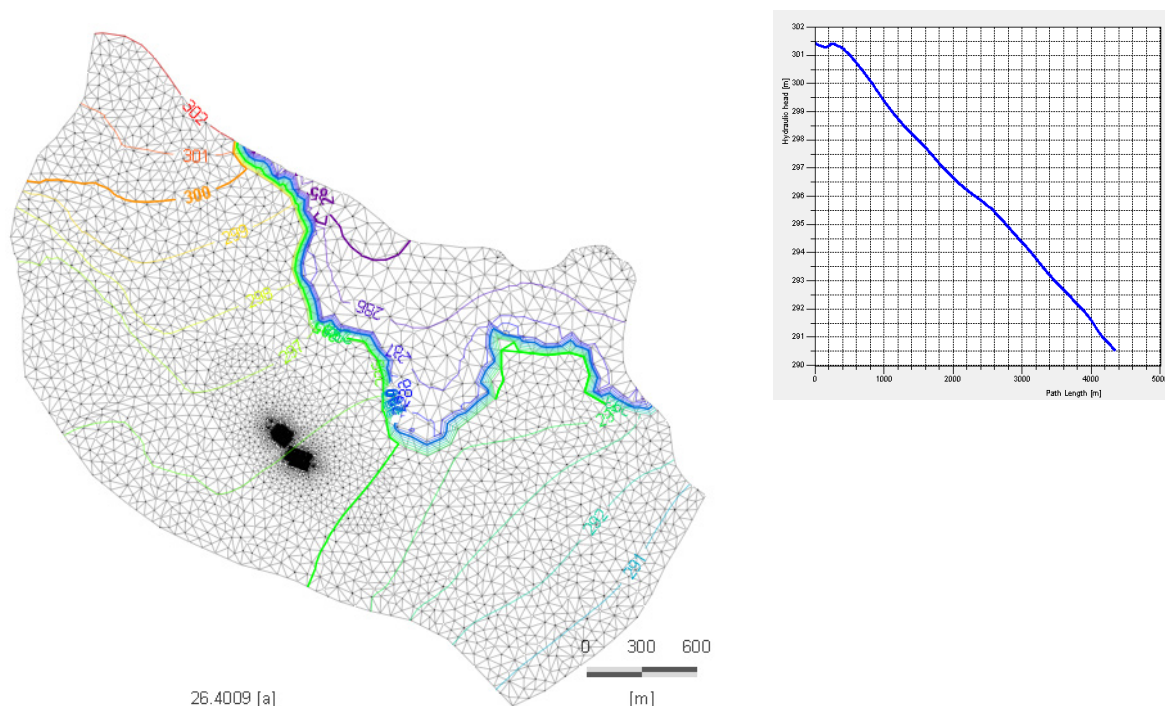
V naslednjem podpoglavju so opisani postopek in rezultati izračuna razporeditve temperature podzemne vode med izvajanjem izkoriščanja plitve geotermije. V poglavju 6.1 so podani rezultati porazdelitve nivoja podzemne vode v prostoru, ki so odraz naravnega stanja pred črpanjem vode in/ali toplote. Poglavje 6.2 prikazuje rezultate dimenzioniranja in optimizacije polja geosond, poglavje 6.3 pa termični vpliv na podtalje pri predvidenem odvzemu in ponikanju toplote, kot je bil podan v dopoljnjeni oceni projektanta.

Na podlagi teh izračunov so podane končne usmeritve projektantu za dimenzioniranje polja geosond.

6.1 Rezultati porazdelitve nivoja podzemne vode v prostoru

Kot je prikazano v poglavju 5, podan hidrogeološki model dobro odraža stanje toka podzemne vode, kot je zabeleženo na terenu tako v zgornjem kot v spodnjem vodonosniku. V nadaljevanju so podani hidravlični gradienti vzdolž tokovnic, ki potekajo preko obravnavanega območja.

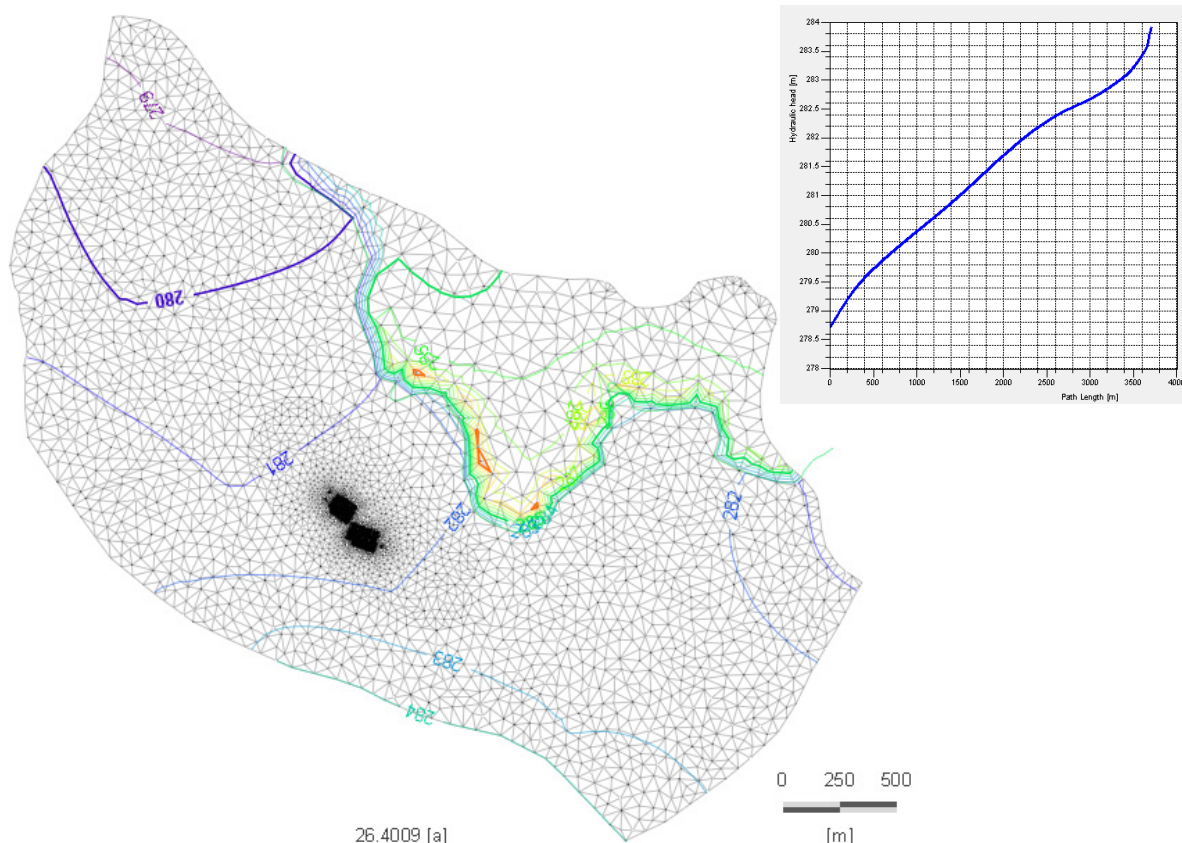
V zgornjem vodonosniku se vzdolž celotne doline Glinščice in v Rožno dolino pojavlja razmeroma uniformen padec tlaka, kot prikazuje spodnja slika.



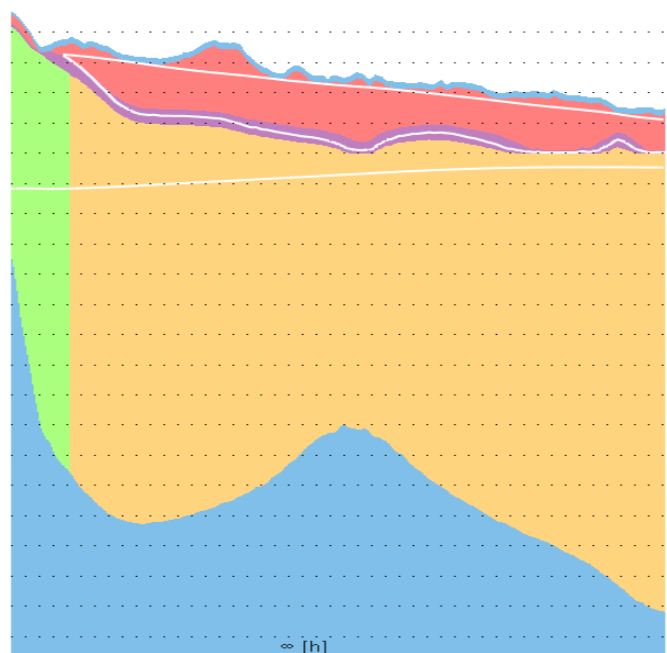
Slika 30 Rezultat porazdelitve nivojev v zgornjem vodonosniku. V izrezu zgoraj: Potek nivoja vzdolž tokovnic od Glinč preko območja fakultet in naprej proti Rožni dolini

V spodnjem vodonosniku so padci tlaka v območju Viča proti dolini Glinščice višji kot posledica nižje prepustnosti in napajanja iz Viške terase, nato pa so v nadaljevanju toka nekoliko nižji in uniformni, kot je prikazano na zgornji sliki.

Spodnja slika prikazuje skupaj potek piezometričnih gladin v zgornjem in spodnjem vodonosniku vzdolž doline Glinščice. Viden je tok podzemne vode v različne smeri v zgornjem in spodnjem vodonosniku ter potek glavnih hidrogeoloških struktur. V območju vmesne zaporne plasti se prav tako pojavlja kontakt med zasičeno in nezasičeno cono, kar kaže na pretežno vertikalni in navzdol usmerjen tok podzemne vode.



Slika 31 Rezultat porazdelitve nivojev v spodnjem vodonosniku. V izrezu zgoraj: Potek nivoja vzdolž tokovnic od Viča preko območja fakultet in naprej proti Dravljam



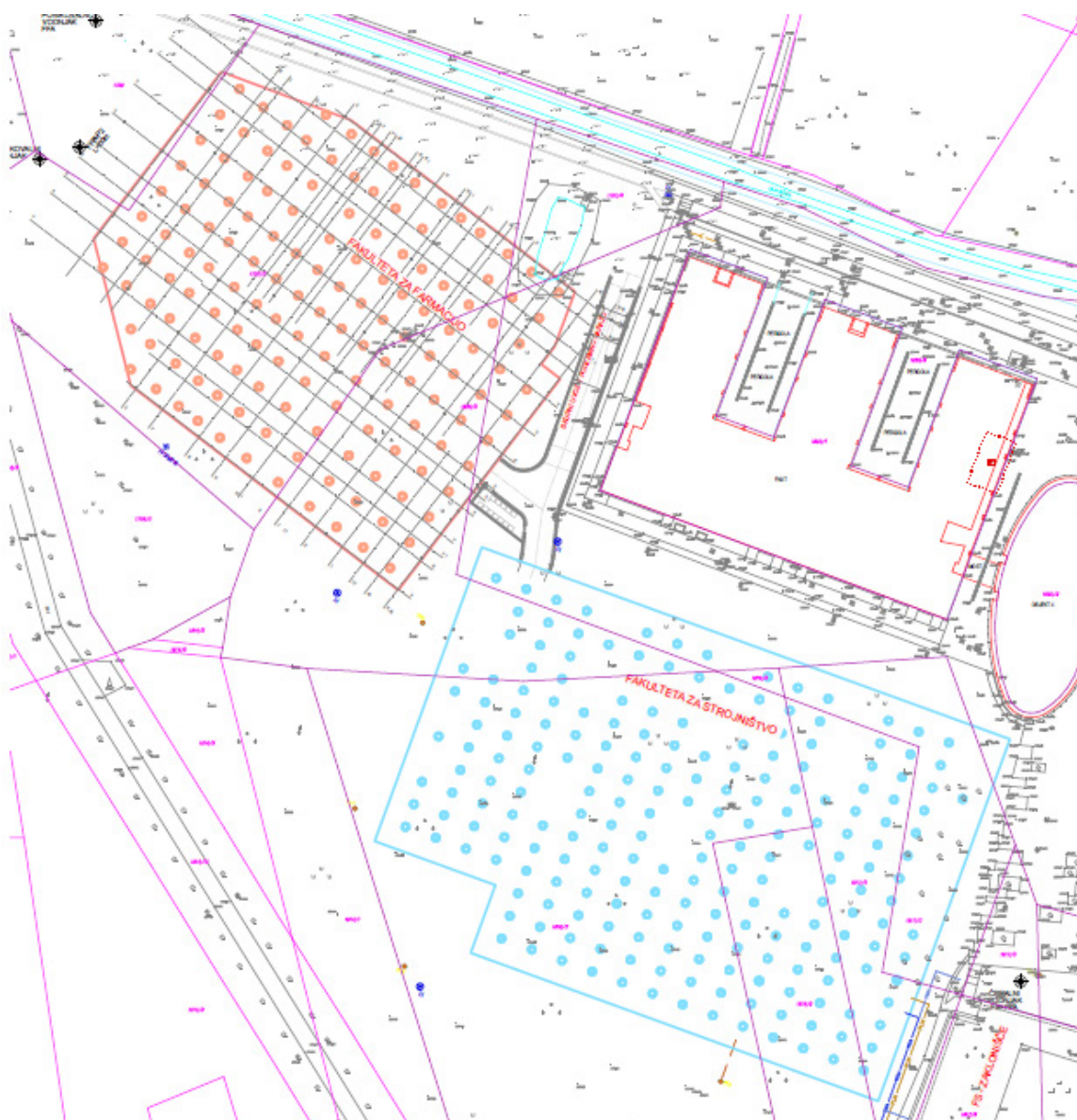
Slika 32 Vzdolžni prerez po dolini Glinščice. Voda v zgornjem vodonosniku (rdeče območje) teče proti jugovzhodu, voda v spodnjem vodonosniku (oker) pa proti severozahodu.



6.2 Dimenzioniranje polja geosond

Polje geosond je prostorsko omejeno z velikostjo parcel obravnavane lokacije, kakor tudi z drugimi predvidenimi objekti ter vkopi, z rastrom pilotov za temeljenje objektov pa je bila pogojena tudi predvidena razdalja med geosondami. Izhodiščna predvidena konfiguracija geosond je bila podana s strani projektanta v obliki zbirne situacije vodov.

Glede na trenutno stanje tehnike je bila za predvideno globino geosond že v idejni fazi izbrana globina 150m od kote današnjega terena, kar ob predvidenem vkopu temeljne plošče objektov pomeni v končni fazi za toliko krajše geosonde, s čemer se zagotavlja hidravlično vzdržnost glede na črpalke. Predviden premer vrtnanja, cementacije, premer in tip U-zanke, ter druge parametre geosond podaja Preglednica 7.



Slika 33 Situacija predvidenih geosond za FS in FFA

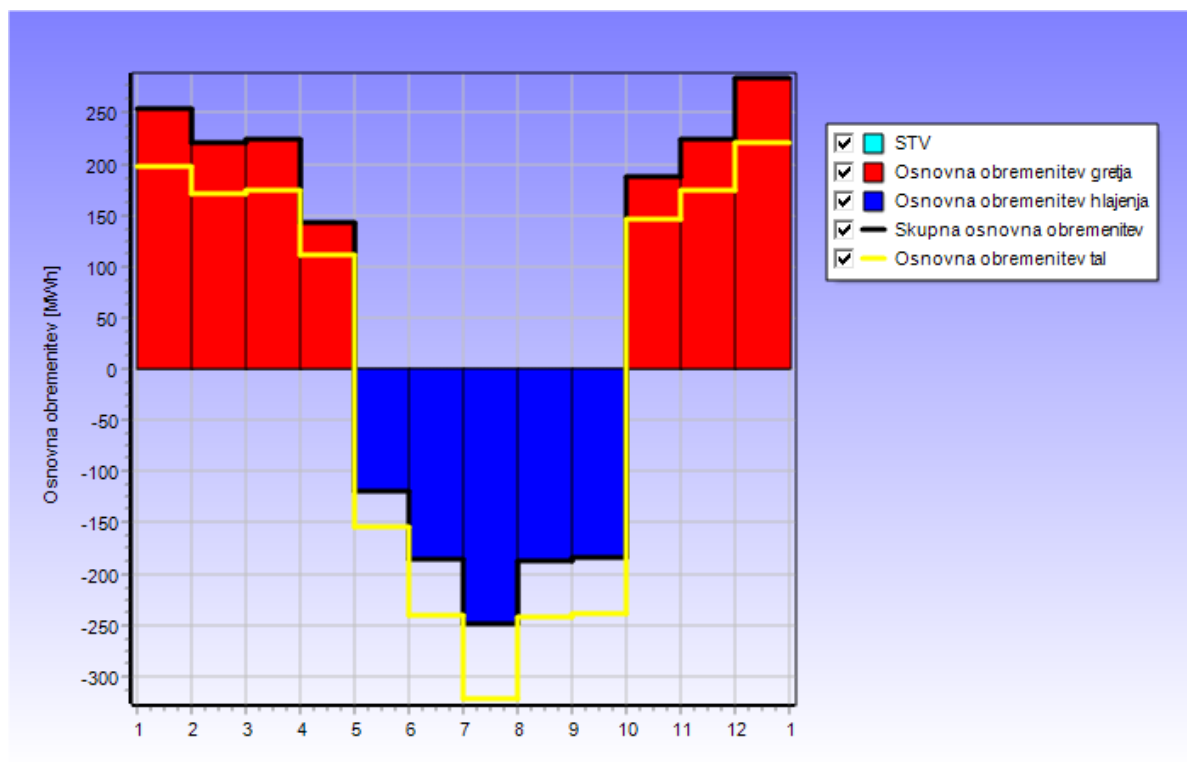


Preglednica 7 Glavne lastnosti predvidenih geosond

	FFA
Število geosond	150
Raster geosond	14 x 11
Razdalja (pogojena s piloti)	8m x 8.4m
Velikost parcele [m x m]	90 x 110
T _{min} hladiva [°C]	-8
T _{max} hladiva [°C]	26
Tip geosonde	dvojna zanka
Premer geosonde [mm]	150/250
Premer u-cevi [mm]	32
Debelina u-cevi	3
Razmik med cevmi [mm]	83
Material zapolnitve, cementacija	Termo cementna masa
Dolžina geosond [m] (pod talno ploščo)	142,5
Hladivo	voda : propilen glikol 33% zmrzuje pri -17°C
Pretok skozi eno geosondo, skupno za obe cevi U-zanke [l/s]	1,05 (nelaminarni tok)
COP	4,52
EER	3,38

Znotraj danih gabaritov smo tako v okviru optimizacije polja geosond za računsko obdobje 50 let variirali vrsto njihove razporeditve in njihovo končno število, medtem ko so ostali parametri ostali fiksni.

Pri FFA je bil simuliran scenarij brez upoštevanja morebitnih dodatnih vršnih obremenitev, kot jih podaja Preglednica 5, preostale parametre geosonde podaja Preglednica 7. Glede na dobljene rezultate smo nadalje inverzno simulirali scenarij še dopustne rabe s predvidenimi 150 geosondami, kot so podane iz faze IdP s strani projektanta. Kot mejna temperatura hladiva sta bili upoštevani vrednosti -2,5 in 26 °C, kot ju je podal projektant.

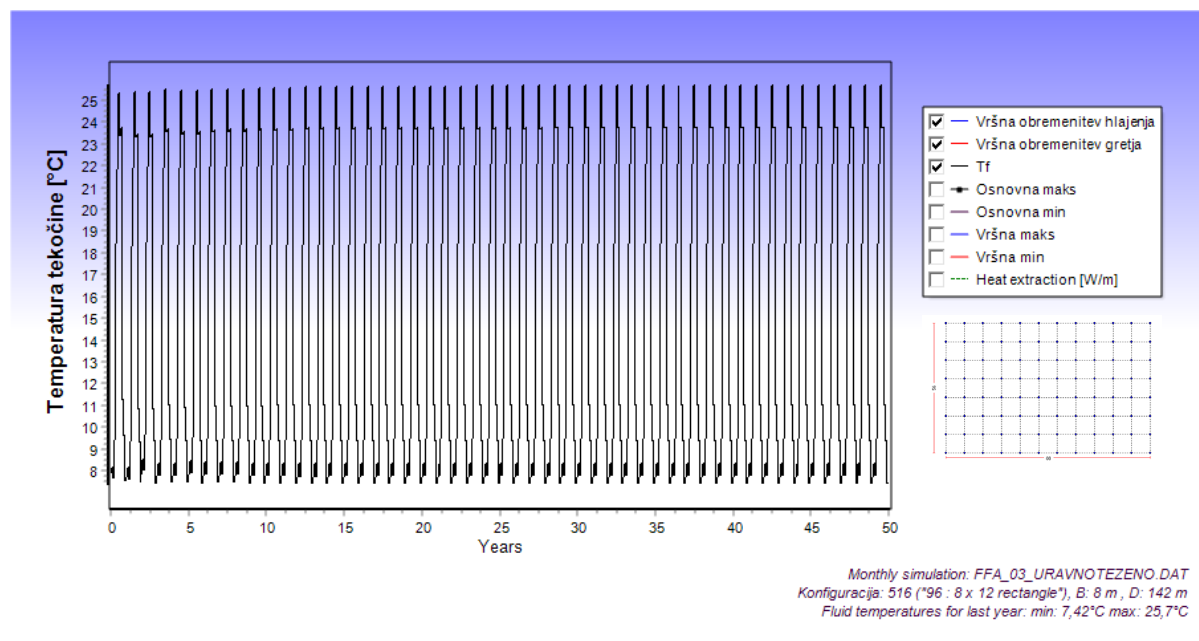


(z uravnoveženjem)

Slika 34 Osnovna obremenitev [MWh] za FFA.

BREZ UPOŠTEVANJA VRŠNIH OBREMENITEV

V scenariju brez upoštevanja vršnih obremenitev (letna raba 1198 MWh ogrevanje in - 1198 MWh hlajenje, skupno 2396 MWh / leto) bi za pokrivanje potreb zadoščalo že 96 geosond v razporeditvi 8 x 12 pri medsebojnem razmiku 8 m. Pri tem zgolj za osnovno rabo energije, ki bi v povprečju na letni ravni predstavljala 274 kW moči, v bolj izpostavljenih poletnih mesecih pa do 322 kW.



Slika 35 Razvoj temperature hladiva brez upoštevanja vršnih obremenitev za FFA.

Preglednica 8 Temperature hladiva [°C] ob koncih posameznih mesecev za izbrana leta obratovanja za FFA

Mesec \ Leto	1	2	5	10	50
Januar	7,87	7,68	7,75	7,74	7,73
Februar	8,15	8,15	8,33	8,33	8,32
Marec	7,64	7,57	7,79	7,76	7,77
April	9,42	9,36	9,45	9,43	9,48
Maj	18,4	18,3	18,3	18,4	18,4
Junij	21,9	21,9	21,9	22	22,1
Julij	25,3	25,3	25,4	25,6	25,7
Avgust	23,4	23,3	23,4	23,6	23,7
September	23,7	23,4	23,5	23,7	23,7
Oktober	11,2	10,8	10,9	11	11
November	9,62	9,32	9,34	9,36	9,38
December	7,54	7,46	7,45	7,43	7,42

Reynoldsovo število znaša 2392 (nelaminarni tok) pri toku 1,05 l/s skozi eno geosondo (0,53 l/s na posamezno cev dvojne U-zanke geosonde), s čemer je izboljšana izmenjava toplote med GS in podtaljem.

150 GEOSOND, PREDVIDENIH V IDP

Za s strani projektanta podano razporeditev 150 geosond v razporeditvi, kot podajata tabela in slika v začetku tega poglavja, smo izračunali velikost vršnih moči, ki bi jo 150 geosond še lahko zagotavljalo ob ocenjenem trajanju vršnih moči. Na podlagi računa lahko ugotovimo, da 150 geosond zadošča za zagotavljanje za vršne rabe plitve geotermalne energije, kot predstavlja spodnja tabela, medtem ko je preostali del potrebno zagotavljati iz drugih virov.

Preglednica 9 Dopustna raba energije in obremenitev na vir za FFA z upoštevanim COP pri 150 geosondah s ocenjenim trajanjem vršne rabe ter ocenjenimi razmerji med mesečnimi rabami (natisnjeno poševno)

Mesec	Obremenitev na vir [kW]	Raba energije [MWh]	Vršna raba [kW]	Trajanje vršne rabe [h]
Januar	850	197	481	8
Februar	817	172	433	6
Marec	748	175	384	2
April	499	112	384	1
Maj	-709	-155	385	2
Junij	-1.091	-241	771	4
Julij	-1.437	-322	771	4
Avgust	-1.080	-242	771	4
September	-1.081	-239	463	2
Oktober	624	146	240	1
November	773	175	360	4
December	953	221	481	8

POVZETEK IZRAČUNOV ZA POLJE GEOSOND FFA

- Za zagotavljanje redne rabe energije (brez vršnih obremenitev) zadošča že 96 geosond (8x12) v oddaljenosti 8m pri zagotavljanju nelaminarnega toka v ceveh geosonde, torej pri pretoku 1.05 l/s/geosondo ali več.
- vršna raba energije ni podana, zato scenarij z redno in vršno rabo ni bil ovrednoten.
- pri ocenjenih razmerjih med vršnimi rabami po posameznih mesecih in ocenjenem trajanju vršne rabe je bila ocenjena dopustna dodatna raba (kratkotrajna vršna) pri predvidenih 150 geosondah, kot je podano v IdP. Rezultate okvirov vršne rabe podaja zgornja preglednica (med 240 in 481 kW za ogrevanje ter med 385 in 771 kW za hlajenje).

Pri prikazanih izračunih je potrebno poudariti, da temeljijo na predpostavki izključno kondukcijskega prenosa toplote, kot posledica omejitev standardne programske opreme. Na lokaciji so po drugi strani razmere zaradi toka podzemne vode nekoliko ugodnejše, zato lahko zgornje izračune obravnavamo kot konzervativno zgornjo oceno potrebnega števila geosond za zagotavljanje potreb po plitvi geotermalni energiji.



6.3 Izračun termičnega vpliva pri predvidenem odvzemu toplote

Vpliv na porazdelitev temperatur podzemne vode in poroznega medija pod obravnavanim objektom se spreminja tako v prostoru, kot po času, v različnih hidrogeoloških enotah. V nadaljevanju je tako podano z numeričnim modelom ovrednoteno prostorsko in časovno razširjanje vpliva odvzema toplote na temperaturo podtalja v okolici fakultet.

Ovrednoteni vplivi so osnova za ugotavljanje:

1. dolgoročne sposobnosti vira za zagotavljanje toplote glede na ocenjene energetske potrebe objekta,
2. časovnih in prostorskih sprememb temperature podzemne vode, ki se bo pojavljala v okolici odvzema in v območju dolvodno v boljše prepustnih hidrogeoloških enotah,
3. sprejemljivosti posega z vidika vpliva na druge podeljene vodne pravice.

Pri kroženju prenosnika toplote skozi cevi geosonde prihaja do intenzivne prerazporeditve toplote, kar se kaže v spremembah temperature, ki so največje v neposredni bližini posamezne geosonde. Ker razpon tekočega agregatnega stanja prenosnika toplote ne sovпада s stanjem podzemne vode, lahko ob preseženem kritičnem odvzemu toplote pride tudi do potencialnega neželenelega znižanja temperature podzemne vode pod njeno ledišče. V odvisnosti od ostalih hidrogeoloških procesov transporta v poroznem mediju se vpliv spremembe temperature razširja različno hitro v različnih plasteh predvsem dolvodno s tokom podzemne vode, kar lahko vpliva na učinkovitost eventualnih sosednjih objektov za zajem toplote.

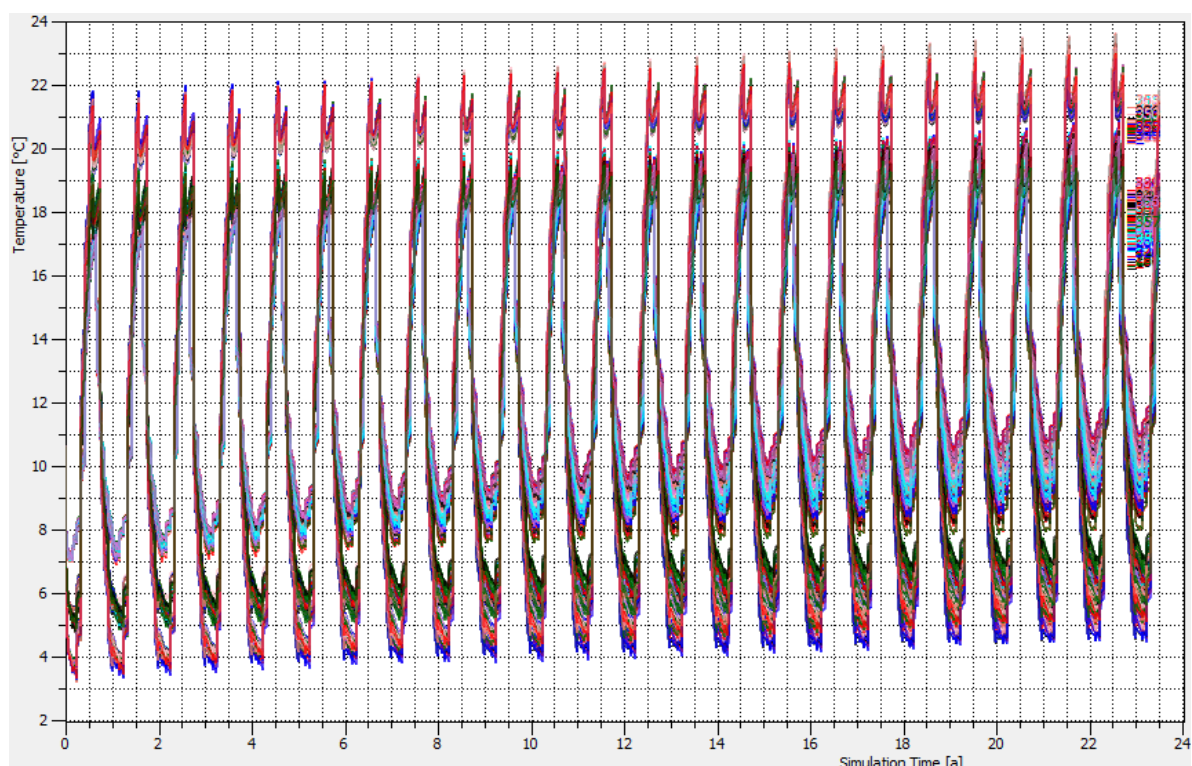
Prikazan temperaturni interval je 1°C , začetna temperatura podzemne vode je bila konzervativno ocenjena na konstantno vrednost $10,6^{\circ}\text{C}$ brez sezonskega nihanja in brez časovnega zamika. Pretok na toplotni črpalki je privzet na $Q_{\text{FS}} = 43,8 \text{ l/s}$ ($= 0,21 \text{ l/s/GS}$) oz. na $Q_{\text{FFA}} = 55,56 \text{ l/s}$ ($= 0,37 \text{ l/s/GS}$). Termični vpliv na sedimente, kamnine in podzemno vodo je ovrednoten za hkratno delovanje 150 geosond na FFA ter 212 geosond na FS. Pri tem je upoštevana sezonska razporeditev toplotne moči za posamezno lokacijo, kot jo podaja Slika 26.

Razmerja med količino toplote, ki jo posamezna lokacija v tla ponika, in toploto, ki se v drugem delu sezone na tem mestu iz tal črpa, kažejo, da imamo po optimizaciji rabe opravka z ustrezno uravnoteženostjo osnovne rabe toplotne energije, ki znaša v obravnavanem primeru 1,00.

6.3.1 Dolgoročna sposobnost vira za zagotavljanje toplote

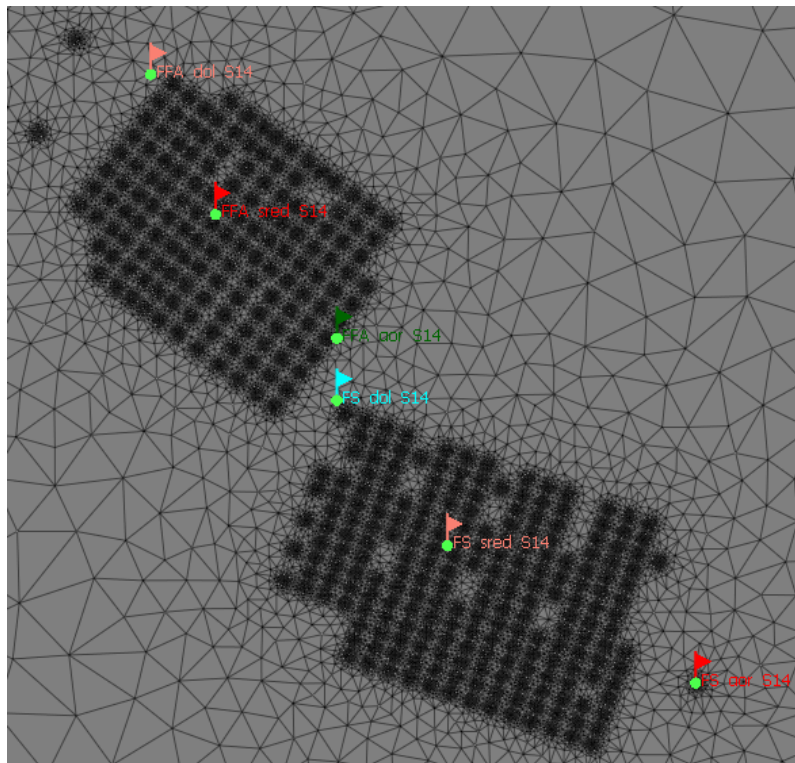
V nadaljevanju so podani rezultati numeričnih analiz za hkratno rabo energije na FS in FFA. Končna dolžina simulacij, ki temeljijo na parametrih, izmerjenih na terenu, znaša ob oddaji poročila 25 let.

Razporeditev povprečnih temperatur hladiva za 25 let prikazuje Slika 36, pri čemer so krivulje z najvišjimi (in tudi najnižjimi) vrednostmi vezane na FFA, kot posledica večje obremenitve geosond glede na njihovo skupno število. Preostale krivulje so vezane na FS, pri čemer se kaže povečevanje temperature hladiva FS, kot posledica manjšega preseganja ponikanja toplote v primerjavi s črpanjem v kW (Preglednica 5). Povprečne temperature hladiv so sicer znotraj predpisanih meja, s čemer lahko ugotovimo, da je sistem vzdržen, kot je prikazano tudi v poglavju 6.2.

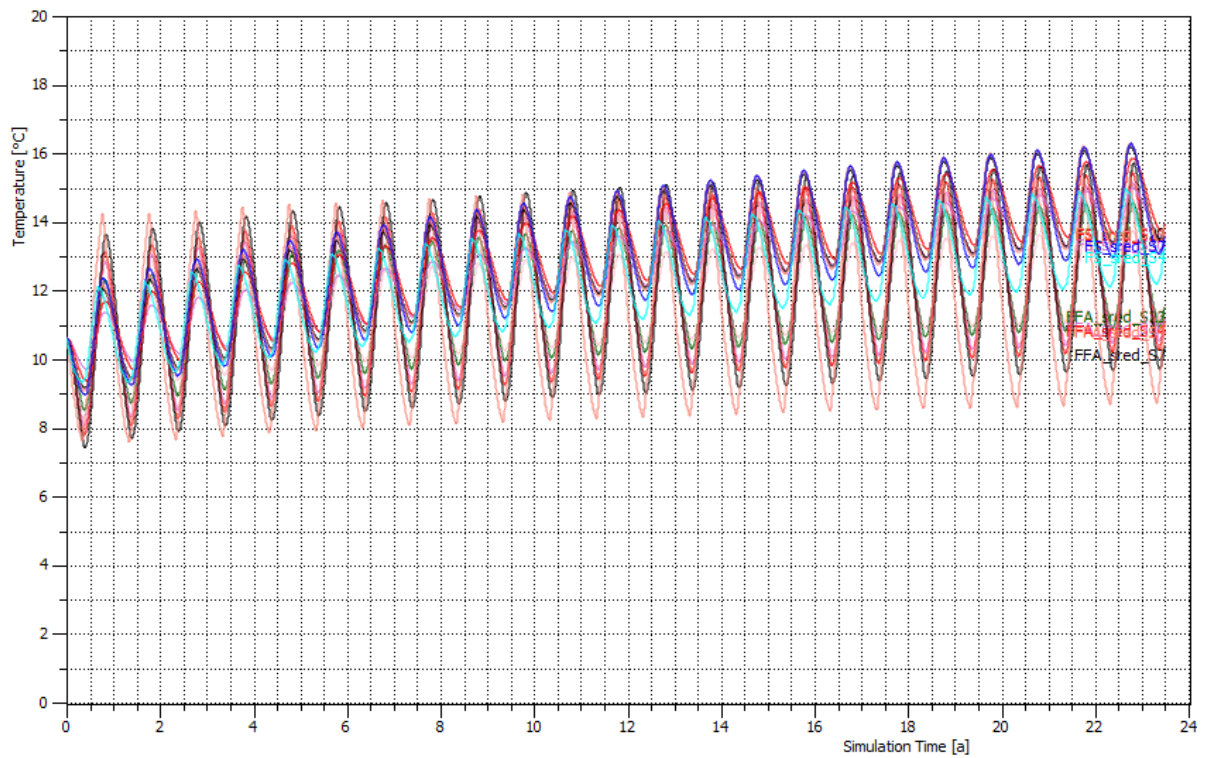


Slika 36 Časovna razporeditev povprečne temperature hladiva na geosondah v odvisnosti od odvzema toplote (hkratna raba FFA in FS).

Pri analizi scenarija hkratne rabe FFA & FS po novelirani rabi ter izmerjenih toplotnih parametrih se pokaže, da se povprečna temperatura hladiva pri FS na vsakih 10 let poveča za ca 0,5°C na robovih polja do 1,5°C v osrednjem delu polja geosond. Pri FFA se na vsakih 10 let temperatura hladiva poveča za 0,5-1°C.



Slika 37 Razporeditev opazovalnih točk v geosferi.



Slika 38 Časovna razporeditev temperature na opazovalnih točkah v geosferi v osrednjih delih posameznega polja geosond FFA in FS.



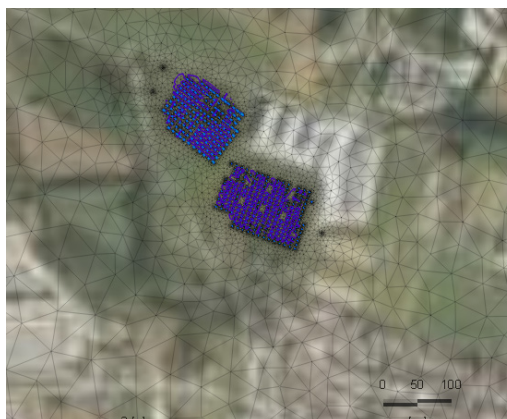
6.3.2 Prostorsko spreminjanje temperature podzemne vode

Širjenje toplotne motnje preko transporta v zasičeni in nezasičeni coni prikazujejo spodnje slike za več ločenih prerezov. Širjenje temperaturne motnje je zaradi dobre uravnoteženosti rabe energije (ogrevanje / hlajenje) majhno. Še najbolj izrazito je v območju bolje prepustnih hidrogeoloških enot, torej predvsem v zgornjem visečem vodonosniku, manj v spodnjem vodonosniku, medtem ko v preostalih plasteh temperaturna anomalija stagnira na območju geosond. Skladno s smerjo toka podzemne vode v zgornjem vodonosniku se temperaturna motnja širi predvsem v longitudinalni, bistveno manj pa v lateralni smeri.

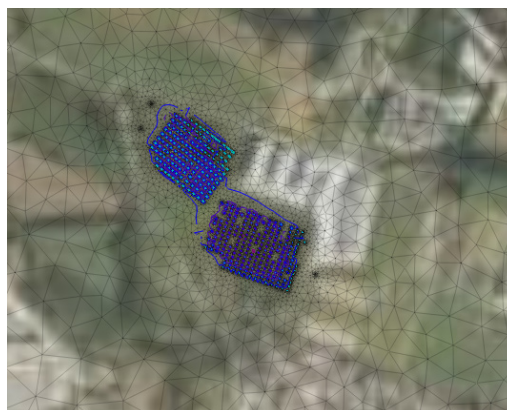
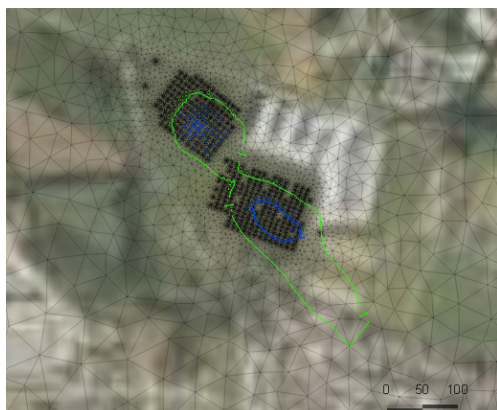
Po treh letih obratovanja se motnja v velikosti $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ praktično ne razširi niti v spodnjem, niti v zgornjem vodonosniku izven območja geosond FFA in FS (Slika 39). Pri tem je na levi sliki viden učinek večje predvidene obremenitve na območju FFA v primerjavi s FS glede na število geosond, zato se sprememba temperature 1°C pri FFA pojavi na nekoliko večji površini. Zaradi primerne uravnoteženosti med črpanjem in ponikanjem toplote na obeh območjih, FS in FFA, po treh letih izoterma $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ vseeno ne premakne izven območja parcel, kar kaže na dobro ohranjanje naravne temperature na območju predvidene rabe. Obliko vplivnega območja v prerezu prikazuje tudi Slika 42.

Po desetih letih obratovanja se motnja v velikosti 1°C v zgornjem vodonosniku vzdolžno razširi na razdalji 250m proti jugovzhodu od roba polja geosond FS. Motnja v velikosti 1°C se v spodnjem vodonosniku razširi slabih 20 m proti severozahodu od roba polja geosond FFA (Slika 40). Obliko vplivnega območja v prerezu prikazuje tudi Slika 43.

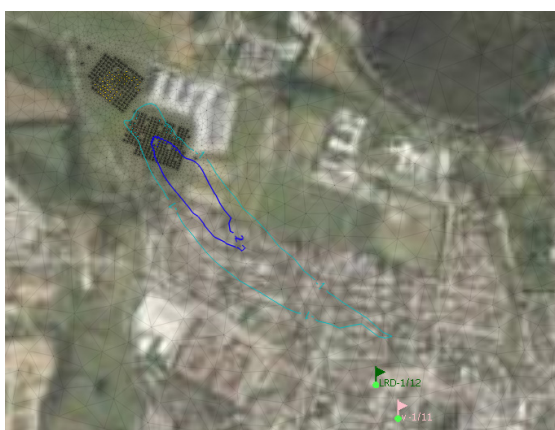
Po petindvajsetih letih obratovanja se motnja v velikosti 1°C vzdolžno razširi na razdalji 600m proti jugovzhodu od roba polja geosond FS. Motnja v velikosti 1°C se v spodnjem vodonosniku razširi slabih 150 m proti severozahodu od roba polja geosond FFA (Slika 41). V območju permokarbonske podlage se izoterme $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ v osrednjem delu polja po 25 letih staknejo in tvorijo enotno polje temperaturne anomalije, medtem ko na območju robov polja geosond izolinijske ostajajo vezane na posamezno geosondo. Obliko vplivnega območja v prerezu prikazuje tudi Slika 44.



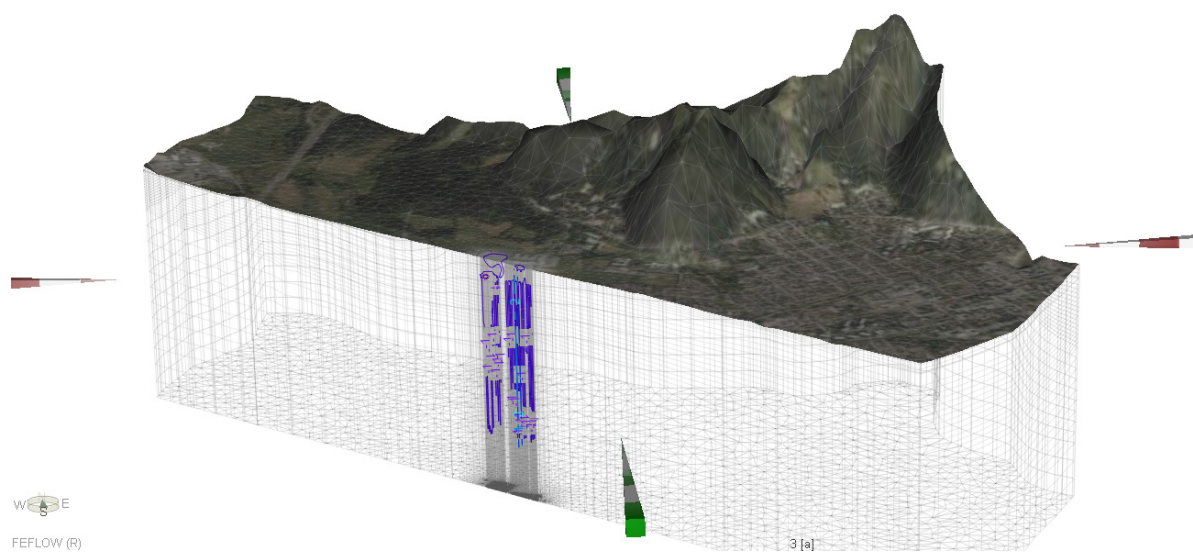
Slika 39 Situacija prostorske razporeditve spremembe temperature $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ po 3 letih obratovanja (levo zelena linija zgornji vodonosnik, desno modra linija spodnji vodonosnik).



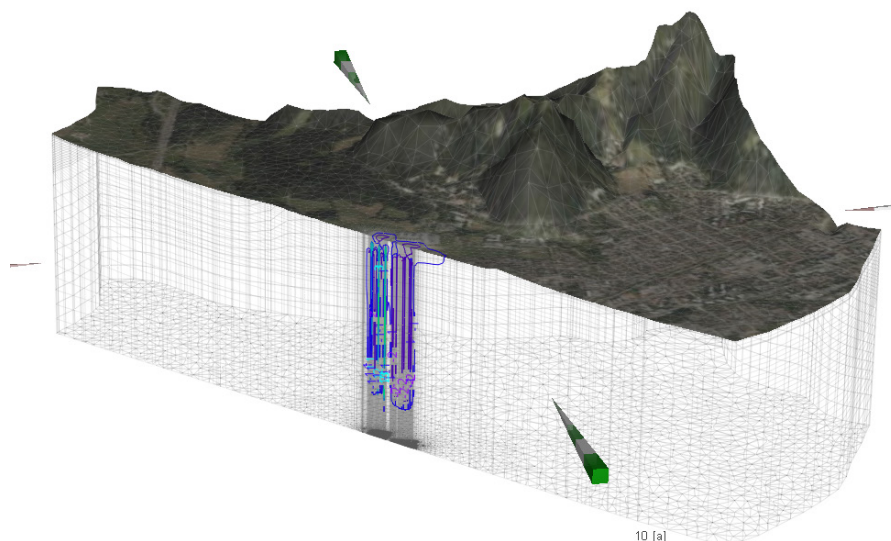
Slika 40 Situacija prostorske razporeditve spremembe temperature $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ po 10 letih obratovanja (levo zelena linija zgornji, desno modra linija spodnji vodonosnik).



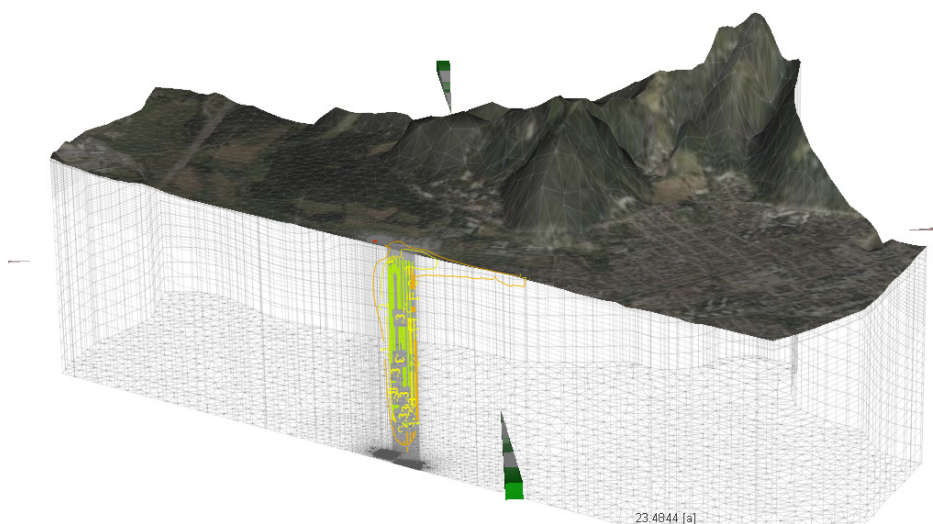
Slika 41 Situacija prostorske razporeditve temperature $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ po 25 letih obratovanja (levo modra linija zgornji vodonosnik, desno oranžna linija spodnji vodonosnik).



Slika 42 Prostorska razporeditev spremembe temperature v sedimentih, kamnini in podzemni vodi v odvisnosti od predvidenega odvzema toplote po 3 letih obratovanja. Vpliv je omejen na neposredno okolico geosond.



Slika 43 Prostorska razporeditev spremembe temperature v sedimentih, kamnini in podzemni vodi v odvisnosti od predvidenega odvzema toplote po 10 letih obratovanja. Vpliv se širi le v zgornjem vodonosniku skladno s tokom podzemne vode, v spodnjem je širjenje minimalno.



Slika 44 Prostorska razporeditev spremembe temperature v sedimentih, kamnini in podzemni vodi v odvisnosti od predvidenega odvzema toplote po 25 letih obratovanja. Vpliv se razširja ca 150 m proti severozahodu v spodnjem in ca 600 m proti jugovzhodu v zgornjem vodonosniku.

6.4 Vpliv na podeljene vodne pravice

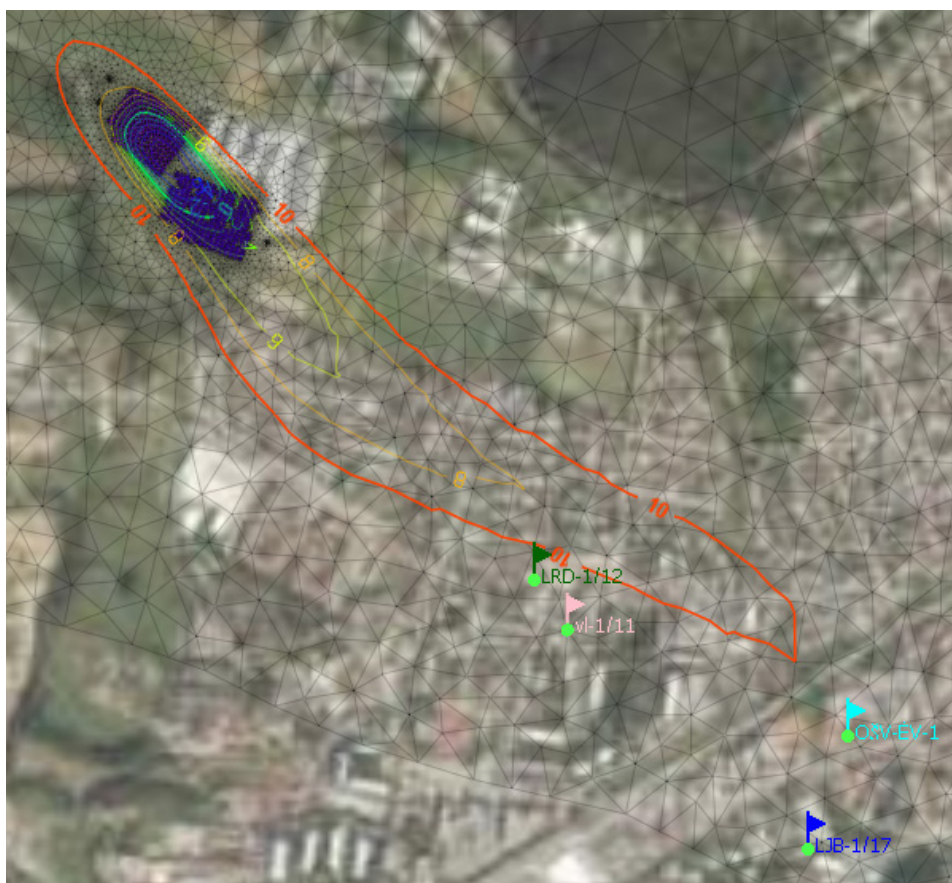
Za potrebe opredelitve celotnega možnega vpliva na podeljene vodne pravice podajamo v tem poglavju tako rezultate iz faze IdP, kakor tudi iz faze PZI. S tem je z ene strani prikazan možni vpliv na vir toplote, v kolikor bo prihajalo do bistvenih odstopanj od v PZI predpisane rabe energije. Po drugi strani pa je s podajanjem vseh dobljenih rezultatov prikazana omejitev vpliva na vir toplote z nadaljnjo optimizacijo preko dimenzioniranja polja geosond in terenskih meritev toplotnih parametrov.

V širšem dolvodnem območju zgornjega vodonosnika obstaja več vodnih virov s podeljeno vodno pravico za pridobivanje toplote, seznam podaja spodnja preglednica, lokacije pa Slika 45. Pri tem je konzervativno privzeto, da vsi vodni viri izkoriščajo podzemno vodo iz zgornjega vodonosnika, s čemer bi bil vpliv temperature motnje na dane vodne vire največji. Vsaj za OŠV-ČV-1 vemo, da se podzemna voda sicer zajema iz spodnjega vodonosnika, zato je vpliv nanjo zagotovo bistveno manjši od izračunanega. Tudi sicer lahko zaključimo, da je vpliv na vse štiri najbližje sisteme voda-voda manjši od 1°C po 25 letih obratovanja.

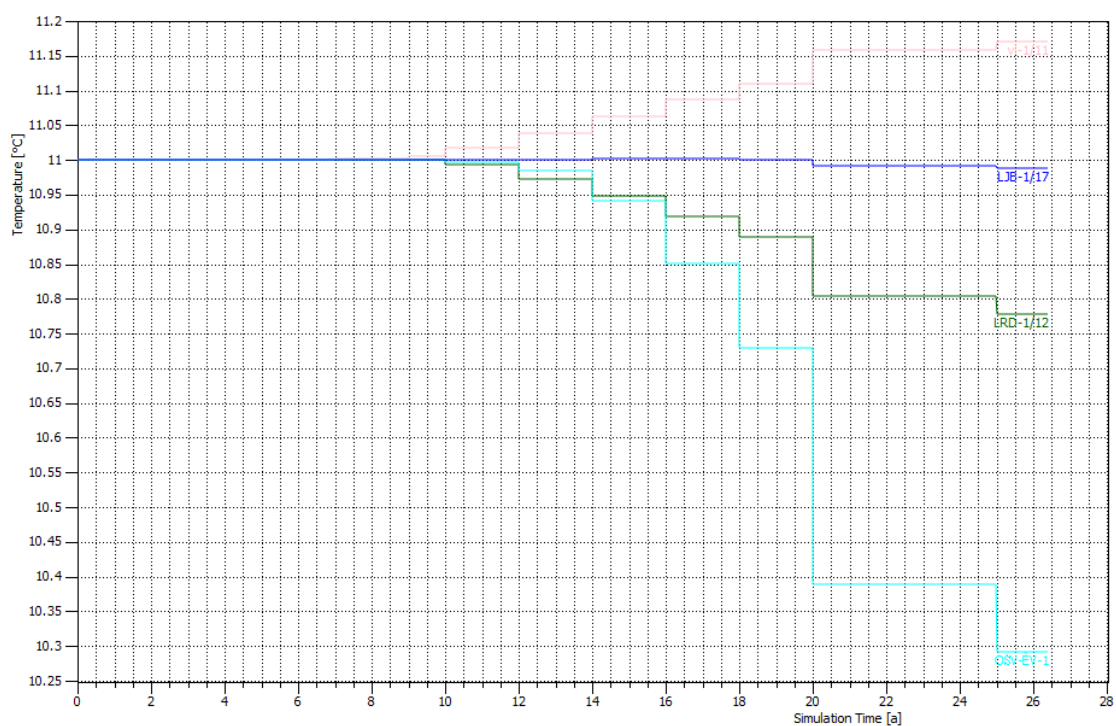
Opozoriti je potrebno, da javno dostopnih podatkov o morebitnih drugih sistemih zemlja - voda ni, saj za slednje ni potrebno pridobiti vodnega dovoljenja. Morebitnih interakcij s slednjimi v bližini obravnavanega območja tako ne moremo vrednotiti.

Preglednica 10 Podeljene vodne pravice za pridobivanje toplote (maj 2022)

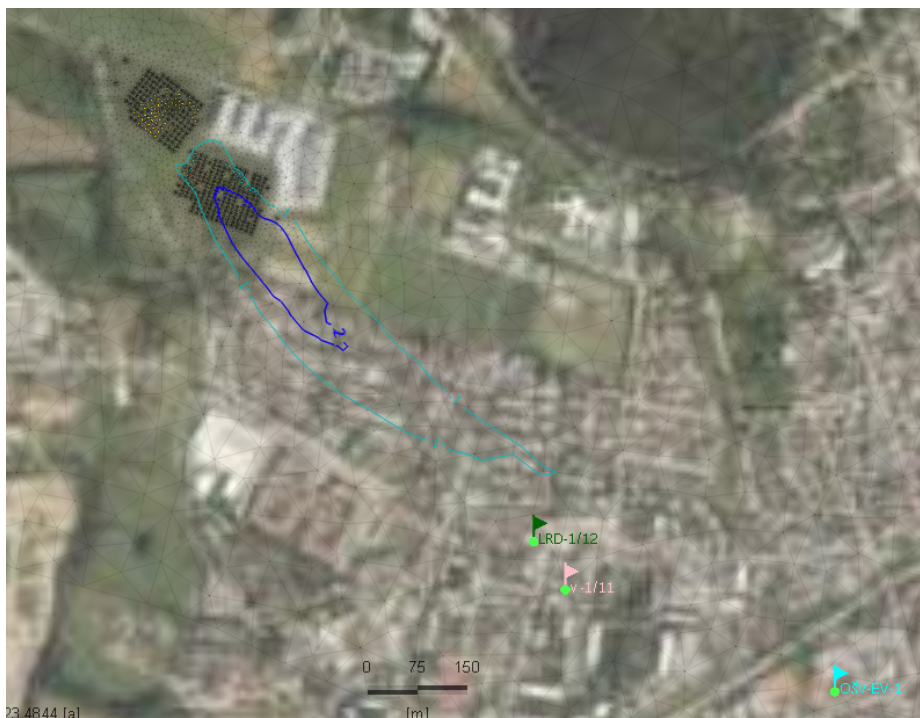
Ime	Številka vodnega dovoljenja	Y ETRS89	X ETRS89	Sistem	Količina [l/s]
LRD-1/12	35532-203/2013	459266	100711	Voda-voda	1,2
vl-1/11	35532-117/2011	459293	100644	Voda-voda	0,83
OŠV-ČV-1	35532-43/2021	459689	100474	Voda-voda	4,8
LJB-1/17	35532-1/2018	459653	100319	Voda-voda	10
Pretečena vodna dovoljenja					
-	35532-14/2005	459454	100723	Voda-voda	1



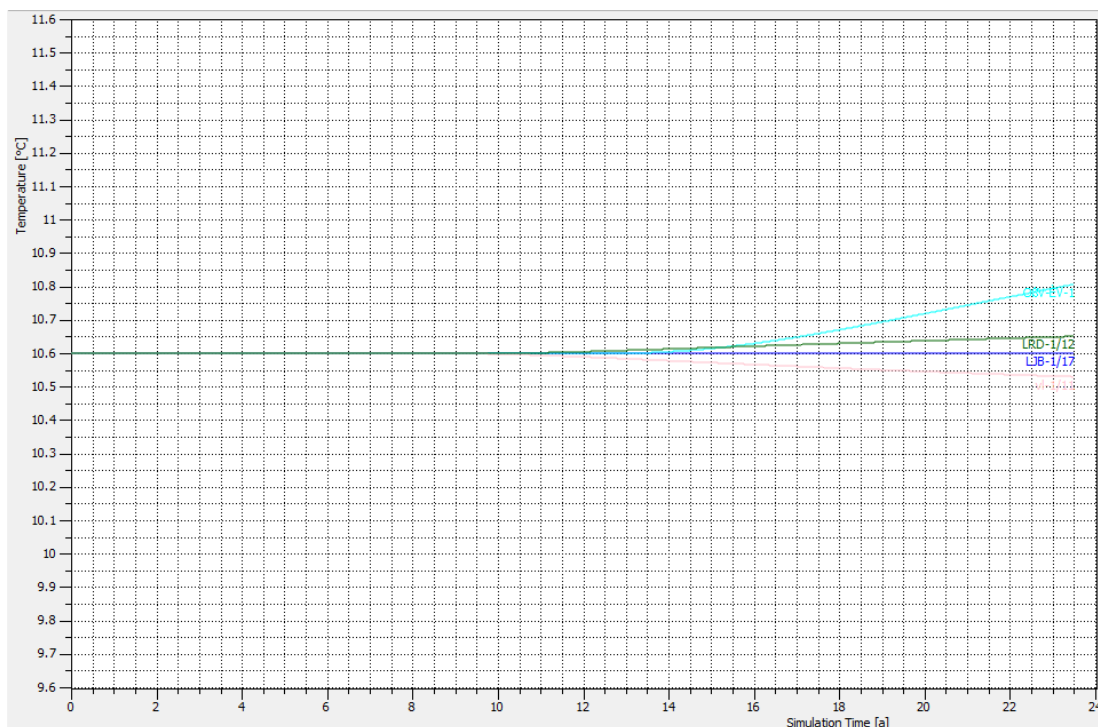
Slika 45 Prostorsko razširjanje toplotne anomalije zaradi rabe toplote na FFA in FS, kot je podana v IdP, z lokacijami drugih registriranih vodnih virov za rabo podzemne vode za pridobivanje toplote (sprememba $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ predstavlja izoterma št 10).



Slika 46 Sprememba temperature zaradi rabe, definirane v IdP, v zgornjem vodonosniku na območjih obravnavanih vodnih dovoljenj v 25 letih delovanja (vpliv je manjši od 1°C).



Slika 47 Prostorsko razširjanje toplotne anomalije zaradi rabe toplote na FFA in FS na podlagi optimizacije v PZI, z lokacijami drugih registriranih vodnih virov za rabo podzemne vode za pridobivanje toplote. svetlo modra linija označuje spremembo $\Delta T = 1^\circ\text{C}$

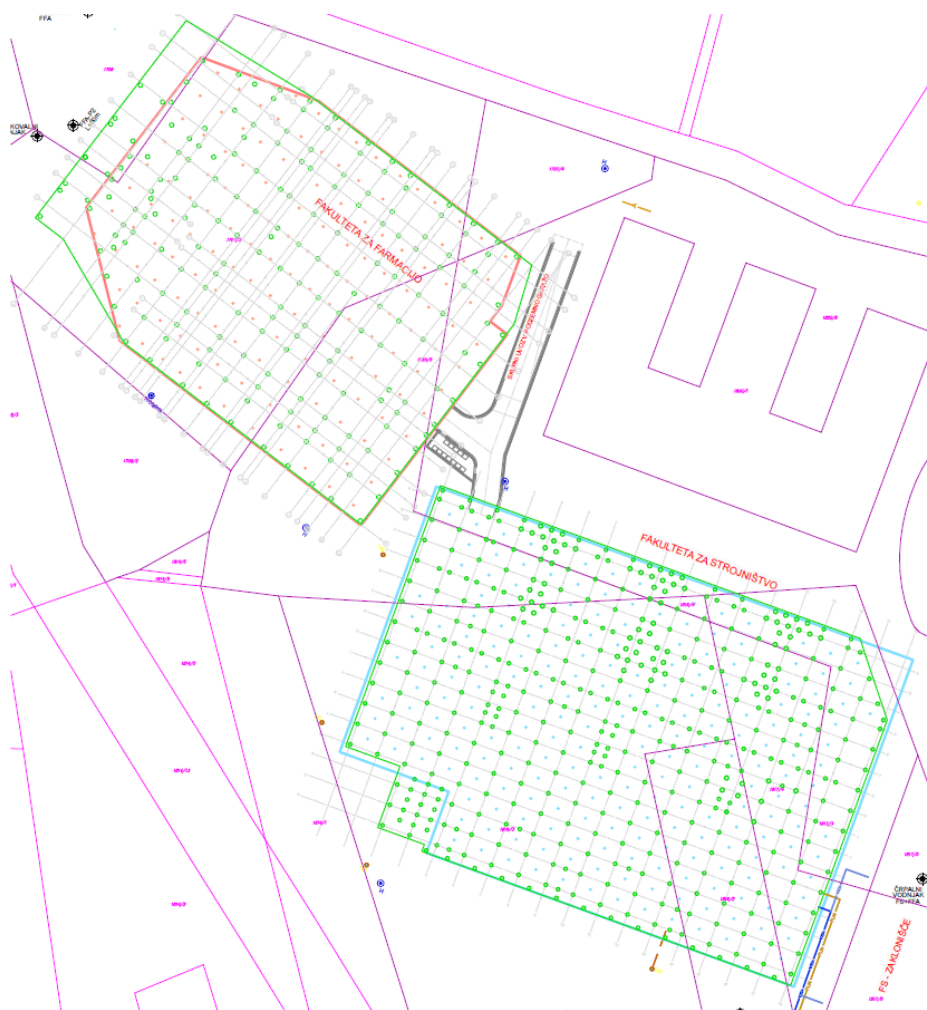


Slika 48 Sprememba temperature zaradi rabe, definirane v PZI, v zgornjem vodonosniku na območjih obravnavanih vodnih dovoljenj v 25 letih delovanja (vpliv je manjši od $0,5^\circ\text{C}$).

V dolvodnem območju spodnjega vodonosnika ne obstajajo vodni viri s podeljeno vodno pravico. Najbližji je izven modeliranega območja v Dravljah, do katerega pa v projektiranem obdobju toplotna motnja ne more prispeti.

7. VPLIV NA TRANSMISIVNOST VODONOSNIKA

Zaradi morebitnih kumulativnih učinkov izvedbe geosond in pilotov na zmanjšanje transmisivnosti vodonosnika smo preverili tudi geometrijo predvidenega posega. Spodnja preglednica podaja predviden raster pilotov in geosond, njihove premere ter globine znotraj zasičene cone aluvialnega vodonosnika. Slednja se nahaja med ca 16 (nivo podzemne vode) in 55 m (podlaga vodonosnika), ob razpoložljivih terenskih podatkih pa lahko predpostavimo enovito prepustnost po celotnem profilu prodno peščeno meljastega vodonosnika.



Slika 49 Razporeditev geosond in pilotov na območju FFA in FS.

Tako piloti kot tudi geosonde bodo segali v zasičeno cono vodonosnika, a zaradi njihove razporeditve predvideno temeljenje s piloti in način ogrevanja/hlajenja z geosondami **ne bo presežno vplivalo na transmisivnost vodonosnika oz. je ne bo zmanjšalo za več kot 10%** kot določa Uredba o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnikov Ljubljanskega barja in okolice Ljubljane (Uradni list RS, št. 115/07, 9/08 – popr., 65/12 in 93/13).



Preglednica 11 Globine, razporeditev in število geosond in pilotov ter vpliv na transmisivnost

	Objekt FFA
Širina prečno na tok	85
Število pilotov	14
Premer pilota	1,2
Število geosond	14
Premer geosonde	0,25
Debelina vodonosnika	39
Globina pilotov pod nivojem podzemne vode	8,15-13,15
Vpliv na transmisivnost - GS	4,1%
Vpliv na transmisivnost - piloti	4,1-6,7%

*hkratni učinek pilotov in geosond ni mogoč, ker piloti in geosonde niso v isti ravnini prečno na tok podzemne vode



8. ZAKLJUČEK

Izveden elaborat je namenjen vrednotenju vpliva predvidenega zajema in ponikanja toplote na podtalje, torej na temperaturo kamnin, sedimentov in podzemne vode na območju fakultet in dolvodno v obeh vodonosnikih na območju. Cilj naloge je z ene strani optimizacija zajema geotermalne energije glede na izmerjene hidrogeološke in toplotne razmere, z druge pa tudi ugotavljanje vpliva na druge nosilce vodnih pravic ter na transmisivnost vodonosnika.

Na območju fakultet FFA in FS je bila analizirana možnost rabe geotermalne energije s sistemom zemlja - voda (geosonde). Za potrebe določitve potenciala zajema toplote je bil izdelan tako numerični hidrogeološki model toka podzemne vode in transporta toplote, za potrebe optimizacije polja geosond pa še analitični model na podlagi terensko izmerjenih podatkov.

Glavne ugotovitve izvedene analize rabe plitve geotermalne energije so naslednje:

- Lokacija predvidenega zajema geotermalne energije je locirana v vodovarstvenem območju, zaradi česar je potrebno posebno pozornost nameniti varovanju podzemne vode tako med izvedbo, kot med obratovanjem (izbira ustreznih dodatkov proti zmrzovanju, ukrepi med vrtanjem in vgradnjo geosond, ipd.).
- Sistem geosond predstavlja zanesljiv vir geotermalne energije na lokaciji, pri čemer po optimizaciji, ki je bila izvedena od faze IdP do PZI ne prihaja do neželenih stranskih učinkov, kot je zamrzovanje podtalja, ohlajanje/pregrevanje hladiva, ipd. Oba sistema sta vzdržna, uravnotežena in predstavljata bistveno manjši vpliv na podtalje kot pred optimizacijo.
- povzetek izračunov za polje geosond FFA
 - Za zagotavljanje redne rabe energije (brez vršnih obremenitev) zadošča že 96 geosond (8x12) v oddaljenosti 8m pri zagotavljanju nelaminarnega toka v ceveh geosonde, torej pri pretoku 1.05 l/s/geosondo ali več.
 - vršna raba energije ni podana, zato scenarij z redno in vršno rabo ni bil ovrednoten.
 - pri ocenjenih razmerjih med vršnimi rabami po posameznih mesecih in ocenjenem trajanju vršne rabe je bila ocenjena dopustna dodatna raba (kratkotrajna vršna) pri predvidenih 150 geosondah, kot je podano v IdP.

Rezultate okvirov vršne rabe podaja zgornja preglednica (med 240 in 481 kW za ogrevanje ter med 385 in 771 kW za hlajenje).

Temperaturna motnja z $\Delta T = 1^\circ\text{C}$, ki bo posledica odvzema in ponikanja toplote za FFA/FS bo po 25 letih v zgornjem vodonosniku segala ca 600 m dolvodno v smeri jugovzhod ter okoli 150 m v zgornjem vodonosniku v smeri severozahod, medtem ko bo v permokarbonskih plasteh pri optimizirani rabi ostajala znotraj polja geosond.

Na temperaturo vodnih virov s pridobljenimi vodnimi dovoljenji za sisteme izkoriščanja plitve geotermalne energije (voda-voda), ki se nahajajo jugovzhodno od obravnavanega sistema geosond FFA/FS planiran poseg ne bo vplival prekomerno, torej z $\Delta T < 1^\circ\text{C}$. Opozoriti je potrebno, da javno dostopnih podatkov o morebitnih drugih sistemih zemlja - voda ni, saj za slednje ni potrebno pridobiti vodnega dovoljenja - morebitnih interakcij s slednjimi v bližini obravnavanega območja tako ne moremo vrednotiti.

Usmeritve za izvajanje geosond

1. Za prenosnik toplote se lahko uporabljajo le sredstva kot je propilen glikol, oziroma sredstva z manjšo toksičnostjo od propilen glikola kot je slanica, če jim niso dodani težko bio-razgradljivi dodatki, klorove spojine in soli težkih kovin, na primer, dodatki za preprečevanje korozije.
2. zaprti sistemi morajo imeti kontrolni sistem proti puščanju, pri čemer se črpalka ugasne in vklopi alarmni sistem.
3. Pri izvedbi geosond bo potrebno posebno pozornost posvetiti cementaciji, ki predstavlja eno ključnih vrtalnih del za učinkovito izvedbo zajetij toplote. Namenjena je:
 - a. Ohranitvi kakovosti podzemne vode – preprečiti mora:
 - i. infiltracijo in precejanje vode ob vrtini s površja proti podzemni vodi ter
 - ii. pretakanje podzemne vode iz zgornjega v spodnji vodonosnik
 - b. Zagotovitvi stabilnost in zaščito cevi U-zanke s kakovostnim stikom cevi in tal.
 - c. Zagotoviti obstojnost vrtine z zaščito pred morebitno agresivnostjo vode.
4. Uporabnik naprave za izkoriščanje zemljine toplote mora redno nadzirati, da prenosnik toplote ne uhaja.
5. Če se naprava z izkoriščanje zemljine toplote opusti, je potrebno izprazniti prenosnik toplote in cevi popolnoma zapolniti z materialom, ki se strdi in ne razpoka na mrazu. V načrtu geosond mora biti predpisan način opuščanja sistema, katerega del je obvezno praznjenje hladiva iz geosond.