

Hidrogeološki model:

Numerična analiza rabe
podzemne vode za potrebe
plitve geotermije za lokacijo
Huje v Kranju

NAROČNIK**Stanovanjski sklad RS**

Poljanska cesta 31,
1000 LJUBLJANA

SODELUJOČI**IRGO Consulting d.o.o.**

Slovenčeva 93
SI-1000 Ljubljana

ŠT. ELABORATA

2012554

KRAJ IN DATUM

Ljubljana, februar 2026



PROJEKTANT

IRGO Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje,
Slovenčeva 93, SI-1000 Ljubljana
dr. Jože Ratej, univ.dipl.inž.geol.

POOBlašČENI INŽENIR

dr. Jože Ratej,
univ. dipl. inž. geol.

SODELAVCI

Mojca Zotler,
univ. dipl. okolj. tehn.



Kazalo

1.	UVOD.....	5
1.1	Izrazi in standardi	6
1.2	Namen izdelave numeričnega modela	6
1.3	Funkcija modela.....	7
1.4	Splošne geološke in hidrogeološke razmere.....	7
2	KONCEPTUALNI MODEL	8
2.1	Vodonosni sistem.....	8
2.1.1	Hidrogeološka zgradba območja.....	8
2.1.2	Dinamika nihanja nivojev podzemne vode.....	9
2.1.3	Smer toka podzemne vode.....	10
2.2	Hidrološke meje	11
2.3	Hidravlične lastnosti sistema	12
2.4	Točkovni elementi modela	13
2.5	Vodna bilanca.....	15
3	OPIS KODE MODELA.....	16
3.1	Predpostavke in omejitve	16
3.2	Način izračuna.....	16
3.3	Vpliv predpostavk in omejitev na model	17
4	IZDELAVA MATEMATIČNEGA MODELA.....	18
4.1	Prostorska domena modela.....	18
4.2	Hidravlični parametri	19
4.2.1	Hidravlična prepustnost.....	19
4.3	Točkovni elementi modela	19
4.4	Robni pogoji	19
4.5	Kalibracija modela	19
5	REZULTATI IN INTERPRETACIJA	20
5.1	Simulacija črpanja podzemne vode in opredelitev toplotne reciklaže preko povratnega toka	20
6	SKLEPI.....	22
7	VIRI IN LITERATURA	23



Slike

Slika 1: Proučevana lokacija posega za sosesko ob Savi Huje v Kranju.	5
Slika 2: Osnovna geološka karta z lokacijo soseske Huje v Kranju (črni križec s krožcem).	8
Slika 3: Nihanje nivoja podzemne vode na obravnavanem območju v obdobju razpoložljivih meritev.	9
Slika 4: Karta gladine podzemne vode (modre črte) in izohips (rjave črte) predkvartarne podlage za srednje visoko stanje (vir: ARSO).	10
Slika 5: Smer toka gladine podzemne vode (modre črte) na območju gradnje Huje, 20.11.2025 (IRGO, 2025).	11
Slika 6: Meje modela in pripisani robni pogoji.	12
Slika 7: Prikazana prostorska razporeditev vodnjakov za sosesko Huje v Kranju in lokacije pridobljenih vodnih dovoljenj za rabo podzemne vode.	14
Slika 8: Prikaz površja terena in podlage z lokacijo črpalnih in ponikalnih vodnjakov.	18
Slika 9: Simulacije toka podzemne vode pri načrtovanih črpalnih količinah.	20

Tabele

Tabela 1: Opisne statistike nihanja gladine podzemne vode na proučevanem območju gradnje (kote gladin podzemne vode v m n. v.).	10
Tabela 2: Rezultati hidravličnih testiranj (črpalni preizkusi) na lokaciji Huje.	12
Tabela 3: Rezultati hidrogeoloških raziskav (povzeto po Poročilu o izvedenih hidrogeoloških preiskavah na lokaciji nove stanovanjske soseske ob Savi »Huje« v Kranju, 2025).	13
Tabela 4: Točkovni elementi modela.	13

1. UVOD

Nameravana novogradnja bo potekala na območju, ki ga opredeljuje veljavni Občinski podrobni prostorski načrt za del urejanja KR SA 6/2 (Stanovanjska sošeska ob Savi) (Uradni list RS, št. 64/15). Stanovanjsko sošesko ob Savi bo sestavljalo 10 stanovanjskih objektov in ena podzemna garaža. Novogradnja bo za ogrevanje in hlajenje kot vir toplote uporabljala toploto podzemne vode oziroma t. i. plitvo geotermijo. V numerični analizi rabe podzemne vode obravnavamo 3 črpalne, od katerih 2 delujeta izmenično, in 2 identična ponikalna vodnjaka.

Za potrebe določitve ustreznosti načrtovane rabe smo izdelali simulacijo toka podzemne vode pri črpanju skupne maksimalne obratovalne količine črpanja, ki znaša **40,90 l/s**. Maksimalna skupna projektirana količina črpanja je glede na zahteve standarda SIA 384/7 **54 l/s**.

Na lokaciji so bile izvedene geološke in hidrogeološke preiskave, katerih glavne rezultate, relevantne za izračun, povzemamo v tem poročilu. Njihov cilj je bil določiti smer in hitrost toka podzemne vode glede na predvideno količino črpanja in umeščenost vodnjakov, s čimer se med drugim preveri tudi vzdržnost vračanja podzemne vode s spremenjenimi fizikalno-kemijskimi lastnosti v podtalje in prepreči t. i. povratni tok, s katerim lahko pride do toplotne reciklaže. S črpanjem se okrog vrtin namreč ustvari znižanje nivoja podzemne vode, ki ima lijakasto obliko, t. i. depresijski lijak. Ta dinamični nivo je odvisen od prepustnosti zemljine in količine črpanja.

Stanovanjska sošeska, pod delovnim imenom »Stanovanjska sošeska ob Savi« (v nadaljevanju sošeska Huje), se bo nahajala v Kranju med Savsko cesto in reko Savo na zahodu. Lokacija obravnavanega območja je predstavljena na Slika 1.



Slika 1: Proučevana lokacija posega za sošesko ob Savi Huje v Kranju.

Na lokaciji same gradnje sošeske Huje se v zatečenem stanju nahaja travnik.



1.1 Izrazi in standardi

Uporabljeni viri in standardi pri modeliranju:

- 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

Po zajemu plitve geotermalne energije za potrebe ogrevanja in hlajenja Stanovanjske soseske Huje ob Savi se v okviru sistema voda–voda izčrpana podzemna voda po prehodu skozi energetski sistem vrača nazaj v vodonosnik. V režimu hlajenja je vračana voda praviloma ohlajena (v režimu ogrevanja pa ogreta), zato ponikanje predstavlja spremembo toplotnega stanja v neposredni okolici ponikalnih vodnjakov. Ker gre za hidravlično povezan vodonosnik, se takšna sprememba lahko z gibanjem podzemne vode prenaša tudi v širše območje.

Pri načrtovanju in obratovanju sistema v prvi vrsti stremimo k preprečevanju povratnega toka od ponikalnih proti črpalnim vodnjakom. Povratni tok pomeni, da se del vračane vode ponovno zajame v črpalnem vodnjaku. Skupaj s povratnim tokom se z advekcijo ne prenaša le voda kot masa, temveč tudi toplota, kar lahko spremeni temperaturo podzemne vode, ki priteka v črpalni vodnjak. Posledično se spremeni vhodna temperatura v toplotno črpalko oziroma v sistem hlajenja/ogrevanja, kar se lahko odrazi v nižji energetski učinkovitosti in zmanjšani stabilnosti delovanja sistema voda–voda. Poleg tega lahko ponavljajoče se vračanje termično spremenjene vode vodi v postopno oblikovanje območja z drugačnim temperaturnim režimom, kar je z vidika dolgoročnega obratovanja neželjeno.



Z namenom preveritve navedenih tveganj in optimizacije zasnove je predvidena izdelava numeričnega matematičnega modela toka podzemne vode (in po potrebi povezanega prenosa toplote). Modeliranje omogoča celovito obravnavo ključnih vplivov, kot so razporeditev vodnjakov, črpalne in ponikalne količine, hidrogeološke značilnosti vodonosnika ter vpliv robnih pogojev (npr. dinamika reke Save), ki pomembno določajo smer in intenziteto toka.

S simulacijami želimo preveriti, ali bo pri črpanju predvidenih črpalnih količin iz posameznih črpalnih vodnjakov prišlo do pojava povratnega toka od ponikalnih vodnjakov, ter oceniti, v kakšnem obsegu in v katerih hidroloških razmerah je tak pojav mogoč. Poleg tega je cilj izvedba dodatnih analiz, s katerimi bo mogoče določiti mejno količino črpanja (oziroma kombinacije črpanja in ponikanja), pri kateri se povratni tok še ne pojavlja oziroma je njegov delež zanemarljiv. Takšna določitev mejnih obratovalnih pogojev je pomembna podlaga za pripravo režima obratovanja, izbor prednostnih vodnjakov, morebitno izmenično delovanje ter za presojo dolgoročne primernosti in učinkovitosti načrtovanega sistema.

1.3 Funkcija modela

Hidrogeološki numerični model analizira tok podzemne vode v kvartarnem prodnatem vodonosniku s plastmi konglomerata.

Z modelom ni simulirana sezonska spremenljivost nivojev podzemne vode v kvartarnem vodonosniku. Prav tako v model ni vključena analiza napajanja iz padavin. Za navedene procese, ki niso vključeni, sicer ocenjujemo, da imajo na rezultate modela, glede na njegov namen, zanemarljiv vpliv.

Cilj izračunov je bil določiti ali je predvidena konfiguracija črpalnih in ponikalnih vrtin ustrezna, da ob črpanju predvidenih črpalnih količin ne pride do povratnega toka.

1.4 Splošne geološke in hidrogeološke razmere

Obravnavano območje sestoji iz nanosov in naplavin pleistocenske in holocenske starosti, ki so nastali iz nanosov reke Save ter morebitnih hudourniških nanosov iz severne in iz zahodne smeri.

Kvartarni zasip na proučevanem območju je sestavljen iz najmlajšega t.i. zasipa savskega belega proda ter mlajšega konglomeratnega zasipa. Oba zasipa sestavljajo prodi, v mlajšem konglomeratnem zasipu pa tudi tanjše plasti konglomeratov. Konglomerati so v mlajšem konglomeratnem zasipu sprva kompaktni, z globino pa kavernočnost narašča, saj imajo konglomerati v spodnjem delu izlužene vtrošnike. Debelejše plasti poplavno zaježitvenih sedimentov sestavljenih iz glinastih, meljnih in peščenih zemljin v profilu niso pričakovane. Pra Sava je v zadnjem poledenitvenem obdobju ter v interglacialnih obdobjih na proučevanem območju erodirala srednji in najverjetneje tudi starejši konglomeratni zasip ter erodirala in poglobila tudi predkvartarno podlago.

Površinsko gre za praktično raven teren na poplavni ravnici.

2 KONCEPTUALNI MODEL

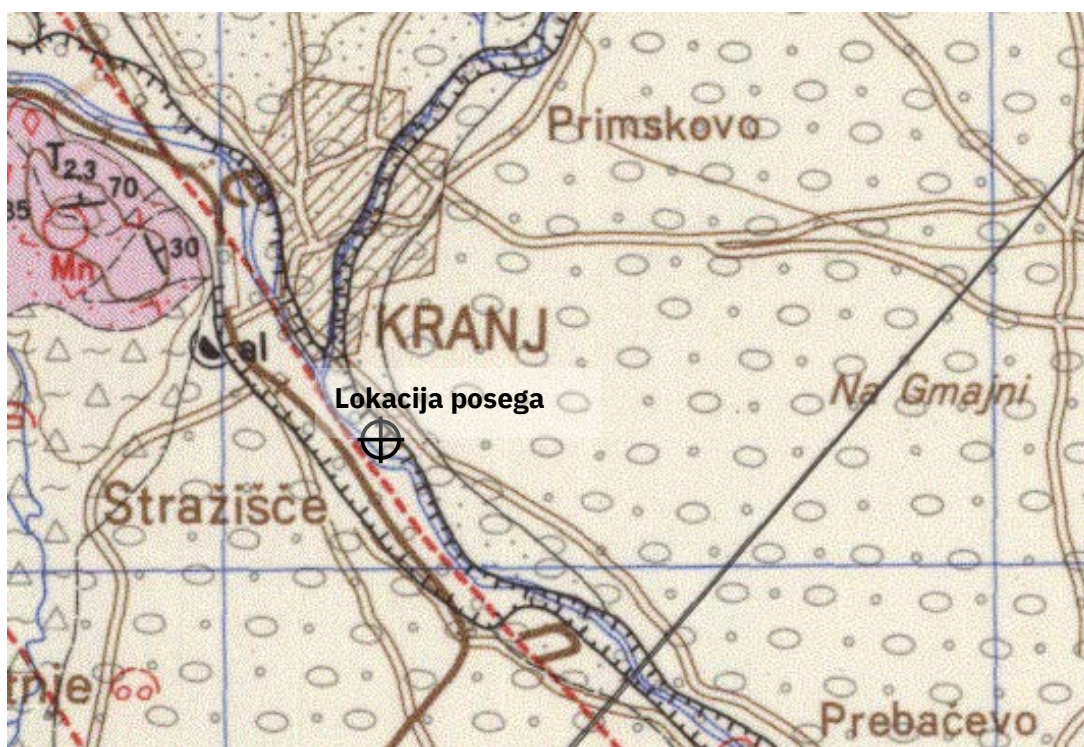
2.1 Vodonosni sistem

Vodno telo podzemne vode vodonosnika Kranjsko polje se nahaja v medzrnskem tipu vodonosnika, ki je v podlagi omejen z zelo slabo do neprepustnimi plastmi. Glede na IAH karto lokacija predvidenih vodnjakov leži na območju, izdatnega in obširnega medzrnskega vodonosnika (IAH tip 1.1). V večjem delu je vodonosnik Kranjsko polje odprt vodonosnik, zaradi lokalnih nanosov slabše prepustnih glinastih ali zaglinjenih plasti je vodonosnik mestoma polodprt, polzaprt ali zaprt. Na kratkih razdaljah se lahko podzemna voda pretaka pod tlakom. Takšni pogoji se pojavljajo le na obrobju aluvialnih nanosov.

Območje posega leži izven vodovarstvenih območij zajetij podzemne vode.

2.1.1 Hidrogeološka zgradba območja

Širšo geološko karto proučevanega območja prikazuje Slika 2.



Slika 2: Osnovna geološka karta z lokacijo seseske Huje v Kranju (črni križec s krožcem).

Na obravnavanem območju imamo opraviti s približno 65 do 70 m debelim vodonosnikom, ki je hidrodinamsko odprtega tipa.

Na podlagi hidrogeoloških preiskav in monitoringa na vrtinah znaša geometrična srednja hidravlična prepustnost (K) za območje seseske Huje po raziskavah približno $1,00E-03$. Kota predkvartarne podlage je na globini med 275 in 280 m n. v.

Podzemna voda na proučevanem območju se napaja iz podzemnega dotoka oz. iz poniklih padavin padlih v napajalnem zaledju, predvsem iz severa (na tem območju reka Sava in reka Kokra napajata vodonosnik). Delež posameznega vira napajanja za nizko, srednje in visoko vodno stanje podzemne vode, ni znan.

Na proučevanem območju ni bilo predhodno podeljene vodne pravice. Najbližja točka zajema je vodnjak za pridobivanje toplote, ki je od severnega roba zazidalnega območja soseske Huje proti severu, gorvodno, oddaljen ca. 85 m. V neposredni okolici območja so še podeljene vodne pravice na drugem bregu Save 230 m proti zahodu za pridobivanje toplote, 200 m proti severozahodu pa je vodnjak za pridobivanje vode v tehnološke namene.

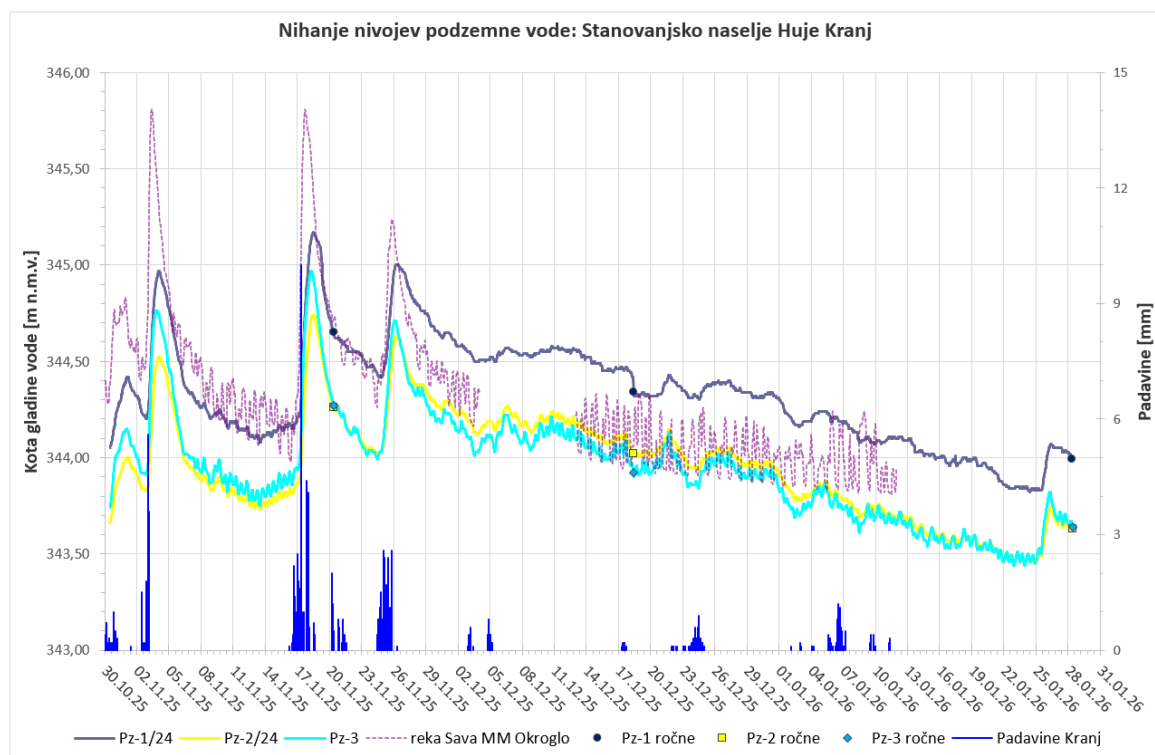
Kota nivoja podzemne vode visokega vodnega stanja znaša ca. 345 m n. v. Omočena debelina vodonosnika na proučevanem območju znaša ca. od 60 m do 65 m.

2.1.2 Dinamika nihanja nivojev podzemne vode

Meritve nivojev podzemne vode potekajo na piezometrih Pz-1/24, Pz-2/24 in Pz-3/24. Med vrtnalnimi deli je bila v Pz-1/24 zabeležena podzemna voda na globini 6,6 m od kote terena oziroma na koti 343,9 m n. v., v Pz-2/24 na globini 6,35 m oziroma 342,66 m n. v. in v Pz-3/24 na globini 6,3 m oziroma 343,81 m n. v.

V piezometre so bile vgrajene tlačne sonde znamke Eltratec, ki avtomatsko beležijo tlak in temperaturo podzemne vode s frekvenco 1 ure.

Na spodnji Slika 3 je podan nivogram nihanja nivojev podzemne vode z razpoložljivimi podatki za v letih 2025 in 2026.



Slika 3: Nihanje nivoja podzemne vode na obravnavanem območju v obdobju razpoložljivih meritev.

Podatki o gladini podzemne vode so prikazani v absolutni koti nadmorske višine. Za lažje razumevanje dogodkov nihanja podajamo tudi dnevne količine padavin merjene v mm/m² oz. l/m² in gladine reke Save na merskem mestu Okroglo.

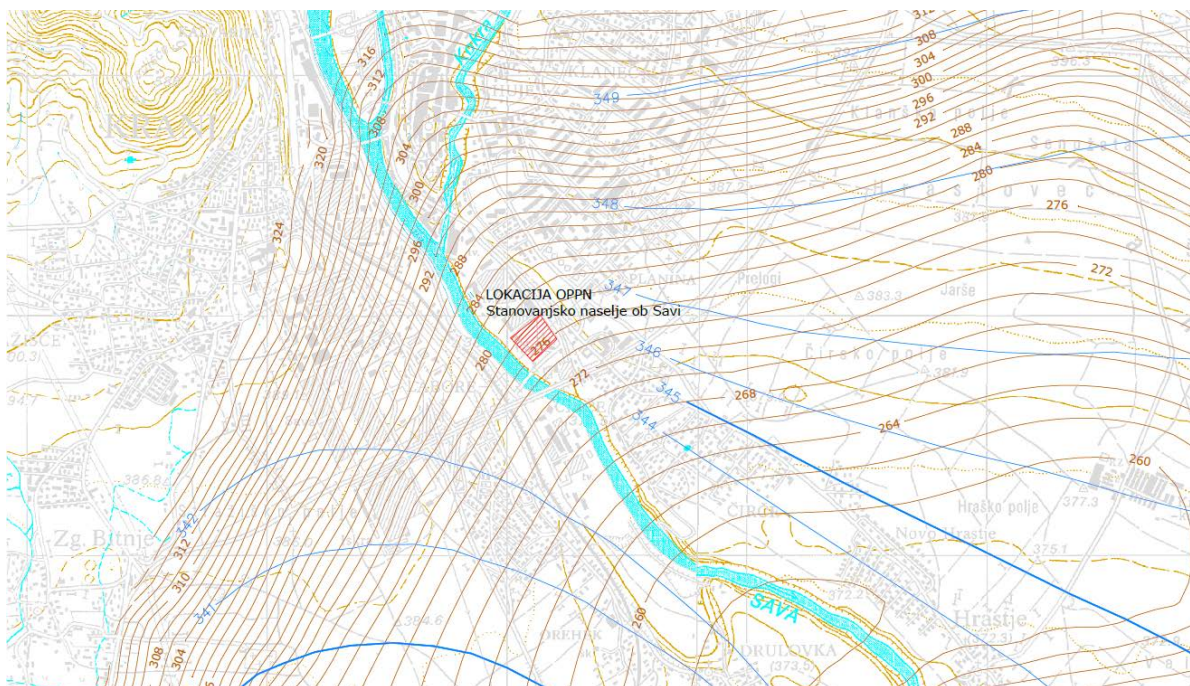
V statistično obdelavo so vključeni podatki od 30. 10. 2025 do 28. 1. 2026.

Tabela 1: Opisne statistike nihanja gladine podzemne vode na proučevanem območju gradnje (kote gladin podzemne vode v m n. v.).

	Pz-1/24	Pz-2/24	Pz-3/24
Št. meritev	2157	2158	2157
Povprečje	344,34	343,96	343,96
Mediana	344,33	343,97	343,95
Minimum	343,82	343,46	343,44
Maksimum	345,17	344,74	344,97
Razpon	1,35	1,28	1,53

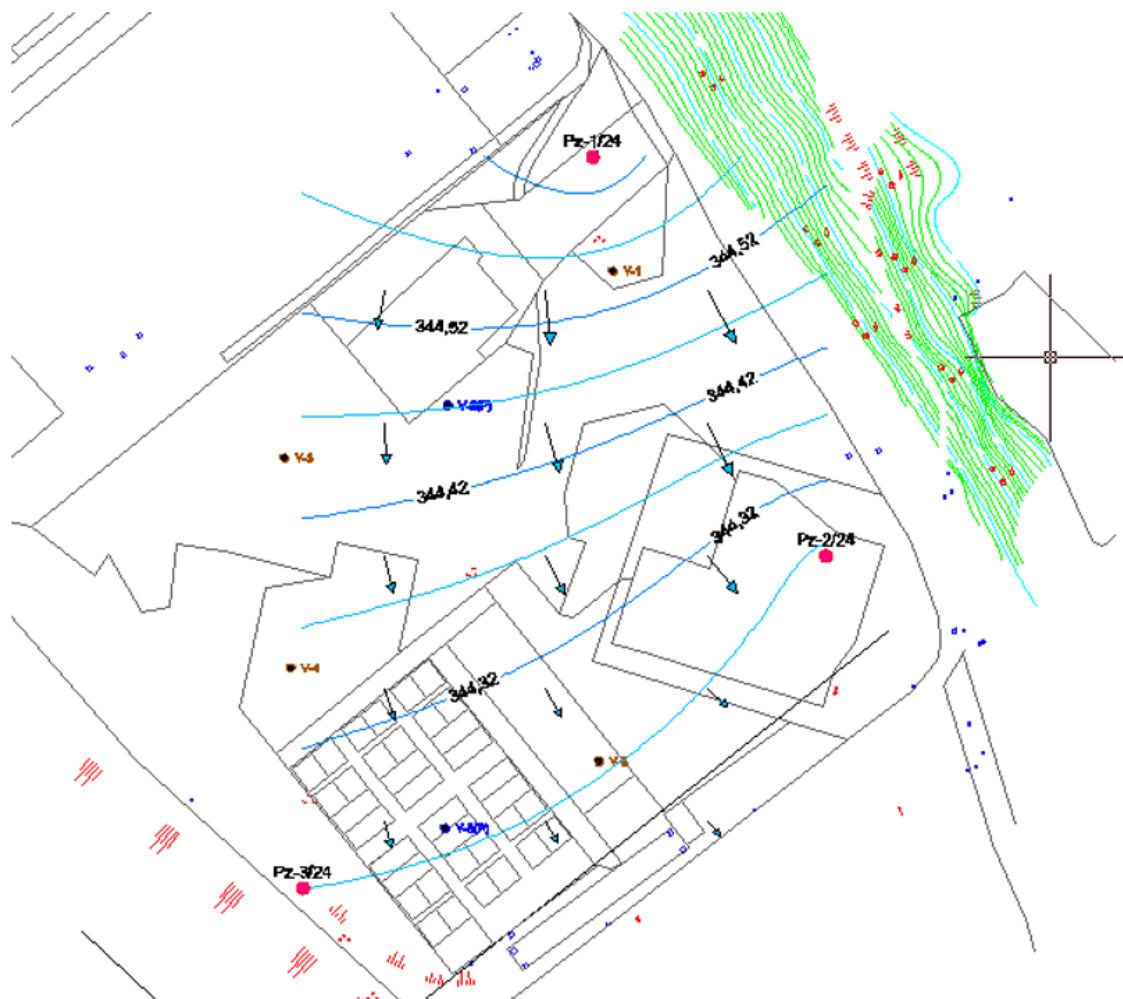
2.1.3 Smer toka podzemne vode

Smer toka podzemne vode čez obravnavano območje je na podlagi regionalnih hidroizohips, izdelanih s pomočjo numeričnega modela (ARSO), usmerjena od severa proti jugu, z rahlim odklonom proti zahodu.



Slika 4: Karta gladine podzemne vode (modre črte) in izohips (rjave črte) predkvartarne podlage za srednje visoko stanje (vir: ARSO).

Ker je na razpolago le malo opazovalnih piezometrov in so le ti prostorsko omejeni na manjše območje, so informacije o morebitnih spremembah smeri toka podzemne vode izven neposrednega območja obravnave nezanesljive oziroma nezadostne.



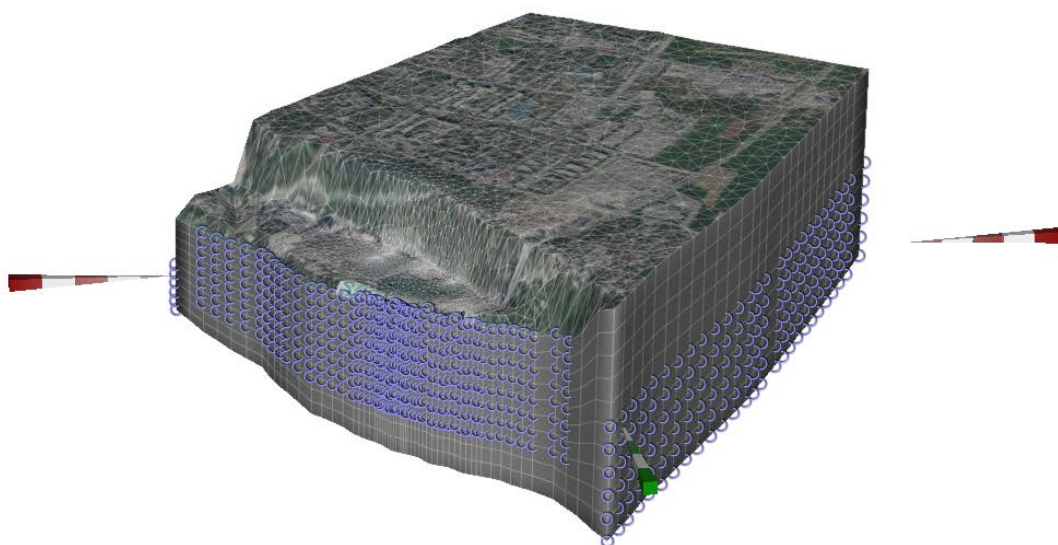
2.2 Hidrološke meje

Model smo v smeri toka omejili s celicami s stalno višino podzemne vode in sicer gorvodno z 347,6 m n. v. na SZ strani ter dolvodno z 342,9 m n. v. na SV strani (constant hydraulic head BC). Stalni nivo v robnih celicah je bil določen na osnovi karte nivojev podzemne vode, izdelane iz razpoložljivih meritev v treh piezometrih na območju SS Huje. Ker so bile meritve prostorsko omejene na manjše območje, smo porazdelitev nivojev za potrebe robnih pogojev na širšem

območju modela določili z linearno ekstrapolacijo iz kartiranega območja, ob upoštevanju prevladujoče smeri toka.

Ker je vodonosnik na boku hidravlično povezan z reko Savo, smo tudi tam določili robne pogoje, in sicer smo ob nezadostnem poznavanju dejanskih razmer pripisali nivo 344,5 m n. v. Pri tem opozorimo, da gladina Save ni bila ločeno izmerjena, temveč je bila odčitana iz lidar posnetka. Model je bil proti SV razširjen na primerno lateralno oddaljenost od ustvarjene hidravlične motnje in omejen z mejo brez toka prečno na mejo (tokovnica podzemne vode) v kvartarnem vodonosniku.

Vertikalno smo model omejili s površjem, pri čemer smo upoštevali dejanski potek terena (relief), na eni strani ter podlago vodonosnika, ki jo predstavlja predviden potek peščene in lapornate gline do sivega laporja, mlajše oligocenske (20l2) starosti, na drugi strani. Potek podlage je bil določen na podlagi ARSO karte poteka podlage na Slika 4.



Slika 6: Meje modela in pripisani robni pogoji.

2.3 Hidravlične lastnosti sistema

Na podlagi hidrogeoloških preiskav geometrična sredina izračunanih prepustnosti vseh piezometrov znaša na območju bodoče gradnje $1,4E-03$ m/s.

Tabela 2: Rezultati hidravličnih testiranj (črpalni preizkusi) na lokaciji Huje.

	Metoda nestacionarni tok			Metoda nestacionarnega toka	
	znižanje		dvig	znižanje	
Piezometer	K_{Jacob}	$K_{\text{Papad. \& Cooper}}$	K_{Theis}	K_{Theim}	Geomean (nest.)
Pz-1	5,2E-03	5,0E-04	1,8E-03	6,7E-04	1,3E-03
Pz-2	2,8E-03	5,0E-04	1,6E-03	3,7E-04	9,6E-04
Pz-3	1,3E-03		9,9E-04	7,0E-03	2,1E-03
					1,4E-03

Zaradi konzervativnosti smo v modelu uporabili nekoliko višjo vrednost izmerjene hidravlične prepustnosti, in sicer $1,5E-03$.

Tabela 3: Rezultati hidrogeoloških raziskav (povzeto po Poročilu o izvedenih hidrogeoloških preiskavah na lokaciji nove stanovanjske soseske ob Savi »Huje« v Kranju, 2025).

Ocena predkvartarne podlage vodonosnika	$\approx 275-280$ m n. v.
Ocenjena debelina vodonosnika (H)	$\approx 65-70$ m
Gradient toka podzemne vode (i)	$\approx 3,0$ do $3,5$ ‰
Smer toka podzemne vode N – S (ω)	$\approx 15^\circ$
Hidravlična prepustnost vodonosnika (K)	0,0014 m/s
Efektivna poroznost vodonosnika (n_{ef})	$\approx 0,16$
Hidrodinamski tip vodonosnika	odprti
Konzervativna transmisivnost vodonosnika (T)	0,06 m ² /s

2.4 Točkovni elementi modela

Na obravnavanem območju točke, iz katerih bi v sistem dotekala ali iz njega odtekala podzemna voda ali toplota in ki bi vplivali na stanje na proučevani lokaciji, predstavljajo črpalni in ponikalni vodnjaki, ki vplivajo tako na hidravliko, kakor tudi na toplotne razmere v vodonosniku.

Kot točkovne elemente modela smo vključili načrtovane črpalne vodnjake in oba ponikalna vodnjaka za SS Huje ter bližnje ležeča vodnjaka s pridobljenim vodnim dovoljenjem za pridobivanje toplote ter vodnjak z vodnim dovoljenjem za pridobivanje podzemne vode za tehnološke namene.

Tabela 4: Točkovni elementi modela.

D96 E	D96 N	Oznaka	Globina vodnjaka	Premer vodnjaka (mm)	Maksimalna raba (l/s)
Črpalni vodnjaki					
450752,57	121465,16	Faza 1 ČV-1/26	52	244,5	28,60
450767,43	121472,72	Faza 1 ČV-2/26	52	244,5	0,00
450819,13	121397,70	Faza 2 ČV-3/26	34	244,5	12,30
Ponikalni vodnjaki					
450680,72	121315,65	VP 1/25	40	244,5	-20,42
450705,51	121291,96	VP 2/25	40	244,5	-20,42
Sosednja vodna dovoljenja					
450699	121561	KRH-1/22 VD: 35532-12/2023	neznano	neznano	12,5
450674	121533	KRH-2/22 VD: 35532-12/2023	neznano	neznano	-12,5
450816	121245	35536-13/2005	neznano	neznano	1,5



Slika 7: Prikazana prostorska razporeditev vodnjakov za sosenko Huje v Kranju in lokacije pridobljenih vodnih dovoljenj za rabo podzemne vode.

Sicer enako močni črpalke v vodnjakih ČV-1/26 in ČV-2/26, delujeta izmenično. V modelu sta bila preverjena oba scenarija.

Črpalni vodnjaki bodo imeli filtre nameščene na globini med 14 in 50 m (ČV-1/26 in ČV-2/26) oziroma med 17 in 32 m (ČV-3/26). Ponikalna vodnjaka pa bosta imela filtre nameščene na globini med 8 in 38 m.

Gorvodno se nahajata še vrtini KRH-1/22 in KRH-2/24 s pridobljenim vodnim dovoljenjem 35532-12/2023 za pridobivanje toplote. Predviden maksimalni zajem tam je 12,5 l/s. JV od ponikalnih vodnjakov se nahaja še vrtina za pridobivanje tehnološke vode z maksimalno črpalno količino 1,5 l/s.

Dimenzije in tehnična izvedba vrtin, preko katerih se podzemna voda rabi glede na okoliška pridobljena vodna dovoljenja, nam niso znane. V modelu je bil za vodnjaka z vodnim dovoljenjem 35532-12/2023 uporabljen polmer 0,20 m in globina 50 m. Filtri so bili pripisani na globinah med ca 7 in 50 m. Za vodnjak z vodnim dovoljenjem 35536-13/2005 pa je bil uporabljen polmer 0,15 m in globina 30 m. Filtri v tem vodnjaku so pripisani na globine med 7 in 30 m.



2.5 Vodna bilanca

Na območju SS Huje predstavljajo vhodne komponente vodne bilance vodonosnika dotoki vode iz okoliških zaledij, napajanje iz padavin (ploskovno bogatenje) in verjetno tudi napajanje iz Kokre in Save ter antropogeni faktorji, kot je puščanje kanalizacije, črpanje ipd. Izhodne komponente predstavljajo evapotranspiracija, iztoki in cone, kjer podzemna voda napaja površinske vodotoke. Z modelom opisujemo rabo podzemne vode za sistem toplotne črpalke voda-voda, pri čemer dodaten iztok iz modela predstavljajo črpalni vodnjaki, dodaten dotok pa ponikalna vodnjaka.

Na vodno bilanco lahko vpliva tudi antropogena raba podzemne vode. V radiju 150 m od načrtovane gradnje se nahajajo tri lokacije podeljenih veljavnih vodnih dovoljenj za rabo vode. Vrtina z vodnim dovoljenjem za izkoriščanje vode za tehnološke namene v povprečju izkorišča največ do 30.000 m³ vode na leto. Iz vrtine, ki je namenjene za rabo vode za potrebe pridobivanja toplote (toplotne črpalke), se po izmenjavi toplotne energije vso vodo (112500 m³/leto) vrača nazaj v isti vodonosnik, kar pomeni, da je bilanca nespremenjena, saj ni trajnega odvzema podzemne vode z vodonosnika. Do spremembe vodne bilance ne pride niti v primeru izvedbe črpalnih in ponikalnih vodnjakov za SS Huje.

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).

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:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

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.

3.3 Vpliv predpostavk in omejitev na model

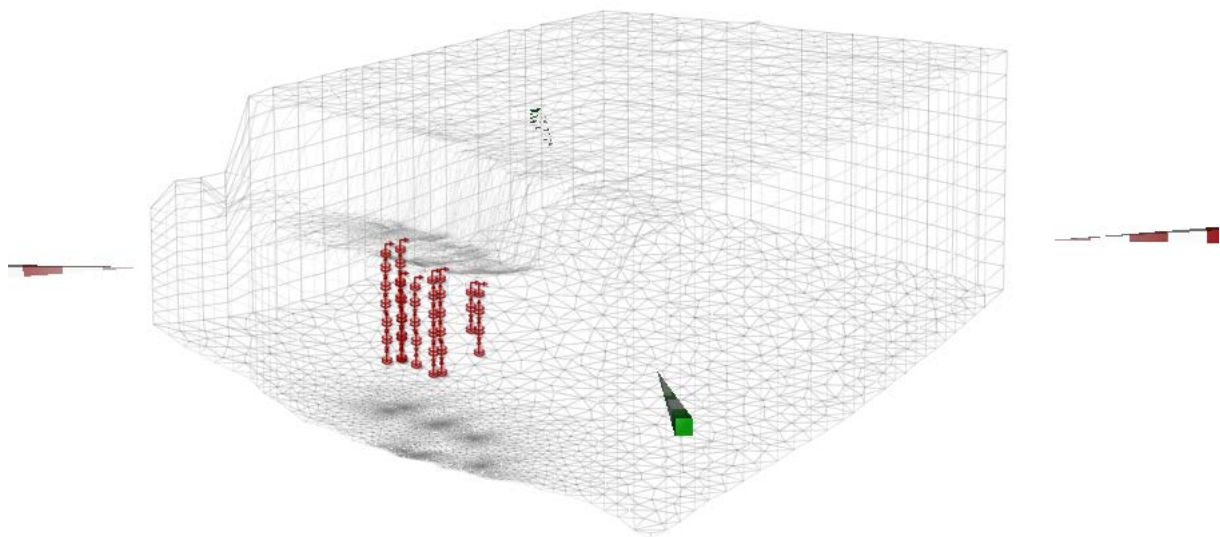
Ker obravnavani problem ne zajema modeliranja sistema, pri katerem so primarne osi anizotropije nagnjene glede na koordinatni sistem (tak primer so lahko npr. razpoke) in ker lahko tok podzemne vode, ki je posledica razlik v gostotah podzemne vode, zanemarimo, lahko vpliv poenostavitve in predpostavk, 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 vode za SS Huje, Slika 8. Vodnjaki bodo izdelani tako, da bodo črpalni vodnjaki izdelani gorvodno glede na smer toka podzemne vode, ponikovalni vodnjaki pa bodo izdelani dolvodno. Zveznica med vodnjaki sicer ni povsem vzporedna s tokom podzemne vode oz. ni pravokotna na hidroizohipse. Medsebojna najbližja oddaljenost med črpalnim poljem (Faza 2 ČV-3/26) in ponikalnim poljem (VP 2/26) znaša $L = 157$ m.

Spodnja meja modela sledi modeliranemu poteku meje vodonosnika (poteku podlage kvartarnih naplavin), pri definiciji zgornje meje smo izhajali iz realne geometrije površja. Slika 8 prikazuje površje in podlago modeliranega območja, kot sta uporabljena v modelu in lokacije črpalnih in ponikalnih vodnjakov.



Slika 8: Prikaz površja terena in podlage z lokacijo črpalnih in ponikalnih vodnjakov.

Velikost končnih elementov (trikotniška mreža) je zgoščena v oklici točkovnih elementov – črpalnih in ponikalnih vodnjakov. Glede na različne debeline uporabljene hidrogeološke plasti so bile dodane računske plasti. Tako ima končni model skupno 10 računskih plasti (11 slojev), porazdeljenih v 1 hidrogeološki enoti. Skupno število 3D elementov znaša 74.190, število vozlišč pa 41470. Površje gradi 193489 elementov.



4.2 Hidravlični parametri

4.2.1 Hidravlična prepustnost

Koeficient prepustnosti v modelu je izbran glede na rezultate črpalnih poizkusov v kvartarnih plasteh. V model je vključena ena plast (celotna vodonosna plast) s prepustnostjo 0,0015 m/s v vseh smereh.

4.3 Točkovni elementi modela

V model so bil vključeni točkovni elementi, katerih vloga v modelu je odzemat ali dodajati vodo v sistem v eni X, Y točki modela preko določene dolžine vzdolž Z-osi. Dimenzije točkovnih elementov so podane v Tabela 4. Črpalni vodnjaki so globoki 52 m (dva, ki delujeta izmenično) in tretji 34 m; globina ponikalnih vodnjakov pa je 40 m. Za vodnjake s pridobljenimi vodnimi dovoljenji, smo uporabili manjše dimenzije, podane v poglavju 2.4. Vodnjaki so bili locirani v vozlišča elementov.

Vodnjaki odzemat in dodajajo podzemno vodo v model, kamor so vstavljeni kot hidravlični linijski elementi.

4.4 Robni pogoji

V model so bili vključeni robni pogoji skladno s stopnjo poznavanja hidrogeoloških razmer in privzetih konzervativnih predpostavk, prikazanih v okviru konceptualnega modela. V izračunu je kot izhodiščna kota podzemne vode uporabljena prostorsko spremenljiva kota, ki je rezultat začetne iteracije modela pri stacionarnih hidrodinamskih pogojih. Hidravlična višina na SZ robni ploskvi znaša 347,6 m, na JV pa 342,9 m.

4.5 Kalibracija modela

Kalibracija modela, pri kateri bi kot kalibracijski element upoštevali nivoje podzemne vode, merjene na bližnjem območju črpanja in ponikanja, ni bila izvedena. Privzeli smo, da simulirano stacionarno stanje toka podzemne vode kaže na ustrezno ujemanje z realnimi merjenimi vrednostmi nivojev podzemne vode v stanju, ko so gradienti podzemne vode najnižji (v skladu s konservativnim pristopom k modeliranju).

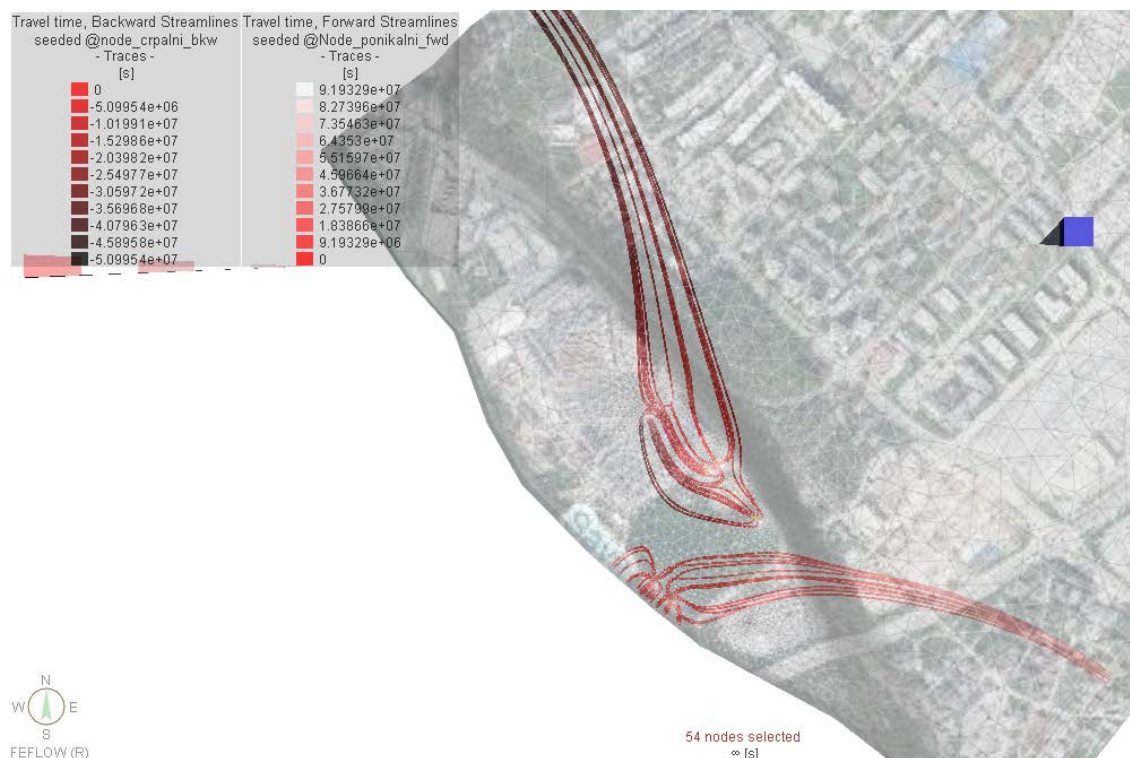
5 REZULTATI IN INTERPRETACIJA

5.1 Simulacija črpanja podzemne vode in opredelitev toplotne reciklaže preko povratnega toka

Toplotna reciklaža se pojavi, ko s ponikanjem prevelike količine načrpane vode iz črpalnega vodnjaka povzročimo povratni tok podzemne vode od ponikalnega proti črpalnemu vodnjaku. Poleg toka podzemne vode z advekcijo se prenaša tudi toplota, posledično se začne temperatura podzemne vode v črpalnem vodnjaku spreminjati, kar vodi v zmanjševanje učinkovitosti sistema voda-voda.

Za preprečitev toplotne reciklaže so bili zato izvedeni izračuni za dane lokacije črpalnih in ponikalnih vodnjakov, ki sta umeščena glede na vse okoliščine poteka parcel in predvidene gradnje. V modelu so predvideni trije novi črpalni vodnjaki ČV, od katerih je 1 neaktiven zaradi izmenjujočega delovanja ČV-1/26 in ČV-2/26 in dva ponikovalna vodnjaka. Prav tako so v model vključeni vodnjaki, ki se uporabljajo za rabo podzemne vode v bližnji okolici in so zanje pridobljena vodna dovoljenja.

Rdeče črte prostih oblik prikazujejo tokovnice podzemne vode glede na hidravlično polje, ki je posledica z ene strani naravnega toka, z druge pa črpanja in ponikanja podzemne vode v načrtovanih in obstoječih vodnjakih. Slika 9 prikazuje tokovno polje s tokovnicami pri predpisani črpalni količini v novih vodnjakih ter sočasnem črpanju maksimalnih količin (glede na vodno dovoljenje) iz obstoječih vodnjakov.



Slika 9: Simulacije toka podzemne vode pri načrtovanih črpalnih količinah.



Rezultati kažejo, da je pojavnost povratnega toka močno odvisna od vodnega stanja Save. Pri visokih nivojih reke tako lahko pride do povratnega toka, vendar gre praviloma za prehodno stanje (1 dan). Za zmanjšanje verjetnosti pojava povratnega toka predlagamo prestavitev lokacije ponikalnih vodnjakov čim bolj JV (navzdol ob Savi).

Modeliranje nadalje kaže, da je pričakovano usmerjanje ponikle vode iz vodnjaka z VD 35532-12/2023 proti novim črpalnim vodnjakom, kar potrjuje njihovo hidravlično povezanost in možnost zajema vračane vode. Dotoku temperaturno spremenjene vode iz ponikalnega vodnjaka KRH-2/22 v vodnjak ČV-3/26 se ne moremo izogniti, je pa mogoče s primarno uporabo vodnjaka ČV-2/26 (v režimu izmeničnega obratovanja ČV-2/26 in ČV-1/26) zmanjšati delež ohlajene/segrete vode v zajemu in s tem omejiti vpliv na temperaturni režim. Zmanjšanje dotoka ohlajene/segrete vode se lahko doseže tudi z izgraditvijo novega cevovoda in priključka na cevovod po katerem se voda ponika v nova vodnjaka VP 1/26 in VP 2/26.

Odvisno od načina obravnave Save (robni pogoji in dinamičnost vodnega stanja) se je v simulacijah pokazal tudi vpliv novih ponikalnih vodnjakov na vodnjak z VD 35536-13/2005. Vpliv se lahko izrazi kot sprememba količinskega stanja ter potencialno tudi kot vpliv na kemijsko stanje, saj vračanje ohlajene/segrete in prezračene vode pomeni dodatno obremenitev vodonosnika z vidika sprememb fizikalno-kemijskih razmer.

Skupni rezultati potrjujejo, da so učinki načrtovanega režima črpanja in ponikanja najbolj občutljivi na hidrološke razmere Save ter tudi na izbrani obratovalni režim posameznih vodnjakov. Z ustreznim upravljanjem (predvsem optimizacijo delovanja para ČV-2/26–ČV-1/26) je mogoče zmanjšati delež vračane ohlajene/segrete vode v zajemu, medtem ko je vplive ponikanja na sosednji vodnjak za zajem tehnološke vode smiselno obravnavati tudi z rednim emisijskim monitoringom na tem vodnjaku.



6 SKLEPI

Na podlagi izdelanega tridimenzionalnega numeričnega modela toka podzemne vode v kvartarnem prodnatem vodonosniku na območju SS Huje in izvedenih simulacij pri načrtovani skupni maksimalni obratovalni količini črpanja 40,90 l/s, je mogoče oceniti, da je predvidena razporeditev črpalnih in ponikalnih vodnjakov načeloma ustrezna, vendar je tveganje za pojav povratnega toka (in s tem povezane toplotne reciklaže) izrazito povezano z robnimi pogoji, predvsem z vplivom reke Save.

Rezultati kažejo, da je pojavnost povratnega toka močno odvisna od vodnega stanja Save: pri visokih nivojih reke lahko do povratnega toka pride, vendar gre praviloma za prehodno stanje, ki večinoma izzveni v približno enem dnevu. Kot učinkovit ukrep za dodatno zmanjšanje verjetnosti povratnega toka se izkazuje premik ponikalnih vodnjakov čim bolj proti JV (dolvodno ob Savi), s čimer se okrepi hidravlično ločevanje ponikanja od črpanja.

Modeliranje nadalje potrjuje, da je pri obstoječih vodnih dovoljenjih pričakovana hidravlična povezanost sistema: ponikla voda iz vodnjaka z vodnim dovoljenjem VD 35532-12/2023 se lahko usmerja proti novim črpalnim vodnjakom. Posledično se dotoku temperaturno spremenjene vode v vodnjak ČV-3/26 ni mogoče izogniti, je pa mogoče z ustreznim obratovalnim režimom črpalnega para ČV-2/26–ČV-1/26 (izmenično delovanje in primarna raba ČV-2/26) delež takšne vode zmanjšati in s tem omejiti vpliv na temperaturni režim ter učinkovitost sistema voda–voda. Dodatno zmanjšanje vpliva je možno tudi z ustrežno rešitvijo ponikanja načrpane vode iz KRH-1/22 v nove ponikalne vodnjake VP 1/26 in VP 2/26.

Odvisno od načina obravnave Save v modelu se je pokazal tudi vpliv novih ponikalnih vodnjakov na vodnjak z VD 35536-13/2005, in sicer v smislu spremembe količinskega stanja ter potencialno tudi vpliva na kemijsko stanje, saj vračanje prezračene in temperaturno spremenjene vode lahko spremeni lokalne fizikalno-kemijske razmere v vodonosniku. Zato je ob izvedbi sistema smiselno načrtovati tudi redno spremljanje (monitoring) na VD 35536-13/2005.

Sklepno lahko ugotovimo, da so učinki načrtovanega črpanja in ponikanja na območju SS Huje najbolj občutljivi na hidrološke razmere Save ter na izbrani režim obratovanja vodnjakov. Z upoštevanjem predlaganih ukrepov (optimalna razporeditev in obratovanje, po potrebi prilagoditev lokacije ponikanja ter spremljanje vplivov) je mogoče tveganje za povratni tok in s tem povezano toplotno reciklažo omejiti na sprejemljivo raven.



7 VIRI IN LITERATURA

- 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 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 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 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 5981-96 (Reapproved 2002) Standard Guide for Calibrating a Ground-Water Flow Model Application. Annual Book of ASTM Standards
- ASTM Standard D 6033-96 (Reapproved 2002) Standard Guide for Describing the Functionality of a Ground-Water Modeling Code. Annual Book of ASTM Standards
- 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.
- PREGL, M., 2025: Poročilo o izvedenih hidrogeoloških preiskavah na lokaciji nove stanovanjske soseske ob Savi »Huje« v Kranju, št. načrta: 2012135, IRGO, Ljubljana.
- PREGL, M., 2026: 7 Načrt s področja geotehnologije in rudarstva (Faza PZI – tehnični del) Gradnja raziskovalnih vodnjakov, kot osnova za sistem za zajem in za vračanje podzemne vode za potrebe plitve geotermije po sistemu voda – voda, za potrebe pridobivanja toplote za bodočo novo SS Huje v Kranju., št. poročila: 2011358, IRGO, Ljubljana