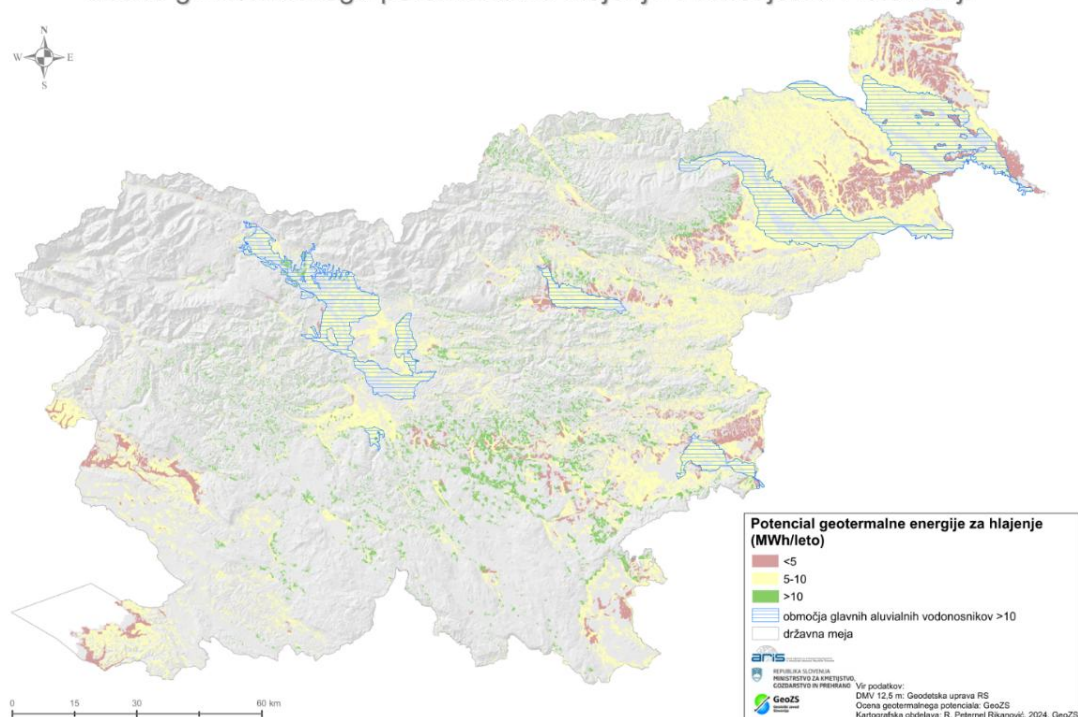


Zaključno vsebinsko poročilo

o projektu GeoCOOL FOOD - Hladno skladiščenje hrane z rabo plitve geotermalne energije

Ocena geotermalnega potenciala za hlajenje v kmetijstvu v Sloveniji



Ljubljana, oktober 2025

Naročnik:	Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano - MKGP, Dunajska cesta 22, 1000 Ljubljana in Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije – ARIS, Bleiweisova cesta 30, 1000 Ljubljana
Izvajalec:	GEOLOŠKI ZAVOD SLOVENIJE Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana
Št. pogodbe:	2330-22-000245 z dne 23. 10. 2022
Ponudba:	razpis CRP »Naša hrana, podeželje in naravni viri" vloga št. 031
Evidenčna številka:	631-300_2025
Število izvodov:	3 GeoZS + pdf za MKGP
Projekt:	projekt V1-2213, GeoCOOL FOOD - Hladno skladiščenje hrane z rabo plitve geotermalne energije
Naslov poročila:	Zaključno vsebinsko poročilo o projektu GeoCOOL FOOD - Hladno skladiščenje hrane z rabo plitve geotermalne energije
Datum izdelave:	15. oktober 2025
Avtorji Geološki zavod Slovenije:	doc. dr. Nina Rman, univ. dipl. inž. geol.  mag. Joerg Prestor, univ. dipl. inž. geol. Simona Pestotnik, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž. dr. Simona Adrinek, mag. inž. geol.  mag. Dušan Rajver, univ. dipl. inž. geol. mag. Andrej Lapanje, univ. dipl. inž. geol.  Karlo Borko, mag. geol.  dr. Mitja Janža, univ. dipl. inž. geol. dr. Kristina Ivančič, univ. dipl. inž. geol. dr. Jernej Jež, univ. dipl. inž. geol. Simon Mozetič, dipl. inž. geoteh. in rud. dr. David Gerčar, mag. inž. geol. Nejc Bizjak, univ. dipl. inž. geol. Aljaž Ciglar, mag. inž. geol. 
Avtorji Institut "Jožef Stefan":	dr. Gašper Stegnar, univ. dipl. inž. grad. dr. Marko Matkovič, univ. dipl. inž. stroj. mag. Marko Pečkaj, univ. dipl. inž. stroj. mag. Stane Merše, univ. dipl. inž. stroj. mag. Damir Staničič, univ. dipl. inž. stroj.
Avtorji Biotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani:	prof. dr. Rajko Vidrih, dipl. ing. živ. tehn. asist. Nik Mahnič, mag. inž. živ. dr. Marjeta Mencin, mag. inž. živ.
Vodja projekta:	doc. dr. Nina Rman, univ. dipl. inž. geol. 
Vodja organizacijske enote GeoZS:	dr. Sonja Cerar, univ. dipl. inž. geol. 
Direktor GeoZS:	dr. Miloš Bavec, univ. dipl. inž. geol. 
Ključne besede:	Geosonde, Geotermalna energija, Geotermične raziskave, Jedra, Modeliranje



VSEBINA

1. Izvleček	1
2. Povzetek	3
3. Abstract.....	7
4. Opis problema in ciljev	11
5. Pregled literature	12
6. Metode dela	14
6.1. Inventarizacija obstoječih hladilnic na kmetijah in izbor dveh pilotnih lokacij	14
6.2. Meritve pogojev in energetskih potreb hladilnic na dveh pilotnih območjih	15
6.3. Analiza naravnih danosti in izdelava karte geotermalnega potenciala za hlajenje v kmetijstvu	16
6.4. Metodologija za opredelitev robnih pogojev za model kvantifikacije in identifikacijo ključnih parametrov za načrtovanje potrebnih raziskav	18
6.5. Izgradnja in testiranje nove raziskovalne geosonde GCF-1/24.....	19
6.6. Od terenskih meritev na pilotnih lokacijah do smernic	22
6.7. Izvedba javnih delavnic in predstavitev projekta	24
7. Rezultati in diskusija.....	24
7.1. Inventarizacija obstoječih hladilnic na kmetijah.....	24
7.2. Značilnosti skladiščenja zelja in solate	25
7.3. Rezultati ocene geotermalnega potenciala geosond za namene hlajenja v kmetijstvu.....	27
7.4. Model kvantifikacije potenciala za hlajenje in skladiščenje energije v podtalju	30
7.5. Izgradnja in testiranje raziskovalne vrtine GCF-1/24 na pilotnem območju	35
7.5.1.1. Rezultati standardnih in naprednih testov toplotnega odziva	40
7.6. Enoletne meritve delovanja izbranih dveh hladilnic	42
7.7. Izračun karakterističnih toplotnih obremenitev objektov v Brodu v Podbočju.....	44
7.8. Smernice za rabo plitve geotermalne energije za hlajenje	46
7.9. Izvedba javnih delavnic in predstavitev projekta	48
8. Zaključki in priporočila naročniku	49
10. Literatura	56
11. Priloge	59

KAZALO SLIK

Slika 1: Pilotni območji za meritve Juršinci (Ptuj) in Brod v Podbočju 4 (Dolenjska).....	15
Slika 2: Primerjava urnega zapisa temperature zraka z merilci M2 (levo) in minutnega zapisa temperature vode z merilci Star:ODDI (desno).....	16

Slika 3: Primerljivost merilnih instrumentov M2 za temperaturo in vlažnost zraka v hladilci v Juršincih	16
Slika 4: Konceptualni modeli petih slovenskih aluvialnih vodonosnikov z glavnimi vhodnimi geotermičnimi in hidrogeološkimi parametri za geotermično modeliranje v FEFLOW.	18
Slika 5: Lokacije vzorčenja kamnin in izvedbe terenskih meritev s podlago Osnovne geološke karte (https://ogk100.geo-zs.si/)	19
Slika 6: Lokacija geosonde GCF-1/24 (vir: Atlas okolja) in pridobljeni jedri lapornatega melja iz globin 24 – 26 m in 50 – 52,5 m	20
Slika 7: Odvzem vzorcev iz jeder za laboratorijske hidrogeološke preiskave na INA Zagreb	20
Slika 8: Povezovanje vseh 4 cevi na dnu geosonde (levo; rumeno je povezava obeh U-cevi) in po celotni dolžini (desno)	21
Slika 9: Prikaz spreminjanja parametrov na ustju vrtine med prvim, standardnim TRT testom feb. 2025	22
Slika 10: Lokacije 49 hladilnic na kmetijah, od tega se jih vsaj 16 uporablja za zelenjadarstvo. Barvna podlaga prikazuje možnost različnih sistemov rabe plitve geotermije: svetlo rjavo – najpogosteje zemlja-voda navpični; temno rjavo - najpogosteje zemlja-voda navpični/vodoravni; svetlo modra – pogosto zemlja-voda vodoravni, košare, piloti, voda-voda; temno modra – najpogosteje voda-voda.....	25
Slika 11: Oddana količina CO ₂ zaradi dihanja pri različnih temperaturah skladiščenja: levo – zelje, desno – solata	27
Slika 12: Razredi geotermalnega potenciala za hlajenje v kmetijstvu v Sloveniji in njihovi deleži glede na kmetijska zemljišča.	27
Slika 13: Pregled vpliva posameznih faktorjev potenciala geosond za hlajenje	28
Slika 14: Pregled vpliva toka podzemne vode na potencial geosonde za hlajenje na območjih tipičnih slovenskih aluvialnih vodonosnikov.....	29
Slika 15: Modelirani geotermalni potencial vodnjakov v tipičnih aluvialnih vodonosnikih v Sloveniji..	29
Slika 16: Karta geotermalnega potenciala za hlajenje v kmetijstvu.....	30
Slika 17: Primer enega koraka v načrtovanju z razvojnim ciljem, da se z investicijo za polovico zmanjša poraba elektrike (po standardu Norm SIA 480).....	31
Slika 18: Primer pregleda tipičnih virov presežkov in primanjkljajev toplotne energije na kmetijskem gospodarstvu	31
Slika 19: Parametri v bilanci rabe energije kažejo, kakšno letni in vršno količino energije je potrebni pridobiti iz podtalja in oddati v podtalje	32
Slika 20: Kumulativna toplotna izmenjava v podtalju ob treh različnih režimih rabe energije v geosondi	32
Slika 21: Različne potrebne globine geosonde na primeru naravnih pogojev v Brodu v Podbočju ob dveh različnih namenih rabe in njuni kombinaciji z uravnoteženjem rabe toplote oziroma rabi podtalja za hranilnik toplote.	33
Slika 22: Primer pregleda ključnih geotermičnih vhodnih podatkov o podtalju za geosondo	33
Slika 23: Priporočene vrednosti najmanjših odmikov in največjih temperaturnih obremenitev proti neželenim okoljskim vplivom.....	34
Slika 24: Primer ključnih robnih pogojev za oceno učinkovitosti naprave.....	35
Slika 25: Meritve temperature po celotni dolžini vrtine GCF-1/24 v od nov. 2024 do jun. 2025	39
Slika 26: Rezultati urnih meritev temperature na 4 različnih globinah v opazovalni cevi geosonde. Jasno se vidi segrevanje ob cementaciji in izvedbi obeh TRT ter sezonsko segrevanje tal na globini dobrih 6 m.	39

Slika 27: Primer profilov temperatur z globino (T-z) za 12-urne korake eTRT med segrevanjem (levo: rdeče črte) in ohlajanjem hibridnih kablov (sredina: modre črte) ter prikaz izračunane toplotne prevodnosti po celotni globini vrtine (desno).....	40
Slika 28: Škatlasti diagrami ponazarjajo določene toplotne prevodnosti po različnih metodah. Meritve na jedrih so rjave, TRT meritve pa modre. Vsak okvirček predstavlja medkvartilni razpon (IQR; od 25. do 75. percentila).	41
Slika 29: Urne meritve temperature in vlažnosti zraka v hladilnici in zunaj nje v Brodu v Podbočju. Črna črta označuje obdobje meritev porabe elektrike 23. 5. – 19. 6. 2024, modra pa priporočeno vlažnost v hladilnici – 92%.....	42
Slika 30: Urne meritve temperature in vlažnosti zraka v hladilnici in zunaj nje v Juršincih. Črna črta označuje obdobje meritev porabe elektrike 23. 5. – 19. 6. 2024, modra pa priporočeno vlažnost v hladilnici – 92%.....	43
Slika 31: Kumulativni diagram merjenih meritev temperature (T) in vlažnosti v obeh hladilnicah v Juršincih in Brodu v Podbočju in zunaj njih (zrak).	43
Slika 32: Graf povprečne dnevne temperature zraka s ponazoritvijo urnika in temperatur ogrevanih ter hlajenih prostorov na kmetiji Turk. Vertikalni črti označujeta čas neprekinjenega izvajanja meritev rabe električne energije v hladilnici 1 in 2.....	44
Slika 33: Rezultati meritev rabe električne energije za potrebe obratovanja hladilnic 1 in 2 ter celotne kmetije Turk, meritev temperature v hladilnici ter okolici.	45
Slika 34: Prikaz tipskih zmogljivosti različnih načinov zajema plitve geotermalne kapacitete – koliko lahko ogrevamo z geosondo, ob prisotnosti podzemne vode in z vodnjakom	47
Slika 35: Prikaz vsebine in posledic predlaganih prednostnih kriterijev	48

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Značilnosti pobiranja in skladiščenja zelja in solate	25
Preglednica 2: Oddana energija zelenjave ob različnih temperaturah zraka	26
Preglednica 3: Ocena geotermalnega potenciala za hlajenje z geosondo na aluvialnih vodonosnikih (2 geosondi po 50 m globine, $T_{\max} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$).	28
Preglednica 4: Razvrstitev vzorcev po zrnivosti po Udden-Wentworth (1922).....	36
Preglednica 5: Statistika geotermičnih lastnosti karbonatnih kamin pri Kostanjevici.....	37
Preglednica 6: Primerjava različnih metod na istih vzorcih jedra GCF-1/24, na GeoZS in PGI (Tempos).	37
Preglednica 7: Osnovna statistika za zvezne meritve temperature (T) in vlažnosti (w) v hladilnicah ($_{hl}$) v Juršincih in Brodu v Podbočju in zunaj njih ($_{zrak}$).....	44
Preglednica 8: Mesečni urnik obratovanja objektov na kmetiji Turk	45
Preglednica 9: Rezultati meritev in izračuna karakterističnih izgub objektov na kmetiji Turk v Brodu v Podbočju.....	45

KAZALO PRILOG

Priloga 1: Inventarizacija 49 hladilnic na kmetijah v Sloveniji	59
Priloga 2: Geotermični parametri iz javnih podatkovnih slojev za hladilnice zelenjave in brez znanega pridelka.....	61
Priloga 3: Litološki in tehnični profil GCF-1/24.....	62

Priloga 4: Rezultati karotažnih meritev v GVF-1/24 z dne 8. 11. 2024	63
Priloga 5: Rezultati terenskih geotermičnih meritev karbonatnih kamin pri Kostanjevici.....	64
Priloga 6: Rezultati laboratorijskih meritev geotermičnih meritev 22 vzorcev.....	65
Priloga 7: Laboratorijske meritve toplotnih parametrov na jedru GCF-1/24 (dne 11. nov. 2024).....	66
Priloga 8: Terenske meritve toplotnih parametrov na jedru GCF-1/24 (izmerjeno 6. in 7. nov. 2024). Vlažnost vzorcev s 25 metrov je bila 34,4%, s 50 metrov pa 30,3%.	67
Priloga 9: Urne meritve temperature in vlažnosti zraka v pilotnih hladilnicah v Brodu v Podbočju in Juršincih s poudarjeno razliko med zunanjo in notranjo temperaturo zraka (roza črta). Modra črta označuje priporočeno vlažnost v hladilnici – 92%. Črna črta v Brodu označuje obdobje meritev porabe elektrike 23. 5. – 19. 6. 2024.	68

1. Izvleček

V CRP projektu GeoCOOL FOOD smo preverjali hipotezo, da interdisciplinarno načrtovanje optimalno rabe plitve geotermalne energije za hlajenje hladilnic na kmetijah omogoča ekonomsko učinkovite rešitve, prispevajo k večji energetske samooskrbi, znižajo stroške energije in ceno hrane za končnega potrošnika. Pri hlajenju se v podtalje odvaja presežna toplota iz hladilnic, kar fizikalno pomeni, da se izvaja podzemno skladiščenje toplotne energije.

Razvili smo interdisciplinarno metodologijo, ki vključuje kvantifikacijo naravnega geotermalnega potenciala, analizo energetskih potreb hladilnic, oceno vpliva skladiščenja na kakovost pridelka ter oblikovanje upravljaljskih modelov. Pristop temelji na kombinaciji analitičnih in numeričnih modelov, terenskih in laboratorijskih geotermičnih meritvah ter poglobljenih intervjujih na izbranih kmetijah.

Na podlagi petih ključnih dejavnikov – toplotna prevodnost, temperatura tal, meteorološke razmere, temperatura delovne tekočine, razporeditev geosond in vpliv toka podzemne vode – smo izdelali prvo karto geotermalnega potenciala za hlajenje v Sloveniji. Ugotovili smo, da prisotnost podzemne vode najbolj poveča potencial geosond, ki pa vseeno ostaja omejena. Zato za večje hladilnice priporočamo odprte sisteme voda-voda z uporabo črpalnih in ponikalnih vodnjakov.

Pripravili smo prvi popis hladilnic na kmetijah, kjer skladiščijo sadje ali zelenjavo. Na podlagi naravnih danosti in razvojnih ciljev teh 49 lokacij smo izbrali dve za pilotne meritve: kmetijo Munda v Podravju in kmetijo Turk v Posavju. V obeh še vedno izvajamo urne meritve temperature in relativne vlažnosti v hladilnici in zunaj nje. Ugotovili smo, da so optimalni pogoji za skladiščenje solate in zelja (5 °C, nad 92 % RH) bolje doseženi v Posavju.

Razvili smo metodologijo in tehnične smernice za učinkovito uporabo plitve geotermalne energije v kmetijstvu, zlasti za hladilnice, rastlinjake in stanovanjske objekte na kmetijah. Rezultati vključujejo integracijo energetskega modeliranja hladilnic, tehnološki izbor najprimernejših geotermalnih sistemov (voda–voda, zemlja–voda, hibridni sistemi) ter simulacijske in ekonomske pristope za preverjanje njihove učinkovitosti. Dokazali smo, da lahko pravilno dimenzionirani geotermalni sistemi bistveno zmanjša rabo energije in emisije CO₂ ter omogoči visoke sezonske izkoristke (SCOP), zlasti v primerih sočasne rabe hlajenja in ogrevanja.

Na lokaciji v Brodu v Podbočju smo izvedli raziskovalno vrtino GCF-1/24 z napredno opremo (DTS optična vlakna), ki je omogočila razvoj metod DTRT in eTRT za natančno oceno vertikalne heterogenosti geotermičnih lastnosti. Te metode smo prvič uporabili v Sloveniji in so redke tudi v evropskem prostoru, kar predstavlja pomemben tehnološki preboj. S primerjavo laboratorijskih in terenskih metod smo ugotovili, da so najbolj kvalitetne in primerljive geotermične meritve z uporabo laboratorijskega TCS sistema in *in situ* izvedbo izboljšane testa toplotnega odziva (eTRT).

Z modelom kvantifikacije geotermičnega potenciala smo dokazali prednosti uravnotežene rabe geosonde za hlajenje in ogrevanje, saj zmanjša okoljski vpliv naprave in potrebno globino vrtanja, s čimer poveča ekonomsko učinkovitost investicije.

Nove smernice za projektiranje plitvih geotermalnih sistemov za hlajenje izpostavljajo, da je njena uporaba najbolj smiselna v okoljih z: velikimi sezonskimi razlikami v potrebah po toploti in hladu, sočasno rabo ogrevanja in hlajenja (npr. hladilnice + bivalni prostori) in možnostjo povezovanja odpadne toplote in sezonske akumulacije. Za učinkovito izvedbo so ključni: prilagojen sistem strojnih instalacij, ki omogoča integracijo ponorov in izvorov toplote, natančna karakterizacija tal in objekta,

večkriterijski izbor tehnologij (energetski, okoljski, ekonomski vidiki) in monitoring porabe s prilagodljivostjo režimov obratovanja.

Rezultate projekta smo predstavili na več znanstvenih konferencah in delavnicah ter v reviji Renewable Energy objavili znanstveni članek. Projekt je pomembno prispeval k razumevanju možne rabe plitve geotermalne energije v kmetijstvu in razvil nove metode za učinkovito načrtovanje in sofinanciranje projektov rabe za hlajenje.

2. Povzetek

V okviru CRP projekta GeoCOOL FOOD - Hladno skladiščenje hrane z rabo plitve geotermalne energije smo razvili metodologijo za interdisciplinarno načrtovanje optimalne rabe plitve geotermalne energije za hlajenje hladilnic z zelenjavo na kmetijah. Naša hipoteza je bila, da optimalno načrtovanje omogoča ekonomsko ugodne rešitve, ki dolgoročno znižajo stroške oskrbe z energijo in se lahko prelijejo tudi v bolj ugodne cene pridelka za končnega potrošnika. Pri tem smo raziskovali pomen štirih področij: naravne danosti oziroma potencial, energetske potrebe in učinkovitost hladilnic, spremembe skladiščenega pridelka med hlajenjem ter možni načini upravljanja.

Za opredelitev naravnih danosti smo **razvili metodo za oceno potenciala plitve geotermalne energije za hlajenje** (dosežek M3_1) s kvantifikacijo petih dejavnikov. Analizo smo izvedli na območjih dejanske kmetijske rabe (njiva, hmeljišče, rastlinjak, vinograd in intenzivni sadovnjak) in kot rezultat podali prvo karto geotermalnega potenciala za hlajenje v kmetijstvu v Sloveniji z geosondami.

Analitični izračuni so narejeni na primeru dveh 50 m globokih geosond. Ugotovili smo, da izmed *lokalnih geotermičnih pogojev* (1) potencial najbolj povišata visoka toplotna prevodnost in čim nižja temperatura tal, saj je ob ugodni kombinaciji v njih možno oddati več presežne toplote iz hladilnic. Opredelili smo tri razrede naravnega geotermičnega potenciala: najmanj ugodna območja z največ 5 MWh/leto, srednja s 5-10 MWh/leto in najbolj ugodna z več kot 10 MWh/leto. *Meteorološke oz. klimatološke razmere* (2) smo analizirali na sedmih območjih in ugotovili, da lahko spremenijo potencial geosond do 18 %. *Najvišja dovoljena temperatura delovne tekočine* (3), ki za geosonde v Sloveniji ni zakonsko predpisana, ima velik vpliv. Pri povišanju za 4° C se potencial poviša za 34%, a ker se hkrati zniža učinkovitost naprave, sprememba ni enoznačna. Še bolj pomembni so *vrsta, globina in razporeditev objektov* (4). Z večanjem razmika med geosondami se potencial povečuje (do 9%), z večjo globino celo večkratno. Povečanje števila objektov seveda poveča potencial, vendar ne linearno. Hkrati linijska postavitev zagotovi več skladiščenja energije kot polje geosond. *Vpliv toka podzemne vode* (5) smo opredelili z numeričnimi modeli in primerjavo modelskih pristopov z analitičnimi (EED) in numeričnimi (FeFLOW) modeli (dosežek M6_1). Numerične simulacije smo izvedli za pet območij aluvialnih ravnin Save (Gorenjska in Krška kotlina), Savinje, Drave in Mure. Ugotovili smo, da prisotnost podzemne vode omogoča hitrejše obnavljanje toplote tal, zato se paru geosond potencial lahko poveča 2,9 do 9,3-krat, najbolj v Savski in Dravski kotlini (na 35-56 MWh/leto). Najbolj drastično se potencial poveča ob spremembi načina zajema – kapaciteta najbolj izdatnih vodnjakov v Dravski in Savski kotlini je ocenjena na 360-384 MWh/leto.

Pripravili smo **prvi popis hladilnic na kmetijah** v Sloveniji in po dogovoru z MKGP nismo zajeli večjih industrijskih hladilnic ali skladišč trgovskih centrov. Zanimale so nas hladilnice, ki skladiščijo sadje ali zelenjavo, še posebej zelje in solato. Ugotovili smo, da javno dostopne prostorske evidence ne omogočajo izločevanja namena stavb kot hladilnice, zato smo seznam 49 hladilnic (dosežek M1_1; Priloga 1) pripravili s pomočjo kmetijskih svetovalcev. Identificirali smo 16 hladilnic za zelenjadarstvo, enako število za sadje, za ostale pa skladiščni pridelek ni bil poročan.

Na podlagi njihove lege smo analizirali geološke, geotermične in klimatološke pogoje ter izbrali 10 kmetij, kjer smo pozimi 2023/2024 izvedli poglobljene intervjuje o načrtovanem energetske preходу kmetij (del poročila M3_1).

Intervjuji so bili izvedeni z upoštevanjem **novega modela kvantifikacije potenciala za pridobivanje hladu s plitvo geotermalno energijo in s tem za podzemno skladiščenje energije** (dosežek M5_1) s

sedmini robnimi pogoji. *Ekonomska uspešnost investicije* (1) ne sme biti edini kriterij, ampak jo je potrebno dopolniti z razvojnimi cilji, kot so energetska samooskrba, prilagajanje podnebnim spremembam in podobno. Izjemno pomembno je v fazi načrtovanja pregledati dostopne *vire energije in uporabnike na kmetiji* (2), kjer se analizira sezonska in letna *bilanca rabe toplotne in električne energije in potrebnih vršnih moči* (3). Naravne in tehnične danosti naprave (vodnjaka ali geosonde) lahko združimo v (4) *pregled vhodnih geotermičnih podatkov*, na *okoljski vpliv naprave* in njen odnos z okolico (5) pa najbolj vpliva temperatura delovne tekočine. *Učinkovitost naprave* (6) je odvisna tako od števila, globine in razporeditve objektov za zajem geotermalne energije kot razlike med temperaturo prostora hlajenja in podtalja, zato je ključno stalno slediti (7) *učinkovitosti delovanja* in tekom 30-50 letom delovanja izvesti potrebne prilagoditve.

Projekt je vzpostavil **celovit metodološki okvir** za določitev **energetskih potreb kmetijskih hladilnic** ter njihovo optimalno pokrivanje z **obnovljivimi viri energije** (dosežek M2_1). Metodologija temelji na **kombinaciji kvazi-stacionarnih izračunov in dinamičnih simulacij (PURES 2022)**, kar omogoča **natančno oceno toplotnih obremenitev** in vplivov sezonskih sprememb. Poseben poudarek je bil namenjen **shranjevanju zelenjave**, kjer ima **natančno obvladovanje temperature in vlage** ključno vlogo pri zmanjšanju izgub in porabe energije. S tem pristopom je projekt zagotovil **trdno podlago za primerljivo in ponovljivo načrtovanje** energetskih sistemov v kmetijskih objektih.

Na osnovi analize **značilnosti kmetijskih objektov, geoloških pogojev in razpoložljivih tehnologij toplotnih črpalk** je bila oblikovana **matrika odločanja**, ki omogoča **izbor najustreznejše tehnologije** glede na lokacijo, potrebe in obremenitve (dosežek 4_1). Analizirana sta bila sistema **voda–voda** in **zemlja–voda** z različnimi izvedbami zajema toplote, vključno z **vodnjaki, geosondami in vodoravnimi kolektorji**. Projekt je jasno opredelil **mejne pogoje za izvedbo sistemov**, vključno z zahtevami upravnih postopkov in hidrogeološkimi omejitvami, kar omogoča **varno in učinkovito umeščanje geotermalnih rešitev** v prostor.

Poročila izpostavljajo pomen **integracije geotermalnega vira z zračnimi sistemi in skupnega zalogovnika toplote**, kar omogoča **preklapljanje med viri** glede na trenutni **COP** in obremenitve. Takšna zasnova omogoča delovanje sistema z **največjim sezonskim izkoristkom**, podpira **sočasno hlajenje in ogrevanje** ter izravnava sezonske potrebe s pomočjo **sezonskega hranilnika toplote v tleh**. **Hibridni sistemi** s tem povečujejo **prilagodljivost obratovanja** in zmanjšujejo odvisnost od enega vira energije, kar je posebej pomembno za objekte z raznolikimi energetskimi potrebami skozi leto.

Simulacije in meritve (dosežek M2_2) so pokazale, da lahko pravilno dimenzionirani geotermalni sistemi dosežejo **grelna števila (COP) nad 4** in omogočijo **znižanje porabe električne energije za 30–60 %** v primerjavi s konvencionalnimi sistemi. Pozitiven vpliv na donosnost imajo **uravnotežena raba energije za ogrevanje in hlajenje, celoletno delovanje** ter **visoka cena energentov**, ki spodbuja ekonomsko smiselnost investicije. Kljub temu ostajajo **IRR** in **NPV** zmerni, kar kaže, da je za širšo uvedbo pomembna **ustrezna finančna podpora ali spodbudni okvir**.

Ključni znanstveni prispevek projekta je v razvoju **prenosljive metodologije za modeliranje in vrednotenje rabe plitve geotermalne energije** v kmetijstvu, **identifikaciji optimalnih tehničnih rešitev** in **kvantifikaciji učinkov na rabo energije ter emisije CO₂**. Rezultati neposredno podpirajo izvajanje **nacionalnih in evropskih podnebno-energetskih ciljev**, vključno z **REPowerEU** in **Evropskim zelenim dogovorom**, ter so uporabni za pripravo **strateških dokumentov, investicijskih načrtov in ukrepov za prehod v nizkoogljično kmetijstvo**.

Namesto načrtovane ene smo izbrali **dve pilotni kmetiji s hladilnico**, ki se pomembno razlikujeta glede na režim delovanja in velikost hladilnic. Na kmetiji Munda v Juršincih (Podravska statistična regija) imajo srednje veliko hladilnico, ki poleti ne deluje, in možnost kombiniranja geosonde in vodnjaka za ogrevanje rastlinjaka za sadike ali namakanje. Kmetija Turk v Brodu v Podbočju (Posavska statistična regija) ima več hladilnic, tudi velike enote, ki stalno delujejo, in razvojni cilj energetske samooskrbe kmetije.

Ker je potencial rabe plitve geotermalne energije večji, v kolikor se hladilnica uporablja tudi poleti, smo novembra 2024 izdelali 100 m globoko **raziskovalno vrtino GCF-1/24 v Brodu v Podbočju** v Krški kotlini (dosežek M3_2). Izvedena je kot geosonda z enojno U-cevjo in ima kot prva v Sloveniji stalno vgrajeno opazovalno cev in stalno nameščena DTS optična vlakna za meritve temperature vzdolž celotne dolžine. S tem smo to napredno tehnologijo vpeljali tudi v geotermične raziskave in preizkusili povsem novo *in situ* kvantitativno metodo za določanje geotermičnih lastnosti kamnin in oceno geotermičnega potenciala. Februarja 2025 smo interpretacijo metode standardnega testa toplotnega odziva (TRT) nadgradili z uporabo stalno nameščenih DTS optičnih vlaken v metodo DTRT, nato pa junija 2025 še v izboljššan TRT s hibridnimi kabli (eTRT), kar je izredno redko tudi v Evropi. **DTRT in eTRT sta prvič omogočila kvantifikacijo vertikalne heterogenosti geotermičnih lastnosti in advekcije zaradi prisotnega toka podzemne vode.**

Z geotermičnimi meritvami smo jasno zaznali sezonski vpliv sončnega obsevanja na geotermalni potencial zelo plitvega podtalja in določili zelo nizek geotermični gradient, kjer se temperatura poveča za največ 10 °C na kilometer globine. Izjemno pomembna je naša **metodološka primerjava terenskih in laboratorijskih geotermičnih metod**, saj je bila opravljena na istih vzorcih sedimenta, torej resnično omogoča kvantifikacijo razlik rezultatov. Ugotovili smo, da meritve z igličasto sondo zaradi manjše vlage, slabšega stika z vzorcem in omejene prostornine podcenjujejo toplotno prevodnost. Rezultati laboratorijskih meritev s TCS napravo in terenski testi toplotnega odziva so bolj realni in primerljivi, pri čemer so cementirana optična vlakna zagotavljala najboljši stik z okoliško formacijo in zato podala višje vrednosti toplotne prevodnosti kot meritve iz hibridnega kabla. DTRT je podal najbolj homogen vertikalni profil, ki verjetno poda malenkost prenizke toplotne prevodnosti, eTRT pa je občutljiv na postavitev grelca in temperaturnega senzorja ter enakomernost porazdelitve toplote po celotni dolžini kabla.

Vrtina GCF-1/24 je na globini 11 m prešla iz kvartarnega dobro prepustnega peščeno-glinastega melja in proda v slabo sprijete in slabo prepustne lapornate melje zgornje miocenske Drnovske formacije. Na globini 25 in 50 m smo odvzeli dve jedri, ki smo jih hidrogeološko in geotermično podrobno preiskali (dosežek M3_2). S takšno kvantifikacijo lastnosti meljev Drnovske formacije povečali dostop do **javnih informacij za zmanjšanje geološkega tveganja** ob izgradnji novih geosond. Podoben doprinos podajajo tudi sistematično opravljene geotermične meritve na številnih izdankih zahodnega roba Krške kotline.

Z uporabo modela kvantifikacije smo na primeru potrebne globine geosonde v Brodu v Podbočju prvič pokazali **prednosti dvojne, čimbolj uravnotežene rabe plitvega podtalja**. V primeru takšne kombinirane rabe lahko le 98,6 m globoka geosonda (torej približno toliko, kot je nova raziskovalna vrtina GCF-1/24) pokrije potrebe po ogrevanju v višini 9,8 MWh/leto in ohlajanju za 5,9 MWh/leto. Če bi bili na lokaciji boljši naravni pogoji, bi lahko iz nje pridobili do 10,6 MWh/leto in uskladičili do 8,3 MWh/leto. Oboje pokriva le slabo desetino realnih energetskih potreb pilotne hladilnice. Najslabši in najdražji scenarij predstavlja raba geosonde le za hlajenje - v tem primeru je njena potrebna globina 134 m. Če bi jo uporabili le za ogrevanje, zadostuje 108 m. A obeh primerih povzročimo okoljski vpliv, ogrevanje ali hlajenje tal. Zato je ključno, da se načrtuje raba naprav za dvojno rabo - oddajanje toplote

v tla pri hlajenju, kar omogoča sezonsko skladiščenje presežne toplotne energije, in nato njeno pridobivanje za ogrevanje objektov v kurilni sezoni. S tem se ji poveča ekonomska učinkovitost in zmanjša vpliv na okolje.

Raziskave energetskih potreb in učinkovitosti hladilnic so presenetljivo redke, zato sta naš pristop in dejanske meritve še toliko pomembnejša.

Na obeh pilotnih hladilnicah smo konec marca 2024 (dosežek M1_2) vzpostavili **urne meritve temperature in relativne vlažnosti v hladilni celici ter zunaj stavbe**, ki potekajo tudi po koncu projekta. Rezultati podajajo sistematično razliko med hladilnicama: povprečna notranja temperatura zraka v Brodu je bila $5,1 \pm 2,7$ °C, relativna vlažnost $93,4 \pm 5,8\%$; povprečna notranja temperatura zraka v Juršincih med delovanjem je bila $6,8 \pm 0,9$ °C, relativna vlažnost $91,5 \pm 6,5\%$.

Naše raziskave bioloških sprememb kakovosti pridelka med skladiščenjem zaradi metabolizma so kot **optimalne pogoje za skladiščenje solate in zelja** prepoznale temperaturo okoli 5 °C in vlažnost nad 92 %. Iz meritev sklepamo, da je za dani namen po obeh parametrih bolj primerna hladilnica v Brodu v Podbočju.

Tehnični del **Smernic za rabo plitve geotermalne energije za hlajenje** (dosežek M7_1) predstavljajo minimalne zahteve in pristopi za pripravo projektne dokumentacije (dosežek M5_1). Smernice poudarjajo, da ni univerzalnih rešitev, ampak je za vsak projekt ključno dobro načrtovanje, ki upošteva realno porabo energije in štiri kriterije: razvojne cilje in robne pogoje kmetije, načrt režima delovanja in toplotne izmenjave s tlemi glede na naravne danosti ter uravnoteženost kombinacije hlajenja in ogrevanja.

Nove smernice za projektiranje plitvih geotermalnih sistemov za hlajenje izpostavljajo, da je njena uporaba najbolj smiselna v okoljih z: velikimi sezonskimi razlikami v potrebah po toploti in hladu, sočasno rabo ogrevanja in hlajenja (npr. hladilnice + bivalni prostori) in možnostjo povezovanja odpadne toplote in sezonske akumulacije. Za učinkovito izvedbo so ključni: prilagojen sistem strojnih instalacij, ki omogoča integracijo ponorov in izvorov toplote, natančna karakterizacija tal in objekta, večkriterijski izbor tehnologij (energetski, okoljski, ekonomski vidiki) in monitoring porabe s prilagodljivostjo režimov obratovanja.

Ekonomsko uspešno rešitev vidimo v novih hladilnicah, ki obratujejo stalno oziroma tudi v najbolj vročih dneh, pri čemer je nazivna moč hlajenja nižja od toplotne moči geosonde in se slednja uporablja uravnoteženo, tudi za ogrevanje. Ključni aplikativni pomen preizkušene metodologije in smernic je, da je za **pokrivanje potreb večjih hladilnic potrebno spodbujati uporabo odprtih sistemov voda-voda z uporabo črpalnih in ponikalnih vodnjakov**.

Rezultate projekta smo uspešno objavili v znanstvenem članku v reviji Renewable energy (A"). Pilotnima kmetijama smo jih predstavili 16. 6. 2025, predlog smernic pa nato med avgustom in oktobrom še strokovnjakom agronomske in geološke stroke na treh delavnicah (dosežek M8_1). Vsebine smo predstavili tudi na več kot desetih strokovnih in znanstvenih srečanjih oziroma konferencah ter julija 2025 kot del terenskega dne na tretji mednarodni poletni geotermalni šoli v Ljubljani.

3. Abstract

Within the framework of the CRP project *GeoCOOL FOOD – Cold Storage of Food Using Shallow Geothermal Energy*, we developed a methodology for interdisciplinary design of the optimal use of shallow geothermal energy for cooling vegetable storage facilities on farms. Our hypothesis was that optimal design enables economically viable solutions that reduce long-term energy supply costs and may translate into more affordable product prices for end consumers. We investigated the relevance of four key domains: (1) natural conditions and geothermal potential, (2) energy demand and cooling efficiency of storage facilities, (3) changes in stored produce during cooling, and (4) potential management strategies.

To define natural conditions, we **developed a method for assessing the potential of shallow geothermal energy for cooling purposes** (output M3_1), based on the quantification of five factors. The analysis was conducted on areas of actual agricultural use (arable land, hop fields, greenhouses, vineyards, and intensive orchards), resulting in the first map of geothermal cooling potential using borehole heat exchangers for agriculture in Slovenia.

Analytical calculations were based on two closed loop geoprobes, each 50 meters deep. We found that among local geothermal conditions (1), the potential is most significantly increased by high thermal conductivity and low ground temperature, as these allow for greater dissipation of excess heat from cooling systems. We defined three classes of natural geothermal potential: least favourable areas with capacity up to 5 MWh/year, moderate areas with 5–10 MWh/year, and most favourable areas with more than 10 MWh/year.

Meteorological and climatological conditions (2) were analyzed across seven regions, revealing that they can alter borehole potential by up to 18%. The maximum allowable temperature of the working fluid (3), which is not legally regulated in Slovenia, has a substantial impact. An increase of 4°C raises the potential by 34%, but simultaneously reduces system efficiency, making the effect non-linear.

Even more critical are the type, depth, and spatial arrangement of boreholes (4). Increasing the spacing enhances potential (up to 9%), and greater depth can multiply it. While increasing the number of boreholes raises potential, the relationship is not linear. Moreover, linear arrangements provide more energy storage capacity than geoprobe fields.

The influence of groundwater flow (5) was assessed using numerical models and by comparing analytical (EED) and numerical (FeFLOW) modelling approaches (output M6_1). Simulations were performed for five alluvial plain regions: the Sava (Upper Carniola and Krško Basin), Savinja, Drava, and Mura. We found that the presence of groundwater accelerates thermal regeneration of the ground, increasing the potential of a borehole pair by 2.9 to 9.3 times, with the highest values in the Sava and Drava basins (up to 35–56 MWh/year). The most significant increase in potential occurs when switching to groundwater abstraction – the capacity of the most productive wells in the Drava and Sava Basins is estimated at 360–384 MWh/year.

We compiled the **first inventory of farm-based cold storage facilities in Slovenia**. In agreement with the Ministry of Agriculture, Forestry and Food (MKGP), large-scale industrial cold stores and retail distribution centres were excluded. Our focus was on facilities used for storing fruits and vegetables, particularly cabbage and lettuce. We found that publicly available spatial datasets do not allow for reliable identification of buildings used specifically as cold storage facilities. Therefore, the list of 49 cold stores (output M1_1; Annex 1) was compiled with the assistance of agricultural advisors. We identified 16 facilities used for vegetable storage, 16 for fruit storage, while the remaining facilities did not report specific types of stored produce.

Based on their geographic locations, we analysed geological, geothermal, and climatological conditions

and selected 10 farms for in-depth interviews conducted during the winter of 2023/2024. These interviews focused on the farms' planned energy transition (part of report M3_1).

The interviews were conducted using a **newly developed model for quantifying the potential for cold generation via shallow geothermal energy**, and thus for subsurface energy storage (output M5_1), based on seven boundary conditions: 1. Economic viability of the investment should not be the sole criterion; it must be complemented by developmental goals such as energy self-sufficiency and climate adaptation; 2. Assessment of available energy sources and end-users on the farm is essential during the planning phase; 3. Seasonal and annual energy balances for thermal and electrical energy, as well as peak power demands, must be analysed; 4. Natural and technical characteristics of the system (boreholes or wells) should be summarized in an overview of geothermal input data; 5. Environmental impact and interaction with surroundings are primarily influenced by the temperature of the working fluid; 6. System efficiency depends on the number, depth, and spatial arrangement of geothermal objects as well as the temperature difference between the cooling space and the subsurface; 7. Long-term performance monitoring is crucial, with necessary adjustments expected over a 30–50 year operational lifespan.

The project established a **comprehensive methodological framework for determining the energy requirements of agricultural cold stores** (output M2_1) and their optimal coverage using renewable energy sources. The methodology combines quasi-stationary calculations with dynamic simulations (PURES 2022), enabling precise estimation of thermal loads and seasonal variation impacts. Special attention was given to vegetable storage, where precise control of temperature and humidity plays a key role in minimizing losses and energy consumption. This approach provides a robust foundation for comparable and replicable planning of energy systems in agricultural facilities.

Based on the analysis of agricultural facility characteristics, geological conditions, and available heat pump technologies, a **decision matrix for selection of the most appropriate technology** (output 4_1) was developed, according to location, energy needs, and thermal loads. Two geothermal system types were analysed: open loops (water–water) and closed loops (ground–water), with various heat extraction configurations, including wells, borehole heat exchangers (geoprobos), and horizontal collectors. The project clearly defined boundary conditions for system implementation, including administrative requirements and hydrogeological constraints, enabling safe and efficient spatial integration of geothermal solutions.

The reports emphasize the **importance of integrating geothermal sources with air-based systems and a shared thermal storage unit**, allowing switching between sources depending on the current coefficient of performance (COP) and load conditions. This design enables maximum seasonal efficiency, supports simultaneous heating and cooling, and balances seasonal demands through subsurface seasonal thermal storage. **Hybrid systems** thus enhance operational flexibility and reduce dependence on a single energy source, which is particularly important for facilities with diverse energy needs throughout the year.

Simulations and measurements (output M2_2) demonstrated that properly dimensioned **geothermal systems can achieve COP values above 4, and reduce electricity consumption by 30–60% compared to conventional systems**. Positive impacts on profitability are associated with balanced heating and cooling usage, year-round operation, and high energy prices, which improve the economic viability of investments. Nevertheless, **internal rate of return (IRR) and net present value (NPV) remain moderate**, indicating that broader adoption requires appropriate financial support or incentive frameworks.

The key scientific contribution of the project lies in the development of a **transferable methodology for modelling and evaluating the use of shallow geothermal energy in agriculture**, the identification

of optimal technical solutions, and the quantification of impacts on energy use and CO₂ emissions. The results directly support the implementation of national and European climate-energy goals, including REPowerEU and the European Green Deal, and are applicable for strategic planning, investment design, and policy development for the transition to low-carbon agriculture.

Instead of one, **two pilot farms with cold storage facilities** were selected, differing significantly in operational regimes and cold store sizes. At Munda Farm in Juršinci (Podravje Statistical Region), a medium-sized cold store is inactive during summer, and there is potential for combining a geoprobe and a well for heating a seedling greenhouse or irrigation. Turk Farm in Brod v Podbočju (Posavje Statistical Region) operates multiple cold stores, including large units with continuous operation, and has a development goal of achieving energy self-sufficiency.

Since the potential for shallow geothermal energy use increases when cold stores operate during summer, in November 2024, a **100-meter deep exploratory borehole GCF-1/24** was drilled in Brod v Podbočju, within the Krško Basin (output M3_2). Constructed as a single U-tube geoprobe, it is the **first in Slovenia to include a permanently installed observation pipe and distributed temperature sensing (DTS) optical fibres** for continuous temperature measurements along its entire length. This **introduced advanced technology into geothermal research** and enabled testing of a novel *in situ* quantitative method for determining thermal properties of rocks and assessing geothermal potential. In February 2025, the interpretation of the standard thermal response test (TRT) was enhanced using permanently installed DTS fibres, resulting in the DTRT method, and in June 2025, further upgraded to an **enhanced TRT with hybrid cables (eTRT)**—a technique still rare even in Europe. DTRT and eTRT enabled, for the first time, the **quantification of vertical heterogeneity** in geothermal properties and advection effects due to groundwater flow.

Geothermal measurements clearly revealed the seasonal influence of solar radiation on the geothermal potential of the very shallow subsurface and identified a very low geothermal gradient, with temperature increasing by no more than 10 °C per kilometre of depth.

A key methodological contribution of the project is the **comparison between field and laboratory geothermal methods**, conducted on identical sediment samples, enabling a true quantification of result discrepancies. We found that needle probe measurements tend to underestimate thermal conductivity due to lower moisture content, poor contact with the sample, and limited sample volume. In contrast, laboratory measurements using the TCS device and field thermal response tests (TRT) yielded more realistic and comparable results. Among these, cemented optical fibres provided the best contact with the surrounding formation and thus reported higher thermal conductivity values than measurements obtained via hybrid cables. The DTRT method produced the most homogeneous vertical profile, though it likely slightly underestimates thermal conductivity. The eTRT method, on the other hand, is sensitive to the positioning of the heater and temperature sensor, as well as the uniformity of heat distribution along the cable length.

The GCF-1/24 borehole, drilled to a depth of 100 m, transitioned at 11 m from well-permeable Quaternary sandy-silty gravel into poorly consolidated and low-permeability marl-rich silts of the Upper Miocene Drnovo Formation. At depths of 25 m and 50 m, two cores were extracted and subjected to detailed hydrogeological and geothermal analysis (output M3_2). This quantification of Drnovo Formation properties **enhances public access to geological data and helps reduce geological risk** in future borehole heat exchanger installations. A similar contribution was made through systematic geothermal measurements on multiple outcrops along the western margin of the Krško Basin.

Using the geothermal quantification model, we **demonstrated the advantages of dual and balanced use of the shallow subsurface** on the example of required borehole depth in Brod v Podbočju. In such

a combined scenario, a borehole of only 98.6 m depth (approximately the depth of GCF-1/24) can meet heating demands of 9.8 MWh/year and cooling demands of 5.9 MWh/year. Under more favourable natural conditions, the same borehole could yield up to 10.6 MWh/year and store up to 8.3 MWh/year. However, this still covers only about 10% of the actual energy needs of the pilot cold store. The least efficient and most expensive scenario is using the borehole exclusively for cooling, which would require a depth of 134 m. For heating-only use, a depth of 108 m would suffice. Both cases, however, result in environmental impacts—either heating or cooling the ground. Therefore, it is essential to plan for dual-use systems, where heat is discharged into the ground during cooling and later recovered for heating during the heating season. This **approach improves economic efficiency and reduces environmental impact**.

Studies on the energy needs and efficiency of cold stores are surprisingly scarce, making our **approach and empirical measurements particularly valuable**. At both pilot cold stores, we established hourly measurements of temperature and relative humidity inside the cooling chamber and outside the building in March 2024 (output M1_2), and these measurements continue beyond the project's conclusion. The results show a **systematic difference between the two facilities**: cool storage at Brod v Podbočju has an average internal air temperature of 5.1 ± 2.7 °C and relative humidity $93.4 \pm 5.8\%$; the one at Juršinci has an average internal air temperature during operation 6.8 ± 0.9 °C and relative humidity $91.5 \pm 6.5\%$.

Our research on **biological changes in produce quality during storage** due to metabolism identified optimal storage conditions for lettuce and cabbage as approximately 5 °C and humidity above 92%. Based on these parameters, the cold store in Brod v Podbočju is more suitable for this purpose.

The technical section of the **Guidelines for the Use of Shallow Geothermal Energy for Cooling** (output M7_1) defines minimum requirements and approaches for preparing project documentation (output M5_1). The guidelines emphasize no universal solutions exist; each project requires careful planning that considers actual energy consumption and four criteria: development goals and boundary conditions of farm; operational regime and heat exchange with the ground that are based on natural conditions and balance between heating and cooling needs, well quantified realistic energy demand.

New design guidelines for **shallow geothermal systems for cooling** emphasize that their **application is most effective** in environments characterized by: significant seasonal variations in heating and cooling demands; simultaneous use of heating and cooling (e.g., cold storage combined with residential spaces), and the potential for integrating waste heat and seasonal thermal storage. Key factors for successful implementation include: a tailored mechanical installation system that enables the integration of heat sources and sinks; precise characterization of the subsurface and the building; a multi-criteria technology selection process considering energy, environmental, and economic aspects, and monitoring of energy consumption with adaptable operational regimes.

An **economically viable solution is seen in new cold stores** that operate continuously, including during the hottest days, where the nominal cooling power is lower than the thermal capacity of the borehole, and the latter is used in a balanced manner, including for heating. The key applied value of the tested methodology and guidelines is the **recommendation to promote open-loop water–water systems using pumping and infiltration wells to meet the energy needs of larger cold stores**.

The project results were successfully published in a scientific article in the journal Renewable Energy (A"). They were presented to the two pilot farms on June 16, 2025, and the guideline proposal was shared between August and October with experts from agronomic and geological disciplines at three workshops (output M8_1). The findings were also presented at more than ten professional and scientific meetings or conferences, and in July 2025 as part of a field work during the third International Geothermal Summer School in Ljubljana.

4. Opis problema in ciljev

Cilja povečanja zdrave prehrane potrošnikov in sočasnega povečanja deleža samooskrbe v zelenjadarstvu neposredno vodi k večji potrebi po zagotovitvi ustreznih skladiščnih pogojev za ohranjanje kakovosti proizvoda čim daljši čas. Zdrava prehrana zahteva ohranjanje visoke kakovosti pridelka, ki se jo lahko ohrani s primernim hladilnicami. Zato postaja vse pomembnejša strategija postavitve energetske učinkovitih hladilnic, na optimalnih lokacijah z rabo lokalnih obnovljivih virov energije in prilagojenih potrebam proizvoda, ki ga skladiščijo. To bo sektorju kmetijstva omogočilo večji prispevek k blaženju in prilagajanju na podnebne spremembe ob hkratnem povečevanju stopnje samooskrbe s hrano in energijo.

V okviru CRP projekta GeoCOOL FOOD - Hladno skladiščenje hrane z rabo plitve geotermalne energije smo stremeli k razvoju metodologije za interdisciplinarno in optimalno načrtovanje rabe geotermalne energije za namen hlajenja hladilnic. Pri tem smo imeli tri ključne izzive:

- i) dobro poznavanje geoloških in klimatoloških razmer na izbrani lokaciji
- ii) zanesljiva ocena energetskih potreb hladilnice (in celotne kmetije) in
- iii) izbira optimalne tehnologije za skladiščenje presežne toplote v tleh.

Le optimalno načrtovanje sistemov rabe plitve geotermalne energije omogoča ekonomsko ugodne rešitve, ki dolgoročno znižajo stroške oskrbe z energijo na kmetiji in se lahko prelijejo tudi v bolj ugodne cene skladiščenega pridelka za končnega potrošnika. Hkrati povečajo rabo lokalnih virov obnovljivih virov energije in izboljšajo energetske samooskrbo kmetij ter prispevajo k manj zavržene hrane, če pride iz hladilnic do potrošnika v boljšem in lepšem stanju.

Načini, posledice in načrtovanje sistemov za rabo tal kot (sezonskega) hranilnika toplote, kar pravzaprav presežno skladiščenje toplote iz hladilnic pomeni, so le slabo raziskani, izjemno redki so tudi primeri rabe plitve geotermalne rabe v kmetijstvu.

Trg z geotermalnimi toplotnimi črpalkami v Sloveniji še vedno izkazuje rast. Konec decembra 2024 je bilo v državi približno 17.198 delujočih enot manjših moči in približno 1390 enot večje moči. S skupno 18.588 enotami je bilo izkoriščeno približno 1694,06 TJ (470,57 GWh) toplote iz podtalja, medtem ko je bilo v hladilnem načinu v podtalje odvedeno vsaj 544 TJ/leto toplote. 45 % je bilo odprtih, voda-voda sistemov, približno 30% vodoravnih zaprtih kolektorjev in 26% enot navpičnih zaprtih kolektorjev tla-voda ali geosond. Segment plitve geotermalne energije je doprinesel 74,4 % vse pridobljene geotermalne energije. Kljub tem spodbudnim številkam nam še vedno ni poznana nobena raba plitve geotermalne energije v kmetijstvu, kaj šele za namene hladilnic.

Glavni cilj projekta GeoCOOL FOOD je bil z interdisciplinarnim pristopom (geološko, biološko, tehnično, energetsko in z upravljalkega vidika) razviti metodologijo za raziskave potenciala plitve geotermalne energije in tehnoloških rešitev za namene izgradnje novih ali prilagoditve obstoječih hladilnic za zelenjadarstvo. Identificirati smo želeli najprimernejša območja za njihov razvoj v Sloveniji in z meritvami, analitičnimi in numeričnimi modeli tipskih primerov in na pilotnih območjih optimizirati tehnološke rešitve, ki zagotavljajo energetsko in stroškovno učinkovito hlajenje za namene kmetijstva.

Cilje smo razvrstili na štiri področja:

- 1) **Raziskave naravnih danosti / potenciala plitve geotermalne energije:**
 - a) Vpeljava novih metod za analizo geotermičnih lastnosti kamnin in oceno geotermičnega

potenciala Slovenije za hlajenje

b) Izvedba pregleda metod vrednotenja potenciala za skladiščenje energije in pridobivanje hladu ter izbor najustreznejšega modela kvantifikacije

c) Vpeljava naprednih numeričnih metod simulacije prenosa toplote in hladu v podtalju za optimizacijo in dimenzioniranje objektov za rabo plitve geotermalne energije.

2) **Raziskave energetskih potreb in učinkovitosti hladilnic:**

d) Vpeljava metod za inventarizacijo hladilnic za zelenjadarstvo in analizo njihovih energetskih potreb

e) Opredelitev tipskih bazičnih in koničnih energetskih potreb ter presežne toplote, ki jo je potrebno odvesti v tla na vsaj enem pilotnem območju

f) Analiza ponudbe dostopnih tehnologij izvedbe geotermalnih toplotnih črpalk s predlogom izbora najprimernejših glede na ugotovljene naravne danosti.

3) **Raziskave sprememb bioloških pogojev ob skladiščenju:**

g) Vpeljava metod za spremljanje spreminjanja kakovosti pridelka med skladiščenjem (npr. zelje, solata, ...), ki vplivajo na določitev vhodnih pogojev za izračun energetskih potreb hladilnic.

4) **Načrtovanje upravljanja rabe plitve geotermalne energije:**

h) Priprava predloga smernic za izvedbo takšnih sistemov z upoštevanjem vpliva na okolje.

5. Pregled literature

Plitva geotermalna energija (PGTE) je lokalno dostopen obnovljiv vir energije, njena ustrezna raba je okoljsko sprejemljiva in energetska učinkovita ter lahko zmanjša povpraševanje po primarni energiji, kar prispeva k energetskemu prehodu (Banks, 2012; Kujbus in sod., 2020; EGEC, 2021). Stabilne temperature tal omogočajo predvidljivo rabo (Sass in sod., 2016; Tsagarakis, 2020), omejujejo jo predvsem višji začetni stroški investicije (Le in sod., 2021). Raba PGTE za hlajenje je najbolj razširjena za stanovanjske in poslovne stavbe, na Portugalskem in Španiji (Magraner in sod., 2010; Iñigo in sod., 2015), Italiji, Grčiji in na Balkanu (Kolbah in sod., 2019), tudi Sloveniji (Rajver in sod., 2021). Francesco s sod. (2016) opisujejo raziskave v okviru projekta LEGEND. Wrobel in sod. (2010) so za ohlajanje kombinirali odstranjevalec vlage, solarno energijo in navpične toplotne izmenjevalce. Rosiek in sod. (2012) so uporabili odprt geotermalni sistem, ki ga napajajo sončne celice.

Potencial rabe PGTE za hladilnice v kmetijstvu je slabo raziskan. V Sloveniji ali okolici jih ne poznamo, a v svetovnem merilu naraščajo. Najpogostejše so raziskave za ogrevanje rastlinjakov, redkeje za hlajenje. Singh in sod. (2020) so raziskali navpične toplotne izmenjevalce (geosonde) za hladilnice krompirja v Indiji, z namenom izboljšanje energetske učinkovitosti in zmanjšanja potreb po vodi za hlajenje kondenzatorja. V Sloveniji je zelo malo raziskav o hladilnicah, pa še te se ukvarjajo predvsem s skladiščenjem sadja. Pregled hladilnic je bil narejen v letu 1991 (PSS, 1991), kasnejše objave zajemajo možnosti rabe odpadne toplote hladilnice sadja (Kovačič, 2021), načine posodobitve hladilnice jabolk (Cehte, 2016), spremembe jabolk med skladiščenjem (Kaučič, 2008), kontrolo ozračja v hladilnici (Dernovšek, 2008), ekonomsko analizo hladilnice za sadje (Korošec, 2007) in kriterije za upravičenost logističnih centrov za sadje in zelenjavo (Hadžić, 2019).

Osnova za načrtovanje rabe PGTE je ocena potenciala, ki upošteva hidrogeološke razmere, ki pogojujejo izbiro geotermalne toplotne črpalke (Le in sod., 2021). Za oceno za rabo z zaprtimi geotermalnimi sistemi je najpogostejše uporabljen nemški standard VDI 4640 (VDI, 2010), ki omogoča ocene toplotne moči na enoto dolžine toplotnega izmenjevalca (W/m) za različne litološke enote. García-Gil in sod. (2015) so razvili metodo za določitev največje toplotne moči na enoto površine, ki se lahko izmenja s tlemi v gosto naseljenem območju mesta, v Barceloni. Omenjena pristopa sta bila osnova za metodo G.POT (Casasso in Sethi, 2016), ki predpostavlja, da ciklične sinusne toplotne obremenitve povzročijo

časovno spremenljivo toplotno obremenitev tal. Ker je toplotna sprememba tal prenosorazmerna s toplotno obremenitvijo, razlika med začetno temperaturo tal in mejno temperaturo delovne tekočine določa toplotno obremenitev oziroma geotermalni potencial, ki ga lahko navpični toplotni izmenjevalec (geosonda) trajnostno izmenjuje.

Geotermične lastnosti podpovršja močno vplivajo na zasnovo in delovanje plitvih geotermalnih sistemov, zato je za dimenzioniranje ključno dobro poznavanje toplotne prevodnosti in difuzivnosti (Raymond, 2018; Chapman et al., 2025). Laboratorijske meritve so neodvisne od prisotne podzemne vode, a so lahko podvržene učinkom obsega in morda ne zajamejo celotne variabilnosti (Li et al., 2024; Albers et al., 2025; Rajver & Adrinek, 2023). Nasprotno testi toplotnega odziva (TRT) zagotavljajo oceno efektivne toplotne prevodnosti in situ in lahko zmanjšajo stroške, povezane z izkopom jedra (GEU, 2020). Standardni TRT predpostavlja homogen material s konduktivnim prenosom toplote na podlagi modela neskončnega linijskega vira (ILS), kar pogosto ne ustreza realnim pogojem, in poda le eno povprečno vrednost. Nadgradnja so testi z uporabo DTS optičnih vlaken, kablov za beleženje temperature na več globinah vzdolž vrtine (Hakala & Leppäharju, 2014). Testi toplotnega odziva (DTRT) izboljšujejo običajne TRT FO kable je mogoče namestiti v različnih. Čeprav je interpretacija podatkov enaka, rezultati omogočajo prepoznavanje heterogenosti in razlikovanje kondukcijskih in adveksijskih conami s podzemno vodo. Vendar pa lahko na meritve DTS vplivajo omejitve senzorjev, slabljenje vzdolž kabla in napake pri kalibraciji (Davis et al., 2021). Izboljšani testi toplotnega odziva (ETRT) dodatno izboljšajo prostorsko ločljivost z neposrednim vbrizgavanjem toplote v vrtino z uporabo grelnih kablov, ki so običajno integrirani s senzorji FO. Za razliko od DTRT med ETRT ne kroži voda, kar omogoča bolj nadzorovan toplotni vnos (Albers et al., 2024).

Zmogljivost hlajenja z rabo PGTE je odvisna od tehnologije in lokalnih geoloških pogojev. Analiza zagotovljene dnevne zmogljivosti hlajenja v mestu Guangzhou na Kitajskem pri sistemu zemlja-zrak znaša 74,6 kWh (Le in sod., 2021). Alghannam (2012) je določil učinkovitost hladilnih sistemov (ang. Earth Tube Heat Exchangers - ETHE) z grelnim številom za hlajenje in dobil povprečno 6,32 na peščenih tleh z aridno klimo. Ozgener in sod. (2010) so določili povprečno vrednost grelnega števila za hladilni sistem (ang. earth to air heat exangers - EAHE) v celotnem eksperimentalnem obdobju 10,09. Učinkovitost geotermalnih toplotnih črpalk za hlajenje v rastlinjakih so preučevali v Južni Koreji, kjer so določili vrednost grelnega števila 3,5 (Seo in sod., 2021). Harjunowibowo in sodelavci (2021) so ga določili kot 1,2-3,45. Boughanmi in sod. (2015) so preučevali uporabnost novega koničnega geotermalnega toplotnega izmenjevalca (CHGHE) za ogrevanje rastlinjaka. Ugotovili so, da nova zasnova bistveno zmanjša obratovalne stroške in površino toplotnega izmenjevalca v primerjavi z običajnimi vertikalnimi in horizontalnimi izmenjevalci. Eksperimentalni rezultati so pokazali toplotno obremenitev 4,7 kW iz tal z grelnim številom 3,93 za toplotno črpalko in 2,64 za celotno enoto.

Potrebne temperature skladiščenja se razlikujejo glede na vrsto pridelka. Za podaljšanje obstojnosti zelja se uporablja temperatura med 0 in 5 °C, kar vpliva predvsem na zmanjšanje izgube mase (Taniwaki in sod., 2009) in tudi manjši mikrobiološki kvar (Watanabe in sod., 2020). Poletne sorte se pri nižani temperaturi in ustrezni relativni vlagi skladiščijo do 3 mesece (Osher in sod., 2018), jesenske sorte tudi dlje. Znižana temperatura skladiščenja vpliva na počasnejšo razgradnjo klorofila in ohranjanje barve ter teksture (Hu, Zhao in sod., 2021). Od skladiščnih parametrov avtorji poudarjajo pomen kumulativne temperature (ure skladiščenja x °C) (Watanabe in sod., 2020). Solata se skladišči pri temperaturi med 0 in 8 °C kar vpliva na zmanjšanje kvara (Gu in sod., 2022). Glavni problem skladiščenja solate je zaradi velike površine listov, izguba vode in ovenelost, kar zmanjšamo z omočevanjem listov in vzdrževanjem visoke relativne vlažnosti pri temperaturi blizu 0 °C. Nižja temperatura skladiščenja zavira razvoj

patogenih mikroorganizmov (*Escherichia coli* O157:H7 ter *Salmonella choleraesuis* (Oliveira in sod., 2010)). Nižja temperatura skladiščenja solate ohranja teksturne lastnosti solate (zadrži hrustljivost dlje časa) (Soltani Firouz in sod., 2021). Zelje in solata se prodajata tudi kot narezana, pripravljena za takojšnje uživanje, kjer je nizka temperatura skladiščenja še pomembnejša za ohranjanje kakovosti.

6. Metode dela

6.1. Inventarizacija obstoječih hladilnic na kmetijah in izbor dveh pilotnih lokacij

Pripravili smo prvi popis hladilnic na kmetijah v Sloveniji, ki so namenjene skladiščenju zelenjave in sadja. Po dogovoru z MKGP, hladilnic, ki so namenjene za industrijsko rabo ali služijo kot skladiščni centri trgovin ali pretežno mesa na kmetijah, nismo zajeli.

Najprej smo pregledali javno dostopne prostorske evidence, tj. baze podatkov Geodetske uprave Republike Slovenije. Osnovna baza je Kataster nepremičnin, kjer so podane mnoge informacije posameznih delov stavb. Ena izmed teh je tudi namen rabe prostora skladno s Pravilnikom iz Uradnega lista RS št. 19/2019. Ta loči več 10 različnih skupin namenov rabe prostora, nobeden izmed teh pa ni namenjen izključno popisu hladilnic. To pomeni, da se le te nahajajo znotraj večje skupine in tako popisa hladilnic na osnovi Katastra nepremičnin ni mogoče opraviti.

Nato smo se povezali s kmetijskimi svetovalci, ki so sporočili terenske informacije. Zaradi težav pri pridobivanju podrobnejših podatkov smo na pregledni seznam hladilnic na kmetijah dodali le najosnovnejše informacije – lokacijo in skladiščeno surovino (zelenjava, sadje, ni znano; Priloga 1). Petnajstim, ki skladiščijo zelenjavo, in sedemnajstim brez poznanega pridelka smo iz javno dostopnih kart (glej poglavje o analizi naravnih danosti) določili sedem pomembnih parametrov, ki vplivajo na geotermični potencial: toplotna prevodnost vrhnjih geoloških plasti, volumska toplotna kapaciteta kamnin in zemljin, potencial za določen tip rabe tehnologije plitve geotermalne energije, pričakovana temperatura na globini 100 m in na površini trdnih tal, gostota toplotnega toka in razvrstitev po hidrogeološki karti.

Sledil je izbor geotermično perspektivnih lokacij in izvedba terenskega pregleda 10 izbranih hladilnic zelenjave izmed 16 popisanih po Sloveniji. Izvedli smo jih v štirih dnevih: 20. 11. 2023 lokacije 11, 12, 13, 15; 24. 11. 2023 lokacije 9, 14 in 49; 19. 01. 2024 lokacijo 1 in 07. 02. 2024 lokacije 16, 39, 45.

Pri izbiri dveh pilotnih lokacij smo upoštevali naslednje:

- 1- Pridelava zelenjave
- 2- Obstoječe hladilnice
- 3- Interes lastnika
- 4- Območje hidro-geološko ni raziskano?
- 5- Možen razvoj hladilnic

Med razpravo so bili izpostavljeni nekateri za projekt pomembni vidiki in vprašanja glede razvoja hladilnic:

- V kakšnem stanju je hiša, objekti – ali tudi potrebujejo menjavo energenta, tako da je smiselno celovito prestrukturirati celotno gospodarstvo.
- Koliko so hladilnice izkoriščene?
- Zakaj so se odločili za energent, ki ga uporabljajo sedaj? Ali so z njim zadovoljni – zakaj da/ne? Zakaj in kdaj bi se za drugega?
- Kakšno podporo potrebujejo pri energetskih dilemah?

- Ali se zaradi spremenjenih stroškov električne energije ali cene goriv sedaj odločajo drugače kot v preteklosti za samo rabo hladilnice? Ali jo npr. prej izključijo? Ali bi dlje skladiščili proizvode, če bi bila energija cenejša, ali to sploh ni faktor za odločitve?
- Ali so povezani v skupino proizvajalcev, zakaj da/ne? Ali bi šli v skupno hladilnico (3 so že skupnost), pod kakšnimi možnostmi?
- Ugotoviti, v čem so razlike med individualnimi in skupinskimi hladilnicami (energetsko, v pristopu, raziskavah, nadzoru-optimizaciji).

6.2. Meritve pogojev in energetskih potreb hladilnic na dveh pilotnih območjih

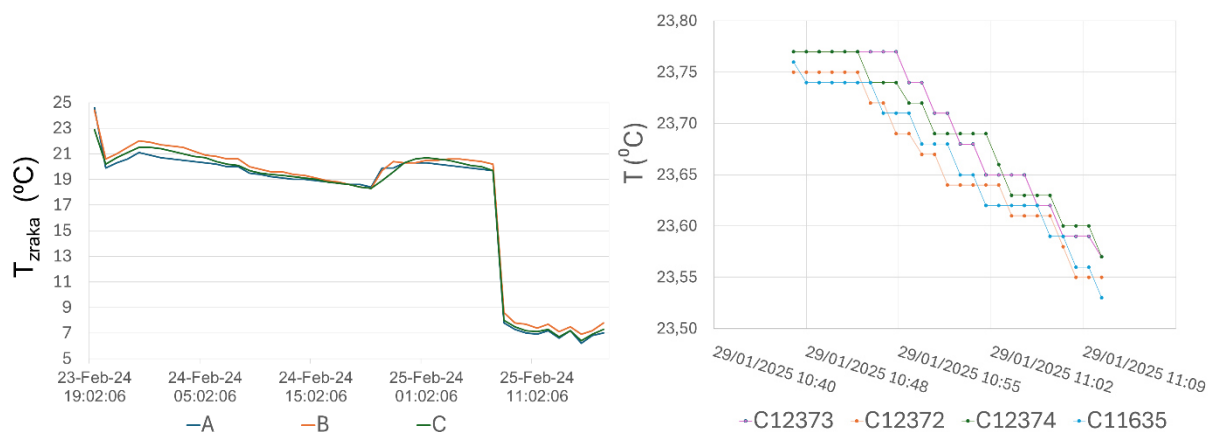
GeoZS je kupil merilce za spremljanje temperature in vlažnosti v hladilnicah in zunaj objektov (USB datalogger temperature in vlage M2, <http://meri.si/izdelek/usb-datalogger-zapisovalnik-temperature-vlage-m2/>) ter za meritve temperature v vodi v opazovalni cevi v geosondi (Star:ODDI). Slednji so zelo majhnega premera in z zelo dolgo trajajočo baterijo. Meritve smo izvajali na obeh pilotnih lokacijah (Slika 1), v Brodu v Podbočju od 27. 3. 2024, v Juršincih pri Ptujju pa od 20. 3. 2024 in tako smo zagotovili več kot eno leto meritev. Za Juršince je na voljo celoten niz podatkov, v Podbočju pa so zanesljivi podatki le do 19. 12. 2024 za vlažnost v hladilnici in do 29. 1. 2025 za temperaturo v njej, ker je prišlo do okvare merilca.



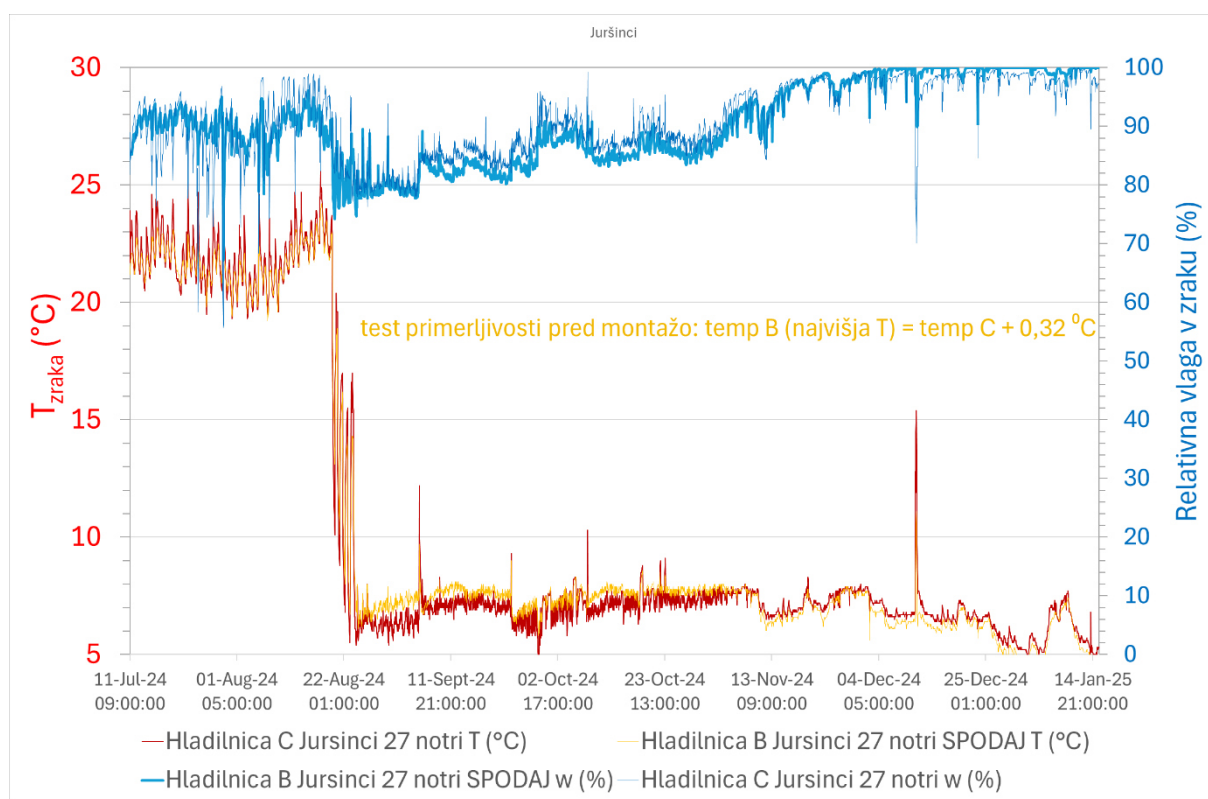
Slika 1: Pilotni območji za meritve Juršinci (Ptuj) in Brod v Podbočju 4 (Dolenjska)

Pred montažo smo naredili primerjavo med instrumenti istega tipa (Slika 2) za ugotavljanje primerljivosti meritev. Rezultati Star:ODDI so zelo primerljivi, rezultati M2 pa imajo nekaj razlike. Če merilec C s srednjo vrednostjo temperature vzamemo za referenčno vrednost, je razmerje z A merilcem $A=C+0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Druga razmerja so; $B=C+0,32\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $B=A+0,47\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pri primerjavah temperatur med in izven hladilnic je potrebno biti nekoliko previden pri interpretaciji absolutnih vrednosti (Slika 3), vendar menimo, da je relativna razlika ustrezna.

V času med 23. 5. in 19. 6. 2024 je IJS meril porabo električne energije v pilotni hladilnici v Brodu v Podbočju in iz tega razvil model za oceno letnih in vršnih potreb. Primerjava celotnega – celoletnega niza podatkov meritev temperature v hladilnici je pokazala, da je bil ta čas reprezentativen za običajno delovanje hladilnice.



Slika 2: Primerjava urnega zapisa temperature zraka z merilci M2 (levo) in minutnega zapisa temperature vode z merilci Star:ODDI (desno)



Slika 3: Primerljivost merilnih instrumentov M2 za temperaturo in vlažnost zraka v hladilci v Juršincih

6.3. Analiza naravnih danosti in izdelava karte geotermalnega potenciala za hlajenje v kmetijstvu

Nova metodologija analize naravnih danosti za karto geotermalnega potenciala za hlajenje v kmetijstvu kot rezultat podaja oceno geotermalnega potenciala za namene hlajenja za celotno Slovenijo. Združuje karte Slovenije o možnosti uporabe sistemov geotermalnih toplotnih črpalk, toplotni prevodnosti vrhnjih geoloških plasti, volumski toplotni kapaciteti kamnin in zemljin, porazdelitvi temperatur na površini trdnih tal, gostoti toplotnega toka, temperaturi tal v globini 100 m, hidrogeološko karto in karto gladin podzemne vode ter karto povprečne temperature podzemne vode v plitvih vodonosnikih.

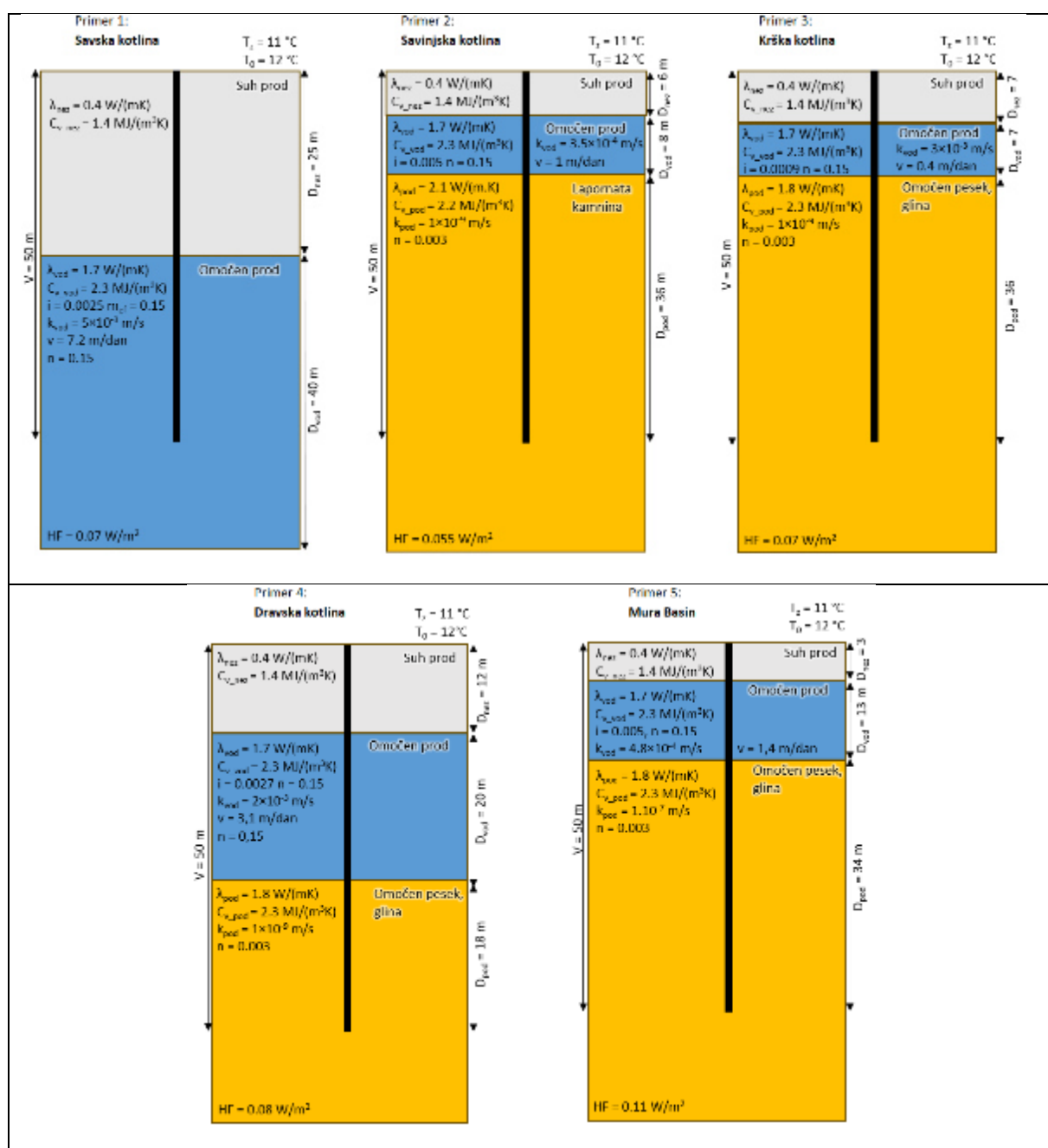
V prvem koraku so bila v GIS izbrana »kmetijska območja« dejanske kmetijske rabe (njiva, hmeljišče,

rastlinjak, vinograd in intenzivni sadovnjak. Tu smo analizirali toplotno prevodnost in temperaturo tal, ki najbolj odločilno vplivata na geotermalni potencial. Ugodnejše so višje toplotne prevodnosti in nižje temperature tal, saj je v njih možno oddati več presežne toplote iz hladilnic. V tretjem koraku smo analizirali najbolj pogoste (33% primerov) »geotermične razmere«, kar je ugotovljeno kot temperatura tal 11°C in toplotna prevodnost $1,6 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$, kar je srednje ugodno. S programom Earth Energy Designer (EED) smo izračunali razpon geotermalnega potenciala za hlajenje z »enostavno izvedbo geosonde«, to je dveh 50 m globokih geosond in najvišjo temperaturo delovne tekočine $\leq 24^\circ\text{C}$. Dobili smo mejne vrednosti za najmanj in najbolj ugodne naravne danosti in na podlagi teh vrednosti opredelili tri razrede. Najmanj ugoden potencial (s številko 1) je nižji kot 5 MWh/leto. Razred 2 predstavlja srednji razred s potencialom med 5 in 10 MWh/leto. Kot najbolj ugodna območja so določena z razredom 3, kjer je potencial večji od 10 MWh/leto.

Za oceno vpliva podnebja, ki vpliva na obnavljanje toplote v tleh, smo za sedem 7 reprezentativnih območij obdelali podatke značilnega meteorološkega leta (Bilje pri Novi Gorici, Dobliče pri Črnomlju, Koper, Letališče ER Maribor, Letališče JP Ljubljana (Kranj), Ljubljana in Murska Sobota). Izračunali smo značilne mesečne vrednosti deležev temperaturnih presežkov in primanjkljajev po odstotkih. Za ogrevanje hiše smo upoštevali temperaturni primanjkljaj za 20°C , za hlajenje hiše temperaturni presežek za 22°C ter za hladilnice presežek $5,5^\circ\text{C}$. V primeru hladilnic smo izračunali mesečne vrednosti za hladilnice, ki delujejo celo leto, in za hladilnice, ki poleti ne obratujejo. Potencial smo računali s programom EED, ki smo ga uporabili tudi za presojo vpliva najvišje dovoljene temperature delovne tekočine v geosondi, postavitve geosond in uravnotežene rabe. Preizkusili smo razmik med geosondami 5, 7, 10 in 25 m, globino 25, 50, 75, 100 in 150 m, ter število geosond, 1, 2, 3 in 9. Vpliv uravnotežene rabe smo presojali za različna razmerja oddane toplote v tla (hlajenje) in nato njenega pridobivanja za ogrevanje objektov v kurilni sezoni.

Ker je večina kmetijskih površin na aluvialnih ravninah, kjer so izdatni, razmeroma plitvi vodonosniki, lahko na potencial za hlajenje precej vpliva tok podzemne vode, saj omogoča hitrejšo obnavljanje toplote v podtalju in poveča geotermalni potencial. Za oceno tega vpliva smo pripravili pet konceptualnih modelov za značilne geotermične in hidrogeološke razmere v aluvialnih ravninah porečja Save, Savinje, Krškega, Drave in Mure.

Modeliranje je bilo izvedeno z uporabo numerične kode FEM (metoda končnih elementov) programa FEFLOW 8.1. Izvedena je bila stacionarna simulacija toka podzemne vode in prenosa toplote. Vodonosnik je modeliran kot odprtega tipa. Za preostale plasti je bila uporabljena Darcyjeva enačba. Stacionarna hidravlična višina in porazdelitev temperature sta bila podlaga za geotermično modeliranje. Vsi modeli imajo dimenzije 500 m dolžine, 200 m širine in 65 m globine. Vsak je imel 13 plasti in 14 računskih slojev z navpično porazdelitvijo na 5 m, za izboljšanje ločljivosti izračunov izmenjave toplote okoli geosonde. Za izračun vpliva toka podzemne vode je bil dodan hidravlični gradient (Slika 4).



Slika 4: Konceptualni modeli petih slovenskih aluvialnih vodonosnikov z glavnimi vhodnimi geotermičnimi in hidrogeološkimi parametri za geotermično modeliranje v FEFLOW.

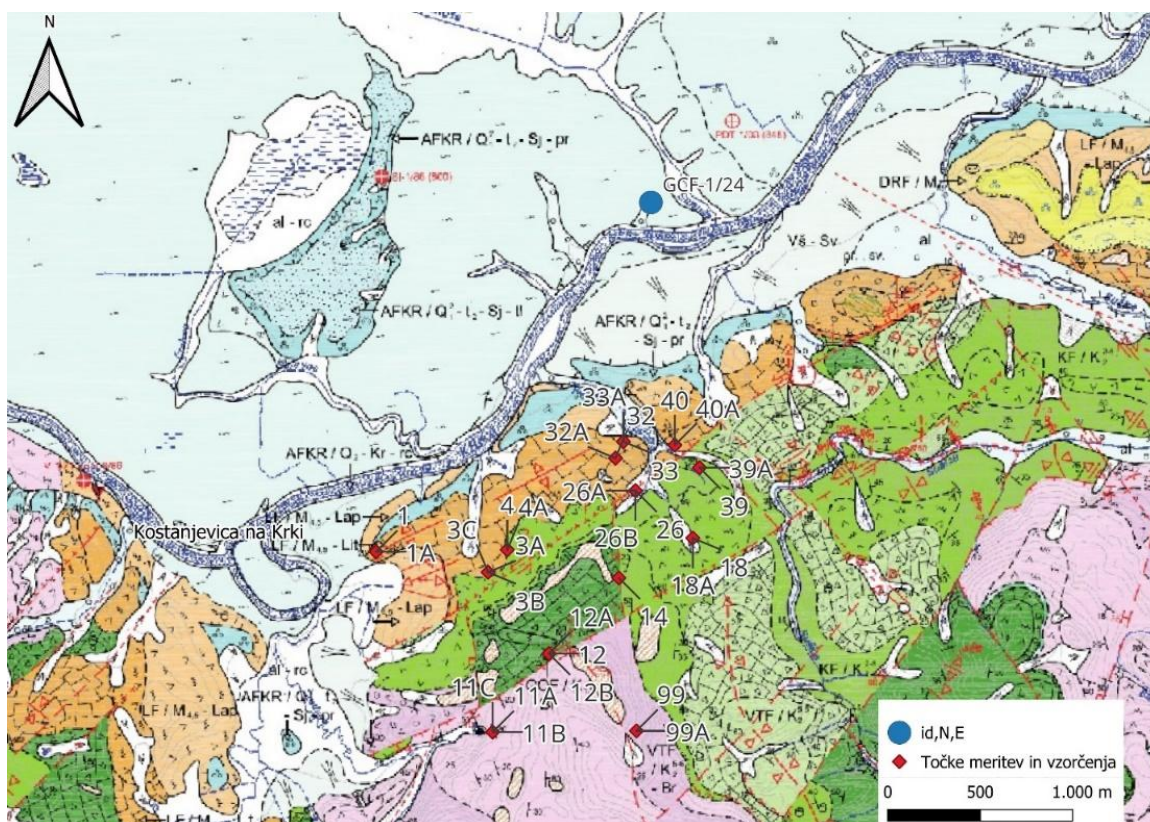
6.4. Metodologija za opredelitev robnih pogojev za model kvantifikacije in identifikacijo ključnih parametrov za načrtovanje potrebnih raziskav

Za model kvantifikacije potenciala za skladiščenje energije in pridobivanje hladu smo podali številne robne pogoje, katere kot rezultat pripravljene metodologije predstavljamo v poglavju z rezultati. Za pilotno območje smo izračunali razliko potrebnih globin geosonde, v kolikor se jo uporablja le za hlajenje, le za ogrevanje, ali kombinira oba namena rabe.

6.5. Izgradnja in testiranje nove raziskovalne geosonde GCF-1/24

Arhivske geotermične raziskave v okolici Kostanjevice na Krki, sploh v bližini karbonatnega geotermalnega vodonosnika (Verbovšek & Ravnik, 1986) so pogosto pokazale negativni temperaturni gradient (V-1/71, V-5/72, V-6/72) ali pa konvekcijo (V-3/72, V-6/72). Najvišji temperaturni gradient v miocenskih sedimentih v tem delu Krške kotline je bil določen blizu geotermalnega vodonosnika v V-7/85 na 96 mK/m, v V-8/86 (50 do 100 m) pa na približno 56 mK/m. Ostale vrtine imajo zelo nizek gradient: TG-1/12 med 30 in 100 m 18 mK/m, Pdt-1/03 med 38 in 500 m le 14,2 mK/m in Kost-1/14 med 30 in 146 m 1-10 mK/m (konvekcija). Vrtina V-8/86 v Malencah (Rajver in sod., 2006) je pretežno v laporju, z več gline z globino. Vpliv pronicanja padavin je izmerjen približno 1 m globoko, vpliv letnega cikla sončnega obsevanja (sezonskosti) na okoli 20 m, vpliv globalnega segrevanja plitvega podtalja pa na +0,12 °C v manj kot osmih letih in +0,28 °C v skoraj 24 letih (Strgar in sod., 2017). Meritve toplotne prevodnosti so poročane za laporje v V-7/85, V-8/86 in SI-1/86 (Rajver & Adrinek, 2023).

Zaradi razmeroma skopih geotermičnih podatkih o širši okolici pilotne lokacije je GeoZS v oktobru 2024 izvedel geotermične meritve na 13 izdankih na severnem obrobju Gorjancev (Slika 5) in odvzel 22 vzorcev karbonatnih kamnin (starost: miocen do spodnja kreda, predvsem apnenci) za laboratorijske meritve. Za terenske meritve smo uporabili KD2 Pro (Decagon Devices, Inc., 2016) in sonde RK-1 in SH-1, za laboratorijske meritve Thermal Conductivity Scanner (TCS) (Popov in sod., 2017).



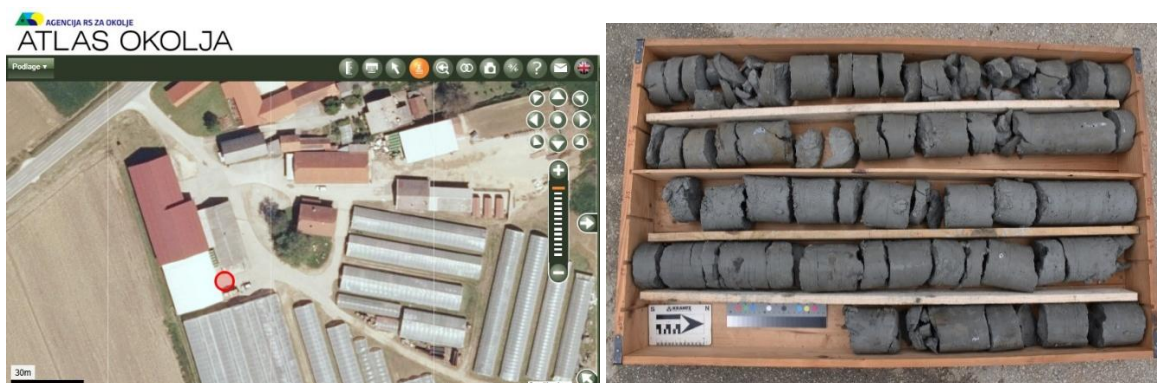
Slika 5: Lokacije vzorčenja kamnin in izvedbe terenskih meritev s podlago Osnovne geološke karte (<https://ogk100.geo-zs.si/>)

Izbrana pilotna lokacija v Brodu v Podbočju leži v zahodnem delu Krške kotline, nekoliko vzhodno od geotermično perspektivne Kostanjevice na Krki. Nova, sto metrov globoka geosonda GCF-1/24 je bila izdelana novembra 2024 na lokaciji Brod v Podbočju 4, 8312 Podbočje (Slika 6). Izbor lokacije in priprava soglasij je potekala poleti 2024. Dokumentacija za dovoljenje za raziskave je bila oddana 10. 9., potrjena

30. 9. 2024. Dokumentacija za vodno soglasje je bila oddana 7. 10., potrjena 11. 10. 2024. Izdelava geosonde in zaključna dela so potekala med 6. in 20. 11. 2024. Načeloma je bila izdelana po Smernicah za vrtanje v plitvi geotermiji (do 300 m) – posodobitev V5 (jan 2021; <https://www.energetika-portal.si/podrocja/rudarstvo/plitva-geotermalna-energija/#c1361>), vendar smo ugotovili, da se nekaj navodil ne upošteva.

Geodetsko določene koordinate so GCF-1/24: D48/GK X in Y: 80106,37 in 535053,82; D96/TM E in N: 534683,167 in 80590,709; Ztal [m n. m. ref. Koper]: 151.82 in Zjaška [m n. m. ref. Koper]: 151.84. Končna globina je značilna za širše območje Krške kotline in enaka obstoječim, 25 m oddaljenim objektom, ki se uporabljajo za ogrevanje in hlajenje stanovanjske hiše.

Vrtanje je potekalo 6.-8. 11. 2024 skladno z dovoljenjem za raziskavo podzemnih voda (DRSV z dne 30. 9. 2024 z arhivsko številko 2024/1557) in vodnim soglasjem št. 35507-1670/2024-2 z dne 11. 10. 2024. Potekalo je s stisnjenim zrakom z uporabo globinskega kladiva in nadprofilnega dleta premera 183 mm ter sočasne začasne cevitve vrtine (angl. over burden system) z obložno kolono premera 168 mm. Jedrovanje sedimenta na globinah 24-26 m in 50-52,5 m je potekalo z jedrnikom z widia krono premera 114 mm, brez dodajanja vode ali izplake (Slika 6).



Slika 6: Lokacija geosonde GCF-1/24 (vir: Atlas okolja) in pridobljeni jedri lapornatega melja iz globin 24 – 26 m in 50 – 52,5 m



Slika 7: Odvzem vzorcev iz jeder za laboratorijske hidrogeološke preiskave na INA Zagreb

Sledile so karotažne meritve 8.11., takoj za njimi vgradnja geosonde. V vrtino so trajno vgrajene:

- i) opazovalna cev z zaključenim dnom, da voda ne more odtekat: PE100, totrapipes, 40x3,7 mm RN 16, ϕ_{notranji} 32,6 mm, k_T 0,38 WK⁻¹m⁻¹, teža 0,44 kg m⁻¹

- ii) cev za cementacijo: PE100, totrapipes, ϕ_{notranji} 25 cm, k_T 0,38 WK⁻¹m⁻¹, teža 0,18 kg/m
- iii) enojna U-zanka geosonde (Slika 8): PE100-RCPE100-RC, MuoviTech, ϕ_{zunanji} 45 mm, zareze povijajo, da povečajo turbulentnost toka (hrapavost 0,03 mm), k_T 0,4 WK⁻¹m⁻¹, c 1,9 JK⁻¹g⁻¹. Uteži niso vgrajene.
- iv) optična vlakna: DTS 4-žilni optični kabel, 50/125 μ m, OM3, LSOH B1011A ACOLAN CLT STD ZH loose-fit in 'patch' kabel z dvema konektorjema E2000. Vgrajenih je 200 m kabla z U-zavojem na dnu vrtine in povezavo vlaken na površini (signal prepotuje 4x100 m).



Slika 8: Povezovanje vseh 4 cevi na dnu geosonde (levo; rumeno je povezava obeh U-cevi) in po celotni dolžini (desno)

Prva cementacija je potekala 9. 11., docementacija vrhnjega dela 13.11., vendar je vršni del cca 2 m pod koto tal ostal necementiran. Cementna masa je bila Portlandski mešani cement EN 197-1 CEM II/B-M(LL-V) 42,5 N, UNIVERSAL, Salonit Anhovo.

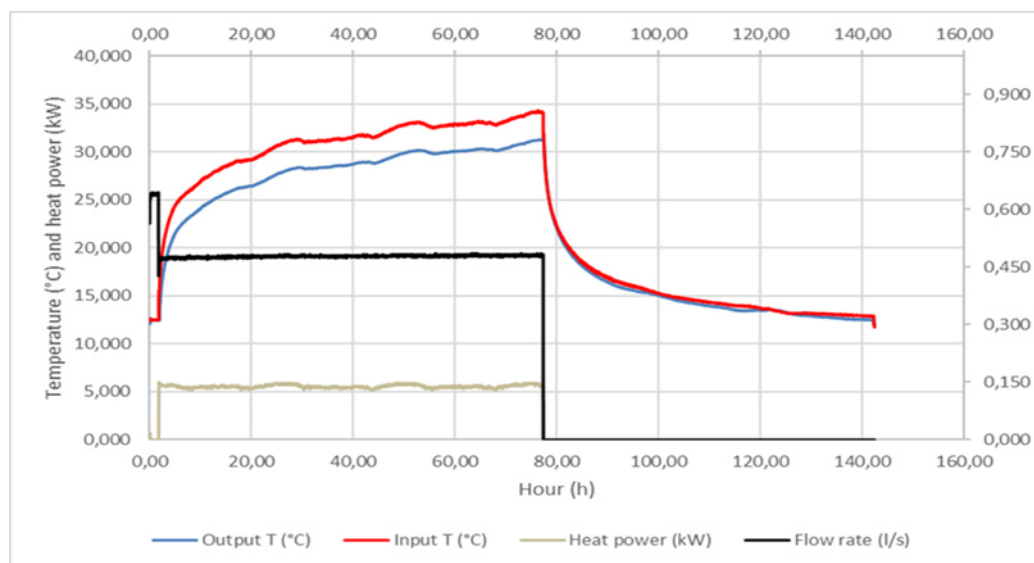
Karotažne meritve je opravil GeoZS 8. 11. 2024 takoj po vrtanju. Opravljene so bile s karotažno opremo Robertson Geologging: RG 1000 m WINCH, Sonda za merjenje naravnega gama sevanja, temperature in električne prevodnosti (TCDS), WinLogger Robertson Geologging. Ničta točka je bila ustje vrtine, 47 cm nad koto terena.

Analizo hidrogeoloških parametrov so opravili v INA, Industrija nafte d.d., Zagreb (Slika 7). Poroznost je bila določena volumetrično na plinskem, helijevem porozimetru z dušikom. S tem se dobi volumen zrn in por pri naraščajočem nadtlaku (EOP). Intrinzična prepustnost je bila določena na plinskem permeamtru z merjenem padca tlaka med tokom zraka skozi vzorec. Tudi ta omogoča spremembo nadtlaka (EOP) in vrednost je brez korekcije za Klinkenbergov plinski efekt. Gostota zrn je bila določena z meritvami mase in volumna vzorca s helijevim piknometrom. Granulometrija je bila določena z lasersko difrakcijo na instrumentu Fritsch Analysette 22 NeXT Nano z Udden-Wentworth (1922) klasifikacijo. Test nabrekanja glin je bil načrtovan v odvisnosti od višanja temperature. Ker so bili nesprijeti delci zelo mobilni, se je porni prostor prehitro »zabil« in pretok vode skozi vzorec ni bil vzpostavljen, zato je bil test neuspešen.

Meritve temperature po globini opazovalne cevi so bile na začetku opravljene z nivo metrom Hydrotechnik typ 120 z dolžino kabla 200 m, ki omogoča meritve globine, temperature (na eno decimalno) in elektroprevodnosti vode. Po 11. 11. 2024 je bil uporabljen AquaLink temperaturni senzor dolžine 200 m, ki omogoča meritve globine in temperature (na 5 decimalno). Navzdol so opravljene na vsak meter in navzgor na vsakih 5 m, s postanki na 15 sec. Temperaturne meritve so bile izvedene (8.),

9., 10., 11., 13., 14. in 15. 11. ter 19. 12. 2024; 18., 21. in 24.2., 18. 4., 3. 6. in 20. 6. 2025. V opazovalno cev je bila novembra 2024 nameščena sonda StarOddi DST Centi-T, ki meri temperaturo v urnem intervalu, od pomladi 2025 pa še tri takšne sonde.

Terenske geotermične meritve in vlažnost jedra so bile opravljene na jedru GCF-1/24 takoj po jedrovanju z merilnikom KD2 Pro z iglastimi sondami SH-1 in TR-1. Del jedra je bil izmerjen tudi z iglično sondo Tempos na poljskem geološkem zavodu PGI. Načrt je bil, da na celotnem jedru laboratorijsko izmerimo toplotno prevodnost in difuzivnost ter izračunamo volumetrično toplotno kapaciteto. Ker jedro ni bilo kompaktno, smo meritve s TCS na GeoZS izvedli le na 14 izbranih kosih obeh jeder v naravni vlažnosti. Poleg standardnega testa toplotnega odziva (TRT) sta bila prvič v Sloveniji opravljena TRT z uporabo DTS optičnih vlaken (DTRT) in izboljšani TRT s hibridnimi kabli (eTRT). Standarden TRT je bil opravljen z opremo GeoZS (Adrinek & Janža, 2025) in FGG (za DTS). Ogrevanje je trajalo 77,3 h, z začetkom 18. 2. 2025 (Slika 9). Dodana toplota je bila 5,57 kW ($55,66 \text{ W m}^{-1}$), tok vode $0,48 \text{ l s}^{-1}$. Po prenehanju ogrevanja smo spremljali stanje še 65 h. Zapis meritev temperatur je bil na 10 min. Ker smo spremljali tudi optična vlakna, test označimo tudi za DTRT. Drugi test, eTRT, je opravil GeoZS z registratorjem Silixa XT-DTS M interrogator od FGG ter grelcem in hibridnimi kabli loose tube LWL-Outdoor Hybrid A-DSQ(ZN)B2Y 1×4G50/125 + CU 4×0.5 mm² od Geosphere iz Dunaja. Pričel se je 5. 6. 2025 s 77 h ogrevanja in 89 h meritev po prekinitvi dovajanja toplote. Dovajali smo $24,67 \text{ W m}^{-1}$. Resolucija podatkov z optičnih vlaken je 65 cm, natančnost meritve $0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$, izračun toplotne prevodnosti pa je bil narejen po prekinitvi ogrevanja v času 113-142 h z Infinite Line Source enačbo.



Slika 9: Prikaz spreminjanja parametrov na ustju vrtine med prvim, standardnim TRT testom feb. 2025

6.6. Od terenskih meritev na pilotnih lokacijah do smernic

Metodološki okvir projekta je bil zasnovan tako, da omogoča **celovit pristop k vrednotenju potenciala uporabe plitve geotermalne energije v kmetijstvu**, s poudarkom na hladilnicah in objektih s kombinirano rabo toplote in hladu. Delo je potekalo v pet med seboj povezanih sklopih: **terenska diagnostika, energetska analiza, modeliranje in simulacije, ekonomska analiza ter tehnično-strateške smernice**.

Terenska diagnostika in zbiranje podatkov

Osnovni podatki so bili zbrani z **terenskimi ogledi in intervjuji na reprezentativnih kmetijah**, kjer so bile analizirane energetske bilance objektov (hladilnice za zelenjavo in sadje, rastlinjaki, pomožni prostori in stanovanjski objekti). Vzpostavljen je bil **sistem za zajem podatkov** o:

- letni in sezonski rabi električne energije za hlajenje in ogrevanje,
- dejanskih temperaturnih režimih (nastavitve, notranje temperature, režimi delovanja hladilnic),
- toplotnih lastnostih stavbnega ovoja (U-vrednosti, izolacija, volumni),
- obratovalnih urnikov (režim delovanja procesov, polnjenje in praznjenje hladilnic).

Dodatno so bili uporabljeni podatki Agencije RS za okolje (ARSO) o **zunanjih temperaturah, padavinah in relativni vlagi** za posamezne lokacije. Ti podatki so bili časovno usklajeni z urnimi profili obratovanja objektov.

Energetska analiza in bilanciranje toplotnih tokov

Za analizo sezonskih potreb po toploti in hlajenju je bila uporabljena kombinacija:

- **kvazi-stacionarnih mesečnih izračunov** po metodi stopinjskih dni (HDD/CDD) za oceno potreb po ogrevanju in hlajenju,
- **urnih energetskih bilanc** za analizo dinamike presežkov in primanjkljajev toplote,
- **računa toplotnih tokov skozi ovoj**, notranjih dobitkov in latentnih obremenitev.

S tem je bila izdelana preliminarne **letna in sezonska energetska bilanca**, ki je omogočila grobo oceno **potrebne moči toplotne črpalke in zmogljivosti geotermalnega vira** (vodnjak, geosonda, kolektor).

Modeliranje in simulacije

Za natančnejšo oceno potenciala uporabe plitve geotermije so bili izdelani **dinamični modeli hladilnic in hibridnih sistemov** s kombinacijo naslednjih orodij:

- **EnergyPlus** (open-source): modeliranje hladilnic, prenos toplote skozi ovoj, notranjih dobitkov in hlajenja v realnih klimatskih pogojih.
- **TRNSYS**: simulacija hibridnih sistemov z geotermalnimi viri, vključno z modulom DST (Duct Storage Model) za simulacijo sezonskega shranjevanja toplote v tleh.
- **EED (Earth Energy Designer)**: preliminarno dimenzioniranje geosond glede na sezonske potrebe po hlajenju in ogrevanju ter preverjanje toplotnih tokov v tleh.
- **IDA ICE**: preverjanje vpliva različnih konfiguracij HVAC sistemov na letni SCOP in pokrivanje konic v obratovanju.

Vhodni podatki za simulacije so bili pripravljeni v skladu z referenčnimi klimatskimi profili ARSO ter prilagojeni urnikom delovanja kmetijskih objektov. Modeli so upoštevali **dejanske obratovalne režime, hladilne obremenitve, tipične temperature ponora in vira toplote** ter **učinkovitost različnih konfiguracij toplotnih črpalk**.

Ekonomska analiza in analiza občutljivosti

Za oceno investicijske upravičenosti in stroškovno-energetske učinkovitosti so bili uporabljeni standardni finančni kazalniki:

- **NPV (Net Present Value)**,
- **IRR (Internal Rate of Return)**,
- **Payback period**.

Analiza je vključevala različne scenarije cen električne energije, velikosti sistemov, letnih obremenitev

in rabe presežne toplote. Izvedena je bila **analiza občutljivosti** za ključne parametre (cena energije, moč geosonde, razmerje med hlajenjem in ogrevanjem), kar je omogočilo določitev mejnih pogojev za ekonomsko upravičenost projektov.

Tehnično-strateške smernice in razvoj orodij

Na podlagi simulacijskih rezultatov so bile oblikovane **tehnične smernice** za hitro oceno primernosti uporabe geotermalnih sistemov, vključno z naborom meril za izbor tehnologije in dimenzioniranje komponent. Dodatno je bil zasnovan okvir za **nadaljnji razvoj digitalnih orodij za sledenje presežkov in primanjkljajev toplote** v realnem času (SCADA ali IoT-platforme), ki bi omogočal sprotno bilanciranje sistemov, spremljanje učinkovitosti in podporo odločanju pri obratovanju hibridnih sistemov

6.7. Izvedba javnih delavnic in predstavitev projekta

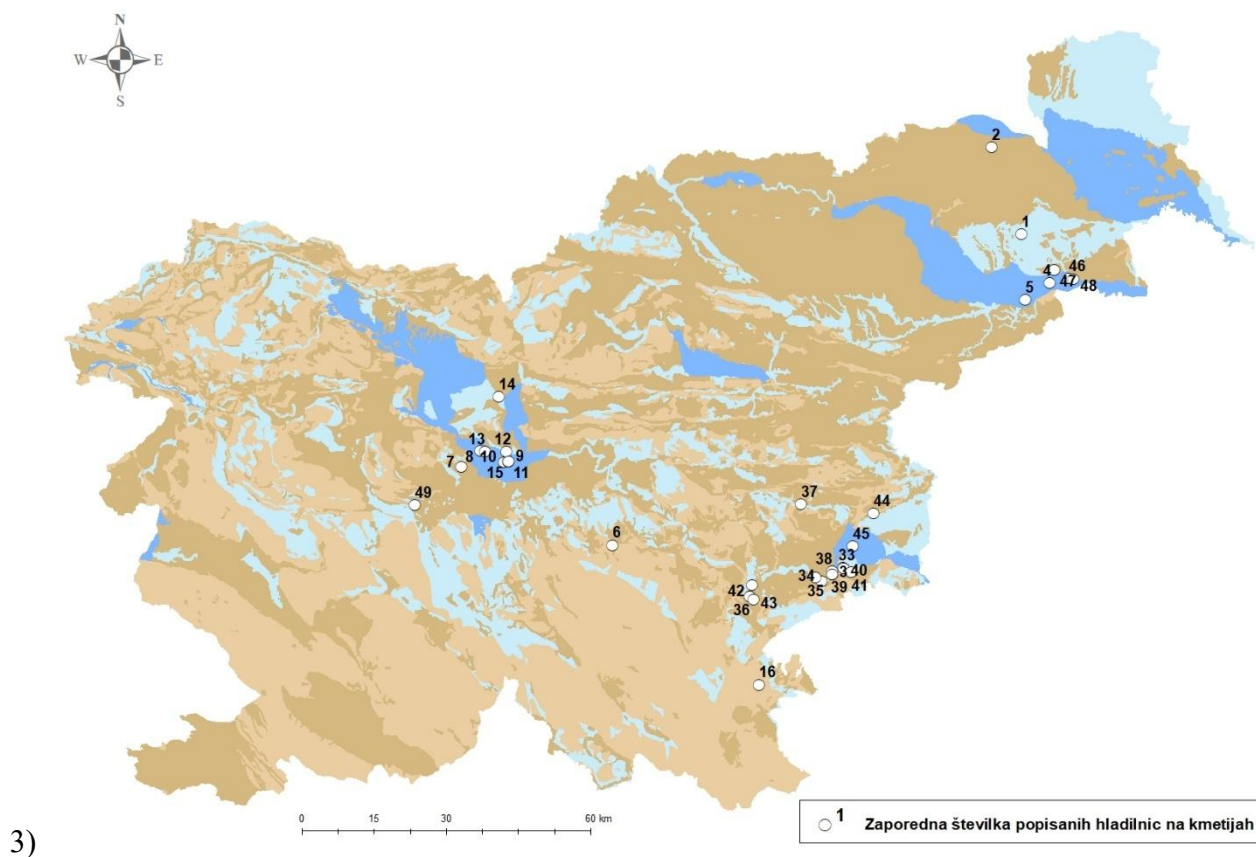
Sodelovanje z deležniki in izvedba delavnic je potekala bolj ciljno kot načrtovano. Namesto spletnih vprašalnikov za analize potreb kmetij smo zaradi težavnosti dostopa do njih in izkazano zanimanje med 20.11.2023 in 7. 2. 2024 raje izvedli deset terenskih ogledov hladilnic in pogovorov z lastniki (ugotovitve so vključene v poročilo M3_1). Sodelovanje s kmetijskimi svetovalci je potekalo zelo dobro. Delavnice za predstavitev rezultatov in smernic smo imeli tri : kot strokovno predavanje na 63. sejmu AGRA 25. 8. 2025, na delavnici o nadgradnji Smernic za vrtanje v plitvi geotermiji 10. 9. 2025 in na tedenskem srečanju svetovalcev za sadjarstvo 1. 10. 2025 v okviru »Testiranja zrelosti jabolok in ocena obiralnega okna po regijah v Sloveniji« (gradivo M8_1). Ob tem smo pripravili še številne strokovne, znanstvene in splošne predstavitve projekta, ki jih povzemamo v rezultatih tega poročila.

7. Rezultati in diskusija

7.1. Inventarizacija obstoječih hladilnic na kmetijah

Popisali smo lokacije in vrsto skladiščenega pridelka (kategorije: zelenjava, sadje, ni znano) na 49 kmetijah po Sloveniji (Priloga 1). Rezultati pregleda geotermičnih lastnosti na lokacijah hladilnic, kjer skladiščijo zelenjavo oziroma je pridelek neznan, smo podali v Priloga 2. Večina kmetij in s tem hladilnic leži na območju aluvialnih vodonosnikov, ki so potencialno primerna za zajem podzemne vode in s tem rabo sistemov voda-voda. Podrobnosti s terenskih ogledov in izvedenih intervjujev v letu 2024 so podane v poročilu Metodologija analize naravnih danosti za karakterizacijo izbranega pilotnega območja (M3_1). Za pilotni kmetiji smo izbrali dve lokaciji, ker se razlikujeta glede na režim delovanja in velikost hladilnic:

- 1) Kmetija Munda (št. 1 v Priloga 1), Juršinci pri Ptuj: zaradi možnosti kombinacije geosonde in vodnjaka ter ogrevanja rastlinjaka za sadike ali rabe vode za namakanje, srednja hladilnica ter
- 2) Kmetija Turk (št. 3 v Priloga 1), Brod v Podbočju – zaradi razvojnih ciljev za pridobitev čim večjega deleža lastne energije na lokaciji, več in večja hladilnica.



Slika 10: Lokacije 49 hladilnic na kmetijah, od tega se jih vsaj 16 uporablja za zelenjadarstvo. Barvna podlaga prikazuje možnost različnih sistemov rabe plitve geotermije: svetlo rjavo – najpogosteje zemlja-voda navpični; temno rjavo - najpogosteje zemlja-voda navpični/vodoravni; svetlo modra – pogosto zemlja-voda vodoravni, košare, piloti, voda-voda; temno modra – najpogosteje voda-voda

7.2. Značilnosti skladiščenja zelja in solate

Za lažje razumevanje režimov delovanja hladilnic smo povzeli časovni (urni, dnevni, mesečni) režim pobiranja in skladiščenja zelja in solate ter fizikalne zahteve, vezane na ta dva procesa (Preglednica 1).

Preglednica 1: Značilnosti pobiranja in skladiščenja zelja in solate

	POBIRANJE	SKLADIŠČENJE
ZELJE	celo poletje do sredine jeseni; priporoča se obiranje zjutraj; Od druge polovice maja, junij, julij (zgodnje zelje) do konca oktobra, začetek novembra (jesensko zelje) Obiranje zjutraj dokler temperature ne doseže 20°C (poletje), npr. od 5h-9h zjutraj (odvisno od temperature) v jesenskem času (nižje dnevne temperature) pričnemo s spravilom šele, ko so glave suhe à obiranje v dopoldanskih in zgodnje popoldanskih urah, npr. od 10h do 14h (odvisno od temperature) v primeru visokih temperatur (nad 20 °C)	v temperaturnem območju 1-4°C*; relativna vlaga: nad 90 %; čas: v odvisnosti od sorte/hibrida in agrotehnike: 2 – 5 mesecev

	pridelek v času 2 uri po pobiranju pospravimo v hladilnico,	
SOLATA	preko celega leta zaradi gojenja v rastlinjakih; gojenje na prostem: od začetka aprila do pozne jeseni (november) (odvisno od sorte) gojenje na prostem: pobiranje zgodaj zjutraj (nižje temperature); priporočeno je pobiranje solate v času, ko je ohlajena: od 5h do 9h (odvisno od temp.); v hladnejših mesecih npr.: od 5h do 14h po max 2 urah od pobiranja je solato potrebno hitro ohladiti (npr. z vodo) oz. jo prenesti v hladilnico (T ca. 4°C)	v temperaturnem območju 1-4°C*; relativna vlaga: nad 90 %; solato na kmetiji kratkotrajno skladiščimo pri temperaturi od 0 °C do 6 °C od 2 do 3 dni, pri optimalni zračni vlagi nad 95 %; v primeru hladilnice (stalna temperatura od 0 °C do 2 °C) bi lahko nekatere kultivarje solat skladiščili tudi okoli 14 do 20 dni pri relativni vlagi od 95 do 98 %

* Nekatere sorte so občutljive na temperature okrog 0°C, zato jih skladiščimo pri nekoliko povišani temperaturi

Zelenjava je tudi po obiranju metabolno aktivna (dihanje), porablja kisik, proizvaja se voda, ogljikov dioksid in toplota. Količino oddane energije pri izbranih temperaturah 0 °C, 5 °C (podobna spremljanim hladilnicah) in 16 °C (zrak) podajamo v Skladno s pričakovanji se količina oddane energije zelenjave z višjo temperaturo povečuje. Zelje pri 5 °C odda 2,6 x več energije kot pri 0 °C, pri razliki med 5 in 16 °C pa pri slednji odda 118% več energije. Pri solati je razlika med 0 in 5 °C manjša, poveča se le za 30%, vendar je razlika med 5 in 16 °C 80% več pri slednji. Za uspešno, čim daljše skladiščenje zelenjave je potrebno zmanjšati metabolno aktivnost kar dosežemo z znižanjem temperature (hlajenjem).

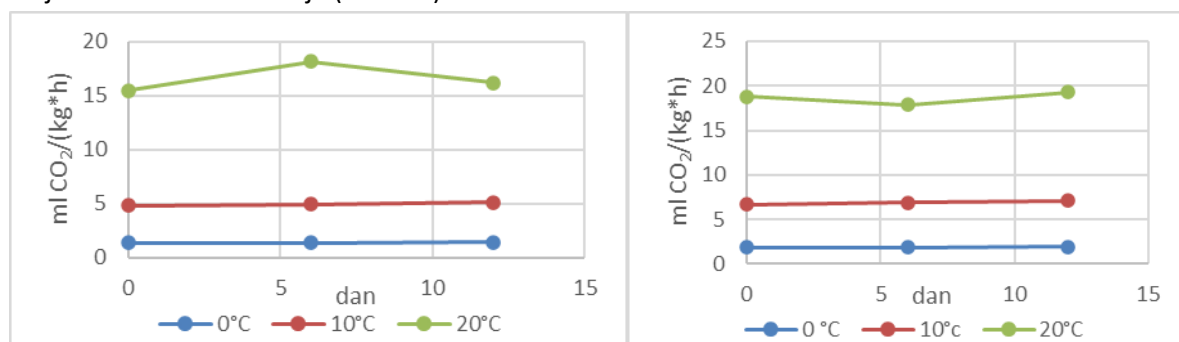
Preglednica 2, oddano količino CO₂ pri različnih temperaturah skladiščenja pa na Slika 11.

Skladno s pričakovanji se količina oddane energije zelenjave z višjo temperaturo povečuje. Zelje pri 5 °C odda 2,6 x več energije kot pri 0 °C, pri razliki med 5 in 16 °C pa pri slednji odda 118% več energije. Pri solati je razlika med 0 in 5 °C manjša, poveča se le za 30%, vendar je razlika med 5 in 16 °C 80% več pri slednji. Za uspešno, čim daljše skladiščenje zelenjave je potrebno zmanjšati metabolno aktivnost kar dosežemo z znižanjem temperature (hlajenjem).

Preglednica 2: Oddana energija zelenjave ob različnih temperaturah zraka

Zelenjava	Oddana energija	Temperatura v hladilnici		
		0 °C	5 °C	16 °C
Zelje	J kg ⁻¹ h ⁻¹	42	109	238
Solata	J kg ⁻¹ h ⁻¹	140	180	325

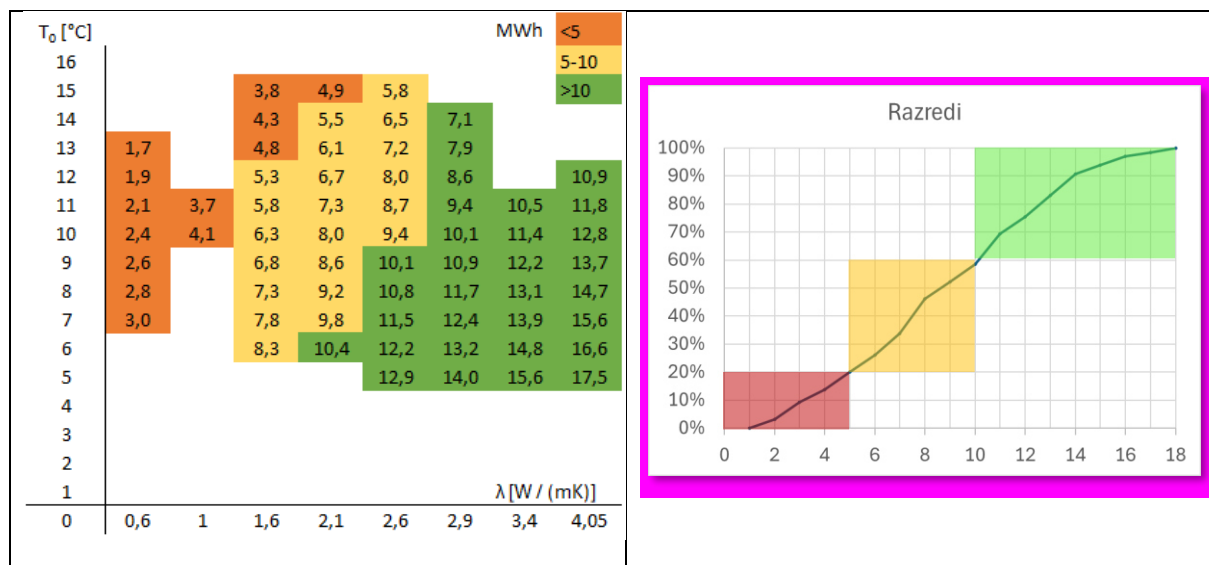
Oddana količina CO₂ zaradi dihanja zelenjave se po pričakovanjih povečuje z višjo temperaturo in z daljšim časom skladiščenja (Slika 11).



Slika 11: Oddana količina CO₂ zaradi dihanja pri različnih temperaturah skladiščenja: levo – zelje, desno – solata

7.3. Rezultati ocene geotermalnega potenciala geosond za namene hlajenja v kmetijstvu

Geotermalni potencial za hlajenje v kmetijstvu je glede na naravne danosti ob rabi dveh 50 m geosond v »najneugodnejših« naravnih danostih ocenjen na 3,8 MWh na leto, v »najugodnejših« pa na 17,4 MWh na leto. Ta potencial za hlajenje smo razdelili v tri razrede, z mejnimi vrednostmi 5 in 10 MWh na leto (Slika 12).

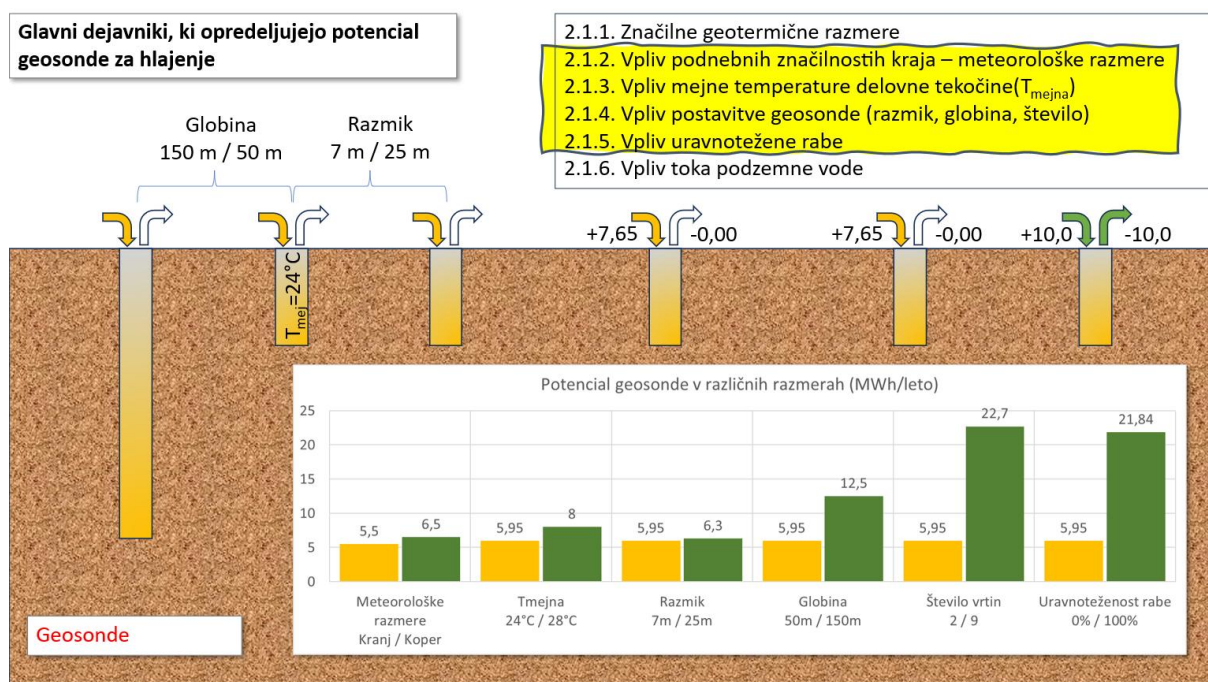


Slika 12: Razredi geotermalnega potenciala za hlajenje v kmetijstvu v Sloveniji in njihovi deleži glede na kmetijska zemljišča.

Podnebne značilnosti kraja lahko povzročijo razliko potenciala do 1 MWh, oziroma do 18 %. Najbližje srednji vrednosti (5,9 MWh) je območje Črnomlja (6,0 MWh, 8%), najbolj pa odstopata Koper (6,5 MWh, 18%) in Kranj (5,5 MWh; 0%).

Najvišja dovoljena temperatura delovne tekočine v geosondi ima velik vpliv na potencial. Pri mejni temperaturi, višji za 4° C, se potencial oddaje toplote v podtalje poviša za 34%. Ker se hkrati zniža učinkovitost naprave (EER), je pri odločanju potrebno preveriti ne le ekonomičnost, ampak tudi možne okoljske vplive, vključno z geotehničnimi razmerami za sosednje objekte in učinkovitost v primerjavi z aerotermalnimi toplotnimi črpalkami.

Z večanjem razmika med geosondami se pridobljena energija povečuje (5 m = 5,8 MWh/leto; 25 m = 6,3 MWh/leto), kar pomeni razliko 9%. Običajno je priporočena razlika 7 m. Energija se povečuje tudi z večjo globino geosonde, ob referenčni globini 50 m (6,0 MWh/leto) podaljšanje na 100 m poveča energijo za 65% (9,8 MWh/leto), na 150 m pa za 110 % (12,5 MWh/leto). Ob upoštevanju 50 metrskih geosond lahko ena zagotovi cca 3,2 MWh/leto, dve 6,0 MWh/leto, tri 8,5 MWh/leto, devet pa okoli 20 MWh/leto, pri čemer linijska postavitve zagotovi več kot polje geosond.



Slika 13: Pregled vpliva posameznih faktorjev potenciala geosond za hlajenje

Numerično modeliranje obnavljanja geotermalne energije v razmerah značilnega toka podzemne vode v petih značilnih vodonosnikih v rečnih ravninah v Sloveniji je kvantificiralo, koliko višji je lahko potencial v odvisnosti od debeline omočenega dela vodonosnika in hitrosti vode v njem (Slika 14). Porazdelitev je odvisna od kombinacije geotermičnih in hidrogeoloških parametrov, zato brez in z upoštevanjem toka podzemne vode različna (Preglednica 3). Če toka vode ne bi bilo, bi bila najmanj perspektivna regija Murska kotlina, najbolj pa Savska. Ker je tok vode prisoten, pa se ne le energija drastično poveča – za faktor od 2,9 do 9,3 – ampak tudi spremeni (Slika 14), da je najmanj potencialno območje Krške (19,2 MWh na leto) in Murske kotline (20,2 MWh na leto), najbolj pa Savska kotlina (56,5 MWh na leto).

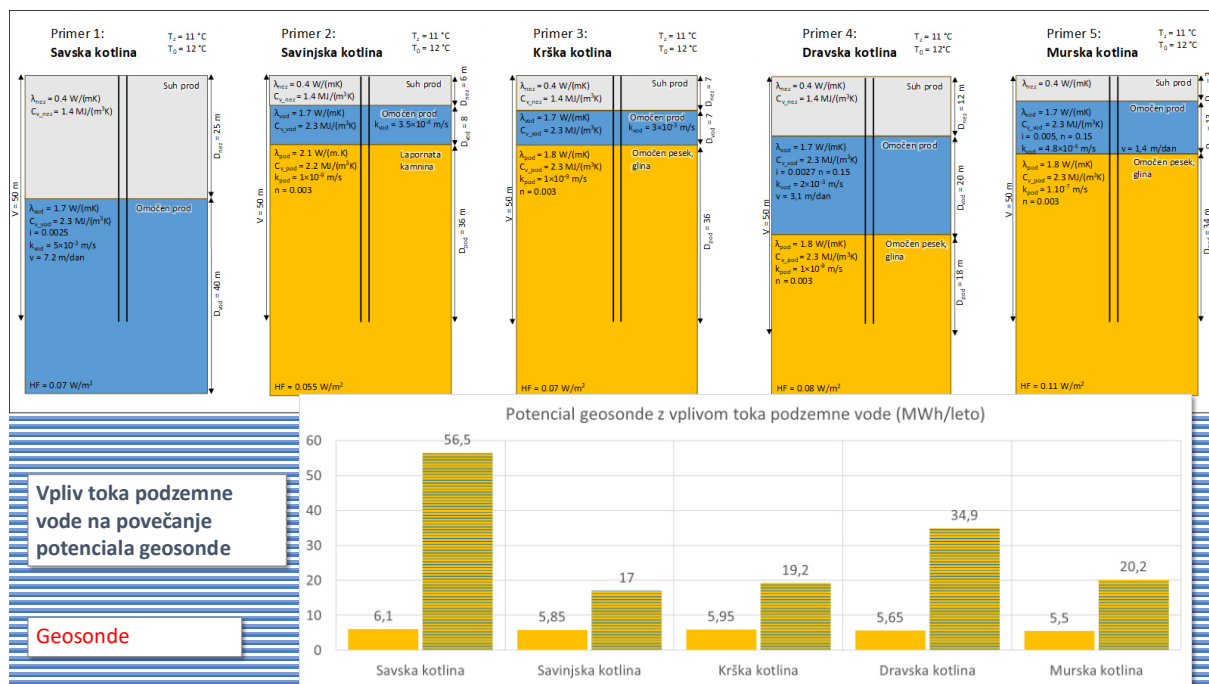
Preglednica 3: Ocena geotermalnega potenciala za hlajenje z geosondo na aluvialnih vodonosnikih (2 geosondi po 50 m globine, $T_{max} = 24\text{ °C}$).

Brez vpliva toka podzemne vode	Območje aluvialnega vodonosnika	Z vplivom toka podzemne vode	Faktor
6.100 kWh/leto	Savska kotlina	56.500 kWh/leto	9,3
5.850 kWh/leto	Savinjska kotlina	17.000 kWh/leto	2,9
5.950 kWh/leto	Krška kotlina	19.200 kWh/leto	3,2
5.650 kWh/leto	Dravska kotlina	34.900 kWh/leto	6,2
5.500 kWh/leto	Murska kotlina	20.200 kWh/leto	3,7

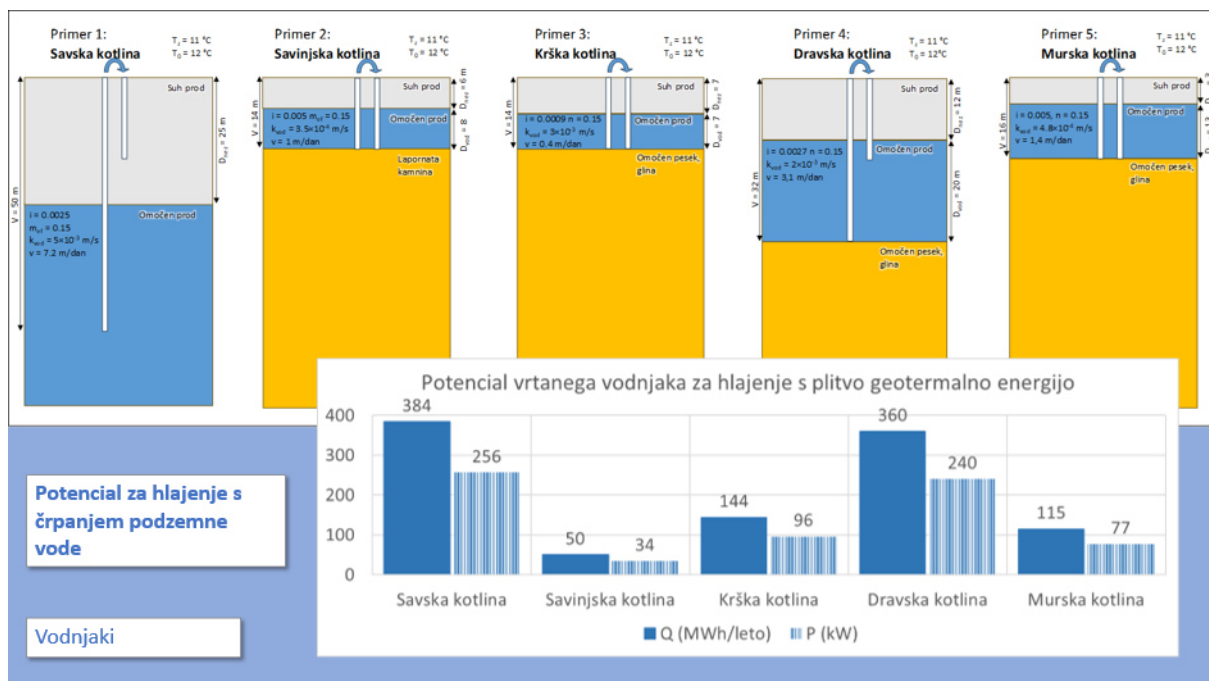
Na podlagi razvite metodologije za oceno naravnega potenciala smo najprej ocenili potencial tipičnega zaprtega sistema zemlja-voda (para geosond; Slika 14), ki je ob ugodnih naravnih danostih reda največji v Savski in Dravski Kotlini - 35-56 MWh/leto. Simulacije odprtih sistemov voda-voda za vodnjak v eni izmed petih tipičnih rečnih ravnin v Sloveniji kažejo, da so ti sposobni zagotoviti bistveno večje kapacitete kot geosonde. Ker so najbolj izdatni vodnjaki pričakovani v Savski in Dravski kotlini, je simulirano, da iz njih pridobimo tudi največ energije, 384 oz. 360 MWh/leto (dosežek 6_1).

Odprti sistemi voda-voda lahko zagotovijo tudi 5 x več energije kot zaprti sistemi zemlja voda (geosonde), zato je za pokrivanje potreb večjih hladilnic potrebno spodbujati uporabo odprtih sistemov.

Pripravljena karta geotermalnega potenciala za hlajenje v kmetijstvu Slovenije prostorsko opredeljuje najbolj perspektivna območja za rabo geosond (Slika 16).

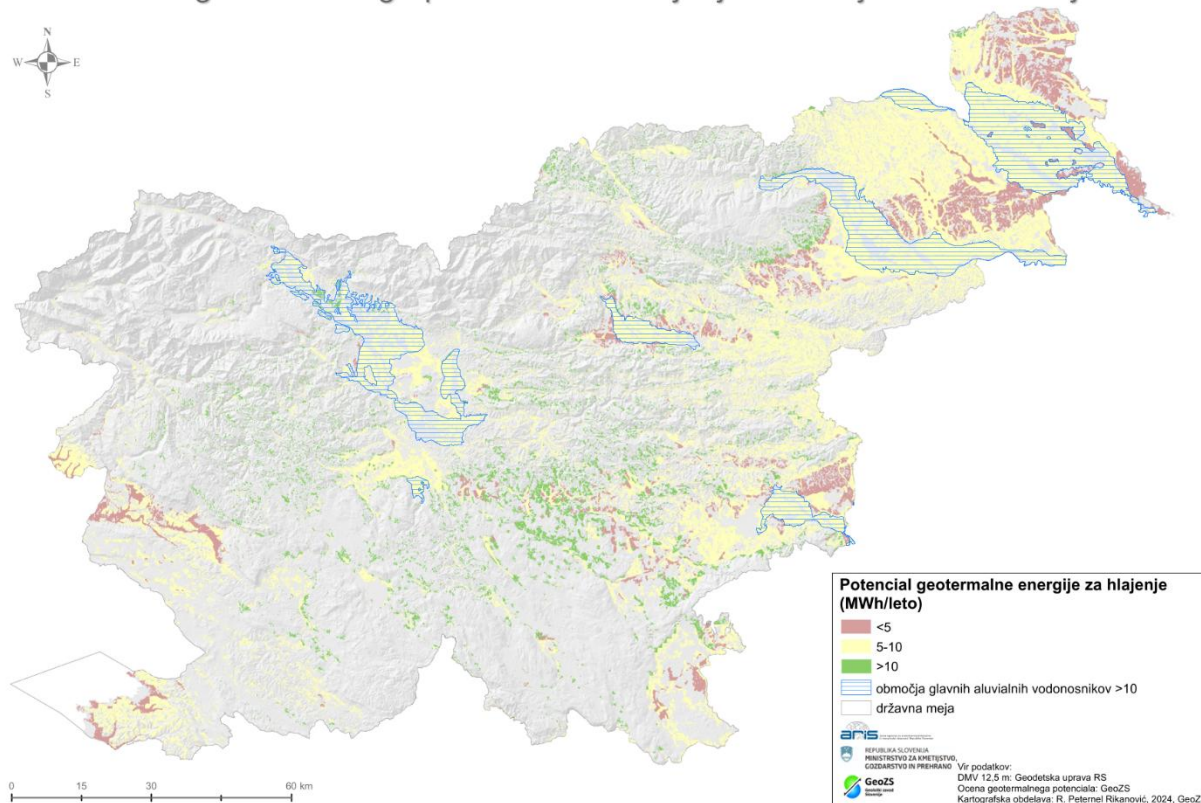


Slika 14: Pregled vpliva toka podzemne vode na potencial geosonde za hlajenje na območjih tipičnih slovenskih aluvialnih vodonosnikov.



Slika 15: Modelirani geotermalni potencial vodnjakov v tipičnih aluvialnih vodonosnikih v Sloveniji

Ocena geotermalnega potenciala za hlajenje v kmetijstvu v Sloveniji



Slika 16: Karta geotermalnega potenciala za hlajenje v kmetijstvu

7.4. Model kvantifikacije potenciala za hlajenje in skladiščenje energije v podtalju

Razvili smo model kvantifikacije potenciala za skladiščenje energije in pridobivanje hladu s šestimi robnimi pogoji:

1) ekonomska uspešnost investicije

Naj ne upošteva le stroškovno učinkovitost, ampak tudi druge učinke razvojnih ciljev kmetije, ki izhajajo iz dejavnosti (Slika 17):

- Povečanje deleža proizvodnje lastne energije - povečanje virov lastne energije
- Samopreskrba – zmanjšanje odvisnosti od zunanjih virov energije
- Izboljšanje prilagodljivosti na spremembe cen energije glede na ponudbo in povpraševanje
- Zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov

Obračunska obrestna mera v %		3,5%	real							
Letna inflacija %										
Realna obrestna mera %										
Investicije za zagon naprave	Znesek	Življenjska doba	Anuiteni faktor	Stroški kapitala	Likvidacijski izkupiček (+/-)	Sprememba cene	Preostala življenjska doba			
	EUR	št. let	%	EUR/let	EUR nom/real	% nom/real	št. let			
Toplotna črpalka	3.900	15	8,7%	339			15			
Strojne instalacije	800	15	8,7%	69			15			
Vrtnalna in gradbena dela	7.500	33	5,2%	387			33			
SKUPAJ	12.200	22,4		795						
Obdobje obravnave		33	5,2%							
Prihodki/Odhodki				Letni dohodki		Letni stroški		Proizvedena energija		
				Vrednost proizvedene energije	Dohodek 2	Dohodek 3	Cena porabljene elektrike	Cena vzdrževanja	Strošek 3	MWh/leto
v referenčnem času EUR/leto				2.750			1.375	100		55
Sprememba cene % (nom/real)										
Ekonomska učinkovitosti investicije v geotermalno energijo										
Neto vrednost kapitala				9.251	EUR					
Notranja stopnja donosa				8,73	%	real				
Odplačilna doba				11,9	Število let					
Neto letni dobiček				477,09	EUR/leto	real				
Proizvodni stroški na proizvedeno enoto				41,33	EUR/MWh	real				

Slika 17: Primer enega koraka v načrtovanju z razvojnim ciljem, da se z investicijo za polovico zmanjša poraba elektrike (po standardu Norm SIA 480)

2) pregled dostopnih virov energije in uporabnikov

Specifičnost in velika prednost rabe plitve geotermalne energije je raba podtalja kot podzemnega hranilnika energije, toplote oziroma hladu, kar se najpogosteje izvaja s tehnologijami v vodnjakih (t.i. ATES – aquifer thermal energy storage) ali geosondah (BTES – borehole thermal energy storage). Zato je ključna energetska analiza VSEH presežkov in primanjkljajev toplotne energije v dejavnosti in kmetijskem gospodarstvu, kar zajema ciljno notranjo temperaturo, obdobje delovanja, potrebno moč (P) in energijo (Q) po posameznih porabnikih (Slika 18).

Primer podatkov									
Hlajenje	T	Režim	P(+)	Q(+)	Q(-)	P(-)	Režim	T	Ogrevanje
	(°C)	Od - do	kW	MWh	MWh	kW	Od - do	(°C)	
Dnevno skladiščenje 1	5	V. - IX.					II. - III.	10	Rastlinjak - vzgoja sadik
Dnevno skladiščenje 2	15	V. - IX.					X. - IV.	18	Rastlinjak - pridelava 1
Dnevno skladiščenje 3	3,5	V. - IX.	12	12			IX. - V.	20	Rastlinjak - pridelava 2
Sezonsko skladiščenje 1	5	IV. - X.					IV. - VI.	24	Rastlinjak - pridelava 3
Sezonsko skladiščenje 2	10	IX. - XI.							...
Stalno skladiščenje	5	I. - XII.							...
Sortirnica / pralnica	18	IV. - IX.					X. - III.	18	Sortirnica / pralnica
Gobarnica	15	I. - XII.					V. - IX.	20	Voda za namakanje
...									...
Stanovanjska hiša	25	VI. - VIII.	12	3	20	11	X. - IV.	24	Stanovanjska hiša
Delovni prostor	25	VI. - VIII.					X. - IV.	18	Delovni prostor
Prodajni prostor	25	VI. - VIII.					X. - IV.	18	Prodajni prostor
Jedilnica	25	VI. - VIII.					X. - IV.	20	Jedilnica
Stanov. sezon. delavci	25	VI. - VIII.					III. - X.	24	Stanov. sezon. delavci
...									...

Slika 18: Primer pregleda tipičnih virov presežkov in primanjkljajev toplotne energije na kmetijskem gospodarstvu

4) analiza bilance rabe energije in vršne moči

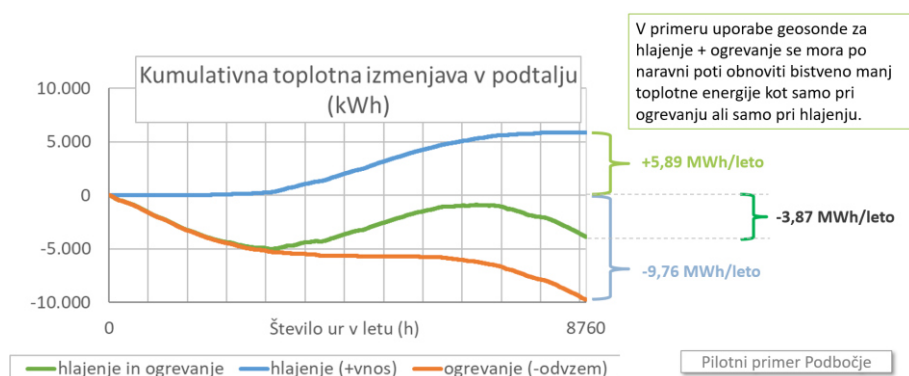
Plitva geotermalna energija zagotavlja stalen bazni lokalni vir energije, ki ne omogoča hitrih sprememb

oziroma prilagajanja spremenljivi vršni moči. Skušamo se približati režimu delovanja s čim bolj uravnoteženo bilanco odvzete in oddane toplote.

Hlajenje		
P = PG-PE	8,0 kW	Toplotna moč pregrevanja stavbe
SEER	4,67	Sezonski faktor učinkovitosti hlajenja
PE	1,7 kW	Potrebna električna moč za delovanje sistema hlajenja
PG	9,7 kW	Moč prenosa toplote v podtalje pri hlajenju
Ekvivalent ur	1500 ur	Ekvivalent ur obratovanja s polno močjo
Q _{pr} = Q _G -Q _E	12,0 MWh/leto	Letna toplotna energija odvedena iz stavbe
Q _E	2,6 MWh/leto	Letna električna energija za delovanje sistema hlajenja
Q _G = Q _x (1+1/SEER)	14,6 MWh/leto	Letna toplotna energija oddana v podtalje (presežek toplote)
Ogrevanje		
P = PG+PE	11,0 kW	Potrebna grelna moč za ogrevanje stavbe
SPF = SCOP	3,74	Sezonski faktor učinkovitosti ogrevanja
PE	2,9 kW	Potrebna električna moč za delovanje sistema ogrevanja
PG	8,1 kW	Moč črpanja toplote iz podtalja
Ekvivalent ur	1800 ur	Ekvivalent ur obratovanja s polno močjo
Q _G +Q _E	19,8 MWh/leto	Letna toplotna energija dovedena v stavbo (primanjkljaj toplote)
Q _E	5,3 MWh/leto	Letna električna energija za delovanje sistema ogrevanja
Q _{pr} = Q _G = Q _x (1-1/SPF)	14,5 MWh/leto	Letna toplotna energija odvzeta iz podtalja
Uravnoteženost Q_G		
oddana/odvzeta toplota	100,4%	Razmerje med oddano toploto v podtalje in odvzeto toploto iz podtalja

Slika 19: Parametri v bilanci rabe energije kažejo, kakšno letni in vršno količino energije je potrebni pridobiti iz podtalja in oddati v podtalje

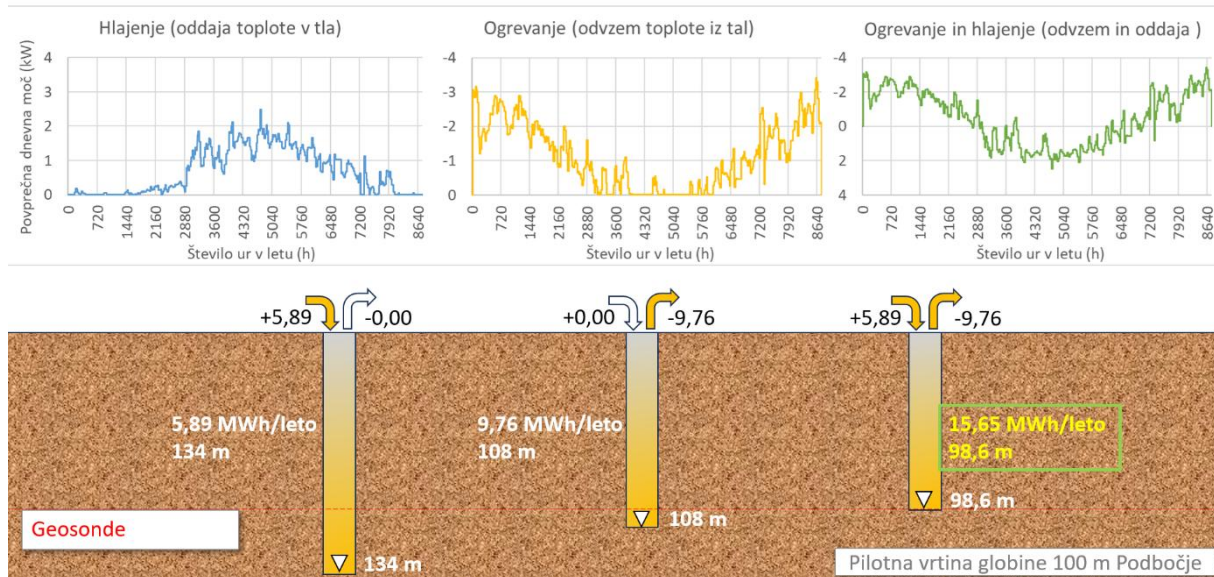
Na pilotnem območju Broda v Podbočju smo simulirali zmogljivost 100 m globoke geosonde ob treh različnih namenih rabe plitve geotermalne energije (le za hlajenje, le za ogrevanje in oboje) in dobili količino toplotne izmenjave v tleh (Slika 20). Ogrevanje stavb tla ohladi, prevladujoče odvajanje presežne toplote iz hladilnice v tla pa jih segreje. Oboje povzroči temperaturno spremembo glede na naravno stanje tal. Če želimo na letni ravno vzdrževati trajnostno energetska bilanco, je potrebno energijo uporabljati tako za ogrevanje kot hlajenje. Če dvojna raba ne bo popolnoma uravnotežena, bo do vpliva na temperaturo tal še vedno prišlo, vendar bo ta bistveno manjši in počasnejši kot ob le enojnem namenu rabe.



Slika 20: Kumulativna toplotna izmenjava v podtalju ob treh različnih režimih rabe energije v geosondi

Prednosti dvojne rabe najbolje ponazorimo s prihrankom investicijskega stroška – potrebne globine geosonde (Slika 21). Najslabši in najdražji scenarij ponazarja raba vrtine le za hlajenje objektov – za odvodnjo 5,9 MWh/leto v tla je potrebna globina geosonde 134 m. Če sondo uporabljamo le za ogrevanje, je sposobna zagotoviti 9,8 MWh/leto že z globino 108 m. V primeru kombinirane rabe je potrebna najkrajša globina. Le 98,6 m zadostuje za ogrevanje z odvzemom iz tal 9,8 MWh/leto in oddajo toplote iz hlajenja v tla v višini 5,9 MWh/leto. Če bi imeli pri tej globini opazno boljše naravne

geotermične pogoje, bi lahko pridobili celo 10,6 MWh/leto in uskladiščili 8,3 MWh/leto.



Slika 21: Različne potrebne globine geosonde na primeru naravnih pogojev v Brodu v Podbočju ob dveh različnih namenih rabe in njuni kombinaciji z uravnoteženjem rabe toplote oziroma rabi podtalja za hranilnik toplote.

4) pregled vhodnih geotermičnih podatkov

Prvi tip podatkov opisuje geotermične lastnosti podtalja (toplotna prevodnost, temperatura tal, gostota toplotnega toka, volumetrična toplotna kapaciteta), drugi pa zajema tehnične značilnosti sistema zajema (odprti voda-voda ali zaprti - geosonde (pri njih npr. število, število zank, globina, premer vrtnice, razmik, geotermični parametri materialov, delovna tekočina) (Slika 22).

Geotermični parametri podtalja	
Toplotna prevodnost [W/mK]	2,1
Temperatura tal [°C]	9,83
Gostota toplotnega toka [mW/m ²]	40,9
Volumetrična toplotna kapaciteta [MJ/(m ³ ·K)]	2,2
Parametri geosonde	
Število U zank v geosondi	2
Globina (m)	50
Premer vrtnice [mm]	152
Razmik med cevmi v zankah [mm]	76
Zunanji premer cevi sonde [mm]	32
Debelina cevi [mm]	3
Toplotna prevodnost cevi [W/(m·K)]	0,42
Toplotna prevodnost polnitve – cement [W/(m·K)]	2
Delovna tekočina - prenosnik toplote	
Pretok delovne tekočine skozi geosondo [l/s]	0,5
Vrsta delovne tekočine	25% Monoethylenglycol
Količina delovne tekočine v geosondi (l)	133
Toplotna prevodnost delovne tekočine [W/(m·K)]	0,48
Specifična toplotna zmogljivost [J/kgK]	3795
Gostota [kg/m ³]	1052
Viskoznost [kg/ms]	0,0052
Zmrzišče [°C]	-14

Slika 22: Primer pregleda ključnih geotermičnih vhodnih podatkov o podtalju za geosondo

5) okoljski vpliv (vpliv naprave in okolice)

Prevelike spremembe temperature v okolici geotermalne naprave imajo lahko povratni neželeni vpliv na napravo ali okolje. Pri ogrevanju objektov (odvzemu toplote iz tal) tla lahko zmrznejo, kar povzroči nabrekanje, vendar proces za kemijsko in mikrobiološko stanje tal običajno ni zelo škodljivo. V primeru hlajenja hladilnic gre za obraten proces – dovajanje presežne toplote v tla, kar lahko zaradi povišanja temperature (povprečna temperatura plitkih tal je 10-12 °C) nad 24 °C in še posebej nad 30 °C povzroči nepovratne geokemijske in mikrobiološke procese, ki lahko povzročijo mobilizacijo onesnaževal v tleh in poslabšanje tehničnih pogojev obratovanja naprave ali stabilnostnih pogojev v podtalju. Čeprav v Sloveniji mejne vrednosti niso uradno opredeljene, lahko različne pristope in standarde povzamemo po zbirnem pregledu v Smernicah za vrtanje v plitvi geotermalni energiji, do 300 m (Slika 23).

	Najmanjši odmiki	Geosonda	Vodnjak
1	Med geosondami iste naprave	>5 m	-
2	Med vodnjaki iste naprave	-	računsko
3	Med vodnjakoma za odvzem in ponovno injiciranje v isti napravi	-	računsko
4	Med sosednjimi napravami PGE	>H/2	-
5	Do sosednje parcele, tj. meje s sosednjim zemljiščem	>5 m	dh<0,1 m
6	Do bližnje stavbe	0	dh<0,1 m
7	Do vodnjaka pitne vode	>H/2	dh<0,1 m in dT<1°C
8	Do vodnjaka za druge vrste uporabe	-	dh<0,1 m in dT<1°C
9	Do posebnega območja	>H/2	dh<0,1 m in dT<1°C
Temperaturna sprememba			
10	Razlika med vstopno in izstopno temperaturo prenosnika toplote ΔT [°C]	-	<6°C
11	Absolutna najnižja temperatura vračane tekočine za prenos toplote T_{min} [°C]	> -3°C	-
12	Absolutna najvišja temperatura vračane tekočine za prenos toplote T_{max} [°C]	< 28°C (<40°C)	-
13	Razlika ΔT_{amb} [°C] med spremenjeno in nespremenjeno temperaturo okolja		<±3 °C <100 m (<±4 °C <200 m)

Slika 23: Priporočene vrednosti najmanjših odmikov in največjih temperaturnih obremenitev proti neželenim okoljskim vplivom

6) učinkovitost naprave

Na višino investicije najbolj vpliva cena vrtalnih del, zato je ključno optimizirati število, globino in razporeditev objektov glede na naravne razmere na zemljišču in morebitne potrebne odmike. Drugi ključni robni pogoj je sezonski faktor učinkovitosti ogrevanja oziroma hlajenja (SPF / SEER), razmerje med pridobljeno in vloženo energijo za ogrevanje in hlajenje. Čim manjša je razlika med temperaturo, na katero moramo ohladiti ali ogreti prostor, in temperaturo podtalja, tem višji je faktor učinkovitosti. Izbor parametrov je dokaj odvisen tudi od lokacije in izbrane tehnologije (Slika 24).

Robni pogoji za velikost zemljišča	
Razmik med geosondami (m)	7
Št. geosond	2
Postavitev (geometrijska razporeditev) geosond na zemljišču	1 × 2
Največja globina geosonde (m)	50
Skupna globina geosond (m)	100
Površina zemljišča vključno z odmiki (m ²)	30
Dolžina × Širina zemljišča vključno z odmiki (m)	10 × 3
Robni pogoji za enotno ceno vrtalnih del	
Fiksni stroški na vrtino (premik) [€/vrtino]	325
Strošek na meter vrtine [€/meter]	66
Strošek na meter jarka (razpeljave med vrtinami) [€/meter]	28
Skupni strošek za vrtalna dela (€)	7.446
Sezonski faktor učinkovitosti ogrevanja (SCOP = SPF)	3,74
Sezonski faktor učinkovitosti hlajenja (SEER)	4,67

Slika 24: Primer ključnih robnih pogojev za oceno učinkovitosti naprave

7) sledenje dejanske učinkovitosti naprave

Ker je energetski objekt zasnovan za 30-50 let, je potrebno stalno spremljati njegovo delovanje – vsaj porabljeno električno energijo za delovanje naprave, pretok delovne tekočine, temperaturo na vstopni in izstopni strani vrtine, notranjo temperaturo prostorov in temperaturo zunaj objektov. Morebitna odstopanja med načrtovanim in dejanskim obnavljanjem toplote tal se pokažejo vsaj po treh letih delovanja, zato bodo morda potrebne prilagoditve.

Več podrobnosti je podanih v poročilu M5_1 Izbor najustreznejšega modela kvantifikacije s predlogom robnih pogojev in prednostnim seznamom ključnih parametrov za načrtovanje potrebnih raziskav.

7.5. Izgradnja in testiranje raziskovalne vrtine GCF-1/24 na pilotnem območju

Ocena stroška izgradnje

Na podlagi izvedenih del v letu 2024 (vrtanje je izvedel Minervo, ostala dela pa interno GeoZS) podajamo grobo oceno stroškov izdelave ene 100 m globoke geosonde, kar se lahko uporabi za oceno investicije v podzemni del izgradnje sistema rabe plitve geotermije. Ob celotni izvedbi rednih del za izgradnjo in testiranje geosonde je ocena stroška približno 17.000 EUR brez ddv. Ciljne raziskave za namen projekta so k strošku pridale še nekaj več kot 10.000 EUR.

Osnovna dela ob izgradnji geosonde:

Dokumentacija:	≈1.500,00 € + DDV
Vrtanje geosonde:	9.995,90 € + DDV
- Distančniki (nerealizirano)	300,00 € + DDV
Geološka spremljava vrtanja	≈1.500,00 € + DDV
Karotaža (gamma in temperature)	≈1.500,00 € + DDV
Klasičen test toplotnega odziva	≈2.500,00 € + DDV

Dodatna dela zaradi raziskav:

- Jedrovanje (4 m)	1.506,40 € + DDV
--------------------	------------------

- Opazovalna cev 300,00 € + DDV
- Vgradnja optičnega kabla 1.000,00 € + DDV
- Laboratorijske analize jeder 3.000,00 € + DDV
- Izboljšani test toplotnega odziva (eTRT) ≈ 5.000,00 € + DDV

Skupna vrednost izvedene geosonde ≈ 28.100,00 € + DDV

Rezultati geološke spremljave in karotažnih meritev

Meritev naravnega gama je pokazala dobro ujemanje geološke sestave z geološkim popisom, opazno je zgolj odstopanje v zgornjih plasteh z glino, kjer se kvartarni rečni sedimenti, ki vsebujejo tudi dobro prepustno plast peščeno glinastega melja in glinasto peščenega proda po karotaži končajo že na globini 9,73 m (Priloga 4), medtem ko je na popisu (Priloga 3) prehod na globini 11 m. Za tem se vsekakor začnejo miocenski slabo sprijeti lapornati melji, ki imajo tudi posamezne manj zaglinjene plasti z večjo prepustnostjo, vendar verjetno brez omembe vrednega toka podzemne vode.

Meritev temperature tik po vrtanju ni dovolj reprezentativna (Priloga 4, Slika 25) in ima bodisi neustrezen rezultat zaradi posledic vrtanja ali pa izkazuje konvekcijo v vrtini s skoraj ničnim geotermalnim gradientom. Najvišja temperatura vode je bila na globini 24,31 m s 13,83 °C. najnižja na dnu z 12,89 °C.

Preračunana električna prevodnost vode je bila visoka (638,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$) in na dnu dosegla maksimum (824,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$). To interpretiramo kot pomanjkanje dotoka podzemne vode in prisotnost stoječe vode zaradi vrtanja.

Rezultati hidrogeoloških raziskav

Prvi pojav podzemne vode med vrtanjem je bil 6. 11. 2024 na globini 3,77 m pod površjem (kota 148,05 m n.v.). Kota reke Krke na tem območju je 147 m n.v. (Atlas okolja). Pred karotažnimi meritvami 8. 11. je bila gladina na koti 139,59 m, a to ni formacijska voda. Podzemna voda z vrtino ni bila zajeta, saj prevladujejo slabo do zelo slabo prepustni melji brez pomembnega toka podzemne vode. Kot nekoliko bolj prepustne horizonte izpostavimo le glinasto peščeni prod na globini 9,0-10,5 m in nekoliko manj prepusten peščeno glinasti ali laporasti melj s prodniki na globinah 3,0-9,0 in 10,5-11,0, 84,0-90,0 m.

Plitvejši vzorec jedra je glinasti melj, globlji pa melj z nekaj glinaste komponente (Preglednica 4). Porazdelitev zrn je slaba do srednja. Vzorca sta glede na celotno poroznost in gostoto zrn podobna, s povprečjema 35,4% in 2,696 g cm^{-3} (Preglednica 4). Z višjim tlakom se prepustnost obeh niža, kar pomeni, da se z globino kompakcija povečuje, pri čemer je globlji (50,19 m) bolj prepusten in bi lahko imel zaznaven tok podzemne vode.

Preglednica 4: Razvrstitev vzorcev po zrnivosti po Udden-Wentworth (1922)

Globina (m)	Glina (m%)	Melj (m%)	Pesek (m%)	d ₁₀	d ₃₀	d ₆₀	C _u	C _c	Gostota ρ (g/cm ³)	poroznost (n)	Intrinzična prepustnost k (mD)	Tlak EOB (bar)
25,22	41,3	58,7	0,0	1,1	2,8	6,8	6,2	1,0	2,7019	35,0	44,28	15
										34,1	24,02	20
50,19	28,5	71,5	0,0	1,8	4,1	9,0	5,0	1,0	2,6903	37,3	1570,51	15
										35,3	497,25	20

Rezultati geotermičnih raziskav

Rezultati toplotne prevodnosti kamnin v okolici raziskovalne vrtine, na severnem obrobju Gorjancev, so razvrščeni glede na tipe kamnin v štiri skupine (Preglednica 5). Meritve so podale tipične vrednosti karbonatnih kamnin skladno z že objavljenimi rezultati za Slovenijo (Rajver & Adrinek, 2023). Apneneci imajo lahko precej širok razpon toplotne prevodnosti, nižje so izmerjene na kalkarenitu, višje pa na apnenčastih brečah in dolomitiziranem apnencu.

Primerjamo lahko rezultat ene meritve z iglično sondo (globina 25,1 - 25,15 m; $1,457 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$), za laboratorijsko metodo TCS ($1,641 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$). Ostale prenizke vrednosti izločimo. Menimo, da so meritve s TCS bolj merodajne, kajti iglične sonde podajo prenizko prevodnost, kar dokazuje poskus izračuna gostote merjenega sedimenta z enačbo $\rho = K \text{ C}^{-1} \text{ D}^{-1}$ (n.pr. Rajver & Adrinek, 2023). Rezultat okrog 1001 kg m^{-3} je v bistvu gostota vode - sedimenti imajo seveda višjo gostoto. Iglične sonde očitno nimajo dovolj dobrega stika s sedimentom in zrak ali voda znižata toplotno prevodnost.

Rezultati terensko izmerjene toplotne prevodnosti (Priloga 5) so nižji kot laboratorijski (Priloga 6). V splošnem so bolj vlažni vzorci pokazali malo višjo prevodnost od bolj suhih. Povprečne vrednosti terenskih meritev karbonatnih kamnin so: toplotna prevodnost $1,218 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$, difuzivnost $0,4154 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, toplotna kapaciteta $2,9398 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ in upornost $0,8299 \text{ }^{\circ}\text{C cm W}^{-1}$.

Povprečne vrednosti 14 vzorcev melja iz vrtine GCF-1/24 iz laboratorijskih meritev so: toplotna prevodnost $1,723 \pm 0,108 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ in toplotna difuzivnost $0,458 \pm 0,070 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Priloga 7) in se dobro ujemajo z dosedanjimi meritvami na vzorcih melja in melja s primesmi (Rajver & Adrinek, 2023), tudi iz plitvejših vrtin v okolici Jedrske elektrarne Krško. Povprečje 17 meritev po 4 metodah na jedrih iz GCF-1 daje toplotno prevodnost $1,451 \pm 0,370 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Imamo sicer dve skupini rezultatov. Strokovna ocena je, da je to za lapornati melj prenizko in je vrednost okoli $1,72 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ bolj realna.

Preglednica 5: Statistika geotermičnih lastnosti karbonatnih kamnin pri Kostanjevici

Litologija	N	$k_T \text{ (W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$			$\rho \text{ (}^{\circ}\text{C cm W}^{-1}\text{)}$			Napaka
		min	maks	aver	min	maks	aver	
Apnenec	17	2,0720	5,0100	$3,1612 \pm 0,9988$	20,0000	48,3000	$34,4176 \pm 9,6100$	$0,0481 \pm 0,0246$
Dolomitiziran apnenec	2	2,4820	3,1030	$2,7925 \pm 0,4391$	32,2000	40,2800	$36,2400 \pm 5,7134$	$0,1741 \pm 0,2386$
Kalkarenit	5	2,0430	4,0100	$2,7616 \pm 0,8331$	24,9000	49,0000	$38,7000 \pm 10,4893$	$0,0245 \pm 0,0134$
Karbonatna breča	3	2,9550	8,6290	$4,8630 \pm 3,2615$	11,6000	33,8000	$26,2333 \pm 12,6753$	$0,0701 \pm 0,1016$
POVPREČJE TERENSKIH MERITEV	27	2,0430	8,6290	$3,2490 \pm 1,3834$	11,6000	49,0000	$34,4363 \pm 9,9440$	$0,0555 \pm 0,0686$
POVPREČJE LABORAT. MERITEV	22	1,9010	3,3680	$2,7352 \pm 0,4670$				

Preglednica 6: Primerjava različnih metod na istih vzorcih jedra GCF-1/24, na GeoZS in PGI (Tempos).

Globina	Metoda	$k_T \text{ (W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$	$k_T \text{ povp (W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$	$k_T \text{ povp (W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$	$k_T \text{ povp (W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$
51,0-51,16 m	Tempos SH-3	1,2950			
51,0-51,16 m	Tempos SH-3	1,2910	1,293		1,451
51,0-51,16 m	Tempos SH-3	1,2920		1,247	

Globina	Metoda	k_T (W m ⁻¹ K ⁻¹)	k_T povp (W m ⁻¹ K ⁻¹)	k_T povp (W m ⁻¹ K ⁻¹)	k_T povp (W m ⁻¹ K ⁻¹)
50,0-50,20 m	KD2 Pro SH-1	1,1110			
51,0-51,16 m	KD2 Pro SH-1	1,2440	1,200		
51,72-51,82 m	KD2 Pro SH-1	1,2460			
51,0-51,16 m	Tempos TR-3	1,1490			
51,0-51,16 m	Tempos TR-3	1,1360	1,147		
51,0-51,16 m	Tempos TR-3	1,1550			
50,0-50,20 m	KD2 Pro TR-1	1,0210			1,153
51,0-51,16 m	KD2 Pro TR-1	1,0760	1,160		
51,72-51,82 m	KD2 Pro TR-1	1,3830			
51,0-51,16 m	TCS	2,161			
51,0-51,16 m	TCS	1,952			
51,0-51,16 m	TCS	1,930	1,953	1,953	
51,0-51,16 m	TCS	1,900			
51,0-51,16 m	TCS	1,821			

Meritve temperature po globini vrtine

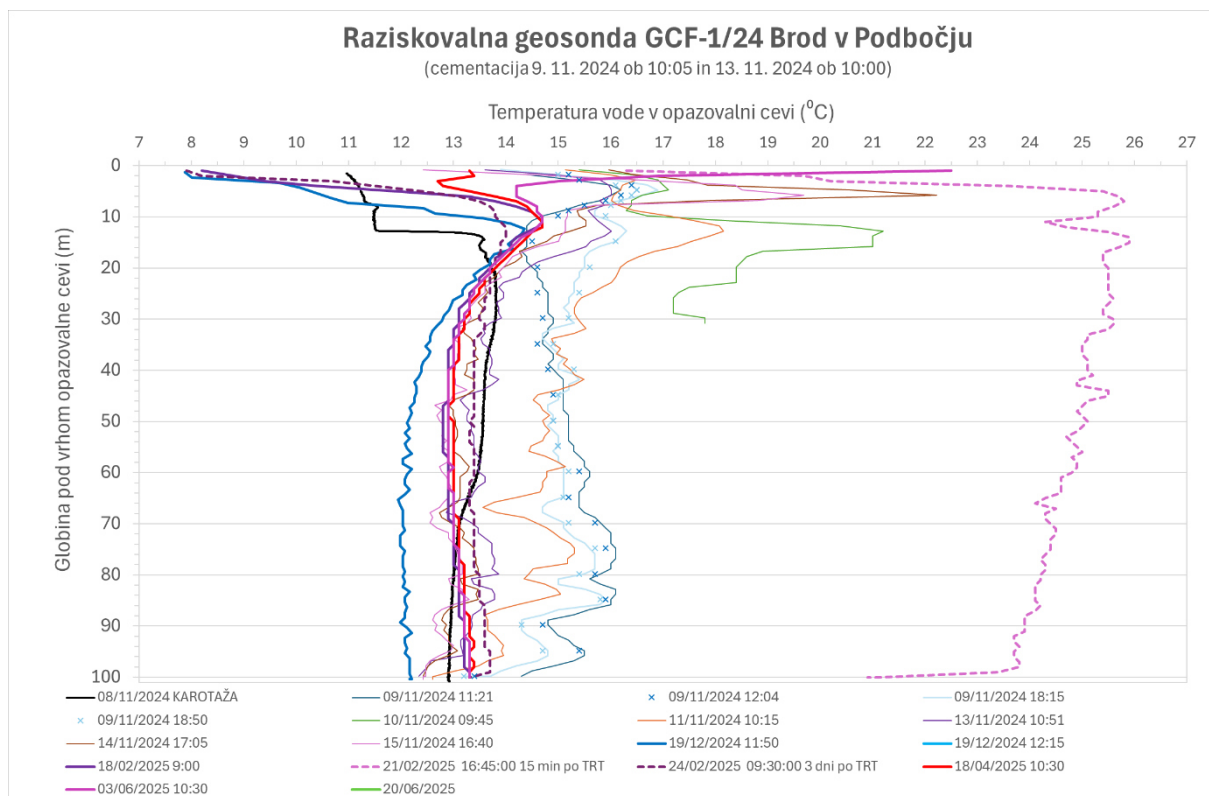
Povprečna letna temperatura zraka na 10 km oddaljenem letališču Cerklje ob Krki v obdobju 1991-2020 je bila 10,9 °C (ARSO, 2025).

Največji porast temperature po prvi cementaciji GCF-1/24 je bil na globini 11-16 m (Slika 25), zato sklepamo, da se je v ta sloj kvartarnega glinasto-peščenega proda izlila večina cementne mešanice. Po drugi, plitvi cementaciji je bil največji porast na okoli 6 m. Spremembe temperature so bile opazne na globinah: 8-9 m, 67 m, 79-80 m, 89-91 m in 100 m.

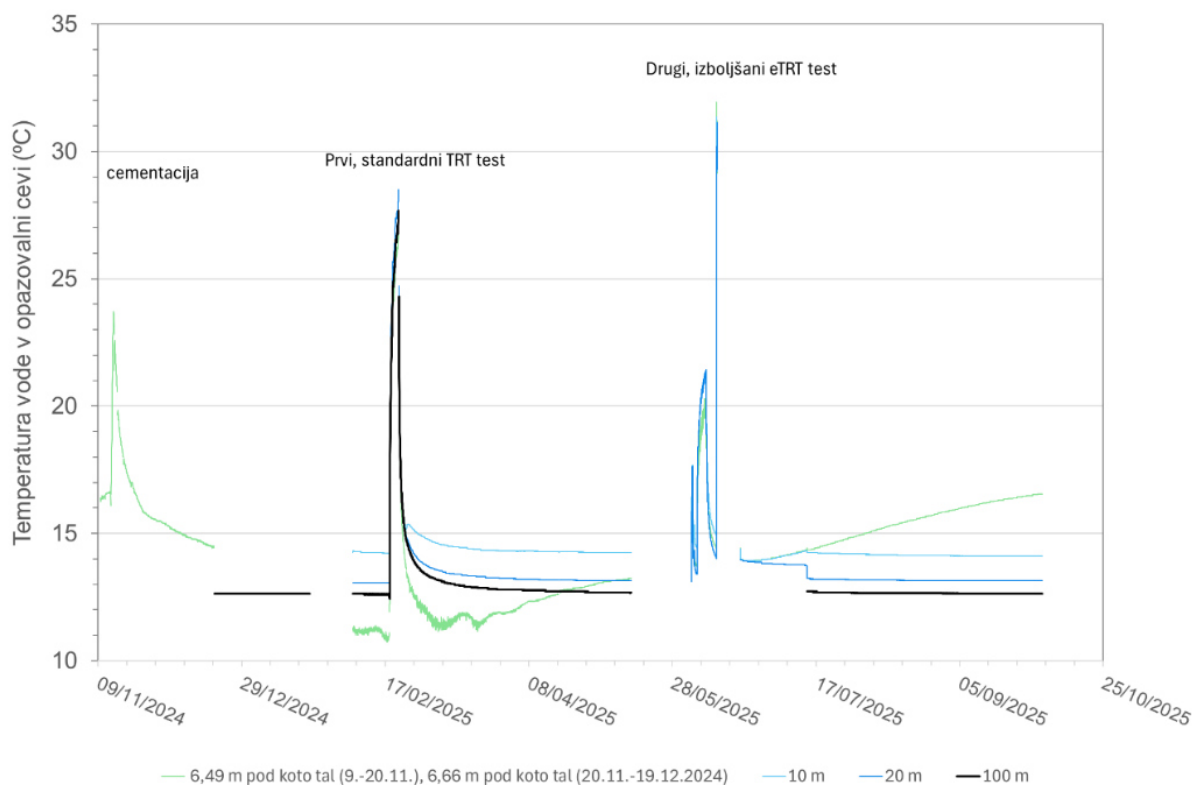
Uravnotežen temperaturni profil iz dec. 2024 kaže na največjo anomalijo na globini 11-12 m, kar je na stiku kvartarja in miocenskega melja in verjetno vpliv podzemne vode, ki se nahaja v kvartarnih rečnih sedimentih. Temperaturni podatki kažejo zelo nizek geotermični gradient, kjer je najnižja temperatura določena na dnu vrtine z 12,63-12,89 °C, povprečno 12,69 °C, in je torej stalna (Slika 26).

Iz meritev temperature 19. 12. 2024 (34 dni po vrtanju) je bil določen nizek geotermični gradient - 10 °C km⁻¹, kar je podobno oziroma malo nižje kot v nekaterih sosednjih vrtinah.

Rezultati urnih meritev temperature na 4 različnih globinah v opazovalni cevi geosonde jasno kažejo segrevanje tal ob cementaciji in izvedbi obeh testov toplotnega odziva. Najvišja dosežena temperatura je bila skoraj 32 °C junija 2025 na globini 6,7 m pod koto tal, kar seveda ni posledica naravnih pogojev, ampak geotermičnih testiranj. Na tej globini je zelo jasno tudi sezonsko nihanje temperature tal zaradi sončnega obsevanja, ki je od novembra 2024 nihala med najmanj 10,74 °C, doseženo sredi februarja 2025, do največ 16,6 °C v začetku oktobra 2025 (Slika 26).



Slika 25: Meritve temperature po celotni dolžini vrtine GCF-1/24 v od nov. 2024 do jun. 2025

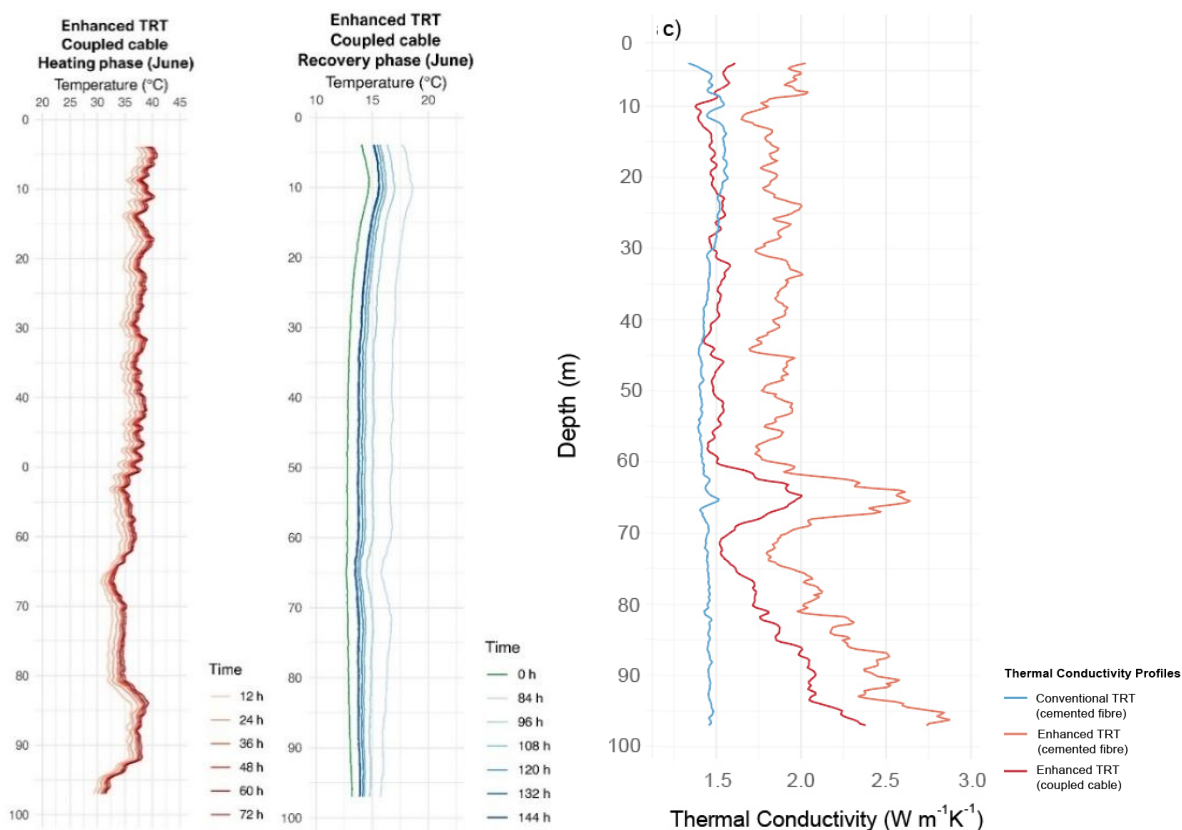


Slika 26: Rezultati urnih meritev temperature na 4 različnih globinah v opazovalni cevi geosonde. Jasno se vidi segrevanje ob cementaciji in izvedbi obeh TRT ter sezonsko segrevanje tal na globini dobrih 6 m.

7.5.1.1. Rezultati standardnih in naprednih testov toplotnega odziva

Analiza standardnega testa toplotnega odziva (TRT) iz februarja 2025 poda le eno, skupno toplotno prevodnost sistema GCF-1/24 kot $1,554 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Junija 2025 je bil prvič v Sloveniji opravljen napredni test toplotnega odziva (eTRT), katerega rezultate podajamo tukaj. Interpretacija podatkov iz DTS optičnih vlaken omogoča izračun toplotne prevodnosti iz hitrosti spremembe temperature vsakih 25 cm (Slika 27), zato je to edini način, da se ugotavlja *in situ* vertikalno heterogenost geotermičnih parametrov in cone z aktivnim tokom podzemne vode.



Slika 27: Primer profilov temperatur z globino (T - z) za 12-urne korake eTRT med segrevanjem (levo: rdeče črte) in ohlajanjem hibridnih kablov (sredina: modre črte) ter prikaz izračunane toplotne prevodnosti po celotni globini vrtine (desno)

Rezultati interpretiranih optičnih vlaken tekom standardnega TRT (t.i. DTRT) so najbolj primerljivi z vrednostmi iz hibridnega kabla med naprednim testom (eTRT) v zgornjem delu vrtine, medtem ko je povečanje toplotne prevodnosti bistveno večje za eTRT (do $2,00 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) v intervalu 60–72 m. Za eTRT je toplotna prevodnost v odseku 3,77–9,00 m v povprečju $1,41 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, z maksimumom $1,49 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Slika 27). V odseku 11–60 m so vrednosti v povprečju $1,49 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, z maksimumom pri $1,58 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Najvišja prevodnost je bila zabeležena med 60 m in 72 m, do $2,00 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Navpična porazdelitev toplotne prevodnosti kaže linearno vedenje, kar kaže na prevladujočo advekcijo. V preostalem delu vrtine se toplotna prevodnost postopoma povečuje do $2,38 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

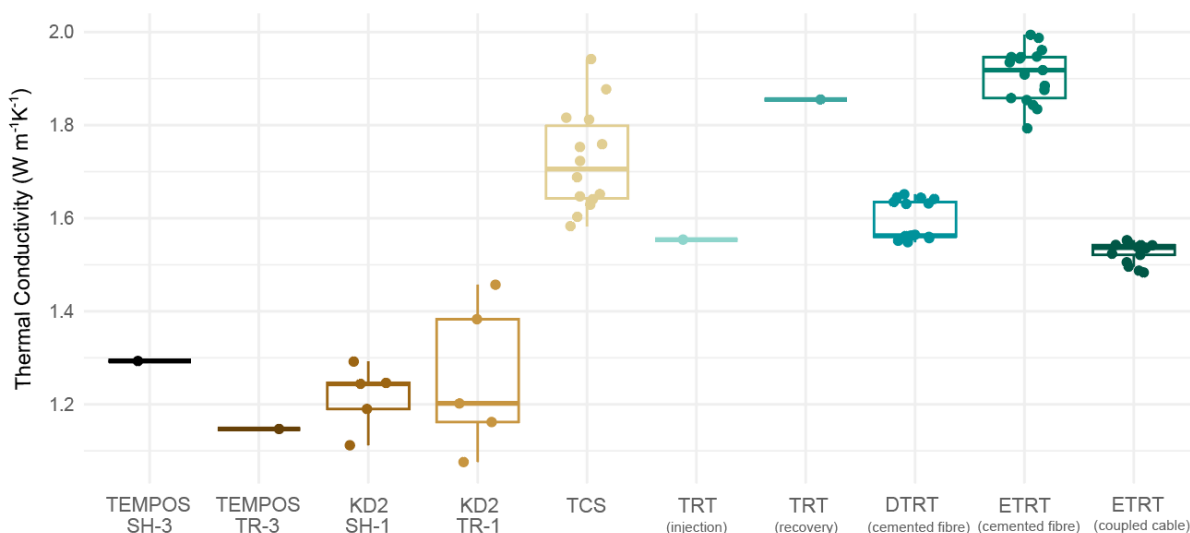
S to raziskavo smo lahko prvič primerjali različne terenske in laboratorijske metode za določitev toplotne prevodnosti – iglične sonde, TCS, TRT, DTRT in eTRT.

Ugotovili smo, da se povprečna toplotna prevodnost jeder in enakovrednih segmentov razlikuje glede

na uporabljeno metodo (Slika 28). Igličaste sonde (npr. KD2 Pro in TEMPOS) podajo nižje vrednosti kot TCS in TRT. Povprečna vrednost uporabljenih metod je $1,23 (\pm 0,11) \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ za igličaste sonde, $1,72 (\pm 0,11) \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ za TCS in $1,68 (\pm 0,17) \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ za TRT meritve. Najvišji razpon podajo KD2 TR-1 in TCS, od $1,08$ do $1,46 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ oziroma od $1,58$ do $1,94 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Najnižja zabeležena vrednost je $1,08 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ pri KD2-TR1, najvišja $1,99 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ med eTRT na cementiranih DTS optičnih vlaknih.

Ta metodološka kaže, da meritve s terensko igličasto sondo zaradi manjše vlage, slabšega stika z vzorcem in omejene prostornine vzorca sistematično podcenjujejo njegovo toplotno prevodnost. Cementirana optična vlakna so zagotavljala najboljši stik z okoliško formacijo in zato podala višje vrednosti kot meritve iz hibridnega kabla med eTRT. V splošnem podajo laboratorijske TCS in terenske TRT metode podoben rezultat. Menimo, da so najbolj primerljivi in točni rezultati TCS, standardnega TRT testa in eTRT testa z uporabo hibridnih kablov. DTRT je podal najbolj homogen vertikalni profil, ki pa verjetno podaja prenizke absolutne toplotne prevodnosti. eTRT je na obeh kablji, tako cementiranem kot hibridnem, precej spremenljiv, ker je bolj občutljiv na postavitev grelca in temperaturnega senzorja ter enakomernost porazdelitve toplote po celotni dolžini kabla. Navidezno povečanje toplotne prevodnosti proti koncu vrtine je najpogostejše posledica kombinacije končnih učinkov, zaradi namestitve in lokalnega električnega pregrevanja – ne pa geoloških ali hidrogeoloških dejavnikov.

Raba optičnih vlaken v raziskovalni vrtini z izvedenima testoma DTRT in eTRT je prvič omogočila kvantifikacijo vertikalne heterogenosti geotermičnih lastnosti in advekcije zaradi toka podzemne vode v Sloveniji. Največji vpliv je na globini 60-72 m (Slika 27), čeprav ga karotažne meritve in popisi ne prepoznajo (ni bistveno bolj prepustnih sedimentov), vendar se anomalija pojavi na vseh senzorjih in ob različnih meritvah.



Slika 28: Škatlasti diagrami ponazarjajo določene toplotne prevodnosti po različnih metodah. Meritve na jedrih so rjave, TRT meritve pa modre. Vsak okvirček predstavlja medkvartilni razpon (IQR; od 25. do 75. percentila).

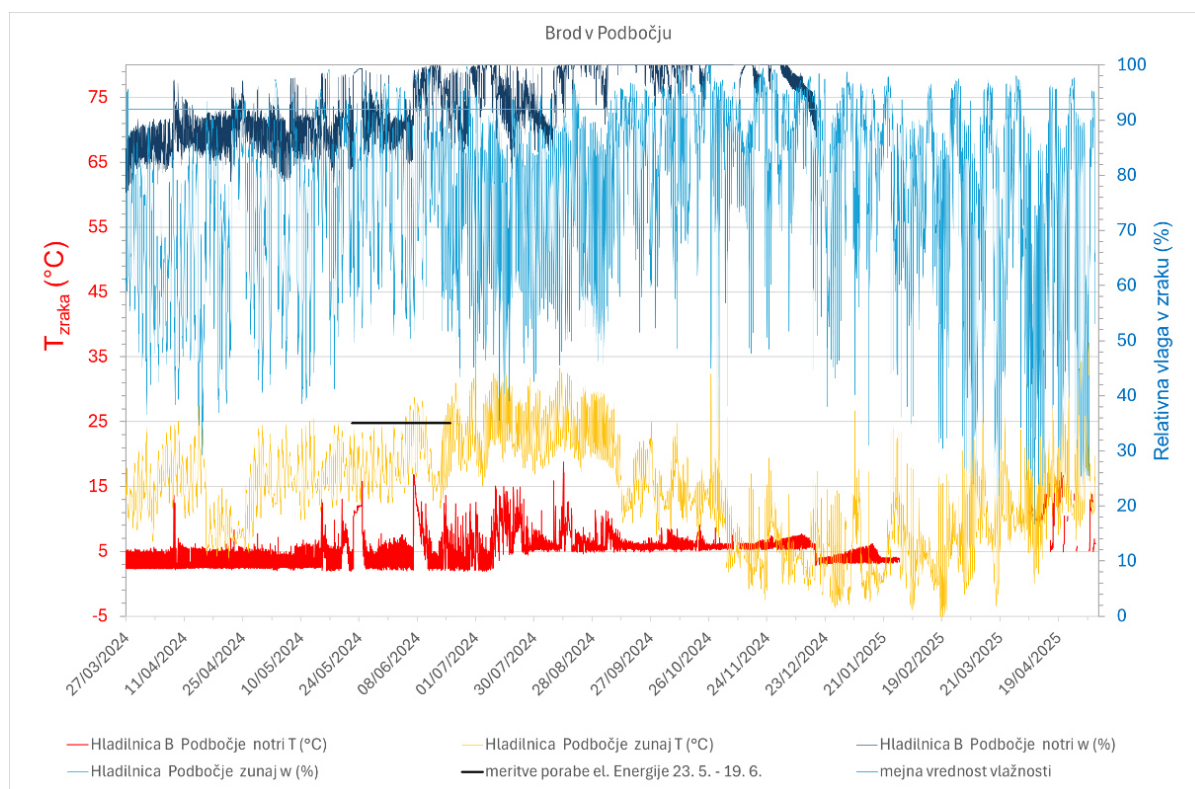
Podrobni podatki o izdelavi in testiranju vrtine so podani v poročilu M3_2 Poročilo o izgradnji raziskovalne geosonde GCF-1/24 v Brodu v Podbočju.

7.6. Enoletne meritve delovanja izbranih dveh hladilnic

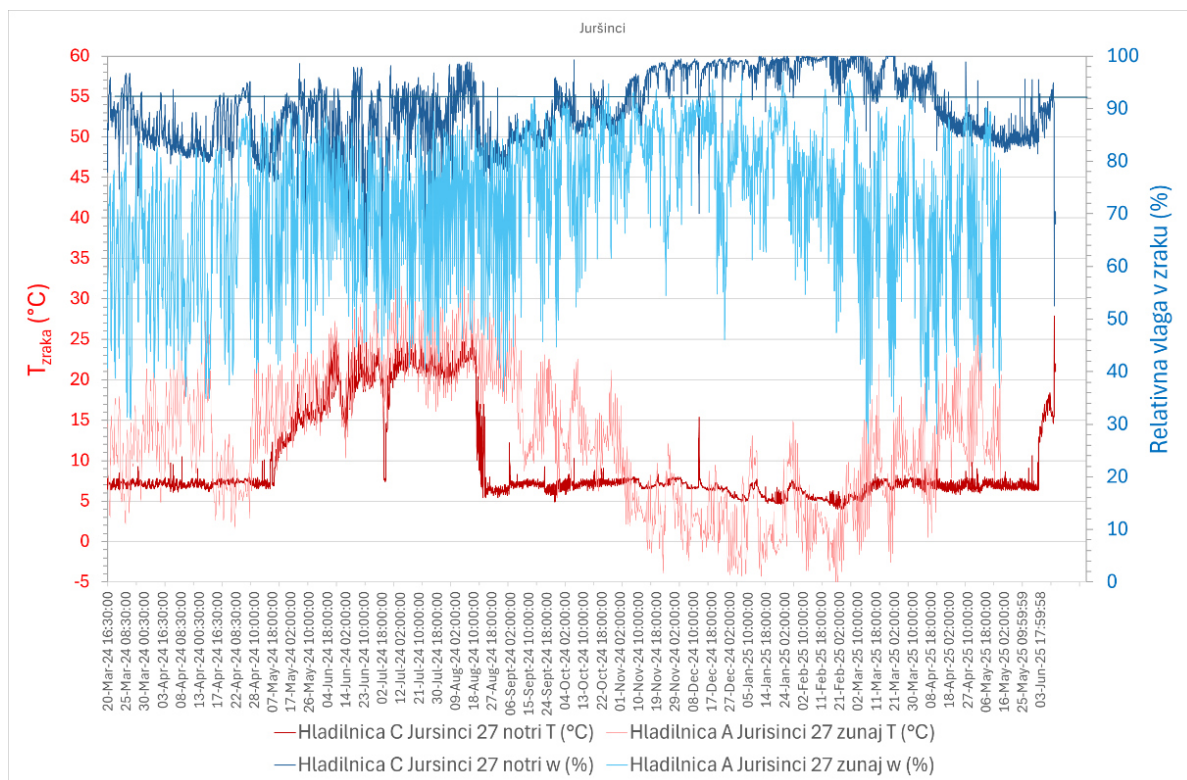
Meritve temperature zraka in vlažnosti v hladilnici in zunaj objekta so na voljo tako za Brod v Podbočju (Slika 29) kot Juršince (Slika 30). V slednji so ob pričetku sezone skladiščili približno 25 ton krompirja, 3 tone rdeče pese, 5 ton zelja, nekaj korenčka, hrena, radiča in kitajskega zelja.

Ključna razlika med hladilnicama je, da se tista v Brodu uporablja celo leto, v Juršincih pa med sredino maja in avgusta načeloma ne deluje, zaradi tega in klimatskih pogojev pa imata različno veliko razliko med zunanjo in notranjo temperaturo zraka (Priloga 9), ki pomembno vpliva na ekonomsko učinkovitost delovanja hladilnice, v kolikor bi uporabljala plitvo geotermalno energijo.

Iz merjenih podatkov je razvidna razlika v notranji temperaturi hladilnic in zunanjih pogojih (Preglednica 7). Povprečna temperatura zraka med delovanjem hladilnice v Brodu v Podbočju je bila $5,1 \pm 2,7$ °C, relativna vlažnost $93,4 \pm 5,8\%$. Zunanji pogoji imajo skladno s pričakovanji večja nihanja: temperatura zraka $13,9 \pm 8,0$ °C, relativna vlažnost $77,0 \pm 15,9\%$. Zanimivo je, da je bila tudi izmerjena najnižja temperatura tal v vrtini šele na globini 100 m - kot $12,7$ °C. Povprečna temperatura med delovanjem hladilnice v Juršincih je bila $6,8 \pm 0,9$ °C in relativna vlažnost $91,5 \pm 6,5\%$. Zunanji zrak ima večja nihanja: temperatura zraka $9,8 \pm 7,1$ °C, relativna vlažnost $73,3 \pm 13,7\%$. V bližnji vrtini smo lahko na globini 30 m izmerili temperaturo vode na $11,4$ °C.

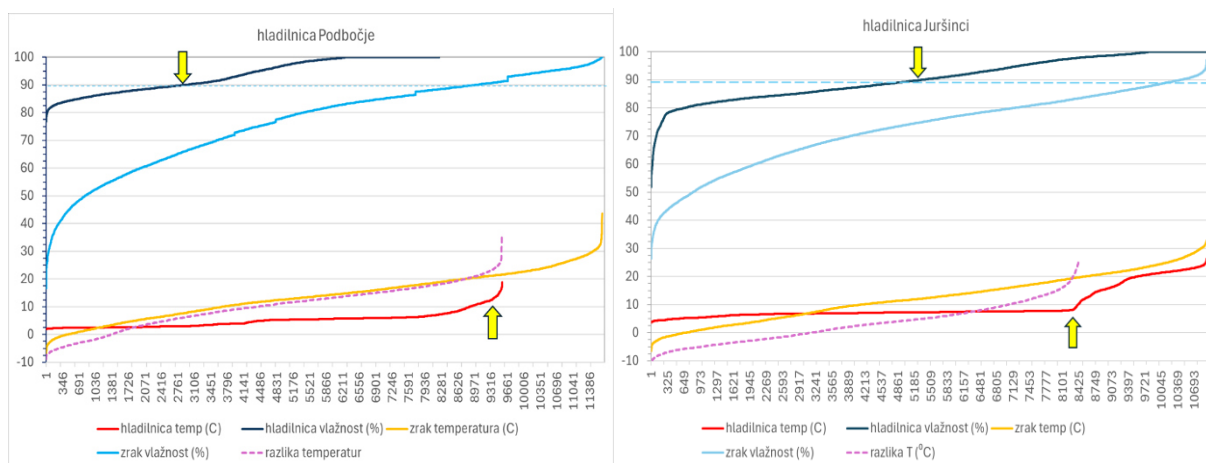


Slika 29: Urne meritve temperature in vlažnosti zraka v hladilnici in zunaj nje v Brodu v Podbočju. Črna črta označuje obdobje meritev porabe elektrike 23. 5. – 19. 6. 2024, modra pa priporočeno vlažnost v hladilnici – 92%.



Slika 30: Urne meritve temperature in vlažnosti zraka v hladilnici in zunaj nje v Juršincih. Črna črta označuje obdobje meritev porabe elektrike 23. 5. – 19. 6. 2024, modra pa priporočeno vlažnost v hladilnici – 92%.

Tudi primerjava osnovnih statistik meritev (Preglednica 7) in kumulativni diagram (Slika 31) kažeta na opazne razlike med hladilnicama. Viden je nepopoln niz podatkov v hladilnici v Brodu zaradi okvare merilne opreme in nedelovanje hladilnice v Juršincih poleti (iz temperature). V Brodu ostaja vlažnost zraka v hladilnici več kot 54% časa v priporočenem območju nad 92%, medtem ko je v Juršincih ta vrednost dosežena le v 45% časa delovanja hladilnice.



Slika 31: Kumulativni diagram merjenih meritev temperature (T) in vlažnosti v obeh hladilnicah v Juršincih in Brodu v Podbočju in zunaj njih (zrak).

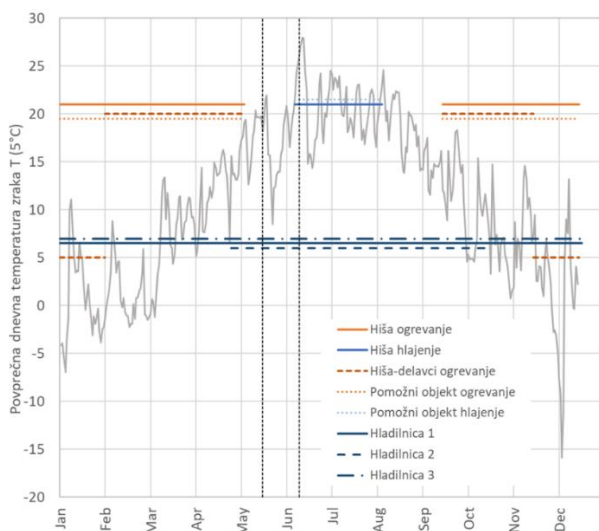
Preglednica 7: Osnovna statistika za zvezne meritve temperature (T) in vlažnosti (w) v hladilnicah ($_{hl}$) v Juršincih in Brodu v Podbočju in zunaj njih ($_{zrak}$).

	Juršinci – v času obratovanja, brez meritev med 6. 5. in 24. 8. 2024					Brod v Podbočju – vse meritve, ker stalno deluje			
	T_{hl} (°C)	w_{hl} (%)	T_{zrak} (°C)	w_{zrak} (%)	T_{zr-hl} (°C)	T_{hl} (°C)	w_{hl} (%)	T_{zrak} (°C)	w_{zrak} (%)
MIN	3,6	70,1	-6,4	26,4	-12,6	1,9	76,9	-7,3	16,6
POVP	6,8	91,5	9,8	73,3	2,9	5,1	93,4	13,9	77,0
MAKS	15,4	100,0	31,0	97,0	24,9	18,8	100,0	43,6	100,0
ST. DEV	0,9	6,5	7,1	13,7	6,9	2,7	5,8	8,0	15,9

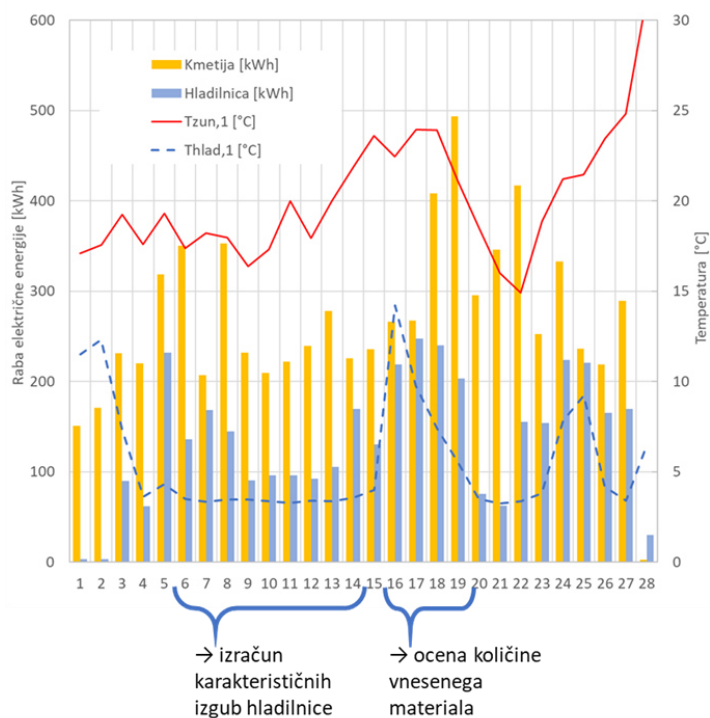
7.7. Izračun karakterističnih toplotnih obremenitev objektov v Brodu v Podbočju

Karakteristična rabe energije za ogrevanje in hlajenje na kmetiji Turk v Brodu v Podbočju je bila izračunana na osnovi meritev rabe električne energije v hladilnici 1 in hladilnici 2, posredovanih podatkov s strani lastnika kmetije in razpoložljivih meritev temperature v obravnavanem obdobju. Vse nadaljnje analize so bile izdelane na osnovi teh izračunov in na osnovi meteoroloških podatkov ARSO za značilno meteorološko leto za lokacijo Novo mesto. V izračunu so bile upoštevane povprečne dnevne vrednosti temperature in globalnega sevanja. Mesečni urnik obratovanja objektov na kmetiji Turk podaja (Preglednica 8), interval izvajanja meritev vertikalne črte na Slika 32.

Na osnovi neprekinjenih meritev rabe električne energije v hladilnicah 1 in 2 (Slika 33) smo identificirali vnos materiala v hladilnico. Ob predpostavki o povprečni specifični toploti $3 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ in temperaturi vnesenega materiala (temperatura okolice) smo lahko ocenili maso vnesenih pridelkov v hladilnico. Na ta način smo lahko od skupnih toplotnih obremenitev oddvojili transmisijske in ventilacijske toplotne obremenitve, ki so linearno odvisne od temperaturnega primanjkljaja ter toplotne obremenitve zaradi vnosa materiala v hladilnico, ki so odvisne predvsem od urnika in količine vnesenih pridelkov. Rezultati in predpostavke izračuna so prikazani v Preglednica 9.



Slika 32: Graf povprečne dnevne temperature zraka s ponazoritvijo urnika in temperatur ogrevanih ter hlajenih prostorov na kmetiji Turk. Vertikalni črti označujeta čas neprekinjenega izvajanja meritev rabe električne energije v hladilnici 1 in 2.



Slika 33: Rezultati meritev rabe električne energije za potrebe obratovanja hladilnic 1 in 2 ter celotne kmetije Turk, meritev temperature v hladilnici ter okolici.

Preglednica 8: Mesečni urnik obratovanja objektov na kmetiji Turk

MESEC:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
HLADILNICA 1	H1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HLADILNICA 2	H2				1	1	1	1	1	1	1	
HLADILNICA 3	H3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HIŠA	S1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PROSTOR ZA DELAVCE	D1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
RASTLINJAK 1	R1	1	1								1	1
RASTLINJAK 2	R2	1	1	1	1							1

Preglednica 9: Rezultati meritev in izračuna karakterističnih izgub objektov na kmetiji Turk v Brodu v Podbočju

Hladilnice: H1, H2, H3		
Povprečna specifična toplota pridelkov in embalaže	3	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Povprečna temperatura hladilnic	4	$^{\circ}\text{C}$
Povprečna temperaturna razlika med okolico in hladilnico v izbranem obdobju	15.5	$^{\circ}\text{C}$
Ocenjena raba energije za pohladitev vnesenih pridelkov in embalaže	500	kWh
Ocenjena masa ohlajenih pridelkov (s povprečno $c_p=3 \text{ kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	38.6	t
Dnevne ventilacijske izgube H1, H2 ($V=375 \text{ m}^3$, $dT=15^{\circ}\text{C}$, izmenjava 0,5 h-1)	19.7	kWh
Povprečna vrednost COPh hlajenja hladilnice	4.5	/
Karakteristične izgube hladilnic H1, H2	483.5	$\text{Wh m}^{-2} \text{K}^{-1} \text{dan}^{-1}$
Karakteristične izgube hladilnice H3	550.0	$\text{Wh m}^{-2} \text{K}^{-1} \text{dan}^{-1}$
Hiša: S1		

Karakteristične izgube hiše	25.0	Wh m ⁻² K ⁻¹ dan ⁻¹
Površina hiše	180	m ²
Povprečna temperatura hiše pozimi	22	°C
Povprečna temperatura hiše poleti	26	°C
Prostor za delavce: D1		
Karakteristične izgube prostora za delavce	80	Wh m ⁻² K ⁻¹ dan ⁻¹
Površina prostora za delavce	250	m ²
Povprečna temperatura prostora za delavce pozimi	20	°C

7.8. Smernice za rabo plitve geotermalne energije za hlajenje

Prehod obstoječih hladilnic, ki že uporabljajo nek sistem hlajenja, na rabo plitve geotermalne energije je trenutno manj ekonomičen. Pri trenutnih cenah energije je razlika učinkovitosti obstoječih sistemov zrak-voda proti novim geosondam premajhna in bo prišla do izraza šele, če bo elektrika dražja.

Univerzalnih rešitev ni in za uspeh in dolgoročno učinkovitost takšnega sistema je ključno dobro načrtovanje, ki upošteva realno porabo energije ter uravnoteženo kombinacijo za hlajenje in ogrevanje. Izhodiščne usmeritve smernic za rabo plitve geotermalne energije z geosondami (dosežek M7_1) so, da se lahko pričakuje **ekonomsko uspešna rešitev** le ob zelo specifičnih geoloških in tehničnih pogojih:

- **Nova hladilnica ali obstoječa, že amortizirana, ki zahteva energetska sanacijo.**
- **Nazivna moč hlajenja je nižja od toplotne moči geosonde.** Ta običajno lahko pokriva povprečno potrebo hladilnic po energiji, zadostno vršno moč pa ima le ob prisotnosti posebnih naravnih pogojev.
- **Hladilnica obratuje stalno in tudi poleti.** V najbolj vročih dneh, ko je zrak najtoplejši, je prednost rabe geosonde največja.
- **Geosonda se uporablja tudi za ogrevanje.** Z uravnoteženo rabo je večji energetski izplen in manjši vpliv na okolje.

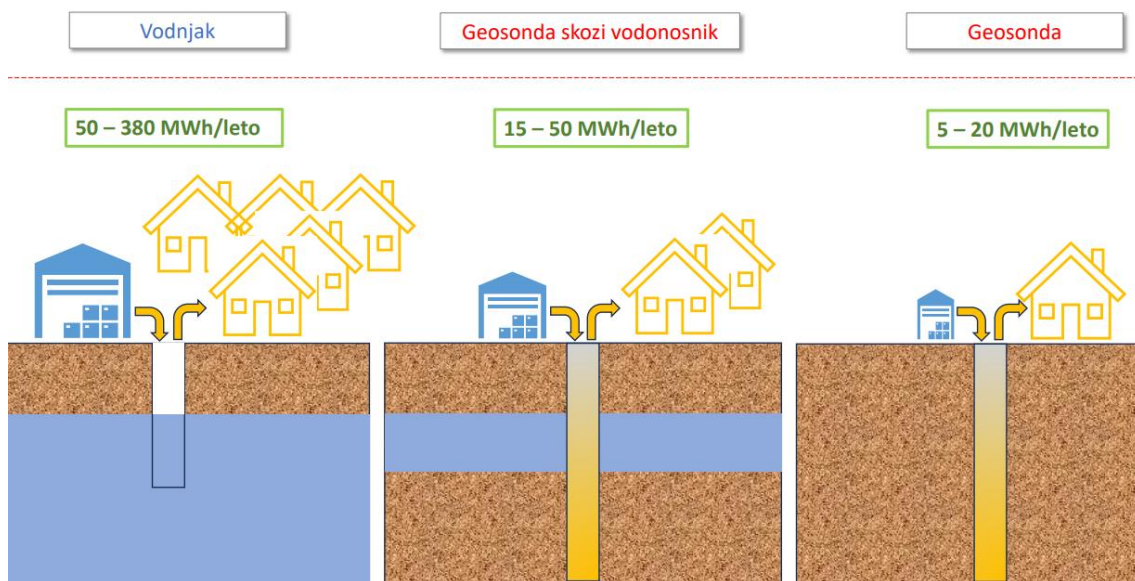
Za načrtovanje geosond, ki bi se uporabljale **le za hlajenje objektov**, priporočamo:

- Izvedbo na območjih s pomembnim tokom podzemne vode, s čimer se poveča kapaciteta.
- Globino nad 50 m, da se izognemo vplivom dolgoročnega zviševanja temperature tal zaradi podnebnih sprememb, kar bi pomenilo zmanjšanje kapacitete.
- Načrtovanje več geosond v optimalni razporeditvi, da med njimi ne pride do sovpliva.

Ob tem priporočamo, da se raje **načrtuje dvojno, uravnoteženo rabo geosonde**, tako za hlajenje kot ogrevanje, kar omenjene tri pogoje nekoliko spremeni.

Upoštevati je potrebno tudi, da kapaciteto posamezne naprave za zajem plitve geotermalne energije (geosonde ali vodnjaka) najbolj poveča prisotnost podzemne vode. Na podlagi izračunov ocenjujemo, da lahko ena geosonda v okolju brez pomembnega toka podzemne vode zagotovi le med 5 in 20 MWh na leto (Slika 34), kar zadostuje za eno hišo oziroma manjšo hladilnico. V kolikor je zgrajena na območju z zaznavnim tokom podzemne vode, kapaciteta zadostuje za srednje veliko hladilnico ali par stanovanjskih objektov. Potrebe velikih hladilnic pa lahko ekonomsko krijemo le z vodnjaki (50-380

MWh na leto).



Slika 34: Prikaz tipskih zmogljivosti različnih načinov zajema plitve geotermalne kapacitete – koliko lahko ogrevamo z geosondo, ob prisotnosti podzemne vode in z vodnjakom

Tehnični del smernic, ki vsebuje minimalne zahteve in pristope za pripravo projektne dokumentacije, predstavlja dosežek M5_1 Izbor najustrežnejšega modela kvantifikacije s predlogom robnih pogojev in prednostnim seznamom ključnih parametrov za načrtovanje potrebnih raziskav. Ta opisuje sedem tehničnih kriterijev, ki so podrobneje opisani v poglavju 7.4 tega poročila, in so:

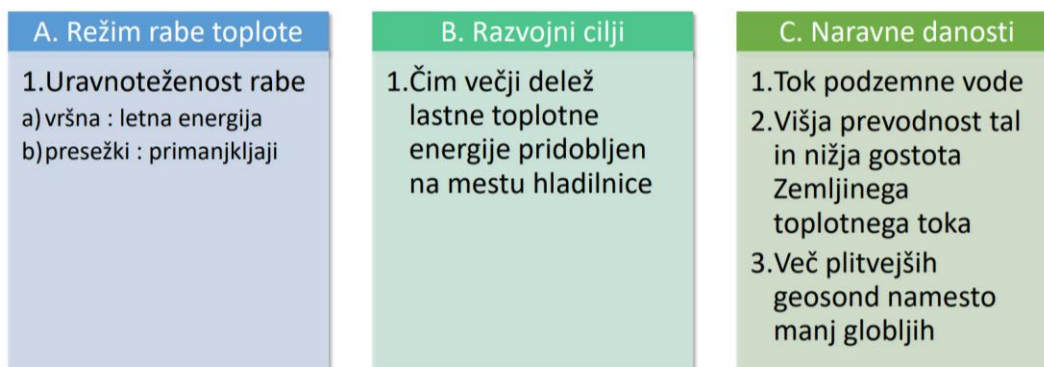
- 1) Robni pogoji ekonomske uspešnosti investicije
- 2) Pregled dostopnih virov energije in uporabnikov
- 3) Bilanca rabe energije in vršne moči
- 4) Pregled vhodnih geotermičnih podatkov
- 5) Robni pogoji za okoljski vpliv
- 6) Robni pogoji učinkovitosti naprave
- 7) Način sledenja dejanske učinkovitosti za vzdrževanje in izboljšave v času delovanja.

Za spodbujanje investicij v rabo geotermalne energije na kmetiji, v podjetju ali zadrugi je potrebno presojeti o naslednjih ključnih informacijah:

- Pregled nad presežki in primanjkljaji toplotne energije v predinvesticijski analizi
- Pregled nad dinamiko presežkov in primanjkljajev
- Določitev razreda zmogljivosti geosonde ali vodnjaka
- Analizo in načrt možnega uravnoteženja rabe toplote oziroma podtalja kot hranilnika toplote

Kot štiri prednostne kriterije za izbiro projektov za sofinanciranje predlagamo (Slika 35):

1. Jasni razvojni cilji in robni pogoji
2. Načrt režima delovanja je optimalen glede na naravne danosti
3. Načrt načina toplotne izmenjave je optimalen glede na naravne danosti
4. Uporabljajo se rešitve, ki vključujejo ogrevanje in hlajenje



Slika 35: Prikaz vsebine in posledic predlaganih prednostnih kriterijev

Ključno sporočilo

Za zanesljivo in natančno oceno upravičenosti uporabe geotermalnega sistema je potrebna poglobljena energijska in finančna analiza vsakega primera posebej. Kakorkoli, upravičenost uporabe geotermalne energije oziroma ponora toplote za potrebe ogrevanja in hlajenja na tipičnem kmetijskem poslopju lahko s sorazmerno veliko gotovostjo potrdimo s pozitivnimi odgovori na naslednja vprašanja:

- Ali se večina energije za potrebe hlajenja uporabi v najbolj vročih dneh oz. ali hladilnica obratuje celo leto?
- Ali sta ogrevanje in hlajenje sklopljena preko sezonskega hranilnika toplote?
- Ali je hladilna moč geotermalnega hladilnega sistema dovolj velika, da v celoti pokriva dobitke hladilnice v najbolj vročih dneh?
- Ali je količina prenesene toplote v in iz tal uravnotežena?

Kljub morebiti ugotovljeni upravičenosti investicije v izkoriščanje PGTE, gre pri tovrstnih projektih praviloma za sorazmerno nizke vrednosti IRR, NPV oziroma za sorazmerno dolgo vračilno dobo. Največji vpliv na donosnost imajo cena energije, moč geosonde in letna obremenitev.

Zaključne smernice za implementacijo

- PGTE je najbolj smiselna v okoljih z:
 - **velikimi sezonskimi razlikami** v potrebah po toploti in hladu,
 - **sočasno rabo ogrevanja in hlajenja** (npr. hladilnice + bivalni prostori),
 - možnostjo **povezovanja odpadne toplote** in sezonske akumulacije.
- Za učinkovito izvedbo so ključni:
 - **prilagojen sistem strojnih instalacij, ki omogoča integracijo ponorov in izvorov toplote,**
 - **natančna karakterizacija tal in objekta,**
 - **večkriterijski izbor tehnologij** (energetski, okoljski, ekonomski vidiki),
 - **monitoring porabe in prilagodljivost režimov obratovanja.**

7.9. Izvedba javnih delavnic in predstavitev projekta

Predlog smernic za izvedbo hladilnic na kmetijah z rabo plitve geotermalne energije se je najbolj podrobno in tehnično usmerjeno predstavil kot del Delavnice o nadgradnji Smernic za vrtanje v plitvi geotermiji, ki se je odvila 10. 9. 2025 v Ljubljani [COBISS.SI-ID [250597635](#)]. Vsebinsi sta močno

komplementarni, saj smo razpravljali o naših izkušnjah z (ne)uporabo Smernic za vrtnanje pri izgradnji raziskovalne vrtine GCF-1/24, hkrati pa predstavili povsem nov pristop Geo-COOL FOOD, smernice, ki izpostavljajo posebnosti pri načrtovanju hlajenja, torej pri uporabi tal za podzemno skladiščenje toplotne energije.

Rezultate meritev in ocene potenciala za njihove hladilnice smo pilotnima kmetijama predstavili 10. 6. 2025.

Projekt GeoCOOL FOOD in njegove rezultate smo predstavili na več strokovnih srečanjih agronomov: 37. tradicionalnem posvetu JSKS na Bledu l. 2022; 22. 11. 2024 v Ljubljani [COBISS.SI-ID [217524227](#)]; 28. Pirčevih dnevih 20. 2. 2025 v Ljubljani [COBISS.SI-ID [227097859](#)], Sejmu AGRA 25. 8. 2025 v Gornji Radgoni [COBISS.SI-ID [250603523](#)] in tedenskem spletnem srečanju svetovalcev za sadjarstvo 1. 10. 2025.

Strokovnjakom geoznanosti smo rezultate predstavili na strokovnih in znanstvenih srečanjih: delavnici za podzemno skladiščenje toplote 20. 4. 2023 na Nizozemskem, na letnem sestanku direktorjev evropskih geoloških zavodov 12. 9. 2023 v Ljubljani, 26. posvetovanju slovenskih geologov 1. 10. 2023 v Ljubljani [COBISS.SI-ID [250603523](#)] in mikrokonferenci o skladiščenju energije 11. 3. 2024 na Cipru [COBISS.SI-ID [189654787](#)]. Zelo pomembna nam je predaja izkušenj mladim znanstvenikom, zato je sodelujoči mladi raziskovalec Karlo Borko predstavil izveden test toplotnega odziva na geosondi GCF-1/24 kolegom na European Geothermal PhD Days v Szegedu 9. in 10. 4. 2025 [COBISS.SI-ID [235572995](#)] ter 2. 7. 2025 na terenskem dnevu tretje poletne geotermalne šole v Ljubljani (<https://www.geo-zs.si/wp-content/uploads/2025/09/202506-GTSS-abstract-book-Ljubljana-1.pdf>).

Poleg teh je bil projekt GeoCOOL FOOD omenjen tudi na regionalnem naučno-stručnem svetovanju 20. 11. 2024 v Sarajevu [COBISS.SI-ID [216981251](#)] in na letni skupščini Sekcije za seizmologijo in fiziko notranjosti Zemlje v Ljubljani v poročilih o delu za leto 2023 (http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/sugg/porocila/2023/IASPEI_SZGG_2023.pdf) in 2024 (https://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/porocila/2024/IASPEI_SZGG_2024.pdf).

V času projekta smo tudi uspeli objaviti en znanstveni članek v reviji Renewable energy (A") z naslovom Effects of groundwater flow on end-temperature of closed-loop systems used for cooling. Renewable energy [COBISS.SI-ID [246318595](#)].

Rezultati projekta bodo prosto dostopni na projektnih spletnih straneh v slovenskem in angleškem jeziku: <https://www.geo-zs.si/projekt/geocool-food-hladno-skladiscenje-hrane-z-rabo-plitve-geotermalne-energije/> in <https://www.geo-zs.si/en/projekt/geocool-food-hladno-skladiscenje-hrane-z-rabo-plitve-geotermalne-energije/>, osnovne informacije so objavljene tudi na straneh UL BF <https://www.bf.uni-lj.si/sl/raziskave/raziskovalni-projekti/2022092215002684/geocool-food--hladno-skladiscenje-hrane-z-rabo-plitve-geotermalne-energije> in IJS https://ceu.ijs.si/en/podrocja_dela/obnovljivi-viri-soproizvodnja-in-lokalna-energetika/.

Splošna javnost je bila o projektu obveščena preko več medijev, s poljudnimi prispevki v Lider.si, spletnih straneh STA in v Gorenjskem glasu. Tuja javnost je bila obveščena preko spletnega portala Thinkgeoenergy (<https://www.thinkgeoenergy.com/research-in-slovenia-evaluates-the-use-of-geothermal-for-cold-storage-of-agricultural-produce/>)

8. Zaključki in priporočila naročniku

Dvig ozaveščenosti o potencialu in možnostih rabe plitve geotermalne energije ter načinu izvedbe naprav za zajem

Kljub stalni rasti sektorja rabe plitve geotermalne energije v Sloveniji, v treh letih izvedbe projekta GeoCOOL FOOD nismo izvedeli za nobeno novo rabo v kmetijstvu in ostaja število sistemov takšne rabe enako nič.

Ob številnih terenskih pregledih smo spoznali, da marsikatera kmetija uporablja plitvo geotermalno energijo za ogrevanje (in hlajenje) stanovanjskih hiš. Takšna raba je v Sloveniji vsekakor najbolj pogosta, saj imamo več kot 17 tisoč individualnih enot, zato ne moremo trditi, da kmetije niso seznanjeni s tehnologijo. **Opazen pa je ogromen razkorak med tipsko, obrtniško rabo plitve geotermalne energije in uporabo naprednih sistemov**, ki zahtevajo natančno načrtovanje in dimenzioniranje, ki je časovno in stroškovno zahteven proces. To je opazno celo v raziskavah, saj je (še vedno) zelo malo informacij in projektov, kjer bi plitvo geotermalno energijo uporabljali v hladilnicah, skladiščili presežno toploto iz hlevov v tleh, uporabljali vodo za namakanje in ogrevanje rastlinjakov, in podobno.

Zato menimo, da je za **premik v razumevanju tehnoloških (z)možnosti in ekonomski privlačnosti takšnih projektov nujna sistemska podpora inovativnih pilotnih projektov na kmetijah**. Ti morajo biti izrazito interdisciplinarni, zagotavljati princip krožnega gospodarstva ne le za surovine in vire na kmetiji, ampak tudi za načrtovanje njihove energetske samozadostnosti. Zato potrebujejo sodelovanje agronomske, energetske, geološke, strojniške in drugih strok. Predlagan metodološki princip je opisan dosežkih projekta GeoCOOL FOOD in povzet v smernicah, pri čemer zagotovo obstajajo možnosti za izboljšavo pristopa s sprotim učenjem med implementacijo na konkretnih pilotnih projektih.

Ob tem opozarjamo na potrebo po **dvigu ozaveščenosti potrošnikov - naročnikov izvedbe vodnjakov in geosond o njihovih pravicah**. Investicija zlahka obsega nekaj tisoč do deset tisoč evrov, vendar naročnik prepogosto ne razpolaga z nobeno dokumentacijo o izvedbi. Na terenu razen objekta samega pogosto ni bilo na voljo pisnih podatkov o globini objekta, o gladini, temperaturi in količini podzemne vode, o energetske kapaciteti in podobno. Čeprav so Smernice za vrtanje v plitvi geotermiji prosto dostopne na spletnih straneh MOPE, so slabo poznane in se v praksi pomanjkljivo uporabljajo, s tem pa se dolgoročno izgubljajo zelo dragoceni podatki o podpovršju Slovenije in zato se geološko tveganje za nove zajeme, kljub ogromnem številu obstoječih objektov za zajem plitve geotermije, bistveno ne zmanjšuje.

Spodbujanje rabe plitve geotermalne energije v kmetijstvu s stopenjskimi razpisi

Rezultati kažejo, da raba plitve geotermalne energije ni preprosta niti tipska in zahteva zelo podrobno interdisciplinarno študijo energetskih virov in potreb vsakega kmetijskega gospodarstva, katerega del je tudi hladilnica. To poleg razvojnih ciljev kmetij seveda zahteva tudi čas in denar. Zelo pomemben rezultat projekta je ugotovitev, da je investicijski strošek v rabo plitve geotermalne energije v primerjavi z drugimi obnovljivimi viri relativno visok, zato bo **njena raba za kmetije zanimiva le, v kolikor bo investicija podprta z ustreznimi subvencijami**.

Na podlagi pridobljenih izkušenj predlagamo za tri faze razvoja in subvencioniranja projektov.

- 1) Analiza naravnega potenciala in energetskih virov na kmetijskem gospodarstvu

Kot prvi korak odločanja o novi investiciji je potrebno za vsako lokacijo posebej analizirati: ekonomsko uspešnost investicije in razvojne cilje kmetije, pregledati vire in porabnike energije ter izračunati čim

bolj podrobno bilanco rabe toplotne in električne energije s potrebnimi vršnimi močmi. Izmed naravnih in tehničnih danosti so ključni geotermični podatki, okoljski vpliv naprave in njena učinkovitost ter dolgoročna učinkovitost delovanja. Režimi delovanja (hladilnic) povzročajo razlike med ekonomičnostjo lokacij, zato je potrebno opredeliti možne povezave virov in ponorov energije in morebiti potrebnih zalogovnikov. Potrebno je upoštevati tudi kombinacije virov, na primer z vodnjaki za zalivanje, skladiščenjem presežne električne energije iz sončnih elektrarn in podobno. Za metodološki pristop se priporoča uporaba dosežkov M2_1, M2_2, M3_1.

Prva faza razpisov naj krije izvedbo energetskega pogleda kmetij in analize naravnega potenciala, kjer se kot sintezni rezultat poda predlog za kombinirano in uravnoteženo rabo energetskih virov.

2) Dimenzioniranje sistemov rabe plitve geotermalne energije

V naslednji fazi se glede na ugotovljene vire in porabnike izbere optimalna tehnologija zajema plitve geotermalne energije, določi njena morebitna kombinacija z drugimi obnovljivimi viri in dimenzionira objekte za zajem (vodnjake, geosonde). Prednost pri tej študiji naj imajo lokacije, kje je možno pridobiti več energije, pokriti večji delež potreb z OVE ter čim bolj uravnotežiti odvzem in skladiščenje toplote, da bo dolgoročni vpliv na okolje čim nižji. Za metodološki pristop se priporoča uporaba dosežkov M4_1, M7_1 in Smernic za vrtnanje v plitvi geotermiji, do 300 m.

Druga faza razpisov naj krije pripravo izvedbenega načrta tako podzemnih objektov kot tudi površinskih inštalacij za povezavo virov in porabnikov v en energetski sistem ter njegovo ekonomsko oceno, da se zagotovijo vsi podatki za tretjo fazo razpisov.

3) Investicija v zajem plitve geotermalne energije

Na podlagi rezultatov obeh faz bo mogoče prepoznati, kje z najmanjšim ekonomskim vložkom najbolj povečamo doseganje ciljnih vrednosti sektorja (odvisno od tipa kazalnikov). Tretja faza pomeni realizacijo izbranih, najbolj optimalnih investicijskih projektov. Ob tem morajo biti postavljene tudi zahteve po stalnem merjenju in opazovanju učinkovitosti delovanja sistema.

Tretja faza razpisov naj pokriva dejansko investicijo, torej izgradnjo podzemnega in površinskega sistema rabe z opazovanjem stanja.

Za izvedbo predlaganega pristopa je smiselno pripraviti nadaljevalni CRP, kjer bi glede na izkazan interes kmetij lahko pripravili tipske inovativne rešitve za različne tipe kmetijskih gospodarstev, lokacij in različne režime rabe ogrevanja in hlajenja.

Rezultati projekta potrjujejo širok potencial za uporabo plitve geotermalne energije v kmetijstvu, pri čemer razvita metodologija omogoča neposredno in učinkovito implementacijo v različne tipe objektov. Tehnologija je še posebej primerna za kmetijske hladilnice, kjer je raba hlajenja največja v poletnem času ali celoletna. To omogoča stabilno obratovanje toplotnih črpalk z visokimi sezonskimi izkoristki in pomembno zmanjšanje rabe električne energije. Nadaljnje pomembno področje uporabe so rastlinjaki in pridelovalne površine, kjer je za ogrevanje značilna nizkotemperaturna raven, ki je povsem združljiva z geotermalnimi viri. Tehnologija je enako primerna za stanovanjske stavbe na kmetijah ter za mlekarne in druge procesne objekte, kjer obstaja izrazita potreba po sočasni rabi toplote in hladu. Poseben potencial predstavlja tudi integracija več objektov na isti lokaciji v enoten sistem z zalogovnikom toplote in geosondo, kar izboljša izrabo vira ter poveča ekonomsko učinkovitost sistema. Zaradi modularnosti in reverzibilnosti tehnologije je mogoče geotermalne sisteme razmeroma

enostavno vključiti v obstoječe objekte, kar zmanjšuje investicijska tveganja ter omogoča fazno uvajanje rešitev.

Za učinkovito širšo uporabo tehnologije so potrebne dodatne ciljno usmerjene raziskave in razvojni ukrepi. Pomembno področje predstavlja natančnejša karakterizacija slovenskih tal in razvoj orodij za hitro oceno potenciala geosonde na posamezni lokaciji, kar bi omogočilo enostavno predhodno presojo primernosti izvedbe. Nadalje je smiselno razviti standardizirane tipologije objektov (hladilnice, rastlinjaki, predelovalni obrati), ki bi omogočale poenostavljene tehnične in ekonomske presoje izvedljivosti. Pomemben doprinos bi predstavljal vzpostavljen sistem eksperimentalnega monitoringa izbranih pilotnih objektov, s katerim bi potrdili simulacijske modele ter določili zanesljive vrednosti sezonskih grelnih števil v realnih pogojih.

Dodatne raziskave naj bodo usmerjene tudi v optimizacijo hibridnih sistemov, ki združujejo geotermalne vire in zrak, ter razvoj naprednih strategij krmiljenja glede na vremenske razmere, obremenitve in cene energentov. To bi omogočilo doseganje višjih sezonskih izkoristkov in dodatno znižanje stroškov obratovanja. Na ravni ekonomike in financiranja je potrebna izdelava robustnih modelov za različne tipe kmetij, ki bodo upoštevali stroške investicije, spodbude, cene energentov in zmanjšanje emisij CO₂. Na institucionalni ravni pa se kot pomemben korak kaže analiza pravno-upravnega okvira in možnost poenostavitve postopkov za manjše geotermalne sisteme, zlasti v povezavi z dovoljenji in soglasji.

Strateško gledano rezultati projekta predstavljajo pomemben temelj za prehod iz posamičnih pilotnih analiz v sistemske implementacije, ki bi lahko vključevale večje število kmetij in regionalno zasnovane energetske rešitve. Na ta način bi bilo mogoče povečati stopnjo energetske samooskrbe kmetijskega sektorja, zmanjšati emisije toplogrednih plinov in izboljšati konkurenčnost slovenskega kmetijstva. Nadaljevanje raziskav in razvojno-demonstracijskih projektov bi omogočilo vzpostavitev nacionalnega okvirja za širšo uporabo plitve geotermalne energije ter pripravilo pogoje za standardizirane, okoljsko in ekonomsko učinkovite rešitve v praksi.

Če povzamemo - čeprav projekt ponuja trdno tehnično in metodološko osnovo, so za učinkovito širšo uporabo potrebne **ciljno usmerjene raziskave in razvoj**:

- **Natančna karakterizacija slovenskih tal in razvoj poenostavljenih orodij za hitro oceno potenciala geosonde** na konkretni lokaciji (npr. "geotermalni kalkulator" za kmetijska gospodarstva).
- **Razvoj standardiziranih tipologij objektov** (hladilnice, rastlinjaki, predelovalni obrati), ki bi omogočale hitrejšo tehnično in finančno presojo izvedljivosti.
- **Eksperimentalni monitoring realnih objektov** – dolgoročne meritve delovanja sistemov v različnih klimatskih razmerah za kalibracijo simulacijskih modelov in določitev zanesljivih SCOP vrednosti v praksi.
- **Optimizacija hibridnih sistemov** (zrak + geotermija) in inteligentnih strategij preklapljanja glede na vremenske razmere in obremenitve, z namenom povečanja letne učinkovitosti in zmanjšanja stroškov.
- **Ekonomske in finančne modeli** za različne tipe kmetij (majhne družinske, zadruge, agroindustrija) – vključno z vplivom cen energentov, spodbud in ogljičnega odtisa.

- **Pravno-upravni okvir** – analiza možnosti za poenostavitev postopkov DRSV za manjše sisteme ter razvoj smernic za pospešeno umeščanje geotermalnih naprav v prostor.

Orodja za ugotavljanje in sledenje presežkov ter primanjkljajev toplote

Rezultati projekta so pokazali, da ima uporaba plitve geotermalne energije v kmetijstvu največji potencial v primerih, kjer **obstajajo sočasne ali sezonsko komplementarne potrebe po toploti in hladu** (hladilnice, rastlinjaki, mlekarne, stanovanjski objekti). Za učinkovito izrabo teh sinergij je ključno **poznavanje časovne dinamike toplotnih tokov**, kar omogoča pravočasno prepoznavanje **presežkov toplote v obdobjih hlajenja ter primanjkljajev toplote v obdobjih ogrevanja**. Ta spoznanja so neposredno vodila do potrebe po razvoju in uporabi orodij, ki omogočajo sledenje toplotnim bilancam, optimizacijo obratovanja in dimenzioniranje sezonskih zalogovnikov toplote.

V okviru metodološkega pristopa projekta, ki združuje **dinamično simulacijo hladilnic in analizo delovanja toplotnih črpalk**, bi lahko v prihodnjih fazah razvili integriran modul za sledenje toplotnim presežkom in primanjkljajem. Tak modul bi temeljil na kombinaciji računskih modelov (EnergyPlus, IDA ICE ali TRNSYS) ter realnih meritev porabe energije in bi omogočal analizo, kako se presežna toplota iz hladilnic ali procesov lahko akumulira v tleh preko geosonde ter uporabi v ogrevalni sezoni.

Za **operativno spremljanje** v realnem času bi se lahko uporabil sistem **SCADA ali IoT-platforma**, ki bi beležila pretoke toplote, COP toplotne črpalke in temperaturo v zalogovniku. Na osnovi teh podatkov bi bilo mogoče izvajati dinamično bilanciranje sistema – torej sprotno prilagajanje delovanja med geotermalnim in zračnim virom glede na trenutno učinkovitost (COP) in temperaturne pogoje. S tem bi sistem deloval s stalno optimiziranim izkoristkom in minimalno porabo električne energije.

V raziskovalnem smislu bi uvedba teh orodij omogočila kalibracijo simulacijskih modelov, ki so bili razviti v projektu, z realnimi podatki z delujočih objektov. To bi pomenilo pomemben korak k razvoju digitalnega dvojčka kmetijskega energetskega sistema, s katerim bi bilo mogoče simulirati različne scenarije obratovanja (npr. spremembe zunanjih temperatur, cen elektrike ali obremenitev). Tak pristop bi omogočil tudi predikcijo energetskih presežkov in predlaganje optimalnih ukrepov za njihovo shranjevanje ali uporabo v drugih procesih na kmetiji.

Povezava orodij za ugotavljanje in sledenje toplotnih bilanc z metodologijo projekta GeoCOOL FOOD bi torej predstavljala **naslednjo stopnjo razvoja koncepta geotermalne samooskrbe**. V prihodnjem raziskovalnem obdobju bi bilo smiselno razviti demonstracijski sistem s celovito energetsko bilanco – od meritev pretokov in COP v realnem času do napovednega modeliranja in avtomatiziranega krmiljenja. Tak sistem bi omogočil ne le tehnično optimizacijo, temveč tudi **ekonomsko oceno učinkovitosti sezonskega shranjevanja toplote**, s čimer bi Slovenija pridobila enega prvih pilotov celovitega upravljanja plitve geotermalne energije v kmetijstvu.

Nadaljevanje meritev klime v hladilnicah

Zaradi velikega pomena zbiranja realnih podatkov o energetskih potrebah hladilnic bomo na GeoZS do nadaljnega nadaljevali z zveznimi urnimi meritvami temperature in relativne vlage v njih. Iz teh podatkov je z modeli možno zelo natančno oceniti vršne in povprečne potrebe opazovanih hladilnic, ki zaenkrat služita kot tipska primera za vse nadaljnje raziskave.

Nadaljevanje raziskav na pilotni lokaciji hladilnice v Brodu v Podbočju in orodje za programiranje »pametne geosonde«

Na konkretnem primeru zaprtega sistema rabe zemlja-voda - geosonde v Brodu v Podbočju smo z izračuni pokazali ekonomske in okoljske prednosti dvojne rabe plitvega podtalja, tako za hlajenje kot ogrevanje.

Nova raziskovalna vrtina – geosonda GCF-1/24 se trenutno uporablja kot **geološko-energetski laboratorij v naravi**. Edina v Sloveniji omogoča preizkušanje nove geotermične metode izboljšane testa toplotnega odziva (eTRT), saj ima stalno vgrajena DTS optična vlakna, ki lahko merijo spremembe temperature z vertikalno resolucijo 65 cm. V njej se na 4 mestih med 6 in 100 m globine urno meri temperatura tal, kar omogoča zanesljivo oceno sezonskega vpliva sončnega obsevanja na potencial plitve geotermije in morebitno zaznavanje sovpliva z v bližini delujočim parom geosond za ogrevanje in hlajenje hiše.

V fazi projekta GeoCOOL FOOD sta bila izvedena le geosonda GCF-1/24 in jašek, zato je za njen priklop v sistem rabe potrebna nadaljnja investicija za povezavo do končnega porabnika (hladilnice) in energetske prestrukturiranje sistema rabe. Zato si želimo nadaljevanja projekta, ki bo omogočil **razvoj v enoten, samooskrben in digitalno opremljen sistem ogrevanja in hlajenja kmetijskega gospodarstva** ter s pridobivanjem električne energije z drugimi obnovljivimi viri energije (sončno energijo že izrabljajo). Zaradi izjemne tehnične zasnove geosonde (optična vlakna, opazovalna cev), ki omogoča izvedbo meritev po celotni dolžini tudi med rednim delovanjem, bo njen **raziskovalni potencial polno izkoriščen šele med redno uporabo za proizvodnjo in podzemno skladiščenje plitve geotermalne energije**. Dolgoročno na GeoZS načrtujemo opremljanje geosonde z več naprednimi napravami za meritve stanja v podtalju in jo želimo razviti v »pametno geosondo«, zato je lahko **predmet nadaljnjih projektov tudi razvoj orodja za programiranje in delovanje »pametne geosonde«**. S tem bo doprinesla nove in ažurne geotermične informacije širši znanstveni skupnosti.

Nova geosonda GCF-1/24 lahko pokriva le slabo desetino realnih energetskih potreb razmeroma velike opazovane hladilnice, zato so ekonomski prihranki trenutnega prehoda na rabo plitve geotermalne energije zanemarljivi in amortizacijska doba več kot 50 let. Omejena kapaciteta ne zadošča za pokrivanje velikih vršnih moči ob dostavah pridelka za skladiščenje, zato bi zanj še vedno potrebovali dodatni vir (toplotne črpalke na zrak), torej dvojno tehnologijo. Ta geosonda tudi, kljub skladiščenju presežne toplote iz hladilnice v tla, ni sposobna pokriti potreb za ogrevanje bližnjega rastlinjaka solate, zato pristopa nismo dodatno raziskovali.

Možno rabo geosonde smo našli v povezavi z manjšo hladilnico pri trgovini in obstoječima geosondama za stanovanjsko hišo. Uskladiščena presežna toplota hladilnice s stalno notranjo temperaturo 6 °C in manjšimi vršnimi močmi bi lahko pomagala zagotoviti dovolj toplote za ogrevanje objekta tudi ob koncu ogrevalne sezone. Za ustrezno načrtovanje prehoda je potrebno mapirati dejanske energetske potrebe hladilnice in hiše in se na podlagi rezultatov odločiti, ali geosonda zadostuje ali je potreben hibridni sistem.

Na lokaciji smo na globili do 11 m sicer navrtali podzemno vodo, vendar kapaciteto sloja ocenjujemo na nizko in gladino vezano na gladino bližnje reke Krke. Tudi idejo o možnosti rabe površinske vode iz Krke za namakanje in/ali ogrevanje-hlajenje smo zaradi okoljskih omejitev, vezanih na nizko poletno gladino reke, opustili.

Nadaljevanje raziskav na pilotni lokaciji hladilnice Juršinci

Opazovana srednje velika hladilnica je razmeroma nova in še ne potrebuje energetske sanacije. Ker

večji del poletja ne deluje, prehod na rabo plitve geotermalne energije izgubi veliko prednosti, zato menjava energenta ni trenutno smiselna. Obstoječi geosondi zadostujeta za ogrevanje in hlajenje hiše, bližnji 30 m vodnjak pa se občasno uporablja za namakanje in ima ocenjeno prenizko kapaciteto, da bi ga bilo smiselno uporabljati za ogrevanje rastlinjaka s sadikami.

Vseeno smo v razvojnih načrtih kmetije našli možno rabo plitve geotermalne energije. Ko bodo gradili nove objekte, bodo ti zaradi topografije terena izvedeni v pobočje – podkleteni. Taka izvedba stavb bi zagotovila dodatno toplotno izolacijo podkletenega dela in s tem zmanjšala potrebe po energiji, zato bi tudi geosonde postale možen vir energije toplote ali hladu.

10. Literatura

Adrinek, S., Prestor, J., Pestotnik, S., Rman, N. (2026) Effects of groundwater flow on end-temperature of closed-loop systems used for cooling. *Renewable Energy* 256/E, 124234, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124234>.

Alghannam, A. R. O. (2012) Investigations of Performance of Earth Tube Heat Exchanger of Sandy Soil in Hot Arid Climate. *Journal of Applied Sciences Research*, 8(6): 3044-3052.

ARSO (2025) Podnebne statistike 1950-2020 – letališče Cerklje ob Krki), https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/statistike_1950_2020/cerklje_ob_krki/

Banks, D. (2012) *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling* (2. ed.): Wiley-Blackwell.

Boughanmi, H. in sod. (2015) Thermal performance of a conic basket heat exchanger coupled to a geothermal heat pump for greenhouse cooling under Tunisian climate. *Energy and Buildings*. 104, 87-96.

Casasso, A., Sethi, R. (2016) G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential. *Energy*, 106, 765-773.

Cehte, K. (2016) Analiza delovanja hladilnice sadja in njena posodobitev: diplomska naloga. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana.

Dernovšek, G. (2008) Senzorji za analizo atmosfere v skladiščnih hladilnicah za sadje : diplomska naloga visokošolskega študijskega programa. Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor.

EGEC. (2021) *Geothermal Market Report 2020*.

García-Gil, A. in sod. (2015) GIS-supported mapping of low-temperature geothermal potential taking groundwater flow into account. *Renewable Energy*, 77, 268-278.

GeoZS (2021) Smernice za vrtanje v plitvi geotermiji (<https://www.energetika-portal.si/podrocja/rudarstvo/plitva-geotermalna-energija/#c1361>)

GU, G. in sod. (2022) Dynamics of *Listeria monocytogenes* and the microbiome on fresh-cut cantaloupe and romaine lettuce during storage at refrigerated and abusive temperatures. *International Journal of Food Microbiology*, 364: 109531.

Hadžić, M. (2019) Upravičenost vzpostavitve distribucijskega centra za sadje in zelenjavo na območju Ivančne Gorice : magistrsko delo. Fakulteta za logistiko, Maribor.

Harjunowibowo, D. in sod. (2021) Experimental investigation of a ground-source heat pump system for greenhouse heating-cooling. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(4): 1529-1541.

Hu, H., Zhao, H. (2021) The application of 1-methylcyclopropene preserves the postharvest quality of cabbage by inhibiting ethylene production, delaying chlorophyll breakdown and increasing antioxidant capacity. *Scientia Horticulturae*, 281: 109986.

- Iñigo, A. in sod. (2015) Country Update for the Spanish Geothermal Sector. Proceedings World Geothermal Congress.
- Kaučič, H. (2008) Primerjava senzoričnih lastnosti jabolk, skladiščenih v naravni in kontrolirani atmosferi: diplomska naloga. Živilska šola, Maribor.
- Kolbah, S. in sod. (2019) Geothermal Energy Use, Country Update for Croatia. Proceedings World Geothermal Congress.
- Korošec, A. (2007) Ekonomska analiza investicije hladilnice za sadje: magistrsko delo. Fakulteta za kmetijstvo in biosistemske vede, Maribor.
- Kovačič, M. (2001) Izkoriščanje odpadne toplote hladilnice sadja: diplomska naloga. Fakulteta za strojništvo Maribor.
- Kujbus, A. in sod. (2020) Strategic research innovation agenda for geothermal technologies. Brussels, Belgium: Secretariat of the geothermal panel of the RHC-Platform.
- Le, A. T. in sod. (2021) Measurement investigation on the feasibility of shallow geothermal energy for heating and cooling applied in agricultural greenhouses of Shouguang City: Ground temperature profiles and geothermal potential. Information Processing in Agriculture, 8(2): 251-269.
- Magraner, T. in sod. (2010) Comparison between design and actual energy performance of a HVAC-ground coupled heat pump system in cooling and heating operation. Energy and Buildings. 42(9): 1394-1401.
- Mongkon, S. in sod. (2014) Cooling performance assessment of horizontal earth tube system and effect on planting in tropical greenhouse. Energy Conversion and Management. 78, 225-236.
- Oliveira, M. in sod. (2010) Effects of packaging type and storage temperature on the growth of foodborne pathogens on shredded 'Romaine' lettuce. Food Microbiology, 27: 375-380.
- Poljak, M. (2019): Geološka karta vzhodnega dela Krške kotline 1:25000. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije.
- Poljak, M. & Rajver, D. (2006) Geološke in geotermalne raziskave v vrtini PDt, Brod pri Podbočju. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- PSS, (1991) Hladilnice v Sloveniji. Poslovna skupnost za sadje, krompir, vrtnine Slovenije.
- Osher, Y. in sod. (2018) Summer storage of cabbage." Postharvest Biology and Technology: 145, 144-150.
- Rajver, D. in sod. (2021) Uveljavljanje plitve geotermalne energije med drugimi obnovljivimi viri energije za ogrevanje in hlajenje. Mineralne surovine, 143-156.
- Rajver, D., Šafanda, J., Dedek, P. (2006) Monitoring of air-ground temperature coupling and examples of shallow subsurface warming in Slovenia. Geologija, 49/2, 279-293. <https://doi.org/10.5474/geologija.2006.021>
- Rajver, D., Adrinek, S. (2023) Overview of the thermal properties of rocks and sediments in Slovenia. Geologija, 66(1), 125–150. <https://doi.org/10.5474/geologija.2023.005>

Rman, N., Rajver, D., Lapanje, A. in sod. (2024) Strokovna podpora na temo geotermalne energije za MOPE za leto 2024. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije.

Roisek, S., Batlles, F. J. (2012) Shallow geothermal energy applied to a solar-assisted air-conditioning system in southern Spain: Two-year experience. *Applied Energy*, 100: 267-276.

Sass, I. in sod. (2016) Shallow Geothermal Systems – Recommendations on Design, Construction, Operation and Monitoring. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.

Seo, Y., Seo, U-N. (2021) Ground source heat pump (GSHP) systems for horticulture greenhouses adjacent to highway interchanges: A case study in South Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135: 110194.

Singh, R. in sod. (2020) Energy Efficient Design of Cold Storage (<https://ic-sd.org/wp-content/uploads/2020/11/Rishabh-Singh.pdf>)

Soltani Firouz, M. in sod. (2021) Effect of modified atmosphere packaging on the mechanical properties of lettuce during shelf life in cold storage. *Information Processing in Agriculture*, 8: 485-493.

Strgar, A., Rajver, D., Gosar, A. (2017) Investigations of the air - ground temperature coupling at location of the Malence borehole near Kostanjevica, SE Slovenia. *Geologija*, 60/1, 129 – 143. <https://www.geologija-revija.si/index.php/geologija/article/view/1394/1457>

Taniwaki, M., Takahashi, M. (2009) Effects of harvest time and low temperature storage on the texture of cabbage leaves. *Postharvest Biology and Technology*: 54, 106-110.

Tsagarakis, K. P. (2020) Shallow geothermal energy under the microscope: Social, economic, and institutional aspects. *Renewable Energy*, 147, 2801-2808.

Uwera, J. in sod. (2015) Design of a Cooling System Using Geothermal Energy for Storage of Agricultural Products With Emphasis on Irish Potatoes in Rwanda, Africa. *GRC Transactions*, 39: 157-164.

Verbovšek, R., Ravnik, D. (1986) Poročilo o geotermičnih raziskavah pri Topličniku (Kostanjevica) s predlogom lokacije strukturno-kaptažne vrtine globine 800 m. Arhiv GeoZS (GZL).

Verbovšek, R., Ločniškar, A., Ravnik, D. & Crnković, I. (1986) Raziskave termalne vode pri Kostanjevici. Geološki zavod Ljubljana, Ljubljana.

VDI, (2010) VDI 4640 Thermal use of underground. Blatt 1: Fundamentals, approvals, environmental aspects.

Watanabe, T. Nakamura, N. (2020) Relationships among expression of six representative genes, bacterial multiplication, color changes of fresh cut cabbages during storage with focus on accumulated storage temperature. *Food Control*: 113, 107190.

Wrobel, J. in sod. (2010) A Desiccant Assisted Air Conditioning System with Use of Geothermal Energy. *Proceedings World Geothermal Congress*.

Wu, H. in sod. (2007) Modelling and evaluation of cooling capacity of earth–air–pipe systems. *Energy Conversion and Management*, 48(5): 1462-1471.

11. Priloge*Priloga 1: Inventarizacija 49 hladilnic na kmetijah v Sloveniji*

Zap. št.	Vrsta pridelka	Y_D48	X_D48	E_D96	N_D96
1	Zelenjava	574523	150882	574154	151366
2	Zelenjava	568313	169034	567945	169518
3	Zelenjava	535092	80133	534721	80617
4	Zelenjava	580356	140711	579987	141195
5	Zelenjava	575312	137284	574943	137768
6	zelenjava	489288	86195	488917	86680
7	zelenjava	457908	102550	457537	103036
8	zelenjava	461914	105808	461543	106294
9	zelenjava	467626	103574	467255	104060
10	zelenjava	466719	103504	466348	103990
11	zelenjava	467632	103598	467261	104084
12	zelenjava	467286	105584	466915	106070
13	zelenjava	462790	105602	462419	106088
14	zelenjava	465627	117095	465256	117581
15	zelenjava	467722	103522	467351	104008
16	zelenjava	519910	57118	519539	57602
17	Sadje	514585	120594	514215	121079
18	Sadje	571872	154293	571503	154777
19	Sadje	539767	89551	539397	90035
20	Sadje	531530	93890	531160	94375
21	Sadje	530770	119061	530400	119546
22	Sadje	539261	135926	538892	136411
23	Sadje	540424	136903	540055	137388
24	Sadje	546585	140696	546216	141181
25	Sadje	532898	137304	532529	137789
26	Sadje	574555	153918	574186	154402
27	Sadje	575758	150227	575389	150711
28	Sadje	571897	154145	571528	154629
29	Sadje	577179	151510	576810	151994
30	Sadje?	571822	154503	571453	154987
31	Sadje	574510	146676	574141	147160
32	Sadje	571616	155770	571247	156254
33	ni podatka	537308	81470	536937	81954
34	ni podatka	532882	78577	532511	79061
35	ni podatka	531685	79436	531314	79920
36	ni podatka	518014	75444	517643	75929
37	ni podatka	528525	94640	528155	95125
38	ni podatka	535044	80675	534673	81159
39	ni podatka	535092	80133	534721	80617
40	ni podatka	537406	81315	537035	81799

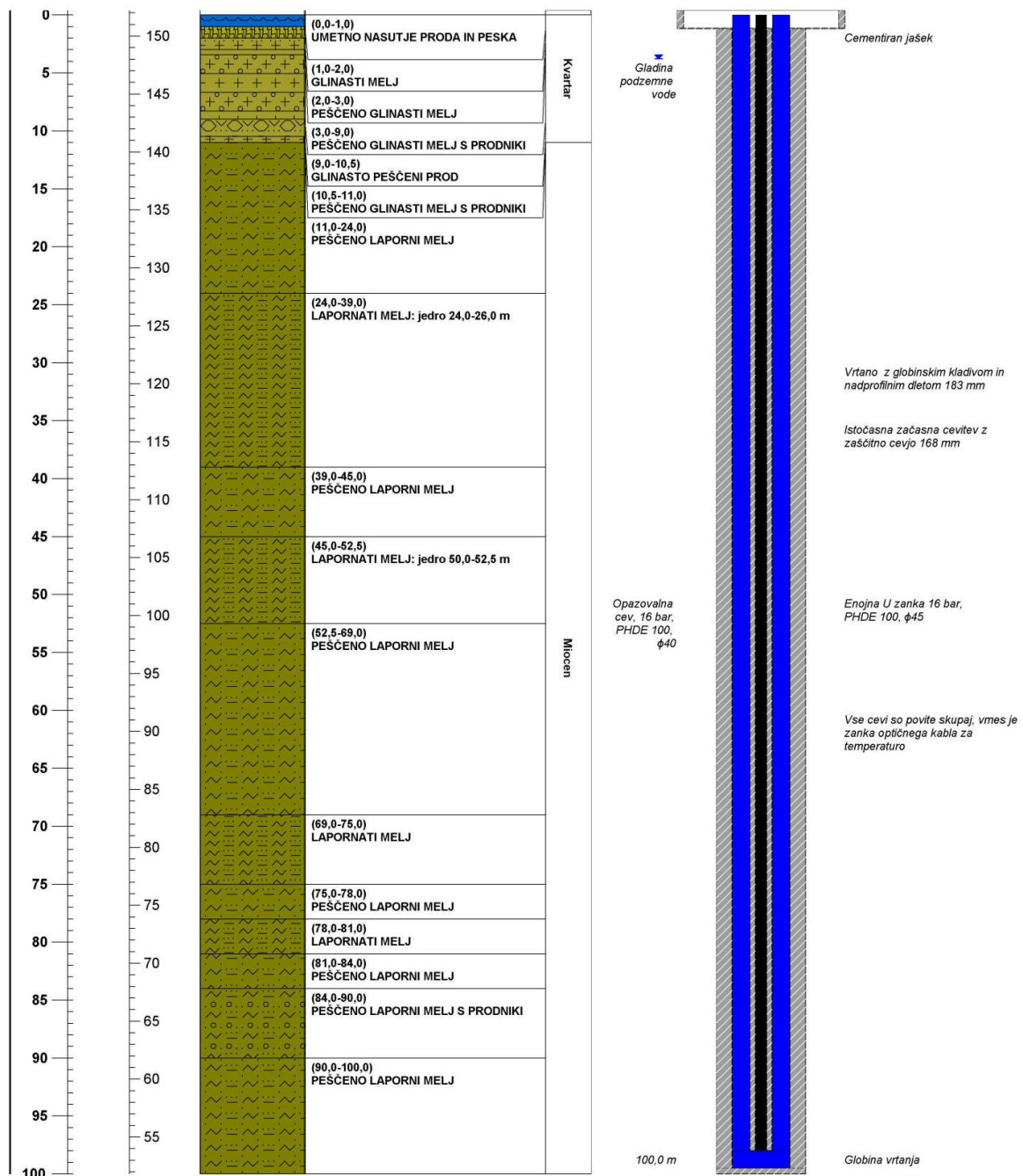
Zap. št.	Vrsta pridelka	Y_D48	X_D48	E_D96	N_D96
41	ni podatka	539119	80540	538748	81024
42	ni podatka	518351	77919	517980	78404
43	ni podatka	518662	74826	518291	75311
44	ni podatka	543708	92796	543338	93280
45	ni podatka	539410	85887	539039	86371
46	ni podatka	584303	141705	583934	142189
47	ni podatka	581357	143428	580988	143912
48	ni podatka	585251	141498	584882	141982
49	ni podatka	448143	94501	447772	94988

Priloga 2: Geotermični parametri iz javnih podatkovnih slojev za hladilnice zelenjave in brez znanega pridelka

Zap št	Toplotna prevodnost vrhnjih geoloških plasti (W/ mK)	Volumska toplotna kapaciteta kamnin in zemljin (kJ/K)	Možnosti uporabe sistemov geotermalnih toplotnih črpalk	Pričakovana temp. na globini 100 m (°C)	Temperatura na površini trdnih tal (°C)	Gostota toplotnega toka (mW/m ²)	Gostota toplotnega toka (mW/m ²)* (aplikacija Geotermija)	Hidrogeološka karta
1	1,7	2,3	Pogosto voda-voda	14,6	11,5	90	88,1	I.b
2	2,1	2,2	Najpogosteje zemlja-voda navpični/vodoravni	17,3	11,1	120	99	III.a
3	1,7	2,3	Pogosto voda-voda	15,8	11,9	70	59,4	I.b
4	1,7	2,3	Najpogosteje voda-voda	14,8	11,8	90	90	I.a
5	1,7	2,3	Najpogosteje voda-voda	14,0	11,8	80	79,9	I.a
6	2,8	2,2	Najpogosteje zemlja-voda navpični	11,3	10,7	50	56,8	II.b
7	2,5	2,2	Najpogosteje zemlja-voda navpični/vodoravni	12,4	11,1	80	77,9	III.a
8	1,7	2,3	Najpogosteje voda-voda	13,5	11,2	80	80,4	I.a
9	1,7	2,3	Najpogosteje voda-voda	13,3	11,3	80	88,3	I.a
10	1,7	2,3	Najpogosteje voda-voda	13,4	11,3	80	88,3	I.a
11	1,7	2,3	Najpogosteje voda-voda	13,3	11,3	80	88,3	I.a
12	1,7	2,3	Pogosto voda-voda	13,3	11,3	90	90,6	I.b
13	1,7	2,3	Najpogosteje voda-voda	12,6	11,2	80	80,4	I.a
14	1,4	2,3	Najpogosteje zemlja-voda navpični/vodoravni	11,7	10,8	60	55,4	III.a
15	1,7	2,3	Najpogosteje voda-voda	13,3	11,3	80	88,3	I.a
16								
33	1,7	2,3	Pogosto voda-voda	13,9	11,9	60	48,5	I.b
34	1,7	2,3	Pogosto voda-voda	17,4	11,9	80	66,4	I.b
35	1,4	2,3	Najpogosteje zemlja-voda navpični/vodoravni	17,7	11,9	70	66,7	III.a
36	0,6	1,5	Najpogosteje zemlja-voda navpični/vodoravni	14,9	11,6	50	50,4	III.c
37	1,7	2,3	Pogosto voda-voda	12,3	11,8	60	58,7	I.b
38	1,7	2,3	Najpogosteje voda-voda	15,8	11,9	70	59,4	I.a
39	1,7	2,3	Pogosto voda-voda	15,8	11,9	70	59,4	I.b
40	1,7	2,3	Pogosto voda-voda	13,9	11,9	60	55,6	I.b
41	1,7	2,3	Pogosto voda-voda	13,9	11,9	60	56,9	I.b
42	4,08	2,4	Pogosto voda-voda	14,9	11,7	50	52	II.a
43	2,8	2,2	Najpogosteje zemlja-voda navpični	13,5	11,6	50	50,4	II.b
44	2,8	2,2	Najpogosteje zemlja-voda navpični	11,3	11,6	50	51,1	II.b
45	1,7	2,3	Najpogosteje voda-voda	13,8	12,0	40	44,2	I.a
46	1,7	2,3	Najpogosteje voda-voda	14,8	11,8	90	99,8	I.a
47	1,7	2,3	Najpogosteje zemlja-voda navpični/vodoravni	14,8	11,7	90	90,6	III.a
48	1,7	2,3	Najpogosteje voda-voda	14,8	11,9	90	99,8	I.a
49	1,4	2,3	Najpogosteje zemlja-voda navpični/vodoravni	13,2	11,2		63,3	III.c

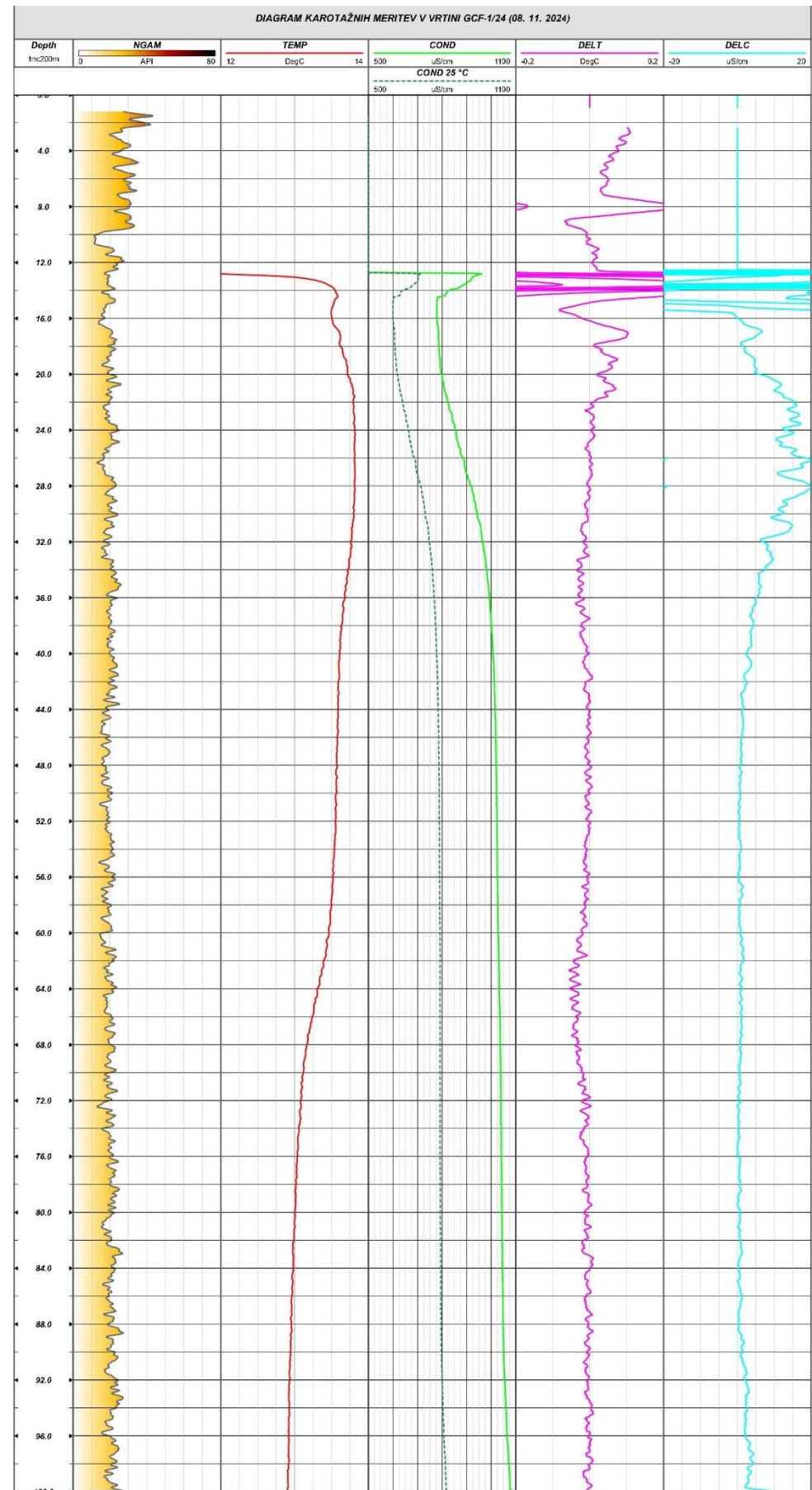
Priloga 3: Litološki in tehnični profil geosonde GCF-1/24

GEOLOŠKI ZAVOD SLOVENIJE Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana www.geo-zs.si E mail: www@geo-zs.si Tel. +386 1 280 97 00					
Litološki popis in tehnični profil geosonde GCF-1/24					
Ime: GCF-1/24		Tip vrtnice: Raziskovalna geosodna		Način vrtnja: Udarno-rotacijsko	
Datum: 5. - 13.11.2024		GPVS: /			
Mesto: Brod v Podbočju 4, 8312 Podbočje		N D96= 534683,167		Kota terena Z= 151,82 m.n.m.	
Vrh železnega jaška Z= 151,84 m.n.m.		E D96= 80590,709			
Globina	Kota	Shematski litološki prikaz	Litološki opis	fm.	HG pojavi med vrtnjem
Konstrukcija vrtnice					



Objekt: Raziskovalna geosonda GCF-1/24	Izvajalec vrtnja: Minervo d.o.o.	Merilo: 1:100
Poročilo: Poročilo o izgradnji raziskovalne geosonde GCF-1/24 v Brodu v Podbočju	Obdelal: Kristina Ivancić, Karlo Borko, Nina Rman, Andrej Lapanje, Aljaž Ciglar (GeoZS)	Priloga: 2
Naročnik: Geološki zavod Slovenije		

Priloga 4: Rezultati karotažnih meritev v GVF-1/24 z dne 8. 11. 2024



Priloga 5: Rezultati terenskih geotermičnih meritev karbonatnih kamin pri Kostanjevici

Vzorec	k_T (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Rel. napaka k_T	rho (°C cm W ⁻¹)	Vzorec	k_T (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Rel. napaka k_T	rho (°C cm W ⁻¹)
1	5,010	0,1061	20,0	26C	2,072	0,033	48,3
1A	2,842	0,0618	35,2	33	2,517	0,023	39,7
3A	4,010	0,0451	24,9	33A	2,043	0,024	49
3B	2,071	0,0076	48,3	32	2,89	0,049	34,6
3C	3,167	0,0238	31,6	32A	2,091	0,018	47,8
4	2,210	0,0279	45,3	40	1,659	0,033	60,3
4A	2,301	0,0256	43,5	40A	1,626	0,015	61,5
11A	4,881	0,0669	20,5	39	3,745	0,0507	26,7
11B	2,506	0,0361	39,9	39A	2,960	0,0338	33,8
11C	3,029	0,0303	33,0	18	4,178	0,0961	23,9
12	8,629	0,187	11,6	18A	2,565	0,0438	39,0
12A	3,005	0,009	33,3	99	2,482	0,3428	40,3
12B	2,955	0,014	33,8	99A	3,103	0,0053	32,2
26	3,422	0,068	29,2	14	4,722	0,0373	21,2
26A	2,317	0,035	43,2				

Priloga 6: Rezultati laboratorijskih meritev geotermičnih meritev 22 vzorcev

Oznaka vzorca	Vrsta sedimenta	Starost	TC mean, W/(m·K)	TC min	TC max	G (%)	Inhomo. Factor	TD mean, mm²/s	TD min	TD max	površina vzorca	smer skenir anja	stanje vzorca
lokacije vzorčenja: vzhodno od Kostanjevice na Krki													
1	apnenec	M	2,176	1,954	2,317	3,696	0,167	0,929	0,825	1,03	f	-	dry
6	apnenec	K ₂ ali K ₁	3,064	2,936	3,187	1,792	0,082	1,175	1,056	1,269	f	-	dry
4	apnenec	K ₂	2,554	2,048	2,718	5,907	0,262	1,065	0,803	1,21	f	-	dry
11	apnenec	T ₃	3,053	2,873	3,266	2,444	0,129	1,152	1,036	1,29	f	-	dry
3	kalkarenit	M	2,01	1,809	2,255	4,892	0,222	0,904	0,831	0,985	f	-	dry
4	apnenec	K ₂	2,468	2,145	2,638	4,742	0,2	1,017	0,912	1,17	f	-	dry
99	apnenec, dolomitiziran	T ₃	3,368	2,959	3,553	3,057	0,176	1,299	1,015	1,56	f	-	dry
99	apnenec, dolomitiziran	T ₃	3,312	2,613	3,541	5,753	0,28	1,294	0,962	1,666	f	-	dry
18	apnenec	K ₂	3,139	2,849	3,293	2,983	0,141	1,306	1,183	1,483	f	-	dry
18	apnenec	K ₂	3,17	2,928	3,396	3,335	0,148	1,119	0,995	1,519	f	-	dry
26	apnenec	K ₂	2,674	2,436	2,835	3,219	0,149	1,177	0,931	1,706	f	-	dry
26	apnenec	K ₂	2,584	1,915	2,864	8,143	0,367	1,038	0,9	1,234	f	-	dry
33	kalkarenit	M	2,029	1,755	2,3	7,301	0,269	0,917	0,788	1,059	f	-	dry
33	kalkarenit	M	1,901	1,54	2,175	9,994	0,334	0,9	0,67	1,135	f	-	dry
32	apnenec	M	2,163	1,937	2,379	5,017	0,205	0,93	0,747	1,102	f	-	dry
32	apnenec	M	2,281	1,876	2,919	9,906	0,457	0,948	0,734	1,167	f	-	dry
39	apnenec	K ₂	3,086	2,941	3,302	2,364	0,117	1,22	1,088	1,404	f	-	dry
39	apnenec	K ₂	3,169	2,897	3,344	3,033	0,141	1,233	1,08	1,364	f	-	dry
12	karbonatna breča	K ₁	2,923	2,72	3,131	2,904	0,14	1,185	0,979	1,4	f	-	dry
12	karbonatna breča	K ₁	3,039	2,762	3,258	3,487	0,163	1,197	1,047	1,455	f	-	dry
14	apnenec	K ₁	3,037	2,847	3,278	2,894	0,142	1,142	1,01	1,265	f	-	dry
14	apnenec	K ₁	2,964	2,76	3,272	4,381	0,173	1,145	0,992	1,37	f	-	dry
Poprečje za vse vzorce:			2,735					1,104					
SKUPAJ skenirano 22 vzorcev kamnin						uporabljeni standarda:							
Starost sedimentov: M, K ₂ , K ₁ in T ₃						fq+Ti: staljeni kremen + Ti zlitina							
OPOMBE:													
površina vzorca: G = standard. dev./mean													
f: flat = ravna Inhogeneity Factor = (max-min)/mean													
cm: cylinder mantle = površina (plašč) valja													
smer skeniranja:													
f: paralelno s plastovitostjo (foliacijo), s smerjo skrilavosti													
p: pravokotno na plastovitost (foliacijo), na smer skrilavosti													
other: s kotom (v stopinjah) naklona smeri skeniranja glede na plastovitost (foliacijo)													
-: brez usmerjenosti													
stanje vzorca:													
sat: z vodo "nasičen" sediment (=lahko je nasičen znotraj celotnega volumna, ali bolj v obodnem delu)													
dry: suh sediment (=lahko je rahlo vlažen na površini)													

Priloga 7: Laboratorijske meritve toplotnih parametrov na jedru GCF-1/24 (dne 11. nov. 2024)

Globina m	k_T povp $W\ m^{-1}K^{-1}$	k_T min $W\ m^{-1}K^{-1}$	k_T maks $W\ m^{-1}K^{-1}$	G (%)	Inhomo. Faktor	TD povp $mm^2\ s^{-1}$	TD min $mm^2\ s^{-1}$	TD maks $mm^2\ s^{-1}$	stanje vzorca
24,13 - 24,22	1,629	1,506	1,759	3,872	0,155	0,394	0,285	0,474	dry
24,62 - 24,70	1,652	1,563	1,771	3,375	0,126	0,493	0,281	0,747	dry
25,06 - 25,27	1,641	1,405	1,819	5,145	0,252	0,524	0,348	0,76	sat
25,35 - 25,44	1,603	1,232	1,808	7,146	0,359	0,494	0,35	0,645	dry
25,69 - 25,79	1,647	1,599	1,699	1,357	0,06	0,321	0,231	0,432	dry
50,00 - 50,22	1,723	1,509	1,947	5,361	0,255	0,521	0,318	0,703	sat
50,31 - 50,40	1,812	1,732	1,986	3,468	0,14	0,381	0,237	0,479	dry
50,69 - 50,77	1,877	1,69	2,061	6,227	0,198	0,368	0,173	0,514	dry
51,05 - 51,17	1,942	1,712	2,223	7,396	0,263	0,43	0,273	0,511	sat
51,22 - 51,33	1,753	1,484	1,935	6,184	0,257	0,511	0,376	0,609	dry
51,73 - 51,83	1,759	1,641	1,95	4,573	0,176	0,552	0,482	0,623	sat
52,00 - 52,09	1,583	1,501	1,68	2,943	0,113	0,454	0,296	0,569	dry
52,29 - 52,40	1,816	1,694	1,923	3,071	0,126	0,52	0,422	0,609	sat
52,46 - 52,55	1,688	1,571	1,839	4,767	0,158	0,448	0,226	0,532	dry
Poprečje za vse vzorce:		1,723					0,458		
ST.DEV		0,108					0,070		

uporabljeni standarda: g+fq: tehnično steklo + staljeni kremen

G = standard. dev./mean

Inhomogeneity Factor = (max-min)/mean

površina vzorca:

f: flat = ravna

cm: cylinder mantle = površina (plašč) valja

smer skeniranja:

f: paralelno s plastovitostjo (foliacijo), s smerjo skrilavosti

p: pravokotno na plastovitost (foliacijo), na smer skrilavosti

other: s kotom (v stopinjah) naklona smeri skeniranja glede na plastovitost (foliacijo)

-: brez usmerjenosti

stanje vzorca:

sat: z vodo "nasičen" sediment (=lahko je nasičen znotraj celotnega volumna, ali samo bolj v obodnem delu)

dry: suh sediment (= lahko je rahlo vlažen na površini)

Anizotropija $An = \lambda_f/\lambda_p$

λ_f =TC paralelna s foliacijo (plastovitostjo)

λ_p =TC pravokotna na foliacijo (plastovitost)

* Napaka v korekciji T.D. pri označenem vzorcu: TD vzorca izven območja umerjanja (izmerjena TD je kljub temu realna)

Priloga 8: Terenske meritve toplotnih parametrov na jedru GCF-1/24 (izmerjeno 6. in 7. nov. 2024). Vlažnost vzorcev s 25 metrov je bila 34,4%, s 50 metrov pa 30,3%.

Globina, m	Senzor	k_T $W\ m^{-1}K^{-1}$	ρ $m\ K\ W^{-1}$	C $MJ\ m^{-3}\cdot K^{-1}$	TD $mm^2\ s^{-1}$	Napaka
25,1 - 25,15	SH-1	1,292	0,774	2,724	0,474	0,0028
25,1 - 25,15	TR-1	1,457	0,686			0,0019
25,70 - 25,80	SH-1	1,19	0,84	3,057	0,389	0,0011
25,70 - 25,80	TR-1	1,162	0,861			0,0061
50,0 - 50,2	SH-1	1,111	0,9	3,015	0,368	0,001
50,0 - 50,2	TR-1	1,021	0,98			0,0023
51,0 - 51,16	SH-1	1,244	0,804	2,774	0,448	0,0019
51,0 - 51,16	TR-1	1,076	0,929			0,0055
51,72 - 51,82	SH-1	1,246	0,802	3,129	0,398	0,0012
51,72 - 51,82	TR-1	1,383	0,723			0,0023

Priloga 9: Urne meritve temperature in vlažnosti zraka v pilotnih hladilnicah v Brodu v Podbočju in Juršincih s poudarjeno razliko med zunanjo in notranjo temperaturo zraka (roza črta). Modra črta označuje priporočeno vlažnost v hladilnici – 92%. Črna črta v Brodu označuje obdobje meritev porabe elektrike 23. 5. – 19. 6. 2024.

