

Poročilo o izgradnji raziskovalne geosonde GCF-1/24 v Brodu v Podbočju



Ljubljana, januar 2025

Naročnik:	GEOLOŠKI ZAVOD SLOVENIJE, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana doc.dr. Nina Rman, nina.rman@geo-zs.si v imenu financerjev projekta GeoCOOL FOOD: 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
Datum izdaje ponudbe:	razpis CRP »Naša hrana, podeželje in naravni viri« vloga št. 031
Evidenčna številka:	631-19/2025
Število izvodov:	4 (3 GeoZS, 1 Aleš Turk, pdf za DRSV)
Projekt:	CRP projekt V1-2213, GeoCOOL FOOD - Hladno skladiščenje hrane z rabo plitve geotermalne energije
Delovni paket:	DP 3: Analiza naravnih danosti za karakterizacijo izbranega pilotnega območja: M3.2 Izvedba raziskovalne vrtine in določitev lokalnih geotermičnih lastnosti
Naslov poročila:	Poročilo o izgradnji raziskovalne geosonde GCF-1/24 v Brodu v Podbočju
Datum izdelave:	30. januar 2025
Avtorji:	doc. dr. Nina Rman, univ. dipl. inž. geol. mag. Dušan Rajver, univ. dipl. inž. geol. Karlo Borko, mag. inž. geol. dr. Kristina Ivančič, univ. dipl. inž. geol. Nejc Bizjak, univ. dipl. inž. geol. dr. Simona Adrinek, mag. inž. geol. mag. Andrej Lapanje, univ. dipl. inž. geol. Simon Mozetič, dipl. inž. geoteh. in rud. dr. David Gerčar, mag. inž. geol. mag. Joerg Prestor, univ. dipl. inž. geol. Simona Pestotnik, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž. Aljaž Ciglar, mag. inž. geol.
Nosilec naloge:	doc. dr. Nina Rman, univ. dipl. inž. geol.
Vodja organizacijske enote:	dr. Sonja Cerar, univ. dipl. inž. geol.
Direktor:	dr. Miloš Bavec, univ. dipl. inž. geol.
Ključne besede:	Geosonde, Geotermalni potencial, Geotermične raziskave



VSEBINA

1. Uvod	5
2. Lokacija raziskovalne geosonde GCF-1/24	5
3. Izgradnja raziskovalne geosonde GCF-1/24.....	6
4. Vgradnja U-zavoja/U-cevi cevi za prenos toplote, opazovalne cevi ter optičnih kablov.....	9
5. Cementacija in tlačni preizkus	12
6. Izgradnja jaška	13
7. Geološki popis navrtanine	15
8. Karotažne meritve 8. 11. 2024	17
8.1. Meritve naravnega gama sevanja.....	17
8.2. Zvezna meritev temperature v vodi	18
8.3. Zvezna meritev električne prevodnosti vode	19
8.4. Ugotovitve karotažnih meritev.....	19
9. Hidrogeološki popis	19
10. Arhivske geotermične meritve v vrtinah.....	23
11. Nove geotermične meritve izdankov v okolici Broda v Podbočju	27
12. Geotermične meritve na jedrih iz GCF-1/24.....	32
13. Meritve temperature v opazovalni cevi	36
14. Zaključek	41
16. Literatura.....	43

KAZALO SLIK

Slika 1: Geodetska izmera jaška in lokacije geosonde GCF-1/24.....	6
Slika 2: Prikaz dejanske lokacije GCF-1/24 (vir: Atlas okolja).....	6
Slika 3: Izgled delovišča GCF-1/24	8
Slika 4: Vrtalna glava (levo) in začasna vrtalna kolona med vrtanjem (desno).....	8
Slika 5: Pridobljeni sta bili skoraj popolni jedri lapornatega melja iz globin 24 – 26 m in 50 – 52,5 m..	9
Slika 6: Izgled opazovalne cevi pred pripravo za vgradnjo	10
Slika 7: Izgled optičnega kabla, ki je bil vgrajen v geosondo	11
Slika 8: Povezovanje vseh 4 cevi smo začeli na dnu geosonde (levo; rumeno je povezava obe U-cevi) in ročno nadaljevali po celotni dolžini (desno)	11
Slika 9: Že povezane cevi v enotno verigo: 45 mm črna U-cev, 32 mm črna z modrimi črtami opazovalna cev, 25 mm cev za cementacijo in tanjši svetlo moder optični kabel, ki je na dnu zvit.....	11
Slika 10: Ustje geosonde ob prihodu jutraj 9. 11. – vse zaščitne vrtalne cevi so bile odstranjene (levo); dolivanje vode v U-cev za preverjanje izgub vode čez noč (desno)	13
Slika 11: Naprava za pripravo cementne mešanice (levo) in izgled geosonde med cementiranjem -	

priključena je cev za cementacijo (levo)	13
Slika 12: Izgled ob izdelavi jaška. U-cev ima prehod iz premera 45 na premer 40 mm na površini, leva cev z modro črto je 30 mm opazovalna cev in mala 25 mm je za cementacijo.....	14
Slika 13: Končni izgled jaška vrtine GCF-1/24	14
Slika 14: Geološka spremljava navrtanine iz vrtine	15
Slika 15: Sedimentološki profil GCF-1/24, primerjaj z geološkim popisom na prilogi 1	16
Slika 16: Ustje vrtine GCF-1/24 med karotažo	17
Slika 17: Termogram vrtine GCF-1/24, z rezultati dveh izmerjenih temperaturnih profilov: termokarotaža (08. nov. 2024) in zadnja točkovno (»ročno«) merjena temperatura (19. dec. 2024). .	18
Slika 18: Odvzem vzorcev iz jeder za laboratorijske hidrogeološke preiskave na INA, Zagreb	20
Slika 19: Udden-Wentworth (1922) shema za oceno velikosti zrn – granulometrijo (vir: priloga 4).....	21
Slika 20: Prikaz kumulativne frekvenca velikosti zrn jeder na 25,22 in 50,19 m globine. X- os je v enotah mikro meter (iz analiz INA)	22
Slika 21: Prikaz granulometrične porazdelitve jeder na 25,22 in 50,19 m globine (analize INA, priloga 4)	23
Slika 22: Točkovne meritve temperatur (T-z profili) v relativno bližnji vrtini V-8/86, Malence pri Kostanjevici (prirejeno po Rajver in sod., 2006; Strgar in sod., 2017).	24
Slika 23: Točkovne meritve temperatur (T-z profili) v bližnji vrtini V-7/85, Topličnik pri Kostanjevici (po Rajver in sod., 2006). V globini 20 m se je segrelo za 0,32 °C v 19 letih.....	25
Slika 24: Točkovne meritve temperatur (T-z profili) v vrtini TG-1/12, Malo Mraševo.	26
Slika 25. Lokacije vzorčenja kamnin in izvedbe terenskih meritev na ortofoto prikazu (vir: Atlas okolja)	28
Slika 26: Lokacije vzorčenja kamnin in izvedbe terenskih meritev s podlago Osnovne geološke karte (https://ogk100.geo-zs.si/)	28
Slika 27. Meritve na izdankih pri Kostanjevici na Krki. Številka označuje točko na obeh kartah lokacij.	29
Slika 28: Odnos med toplotno prevodnostjo in upornostjo pri 29 terenskih meritvah.....	30
Slika 29: Dve jedri lapornatega melja (iz globin 24,0 do 26,0 m in 50,0 do 52,55 m); skeniranje s TCS merilnikom se je izvedlo na 14 večjih kosih obeh jeder.....	32
Slika 30: Vzorci z oznakami GCF1 (-5 -6 -7 in -14) med skeniranjem s TCS merilnikom	33
Slika 31: Rezultati meritev toplotne prevodnosti jedra iz globine 51,05-51,17 m iz GCF-1/24 po različnih metodah	34
Slika 32: Izvedba ročne meritve temperature v opazovalni cevi po cementaciji geosonde	36
Slika 33: Vse meritve temperature v opazovalni cevi GCF-1/24 v letu 2024	40
Slika 34: Vse meritve temperature v opazovalni cevi GCF-1/24 v letu 2024 in primerjava z meritvami v vrtini V-8 v Malencah (min-max razpon v 2015 in enkratna meritev avg. 2011 – vir: D. Rajver)	40
Slika 35: Urne meritve temperature s sondo za zvezne meritve temperature Centi-T na dveh različnih globinah, vsaka po mesec dni.....	41

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Geodetska izmera in odstopanje od predvidene lokacije za GCF-1/24	5
Preglednica 2: Primerjava izhodiščnih višin za meritve pred in po izvedbi jaška	14
Preglednica 3: Prognozni in popisani geološki profil GCF-1/24	15
Preglednica 4: Hidrogeološka razvrstitev bolj prepustnih plasti.....	20
Preglednica 5: Hidrogeološke lastnosti lapornatega melja na 25,22 in 50,19 m globine (analize INA,	

priloga 4)	22
Preglednica 6: Razvrstitev vzorcev po zrnivosti po Udden-Wentworth (1922)	22
Preglednica 7: Geotermični podatki z jedrovanih kamnin za tri lokacije v relativni bližini raziskovalne geosonde, Topličnik, Sajeve in Malence pri Kostanjevici na Krki. TC – toplotna prevodnost, TD – toplotna difuzivnost (Rajver & Adrinek, 2023)	27
Preglednica 8: Rezultati terenskih geotermičnih meritev karbonatnih kamnin pri Kostanjevici	29
Preglednica 9: Tipična statistika geotermičnih lastnosti karbonatnih kamnin pri Kostanjevici	30
Preglednica 10: Rezultati laboratorijskih meritev toplotne prevodnosti in difuzivnosti 22 vzorcev karbonatnih kamnin z metodo optičnega skeniranja (TCS)	31
Preglednica 11: Meritev geotermičnih lastnosti tal v rastlinjaku na kmetiji Turk	32
Preglednica 12: Terenske meritve toplotne prevodnosti in drugih toplotnih parametrov na jedru GCF-1/24 (v dneh 6. in 7. nov. 2024). Ti podatki niso vključeni na sliko 31. Vlažnost vzorcev s 25. metrov je bila 34,4%, s 50. metrov pa 30,3%	33
<i>Preglednica 13: Laboratorijske meritve toplotne prevodnosti (TC) in toplotne difuzivnosti (TD) na jedru GCF-1/24 (dne 11. nov. 2024)</i>	<i>33</i>
Preglednica 14: Primerjava meritev z različnimi metodami na istih vzorcih iz GCF-1, na GeoZS (KD2 in TCS) in PGI (Tempos). Tempos in KD2 sta iglični sondi.	35
Preglednica 15: Pregled meritev gladine vode v (načeloma na dnu zatesnjeni) opazovalni cevi pred začetkom geotermičnih meritev	37

KAZALO PRILOG

Priloga 1. Geološki popis vrtine GCF-1/24

Priloga 2: Litološki popis in tehnični profil geosonde GCF-1/24

Priloga 3. Karotažni diagrami meritev v vrtini GCF-1/24

Priloga 4: Analizno poročilo GCF-1, INA, Industrija nafte d.d.

1. Uvod

V okviru CRP projekta št. V1-2213 »GeoCOOL FOOD - Hladno skladiščenje hrane z rabo plitve geotermalne energije« je bila v okviru delovnega paketa 3. Analiza naravnih danosti za karakterizacijo izbranega pilotnega območja predvidena izvedba in testiranje vsaj 150 m globoke nove raziskovalne vrtine in izvedba geotermičnih meritev v okolici. Rezultati dela predstavljajo dosežek M3.2 Izvedba raziskovalne vrtine in določitev lokalnih geotermičnih lastnosti.

Vrtanje je potekalo skladno z dovoljenjem za raziskavo podzemnih voda, ki ga je izdala DRSV dne 30. 9. 2024 z arhivsko številko 2024/1557 in številko dopisa 35505-169/2024-3. Pred pričetkom del je bilo pridobljeno tudi vodno soglasje št. 35507-1670/2024-2 z dne 11. 10. 2024.

Poročilo opisuje izvedbo raziskovalne geosonde, geoloških in karotažnih meritev ter hidrogeološke in geotermične meritve na jedrih kamnine in v okolici. Test toplotnega odziva bo izveden spomladi 2025 in poročan v ločenem dokumentu.

2. Lokacija raziskovalne geosonde GCF-1/24

Raziskovalna geosonda GCF-1/24 je izdelana na območju kmetijskega gospodarstva g. Turka na naslovu Brod v Podbočju 4, 8312 Podbočje.

Končna globina 100 metrov je bila določena iz dveh razlogov in je skladna z dovoljenjem za raziskavo podzemnih voda:

- To je značilna globina geosond na širšem območju. Enake globine sta tudi obstoječi, 25 m oddaljeni geosondi, ki se uporabljata za ogrevanje in hlajenje stanovanjske hiše.
- Drugi razlog so bila omejena finančna sredstva.

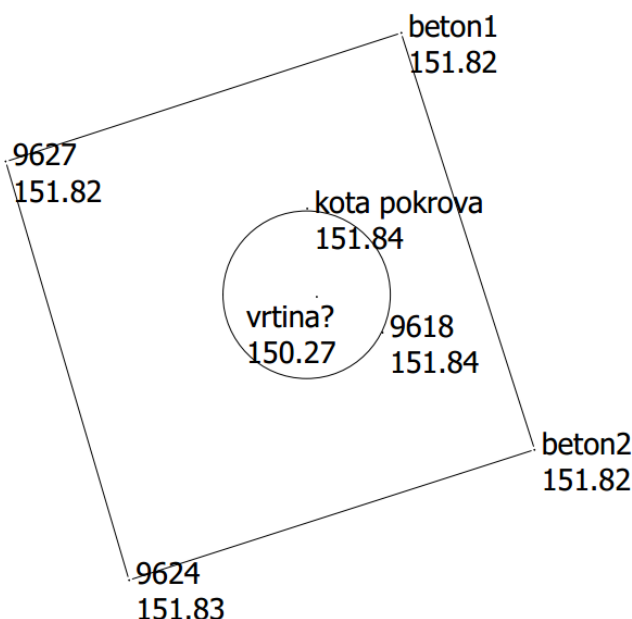
Dolgoročna ideja je, da se jo poveže v sistem ogrevanja in hlajenja kmetijskega gospodarstva s plitvo geotermalno energijo, na njej pa bo tudi ves čas možna izvedba meritve spremembe temperature tal, saj vsebuje opazovalno cev. Tudi v času, ko se ne bo uporabljala, bo primerna za izvedbo raziskovalnih geotermičnih testiranj in meritev.

Geosonda GCF-1/24 leži na parc. št.: 1207/4, št. k.o.: 1330, k.o. Veliko Mraševo, kraj: naselje Brod v Podbočju, občina: Krško z geodetsko določenimi koordinatami (Slika 1, Slika 2, Preglednica 1). Geodetske meritve je dne 21. 01. 2025 opravil Borut Mežnarčič, univ. dipl. inž. geod.

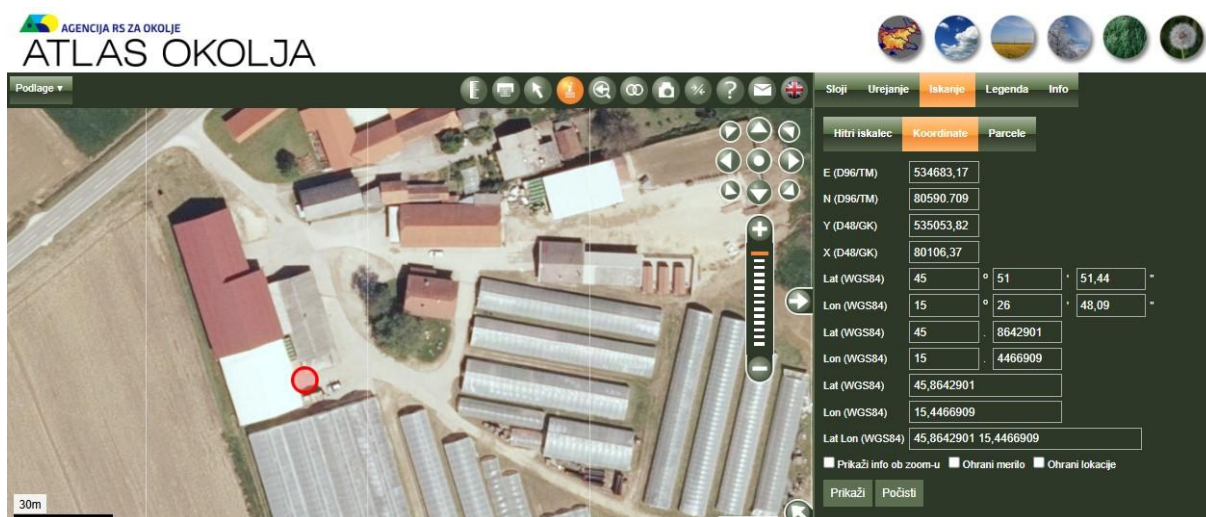
Preglednica 1: Geodetska izmera in odstopanje od predvidene lokacije za GCF-1/24

	Predvidena lokacija	Dejanska lokacija
D48/GK_Y	535060	535053,82
D48/GK_X	80104	80106,37
Z _{tal} [m n. m. ref. Koper]	152	151.82
Z _{vrha železnega jaška} [m n. m. ref. Koper]		151.84
D96/TM_E	534689	534683.167
D96/TM_N	80588	80590.709

Dno jaška je cca 1,5 m globlje in neravno. V trenutnem stanju (jan 2025) je vrh opazovalne cevi 32 cm in vrh geosonde 45 cm niže od vrha jaška, torej sta na kotah 151,52 m in 151,39 m n.v.



Slika 1: Geodetska izmera jaška in lokacije geosonde GCF-1/24



Slika 2: Prikaz dejanske lokacije GCF-1/24 (vir: Atlas okolja)

3. Izgradnja raziskovalne geosonde GCF-1/24

V torek 5. 11. 2024 je potekala priprava terena in namestitev vrtalne opreme s strani izvajalca, Minervo d.o.o.

Vrtanje je trajalo od 6. do 8. 11. 2024. Poleg vrtalcev so bili ob izdelavi prisotni na terenu predstavniki GeoZS kot izvajalca geološkega in hidrogeološkega nadzora:

- Sreda 6. 11.: Nejc Bizjak, Karlo Borko, Kristina Ivančič, Lara Mencinger, Andrej Vidmar (UL FGG)

- Četrtek 7. 11.: Karlo Borko, Kristina Ivančič, Miha Marinšek, Nina Rman, Kevin Oblak, Andrej Vidmar (UL FGG)

- Petek 8.1 1.: Nejc Bizjak, Karlo Borko, Kevin Oblak, Maj Mišjak

Dne 6. in 7. 11. je potekalo jedrovanje.

V petek 8.1. po končanem vrtanju je potekala karotaža, prisotna sta bila Jan Udovč in Simon Mozetič, in nato vgradnja vseh cevi v vrtino.

V soboto 9. 11. je potekala prva cementacija in izvedene temperaturne meritve po dolžini vrtine, prisotna je bila Nina Rman.

V nedeljo 10. 11. so bile izvedene temperaturne meritve po dolžini vrtine, prisoten je bil Karlo Borko.

V ponedeljek 11. 11. je bil izveden tlačni preizkus in izvedene temperaturne meritve po dolžini vrtine, prisoten je bil Karlo Borko.

V sredo 13. 11. je bila izvedena druga cementacija – docementacija vrhnjega dela in izvedene temperaturne meritve po dolžini vrtine, prisoten je bil Karlo Borko.

V četrtek 14. 11. so bile izvedene temperaturne meritve po dolžini vrtine, prisoten je bil Karlo Borko.

V petek 15. 11. so bile izvedene temperaturne meritve po dolžini vrtine, prisoten je bil Karlo Borko.

V sredo 20. 11. je bil izveden izkop in postavitve jaška in odrezan vrhnji del cevi, prisoten je bil Maj Mišjak.

V četrtek 19. 12. so bile izvedene temperaturne meritve po dolžini vrtine, prisotna sta bila Karlo Borko in Nina Rman.

V torek 21. 1. 2025 so bili pobrani podatki iz stalno vgrajene sonde, prisotna je bila Nina Rman.

V torek 5. 11. 2024 je potekala priprava terena in namestitve vrtalne opreme, vrtanje je trajalo od 6. do 8. 11. v rednem delovnem času (Slika 3). Geosonda je izvrtana z uporabo globinskega kladiiva in sočasne začasne cevitev vrtine (angl. over burden system). Za začasno cevitev je bila uporabljena obložna kolona premera 168 mm (Slika 4), vrtanje pa je potekalo po ti. sistemu dvojne rotacijske glave, z uporabo globinskega kladiiva in nadprofilnega dleta premera 183 mm. Vrtalo se je s stisnjenim zrakom.

Ob zaključku vrtanja 8.11. je bilo vrtalno drogovje dvignjeno iz vrtine in vgrajena geosonda (Priloga 2).

Izvedba vrtine je potekala po rednem načinu dela vrtalca, ker nas je zanimalo, kaj prejmejo naročniki kot rezultat naročenih del. Čeprav smo izrecno prosili, da se sledi navodilom o zapisnikih o opravljenih delih, teh nismo prejeli, ampak smo vso dokumentacijo pripravili sami. Prejeli pa smo tehnične liste o vgrajenih ceveh geosonde.



Slika 3: Izgled delovišča GCF-1/24



Slika 4: Vrtalna glava (levo) in začasna vrtalna kolona med vrtanjem (desno)

Jedrovanje sedimenta je potekalo skladno z načrtom vrtanja. Pridobljeno je bilo z rotacijskim vrtanjem, z jedrnikom z widia krono premera 114 mm, brez dodajanja vode ali izplake.

Dne 6. 11. 2024 je bilo odvzeto prvo jedro na globini 24-26 m in dne 7. 11. 2024 drugo jedro v globini 50-52,5 m. Večji kosi so bili zaviti v folijo, da so ohranili prvotno vlažnost za izvedbo geotermičnih in hidrogeoloških meritev. Luknjice z belo pasto (Slika 5) kažejo mesta terenskih meritev vlažnosti in geotermičnih parametrov sedimenta, ki so bile opravljene takoj po pridobitvi vzorca.



Slika 5: Pridobljeni sta bili skoraj popolni jedri lapornatega melja iz globin 24 – 26 m in 50 – 52,5 m.

4. Vgradnja U-zavoja/U-cevi cevi za prenos toplote, opazovalne cevi ter optičnih kablov

V torek 5. 11. so pripeljali vse cevi in jih razgrnili ob rastlinjaki, kjer so se le malo poravnale, saj je bilo mrzlo.

V izdelano vrtino smo vgradili naslednje cevi: opazovalno cev, cev za cementacijo in geosondo ter optične kable.

Za opazovalno cev je bila uporabljena cev PE100 za vodovodna omrežja proizvajalca totrapipes, 40x3,7 mm RN 16 z zaključenim dnom, da voda ne more odtekat (Slika 6). Njen notranji premer je 32,6 mm, notranjost je gladka. Toplotna prevodnosti cevi je specificirana na $0,38 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$, teža pa na $0,44 \text{ kg/m}$.

Cev za cementacijo tipa PE100 za vodovodna omrežja, proizvajalca totrapipes, premera 25 cm je po izvedbi ostala v vrtini. Njena toplotna prevodnost je enaka kot za opazovalno cev, teža pa $0,18 \text{ kg/m}$.

Geosonda je opremljena z enojno U-zanko (U-cev) proizvajalca MuoviTech, tipa PE100-RCPE100-RC in zunanjega premera 45 mm, ki je na dnu standardno povezana (Slika 8). V notranjosti zareze počasi povijajo, da povečajo turbulentnost toka (hrapavost je $0,03 \text{ mm}$). Toplotna prevodnosti (TC) cevi je specificirana na $0,4 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$, specifična toplotna kapaciteta je $1,9 \text{ JK}^{-1}\text{g}^{-1}$. Razpon projektiranih temperatur je med -20 in $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Uteži ob vgradnji nismo uporabili.

Med cevi smo dodali dva kabla z DTS optičnimi vlakni za zvezne meritve temperature po dolžini vrtine.

V sredo 6.11. je naš podizvajalec dr. Andrej Vidmar dostavil optične kable (modri kabli na fotografijah), ki so tipa DTS, z robustno zaščito s steklenimi vlakni, 4 žilni, multimode 50-125 μm , 'loose-fit-tube', LSOH in 'patch' kabel z dvema konektorjema E2000. Izvedba je takšna, da smo uporabili kabel v dolžini nekaj več kot 200 m z U-zavojem na dnu vrtine (en zvezni kabel, ki je na dnu vrtine zvit, vendar v radiju cca 5 cm, tako da se ni zlomil). Ker je 4-žilni (Slika 7), bosta na površini dve optični vlakni povezani skupaj in tako bo optični signal prepotoval 400 m (100 m dol in 100 m gor po istem OV kablu, nato bo prešel na drug OV in šel zopet 100 m dol in 100 m gor do registratorja/interrogatorja).

Na lokaciji smo se odločili za spremembo načina montaže. Prvotno je bilo mišljeno, da bi okoli U-cevi navijali optične kable (3 navoji na meter) in vgradili distančnike. Vendar to ni bilo mogoče, ker je cev pregladka in bi se med vgradnjo premikala in poškodovala. Ker je prostor omejen in razporeditve drugače niso bile možne, distančnikov nismo vgradili. Nato smo v četrtek 7.11. cevi združili drugače, potrebovali smo 4 ljudi za izvedbo. Ker je izvajalec vrtanja povedal, da cevi za cementacijo po obstoječi praksi ne odstranijo iz vrtine, ampak ostane na isti globini v vrtini, smo njo in opazovalno in U-cev stisnili skupaj, vmes pa smo »skrili« oba kraka optičnega kabla (Slika 8, Slika 9). Cevi smo tako stisnili, da vmesni moder optični kabel ni pogledal na zunanjo stran skupka, ampak je ostal zaščiten na sredini. Nato smo na približno 1 m vse cevi povezali z »elektrostatično« folijo za zavijanje (cca 15 cm široko). Na zavojih cevi, ki še niso bili poravnani (saj je bila več dni megla in hladno) so bili ovoji na cca pol metra. To je ustrezno držalo sistem cevi do vgradnje v vrtino.

Geosonda se je vgradila 8. 11. in cementirala dan kasneje. Ker je bila celotna cev oz cevi raztegnjena ob poti bližnjega rastlinjaka (Slika 8), je vstavljanje cevi potekalo ročno. Cevi je premikalo 13-14 ljudi, da se ni drsala po tleh in poškodovala. Na začetku se je uspešno spuščala, nato pa je vzgon v vrtini postal premočan, zato se je U-cev napolnilo z vodo. Nato se je porivalo notri počasi, po metrih. Na koncu se je vtiskoval zrak skozi cementacijsko cev, da se je voda izpodrivala iz vrtine in tako se je celotna cev uspešno spustila v vrtino. Med spuščanjem na ustju ni bilo nobene posebne zaščite, le nadzorna oseba ob njem je gledala, da ni prišlo do neposrednega stika z robom/tlemi (se ni drgnilo). Uteži (ki je skoraj 1 m dolga) nismo vgradili.



Slika 6: Izgled opazovalne cevi pred pripravo za vgradnjo



Slika 7: Izgled optičnega kabla, ki je bil vgrajen v geosondo



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



Slika 9: Že povezane cevi v enotno verigo: 45 mm črna U-cev, 32 mm črna z modrimi črtami opazovalna cev, 25 mm cev za cementacijo in tanjši svetlo moder optični kabel, ki je na dnu zviti

5. Cementacija in tlačni preizkus

Pred cementacijo 9.11. bi moral biti izveden test tesnosti U-cevi, vendar izvajalec ni imel na voljo ustreznega povezovalnega ventila za testiranje cevi s 45 mm premera. Zato je po dogovoru z naročnikom na svoj riziko in stroške (v primeru da geosonda ne bo tesnila, bi izvedel novo geosondo) izvedel cementacijo geosonde. Test tesnosti je izvedel 11. 11., ko je namestil ravne elektrofuzijske spojke premera DN40 preko redukcije DN45/DN40, in namestil tlačni merilec na ustje vrtine. Tlak polnjenja cevi je bil kot na vodovodnem omrežju, cca 2 bar. Po predvidenem času ni bilo opaziti znižanja tlaka, zato je sklepal, da cevi geosonde ustrezno tesnijo.

Zaradi dotične razpoložljive opreme in ker smo želeli izvesti vrtino na običajen način, kot to izvajalec dela vsakodnevno, ta izvedba tlačnega preizkusa ni identična, kot je svetovano v Smernicah za vrtanje v plitvi geotermiji (GeoZS, 2021).

Medprostor vrtine je bil zapolnjen s cementno mešanico dvakrat, do globine približno 2 m pod koto tal.

Prva cementacija se je izvedla v soboto 9. 11. 2024. Cementna masa je bila Portlandski mešani cement EN 197-1 CEM II/B-M(LL-V) 42,5 N, UNIVERSAL, Salonit Anhovo s časom začetka vezave nad 60 min. Cement je izbral vrtalec, saj je to material, ki ga uporablja v 99% vseh izvedenih geosond. Za določitev natančnih geotermičnih lastnosti v januarju 2025 na GeoZS izvajamo laboratorijske meritve toplotne prevodnosti različnih cementnih mešanic. Porabljena je bila cela paleta cementnih vreč.

Prejšnji dan (8. 11.) je bilo na terenu dogovorjeno, da vrtalci v vrtini pustijo cca 12 m uvodne kolone, ki jo odstranijo šele ob koncu cementacije, zato da se ne bi v plitve vodonosne plasti izpiral cement. Ko je predstavnica GeoZS zjutraj prišla na lokacijo, v vrtini ni bilo več cevi in se je videl prazen prostor ob ceveh geosonde. Menimo, da je bil zaradi takšne neustrezne izvedbe vrhnji del neoptimalno izveden in cementna mešanica ni nikoli prišla na površje in zato vrtina vsaj v zgornjih cca 2 m ni cementirana. Zato se ob ceveh sedaj nahaja podzemna voda (Slika 13).

Pred pričetkom cementacije se je v U-cev dolivala voda, da bi se ocenilo puščanje. Ker je voda takoj iztekala, je bila cev polna vode in ustrezno tesnila. Optični kabli in opazovalna cev so izgledali ustrezno.

Cementacijo 9. 11. so pričeli ob 8:25 in je trajala do cca 10:05. Porabili so celo paleto cementa, nato pa še nekaj minut vtiskali vodo. V vrtini se je videla vodna gladina, ki je bila ob 9:45 2,7 m pod koto tal. Ob 10:12 se je vodna gladina dvignila na slab meter pod površje, a čez par minut je zopet padla v globino. Vrtalec je izjavil, da so se zmenili, da vrtina ne bo cementirana do vrha, ampak le do 2 m pod koto tal, vendar ta informacija pred izvedbo ni prišla do naročnika.

Druga cementacija je bila izvedena 13. 11., ko so od zgoraj dolivali v vrhnji del vrtine. Kljub temu je še vedno tik ob ceveh vsaj 1,5 m pod koto tal in vsaj pol metra pod dnem jaška necementiranih (Priloga 2).



Slika 10: Ustje geosonde ob prihodu zjutraj 9. 11. – vse zaščitne vrtalne cevi so bile odstranjene (levo); dolivanje vode v U-cev za preverjanje izgub vode čez noč (desno)



Slika 11: Naprava za pripravo cementne mešanice (levo) in izgled geosonde med cementiranjem - priključena je cev za cementacijo (levo)

6. Izgradnja jaška

Izgradnja jaška je potekala 20. 11. 2024. Jašek se odpira z gedora ključem 17 mm in ima okoli železnega roba gumo. Vrh roba je 2 cm nad tlemi. Sega približno 1,2 m pod površje tal, vendar območje tik ob U-cevi ni cementirano, zato je tam globlje. V jašku se sedaj nahaja voda (Slika 13). Cementacijska cev je odrezana in kar ni zapolnjeno s cementom, je zapolnjeno z vodo. U-cev je zaprta s čepi (ki se rahlo privijejo), na opazovalni cevi pa je čep nataknen, da se lažje sname za izvajanje meritev. Na njej je tudi izvrtana luknjica približno 5 cm pod vrhom, na katero je privezana vrvica za stalne merilne sonde.



Slika 12: Izgled ob izdelavi jaška. U-cev ima prehod iz premera 45 na premer 40 mm na površini, leva cev z modro črto je 30 mm opazovalna cev in mala 25 mm je za cementacijo.



Slika 13: Končni izgled jaška vrtine GCF-1/24

Preglednica 2: Primerjava izhodiščnih višin za meritve pred in po izvedbi jaška

	Glede na koto tal (m)	Glede na vrh železnega jaška (m)
Vrh opazovalne cevi (OC)	+0,21 pred izvedbo jaška	-0,33 po izvedbi jaška
Kota stalne sonde na vrvi v OC	-6,49 pred izvedbo jaška; -6,66 po skrajšanju OC	6,33 po odrezanju OC -6,64 po skrajšanju OC
Dno jaška	-1,21 po izvedbi jaška	
U-cev	-0,44 po izvedbi jaška	

7. Geološki popis navrtanine

Geološki popis navrtanine oziroma masterlog se je izvajal med vrtanjem z zbiranjem vzorcev. Prvih 16 metrov je bil odvzem vzorca na vsak meter, nato pa vsake 3 m. Odvzeli smo tudi dve jedri, na 24,0-26,0 in 50,0-52,5 m globine (poglavje 3; Slika 14; prilogi 2,3).



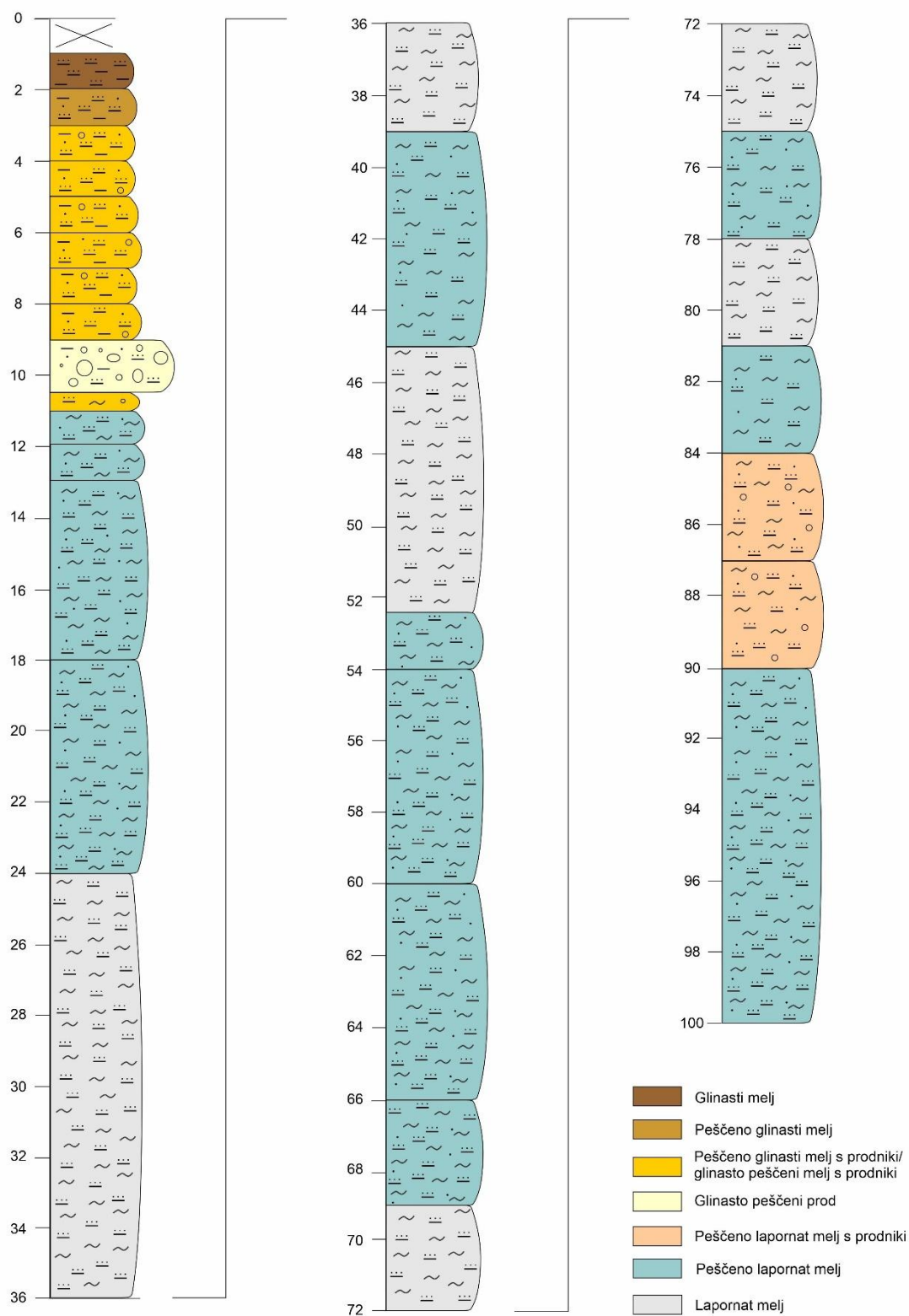
Slika 14: Geološka spremljava navrtanine iz vrtine

Prognozni geološki profil (Preglednica 3) je kar dobro napovedal geološki profil (Slika 15, priloga 1). Ugotovljena **globina kvartarnih rečnih sedimentov je 11 m**, prod pa ni nikjer zelo čist, ampak vedno mešan z glinasto, meljasto ali peščeno komponento. Prodniki so rumenkasti in različnega izvora (litotamnijski apnenec, zelen peščenjak, apnenec...). Pod tem se začnejo zelo slabo litificirani miocenski lapornati melji rjavo-sive barve, verjetno Drnovske formacije. Ponekod se makroskopsko vidijo bele lupinice ostrakodov ali ostanki lupinic školjk (priloga 1).

Preglednica 3: Prognozni in popisani geološki profil GCF-1/24

Globina [m]	Sediment/kamnina	Starost	Globina [m]	Sediment/kamnina	Starost
0–4	Glina, glinast prod, melj	Kvartar – poplavni sediment	0-1 1-2 2-3	Umetno nasutje Glinasti melj Peščeno glinasti melj	Q
4–10	Prod, peščen prod	Kvartar – rečni sediment	3-9	Peščeno glinasti melj s prodniki	
10–12	Meljast pesek s prodniki	Kvartar – rečni sediment	9-10,5	Glinasto peščeni prod	
12–15	Lapornata glina s prodniki	Kvartar – preperina miocenskih kamnin	10,5-11,0	Peščeno glinasti melj s prodniki	
15–250	Karbonatni meljevci, laporovci, lapornati glinavci	Miocen (sarmatij–panonij) ?Drnovska ali Laška formacija	11-24 24-39 39-45 45-52,5 52,5-69 69-75 75-78 78-81 81-84 84-90 90-100	Peščeno laporni melj Lapornati melj Peščeno laporni melj Lapornati melj Peščeno laporni melj Lapornati melj Peščeno laporni melj Lapornati melj Peščeno laporni melj Peščeno laporni melj s prodniki Peščeno laporni melj	Miocen

Vrtina GCF-1: Sedimentološki popis



Slika 15: Sedimentološki profil GCF-1/24, primerjaj z geološkim popisom na prilogi 1

8. Karotažne meritve 8. 11. 2024

Skladno z načrtom izvedbe vrtine in dovoljenjem za raziskavo so bile opravljene karotažne meritve naravni gama in T/dT. Karotažne meritve sta opravila Simon Mozetič in Jan Udovč iz GeoZS v petek 8. 11. 2024, takoj po dokončanju vrtanja (cca 1 uro po vrtanju) in pred vgradnjo geosonde. Namen meritve je bil ugotoviti ujemanje litološke sestave ter izmeriti električno prevodnost in temperaturo vzdolž celotnega kanala vrtine. Kljub dogovoru vrtina ni bila več zacevljena z začasnimi obložnimi cevmi.

Karotažne meritve so bile opravljene s karotažno opremo Robertson Geologging (priloga 3):

- RG 1000 m WINCH
- Sonda za merjenje naravnega gama sevanja, temperature in električne prevodnosti (TCDS)
- WinLogger Robertson Geologging.

Referenčna (nična) točka je bila ustje vrtine, ki je bilo 47 cm nad koto terena (Slika 16). Nad vrtino je še vedno stala vrtalna garnitura. Gladina vode je bila pred pričetkom na globini 12,70 m.

Meritev s TCDS sondo za merjenje temperature in električne prevodnosti fluida ter naravnega gama sevanja v vrtini je bila opravljena med spuščanjem sonde po vrtini od ustja do dna vrtine (točke nasedanja sonde). S sondo je bilo na globini 99,94 m doseženo dno vrtine.

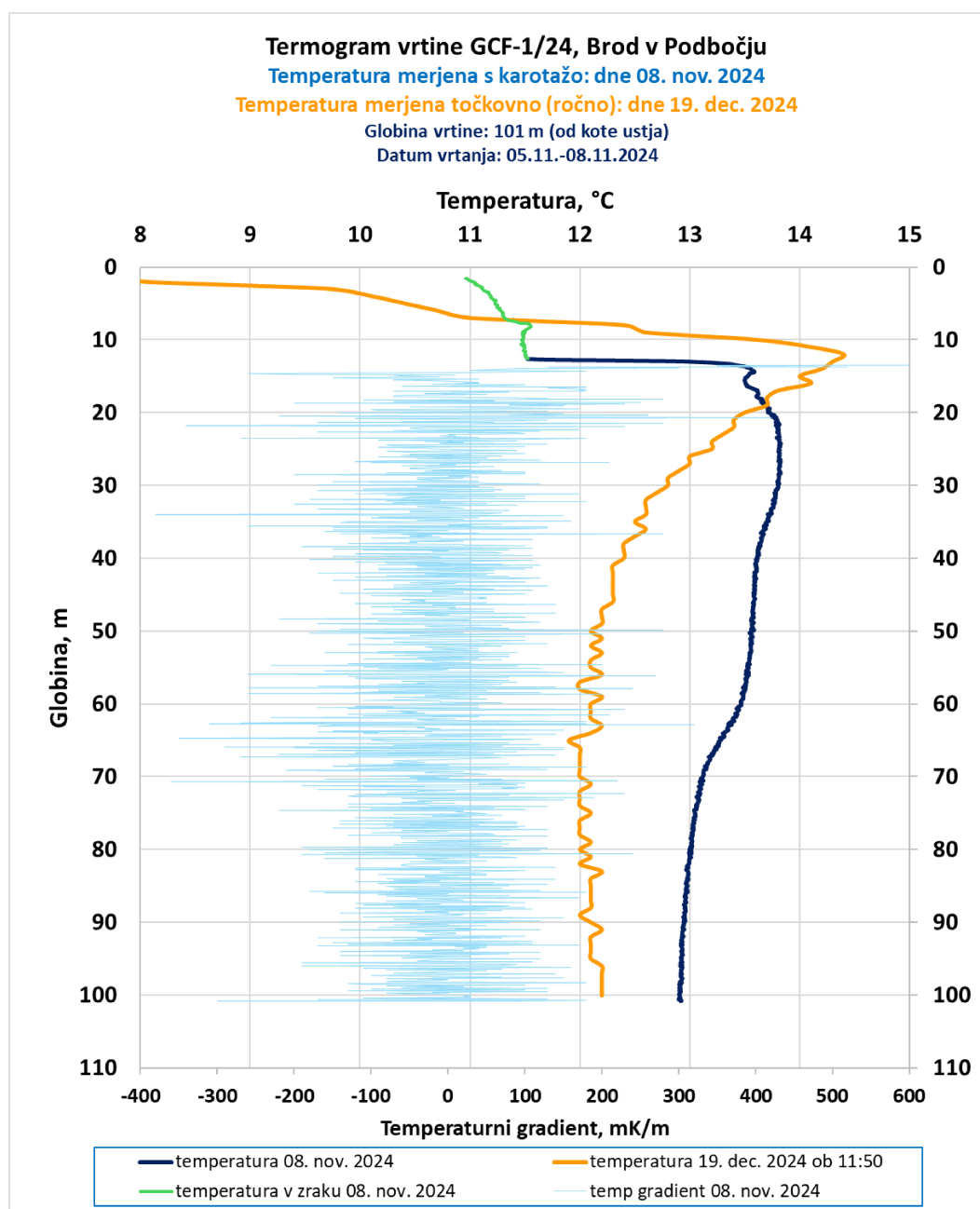


Slika 16: Ustje vrtine GCF-1/24 med karotažo

8.1. Meritve naravnega gama sevanja

Meritve naravnega gama sevanja se zelo dobro ujemajo z geološkim popisom prevrtanih plasti. Vrednosti naravnega gama sevanja so vzdolž celotne izmerjene dolžine vrtine precej nizke, kar sovпада z lastnostmi peščenih in lapornih meljev. Omenimo lahko rahlo povišane vrednosti na globini med 1,3 m in 9,73 m, kjer se gibljejo med 16,3 API in 47,3 API, s povprečjem 29,4 API enot. Te vrednosti sovpadajo s popisanimi zgornjimi plastmi kvartarnega glinastega melja, peščeno glinastega melja in glinasto peščenega proda. Vrednosti med 9,73 m in dnom vrtine se gibljejo med 9,9 API in 31,0 API, s povprečjem 19,9 API enot (glej prilogo 3). To ustreza menjavanju plasti lapornatega melja in peščenega lapornatega melja, slednji je bil popisani kot peščeno lapornat melj s prodniki na globini 84-90 m.

8.2. Zvezna meritev temperature v vodi



Slika 17: Termogram vrtine GCF-1/24, z rezultati dveh izmerjenih temperaturnih profilov: termokarotaža (08. nov. 2024) in zadnja točkovno (»ročno«) merjena temperatura (19. dec. 2024).

V globinskem odseku 1,53 m do 12,69 m je merilna sonda merila temperature v zraku (Slika 17, priloga 3). Potem je sonda vstopila v vodo v globini 12,7 m, kjer je temperatura znašala 11,52 °C. Hiter temperaturni skok v vrhnjem odseku vodnega stolpca 12,7 do 13,7 m (od 11,52 na 13,50 °C) je le posledica prilagajanja senzorja sonde iz temperature zraka na temperaturo vode in ga ne upoštevamo v obdelavi podatkov. Temperatura vode nato počasi narašča in v globini 24,31 m doseže najvišjo temperaturo 13,83 °C. Od tu dalje do dna vrtine temperatura v dveh opaznejših korakih pade na 12,90 °C. Opaznejši padci so v globinah okrog 35 m in 65 m. Vendar pa je bil temperaturni profil T-z (termogram) izmerjen le 1 uro po končanem vrtanju (in pred vgradnjo geosonde ter cementacijo), zato je njegova uporabnost omejena, saj meritev ni opravljena v toplotno uravnovišeni vrtini z obdajajočimi

prevrtanimi sedimenti, zato se vpliv vrtnih del očitno odraža v izgledu T-z profila in večinoma negativnem temperaturnem gradientu. Zato prikazujemo še izmerjen T-z profil po 34 dnevih mirovanja vrtine z dne 19. 12. 2024.

Morda pa je izgled T-z profila iz dne 19. dec. 2024 že dokaj blizu realnemu poteku temperature v tej vrtini na tej lokaciji, torej bolj ali manj konvekcijski oziroma s skoraj ničnim temperaturnim gradientom (5 °C na 1 km).

Termogrami (T-z profili) iz treh vrtin v širši okolici, V-7/85 (Topličnik), V-8/86 (Malence) in TG-1/12 (Malo Mraševo), se bistveno razlikujejo od termograma v vrtini GCF-1, saj so vsi s pozitivnim temperaturnim gradientom, brez vidnih con konvekcije. Po drugi strani pa je iz T-z profila iz vrtine GCF-1 (Slika 17), zaradi prej omenjenih razlogov kako in kdaj je bil izmerjen, še precej negotovo sklepati zakaj kaže negativni temperaturni gradient skoraj po celem stolpcu vrtine. Izmerjena temperatura vzdolž vrtine dne 19. 12. 2024 (ob 11:50), torej po 34 dneh mirovanja vrtine, je verjetno še najboljši prikaz dejanskega poteka temperature z globino (T-z profil). Anomalija v odseku 9 do 16 m je verjetno odraz prisotnosti plitvega vodonosnika, ki ga litološki popis zazna med 9,0 in 10,5 m. Globlje pa se temperatura znižuje vse do 70 m globine, verjetno zaradi odsotnosti kakršnih koli geotermalnih virov v večji globini.

8.3. Zvezna meritev električne prevodnosti vode

Preračunana električna prevodnost vode pri 25 °C je ob vstopu sonde v vodo na globini 14 m znašala 638,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Vrednost električne prevodnosti je nato do globine ~40 m hitro narasla na 778,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Od tu dalje do dna vrtine se je električna prevodnost vode počasi dvigala in na dnu dosegla svojo najvišjo vrednost 824,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

8.4. Ugotovitve karotažnih meritev

Meritev naravnega gama je pokazala praktično popolno ujemanje z geološkim popisom, opazno je zgolj odstopanje v zgornjih plasteh z glino, kjer se plasti glinastega melja, peščeno glinastega melja in glinasto **peščenega proda po karotaži končajo že na globini 9,73 m**, medtem ko je na popisu prehod v plasti brez gline naveden na globini 11 m.

Meritev temperature kaže na najvišje temperature pri vrhu vrtine, katere so lahko posledica vpliva poletnih temperatur in bolj segrelih zgornjih plasti, pa tudi ravno končanega vrtanja. Najvišja temperatura vode je bila zabeležena na globini 24,31 m in je znašala 13,83 °C. Najnižja temperatura je bila zabeležena na dnu vrtine in je znašala 12,89 °C

Preračunana električna prevodnost vode je bila že ob vstopu precej visoka in je znašala 638,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in se je z globino samo še dvigovala ter na dnu dosegla svoj maksimum 824,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Menimo, da to odraža pomanjkanje dotoka podzemne vode in je to verjetno stoječa, vrtalna voda.

9. Hidrogeološki popis

Pojav podzemne vode smo zabeležili med vrtanjem 6. 11. 2024 na globini 3,77 m pod površjem, kar je na koti 148,05 m n.v. Kota reke Krke na tem območju z Atlasa okolja je 147 m.

Pred karotažnimi meritvami 8. 11. 2024 je bila gladina vrtalne vode ugotovljena na globini 12,70 m (ob ref. točki 47 cm nad tlemi), torej na koti 139,59 m, kar približno sovpada oz. je malenkost globlje od dna kvartarne formacije. Podzemna voda z vrtino ni bila zajeta ali prelivala, je pa bila med karotažo ugotovljena njena elektroprevodnost pri 25 °C 638,7 do 824,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kar je razmeroma veliko in kaže na posledico vrtnja (vrtalna voda) oziroma glinaste plasti.

Kot bolj prepustne horizonte izpostavimo (Preglednica 4) 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 ter 84,0-90,0 m. Ostalo uvrščamo med slabo do zelo slabo prepustne sedimente.

Preglednica 4: Hidrogeološka razvrstitev bolj prepustnih plasti

Globina [m]	Sediment	Razvrstitev
9-10,5	Glinasto peščeni prod	Najbolj prepustno
3-9 10,5-11,0	Peščeno glinasti melj s prodniki	Nekoliko višja prepustnost
84-90	Peščeno laporni melj s prodniki	
11-24 39-45 52,5-69 75-78 81-84 90-100	Peščeno laporni melj	Ni povsem zelo slabo prepustno

Hidrogeološke parametre smo ocenjevali z analizami, ki jih je opravila INA, Industrija nafte d.d., Zagreb. Tu je povzeto Analizno poročilo GCF-1 z dne 23. 12. 2024 (Priloga 4). Iz jeder, zaviti v folijo, da so ohranila prvotno vlažnost, sta bila odvzeta dva vzorca z ročnim vzorčevalnikom v železno svinčeno cev premera 2,54 cm in dolžine približno 4 cm (Slika 18). Oba vzorca sta orientirana pravokotno na os jedra. Vzorca sta bila osušena pri 105 °C. Vzorci za gostoto zrn in granulacijo so bili vzeti iz bližnje lokacije. Za slednje se je vzorec očistil in razsolil, nato tudi osušil pri 105 °C in razčetveril za reprezentativnost analize.

Namen je bil določiti poroznost, prepustnost, gostoto in velikost zrn ter njihov potencial za nabrekanje.



Slika 18: Odvzem vzorcev iz jeder za laboratorijske hidrogeološke preiskave na INA, Zagreb

Poroznost je bila določena volumetrično na plinskem porozimetru (Core Laboratories helium Porosimeter) in dušikom. S tem se dobi volumen zrn in por pri naraščajočem nadtlaku (EOP).

Intrinzična (notranja/specifična; neodvisna od fluida) prepustnost je bila določena na plinskem permeamtru (Core Laboratories Air Permeameter) 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. Velikost zrn se ocenjuje glede na Udden-Wentworth (1922) shemo (Slika 19).

Test za določanje potenciala za nabrekanje glin je bil načrtovan kot ocena vpliva spremembe prepustnosti zaradi nabrekanja glin 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.

J. A. Udden (1916)	d _{grain} mm	C. K. Wentworth (1922)	
	≥ 256	Boulder	Gravel
Coarse cobble	≤ 256	Cobble	
Medium cobble	≤ 128		
Fine cobble	≤ 64	Pebble	
Very fine cobble	≤ 32		
Very coarse pebble	≤ 16		
Coarse pebble	≤ 8		
Medium pebble	≤ 4	Granule	
Fine pebble	≤ 2	Very coarse sand	Sand
Coarse sand	≤ 1	Coarse sand	
Medium sand	≤ 0,5	Medium sand	
Fine sand	≤ 0,25	Fine sand	
Very fine sand	≤ 0,125	Very fine sand	
Coarse silt	≤ 0,063	Silt	
Medium silt	≤ 0,032		
Fine silt	≤ 0,016		
Very fine silt	≤ 0,008		
Coarse clay	≤ 0,004	Clay	
Medium clay	≤ 0,002		
Fine clay	≤ 0,001		
Very fine clay	≤ 0.0005		

Slika 19: Udden-Wentworth (1922) shema za oceno velikosti zrn – granulometrijo (vir: priloga 4)

Rezultati meritev kažejo, da sta preiskana vzorca glede na celotno poroznost podobna, saj znaša povprečno 35,4% (Preglednica 5). Tudi gostota zrn je podobna, povprečno 2,696 g/cm³. Večja je razlika pri intrinzični prepustnosti, ki je v plitvejšem vzorcu opazno nižja in ga lahko smatramo kot zelo slabo prepustnega. V obeh primerih se z večanjem nadtlaka prepustnost niža, kar pomeni, da se v naravi z večanjem globine ti miocenski sedimenti kompaktirajo in postajajo manj prepustni za tok podzemne vode. Drugi vzorec, na globini 50,19 m, je dobro prepusten pod nižjimi tlaki in bi moral imeti zaznaven tok podzemne vode.

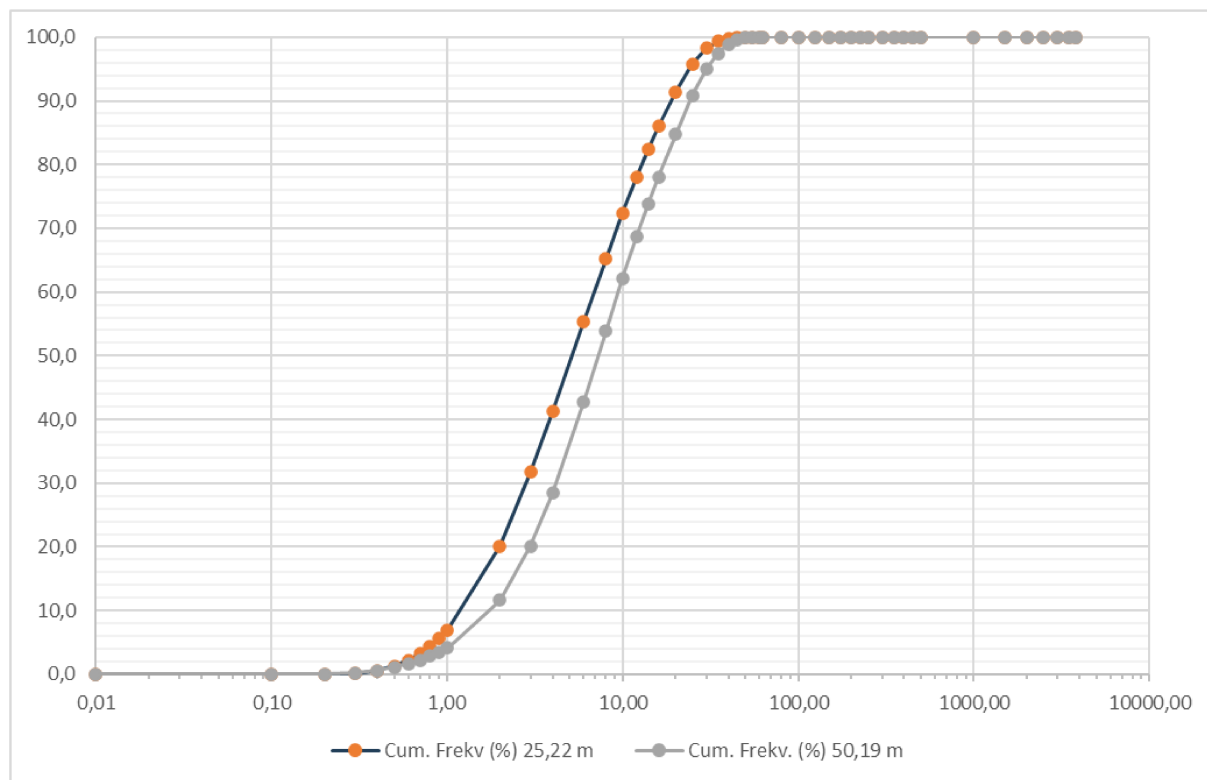
Preglednica 5: Hidrogeološke lastnosti lapornatega melja na 25,22 in 50,19 m globine (analize INA, priloga 4)

Globina vzorca (m)	Gostota vzorca ρ (g/cm ³)	poroznost (ϕ)	Intrinzična prepustnost k (mD)	Tlak EOB (bar)
25,22	2,7019	35,0	44,28	15
		34,1	24,02	20
50,19	2,6903	37,3	1570,51	15
		35,3	497,25	20

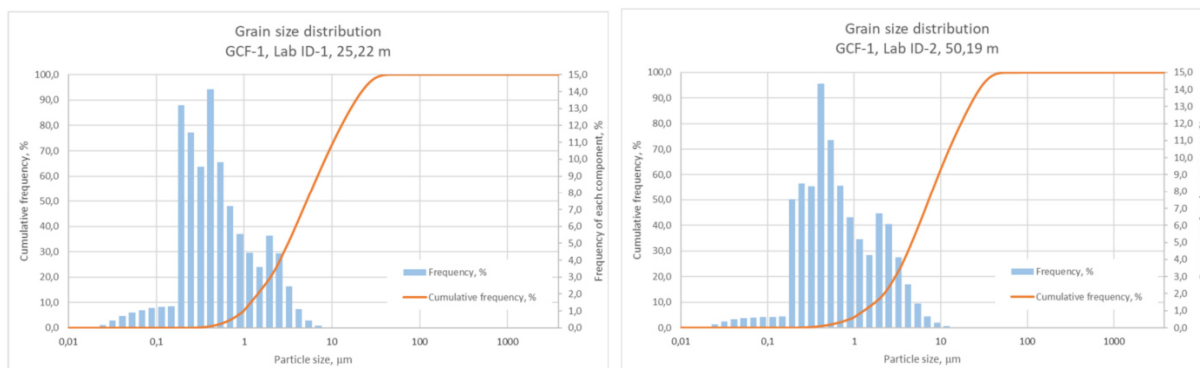
Klasifikacija sedimenta po zrnivosti po Udden-Wentworth (1922; Preglednica 6) potrjuje opaženo razliko v prepustnosti, kajti plitvejši vzorec ima več, 41,3 mas% glinenih zrn, medtem ko globlji le 28,5 mas% in je bistveno bolj meljast (Slika 21). To sta drobnozrnata vzorca. Po opisu oblike krivulje zrnivosti je porazdelitev zrn slaba (globlji vzorec) do srednja (plitvejši vzorec) (Slika 20). Plitvejši vzorec je glinasti melj, globlji pa melj z nekaj glinaste komponente.

Preglednica 6: Razvrstitev vzorcev po zrnivosti po Udden-Wentworth (1922)

Globina vzorca (m)	Glina (mas%)	Melj (mas%)	Pesek (mas%)	d_{10}	d_{30}	d_{60}	C_u	C_c
25,22	41,3	58,7	0,0	1,1	2,8	6,8	$=6,8/1,1=6,2$	1,0
50,19	28,5	71,5	0,0	1,8	4,1	9,0	$=9,0/1,8=5,0$	1,0



Slika 20: Prikaz kumulativne frekvenca velikosti zrn jeder na 25,22 in 50,19 m globine. X- os je v enotah mikro meter (iz analiz INA)



Slika 21: Prikaz granulometrične porazdelitve jeder na 25,22 in 50,19 m globine (analize INA, priloga 4)

10. Arhivske geotermične meritve v vrtinah

Po podatkih s portala Trajnostna energija (vir kart: GeoZS) so za dano lokacijo v Brodu pri Podbočju pričakovani naslednji geotermični pogoji:

- Temperatura na površini trdnih tal (temp 0 m) = 11,9 °C
- Gostota površinskega toplotnega toka (q) = 59,4 W/m²
- Toplotna prevodnost vrhnjih geoloških plasti (λ) = 1,7 W/mK
- Volumska toplotna kapaciteta kamnin in zemljin (cv) = 2,3 MJ/kgK

V preteklosti so bili na širšem območju Kostanjevice že izmerjeni v izgledu GCF-1/24 (Slika 17) podobni T-z profili, bodisi konvekcijski ali s šibkim pozitivnim oziroma negativnim temperaturnim gradientom, ki pa so tudi posledica drugačne prevrtane geološke sestave in hidrogeoloških pogojev, kot pa so zajeti z vrtino GCF-1. Primeri štirih vrtin pri Dobe pri Kostanjevici imajo temperature merjene kmalu (nekaj ur do en dan) po končanem vrtanju, kar pomeni, da stolpec teh vrtin ni bil toplotno uravnovešen:

Vrtina V-1/71 je z globino 191 m zavrtala v mezozojske karbonatne kamnine. Globlje od 20 m je izmerjen negativni temperaturni gradient, kar je posledica dejstva, da je že v svojem zgornjem delu vrtina prevrtala subtermalni vodonosnik s temperaturo malo nad 19 °C.

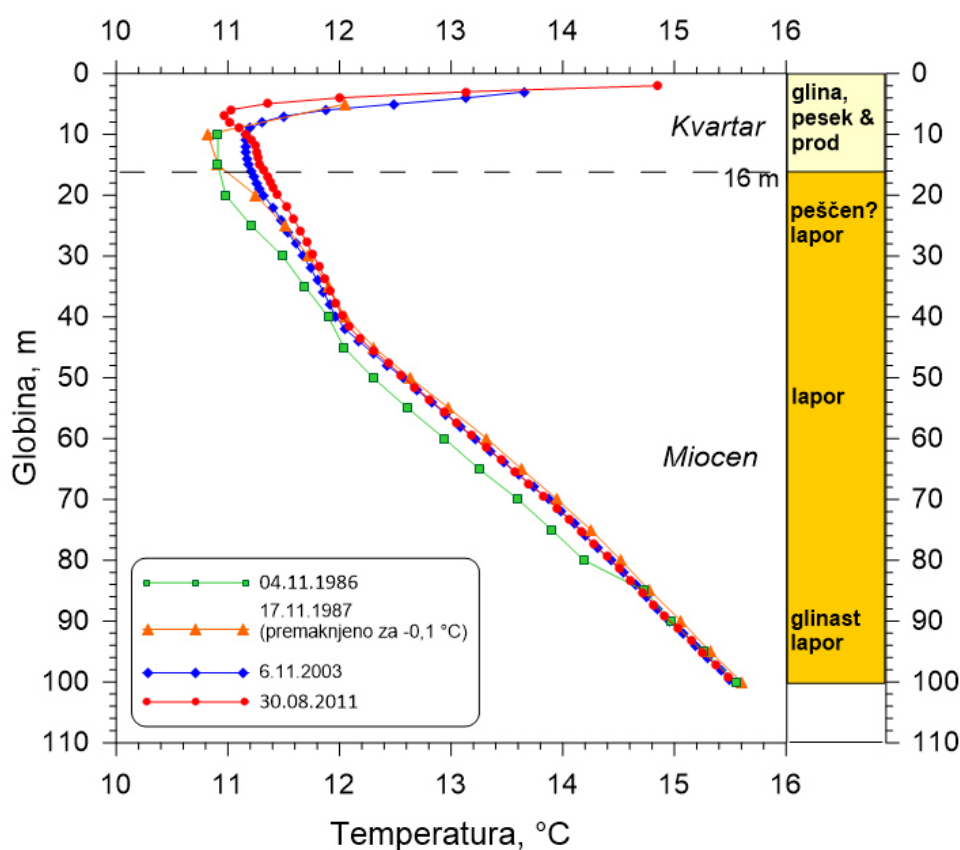
Vrtina V-3/72 je z globino 96 m prevrtala miocenski lapor (do 57 m glob.), dalje pa jurski apnenec. T-z profil je konvekcijski s temperaturo med 18 in 20 °C, temp. gradient je večinoma pozitiven, najbolj narašča med 20 in 40 m globine.

Vrtina V-5/72 je z globino 91 m zavrtala v zaglinjeni jurski apnenec. T-z profil je konvekcijski s temperaturo med 20 in 23 °C, temp. gradient je globlje od 20 m negativen.

Vrtina V-6/72 je z globino 45 m zavrtala v kredni-jurski apnenec in lapornati apnenec. T-z profil je konvekcijski s temperaturo med 22,5 in 24 °C, temp. gradient je globlje od 30 m negativen. Edino ta vrtina je bila med vsemi štirimi vrtinami kaptažna, ostale so raziskovalne (Verbovšek & Ravnik, 1986).

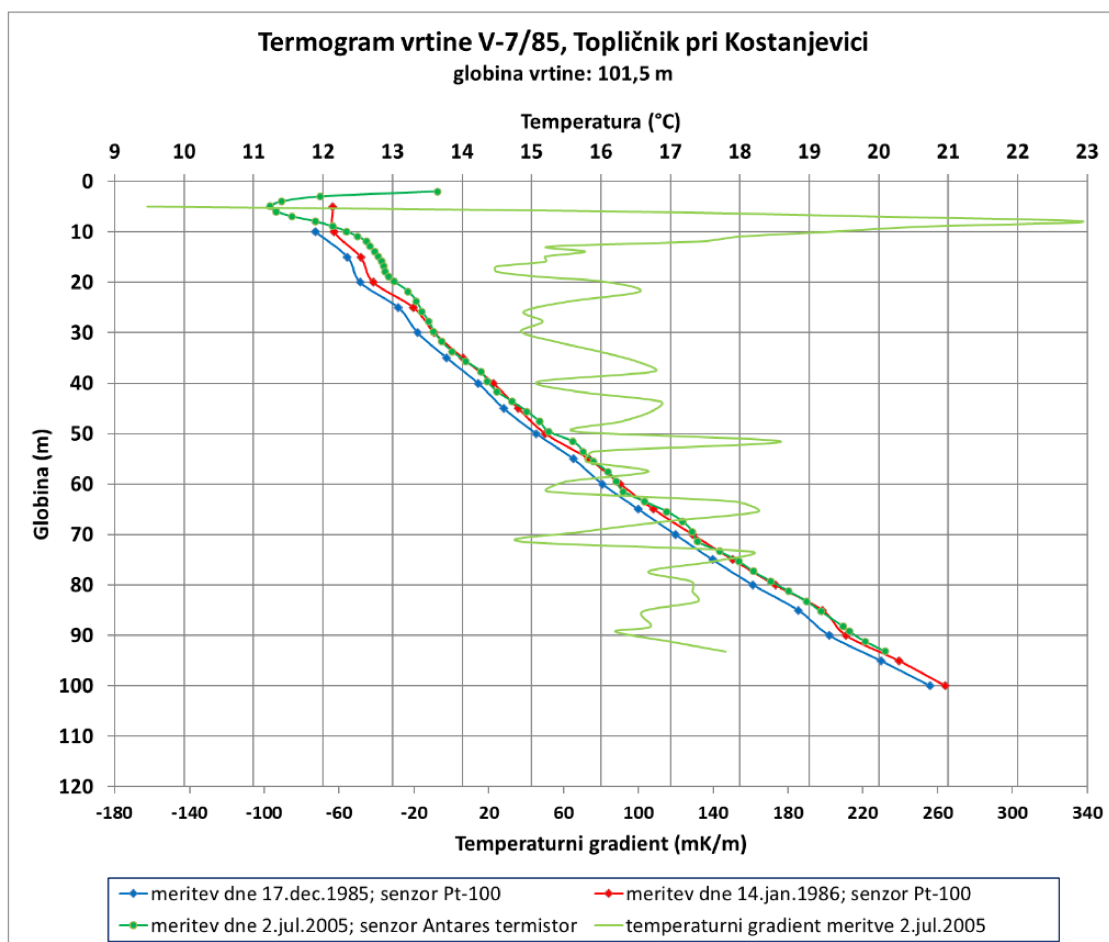
Nekaj kilometrov (točneje 3,690 km) zahodno od lokacije se nahaja 100 m globoka vrtina V-8/86 v Malencah pri Kostanjevici (Rajver in sod., 2006; Strgar in sod. 2017), ki je do 16 m prevrtala kvartarno glino, pesek in prod, nato pa miocenski lapor z večjim deležem gline z globino. Pri vrtini je bil izkopen jašek za temperaturne senzorje in pri tem odvzeto nekaj kvartarne peščene gline v globini 0,7 m, iz

vtine pa odvzeto jedro miocenskega glinastega laporja na 99 m globine. Prvi je imel toplotno prevodnost nasičenega vzorca določeno na $1,7 \pm 0,10$ W/mK, drugi pa na $1,50 \pm 0,04$ W/mK, toplotna difuzivnost pa $0,5-0,7 \cdot 10^{-6}$ m²/s za kamninsko podlago. V tej vrtini je bil tudi 4-krat izmerjen temperaturni profil (T-z) do globine 100 m (Slika 22). Podatki kažejo, da sega vpliv pronicanja padavin približno 1 m globoko, vpliv letnega cikla sončnega obsevanja (sezonskosti) pa večinoma okoli 20 m globoko. S ponovljenimi meritvami temperatur (T-z profili) v nekaterih vrtinah v Sloveniji, smo že ugotovili očiten vpliv globalnega segrevanja do globin 20 do 30 m, s časovnim razponom ponovljenega T-z profila med 8 in 20 leti po prvi meritvi pa je vpliv segrevanja površja opazen tudi do globine okrog 22 do 70 m (Rajver in sod., 2006). Zadnji trije T-z profili v vrtini V-8/86 jasno kažejo na vpliv globalnega segrevanja plitvega podtalja, za 0,12 °C v manj kot osmih letih in za 0,28 °C v skoraj 24 letih (Strgar in sod., 2017). Prevladujoč mehanizem prenosa toplote je kondukcija, čeprav so indicacije tudi za konvekcijo, vendar v zelo omejenem obsegu. Opazen je nekakšen prevoj oziroma minimum v T-z poteku v globini okrog 40 m, ki je domnevno lahko povzročen z vplivom nekega lateralnega precejjanja vode od reke Krke, za katerega pa nimamo nobenih trdnih kazalcev, saj tudi rahle variacije v 4-letnem opazovanju nivoja vode v vrtini v globini 1 m niso pokazale povezave na variacije v nivoju reke Krke. Možen vzrok za odklon v T-z poteku je lahko tudi le sprememba v toplotni prevodnosti prevrtanih različic laporja. Tudi bližnji vrtini V-7/85 (Topličnik; Slika 23) in SI-1/86 (Sajevce) (Rajver & Adrinek, 2023) sta navrtali oz. prevrtali miocenske laporje, tako da nekaj meritev že obstaja.



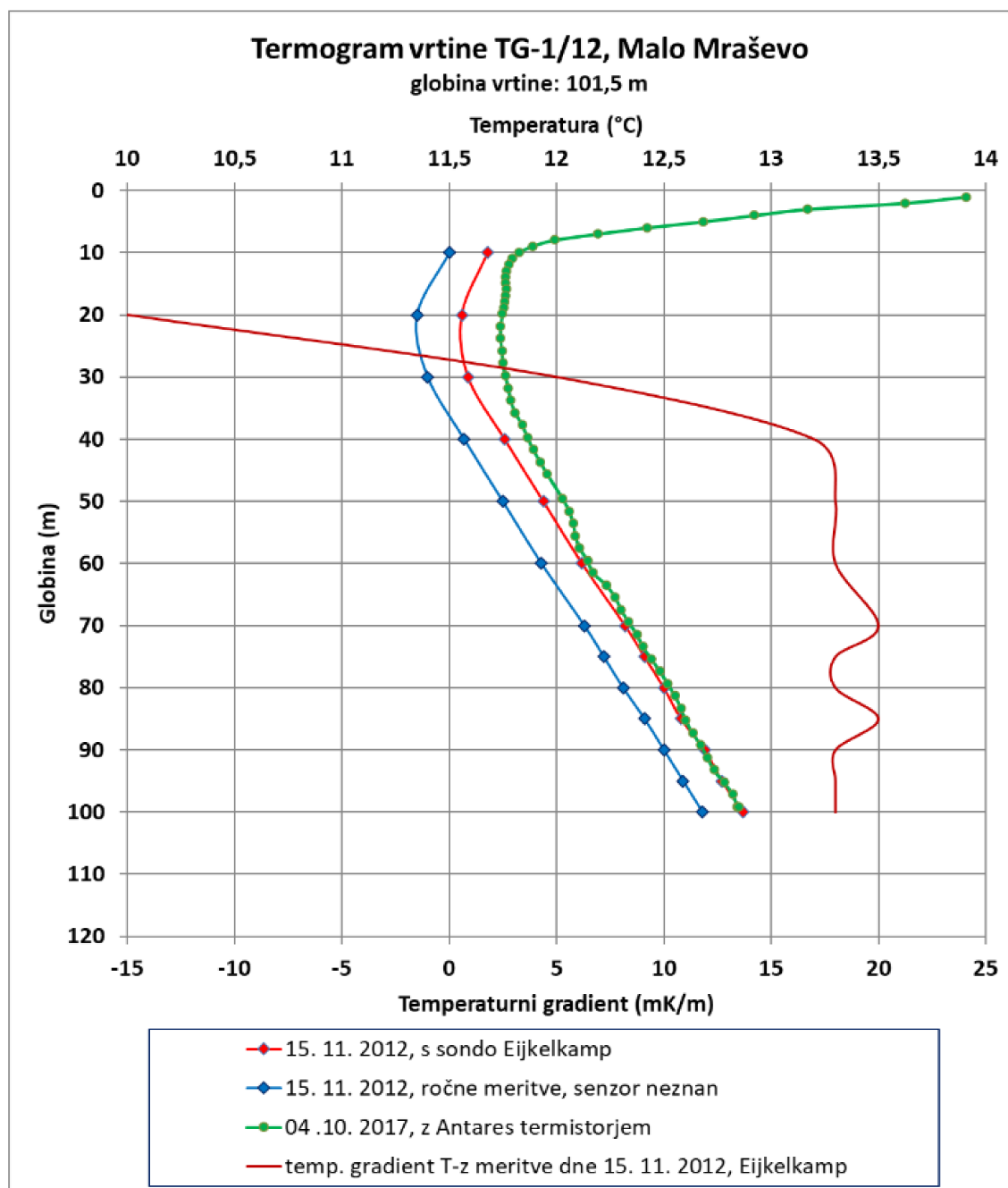
Slika 22: Točkovne meritve temperatur (T-z profili) v relativno bližnji vrtini V-8/86, Malence pri Kostanjevici (prirejeno po Rajver in sod., 2006; Strgar in sod., 2017).

Okrog 2,82 km ZJZ od GCF-1/24 je bila v dec. 1985 izdelana 101,5 m globoka termometrična vrtina V-7/85 pri Topličniku (N od Kostanjevice), s 3-krat izmerjenimi temperaturami (Slika 23). Ima najvišji beleženi temperaturni gradient v miocenskih sedimentih v tem delu Krške kotline na sploh (96 mK/m).



Slika 23: Točkovne meritve temperatur (T-z profili) v bližnji vrtini V-7/85, Topličnik pri Kostanjevici (po Rajver in sod., 2006). V globini 20 m se je segrelo za 0,32 °C v 19 letih.

Še bližje GCF-1/24, samo okrog 355 m severneje, je bila v oktobru 2012 za naročnika Ribogojstvo Goričar d.o.o., pri naselju Malo Mraševo, izdelana termometrična raziskovalna vrtina TG-1/12 z globino 101,5 m (Slika 24), ki je zavrtala le v miocenske sedimente. Globlje od 30 m je v njej izmerjen pozitiven temp. gradient, čeprav relativno nizek, le 17 do 18 mK/m. V njej so bile 3-krat izvedene meritve temperature po globini do dna vrtine, prvi dve dne 15. nov. 2012 z Eijkelkamp sondo in ročno merilno sondo (Petauer, oseb. spor.), zadnjo pa je po daljšem obdobju mirovanja izvedla ekipa iz GFU (Praga) dne 04. okt. 2017 z umerjenim Antares termistorjem (Šafanda, oseb. spor.). Ta zadnja meritev je kvalitetno najboljša, iz vseh meritev lahko tudi ugotovimo poprečni temperaturni gradient v odseku 60 do 100 m in ta znaša le 18 mK/m, ki je občutno nižji od izmerjenega v vrtini V-8/86, ki je okrog 56 mK/m v odseku 50 do 100 m (Slika 22) in seveda nižji od tistega v vrtini V-7/85 (Slika 23). Razlog je ta, da se dno vrtine V-8/86 nahaja le cca 330 m nad geotermalnim karbonatnim vodonosnikom jursko-triasne starosti, kar je še bolj potrjeno s še višjim izmerjenim temperaturnim gradientom (96 mK/m) v vrtini V-7/85 pri Topličniku, katere dno se nahaja samo cca 110 m nad geotermalnim vodonosnikom, ki se rahlo poglablja proti severu. Ta geotermalna cona je bila kmalu za tem potrjena z 800 m globoko raziskovalno-proizvodno vrtino SI-1/86 (Sajevce), iz katere priteka termalna voda s temperaturo 35,5 °C (Verbovšek in sod., 1986; Rajver in sod., 2015; Preglednica 7). Morda se takšne termalne cone v smeri jug-sever vlečejo še ponekod v tem predelu Krške kotline, očitno pa je območje okrog naselij Brod v Podbočju in Malo Mraševo »termalno mrtvo« in so tam potencialni karbonatni geotermalni vodonosniki in/ali širše razpokane cone v karbonatni podlagi povsem odsotni ali pa se nahajajo precej globlje.



Slika 24: Točkovne meritve temperatur (T-z profili) v vrtini TG-1/12, Malo Mraševo.

Vrtina PDT-1/03 (severno od Broda v Podbočju) je z globino 848 m najgloblja vrtina v tem območju in druga najgloblja v Krški kotlini. Prevertala je sedimente in kamnine miocenske starosti do globine 767 m (v globljem delu tudi apnenec, lapornat apnenec in konglomerat), do dna pa ostala v apnenčevi breči in apnencu zgornjekredne starosti. Globlje od 38 m je temperaturni gradient pozitiven, vendar relativno nizek, le 14,2 mK/m do globine 500 m, ki je še malce nižji od izmerjenega temp. gradienta (17 do 18 mK/m) v najgloblji vrtini v Krški kotlini, DRN-1/89 pri Drnovem.

Vrtina Kost-1/14 (JZ od Kostanjevice pri Galeriji B. Jakac) je z globino 146 m prevertala miocenske sedimente do globine 94 m, do dna pa ostala v zgornjetriasnem dolomitu. T-z profil kaže povsem konvekcijski značaj, globlje od 30 m je temp. gradient sicer pozitiven, vendar precej nizek, znaša le cca 1 do 10 mK/m.

Preglednica 7: Geotermični podatki z jedrovanih kamnin za tri lokacije v relativni bližini raziskovalne geosonde, Topličnik, Sajevece in Malence pri Kostanjevici na Krki. TC – toplotna prevodnost, TD – toplotna difuzivnost (Rajver & Adrinek, 2023)

Data Base No.	Borehole name	Locality	Lat. WGS84	Lon. WGS84	Altitude z	TVD	Rock or sediment type	Chrono-stratigraphy	TC λ	TC s.d.	Rock state	TC year of meas.	TC meas. device	TD a	Rock density ρ	Radiog. Heat Prod. H	H year of det.
					m	m			W/(m·K)	W/m·K				mm ² /s	g/cm ³	μ W/m ³	
14	V-7/85	Topličnik near Kostanjevica	45,8549	15,4130	152	52	marl or clayey marl	Upper Miocene	1,55	0,13	Semi-dry	1985-1986	MTP-4, MTP-1				
						100	marl or clayey marl		1,23	0,05	Semi-dry						
15	L-1/86	Mostec near Catež	45,8990	15,6268	143	102	marl or clayey marl	Upper Miocene	1,43	0,29	Saturated						
						200	marl		1,73	0,30	Saturated						
						262	sandy marl		1,82	0,34	Semi-dry	1986	MTP-4				
						462	dolomite		4,77	0,93	Semi-dry						
						599	dolomite	Upper Triassic	4,27	1,34	Semi-dry						
						700	dolomite		4,24	0,90	Semi-dry						
16	SI-1/86	Sajevece near Kostanjevica	45,8660	15,4277	153	101	marly clay (soft)		1,68	0,13	Saturated						
						205	clayey marl (soft)		1,45	0,10	Saturated						
						305	clayey marl		1,34	0,05	Semi-dry						
						406	marl (clayey?)	Miocene	1,50	0,08	Semi-dry						
						501	carbonatic sandstone		1,77	0,14	Semi-dry	1986	MTP-1, MTP-4				
						592	carbonatic sandstone		2,30	0,09	Semi-dry						
						636	limestone		2,78	0,07	Dry				2,732	0,82	1987
						688	limestone	Jurassic	2,95	0,12	Semi-dry						
						799	limestone	Jurassic or Triassic?	2,99	0,18	Semi-dry						
18	V-8/86	Malence near Kostanjevica	45,8667	15,3992	152	1	clay with some sand	Quaternary	1,70	0,10	Saturated	2003	TCS				
						99	clayey marl	Miocene	1,50	0,04	Semi-dry	1986	MTP-4				

11. Nove geotermične meritve izdankov v okolici Broda v Podbočju

V širši okolici Broda v Podbočju in Kostanjevice na Krki smo med 1. in 14. okt. 2024 izvedli geotermične meritve na 13 izdankih na severnem obrobju Gorjancev in odvzeli vzorce kamin za laboratorijske meritve (Slika 25 do Slika 27). Rezultate laboratorijskih analiz smo vključili tudi v poročilo za MOPE z naslovom Strokovna podpora na temo geotermalne energije za MOPE za leto 2024 (Rman in sod. 2024).

Za terenske meritve geotermičnih lastnosti kamnin smo uporabili analizator toplotnih lastnosti KD2 Pro (Decagon Devices, Inc., 2016) in sondo RK-1, s privzetim časom merjenja pet minut. Ta sonda meri toplotno prevodnost (TC) in toplotno upornost (ρ). Za meritve sipkih materialov se uporablja SH-1 sonda z dvojno iglo, ki meri volumetrično toplotno kapaciteto (C), toplotno difuzivnost (TD), toplotno prevodnost (TC) in toplotno upornost (ρ). Privzeti čas merjenja je dve minuti. Po vrtanju v kamninno se je počakalo nekaj minut, da se je temperatura kamnine povrnila v ravnotežje. Nato se je v luknjo nanese keramična pasta, vstavila sonda in začela meritev. Za vsak izdanek smo opravili meritev v dveh izvrtanih luknjah.

28



Slika 27. Meritve na izdankih pri Kostanjevici na Krki. Številka označuje točko na obeh kartah lokacij.

Preglednica 8: Rezultati terenskih geotermičnih meritev karbonatnih kamin pri Kostanjevici

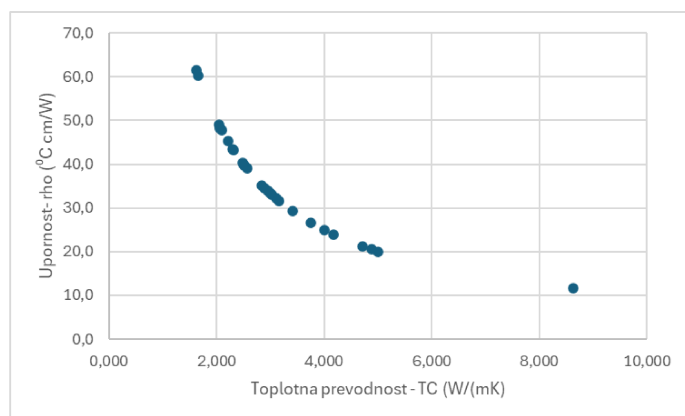
Vzorec	E (D96)	N (D96)	TC (W/(m·K))	rho (°C·cm/W)	Rel. napaka TC	Temp kamnine (°C)
1	78699.829	533195.723	5,010	20,0	0,1061	15,01
1A	78699.829	533195.723	2,842	35,2	0,0618	14,54
3A	78588.624	533801.227	4,010	24,9	0,0451	17,27
3B	78588.624	533801.227	2,071	48,3	0,0076	17,76
3C	78588.624	533801.227	3,167	31,6	0,0238	18,81
4	78710.113	533905.187	2,210	45,3	0,0279	14,61
4A	78710.113	533905.187	2,301	43,5	0,0256	14,06
11A	77723.31	533825.984	4,881	20,5	0,0669	16,07
11B	77723.31	533825.984	2,506	39,9	0,0361	15,33
11C	77723.31	533825.984	3,029	33,0	0,0303	14,95
12	78148.089	534130.572	8,629	11,6	0,187	17,74
12A	78148.089	534130.572	3,005	33,3	0,009	16,23
12B	78148.089	534130.572	2,955	33,8	0,014	16,5
26	79030.473	534599.017	3,422	29,2	0,068	17,67
26A	79030.473	534599.017	2,317	43,2	0,035	17,37
26B	79030.473	534599.017	62,705	6518,4	6,375	20,76
26C	79030.473	534599.017	2,072	48,3	0,033	16,69

Vzorec	E (D96)	N (D96)	TC	rho	Rel. napaka TC	Temp kamnine
			(W/(m·K))	(°C·cm/W)		(°C)
33	79295.956	534533.541	2,517	39,7	0,023	16,96
33A	79295.956	534533.541	2,043	49	0,024	16,25
32	79206.029	534491.016	2,89	34,6	0,049	17,97
32A	79206.029	534491.016	2,091	47,8	0,018	17,05
40	79277.287	534812.146	1,659	60,3	0,033	29,32
40A	79277.287	534812.146	1,626	61,5	0,015	27,86
39	79154.891	534945.291	3,745	26,7	0,0507	15,26
39A	79154.891	534945.291	2,960	33,8	0,0338	14,70
18	78773.675	534909.078	4,178	23,9	0,0961	15,22
18A	78773.675	534909.078	2,565	39,0	0,0438	14,16
99	77729.724	534604.16	2,482	40,3	0,3428	14,61
99A	77729.724	534604.16	3,103	32,2	0,0053	14,64
14	78557.946	534508.99	4,722	21,2	0,0373	15,04

Rezultati za toplotno upornost so razvidni iz terenskih meritev (Preglednica 8). Glede na tipe kamnin imamo štiri skupine s skupaj 27 meritvami (Preglednica 9), za katere smo izračunali osnovne statistične značilnosti geotermičnih lastnosti in skupno povprečje in jih primerjali z laboratorijskimi s TCS sondo.

Preglednica 9: Tipična statistika geotermičnih lastnosti karbonatnih kamnin pri Kostanjevici

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



Slika 28: Odnos med toplotno prevodnostjo in upornostjo pri 29 terenskih meritvah

Laboratorijske meritve smo izvedli z merilnikom Thermal Conductivity Scanner (TCS), ki deluje po principu nekontaktnega optičnega skeniranja vzorcev (Popov in sod., 2017), v geotermičnem laboratoriju na GeoZS dne 15. in 18. nov. 2024. Bilo je 22 vzorcev karbonatnih kamnin (starost: miocen do spodnja kreda): predvsem apnenci, po dva vzorca sta apnenčasti breči in kalkarenita ter dva dolomitizirana apnenca (ali apnenca, ki prehajata v dolomit).

Meritve so podale tipične vrednosti za toplotno prevodnost (TC) in toplotno difuzivnost (TD) karbonatnih kamnin (Preglednica 10) skladno z že objavljenimi rezultati za Slovenijo (Rajver & Adrinek, 2023). Apnenci imajo lahko precej širok razpon toplotne prevodnosti. Nižje prevodnosti so izmerjene na vzorcih kalkarenita, višje pa na apnenčastih brečah in dolomitiziranem apnencu (TC okrog 3,3 W/(mK)).

Preglednica 10: Rezultati laboratorijskih meritev toplotne prevodnosti in difuzivnosti 22 vzorcev karbonatnih kamnin z metodo optičnega skeniranja (TCS).

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						uporabljena 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			Inhomogeneity 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)										

Ker so v bližini tudi plastinjaki s solato, z uporabo kapljičnega namakanja in na dejanskih tleh, smo z igličnima sondama SH-1 in TR-1 merilca KD2 Pro določili tudi geotermične lastnosti tal (Preglednica 11). Meritve so bile narejene na 3 mestih ob gredi s solato, kar vpliva predvsem na vlažnost tal.

Preglednica 11: Meritev geotermičnih lastnosti tal v rastlinjaku na kmetiji Turk

Št.	SH-1					TR-1			vlažnost (%)
	TC (W/mK)	rho (mK/W)	C (MJ/m ³ K)	D (mm ² /s)	T (°C)	TC (W/mK)	rho (mK/W)	T (°C)	
1	0,308	3,244	1,020	0,302	11,59	0,331	3,023	11,34	8,5
2	0,686	1,457	2,277	0,301	13,35	0,839	1,191	13,41	15,3
3	0,505	1,981	1,738	0,29	13,57	0,683	1,464	13,64	17,8

12. Geotermične meritve na jedrih iz GCF-1/24

Terenske geotermične meritve so bile opravljene na jedrih iz GCF-1/24 iz globinskih odsekov 24,0-26,0 m in 50,0-52,5 m takoj po jedrovanju, na svežih sedimentih. Uporabili smo nestacionarno metodo z merilnikom KD2 Pro z iglastimi sondami za sedimente SH-1 in TR-1. Določene so bile na globinah 25, 26, 50, 51 in 52 metrov (Slika 5, Preglednica 12), tudi vlažnost jeder. Jedra so bila nato zavita s folijo, da se prepreči izguba vlage, in nato izmerjena še v laboratoriju GeoZS dne 11. nov. 2024 z nekontaktno optično metodo skeniranja z merilnikom TCS (Preglednica 13). Del jedra je bil izmerjen tudi z iglično sondo Tempos na poljskem geološkem zavodu PGI (Preglednica 14, Slika 31).

Načrt je bil, da na celotnem jedru vrtine laboratorijsko izmerimo toplotno prevodnost (oznaka TC oz. K) in toplotno difuzivnost (oznaka TD oz. D) ter izračunamo volumetrično toplotno kapaciteto. Ker nobeno izmed obeh jeder ni bilo kompaktno, ampak je bilo sestavljeno iz po nekaj centimetrov do nekaj decimetrov dolgih kosov (Slika 29), smo laboratorijske meritve s »Thermal Conductivity Scannerjem (TCS)« na GeoZS izvedli le na 14 izbranih kosih obeh jeder (Slika 30), in sicer kmalu po prevzemu, da se niso bistveno posušila in so obdržala vlažno notranjost.



Slika 29: Dve jedri lapornatega melja (iz globin 24,0 do 26,0 m in 50,0 do 52,55 m); skeniranje s TCS merilnikom se je izvedlo na 14 večjih kosih obeh jeder.



Slika 30: Vzorci z oznakami GCF1 (-5 -6 -7 in -14) med skeniranjem s TCS merilnikom

Preglednica 12: Terenske meritve toplotne prevodnosti in drugih toplotnih parametrov na jedru GCF-1/24 (v dneh 6. in 7. nov. 2024). Ti podatki niso vključeni na sliko 31. Vlažnost vzorcev s 25. metrov je bila 34,4%, s 50. metrov pa 30,3%

Oznaka Dušan	Globina, m	Senzor	TC W/(m·K)	rho m·K/W	C MJ/(m³·K)	TD mm²/s	Err	Temp (0) °C	Oznaka Karlo
GCF1-5	25,1 - 25,15	SH-1	1,292	0,774	2,724	0,474	0,0028	19,69	VRT1
GCF1-5	25,1 - 25,15	TR-1	1,457	0,686			0,0019	21,86	VRT2
GCF1-3	25,70 - 25,80	SH-1	1,19	0,84	3,057	0,389	0,0011	5,03	VRT3
GCF1-3	25,70 - 25,80	TR-1	1,162	0,861			0,0061	5,03	VRT4
GCF1-8	50,0 - 50,2	SH-1	1,111	0,9	3,015	0,368	0,001	10,07	VRT1A
GCF1-8	50,0 - 50,2	TR-1	1,021	0,98			0,0023	11,19	VRT2A
GCF1-9	51,0 - 51,16	SH-1	1,244	0,804	2,774	0,448	0,0019	12,29	VRT1B
GCF1-9	51,0 - 51,16	TR-1	1,076	0,929			0,0055	13,37	VRT2B
GCF1-11	51,72 - 51,82	SH-1	1,246	0,802	3,129	0,398	0,0012	11,68	VRT1C
GCF1-11	51,72 - 51,82	TR-1	1,383	0,723			0,0023	14,98	VRT2C

Preglednica 13: Laboratorijske meritve toplotne prevodnosti (TC) in toplotne difuzivnosti (TD) na jedru GCF-1/24 (dne 11. nov. 2024)

Oznaka	Globina m	TC mean W/(m·K)	TC min W/(m·K)	TC max W/(m·K)	G (%)	Inhomo. Factor	TD mean mm²/s	TD min mm²/s	TD max mm²/s	stanje vzorca
GCF1-1	24,13 - 24,22	1,629	1,506	1,759	3,872	0,155	0,394	0,285	0,474	dry
GCF1-2	24,62 - 24,70	1,652	1,563	1,771	3,375	0,126	0,493	0,281	0,747	dry
GCF1-5	25,06 - 25,27	1,641	1,405	1,819	5,145	0,252	0,524	0,348	0,76	sat
GCF1-4	25,35 - 25,44	1,603	1,232	1,808	7,146	0,359	0,494	0,35	0,645	dry
GCF1-3	25,69 - 25,79	1,647	1,599	1,699	1,357	0,06	0,321	0,231	0,432	dry
GCF1-8	50,00 - 50,22	1,723	1,509	1,947	5,361	0,255	0,521	0,318	0,703	sat
GCF1-7	50,31 - 50,40	1,812	1,732	1,986	3,468	0,14	0,381	0,237	0,479	dry
GCF1-6	50,69 - 50,77	1,877	1,69	2,061	6,227	0,198	0,368	0,173	0,514	dry
GCF1-9	51,05 - 51,17	1,942	1,712	2,223	7,396	0,263	0,43	0,273	0,511	sat

Oznaka	Globina m	TC mean W/(m·K)	TC min W/(m·K)	TC max W/(m·K)	G (%)	Inhomo. Factor	TD mean mm ² /s	TD min mm ² /s	TD max mm ² /s	stanje vzorca
GCF1-10	51,22 - 51,33	1,753	1,484	1,935	6,184	0,257	0,511	0,376	0,609	dry
GCF1-11	51,73 - 51,83	1,759	1,641	1,95	4,573	0,176	0,552	0,482	0,623	sat
GCF1-14	52,00 - 52,09	1,583	1,501	1,68	2,943	0,113	0,454	0,296	0,569	dry
GCF1-12	52,29 - 52,40	1,816	1,694	1,923	3,071	0,126	0,52	0,422	0,609	sat
GCF1-13	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)

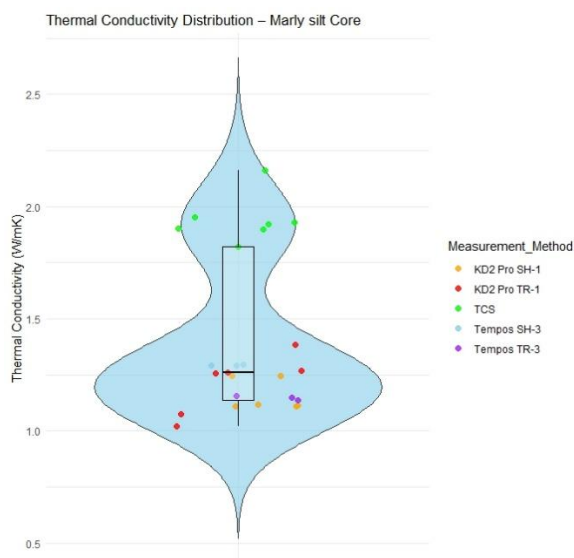
dry: suh sediment (= lahko je rahlo vlažen na površini)

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)



Slika 31: Rezultati meritev toplotne prevodnosti jedra iz globine 51,05-51,17 m iz GCF-1/24 po različnih metodah

Preglednica 14: Primerjava meritev z različnimi metodami na istih vzorcih iz GCF-1, na GeoZS (KD2 in TCS) in PGI (Tempos). Tempos in KD2 sta iglični sondi.

Globina	Metoda	TC W/(m·K)	Povp TC W/(m·K)	Povp TC W/(m·K)	Povp TC W/(m·K)
51,0-51,16 m	Tempos SH-3	1,2950			
51,0-51,16 m	Tempos SH-3	1,2910	1,293		
51,0-51,16 m	Tempos SH-3	1,2920		1,247	
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		1,153	1,451
50,0-50,20 m	KD2 Pro TR-1	1,0210			
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			

Kvečjemu lahko primerjamo rezultat ene meritve z iglično sondo, to je na vzorcu GCF1-5 (globina 25,1 - 25,15 m), ki znaša 1,457 W/(mK), z rezultatom skeniranja na praktično istem vzorcu GCF1-5, ki je pokazal 1,641 W/(mK). Ostale prenizke vrednosti TC lahko izločimo. Menimo, da so meritve s TCS bolj merodajne. Dokaz za to, da je z igličnimi sondami izmerjena toplotna prevodnost večinoma prenizka, je poskus izračuna gostote merjenega sedimenta iz podatkov v Preglednica 12 z enačbo $\rho = K / (C \cdot D)$ (n.pr. Rajver & Adrinek, 2023). Rezultat se suče okrog 1001 kg/m³, kar pa je v bistvu gostota vode; sedimenti imajo seveda višjo gostoto. Pokaže se namreč dejstvo, da imajo meritve z igličnimi sondami določeno slabo stran v smislu stika iglične sonde s sedimentom, ki je v stiku z njo, saj so vmes med zrnji melja lahko ali zrak ali voda, kar oboje zniža toplotno prevodnost.

Razvidno je, da so rezultati terenske izmerjene toplotne prevodnosti v (oznaka TC oz. K, Preglednica 10) nižji kot laboratorijski rezultati iz TCS merilnika (Preglednica 12). V splošnem so bolj vlažni vzorci pokazali malo višjo TC od tistih manj vlažnih. Povprečne vrednosti terenskih meritev so: toplotna prevodnost 1,218 W/(mK), difuzivnost 0,4154 mm²/s, toplotna kapaciteta 2,9398 MJ/(m³K) in upornost 0,8299 °C·cm/W.

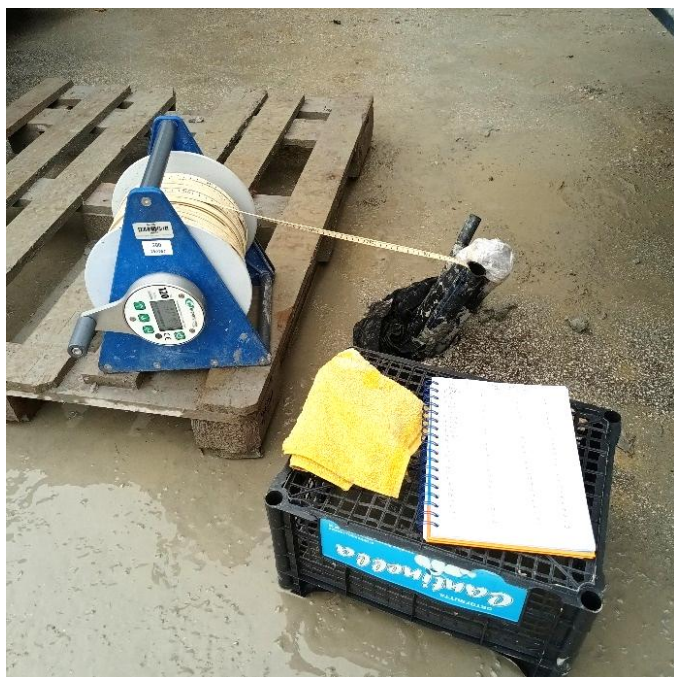
Poprečne vrednosti 14 vzorcev laboratorijskih meritev s TCS merilnikom so: toplotna prevodnost 1,723 ± 0,108 W/(mK) in toplotna difuzivnost 0,458 ± 0,070 mm²/s (Preglednica 13) in te vrednosti je pomembno upoštevati pri nadaljnjem modeliranju. Ugotovljene vrednosti TC se dobro ujemajo z dosedanjimi meritvami na vzorcih melja in melja s primesmi (Rajver & Adrinek, 2023) in tudi z rezultati nedavnih meritev na številnih vzorcih melja iz globoke vrtine Mt-9/23 (Moravske Toplice) ter na vzorcih melja in melja s primesmi iz plitvejših vrtin v okolici JEK (vrtine VOG-2, JC-1, VOG-3, HG-1, VOP-1, PRES1).

Če bi upoštevali še rezultat $1,457 \text{ W/(mK)}$ iz meritve z iglično sondo (s KD2 Pro merilnikom) na vzorcu GCF1-5, potem je skupno poprečje 15 meritev $1,705 \pm 0,11 \text{ W/(mK)}$. Povprečje 17 meritev po 4 metodah za jedra iz GCF-1 daje toplotno prevodnost $1,451 \pm 0,370 \text{ W/mK}$ (Slika 31). Imamo sicer dve skupini rezultatov, to je povprečje vseh 17 meritev. Strokovna ocena je, da je ta vrednost za lapornati melj prenizka in je okoli $1,72 \text{ W/(mK)}$ bolj realna.

13. Meritve temperature v opazovalni cevi

Po načrtu raziskav je bilo potrebno v izbranih časovnih intervalih v cevi za opazovanje izmeriti več temperaturnih profilov vzdolž geosonde (na 1 m) ter preko njih oceniti kakovost cementacije. Dne 9. 11. 2024 ob 10:33 je bila dolžina opazovalne cevi določena na 100,6 m od vrha cevi (ki je bila 21 cm nad koto tal), kar pomeni, da se njeno dno nahaja 100,39 m pod koto tal. Ker je karotaža pokazala globino vrtine 99,6 m, je morda vstavljena cev v vrtino nekoliko povita.

Meritve so bile na začetku opravljene z nivo metrom Hydrotechnik typ 120 z dolžino kabla 200 m, ki omogoča meritve globine, temperature (na eno decimalko) in elektoprevodnosti vode (Slika 32). Zaradi njegove okvare je bil po 11. 11. 2024 uporabljen drug merilec, z AquaLink temperaturnim senzorjem z dolžino kabla 200 m, ki omogoča meritve globine in temperature (na 5 decimalk). V vrtino je bila tudi nameščena sonda StarOddi DST Centi-T, ki meri temperaturo v urnem intervalu na izbrani globini, linearno do 40°C , zdrži pa do 60°C in 200 m vodnega stolpca. Nameščena je na kevlerjevi ariadnini vrvici.



Slika 32: Izvedba ročne meritve temperature v opazovalni cevi po cementaciji geosonde

Opazovalna sonda je bila v petek 9. 11. 2024 prvič napolnjena z vodo iz vodovoda, ki je imela temperaturo okoli $11,6^\circ\text{C}$. Pred prvo meritvijo je bil nivo vode na 24 m pod robom cevi (ki je bil 21 cm nad koto tal) in vrtalci so rekli, da se cev noče napolniti, ker vedno izbruhne vodo nazaj. Potem smo 9. 11. 2024 ob 10:45 nalivali vodo počasneje in cev se je do vrha napolnila z vodo brez težav. Zaradi

različnih velikosti merilnih sond in izvlačanja kabla je občasno potrebno doliti vodo, kar je zabeleženo v Preglednica 15. Zaenkrat sklepamo, da opazovalna cev tesni.

Preglednica 15: Pregled meritev gladine vode v (načeloma na dnu zatesnjeni) opazovalni cevi pred začetkom geotermičnih meritev.

Datum	Globina do vode v opazovalni cevi (m pod koto tal)
09/11/2024 11:21	1,63
09/11/2024 12:04	1,72
09/11/2024 18:15	polna do vrha
10/11/2024 09:45	polna do vrha
11/11/2024 10:15	polna do vrha
13/11/2024 10:51	polna do vrha
14/11/2024 17:05	polna do vrha
20/11/2024 10:00	2,12
19/12/2024 11:50	2,09
19/12/2024 12:15	1,61
21/01/2025 16:15	polna do vrha

Meritve so vedno opravljene najprej navzdol s korakom po 1 m in v smeri navzgor na vsakih 5 m; na primer, meritve dne 19. 12. 2024 so opravljene na vsak meter (začetek ob 11:50) in na vsakih 5 m (zadnja meritev (začetek ob 12:15)). Na vsaki globini se počaka 15 sec in zapiše meritev.

Meritve so bile do sedaj opravljene v sedmih različnih dneh: 9., 10., 11., 13., 14. in 15. 11. 2024 in 19. 12. 2024. Pred tem je bila 8. 11. 2024 izvedena temperaturna karotaža (tako po vrtnanju vrtine), ki jo lahko prevzamemo za začetno stanje (Slika 17, Slika 33).

Namen meritve je bil dvojen:

- Ugotoviti uspešnost cementacije vrtine
- Sčasoma ugotoviti naravne geotermične pogoje in sezonsko spreminjanje temperature tal.

Karotažne meritve temperature (termokarotaža) ali točkovne meritve temperature, ki se izvajajo nekaj časa po cementaciji, so primerne za zbiranje naslednjih informacij (Kappelmeyer & Haenel, 1974):

- lokacija vrhov cementa (raven dviga cementa za cevitevijo),
- indikacije o prostornini cementa okoli vrtine,
- indikacije o kontaminaciji cementa z vrtalno izplako.

Proces strjevanja cementa je eksotermni postopek in povzroči dvig temperature v cementu in njegovi okolici. Dobra izolacija okoli cementa spodbuja povišanje temperature. Cement, stisnjen v vrtino, je na eni strani obdan s kamnino, na drugi strani pa s cevitevijo vrtine (v primeru GCF-1 cevitevje ni). Toplotna prevodnost kamnin je relativno nizka, zato je dvig temperature v cementu razmeroma stabilen, če je kroženje vrtalne izplake (drilling mud) že ustavljeno (tudi te v vrtini GCF-1 ni bilo). Stopnja cementacije je jasno vidna z izrazitim povišanjem temperature. Velike količine cementa okoli vrtine povzročijo večjo anomalijo kot tanek sloj. Kontaminacija cementa z vrtalno izplako (v primeru GCF-1 je ni) upočasni strjevanje cementov, posledično se dvig temperature pojavi počasneje in postane manj izrazit, vendar

traja dlje časa. Če se temperatura le počasi spreminja, to pomeni, da se za cementom verjetno nahaja material z dobro toplotno prevodnostjo. Če se razvoj anomalije odvija hitro, pa material s slabšo prevodnostjo. Dobre informacije o cementaciji je mogoče zbrati, če predpostavimo, da so razmere v vrtini v intervalu med vbrizgavanjem cementa in temperaturno karotažo statične.

Najprimernejši čas, v katerem je treba počakati, ko se cementni čep spusti, da bi imeli temperaturno anomalijo, ki je dovolj velika, da pokaže cone cementiranja, je odvisen od individualnega časa strjevanja uporabljenega cementa. Hitro vezni cementi kažejo dvig temperature po nekaj urah. Še leta 1950 je veljalo, da je najdaljša čakalna doba 12 ur. Danes se dobre informacije dobijo po več dneh. To je lahko tudi posledica izjemno dolgih časov strjevanja posebnih cementnih mešanic. Za boljšo indikacijo o onesnaženosti cementa z vrtalno izplako (podtalnico, podpovršinsko soljo itd.) je lahko uporabna serija karotaž temperature, ki se izvajajo v intervalih od 12 do 24 ur. Če uporabimo relativno hitro vezne cimente, neonesnažene cone po kratkem času povzročijo anomalije, ki relativno hitro izginejo. Kontaminacija povzroči zakasnitev razvoja anomalije.

Meritve premera vrtine (caliperja) so lahko v pomoč pri analizi meritev temperature. Na razvoj in razpad temperaturne anomalije vpliva toplotno obnašanje cementa in v določeni meri toplotne lastnosti kamnin za cevitevijo ali cementom. Če zapis premera ne kaže spremembe v premeru vrtine in ni verjetne kontaminacije cementa, je lahko počasen razvoj temperaturne anomalije povezan z odseki kamnin z dobro toplotno prevodnostjo, na primer z mokrim peskom itd., hiter razvoj večje temperaturne anomalije pa z odseki kamnin z nizko toplotno prevodnostjo (Kappelmeyer & Haenel, 1974). V primeru GCF-1 meritev premera vrtine ni bilo.

S cementacijo v vrtini GCF-1 so končali dne 09. 11. 2024 ob 10:05 uri, prvo ročno temperaturno karotažo (T-z meritev z merilno sondo na vsak meter) smo izvedli isti dan ob 11:21 uri, torej 1 h 17 min po končani cementaciji. Takoj za njo pa ob 12:04 (1 h 59 min po končani cementaciji) še drugo T-z karotažo (na vsakih 5 m navzgor). Obe kažeta, da se je cement hitreje strjeval v zgornjem odseku 2 do 8 m, nekaj slabše se je strjeval v coni okrog 60 m globine, hitreje pa se je strjeval spet v odsekih 70 do 80 m, 83 do 88 m ter 93 do 98 m. Morda je bila v ostalih odsekih cementacija vsaj malo kontaminirana (z vodo). Isti dan smo ponovno izvedli T-z karotažo (ob 18:15 po 1 m navzdol in ob 18:50 po 5 m navzgor). Tudi ti dve kažeta na hitrejšje strjevanje cementa v globinskem odseku 3 do 8 m in 10 do 16 m, globlje pa slabše izraženo (počasnejše strjevanje) v globini okrog 42 m, malo hitrejšje strjevanje v odsekih 58 do 66 m, 70 do 81 (posebno med 75 in 80 m), od 84 do 87 m, in malo počasnejše strjevanje od 92 do 97 m.

Dne 10. 11. 2024 smo izvedli naslednjo T-z karotažo, ob 09:45 (23 h 40 min po končani cementaciji), ki kaže še naprej na dobro strjevanje cementa v odseku 3 do 8 m, še hitrejšje strjevanje na odseku 11 do 16 m, počasnejše pa na odseku 17 do 24 m.

Dne 11. 11. 2024 ob 10:15 smo izvedli naslednjo T-z karotažo (po 1 m navzdol), ki kaže na nadaljnje strjevanje v odseku 3 do 6 m, še boljše strjevanje med 10 in 16 m, globlje pa počasnejše strjevanje cementa, bolj vidno na odsekih okrog 26 m, 43 m, 58 do 60 m (do 64 m), od 70 do 79 m, 82 do 86 m in od 92 do 97 m. S časovnim odmikom temperaturne anomalije počasi »odmirajo«, kar kažejo naslednje T-z karotaže.

Dne 13. 11. 2024 smo jo izvedli ob 10:51 uri, kmalu po ponovnem vbrizgavanju cementa, in kaže na hitro strjevanje v zgornjih 16 m in tudi v posameznih odsekih globlje, okrog 42 m globine, med 56 in 64 m, med 70 in 81 m, med 83 in 96 m.

Na podobne odseke kaže naslednja T-z karotaža dne 14. 11. 2024 ob 17:05 (po 1 m navzdol), predvsem na zelo hitro strjevanje v odseku 6 do 10 m, globlje pa v podobnih odsekih dobro strjevanje kot prejšnja karotaža dne 13. 11. 2024.

Dne 15. 11. 2024 smo izvedli ob 16:40 še eno T-z karotažo, ki je pokazala spet na isto cono zelo hitrega strjevanja v odseku 6 do 10 m globine, globlje pa na podobne cone počasnejšega strjevanja cementa.

Interpretacijo T-z karotaže dne 19. 12. 2024 (po 1 m navzdol) smo že prej navedli (Slika 33).

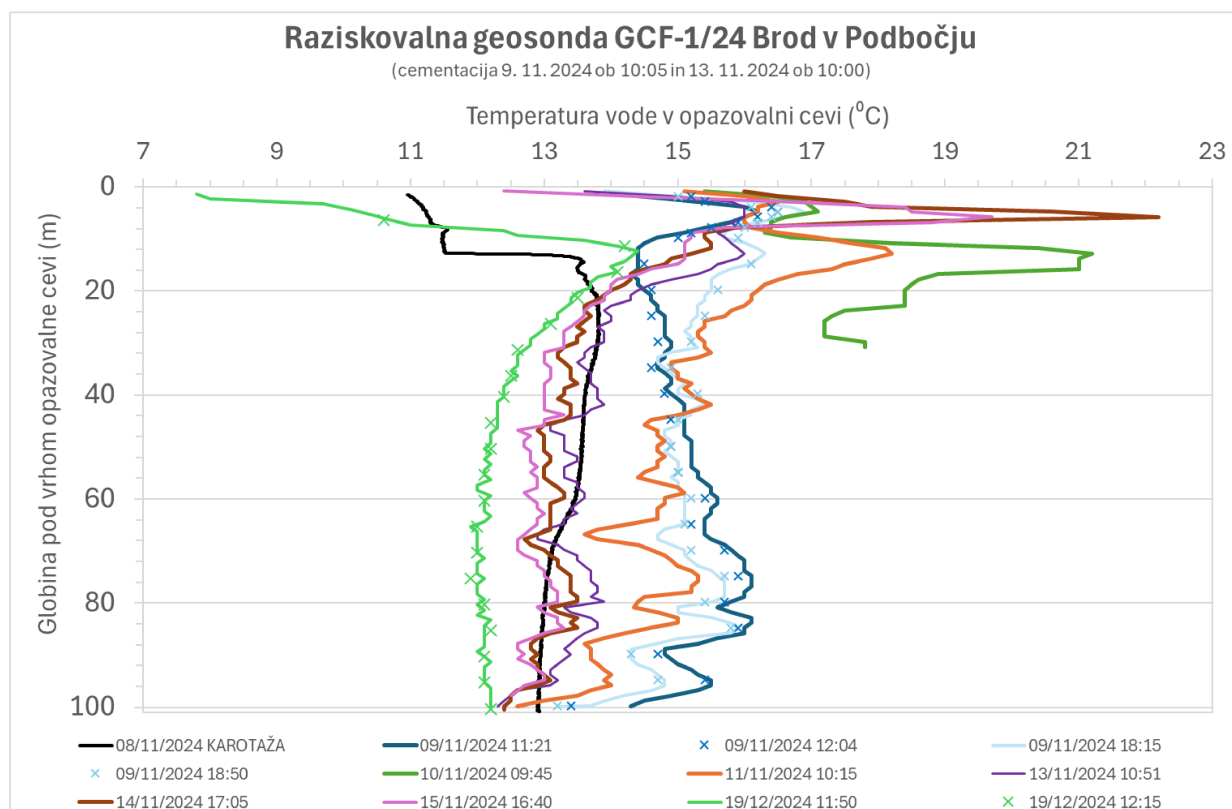
Iz meritev toplotne prevodnosti jedreh potrdimo njeno razmeroma visoko vrednost v obeh odsekih. V globljem delu vrtine se je temperatura ponekod zniževala hitreje, kar lahko pomeni sedimente z nižjo toplotno prevodnostjo – po geološkem popisu je tu več peščene komponente, v odseku 84-90 m tudi prodniki. Oboje verjetno bistveno ne zvišuje toplotne prevodnosti, saj prevladujejo karbonatne kamnine. Seveda pa lahko močnejša anomalija pomeni tudi večjo količino vbrizganega cementa.

Izrazito stalna oziroma nižja temperatura je najpogostejša na globinah: 67 m, 79-80 m, 89-91 m in dnu vrtine. Počasnejši razvoj anomalije lahko pomeni prisotnost sedimentov z boljšo toplotno prevodnostjo ali pa krajše odseke, kjer je plast cementa na obodu tanjša.

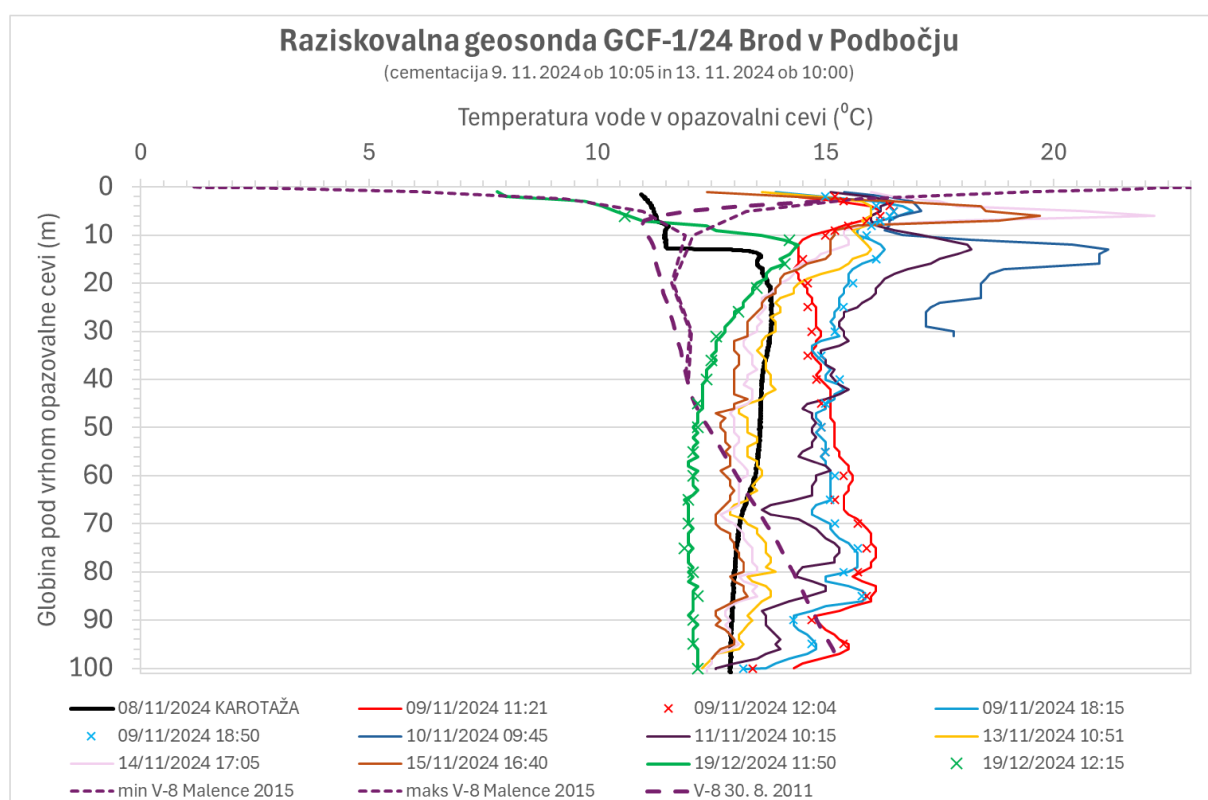
Najmanjši porast temperature in vsake serije meritev je na dnu vrtine - karotažna meritev 8. 11. poda 12,9 °C. Najvišja temperatura po cementaciji je bila 14,2 °C, v že bolj stabiliziranih pogojih decembra 2024 je bilo izmerjenih 12,2 °C, meritve z urno sondo do januarja 2025 pa dajo nespremenljivo temperaturo 12,63 °C (Slika 35). Iz primerjave s termogramom iz vrtine V-8 v Malencah (ki ima sicer dokazan vpliv globlje termalne vode), bi na tej globini pričakovali nekaj nad 15 °C.

Največji porast temperature je bil na globini približno 11-16 m po prvi cementaciji (dosežena temperatura 21,1 °C, tako da 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 z doseženimi 22,2 °C. Očitno je tudi tu plitveje nek sloj z več prodniki.

Uravnotežen profil iz dec. 2024 kaže na največjo anomalijo na globini 11-12 m, kar je na stiku kvartarja in miocenskega melja. To je za slab meter globlje, kot se nahaja izrazit sezonski prevoj v Malencah (Slika 34; ki so sicer geološko težko primerljive, ampak ker drugega boljšega bližjega profila ni, podajamo tega), zato je to verjetno vpliv podzemne vode, ki se nahaja v kvartarnih rečnih sedimentih.

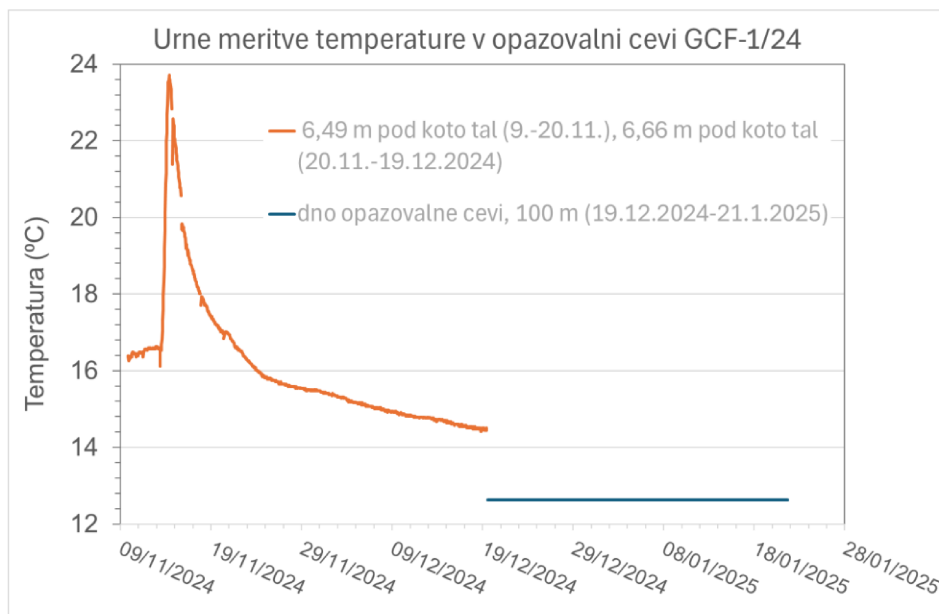


Slika 33: Vse meritve temperature v opazovalni cevi GCF-1/24 v letu 2024



Slika 34: Vse meritve temperature v opazovalni cevi GCF-1/24 v letu 2024 in primerjava z meritvami v vrtini V-8 v Malencah (min-max razpon v 2015 in enkratna meritev avg. 2011 – vir: D. Rajver)

Za opazovanje vpliva cementacije smo na globino 6,5 m (Slika 35) namestili urni merilec po drugi cementaciji 13. 11. 2024 ob 10:00. Začetna temperatura je bila 16,54 °C in porast se zazna že v 2 urah z zelo linearno rastjo (0,31 °C/uro), ki v 23 urah doseže najvišjo vrednost, 23,71 °C. Nato se začne počasno (logaritemsko) ohlajanje, ki doseže prevoj trenda sredi 24. 11. 2024 ob 16:00. Zato ocenjujemo, da se vpliv cementacije po teh 11 dneh in 15 min ne vidi več. Nato se 24 dni in 50 min, do 19. 12. 2024 ob 11:00 nadaljuje linearni trend zniževanja temperature (15,84-14,45 = 1,39 °C) s hitrostjo -0,056 °C na dan. To bi že lahko pripisali sezonski spremembi podzemne vode. Ob tem tudi izpostavljamo, da zvezni (14,45 °C) in ročni (10,7 °C) merilec nista pokazala istih vrednosti, ročni je najvišjo temperaturo 14,4 °C zabeležil na globini 12,3 m.



Slika 35: Urne meritve temperature s sondo za zvezne meritve temperature Centi-T na dveh različnih globinah, vsaka po mesec dni.

14. Zaključek

Raziskovalna geosonda GCF-1/24 je 100,4 m globoka vrtina z enojno U-cevjo, eno opazovalno cevjo (zaprto na dnu in napolnjeno z vodo) ter zanko z optičnimi DTS vlakni, ki omogočajo meritve temperature vzdolž celotne dolžine.

Vrtanje je trajalo od 6. do 8. 11. 2024 in odvzeti sta bili dve jedri, na globini 24,0-26,0 m in 50,0-52,5 m. Takoj za tem je bila dne 8. 11. 2024 karotaža in vgradnja cevi v vrtino, dne 9. 11. 2024 prva in nato dne 13. 11. 2024 druga cementacija. Tlačni preizkus je bil izveden dne 11. 11. 2024, postavitev jaška dne 20. 11. 2024. Temperaturne meritve so bile izvedene v dneh (8.), 9., 10., 11., 13., 14. in 15. 11. 2024 in 19. 12. 2024 in dokazujejo območja obsežnejše cementacije, ob tem pa povsem stacionarnih pogojev verjetno še nismo dosegli.

Meja med kvartarnimi rečnimi sedimenti, ki vsebujejo tudi dobro prepustno plast peščeno glinastega melja in glinasto peščenega proda, po karotaži postavljamo na 9,73 m, po popisu pa na globino 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.

Določene so bile geotermične lastnosti lapornatega melja in okoliških karbonatnih kamnin. Temperaturni podatki ne kažejo nobene toplotne anomalije, le zelo nizek geotermični gradient, kjer je najnižja temperatura določena na dnu vrtine in je znašala 12,63 (do 12,89 °C) v statičnih pogojih. To tudi dokazuje, da se lokacija te geosonde bistveno razlikuje v geotermičnem smislu od lokacije Malence z vrtino V-8 (in tudi lokacije Topličnik z V-7 vrtin).

16. Literatura

- Atlas Trajnostne Energije – Geotermija potenciali. Dostopno na: <https://borzen.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=756ad50afb9240c58e95fc29d6f09170>
- GeoZS, 2021: Smernica za vrtanje v plitvi geotermiji (<https://www.energetika-portal.si/podrocja/rudarstvo/plitva-geotermalna-energija/#c1361>)
- Kappelmeyer, O., Haenel, R., 1974: Geothermics with special reference to application. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 238 p.
- Poljak, M. 2019a: Geološka karta vzhodnega dela Krške kotline 1:25000. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije.
- Poljak, M. 2019b: Geološka karta vzhodnega dela Krške kotline 1:25000. Tolmač. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije: 108 str.
- Poljak, M. 2019c: Geološka karta vzhodnega dela Krške kotline 1:25000. Prečni profili. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije.
- Poljak, M. & Rajver, D., 2006: Geološke in geotermalne raziskave v vrtini PDt, Brod pri Podbočju. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Rajver, D., Šafanda, J., Dedeček, 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>
- Rajver, D., Lapanje, A., Rman, N., Poljak, M., Matoz, T. 2015: Hidrogeološke strokovne osnove za pridobitev koncesije za vir termalne vode pri Kostanjevici na Krki (vrtina Si-1/86 pri zaselku Sajevce). Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Rman, N., Rajver, D., Lapanje, A. in sod. 2024: Strokovna podpora na temo geotermalne energije za MOPE za leto 2024. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije.
- 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>
- 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.

LOCATION: KOSTANJEVICA PRI KRKI

FIELD LOGGER: KENOINGER, VANEJC

DEPTH (m)	RUN No.	RECOVERY	Drilling profile (mm)	Casing profile (mm)	LITHOLOGY	M					GRADE (%)	COLOUR	HCl reaction	cementation	STRUCTURE	FINE GRAINED			COARSE GRAINED			SHAPE	COMMENTS/DESCRIPTION	SAMPLES
						C	S	F	M	G						CONSISTENCY	MOISTURE	PLASTICITY	SORTING	ROUNDNESS	SPHERICITY			
1			175	163	2.2.2.2						50 glin	54	W										17a 5 pralniki - verjetno nastajajo kar je pod asfaltno	
2			175	163	2.2.2.2						50 M	54	W		v osnovi pesčeno glinasti melj								2a rahlo pesčena oz. meljasta glina rane barve	
3			175	163	2.2.2.2						30 G	54	W										meljasta glina, v glini so preprosti pesčeni pralniki (5) barve 10 do 5/6 velikost do 1 cm	
4			175	163	2.2.2.2						20 Pe	54	W										NS, 5/6 2/4 - meljasta glina, pesčeni rumeni pralniki, bolj drobna osnova glinasti melj	
5			175	163	2.2.2.2						5 prod	54	W										pesčeno glinasti melj, bolj meljasto kot pesčeno, malo rumenih pralnikov	
6			175	163	2.2.2.2						10 Pe	54	W										pralniki do 1 cm, rumeni, meljasta glina	
7			175	163	2.2.2.2						50 M	54	W										glinasto pesčeni melj s preprostim rumenimi pralniki	
8			175	163	2.2.2.2						20 G	54	W										pralniki temnih preprostih (5/6 2/2) velikosti do 1 cm, rumenih pralnikov	
9			175	163	2.2.2.2						5 prod	54	W										glinasti melj	
10			175	163	2.2.2.2						10 Pe	54	W										glinasti melj s manj pralniki, redki rumeni pralniki + majhni	
11			175	163	2.2.2.2						50 M	54	W										veliki pralniki, vsi klasični	
12			175	163	2.2.2.2						20 G	54	W										glinasto pesčeni prod	
13			175	163	2.2.2.2						50 M	54	W										10-15 mm apn, apn, zeleni pesč., meljasta, karat	
14			175	163	2.2.2.2						20 G	54	W										menjavajo glinastega melja in prod, pralniki evake sestave	
15			175	163	2.2.2.2						50 M	54	W										glinasti melj s posameznimi pralniki	
16			175	163	2.2.2.2						20 G	54	W										meljasta	
17			175	163	2.2.2.2						50 M	54	W										pesčeno lapornati melj	
18			175	163	2.2.2.2						30 G	54	W										pesčeno lapornati melj	
19			175	163	2.2.2.2						20 Pe	54	W										pesčeno lapornati melj	
20			175	163	2.2.2.2						50 M	54	W										pesčeno lapornati melj	
21			175	163	2.2.2.2						30 G	54	W										pesčeno lapornati melj	
22			175	163	2.2.2.2						10 Pe	54	W										pesčeno lapornati melj	
23			175	163	2.2.2.2						50 M	54	W										pesčeno lapornati melj	
24			175	163	2.2.2.2						30 G	54	W										pesčeno lapornati melj	
25			175	163	2.2.2.2						10 Pe	54	W										pesčeno lapornati melj	
26			175	163	2.2.2.2						50 M	54	W										pesčeno lapornati melj	
27			175	163	2.2.2.2						30 G	54	W										pesčeno lapornati melj	
28			175	163	2.2.2.2						10 Pe	54	W										pesčeno lapornati melj	
29			175	163	2.2.2.2						50 M	54	W										pesčeno lapornati melj	
30			175	163	2.2.2.2						30 G	54	W										pesčeno lapornati melj	
31			175	163	2.2.2.2						10 Pe	54	W										pesčeno lapornati melj	
32			175	163	2.2.2.2						50 M	54	W										pesčeno lapornati melj	
33			175	163	2.2.2.2						30 G	54	W										pesčeno lapornati melj	
34			175	163	2.2.2.2						10 Pe	54	W										pesčeno lapornati melj	
35			175	163	2.2.2.2						50 M	54	W										pesčeno lapornati melj	
36			175	163	2.2.2.2						30 G	54	W										pesčeno lapornati melj	

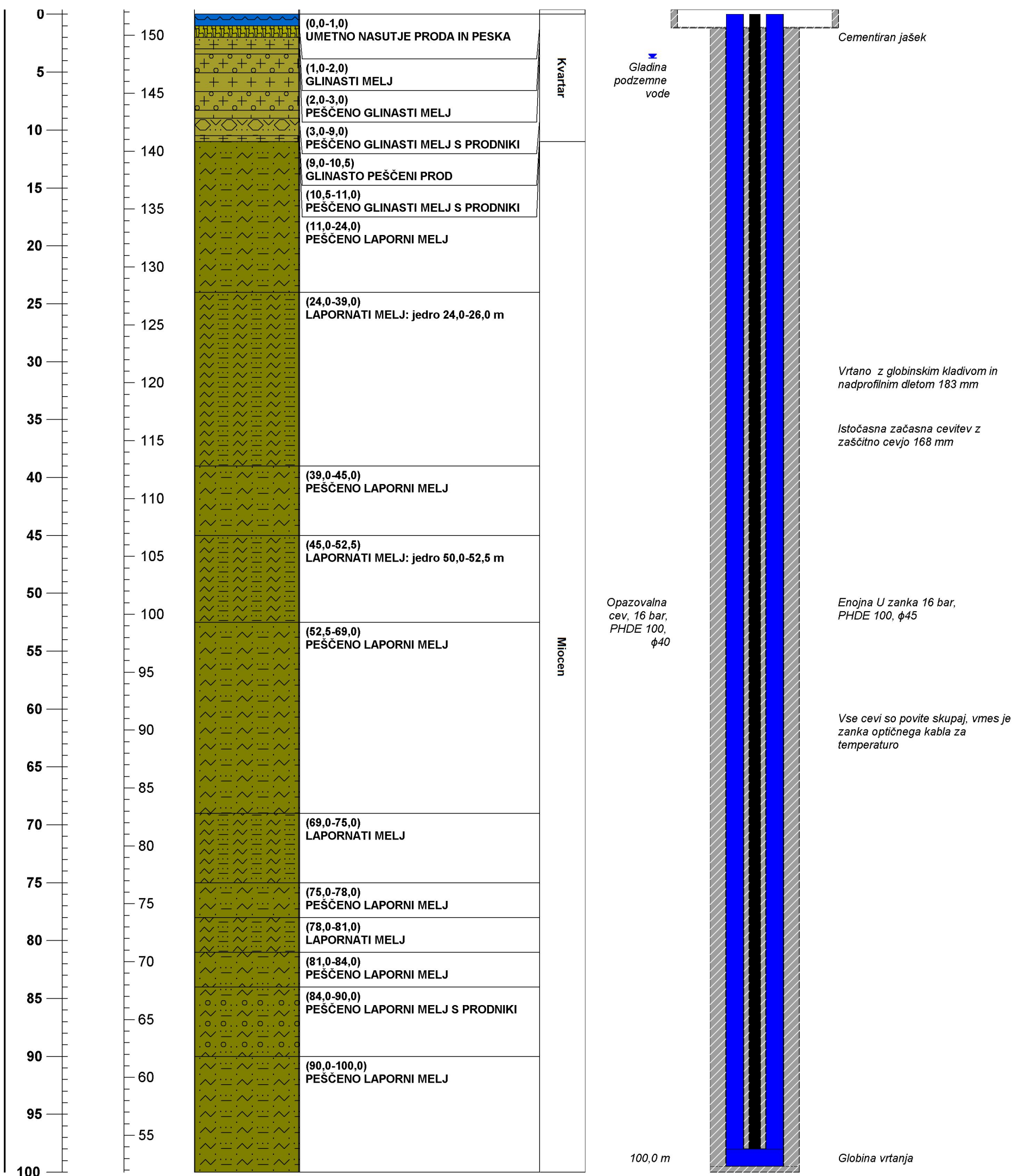
[illegible]

FIELD LOGGER: MARINŠEK, MENCINGER

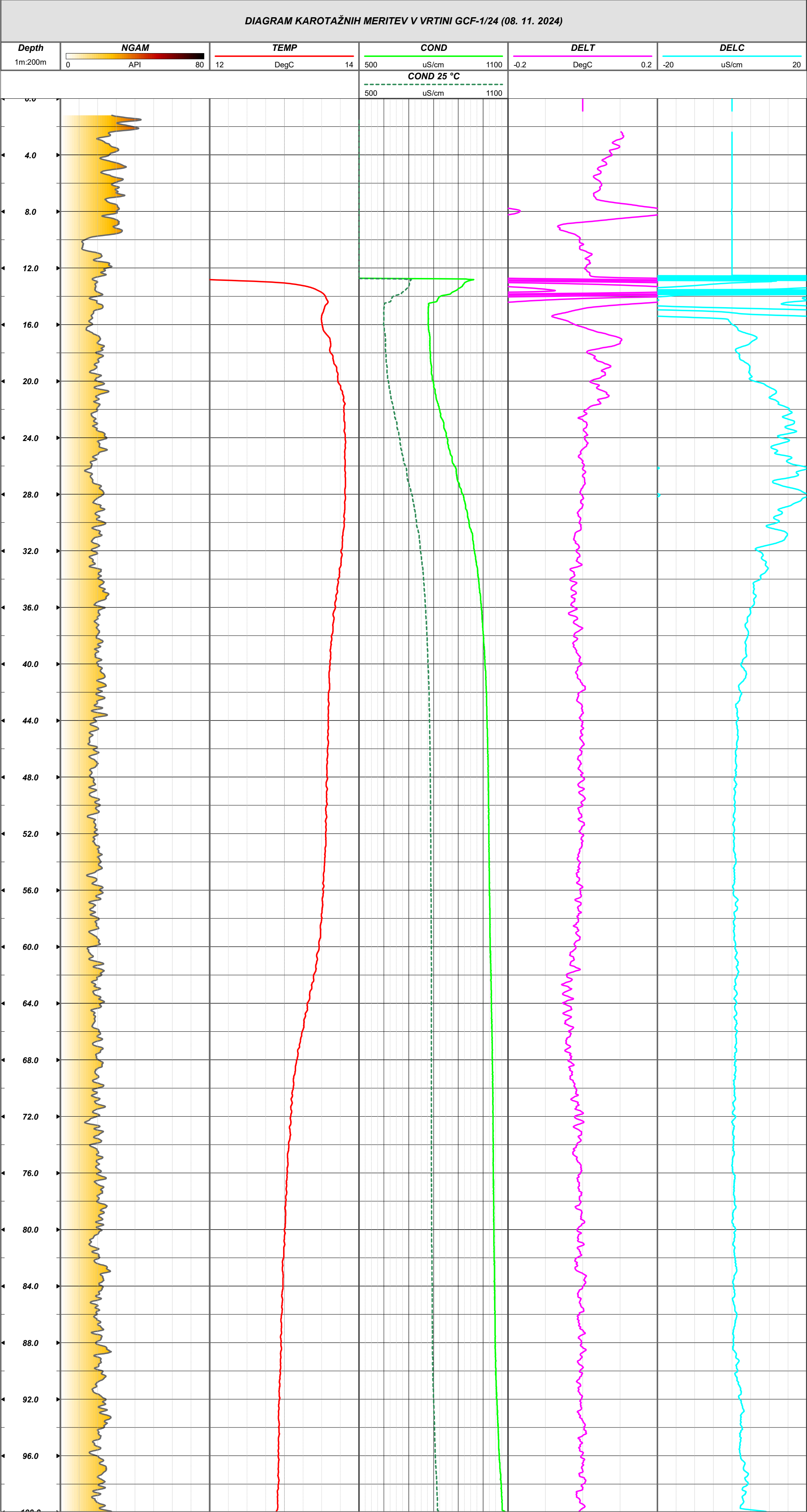
[illegible]

Litološki popis in tehnični profil geosonde GCF-1/24

Ime: GCF-1/24		Tip vrtnine: Raziskovalna geosodna		Način vrtnanja: Udarno-rotacijsko		Datum: 5. - 13.11.2024		GPVS: /	
Mesto: Brod v Podbočju 4, 8312 Podbočje		N D96= 534683,167		E D96= 80590,709		Kota terena Z= 151,82 m.n.m.		Vrh železnega jaška Z= 151,84 m.n.m.	
Globina	Kota	Shematski litološki prikaz	Litološki opis		fm.	HG pojavi med vrtnjem	Konstrukcija vrtnine		



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



 INDUSTRIJA NAFTE, d.d. Exploration & Production Field Development Exploration & Production Laboratory		Report No: 50000368-851/24	
		Edition: 00	Page: 1/11
		Date: 23.12.2024.	

GCF-1 (Geološki Zavod Slovenije)

Grain size distribution, porosity, permeability and grain density

Responsibility of  Ninoslav Sabol, mag.geol.	Verified by  Adaleta Perković, PhD	Approved by  Jasmina Jelić-Balta, PhD
--	--	---

These test results apply only to the tested samples. Any duplication of report or parts of report is not allowed without permission of Exploration & Production Laboratory.

Exploration & Production Laboratory

 Lovinciceva 4, 10002 Zagreb, Croatia /  +385 1 645 2882 /  upstream.laboratory@ina.hr

 INDUSTRIJA NAFTE, d.d. Exploration & Production Field Development Exploration & Production Laboratory	GCF-1 (Geološki Zavod Slovenije) Grain size distribution, porosity, permeability and grain density		Report No: 50000368-851/24
			Edition: 00 Page: 2/11
	Date: 23.12.2024.		

Client:	Geološki Zavod Slovenije assist. prof. Nina Rman, PhD. Dimičeva uica 14, Ljubljana
Order No.:	1505.2024
Order date:	18.12.2024.
Received by E&P Laboratory under Reg.No:	001/50000368/19-12-24/1795
Testing performed by:	Exploration & Production Field Development Exploration and Production Laboratory Lovinciceva 4, 10002 Zagreb, Croatia
Sampled on:	-
Sampled by:	core sampling – by client core plug sampling – INA laboratory
Sample received on:	13.12.2024.
Participants in the work:	Vjeran Jurković, Vjekoslav Torinek, Adaleta Perković, Ninoslav Sabol, Marko Gaćina
Report and Interpretation:	Ninoslav Sabol, mag.geol.
Delivered to:	Geološki Zavod Slovenije assist. prof. Nina Rman, PhD. Exploration and Production Laboratory Archive
	pdf pdf

The report is distributed with a title: **50000368-851/24 GCF-1 (Geološki Zavod Slovenije), Grain size distribution, porosity, permeability and grain density**, in pdf file format, according to the distribution list.



INDUSTRIJA NAFTE, d.d.

Exploration & Production

Field Development

Exploration & Production Laboratory

GCF-1 (Geološki Zavod Slovenije)

Grain size distribution, porosity, permeability and grain density

Report No:
50000368-851/24

Edition:
00

Page:
3/11

Date:
23.12.2024.

CONTENT

INTRODUCTION	4
SAMPLE PREPARATION AND ROUTINE CORE ANALYSES	4
POROSITY, PERMEABILITY AND GRAIN DENSITY	5
GRAIN SIZE DISTRIBUTION	6
RESULTS	7
Porosity, permeability and grain density	7
Grain Size Distribution	8
LITERATURE.....	10

 INDUSTRIJA NAFTE, d.d. Exploration & Production Field Development Exploration & Production Laboratory	GCF-1 (Geološki Zavod Slovenije) Grain size distribution, porosity, permeability and grain density		Report No: 50000368-851/24
			Edition: 00 Page: 4/11
	Date: 23.12.2024.		

INTRODUCTION

Based on the Order of the Geological Survey of Slovenia, routine core analyses, on core (Fig. 3) from the well **GFC-1**, were conducted to evaluate core characteristics, with a focus on porosity, permeability, grain density, grain size distribution and clay swelling analyses. These analyses aimed to evaluate pore characteristics and the reduction in permeability during water production.

Due to the unconsolidated nature of the received core material, it was possible to prepare only two samples using a manual sampler.

During the clay swelling test on GCF-1 samples, an attempt was made to evaluate the effect of temperature on clay swelling by measuring permeability changes with temperature. However, due to particle mobility and the nature of the samples, pore space blockage occurred, preventing stable water flow.

The conducted analyses in this report include measurement of porosity, permeability, grain density, and grain size distribution measurements.

SAMPLE PREPARATION AND ROUTINE CORE ANALYSES

Sampling of core material was carried out using a sampling puncher method with a manual sampler and by placing the collected material into a small lead tube. Steel mesh were placed at both ends of the lead tube to prevent material loss. Sampling was performed immediately after receiving the core material; however, it was particularly difficult because the core was dried, making it challenging to obtain proper and undamaged samples. A total of two samples were taken. The diameter of the drilled samples is 1 inch (2,54 cm) and the length of the core plugs is approximately 4 cm. Both plugs were taken perpendicular to the core axis.

After forming the plugs in lead tubes and before porosity and permeability measurements, the samples were subjected to the standard drying procedure at 105°C.

Additionally, samples for determining grain density and grain size distribution were taken from the same positions.

For grain size distribution, the sample preparation first involved the extraction (cleaning) and desalting process. The sample was then dried at 105°C. Afterward, the sample was divided by simple quartering to obtain a representative amount needed for analysis.

 INDUSTRIJA NAFTE, d.d. Exploration & Production Field Development Exploration & Production Laboratory	GCF-1 (Geološki Zavod Slovenije) Grain size distribution, porosity, permeability and grain density		Report No: 50000368-851/24
			Edition: 00 Page: 5/11
	Date: 23.12.2024.		

POROSITY, PERMEABILITY AND GRAIN DENSITY

Porosity, permeability, and grain density were measured on core samples using standard laboratory methods.

Porosity was determined using the volumetric method on a gas porosimeter (Core Laboratories helium Porosimeter) with nitrogen filling the pore space. For unconsolidated samples, the method involves measuring the volume of the solid phase (grain volume) and the pore volume using inert gas to fill the pore space within the rock sample. The measurement is based on Boyle's law of gas expansion, where gas expands from a reference cell of known volume into a cell containing the plug sample. The pore volume is measured in a triaxial holder and decreases with increasing overburden pressure (EOB). The porosity is calculated as a ratio of measured pore volume and the total volume (sum of pore volume and solid phase volume) of the plug sample.

Permeability was determined on a gas permeameter (Core Laboratories Air Permeameter) by measuring the pressure drop during air flow through the sample. This method follows Darcy's law of fluid flow through the pore space. The measurement was conducted in a triaxial holder with an increase in EOB pressure. No correction was made for the Klinkenberg gas slippage effect during permeability measurement at EOB pressure.

For **grain density measurements**, core material was taken from the same depth as the plug samples to ensure that the exact location of the grain density samples matched the plug samples. Grain density was determined on the samples by measuring the mass and volume using the helium pycnometer method. The measurement units are in g/cm^3 .

The results of these measurements are shown in Table 2.

GRAIN SIZE DISTRIBUTION

Grain size distribution determines the percentage of particles based on their size and is determined using the laser diffraction particle size analyzer Fritsch Analysette 22 NeXT Nano. The analysis utilizes static light scattering (laser diffraction) and involves wet measurement of the particle size of the sample.

In this type of device particle size is calculated by measuring the angle of the light scattered as particle pass through a laser beam using ISO 13320 method.

For qualitative characterization of the sediment grain size, common terminology is used: gravel, sand, silt and clay. There are different classifications that define grain dimensions. The widest application is the Udden-Wentworth scale shown in Table 1. [Udden, J. A. (1914): Mechanical Composition of Clastic Sediments, Bulletin of the Geological Society of America, Vol. 25, pp. 655–744., and Wentworth, C. K. (1922): A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments, The Journal of Geology, Vol. 30, pp. 377–392.]. The scale is geometric and logarithmic based on the number two.

The results of these measurements are shown in Table 3 and 4.

Table 1 Grain size according to Udden-Wentworth [1922].

J. A. Udden (1916)	d_{grain} mm	C. K. Wentworth (1922)	
	≥ 256	Boulder	Gravel
Coarse cobble	≤ 256	Cobble	
Medium cobble	≤ 128		
Fine cobble	≤ 64	Pebble	
Very fine cobble	≤ 32		
Very coarse pebble	≤ 16		
Coarse pebble	≤ 8		
Medium pebble	≤ 4	Granule	
Fine pebble	≤ 2	Very coarse sand	Sand
Coarse sand	≤ 1	Coarse sand	
Medium sand	$\leq 0,5$	Medium sand	
Fine sand	$\leq 0,25$	Fine sand	
Very fine sand	$\leq 0,125$	Very fine sand	
Coarse silt	$\leq 0,063$	Silt	
Medium silt	$\leq 0,032$		
Fine silt	$\leq 0,016$		
Very fine silt	$\leq 0,008$		
Coarse clay	$\leq 0,004$	Clay	
Medium clay	$\leq 0,002$		
Fine clay	$\leq 0,001$		
Very fine clay	$\leq 0,0005$		

GCF-1 (Geološki Zavod Slovenije)

Grain size distribution, porosity, permeability and grain density

Report No:
50000368-851/24

Edition:
00

Page:
7/11

Date:
23.12.2024.

RESULTS

Porosity, permeability and grain density

Table 2 Porosity, permeability and grain density results, GCF-1

Well	Core No.	Sample ID	Depth	Grain Density	EOB Pressure	Porosity	Permeability
			(m)	(g/cm ³)	(bar)	(%)	mD
GCF-1	1	1	25,22	2,7019	15	35,0	44,28
					20	34,1	24,02
GCF-1	1	2	50,19	2,6903	15	37,3	1570,51
					20	35,3	497,25

GCF-1 (Geološki Zavod Slovenije)

Grain size distribution, porosity, permeability and grain density

Report No:
50000368-851/24

Edition:
00

Page:
8/11

Date:
23.12.2024.

Grain Size Distribution

Table 3 Grain Size Distribution Result for Sample 1 (25,22 m), GCF-1.

Size Low [μm]	Size High [μm]	Frequency, %	Cumulative frequency, %	Size Low [μm]	Size High [μm]	Frequency, %	Cumulative frequency, %
0	0,01	0,0	0,0	40	45	0,1	100,0
0,01	0,1	0,0	0,0	45	50	0,0	100,0
0,1	0,2	0,0	0,0	50	55	0,0	100,0
0,2	0,3	0,1	0,2	55	60	0,0	100,0
0,3	0,4	0,4	0,6	60	63	0,0	100,0
0,4	0,5	0,7	1,3	63	80	0,0	100,0
0,5	0,6	0,9	2,2	80	100	0,0	100,0
0,6	0,7	1,1	3,3	100	125	0,0	100,0
0,7	0,8	1,2	4,4	125	150	0,0	100,0
0,8	0,9	1,2	5,6	150	175	0,0	100,0
0,9	1	1,3	6,9	175	200	0,0	100,0
1	2	13,2	20,1	200	225	0,0	100,0
2	3	11,6	31,7	225	250	0,0	100,0
3	4	9,5	41,3	250	300	0,0	100,0
4	6	14,1	55,4	300	350	0,0	100,0
6	8	9,8	65,2	350	400	0,0	100,0
8	10	7,2	72,4	400	450	0,0	100,0
10	12	5,6	78,0	450	500	0,0	100,0
12	14	4,4	82,4	500	1000	0,0	100,0
14	16	3,6	86,0	1000	1500	0,0	100,0
16	20	5,4	91,5	1500	2000	0,0	100,0
20	25	4,4	95,8	2000	2500	0,0	100,0
25	30	2,4	98,3	2500	3000	0,0	100,0
30	35	1,1	99,4	3000	3500	0,0	100,0
35	40	0,4	99,9	3500	3800	0,0	100,0

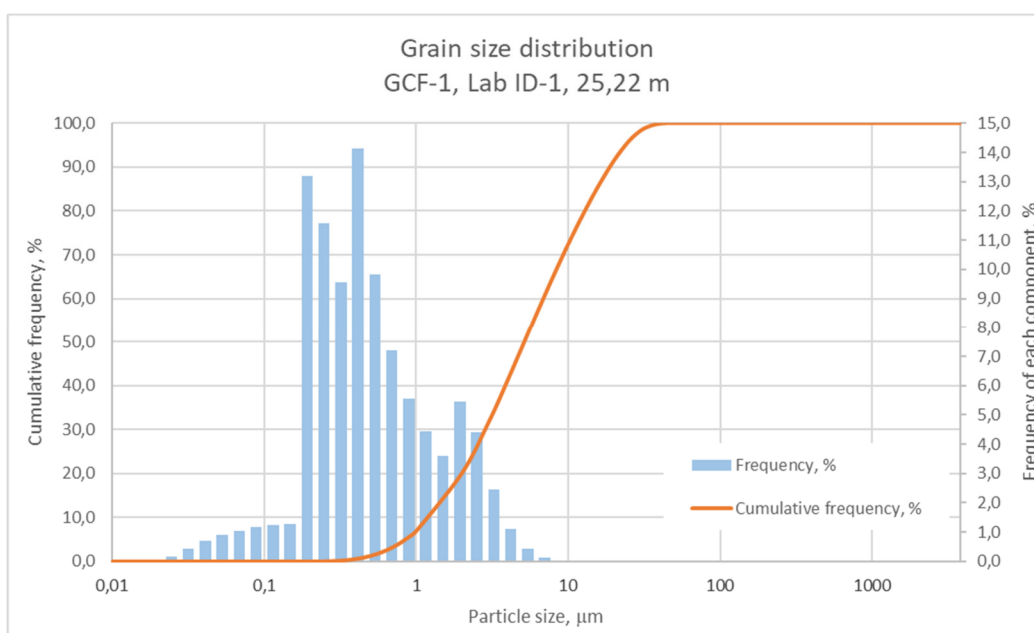


Figure 1. Grain Size Distribution Result for Sample 1 (25,22 m), GCF-1.

GCF-1 (Geološki Zavod Slovenije)

Grain size distribution, porosity, permeability and grain density

Report No:
50000368-851/24

Edition:
00

Page:
9/11

Date:
23.12.2024.

Table 4 Grain Size Distribution Result for Sample 2 (50,19 m), GCF-1.

Size Low [μm]	Size High [μm]	Frequency, %	Cumulative frequency, %	Size Low [μm]	Size High [μm]	Frequency, %	Cumulative frequency, %
0	0,01	0,0	0,0	40	45	0,7	99,6
0,01	0,1	0,0	0,0	45	50	0,3	99,9
0,1	0,2	0,0	0,0	50	55	0,1	100,0
0,2	0,3	0,2	0,2	55	60	0,0	100,0
0,3	0,4	0,4	0,6	60	63	0,0	100,0
0,4	0,5	0,5	1,1	63	80	0,0	100,0
0,5	0,6	0,6	1,6	80	100	0,0	100,0
0,6	0,7	0,6	2,2	100	125	0,0	100,0
0,7	0,8	0,6	2,8	125	150	0,0	100,0
0,8	0,9	0,6	3,5	150	175	0,0	100,0
0,9	1	0,7	4,1	175	200	0,0	100,0
1	2	7,5	11,7	200	225	0,0	100,0
2	3	8,5	20,1	225	250	0,0	100,0
3	4	8,3	28,5	250	300	0,0	100,0
4	6	14,3	42,8	300	350	0,0	100,0
6	8	11,0	53,8	350	400	0,0	100,0
8	10	8,3	62,2	400	450	0,0	100,0
10	12	6,5	68,6	450	500	0,0	100,0
12	14	5,2	73,8	500	1000	0,0	100,0
14	16	4,2	78,0	1000	1500	0,0	100,0
16	20	6,7	84,7	1500	2000	0,0	100,0
20	25	6,1	90,8	2000	2500	0,0	100,0
25	30	4,1	95,0	2500	3000	0,0	100,0
30	35	2,5	97,5	3000	3500	0,0	100,0
35	40	1,4	98,9	3500	3800	0,0	100,0

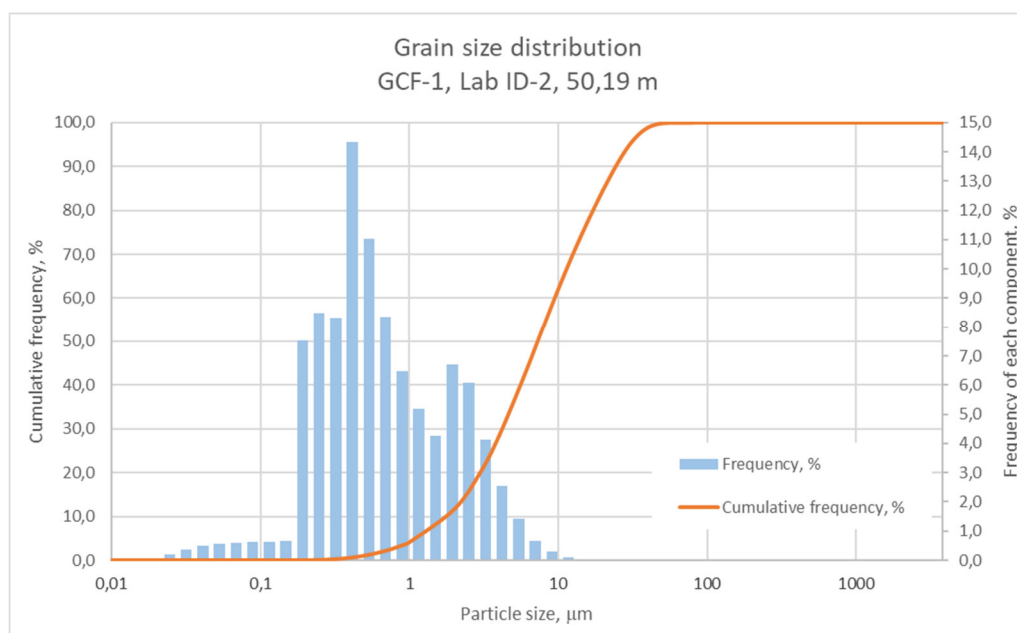


Figure 2. Grain Size Distribution Result for Sample 2 (50,19 m), GCF-1.

GCF-1 (Geološki Zavod Slovenije)
**Grain size distribution, porosity, permeability
and grain density**

Report No:
50000368-851/24

Edition:
00

Page:
10/11

Date:
23.12.2024.



Figure 3. Core GCF-1.

 INDUSTRIJA NAFTE, d.d. Exploration & Production Field Development Exploration & Production Laboratory	GCF-1 (Geološki Zavod Slovenije) Grain size distribution, porosity, permeability and grain density		Report No: 50000368-851/24
			Edition: 00 Page: 11/11
	Date: 23.12.2024.		

LITERATURE

- American Petroleum Institute (1998): Recommended Practice for Core Analysis (RP-40), 2nd edition, American Petroleum Institute, API Publishing Services, Washington, str. 236.
- Core Laboratories (1973a): *Operating Instructions for Air Permeameter*, Core Laboratories Inc, Houston
- Core Laboratories (1973b): *Operating Instructions for Helium Gas Expansion Boyle's Law Porosimeter*, Core Laboratories Inc, Houston
- Fritsch (2020): Operating Instruction – Analysette 22 NeXT, Fritsch GmbH
- Fritsch (2013): Operating Instruction – Analysette 28 IMAGESIZER, Fritsch GmbH
- Tišljar, J. (2001): Sedimentologija karbonata i evaporita. Institut za geološka istraživanja – Zagreb, Zagreb, 375 p.
- Wentworth, C.K. (1922): A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology 30, 377–392.

-----END OF THE REPORT-----