Mjerenja toplinske vodljivosti stijena na lokalitetima u hrvatskome dijelu Panonskog bazena

Cindrić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:600983

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij Geologije mineralnih sirovina i geofizičkih istraživanja

MJERENJA TOPLINSKE VODLJIVOSTI STIJENA NA LOKALITETIMA U HRVATSKOME DIJELU PANONSKOG BAZENA

Diplomski rad

Ivan Cindrić

GI2110

Zagreb, 2023

KLASA: 602-01/23-01/38
URBROJ: 251-70-15-23-2
U Zagrebu, 25. 5. 2023.

Ivan Cindrić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/38, URBROJ: 251-70-15-23-1 od 3. 4. 2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

MJERENJA TOPLINSKE VODLJIVOSTI STIJENA NA LOKALITETIMA U HRVATSKOME DIJELU PANONSKOG BAZENA

Za mentoricu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Doc. dr. sc. Iva Kolenković Močilac nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:

(potpis)

Doc. dr. sc. Iva Kolenković Močilac

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc. dr. sc. Zoran Kovač

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić

(titula, ime i prezime)

Sveučilište u Zagrebu Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

MJERENJA TOPLINSKE VODLJIVOSTI STIJENA NA LOKALITETIMA U HRVATSKOME DIJELU PANONSKOG BAZENA

Ivan Cindrić

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U sklopu ovog rada provedeno je ukupno 16 mjerenja toplinske vodljivosti stijena na tri lokacije, od kojih se dvije nalaze u istočnom dijelu Dravske depresije. Mjerenja su izvedena metodom iglene sonde (engl. *Single Needle Probe*), koristeći uređaj Thermal Properties Analyzer. Pet točaka mjerenja je izvedeno unutar lapora, a po jedna točka unutar gnajsa, biokalkarenita, filita i biokalkarenita do biokalkrudita Dobiveni rezultati su uspoređeni s podatcima iz literature te je uočeno da se većina izmjerenih vrijednosti toplinske vodljivosti nalazi unutar prosječnog intervala vrijednosti za određenu vrstu stijene. Poneka odstupanja određenih izmjerenih vrijednosti se vrlo vjerojatno mogu prepisati malo drugačijem mineralnom sastavu stijene za koje su dane vrijednosti u literaturi u odnosu na stijene ispitane u okviru ovoga rada. Osim toga, razlike su vjerojatno utjecane i različitim uvjetima mjerenja. Potrebna su daljnja istraživanja kako bi se vrijednosti korigirale za utjecaje saturacije fluidima koje se očekuju u podzemlju.

Ključne riječi: toplinska vodljivost, metoda iglene sonde, Dravska depresija

Diplomski rad sadrži: 27 stranica, 11 slika, 4 tablice, 1 dijagram i 25 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Iva Kolenković Močilac, docentica RGNF

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Iva Kolenković Močilac, docentica RGNF
2. Dr. sc. Marko Cvetković, izvanredni profesor RGNF
3. Dr.sc. Bruno Saftić, izvanredni profesor RGNF

Datum obrane: 2. lipnja 2023.

University of Zagreb Master´s Thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

MEASUREMENTS OF THERMAL CONDUCTIVITY OF ROCKS AT LOCATIONS IN THE CROATIAN PART OF THE PANNONIAN BASIN

Ivan Cindrić

Thesis completed at: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Department of Geology and Geological Engineering

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

As part of this work, a total of 16 measurements of thermal conductivity of rocks were carried out at three locations, two of which are located in the eastern part of the Drava Depression. The measurement was performed using the Single Needle Probe method, using the Thermal Properties Analyzer device. Five measurement points were made inside marl, and one point each inside gneiss, biocalcarenite, phyllite and biocalcarenite to biocalcrudite. The obtained results were compared with data from the literature and it was assessed that most of the measured thermal conductivity values are within the average value interval for a certain type of rock. A few deviations of certain measured values can very likely be attributed to the slightly different mineral composition of the rocks for which the values are given in the literature compared to the rocks examined in this work. In addition, the differences are probably due to different influences and measurement conditions. Further research is needed to correct the values for the influence of fluid saturation expected in the subsurface.

Key words: thermal conductivity, Needle Probe Method, Drava depression

Thesis contains: 27 pages, 11 figures, 4 tables, 1 diagram and 25 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Assistant Professor Iva Kolenković Močilac, PhD

Reviewers: 1. Assistant Professor Iva Kolenković Močilac, PhD
2. Associate Professor Marko Cvetković, PhD
3. Associate Professor Bruno Saftić, PhD

Defence date: June 2, 2023., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

Zahvala:

Od srca se zahvaljujem svojoj mentorici docentici dr. sc. Ivi Kolenković Močilac na trudu, strpljenju, pomoći, vedrini i ponekom šaljivom komentaru koji mi je uputila tijekom izrade ovog rada. Uz takvu mentoricu ne postoje nepremostive prepreke.

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Marku Cvetkoviću na pomoći tijekom terenskih mjerenja i davanju konstruktivnih komentara u svrhu poboljšanja rada.

Zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Bruni Saftiću na brojnim komentarima koji su pozitivno utjecali na kvalitetu rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na pruženoj potpori i strpljenju kako za izradu ovog rada tako i općenito u životu.

Ovaj rad sufinancirala je Hrvatska zaklada za znanost projektom GEOloška karakterizacija istočnog dijela Dravske DEPresije (GEODEP, UIP-2019-04-3846).

Sadržaj:

1. Uvod……..…….…….……...…..1

2. Zemljina unutarnja toplina…….…….…….……2

2.1. Toplinski tok…….……...…….…….3

2.2. Prijenos topline……..…….…….…….5

2.3. Toplinska vodljivost……...…….…….…….6

3. Geološke značajke područja istraživanja……..……..…..……..11

3.1. Geografski položaj područja istraživanja…….…….……..11

3.2.Stratigrafske značajke područja istraživanja …….…….…….……12

4. Metodologija……...……...…..……..15

4.1.Laboratorijske metode……..15

4.1.1. Metoda stacionarnog komparatora……...……15

4.2.Dinamičke metode……...…….……...……16

4.2.1 Metoda prstena kao izvora topline……..16

4.2.2. Metoda iglene sonde…….…….16

5. Izvođenje mjerenja……..……...…….18

6. Rezultati……20

7. Diskusija i zaključak……...…….23

8. Literatura…….…….……25

Popis slika:

Slika 2.1. Dijagram proizvodnje topline radioaktivnim raspadom izotopa uranija, kalija i torija u geološkoj prošlosti (W. R. Van Schmus, 1995) ……..……3

Slika 2.2. Karta toplinskog toka (Pollack et al. 1993) ……4

Slika 2.3. Vrijednosti površinskog toplinskog toka (Cvetković et al. 2019)……5

Slika 2.4. Toplinska vodljivost felzičnih stijena pri 300 K, 5 MPa i sa zrakom kao pornim fluidom (Robertson, 1988) ……7

Slika 2.5. Toplinska vodljivost felzičnih stijena pri 300 K, 5 MPa i s vodom kao pornim fluidom (Robertson, 1988)…… 8

Slika 3.1. Panonski bazenski sustav s označenim njegovim jugozapadnim dijelom (Pavelić & Kovačić, 2018) ……11

Slika 3.2. Hrvatski dio Panonskog bazenskog sustava s označenim granicama depresija (Kranjec et al., 1981) …….……..12

Slika 3.3. Formacije unutar hrvatskog dijela Dravske depresije (Malvić & Cvetković, 2013)…….…13

Slika 4.1. Uzorak i standardi za aparaturu stacionarnog komparatora (Somertson, 1992).....16

Slika 5.1. Ispravno postavljena sonda u stijenskoj masi ……..……...…....18

Slika 5.2. Izvođenje mjerenja na filitima južnih obronaka Papuka ……...……..19

Slika 6.1. Prikaz lokacija mjerenja u blizini naselja Koturić (A) i Voćin (B i C) (Google Maps)…….. ……..…….…..……22

Popis tablica:

Tablica 2.1. $T_{1/2}$ vrijeme poluraspada, Q oslobođena energija, E_H energija koja stvara toplinu, H specifična toplina (Ruedas, 2017)…….……2

Tablica 2.2. Toplinska vodljivost najvažnijih petrogenih minerala (Horai, 1971)…..…….. 6

Tablica 2.3. Rasponi toplinske vodljivosti zabilježeni za različite vrste stijena ……...……9

Tablica 6.1 Pregled rezultata mjerenja ……..…….…….……21

Popis dijagrama:

2.1. Dijagram prosječnih toplinskih vodljivosti …….…….10

1. Uvod

Postotak energije dobiven iz obnovljivih izvora se povećava svake godine, a sve u svrhu smanjenja čovjekovog utjecaja na okoliš. Jedna od vrsta obnovljivih izvora energije je i geotermalna energija koja se bazira na iskorištavanju Zemljine unutrašnje energije tj. topline. Kako bi se utvrdio potencijal geotermalne energije na određenom lokalitetu potrebno je provesti razna istraživanja, a jedno od njih je mjerenje toplinske vodljivosti stijena. Mogućnost stijene da provodi toplinu je od izuzetne važnosti iz perspektive iskorištavanja unutrašnje Zemljine topline, stoga je poznavanje tih svojstava vrlo bitno za daljnje planiranje istražnih radova i provedbu projekta. Vrijednosti toplinske vodljivosti koriste se za izračune vrijednosti toplinskog toka, kao i za izračun vrijednosti temperature u podzemlju, stoga će ovi podatci dati smjernice za način iskorištavanja geotermalne energije, ali i informacije o obnovljivosti geotermalnog ležišta, tj. omogućit će izračun vremena potrebnog da se toplina u podzemlju obnovi uslijed njenog iskorištavanja. Kako bi rezultati istraživanja toplinske vodljivosti stijena bili što pouzdaniji potrebno je znati sve prednosti i nedostatke korištene metode mjerenja te dobivene rezultate usporediti s otprije poznatim podatcima za određene vrste stijena. U svrhu izrade ovog diplomskog rada provedeno je ukupno 16 mjerenja toplinske vodljivosti stijena unutar hrvatskog dijela Dravske depresije. Mjerenja su napravljena in situ, metodom iglene sonde u sklopu terenskih istraživanja projekta GEODEP - GEOloška karakterizacija podzemlja istočnog dijela Dravske depresije s ciljem procjene Energetskog Potencijala (UIP2019-04-3864).

2. Zemljina unutarnja toplina

Temperatura Zemljine unutrašnjosti, točnije njene jezgre, može iznositi do 7000 ^{o}C (Jeanloz, 1990). Zemljina unutarnja toplina je odgovorna za mnoge procese koji se odvijaju na Zemlji, kao što je kretanje tektonskih ploča, erupcije vulkana, potresi itd. Smatra se kako postoje četiri izvora topline: 1) radioaktivno raspadanje izotopa urana, torija i kalija, 2) toplina emitirana za vrijeme formiranja Zemlje sudaranjem s nebeskim tijelima, 3) toplina oslobođena kristalizacijom željeza u jezgri i 4) toplina nastala gravitacijskom kompakcijom (Pavelić, 2014).

Najvažniji izvor topline koji je zaslužan za oko 50 % Zemljine unutarnje topline je radioaktivno raspadanje izotopa urana, torija i kalija (Pavelić, 2014). Prelaskom nestabilnog izotopa (roditelja) u stabilni izotop (kćer) dolazi do oslobađanja energije koja dijelom prelazi u toplinu. Prema Ruedasu (2017)., radioaktivnim raspadom oslobođena energija Q se može izraziti kao umnožak razlike masa izotopa roditelja (m_p) i kćeri (m_d) i kvadrata brzine svjetlosti u vakuumu (c_0):

$$Q = (m_p - m_d) \bullet c_0^2 \quad (1)$$

Dio energije Q će biti potrošen djelovanjem neutrina i antineuterina (E_v), dok će dio koji ostaje (E_H) stvarati toplinu:

$$E_H = (m_p - m_d) \bullet c_0^2 - E_v \quad (2)$$

Specifična proizvedena toplina (H) se može izraziti pomoću jednadžbe:

$$H = E_H \bullet \lambda 1/2 \quad (3)$$

Gdje je λ definirana kao (ln2)/$T_{1/2}$, gdje je $T_{1/2}$ vrijeme poluraspada.

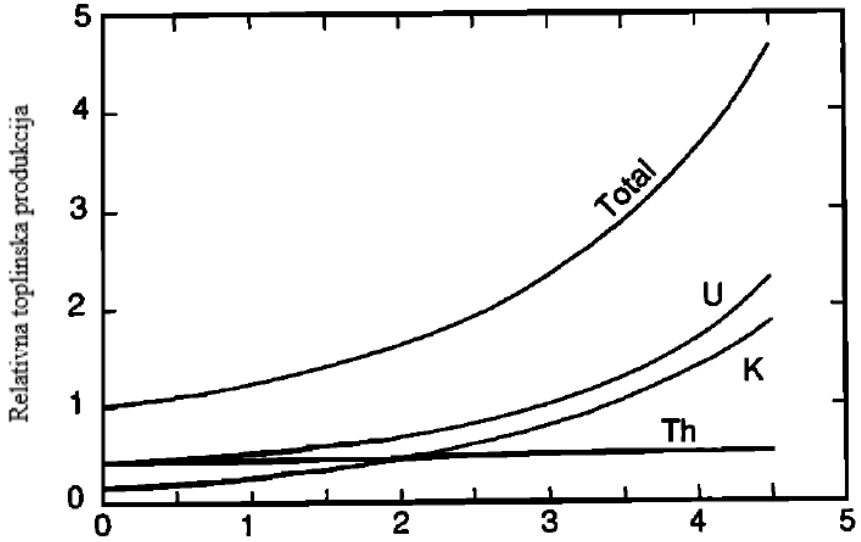
Gotovo polovica topline generirane radioaktivnim raspadom dolazi iz plašta.

Tablica 2.1. $T_{1/2}$ vrijeme poluraspada, Q oslobođena energija, E_H energija koja stvara toplinu, H specifična toplina (Ruedas, 2017)

	$T_{1/2}$ (mil.god.)	Q (keV, J)	E_H (keV, J)	H (W/kg)
^{40}K	1248	1331,637 6.416 x10^{-13}	676,863 1,084 x 10^{-13}	2,8761 x 10^{-5}
^{232}Th	14000	4264,892 6,833 x 10^{-12}	40418,037 6,476 x 10^{-12}	2,6368 x 10^{-5}
^{235}U	704	46396,500 7,434 x 10^{-12}	44379,817 7,110 x 10^{-12}	5,68402 x10^{-4}

^{238}U	4460	51694,046 8,282 x 10^{-12}	47650,476 7,634 x 10^{-12}	9,4946 x 10^{-5}

Znanje o radioaktivnim izotopima i njihovo proučavanje je od velike važnosti za razumijevanje geoloških procesa koji se odvijaju unutar Zemlje, kao i za modeliranje, kako današnjih toplinskih svojstava, tako i toplinskih svojstava u Zemljinoj prošlosti. Dijagram na slici 2.1. prikazuje relativnu proizvodnju topline unutar Zemlje od njenog nastanka pa do danas. Vidljivo je kako se Zemlja postupno hladi te da se s vremenom smanjuje količina topline nastale radioaktivnim raspadom, što ukazuje da će jednog dana naš planet ostati bez topline i postati hladan.



Slika 2.1. Dijagram proizvodnje topline radioaktivnim raspadom izotopa uranija, kalija i torija u geološkoj prošlosti (W. R. Van Schmus, 1995)

2.1 Toplinski tok

Prosječna vrijednost Zemljinog toplinskog toka iznosi 87 ± 2 mW/m^2 i korespondira s temperaturnim gradijentom od 30 ^{o}C/km (Pollack et al., 1993). Ukupni gubitak topline danas iznosi oko 44,2 x 10^{12} W. Od toga se 70% topline izgubi na područjima oceana, a 30% na područjima kontinenata. S obzirom da je debljina kontinentalne kore (20-65 km) veća od oceanske kore (5-6 km), prosječna vrijednost toplinskog toka kontinentalne kore je manja od oceanske kore te iznosi oko 65 mW/m^2 dok je prosječna vrijednost toplinskog toka za oceansku koru oko 101 mW/m^2.

Toplinski tok se može opisati pomoću jednadžbe (Pollack et al., 1993):

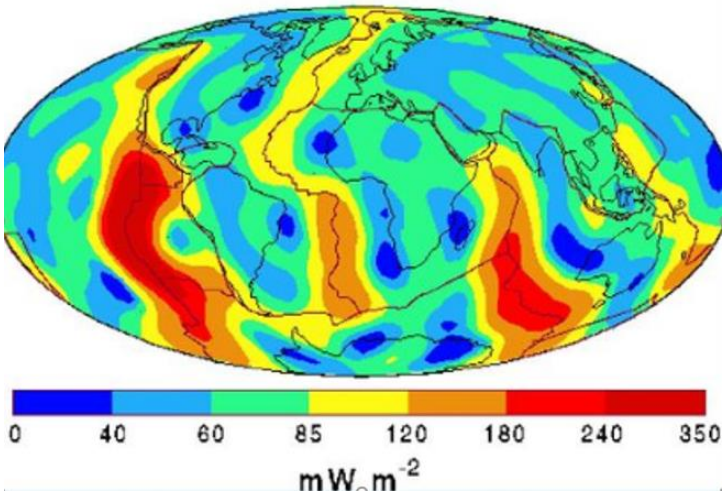
$$q(t) = C \bullet t^{-1/2}$$

gdje je t starost formacije (u milijunima godina), a C je toplinski tok kore stare milijun godina izražen u milivatima po kubičnom metru. Na područjima oceana važnu ulogu ima mlađa oceanska kora nastala na područjima oceanskih hrptova. Takva kora se odlikuju većom propusnošću, što omogućuje morskoj vodi da cirkulira, što dovodi do poboljšavanja prijenosa topline (Pollack et al., 1993). Ovakva oceanska kora kenozojske starosti pokriva tek trećinu Zemljine površine, a odgovorna je za otprilike 50% ukupnog gubitka topline. Toplinski tok oceanske kore kroz koju cirkulira voda može se izraziti formulom (Pollack et al., 1993):

$$q = (t_1 - t_2)^{-1} \int_{t2}^{t1} q(t)\ dt$$

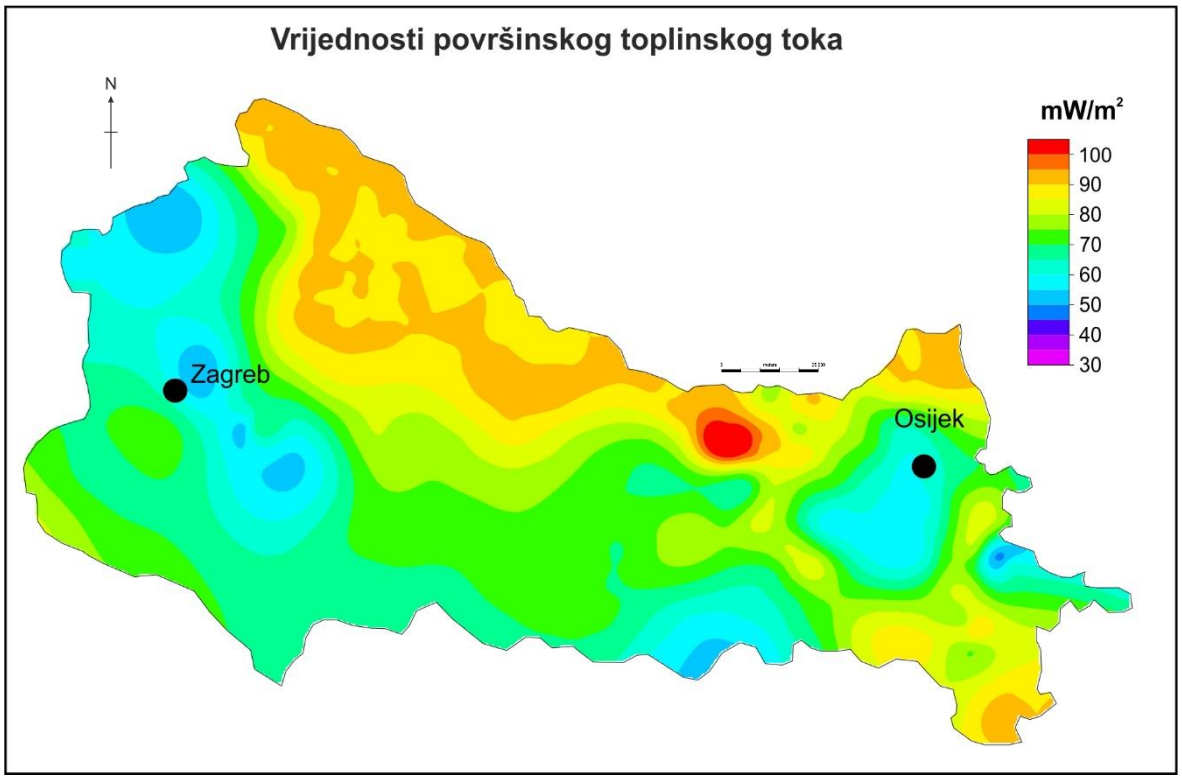
gdje je q prosječan toplinski tok oceanske kore definirane starosti s t_1 i t_2, *q(t)* je dobiven iz jednadžbe (1) gdje je C=510 mW/m (Pollack et al., 1993).

Na slici 2.2. je vidljivo kako se najveće vrijednosti toplinskog toka nalaze u područjima prekrivenim oceanskom korom, osobito u zonama oceanskih hrptova te na granicama tektonskih ploča. Područja kontinentalne kore gdje nema nikakvih velikih tektonskih aktivnosti pokazuju male vrijednosti toplinskog toka.



Slika 2.2. Karta toplinskog toka (Pollack et al., 1993)

Na području sjeverne Hrvatske, kojoj pripada jugozapadni dio Panonskog bazenskog sustava, povišen toplinski tok je rezultat tektonskog razvoja tog područja. Glavne tektonske faze odgovorne za stanjenje kore i izdizanje astenosfere su ekstenzija tijekom badena i termalna subsidencija za vrijeme panona (Cvetković et al. 2019). Na slici 2.3. je vidljivo kako vrijednosti toplinskog toka u sjevernoj Hrvatskoj generalno imaju smjer povišenja od juga prema sjeveru. Najviša vrijednost toplinskog toka iznosi oko 110 mW/m^2 dok najniža iznosi 50 mW/m^2.



Slika 2.3. Vrijednosti površinskog toplinskog toka (Cvetković et al., 2019)

2.2 Prijenos topline

Toplina se može prenositi na tri različita načina: 1) kondukcijom, 2) konvekcijom i 3) zračenjem. U podzemlju značajni mehanizmi prijenosa topline su kondukcija i konvekcija.

U slučaju toplinske kondukcije (još se naziva toplinska vodljivost) toplina se u krutinama prenosi na način da čestice pobuđene temperaturom titraju i na taj način pobuđuju čestice u svojem okruženju te prenose energiju, a time i toplinu. U slučaju tekućina i plinova do prijenosa topline dolazi sudaranjem čestica tijekom njihovog nasumičnog kretanja. Konvekcija je vrsta prijenosa topline u kojem se prijenos postiže strujanjem čestica fluida kao posljedica promjena gustoće uslijed zagrijavanja. Zračenje je prijenos topline elektromagnetskim valovima.

2.3. Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost je svojstvo materijala koje opisuje njegovu sposobnost provođenja topline. Označava se sa K i izražava u W/mK. Toplinska vodljivost se može opisati pomoću Fourierivog zakona koji glasi :

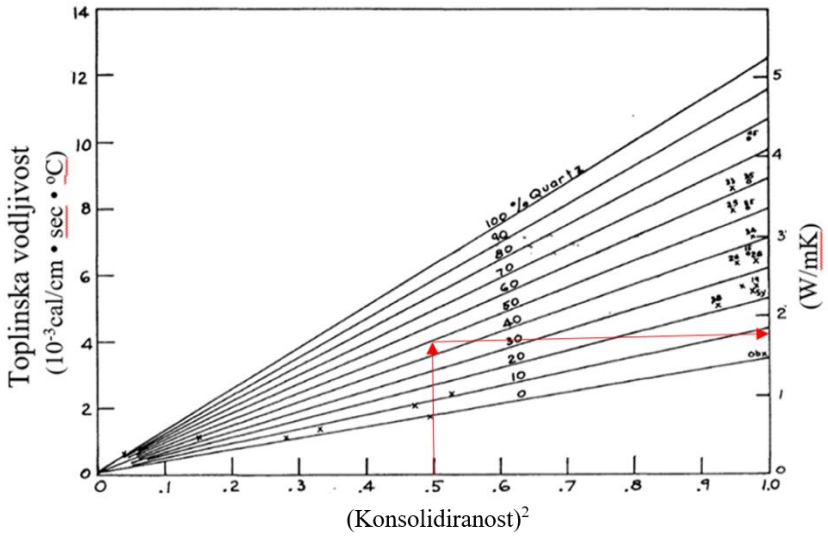
$$q = -K\, dT$$

gdje je: q - toplinski tok (W/m^2), dT – temperaturni gradijent (K/m) i K – toplinska vodljivost. Jednadžba ukazuje da je toplinski tok linearno proporcionalan temperaturnom gradijentu, a toplinska vodljivost konstanta za određenu tvar. Toplinska vodljivost ima vrlo važnu ulogu u izračunu toplinskog toka i otkrivanju raspodjele topline unutar Zemlje. Također se koristi za termalno modeliranje istraživanog područja, određivanje područja većeg geotermalnog potencijala, a ima i važnu ulogu u istraživanju nafte i plina (Balkan et al., 2017). Različite stijene različito provode toplinu iz razloga što toplinska vodljivost ovisi o mineralnom sastavu, poroznosti, fluidima koji ispunjavaju pore, tlaku i temperaturi. Prilikom analize mineralnog sastava stijena najveću pažnju treba usmjeriti na sadržaj kvarca s obzirom da on odlično provodi toplinu i uvelike utječe na vodljivost same stijene. Toplinska vodljivost pojedinih minerala prikazana je u tablici 2.2. (Horai, 1971).

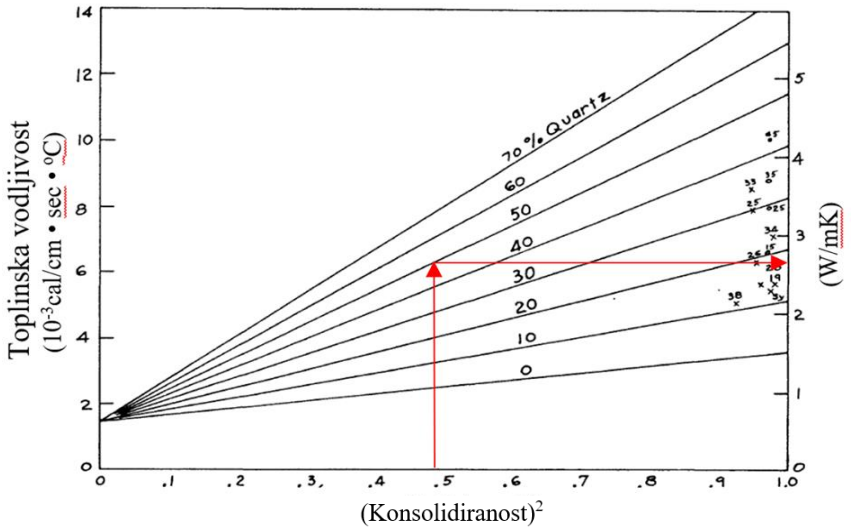
Tablica 2.2. Toplinska vodljivost najvažnijih petrogenih minerala (Horai, 1971)

Mineral	***Toplinska vodljivost (W/mK)***
Kvarc	7,70
Klorit	4,91
Kalcit	3,60
Hornblenda	3,08
Epidot	2,61
Biotit	2,34
Ortoklas	2,32
Muskovit	2,21
Plagioklas	2,15

Poroznost negativno utječe na toplinsku vodljivost, odnosno s povećanjem poroznosti smanjuje se toplinska vodljivost stijene. Fluidi koji ispunjavaju porni prostor također imaju veliki utjecaj na toplinsku vodljivost. Stoga ukoliko se unutar pora nalazi voda, stijena će imati veću toplinsku vodljivost nego kada bi se umjesto vode u porama nalazio zrak. Osim same poroznosti i pornog fluida, na toplinsku vodljivost utječe i način na koji porni fluid ispunjava pore. Ukoliko se fluid nalazi unutar pora sferičnih oblika, on ima manji utjecaj na vodljivost nego kada se nalazi kao tanki film oko sferičnih zrna stijene (Walsh & Decker, 1966). Robertson u izvješću iz 1988. prikazuje utjecaj zastupljenosti kvarca i konsolidiranosti stijene na toplinsku provodljivost felzičnih stijena. Konsolidiranost stijene je, prema Robertsonu & Pecku (1974), definirana kao 1- ϕ, gdje je ϕ oznaka za poroznost. Konslidiranost je uvedena kao parametar kojim bi se lakše objasnio izolacijski utjecaj pornog prostora na toplinsku vodljivost stijene. Na slici 2.4. prikazana je toplinska vodljivost felzičnih stijena pri temperaturi od 300 K i tlaku od 5 MPa, dok su pore ispunjene zrakom. Vidljivo je kako s povećanjem zastupljenosti kvarca i smanjenjem poroznosti raste toplinska vodljivost stijena. Slika 2.5. prikazuje toplinsku vodljivost iste vrste stijena i pri istim uvjetima kao i slika 2.4., jedina razlika je u tome što su pore ispunjene vodom. Uočava se velika razlika u toplinskoj vodljivosti stijena istih karakteristika. Kao primjer može poslužiti kisela stijena koja sadrži 50% kvarca sa kvadratom solidnosti od 0,5. Ukoliko su pore takve stijene ispunjene zrakom, vrijednost njene toplinske vodljivosti će iznositi 1,75 W/mK, međutim ukoliko su pore ispunjene vodom vrijednost toplinske vodljivosti će biti 2,6 W/mK što je povećanje vodljivosti za 48%.



Slika 2.4. Toplinska vodljivost felzičnih stijena pri 300 K, 5 MPa i sa zrakom kao pornim fluidom (Robertson, 1988)



Slika 2.5. Toplinska vodljivost felzičnih stijena pri 300 K, 5 MPa i s vodom kao pornim fluidom (Robertson, 1988)

Temperatura je također jedan od čimbenika koji utječe na toplinsku vodljivost stijena. Za većinu stijena s porastom temperature dolazi do smanjenja toplinske vodljivosti. Za stijene bogate kvarcom ili kalcitom ili olivinom smanjenje iznosi čak oko 30 % u temperaturnom intervalu od 0 ^{o}C do 100 ^{o}C. Međutim postoje i stijene kod kojih se s povećanjem temperature povećava i toplinska vodljivost kao što su bazalti i porozni pješčenjaci (Robertson, 1988).

Tlak je još jedan faktor o kojem ovisi toplinska vodljivost. Iako utječe u manjoj mjeri negoli temperatura, potrebno ga je uzeti u obzir, posebno kod laboratorijskih istraživanja (Abdulagatov et al., 2006). Podatci dobiveni laboratorijskim ispitivanjem uzoraka stijena na toplinsku vodljivost govore u prilog tome da se vodljivost najviše povećava pri manjim tlakovima. Međutim treba uzeti u obzir da je to povećanje vodljivosti vjerojatno rezultat zbijanja i zatvaranja pukotina nastalih prilikom uzimanja uzorka. Jednom kada su pukotine zatvorene, utjecaj tlaka na vodljivost stijene se znatno smanjuje (Abdulagatov et al., 2006).

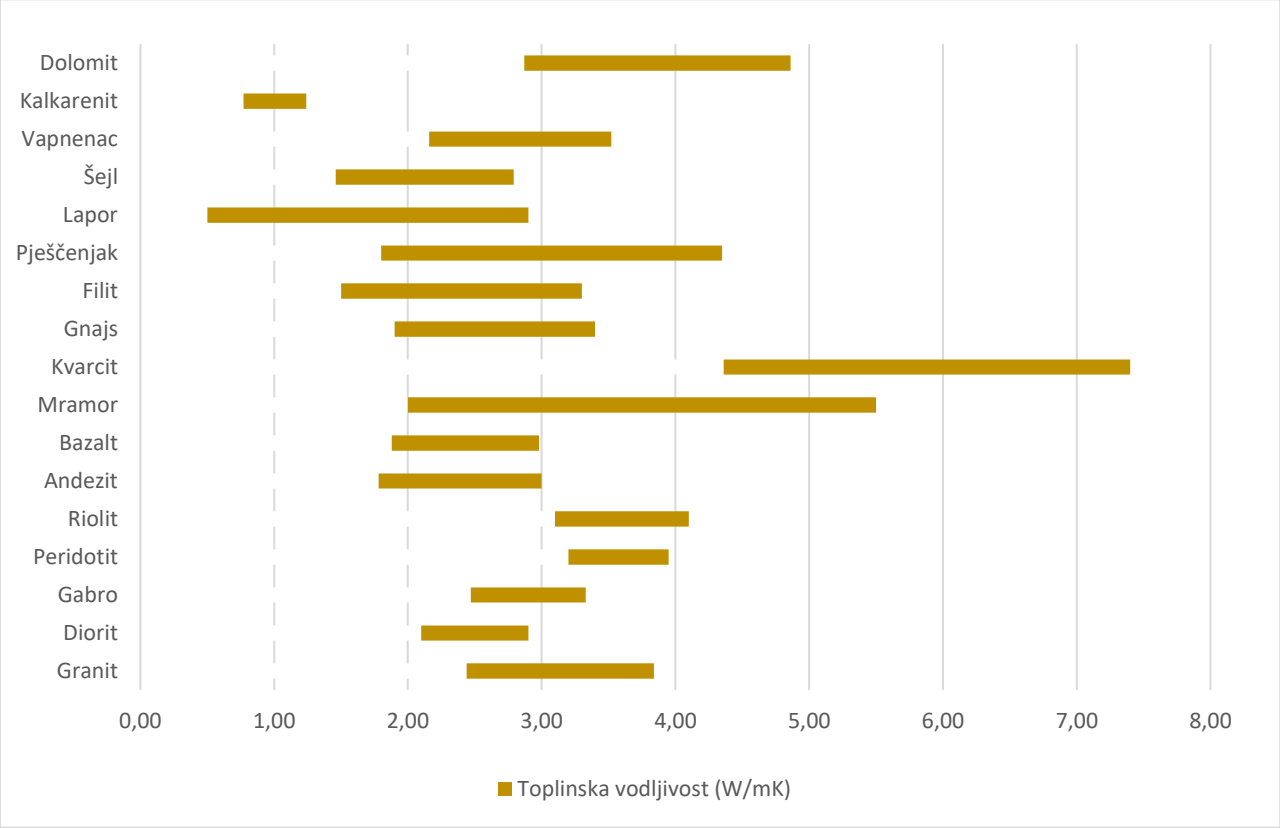
Tablica 2.3. Rasponi toplinske vodljivosti zabilježeni za različite vrste stijena

Vrsta stijene	Raspon toplinske vodljivosti (W/mK)	Prosječni raspon (W/mK)
Granit	(2,6 - 3,8)[a], (2,5 – 4,0)[a], (1,7 – 3,4) [a], (2,7 – 3,5) [a], (2,7 – 4,5) [a]	2,44 – 3,84
Diorit	(2,2 – 2,8) [a], (1,8 – 2,9) [a], (2,3 – 3,0) [a]	2,10 – 2,90
Gabro	(2,5 – 4,1) [a], (2,3 – 2,9) [a], (2,6 – 3,0) [a]	2,47 – 3.33
Peridotit	(3,8 – 4,9) [a], (2,6 – 3,0) [a]	3,2 – 3,95
Riolit	(3,1 – 4,1) [a]	3,1 -4,1
Andezit	(1,6 – 2,5) [a], (2,3 – 2,7) [a], (1,45, 2,10)[b]	1,78 – 3,0
Bazalt	(1,4 – 3,6) [a], (1,4 – 2,1) [a], (2,5 – 2,9) [a], (3,2 – 5,0)[a], (1,45 - 2,10) [b], (1, 98 – 2,2)[c]	1,88 – 2,98
Maramor	(2,0 – 5,5)[a]	2,0 – 5,5
Kvarcit	(5,1 – 7,6) [a], (3,5 – 7,8) [a], (5,9 – 7,4) [a], (3,1 – 7,9) [a], (4,2 – 6,3) [b]	4,36 – 7,4
Gnajs	(2,1 – 3,3) [a], (1,9 – 3,2) [a], (1,7 – 3,7) [a]	1,9 – 3,4
Filit	(1,5 – 3,3)[f]	1,5 – 3,3
Pješčenjak	(1,8 – 3,1) [a], (2,3 – 3,9) [a], (2,0 – 5,5) [a], (2,5 – 4,2)[b], (1,74 – 5,25) [d], (1,19 – 4,15)[e]	1,80 – 4,35
Lapor	(0,5 – 2,9)[g]	0,5 – 2,9
Šejl	(1,2 – 1,8) [a], (2,3 – 4,0) [a], (1,6 – 4,0) [a], (1,1 – 2,3) [a], (1,05 – 1,45) [b] (1,17 – 2,87), (1,8 - 3,14) [d]	1,46 – 2,79
Vapnenac	(1,9 – 3,1) [a], (2,5 – 3,1) [a], (1,3 – 3,3) [a], (2,7 – 3,4) [a], (2,5 – 3,1) [b], (2,74 – 3,58) [c], (1,71 – 4,46) [d], (1,89 – 4,15) [d]	2,16 – 3,52
Kalkarenit	(0,77 - 1,24)[h]	0,77 - 1,24
Dolomit	(2,7 – 3,0) [a], (3,0 – 4,5) [a], (2,5 – 4,2) [a], (4,0 – 5,0) [a], (3,75 – 6,30) [b] (2,75 – 5,84) [c], (1,91 – 5,55)[d], (2,32 – 4,46) [d]	2,87 – 4,86

a) (Cermak & Rybach 1982), b) (Blackweel & Steele 1989), c) (Song Xiaoqing et al., 2018)
d) (Boning Tang et al., 2018) e) (Xianglan Li et al., 2008 f) (Dalla Santa et al., 2020)
g) (Iosif Stylianou et al., 2016) h) (Andolfsson, 2013)

Tablica sadržava raspone toplinske vodljivosti za različite vrste stijena iz gore navedenih članaka. Prilikom odabira raspona iz rada autora Cermak & Rybach (1982) glavni uvjet je bio da su svi rasponi izmjereni oko sobne temperature kako bi se izbjegao učinak temperature na izmjerene vrijednosti. Članak autora Song Xiaoqing et al. (2018) prikazuje raspon toplinske vodljivosti za više različitih formacija istog litološkog sastava. Stoga je ovdje prikazan raspon modificiran na način da je vrijednost za određenu litologiju uzeta iz više formacija. Stupac pod nazivom prosječni raspon obuhvaća sve navedene raspone za pojedine vrste stijena i izračunat je po principu srednjih vrijednosti minimalne i maksimalne toplinske vodljivosti.

U svrhu lakše vizualizacije dan je dijagram 2.1. toplinskih vodljivosti stijena koji prikazuje prosječne intervale vrijednosti navedene u tablici 2.3. Na dijagramu se uočava da prosječno najniže zabilježene vrijednosti imaju kalkareniti, dok su najviše vrijednosti karakteristične za kvarcite, što je u skladu s tablicom 2.2. u kojoj se uočava da kvarc ima najvišu toplinsku vodljivost među petrogenim mineralima.



Dijagram 2.1. Dijagram prosječnih toplinskih vodljivosti stijena (za reference pogledati tablicu 2.3.)

3. Geološke značajke područja istraživanja

3.1. Geografski položaj područja istraživanja

Mjerenja toplinske vodljivosti su provedena in situ terenskim uređajem na tri lokacije od kojih se dvije nalaze u okolici Voćina, na obodima Papuka, odnosno uz sam rub istočnoga dijela Dravske depresije. Dravska depresija se nalazi na jugozapadnom dijelu Panonskog bazenskog sustava i pokriva područje od oko 12 000 km^2. Veći dio Dravske depresije (oko 9 100 km^2) pripada sjevernom dijelu Republike Hrvatske, dok se ostatak nalazi na području Mađarske. Razvoj Panonskog bazenskog sustava, a time i njegovog hrvatskog dijela, je vrlo kompleksan, što se može zaključiti i iz činjenice da se unutar hrvatskoga dijela Panonskog bazena mogu jasno izdvojiti četiri depresije na relativno malom području. Površina Panonskog bazenskog sustava koji pripada Hrvatskoj iznosi oko 30 000 km^2, a kao granice se mogu uzeti rijeke Drava na sjeveru te Kupa i Sava na jugu (Velić, 2007). Razvoj se može podijeliti na dvije faze. Prva faza se odnosi na vrijeme riftovanja tijekom koje je došlo do uzdizanja astenosfere, stanjivanja kore ekstenzijskim tektonizmom te na kraju subsidencije. Druga faza označava vrijeme nakon riftovanja i okarakterizirano je subsidencijom kao posljedicom hlađenja astenosfere (Pavelić & Kovačić, 2018).

Slika 3.1. Panonski bazenski sustav s označenim njegovim jugozapadnim dijelom (Pavelić & Kovačić, 2018)

3.2. Stratigrafske značajke područja istraživanja

Ispuna Dravske depresije se sastoji od neogenskih i kvartarnih stijena, a najzastupljenije naslage su srednjo i gornjomiocenske klastične naslage kao i pliocenske, pleistocenske i holocenske naslage (Malvić & Cvetković, 2013). Dravska depresija je najdublja depresija u Hrvatskoj, a njena dubina na području između Virovitice i Slatine prelazi 7000 metara (Velić, 2007). Tolika debljina naslaga ukazuje na to da je Dravska depresija najstarija depresija unutar hrvatskog područja Panonskog bazenskog sustava i predstavlja područje na kojemu je započeo proces kontinentalnog riftovanja (Pavelić & Kovačić, 2018).

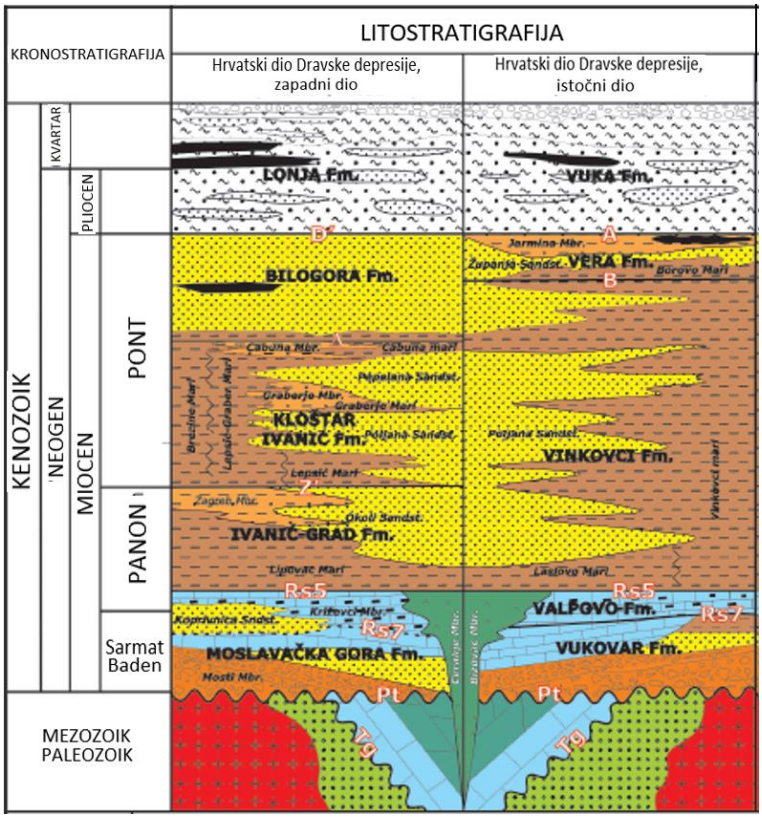
Podinu Dravske depresije čine stijene starije od miocena, uglavnom se radi o magmatitima i metamorfitima koji se zajedno nazivaju „temeljno gorje“. Najčešće se radi o kataklaziranim i hidrotermalno izmjenjenim zelenim škriljavcima, gnajsevima, granitima, gabrima i amfibolitima (Malvić & Cvetković, 2013). U slučaju da se između stijena temeljnog gorja i neogensko-kvartarne ispune nalaze karbonatne stijene, najčešće vapnenci ili dolomiti, tada se taj interval naziva „podloga tercijara“ (Malvić & Cvetković, 2013). Dravska depresija se može podijeliti na njen istočni i zapadni dio kako je prikazano na slici 3.2.

Slika 3.2. Hrvatski dio Panonskog bazenskog sustava s označenim granicama depresija (Kranjec et al., 1981)

Najstarija formacija u njenom istočnom dijelu je formacija Vukovar, a nakon nje slijedi formacija Valpovo što je vidljivo na slici 3.3. Obje formacije predstavljaju naslage miocenske starosti do donjeg panona. Formacije su međusobno odvojene na temelju EK markera Rs7, dok je granica sa stijenama podloge određena EK-granicom Tg ili Pt. Formacija Vukovar obuhvaća konglomerate i breče u svojoj podini, a u gornjem dijelu sadrži pješčenjake i vapnence. Formacija Valpovo se sastoji pretežito od glinovitih vapnenaca (Hernitz, 1983).

Tijekom kasnijeg panona dolazi do taloženja formacije Vinkovci (slika 3.3.), čija je baza odvojena od Valpovo formacije EK-markerom Rs5 i sastoji se uglavnom od lapora i pješčenjaka. Naslage taložene tijekom starijeg i mlađeg ponta (mlađi panon) također pripadaju formaciji Vinkovci. Formacija Vera (slika 3.3.) predstavlja naslage taložene pri samom kraju ponta i odvojena je EK-markerom B od formacije Vinkovci. U svome baznom dijelu se sastoji od lapora, dok se u plićem dijelu formacije nalaze pješčenjaci (Hernitz, 1983).

Najmlađa formacija istočnog dijela Dravske depresije je formacija Vuka čije su naslage taložene tijekom pliocena i kvartara. Podinu formacije čine gline, siltovi i pijesci, a gornji dio se sastoji od šljunaka i pijeska (Hernitz, 1983).



Slika 3.3. Formacije unutar hrvatskog dijela Dravske depresije (Malvić & Cvetković, 2013)

Zbog povijesnog tijeka istraživanja, litostratigrafske su jedinice u zapadnom dijelu Dravske depresije dijelom prenesene iz Savske depresije, a dijelom tad prvotno novoimenovane. Zbog razlika u sastavu i taložnim facijesima nikad nisu bile izjednačene s jedinicama u istočnome dijelu depresije.

4. Metodologija

Metode mjerenja termalne vodljivosti stijena možemo podijeliti u dvije grupe:

1) laboratorijske stacionarne metode i
2) „dinamičke“ metode mjerenja u nestacionarnim temperaturnim uvjetima.

Obje grupe metoda se odlikuju svojim pozitivnim, ali i negativnim karakteristikama. Laboratorijske metode generalno daju vrlo precizne rezultate, ali postizanje ustaljenog stanja tijekom ove analize, kao i priprema uzoraka točno određenih dimenzija iziskuju dosta vremena. Dinamičke metode daju ipak malo manje precizne rezultate u odnosu na laboratorijske, međutim jednostavnost njihove izvedbe i mogućnost mjerenja na više lokaliteta u relativno kratkom periodu ih čine vrlo poželjnima.

4.1. Laboratorijske metode

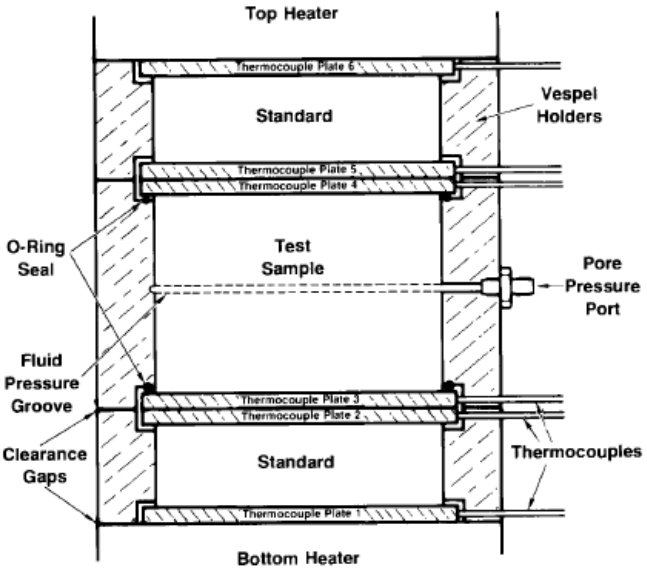
4.1.1. Metoda stacionarnog komparatora

Mjerenje ovom metodom izvodi se na način da se primjenjuje temperaturni gradijent preko uzorka i jednog ili više standarda poznate toplinske vodljivosti sve dok se temperatura ne prestane mijenjati. Mjeri se temperaturna razlika kroz uzorak i standard, ukoliko su poprečni presjeci uzorka i standarda jednake veličine, toplinska vodljivost uzorka se za linearni sustav može izračunati iz formule:

$$\lambda = \lambda_{st} (\Delta T_{st}/L_{st}) (L/\Delta T)$$

gdje je λ = toplinska vodljivost uzorka, L = duljina uzorka, ΔT = temperaturna razlika, λ_{st}, L_{st} i ΔT_{st} su toplinska vodljivost standarda, duljina standarda i temperaturna razlika za standard.

Prikaz na slici 4.1. obuhvaća dio aparature unutar kojega se postavlja uzorak. Postupak mjerenja se izvodi na način da se uzorak postavi između dva standarda kružnih presjeka i poznate toplinske vodljivosti. Između standarda i uzorka se postavljaju termoploče koje osiguravaju ravnomjernu distribuciju topline i omogućavaju mjerenje temperatura. Držači služe za pridržavanje uzorka i standarda te omogućuju saturaciju uzorka. Izvor topline i njen odvod čine cilindri koji su napravljeni od bakra i opremljeni s grijačima i termometrima. Saturiranost fluidom ili parom se kontrolira pomoću utora koji se nalazi na srednjem dijelu držača uzorka.



Slika 4.1.Uzorak i standardi za aparaturu stacionarnog komparatora (Somertson, 1992)

4.2. Dinamičke metode

4.2.1. Metoda prstena kao izvora topline

Na površinu uzorka se pomoću opruge prisloni prsten koji služi kao izvor topline. U središte prstena se postavi termometar koji je također oprugom prislonjen na površinu uzorka. Pojačavajući struju konstantnom jačinom kroz prsten, dolazi do njegovog zagrijavanja te se pomoću termometra mjeri povećanje temperature kroz vrijeme. Termalna vodljivost se može izračunati na temelju formule (Somerton, 1992):

$$\lambda = (q/2\,\pi r \Delta T) \bullet \mathrm{erfc}[r/(4\alpha t)^{1/2}]$$

gdje je q - toplina otpuštena iz prstena korigirana za gubitak topline [W], r - polumjer prstena [m], ΔT – temperaturna razlika na početku i kraju mjerenja [°C], erfc – komplementarna pogreška funkcije, α – toplinska difuzivnost uzorka [m^2/s], t – vrijeme [s].

4.2.2. Metoda iglene sonde

Ovom metodom mjerene su toplinske vodljivosti istraživanih stijena u okviru ovog diplomskog rada.

Metoda se zasniva na teoriji beskonačno dugačkog i beskonačno tankog linijskog izvora topline. Ukoliko je takav izvor topline napajan konstantnom strujom, razlika u temperaturi

(ΔT) za vrijeme proteklo od početka grijanja (t) i na radijalnoj udaljenosti od izvora (r) se može izraziti pomoću formule (Somerton, 1992) :

$$\Delta T \cong \frac{q}{4\pi\lambda} ln(t) - \frac{q}{4\pi\lambda}\left(\gamma + ln\left(\frac{r^2}{4\alpha}\right)\right)$$

Gdje je q – toplina po jedinici dužine, λ toplinska vodljivost, α toplinska difuzivnost uzorka i γ – Eulerova konstanta. U praksi linijski izvor topline predstavlja sonda u obliku igle.

Negativna strana ove metode je to što je potrebno umetnuti sondu u ispitivanu masu. Ukoliko se radi o nekonsolidiranim stijenama umetanjem sonde dolazi do poremećaja rasporeda mineralnih zrna i do smanjenja površine kontakta između sonde i stijene. Ukoliko je riječ o čvrstoj konsolidiranoj stijeni potrebno je probušiti rupu i koristiti odgovarajući medij za osiguravanje kontakta između sonde i stijene. Preciznost ove metode se procjenjuje na oko +/- 10% (Somerton, 1992).

Za mjerenje toplinske vodljivosti koristio se uređaj TEMPOS Thermal Properties Analyzer proizvođača Meter grupe. Sonde Tempos uređaja u sebi imaju ugrađen grijač i senzor temperature. Mjerenja se izvode na način da struja protječe kroz grijač sonde, a sustav prati promjenu temperature kroz vrijeme pomoću senzora. Senzor temperature mora biti u kontaktu s ispitivanim materijalom kako bi očitanja bila što točnija. U idealnom slučaju se temperatura ispitivanog materijala tijekom mjerenja ne bi trebala mijenjati pod utjecajem vanjskih čimbenika. Vrijeme zagrijavanja sonde se svodi na minimum kako bi se izbjeglo kretanje vode termalnom indukcijom i osiguralo što brže mjerenje. Sonda prvo 30 sekundi mjeri temperaturu okoline, zatim 60 sekundi traje njeno zagrijavanje. Analizom ovisnosti promjene temperature i proteklog vremena dobije se toplinska vodljivost uzorka. Algoritam koji uređaj koristi prilikom mjerenja se bazira na formuli:

$$\Delta T = \left(\frac{q}{4\pi k}\right) ln(t/t_0) + C$$

Gdje je ΔT – promjena temperature (K), q – toplina po duljini (W/m), k – toplinska vodljivost (W/mK), t – vrijeme mjerenja (s), t_0 – vrijeme pomaka (s) i C – konstanta.

Prema uputama proizvođača korištena je sonda RK-3 koja se smatra najboljom za mjerenje unutar čvrstog betona ili stijene. Sonda je dugačka 6 cm i ima promjer od 0,39 cm. Može mjeriti toplinsku vodljivost u rasponu od 0,1 do 6,0 W/mK sa preciznošću od +/- 10%.

5. Izvođenje mjerenja

Kako bi dobiveni rezultati mjerenja bili što točniji potrebno je osigurati što bolje uvjete mjerenja. Dolaskom na željeni lokalitet potrebno je odrediti površinu stijene koja je pogodna za provođenje ispitivanja. Takva površina bi trebala predstavljati reprezentativan uzorak za determiniranu stijenu, odnosno ne bi smjela imati pukotine u blizini samog mjesta mjerenja i ne bi smjela sadržavati nikakve tragove promjena od strane ljudskog djelovanja (tretiranje kemikalijama). Nakon što se takva površina definira ponekad ju je potrebno malo obraditi kako bi se postigli što bolji uvjeti mjerenja. U idealnom slučaju prilikom mjerenja toplinske vodljivosti sonda uređaja bi trebala cijela ući sa svih strana u stijenu, a to je zbog konstrukcije same sonde moguće jedino ukoliko je kut između sonde i površine stijene približno 90^o (slika 5.1.).

Slika 5.1. Ispravno postavljena sonda u stijenskoj masi

Površina se obradi na način da se brusilicom izgladi površina od svega nekoliko cm^2 potrebnih za dobro prijanjanje sonde. Nakon što je pitanje prianjanja riješeno, potrebno je izbušiti rupu točno određenog promjera i duljine kako bi odgovarala dimenzijama sonde. Prilikom bušenja tvrđih stijena treba paziti na opterećenje bušilice i temperaturu svrdla, stoga je ponekad potrebno bušiti u intervalima i hladiti svrdlo s vodom. Kada je odgovarajuća rupa izbušena, slijedi njeno čišćenje od praha i krhotina nastalih tijekom bušenja. Čišćenje se izvodi ispuhivanjem komprimiranog zraka u rupe. Tijekom opisanih postupaka stijena se u okolini izbušene rupe zagrije, stoga je potrebno napraviti određeni vremenski razmak prije početka mjerenja kako bi se stijena stigla ohladiti na prvobitnu temperaturu. Prije samog stavljanja sonde u rupu potrebno je nanijeti termalnu pastu na sondu kako bi se osigurala što bolja provodljivost i preciznije mjerenje temperatura. Nakon izvršenog mjerenja sonda se

pažljivo izvlači iz rupe i očisti od termalne paste kako bi bila spremna za mjerenje na sljedećem lokalitetu.

Slika 5.2. Izvođenje mjerenja na filitima južnih obronaka Papuka

6. Rezultati

Ukupno je napravljeno 16 mjerenja toplinske vodljivosti na tri različita lokaliteta. Prvi lokalitet (lokalitet A na slici 6.1.) na kojem su izvođena mjerenja toplinske vodljivosti nalazi se u blizini sela Koturić. Vrsta stijene je determinirana kao filit, a izmjerena vrijednost K iznosi 2,184 W/mK.

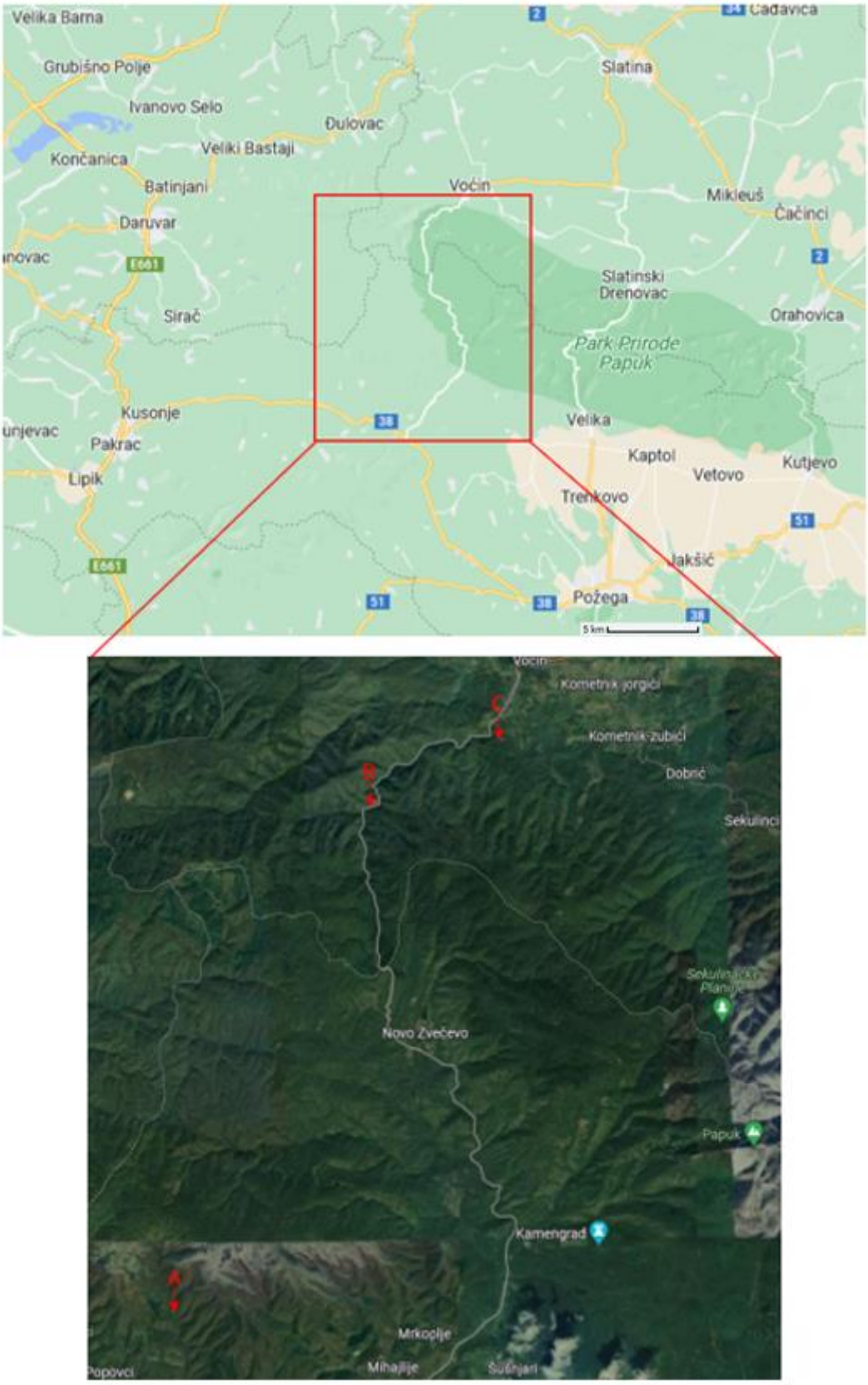
Drugi lokalitet (lokalitet B) se nalazi na udaljenosti od oko 12,7 km zračne linije u smjeru sjeveroistoka od lokaliteta A. Riječ je o starom kamenolomu na cesti između mjesta Novo Zvečevo i Voćin. Na tom lokalitetu je istraživana stijena determinirana kao gnajs, te su napravljena dva mjerenja unutar iste točke G9 s oznakama G9a i G9b. Za mjerenje pod oznakom G9a izmjerena vrijednost K iznosi 3,414 W/mK, dok za mjerenje pod oznakom G9b vrijednost K iznosi 3,715 W/mK.

Treći lokalitet (lokalitet C) je udaljen 3,4 km zračne linije sjeveroistočno od lokaliteta B. Na ovom lokalitetu je izmjereno sedam točaka te su izvedena po dva mjerenja za svaku točku. Točka VocA1 označava svjetložuti lapor srednje tvrdoće koji se nalazi u donjem dijelu sedimentološkog stupa VOC-A. Prvo mjerenje na toj točki označeno s VocA1a je dalo vrijednost K od 0,921 W/mK, dok je u drugom mjerenju VocA1b iste točke vrijednost K iznosila 0,913 W/mK. Prilikom mjerenja VocA1b je došlo do stvaranja zračnog čepa u rupi, stoga se pretpostavlja da je to razlog nižim vrijednostima mjerenja. Točka VocA2 predstavlja biokalkarenit do biokalkrudit svjetlosmeđe boje, naizgled homogen. Rezultat prvog mjerenja, VocA2a, za vrijednost K iznosi 1,46 W/mK, dok je kod drugog mjerenja s oznakom VocA2b vrijednost K iznosila 1,686 W/mK. Točka VocA3 označuje kompaktni svjetlosmeđi lapor koji se nalazi na polovici sedimentološkog stupa VOC-A. Kod ove točke oba mjerenja VocA3a i VocA3b su dala istu vrijednost K od 1,028 W/mK. Točka VocA4 se nalazi pred kraj litološkog stupa VOC-A i predstavlja biokalkarenit svjetložute boje koji je jako trošen. Kod prvog mjerenja označenog sa VocA4a vrijednost K je iznosila 0,993 W/mK, kod drugog mjerenja oznake VocA4b K je iznosio 0,987 W/mK. Potrebno je naglasiti da se prilikom drugog mjerenja (VocA4b) rupa išla obnoviti zbog trošnosti stijene prilikom čega je došlo do mogućeg nailaska na šupljinu zbog naglog propada bušilice u stijenu. Točka VocA5 je smještena pred sam kraj litološkog stupa VOC-A. Determinirana stijena je lapor te je vidljiva izmjena tamnijih i svjetlijih lapora kao i nakupina organske tvari. Na ovoj točki su također izvršena dva mjerenja VocA5a i VocA5b. Mjerenje VocA5a je dalo rezultat K u iznosu od 1,01 W/mK, dok je mjerenje VocA5b dalo vrijednost K od 0,982 W/mK.

Zadnja lokacija na kojoj su izmjerene posljednje dvije točke i dalje pripada lokalitetu C međutim ispitivane stijene pripadaju litološkom stupu VocB. Obje točke mjerenja VocB1 i VocB2 se nalaze uz rub potoka na međusobnoj udaljenosti od jednog metra i predstavljaju laminirane lapore. Razlika je u tome što je točka VocB1 smještena bliže koritu potoka gdje je veća saturiranost vodom, dok je točka VocB2 smještena jedan metar više i stoga je kod te točka saturiranost vodom bitno manja. Izmjerena vrijednost K za točku VocB1 iznosi 0,936 W/mK. Za točku VocB2 su napravljene dva mjerenja gdje je prvo mjerenje VocB2a iznosilo 1,051 W/mK, a drugo mjerenje VocB2b 1,124 W/mK. U svrhu lakšeg praćenja rezultata napravljena je tablica 6.1.

Tablica 6.1 Pregled rezultata mjerenja

Lokalitet	Točka	Vrsta stijene	Mjerenje	Toplinska vodljivost (W/mK)
Lokalitet A	G64	filit	G64	2,184
Lokalitet B	G9	gnajs	G9a	3,414
			G9b	3,715
Lokalitet C	VocA1	lapor	VocA1a	0,921
			VocA1b	0,913
	VocA2	biokalkarenit do biokalkrudit	VocA2a	1,46
			VocA2b	1,686
	VocA3	lapor	VocA3a	1,028
			VocA3b	1,028
	VocA4	biokalkarenit	VocA4a	0,993
			VocA4b	0,987
	VocA5	lapor	VocA5a	1,01
			VocA5b	0,982
	VocB1	lapor	VocB1	0,936
	VocB2	lapor	VocB2a	1,051
			VocB2b	1,124



Slika 6.1. Prikaz lokacija mjerenja u blizini naselja Koturić (A) i Voćin (B i C) (Google Maps)

7. Diskusija i zaključak

Dobiveni rezultati ukazuju na to da se metodom iglene sonde izmjerene vrijednosti toplinske vodljivosti mogu međusobno razlikovati čak i kada su izmjerene na istom uzorku stijene. Vrijednost toplinske vodljivosti ispitivanog filita odgovara skoro središnjoj vrijednosti referentnog intervala za tu vrstu stijene navedenoj u tablici 2.3., što ide u prilog točnosti mjerenja metodom iglene sonde. Rezultati ispitivanih toplinskih vrijednosti za gnajs se međusobno razlikuju za 0.083 W/mK, te se obje vrijednosti nalaze oko gornje granice referentnog intervala iz tablice 2.3. Kako je spomenuto na početku rada, mjerenja toplinske vodljivosti koriste se u modeliranju podzemlja, stoga spoznaja da gnajsevi na istraživanom području uistinu imaju visoku toplinsku vodljivost za tu vrstu stijena može promjeniti do tada pretpostavljen model raspodjele topline temeljen na vrijednostima preuzetima iz literature. Na istraživanom području najviše točaka mjerenja je izvedeno unutar lapora, a razlika između najviše (VocB2b) i najniže (VocA1b) izmjerene vrijednosti toplinske vodljivosti iznosi 0,199 w/mK. Treba uzeti u obzir da je to razlika između dvije točke mjerenja, što znači da nije nužno rezultat nepreciznosti metode mjerenja, već različitih svojstava dvaju lapora kao što su: mineralni sastav, poroznost, saturiranost i prisutnost fluida. Prilikom mjerenja točke VocB2 je zabilježena najveća razlika između vrijednosti dvaju mjerenja iste točke unutar lapora i iznosi 0,073 W/mK. Uzimajući u obzir da sve izmjerene vrijednosti toplinske vodljivosti lapora na istraživanom području odgovaraju intervalnim vrijednostima navedenim u tablici 2.3. te da razlike vrijednosti između točaka mjerenja i samih mjerenja unutar iste točke nisu značajne ide u prilog točnosti rezultata dobivenih korištenjem metode iglene sonde. Najveća razlika između dvaju mjerenja iste točke na cijelom istraživanom području iznosi 0,226 W/mK i pripada točki VocA2 koja se nalazi unutar stijene determinirane kao biokalkarenit do biokalrudit. Oba mjerenja provedena kod točke VocA2 pokazuju nešto veće vrijednosti od referentnog intervala za kalkarenit navedenog u tablici 2.3. Razlog viših vrijednosti se vrlo vjerojatno može pripisati razlici u mineralnom sastavu između čistog kalkarenita i biokalkarenita do biokalkrudita. Izmjerene vrijednosti na točki VocA4, koja predstavlja biokalkarenit, se nalaze unutar referentnog intervala što potvrđuje njihovu točnost. Gledajući redoslijed mjerenja nije uočena poveznica između rezultata i rednog broja mjerenja. Kod točaka gdje su napravljena po dva mjerenja samo je kod jedne točke (VocA3) rezultat prvog i drugog mjerenja bio jednak, dok su po tri točke imale višu vrijednost prvog mjerenja, a tri višu vrijednost drugog mjerenja.

Metoda iglene sonde generalno daje dobre vrijednosti toplinske vodljivosti, uz određena odstupanja između mjerenja. Pogodna je za pokrivanje veće površine terena u relativno malom vremenskom intervalu i preliminarna istraživanja. Prilikom mjerenja ovom metodom moraju se uzeti u obzir i vremenski uvjeti (npr. prisutnost padalina i močenje stijene) za vrijeme mjerenja, koji bi tijekom samog mjerenja mogli utjecati na rezultate. Kako bi se dobili što precizniji podaci o toplinskoj vodljivosti stijena u podzemlju, potrebno je uzeti u obzir i razliku uvjeta između stijena na površini i u podzemlju. Poznato je da uvjeti temperature, tlaka, poroznosti i saturiranosti fluidima uvelike utječu na toplinsku vodljivost stijene. Međutim te utjecaje je načelno moguće korigirati temeljem praćenja utjecaja pojedinog čimbenika na promjenu toplinske vodljivosti tijekom višestrukih mjerenja. Upravo zato je poželjno uz terenska mjerenja provesti i detaljnija laboratorijska mjerenja toplinske vodljivosti gdje je moguće do određene mjere simulirati uvjete unutar kojih se nalazi ispitivana stijena u podzemlju. Nastavak ovog rada bit će usmjeren na uspostavljanje empirijskih korelacija koje bi trebale omogućiti korekcije podataka za uvjete u podzemlju.

8. Literatura

Abdulagatova, Z., Abdulagatov, I. M. & Emirov, V. N. (2009). Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46(6), 1055-1071.

Andolfsson, T. (2013). Analyses of thermal conductivity from mineral composition and analyses by use of Thermal Conductivity Scanner: a study of thermal properties of Scanian rock types. *Dissertations in Geology at Lund University*.

Balkan, E., Erkan, K., & Şalk, M. (2017). Thermal conductivity of major rock types in western and central Anatolia regions, Turkey. Journal of Geophysics and Engineering, 14(4), 909-919.

Blackwell, D. D., & Steele, J. L. (1989). Thermal conductivity of sedimentary rocks: measurement and significance. In: Thermal history of sedimentary basins: methods and case histories (pp. 13-36). Springer New York.

Cermak, V., & Rybach, L. (1982)Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In: G.Angeneister (Ed,), Landolt-B“rnstein Zahlenwerte and Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik, Neue Serie, Physikalische Eigenschaften der Gesteine. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg and New York, V/1a, 305-343.

Cvetković, M., Matoš, B., Rukavina, D., Kolenković Močilac, I., Saftić, B., Baketarić, T., Baketarić M., Vuić I., Stopar A., Jarić A., & Paškov, T. (2019). Geoenergy potential of the Croatian part of Pannonian Basin: insights from the reconstruction of the pre-Neogene basement unconformity. *Journal of Maps*, *15*(2), 651-661.

Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R., Cultrera, M., Scotton, P., Mueller, J., ., Bertermann, D., Mendrinos, D., Pasquali, R., Perego, R., Pera, S., Di Sipio, E., Cassiani, G., De Carli, M.,& Bernardi, A. (2020). An updated ground thermal properties database for GSHP applications. Geothermics, 85, 101758.

Hernitz, Z. (1983): Dubinski strukturno-tektonski odnosi u području istočne Slavonije. Doktorska disertacija, poseb. izd. Nafte, p. 221, Zagreb.

Horai, K. I. (1971). Thermal conductivity of rock-forming minerals. Journal of geophysical research, 76(5), 1278-1308.

Iosif Stylianou, I., Tassou, S., Christodoulides, P., Panayides, I., Florides, G. (2016): Measurement and analysis of thermal properties of rocks for the compilation of geothermal maps of Cyprus. Renewable Energy, 88, 418–429. doi:10.1016/j.renene.2015.10.058

Jeanloz, R. (1990). The nature of the Earth's core. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, *18*(1), 357-386.

Kranjec, V., Hernitz, Z. & Velić, J. (1981): Neke značajke naftnoplinonosnosti naslaga i moguća daljnja nalazišta ugljikovodika u predjelima Vanjskih Dinarida i Jadranskog područja. Pomorski zbornik, 19, 385 – 412, Rijeka.

Malvić, T., & Cvetković, M. (2013). Korelacija litostratigrafskih jedinica u Dravskoj depresiji (hrvatski i mađarski dio). Nafta, 64(1), 27-33.

Pavelić, D. 2014. Opća Geologija. Sveučilišni udžbenik Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Pavelić, D., & Kovačić, M. (2018). Sedimentology and stratigraphy of the Neogene rift-type North Croatian Basin (Pannonian Basin System, Croatia): A review. Marine and petroleum geology, 91, 455-469.

Pollack, H. N., Hurter, S. J., & Johnson, J. R. (1993). Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set. Reviews of Geophysics, 31(3), 267-280.

Robertson, E. C. (1988). Thermal properties of rocks. Report, USGS Numbered Series, https://doi.org/10.3133/ofr88441

Robertson, E. C., & Peck, D. L. (1974). Thermal conductivity of vesicular basalt from Hawaii. *Journal of Geophysical Research, 79*(32), 4875-4888.

Ruedas, T. (2017). Radioactive heat production of six geologically important nuclides. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 18(9), 3530-3541.

Somerton, W. H. (1992). Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems. Elsevier, University of California, str. 41-60

Van Schmus, W. R. (1995). Natural radioactivity of the crust and mantle. In Global earth physics: A handbook of physical constants (Vol. 1, pp. 283-291). Washington, DC: American Geophysical Union

Velić, J. 2007. Geologija ležišta nafte i plina. Sveučilišni udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Xiaoqing, S., Ming, J., & Peiwen, X. (2018). Analysis of the thermophysical properties and influencing factors of various rock types from the guizhou province. In E3S Web of Conferences (Vol. 53, p. 03059). EDP Sciences.

Walsh, J. B., & Decker, E. R. (1966). Effect of pressure and saturating fluid on the thermal conductivity of compact rock. Journal of Geophysical Research, 71(12), 3053-3061.

Web izvori:

Tempos priručnik: http://publications.metergroup.com/Manuals/20645%20TEMPOS_Manual_Web.pdf (20.5.2023.)