

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Ökoloogia ja maateaduste instituut  
Geoloogia osakond

Magistritöö geoloogias (30EAP)

**Tiskre soojuspuuraugu aluskorra kivimite soojusjuhtivus**  
**Thermal Conductivity of Crystalline rock in Tiskre Borehole Heat Exchanger**

Grete Raie

Juhendaja: Argo Jõelett

Tartu 2025

## **Tiskre soojuspuuraugu aluskorrakivimite soojusjuhtivus**

Käesolev töö uuris Tiskres asuva soojuspuuraugus aluskorra kivimite soojusjuhtivust, et mõista piirkonna geotermilist potentsiaali. Töö käigus analüüsiti proove eri sügavustelt ning eri fraktsioonidega, et leida parimat analüüsi meetodit, mis selliste laboratoorsete katsete puhul töötaks. Töös selgitatakse välja kivimite soojusjuhtivused, toetudes tugevalt poorsusele, temperatuurile ning mineraalsele koostisele.

Korrelatsioon poorsuse ja soojusjuhtivuse vahel viitab asjaolule, et poorsuse kasvuga soojusjuhtivus väheneb ning mõõtmised tehti, kasutades aeg-sõltuvaid meetodeid. Proovide analüüsimiseks kasutati kahte andurit: nõelandurit ja pinna-andurit, mis kumbki töötavad impulsside baasil. Nõelanduri puhul toodeti stabiilsemad ja usaldusväärsemad tulemused

Märksõnad: *Soojusjuhtivus, aeg-sõltuv meetod, poorsus, mineraalne koostis*

Maateadused, geofüüsika, geoloogia

CERCS: P500 - 50%, P470 - 25%, P420 - 25%

## **Thermal Conductivity of Crystalline rocks in Tiskre Borehole Heat Exchanger**

This study investigated that the thermal conductivity of the crystalline rocks in Tiskre geothermal borehole is a key factor in assessing the areas geothermal potential. It evaluates the best analytical methods, thermal properties of rock samples from various depths focusing on their mineralogical composition, temperature and porosity.

The correlation between porosity and thermal conductivity suggests that increased porosity leads to lower heat transfer efficiency. Measurements were conducted using transient methods, comparing TLS and TPS techniques, with TLS providing more stable and trustworthy results.

Keywords: *Thermal conductivity, transient methods, porosity, mineral composition*

Earth sciences, Geophysics, Geology

CERCS: P500 - 50%, P470 - 25%, P420 - 25%

## Sisukord

Sissejuhatus .....	4
Soojusjuhtivus.....	5
Mõiste .....	5
Mineraalide soojusjuhtivus .....	6
Kivimite soojusjuhtivus.....	7
Settekivimite .....	8
Magmakivimite .....	8
Moondekivimite .....	8
Poorsus.....	8
Temperatuur ja rõhk.....	10
Materjal ja meetodid .....	12
Tulemused.....	15
Järeldused.....	24
Kasutatud kirjandus:.....	28

## 1. Sissejuhatus

Maa sisemuses akumulunud soojus on väärtuslik taastuv energiaressurss, mille kättesaadavus sõltub eeskätt maakoore termilistest omadustest. Aluskorra kivimite omadused mängivad olulist rolli nii geotermiliste ressursside hindamisel kui ka maa-aluste energiasalvestussüsteemide, soojuspuuraukude ja muude insenertehniliste rakenduste planeerimisel. Eriti oluline on soojusjuhtivus – parameeter, mis määrab ära, kui hästi kivim suudab soojust edasi kanda. See on otseselt seotud nii energiakasutuse efektiivsuse kui ka aluspõhja geotermilise modelleerimise täpsusega.

Soojuskanduvuse hindamisel on oluline mõista, millised tegurid mõjutavad kivimitüüpide (näiteks moonde-, sette- ja magmakivimite) termilisi omadusi. Aluskorras esinevate kivimite soojusjuhtivus ei ole konstantne väärtus, vaid sõltub mineraalsest koostisest, poorsusest, struktuurist ja veesisaldusest. Näiteks kvartsirikkad kivimid juhivad soojust paremini kui päevakivirikkad kivimid. Samuti võivad kivimi lõhelisus ja kihilisus põhjustada anisotroopsust. (Clauser, Huenges, 1995; Schön, 2015)

Eestis, sh Tiskre piirkonnas, kus töö käigus uuritakse geotermaalenergia kasutuselevõtuks puuritud soojuspuurauke, on aluskorraks valdavalt kristalne kivimasiiv, mille koosseisus esineb nii graniiti, gneissi kui ka muid moonde- ja süvakivimeid. Graniit on seejuures üks levinumaid ning tehniliselt olulisi kivimitüüpe, mida kohtub ka Tiskre piirkonna geoloogilises läbilõikes. Graniidi soojusjuhtivus varieerub vahemikus 2,5 – 4 W/mK, sõltudes selle kvartsisisaldusest, terasuurusest ja lõhelisusest (Clauser, 2006; Schön, 2015). Suurema kvartsisisaldusega graniidid, millel on hea kristalliseeritus ja madal poorsus, juhivad soojust tõhusamalt ning on seetõttu sobivamad geotermiliste rakenduste jaoks. Seetõttu on graniidi omaduste tundmine oluline sügavamate puuraukude ja nende termilise potentsiaali hindamisel.

Käesoleva töö eesmärk on analüüsida Tiskre piirkonna soojuspuuraugu kivimite soojusjuhtivust laboratoorsete mõõtmiste kaudu ning hinnata kasutatud mõõtmismeetodite – nõelanduri ja pinnaanduri sobivust. Erilist tähelepanu pööratakse poorsuse ja mineraalse koostise seoste mõõdetavade termiliste omadustega. Töö tulemused aitavad paremini hinnata Tiskre geotermilise energia kasutuspotentsiaali ning laiendada teadmisi Eesti aluskorra kivimite termiliste omaduste kohta.

## 2. Soojusjuhtivus

### 2.1 Mõiste

Soojusjuhtivus on soojusülekanne tüüp, mis toimub makroskoopiliselt paigal seisvas kehas. Protsess esineb nii gaasides, vedelikes kui ka tahketes materjalides ning väljendab soojuskannet, mis toimub keha osakeste soojusvõnkumise tulemusena. Termodünaamiliselt on soojusülekanne võimalik vaid siis, kui süsteemis puudub termiline tasakaal, mistõttu saab energia siirduda kõrgema temperatuuriga piirkonnast madalama temperatuuriga piirkonda. Parimad soojusjuhivad on tahkised, eriti metallid, halvimald soojusjuhivad on gaasid (TSederberg, 1965). Vedelikus ja gaasis põhjustab soojusjuhtivuse molekulide omavaheline kokkupõrge ja diffusiooninähtus, tahkiste puhul molekulide vibreerimine kristallvõres ja vabade elektronide liikumine.

Teadad on kolm soojuskande moodust: konduktiivne, konvektiivne ja kiirguslik ning need võivad esineda nii üksikult kui ka kombineeritult. Soojusjuhtivus on konduktiivne protsess, mis tugineb Fourier'i seadusele, mille kohaselt soojusvoo tiheduse  $q$  (W/mK) kehas määrab temperatuurigradiendi  $dT/dx$  (K/m) ja aine soojusjuhtivuse  $\lambda$  (W/mK) korrutis:

$$q = -\frac{dT}{dx} \times \lambda$$

See tähendab, et soojusjuhtivus on pinnaühikut ajaühikus läbiv soojushulk temperatuurigradiendi ühiku kohta ning iseloomustab keha soojusläbilaskvust ja väljendub soojusjuhtivusteguri kaudu. Mida suurem on aine soojusjuhtivustegur, seda paremini juhib ta soojust ehk soojus liigub materjalis efektiivselt.  $\lambda$  sõltub aine agregaatolekust, mineraalsest koostisest, poorsusest ja rõhust, mis tõttu võib ühel materjalil olla mitu erinevat soojusjuhtivustegurit (Ots, 2011). Tahkised omavad tihedat kristallvõret, mis tähendab, et nende osakesed on tihedalt koos ning vibreerimisel toimub kokkupõrkeid palju ning ka soojusjuhtivus seetõttu on kõrgem kui vedelikel ja gaasidel. Vedelas olekus ainete osakesed on liikuvad ja soojusenergia levib põhiliselt konvektsiooni, mitte osakeste vahelise otsese edasikande kaudu. Gaaside puhul asuvad osakesed üksteisest kaugel ning kokkupõrked on juhuslikud, mistõttu ei saa soojus neis ka hästi levida, sest pidev kontakt puudub.

Oluliseks teguriks kivimite soojusjuhtivuse juures on nende mineraalne koostis ning anisotroopsus. Viimast käsitletakse just mineraalide puhul ning see näitab soojusjuhtivuse

varieeruvust sõltuvalt suunast, milles soojus liigub. Anisotroopsus esineb sageli kristallilistes materjalides ning tähendab, et materjalil on erinevad füüsikalised omadused erinevates suundades

## 2.2 Mineraalide soojusjuhtivus

Kivimi soojusjuhtivuse määravad kivimit moodustavate mineraalide soojusjuhtivused (Cermak, Rybach, 1982), mis on palju paremini piiritletud kui kivimite  $\lambda$ , sest teada on kindel kristallstruktuur ning spetsiifilised keemilised valemid (Mavko et al., 2009).

Peamiste aluskorra kivimmoodustajate mineraalide alla kuuluvad kvarts, plagioklass, ortoklass, biotiit, muskoviit, amfiboolid, pürokseenid ja oliviin jt., millest suurim soojusjuhtivus on omistatud kvartsile: 6,15 – 7,69 W/mK (Ratchliffe, 1959). Kristallilise ja polükristallilise kvartsi soojusjuhtivus ulatub 4 – 8 W/mK, samas kui amorfse kvartsi ehk klaasja ränidioksiidi soojusjuhtivus on oluliselt madalam 0,9 – 1,4 W/mK. Selle põhjuseks on amorfse materjali ebakorrapärane struktuur, mis takistab soojuse suunatud levikut ning põhjustab soojusenergia hajumist (Coquil et al., 2011).

Kihtsilikaadid, nagu biotiit ja muskoviit, iseloomustuvad madala ja keskmise soojusjuhtivusega  $\lambda(\text{biotiid})=2,02$  W/mK,  $\lambda(\text{muskoviit})=2,28$  W/mK (Cermak, Rybach, 1982). Nende mineraalide kristallstruktuur koosneb tugevalt seotud silikaatkihtidest, mida ühendavad ioonilised või Van der Waalsi jõud. See põhjustab märkimisväärset anisotroopiat, kus soojusenergia levib muskoviidis kiiremini paralleelselt kihipinnaga (5,1 W/mK) kui risti kihistruktuuriga (0,84 W/mK) (Cermak, Rybak, 1982). Kihtsilikaatide soojusjuhtivust mõjutab keemiline koostis, näiteks muskoviidis sisalduvad oksüdeeritud alumiinium ja kaalium ioonid, mis vähendavad materjali soojusjuhtivust. Biotiidi koostises esineb raud seotult silikaatstruktuuris, mitte metallilises vormis, mis piirab soojuse levikut. Lisaks vähendab OH-rühmade olemasolu materjalide soojusjuhtivust, kuna vesinik hajutab energiat ja häirib kristallvõre korrapära, takistades efektiivset soojusülekanget (Wapels, Wapels, 2004).

Päevakivid nagu ortoklass ja plagioklass, omavad keskmise suurusega soojusjuhtivuse väärtusi (Cermak, Rybach, 1982). Nende suhteliselt madalam soojusjuhtivus võrreldes kvartsiga on tingitud raamistikstruktuurist, kus aatomid paiknevad vähem tihedalt. Ortoklassi ( $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ ) soojusjuhtivus jääb vahemikku 2,30 – 2,68 W/mK, samas kui naatriumirikkama plagioklassi mineraalid, nagu albiit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), anortiit ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), ja labradoriit ( $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$ ), näitavad varieeruvaid väärtusi, sõltuvalt keemilisest koostisest. Na-rikkal albiidil on

soojusjuhtivus 1,8 -2,0 W/mK, Ca-rikka anortiidi väärtused on madalamad ja jäävad 1,5 – 1,6 W/mK vahele, samas kui labradoriit, mis on vahepealse Na ja Ca sisaldusega, omab väärtusi vahemikus 1,6-1,8 W/mK (Hofmeister, 2012). Na-rikaste päevakivide parem soojusjuhtivus võrreldes Ca-rikastega tuleneb kergemate ja väiksemate ioonide tõhusamast soojusülekandest. Amfiboolid, mida leidub peamiselt tard- ja moondekivimites, kuuluvad lintsilikaatide rühma. Kүүnekivi on selle mineraalirühma üks tuntumaid esindajaid. Amfiboolidel esineb laialdasi keemilisi asendumisi, mistõttu nende soojusjuhtivus varieerub. Näiteks glaukofaani  $\lambda = 2,17$  W/mK (Cermak, Rybach, 1982) ja kүүnekivi  $\lambda = 5,30$  W/mK (Ye et al., 2022). Nende kiuline ehitus põhjustab anisotroopset soojusülekanget.

Pürokseenid, mis kuuluvad ahelsilikaatide hulka, on olulised tardkivimite, nagu basalt ja gabro, koostises. Nende kristallstruktuur võib olla rombiline (ortopürokseenid) või monokliinne (klinopürokseenid), mis mõjutab soojusenergia levimise suunda (Osako et al., 2013). Pürokseeni kõrge (38%) kontsentratsiooniga mineraalsetes on soojusjuhtivus ligikaudu 2,1 W/mK (McCombie et al., 2017), samas kui puhaste mineraalide soojusjuhtivus võib ulatuda diopsiidi puhul kuni 5,02 W/mK (Cermak, Rybach, 1982). Kristallstruktuuri keerukus ja koostises esinevate ioonide omadused võivad põhjustada märkimisväärseid variatsioone, näiteks omfatsiidi juhtivuse langust (Osako et al., 2013; Wang et al., 2014).

Üks tähtsamaid kivimoodustajaid on oliviin, mis mõjutab Maa vahevöö materjali soojusülekanne omadusi. Selle mineraalirühma soojusjuhtivus sõltub raua ja magneesiumisisaldusest. Mg-rikkad oliviinid, nagu fosteriit ( $\lambda=4,65 - 5,03$  W/mK) (Clauser, Huenges, 1995), juhivad soojust efektiivsemalt kui rauarikkad variandid, nagu fajaliit ( $\lambda=3,16 - 3,85$  W/mK) (Clauser, Huenges, 1995; Zhang et al., 2019).

### 2.3 Kivimite soojusjuhtivus

Kivimite soojusjuhtivus ei ole nii kindlalt määratletud kui üksikute mineraalide puhul, kuna kivimid on oma koostiselt ja struktuurilt märksa heterogeensemad. Soojusjuhtivus sõltub mitmetest teguritest, nagu mineraalne koostis, terasuurus, tekstuur, poorsus, veesisaldus ja kivimi struktuurne orientatsioon (Clauser, Huenges, 1995, Schön, 2015). Erinevatel kivimtüüpide klassidel – settekivimitel, magmakivimitel ja moondekivimitel – on erinevad domineerivad omadused, mis määravad soojusjuhtivuse taseme ja varieeruvuse.

2.3.1 Settekivimite puhul mõjutavad soojusjuhtivust kõige enam poorsus, sette tüüp, niiskusesisaldus ja kivimi tsementeeritus. Tugevamalt tsementeerunud, hästi sorteeritud ja tihedamad setted juhivad üldiselt paremini soojust. Näiteks on liivakivi keskmine soojusjuhtivus ligikaudu 4,1 W/mK, samas kui lubjakivil on see umbes 3,5 W/mK (Schön, 2015). Peeneteralised settekivimid, nagu savikad kihilised kivimid, on tundlikud settimissuunale ja mineraalsele koostisele, mis võib põhjustada tugevat anisotroopiat termilistes omadustes (Beardsmore, Cull, 2001)

2.3.2 Magmakivimite puhul määrab soojusjuhtivuse suurel määral päevakivide ja kvartsisisaldus. Kui päevakivide osakaal ületab juba 60%, väheneb kivimi soojusjuhtivus märgatavalt (Clauser, 2006). Samuti mängib rolli kristallide suurus – suurekristallilised süvakivimid (nt. graniit) juhivad paremini soojust kui klaasilised vulkaanilised kivimid (nt. obsidiaan). Graniidi soojusjuhtivus võib ulatuda 3,8 W/mK, samas kui obsidiaani puhul on see vaid 0,69 W/mK (Horai, 1971; Schön, 2015)

2.3.3 Moondekivimite puhul on oluliseks määravaks teguriks kvartsisisaldus, kuna kvarts on kõrge soojusjuhtivusega mineraal (6 W/mK). Q-rohked moondekivimid võivad seetõttu olla kuni kaks korda suurema soojusjuhtivusega kui Q-vaesed kivimid (Clauser, 2006; Suft et al. 2025). Moondekivimite, eriti gneissidele (ja kiltade), on iseloomulik tugev anisotroopia, mis tähendab, et soojusjuhtivus sõltub suunast – gneisi korral võib see varieeruda 2,5 – 4,5 W/mK paralleelselt tekstuuriga ning 1,5 – 3,0 W/mK risti tekstuuriga (Seipold, 1998)

## 2.4 Poorsus

Poorsus on oluline kivimi soojusjuhtivust mõjutav parameeter, kuna poore täidab tavaliselt kas õhk või vesi. Õhu soojusjuhtivus, mis on ligikaudu 0,026 W/mK toatemperatuuril, on oluliselt madalam kui tahkete mineraalide oma, mistõttu õhk toimib tõhusa soojusisolaatorina (Holman, 2010). Vee soojusjuhtivus, umbes 0,6 W/mK, on küll kõrgem kui õhul, kuid jääb alla enamikule kivim moodustajatele. See tuleneb vee molekulidevahelisest sidemest ja konvektiivsetest soojusülekanne omadustest (Incropera & DeWitt, 2002). Vee ja õhu soojusjuhtivusega tuleb arvestada suures vahemikus varieeruva poorsusega settekivimite puhul. Mida poorem on kivim, seda madalam on soojusjuhtivus. Enamasti on kivim maa sees veeküllastunud olekus, Pinnakihis või labori tingimustes võivad poorid olla erineval määral küllastumata ning siis on kivimi soojusjuhtivus oluliselt väiksem.

Veeküllastunud poorse materjali soojusjuhtivuse kirjeldamiseks kasutatakse mitmeid seoseid poorsuse funktsioonina. Seosed on enamasti keerukad, sest poorsuse muutudes muutub sageli koostis või mõni muu tegur. Aritmeetiline ja harmooniline kaalutud keskmine kirjeldavad soojuskannet piki ja risti kihilisuse suunale ning annavad mõõtetulemuste hajumise ülemise ja alumise piiri. Geomeetriline keskmine, mida saab arvutada aritmeetilise ja harmoonilise keskmise väärtuse keskmisena, töötab sageli paremini.

Magistritöös kasutatakse kivimi ja poorivee binaarse süsteemi soojusjuhtivuse sõltuvust, et arvutada mittepoorse kivimi soojusjuhtivust. See annab hinnangu vee poolt täidetud graniidi efektiivsele soojusjuhtivusele, võttes arvesse poorsuse mõju eksponentsiaalselt.

$$\lambda_{kivim} = \left( \frac{\lambda_{proov}}{\lambda_f^p} \right)^{\frac{1}{1-p}}$$

Kus

$\lambda_{kivim}$  on mittepoorse kivimi soojusjuhtivus (W/mK)

$\lambda_{proov}$  on veeküllastunud proovi mõõdetud soojusjuhtivus (W/mK)

$\lambda_f$  on poorides oleva vee soojusjuhtivus (0,6 W/mK)

$p$  on proovi poorsus

Antud töö puhul oli fluidi soojusjuhtivuseks 0,6 W/mK, mis püsis konstantsena kõikide proovide puhul. Proovi mõõdetud soojusjuhtivus on mõõtmiste keskmistatud väärtus.

## 2.5 Temperatuur ja rõhk

Temperatuuril on oluline mõju mineraalide ja kivimite soojusjuhtivusele. Kui temperatuur tõuseb, väheneb enamiku kivimite ja mineraalide soojusjuhtivus, sageli märkimisväärselt. See seos on oluline geotermaalse gradiendi, soojusvoo ja Maakoore termilise käitumise mõistmiseks. Peab aru saama, et sügavuse suurenemisega kaasneb ka temperatuuri ning rõhu tõus ning soojusjuhtivust saab kirjeldada valemiga:

$$k = \frac{bf(p)}{T}$$

Kus

$b/T=k_0$  tähistab soojusjuhtivust, mis sõltub temperatuurist ja rõhust

$f(p)=1$  rõhk maapinnal

$f(p)=23$  rõhk tuuma-vahevöö piiril (Clark, 1957).

Erinevate kivimitüüpide puhul (karbonaatkivimid, kristalsed kivimid, settekivimid) toimub pidev soojusjuhtivuse vähenemine temperatuuri tõusuga, ulatudes 12 -50%, kui temperatuur tõuseb toatemperatuurilt kuni 600 °C (Miao et al., 2014; Merriman et al., 2018).

Kivimite soojusülekanne saab kirjeldada termodünaamika teise seaduse kaudu, mille kohaselt liigub soojus kõrgema temperatuuriga piirkonnast madalama temperatuuriga piirkonda, tegelikult suurendades entroopiat. Soojuspaisumise tulemusena võib „termiline pragunemine“ tekitada kontaktitakistusi mineraali terade vahel, mis omakorda vähendab soojusjuhtivust, mida rohkem temperatuur tõuseb. See mõju ei ole tõenäoliselt nii tugev vee küllastunud kivimites kui kuivades kivimites (Clauser, Huenges, 1995). Kõige suuremad väärtuste kukkumised toimuvad vahemikus 27 - 227°C, peale mida, toimub soojusjuhtivuse tasakaalustumine kõrgematel temperatuuridel (Miao et al., 2014). Tasakaalustumise protsessi juhib 1000 - 1200 °C juures juba kiirguslik soojusjuhtivus, mis järgib termodünaamika kolmandat seadust (Clauser, 1988) ning võib ka  $\lambda$  vähenemise trendi ümber pöörata (Clauser, Huenges, 1995) Suureteralised mineraalid kogevad väiksemat soojusjuhtivuse langust kui peenemateralised mineraalid, kus teradevahelisi piire on rohkem ning kontaktitakistus on kergem tekkima (Song et al., 2023).

Süvakivimite puhul ei ole kiirguslik komponent niivõrd tähtis, kui seda on päevakivide sisaldus. Päevakivi-rikaste kivimite soojusjuhtivus ei vähene oluliselt (ligikaudu 10%) kuni 300°C. Ksp-vaesed kivimid võivad aga samas vahemikus kaotada üle 40% oma soojusjuhtivusest. Kivimite erineva käitumise taga on teatud liiki plagioklass-päevakivid, mille soojusjuhtivus kasvab temperatuuri tõusuga (Birch, Clark, 1940). Tulemuseks on temperatuurist põhjustatud soojusjuhtivuse vähenemise kompenseerimine (Clauser, Huenges, 1995). Sarnast fenomeni võib näha ka mõnede gaaside puhul.

Rõhk avaldab pidevat mõju nii kivimitele kui nende soojusjuhtivusele. Tavaliselt pidevalt tõusva rõhuga, tõuseb ka kivimite soojusjuhtivus. Muutub eelkõige just mineraalide tihedus ja kristallstruktuuri stabiilsus, kus suurem rõhk võib tugevdada aatomitevahelisi sidemeid, seeläbi parandades soojusjuhtivust (Osako et al., 2013). Eriti kiiresti tõuseb soojusjuhtivus madalatel rõhkudel (<100 MPa), kus mikrolõhede sulgumine ja poorsuse vähenemine parandavad kivimis soojuse levimiseks vajalikke kontakte (Abdulagatov et al., 2006). Kõige paremini nähtav on see efekt kõrge poorsuse või lõhenevusega kivimitel ning olulist mõju avaldavad just suletud poorid, kuna piiravad soojuse levikut (Lin et al., 2011).

### 3. Materjal ja meetodid

Uuritud materjal pärineb Tiskre pilootpuurangu südamikust Soojuspuurauk asub aadressil Taludevahe 116, Tallinn. Puurauk rajati projekti GEOENEST raames 2023. aasta oktoobris. Eesti Geoloogiateenistuse ja Soome Geoloogiateenistuse koostöös loodi esimesed kesk-sügavus puuraugud, et uurida Põhja-Eesti võimalikku maasoojusenergia potentsiaali ning tehnoloogiate rakendavust sealsetes geoloogilistes tingimustes

Alates 2. mai seisuga aastal 2024 on Eestisse rajatud 4398 maasoojuspuurauku. Töös kasutatud puurauk on aga Eesti sügavaim ning ulatub kuni 505 meetrini. Valmis sai puurauk 2024. aasta maiks. Puurimisi teostas Inseneribüroo Steiger OÜ, TJ Hooldus OÜ ja HeatConsult OÜ. Puurauku paigaldati topelt U-toru, mille kogupikkuseks on 505 m. Süsteemile lisati ka 74 kW nominaalvõimasusega soojuspump. Kokku läks see projekt maksma 381600 €. (Eesti Geoloogiateenistus, n.d.)

Proovid koguti 2023 aasta detsembris. Algmaterjaliks olid südamiku puurmed, mis jagati vastavalt sügavusvahemikele. Puurmeid hoiustati Arbavere uurimiskeskuses ning hiljem väiksemates kogustes ka Tartu Ülikooli Geoloogia osakonnas. Puurmeid olid jagatud proovikottidesse sügavusvahemike kaupa.

Mõõtmistes kasutatud proovid esinesid kahel kujul: jämedateralise materjalina ning peenestatud peeneteralise pulbrina. Esialgu eelistati mõõtmiseks peeneteralist materjali kuna homogeenne struktuur tagabüldjuhul usaldusväärsemad ja stabiilsemad tulemused. Siiski ilmnes, et veeküllastamise käigus toimunud mahumuutus mõjutas proovide ruumala määramist, mistõttu sai see soojusjuhtivuse arvutuste täpsust negatiivselt mõjutada.

Peeneteralisi proove valmistati kahel erineval viisil: esimesel juhul pressiti pulber käsitsi otse plastikust proovitopsi. Teisel juhul pressiti pulbrid tablettideks, kasutades Hertzogi hüdraulilist pressi, mille all töödeldi proove 5 minuti vältel. Pärast pressimist proovide mass määrati ning need kasteti veega küllastamiseks.

Esialgsete katsetuste käigus paigutati proovid 3 cm<sup>3</sup> plasttopsidesse, kuid veega küllastamisel paisus materjal üle serva, muutes proovi ruumala. Seetõttu ei olnud võimalik määrata täpset soojusjuhtivust. Sarnane paisumine ilmnes ka tablettidel, kus vee imendumine muutis proovide kõrgust, mis takistas korrektsete mõõtmistulemuste saavutamist. Täiendavaks väljakutseks osutus kuivatamisprotsess, kuna plastiktopsid ei olnud kuumakindlad, mistõttu proovid ka hävisid.

Hiljem valiti mõõtmiseks jämedateraline materjal, mille maht ei muutunud ning ruumala oli üheselt määratletav.

Jämedateraliste materjalide mõõtmiseks kasutati keraamilisi küvette ning 150ml mahutavusega keeduklaase, mis talusid edukalt kuivatusahju temperatuuri 105°C. Proovid küllastati eelnevalt Milli-Q veega ning soojusmahtuvust mõõdeti kolmel korral viieminutiliste vahedega. Keskmiselt kulus ühe jämedateralise proovi mõõtmiseks ja kaalumiseks umbes 20 min.

Peeneteralisi proove mõõdeti viiel kuni üheksal korral, viie minutiliste vahedega, nii et ühe proovi mõõtmistsükli kestus oli ligikaudu 40 – 60min. Kokku analüüsiti 72 jämedateralist proovi ning 43 peeneteralist proovi. Kõik proovid kaaluti nii enne kui pärast mõõtmist, et kontrollida vee võimalikku kadu mõõtmisprotsessi jooksul.

Proovianumate ruumalad määrati kaudselt, kasutades vee tihedust. Kõik anumad täideti veega ning ruumala arvutati massierinevuse alusel: veega täidetud anuma massist lahutati tühja anuma mass. Küvetid täideti täielikult, keeduklaasidesse asetati ligikaudu 110 ml proovi ning ruumalad määrati samal põhimõttel, eeldades vee tiheduseks 1 g/cm<sup>3</sup>.

Proovides sisalduv vee hulk arvutati veega küllastatud ja kuivatatud proovide masside erinevuse põhjal. Nii määrati proovis oleva vee mass. Poorsus arvutati, jagades veemassi ruumalaga, mille andis anuma maht.

Proovid mõõdeti *aeg-sõltuv* meetodiga, kasutades kahte erinevat andurit (Foto 1). Need rakendavad soojusallikat perioodiliselt või impulssidena, mis muudab mõõtmisaja oluliselt lühemaks. *Transient* meetodid on viimase kolme kümnendi jooksul osutunud eelistatumaks meetodiks *steady-state* meetodite ees, olle paindlikumad nii aja, täpsuse kui ka proovi suuruse suhtes. (Thermtest, n.d.)

Pulbrite puhul kasutati mõõtmiseks Thermtesti kaasaskantavat mõõdikut TPS (*transient plane source*) sensoriga. TPS andur ehk pinna-andur mõõdab ainult soojusjuhtivust. Sensor koosneb kahepoolsestspiraalsensorist, mis on nii soojusallikas kui ka temperatuuriandur. Sensor paigutatakse proovi pinnale, mistõttu ei kahjusta ega hävita see proovi (*non-destructive*) ning sobib ka anisotroopsete ning õhukeste materjalide mõõtmiseks. Andur suudab mõõta  $\lambda$  väärtusi vahemikus 0,005 – 1800 W/mK, annab väärtuseid 5% täpsusega, mille korratavus on 2%. Peeneteraliste proovide mõõtmisel paigutati andurile peale ka 1kg raskus, et materjali ja anduri kontakt oleks tõhusam. TPS-meetodi piiranguks on asjaolu, et mõõta saab ainult tahkeid materjale.

Jämeda materjali puhul sooritati mõõtmised TLS (*transient line source*) sensoriga, mis mõõdab soojusjuhtivuse kõrval ka soojustakistust. Anduri nõel koosneb õhukesest torust, mille sisse on paigutatud temperatuuriandur - 50, 100 või 150 mm terastorus nõela sees. Sensor paigutatakse täielikult proovi sisse ning sellega on võimalik mõõta nii tahkeid kui ka vedelaid materjale. Töötab sensor konstantse vooluallikaga ning mõõdab kindla aja jooksul temperatuuri tõusu. Kui kuumutamine on läbi saanud mõõdab sensor ka jahtumist. Andur töötab  $-40^{\circ}\text{C}$  kuni  $100^{\circ}\text{C}$  ning suudab määrata  $\lambda$  väärtusi vahemikus  $0,1 - 5 \text{ W/mK}$ , annab tulemusi 5% täpsusega ning korratavus on 2%. Minimaalne proovikogus on selle meetodi ainsaks piiranguks – proovi peab olema vähemalt 80ml.



Foto 1. Pildil on näha vasakul pool üleval TLS ehk nõelandurit ning all pool TPS andurit ehk pinnaandurit.

Lisaks kõikidele labori mõõtmistele sooritati ka XRD analüüs peenestatud proovide pulbritega. Pulbrirest tehti klaasist tabletid, et maatriks oleks kontrollitav ning XRD-s mõõdeti mineraalide

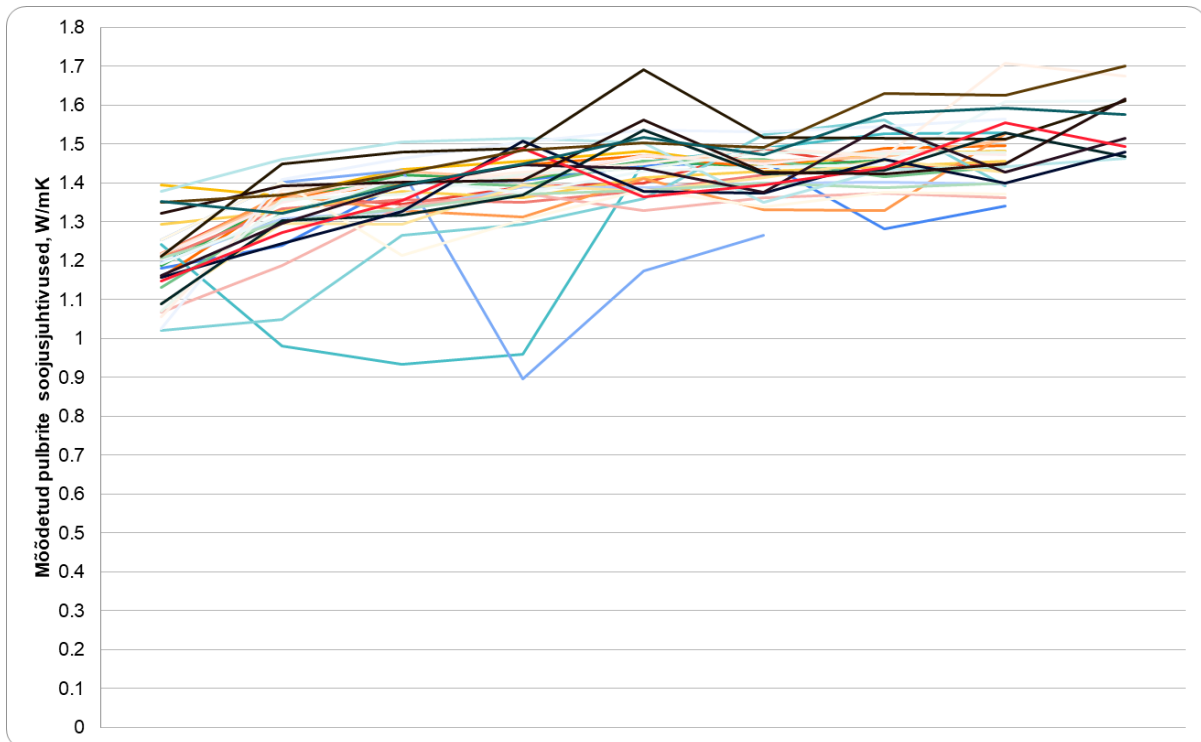
sisaldustele. Koostise põhjal soojusjuhtivuse arvutamine on üks kaudsetest meetoditest, millel üldjuhul esineb päris kõrge täpsus mõõtmistulemuste suhtes.

Mõõdetud väärtused koondati tabelisse ning arvutati soojusjuhtivuse väärtused iga sügavusvahemiku kohta. XRD analüüsi suhtelised väärtused (%) jagati esmalt 100-ga, et saada igas vahemikus mineraali murdosa. Järgmiseks leiti kaalutud keskmine, jagades murdosa omakorda mineraali spetsiifilise soojusjuhtivusega. Kõige viimaseks liideti kõikide mineraalide kaalutud keskmised ning vastuseks saadi kivimi keskmine soojusjuhtivus (W/mK)

## 4. Tulemused

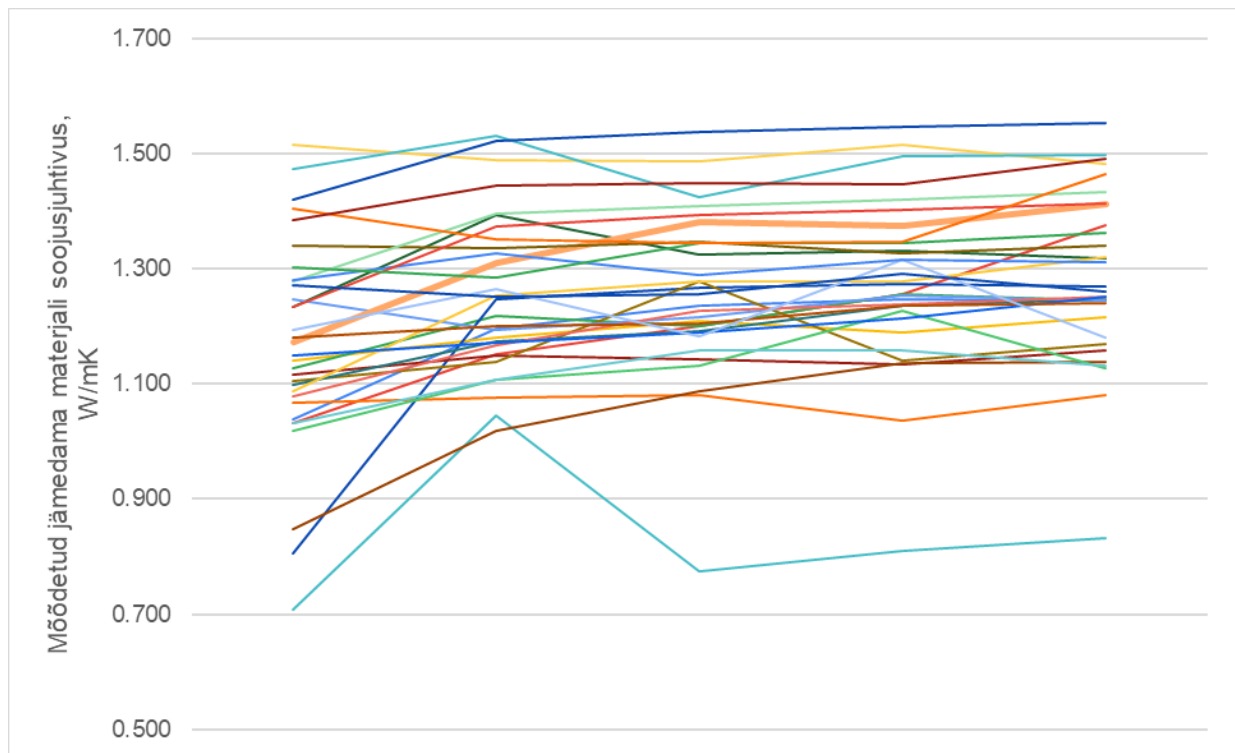
Peenestatud proovide soojusjuhtivusi mõõdeti kokku 43 proovil ning sooritati kokku 331 mõõtmist. Tulemuste väärtused varieerusid vahemikus 0,897 – 1,701 W/mK. Sama proovi kordusmõõtmiste standardhälve oli aga kõrge, mis viitab saadud näitude laialdasele varieeruvusele. Proove mõõdeti nii proovitopsi surutud pulbritest kui ka hüdraulilise pressiga valmistatud tablettidest, eesmärgiga saavutada võimalikult väike poorsus. Proovide poorsused jäid 27% ja 32% vahele, millest hiljem arvutati ka maatriksi soojusjuhtivus, mille väärtused jäid vahemikku 1,74 – 2,28 W/mK. Keskmiselt kulus iga proovi tegemiseks vähemalt 40 minutit, mille jooksul võis näha mõõdetud soojusjuhtivuste pidevat kasvutrendi (Joonis 1). Pulberproove mõõdeti pinnaanduriga, mille puhul kindlustati korraliku kontakti loomine kilose lisaraskuse lisamisega. See aga häiris pulberproovide korrektse ruumala määranguid.

Lisaraskuse tõttu toimus proovi kompakteerumine, eriti anduri keskosa all, mille tasapind ei olnud päris sile, vaid natuke kumer. Kompaktsiooni tagajärjel vähenes pulbrites pooriruum ning vesi valgus proovist välja, mistõttu ei saanud täpselt ja usaldusväärselt määrata proovi kõrgusi ning seeläbi ka ruumala. Samal ajal tihenes ilmselt anduri mõõteosa all proov rohkem kui mujal, ning soojusjuhtivus ei esinda kogu proovi keskmist. Kuna ei õnnestunud saada stabiilseid proovide näite, siis loeti pulberproovide tulemused ebausaldusväärseks.



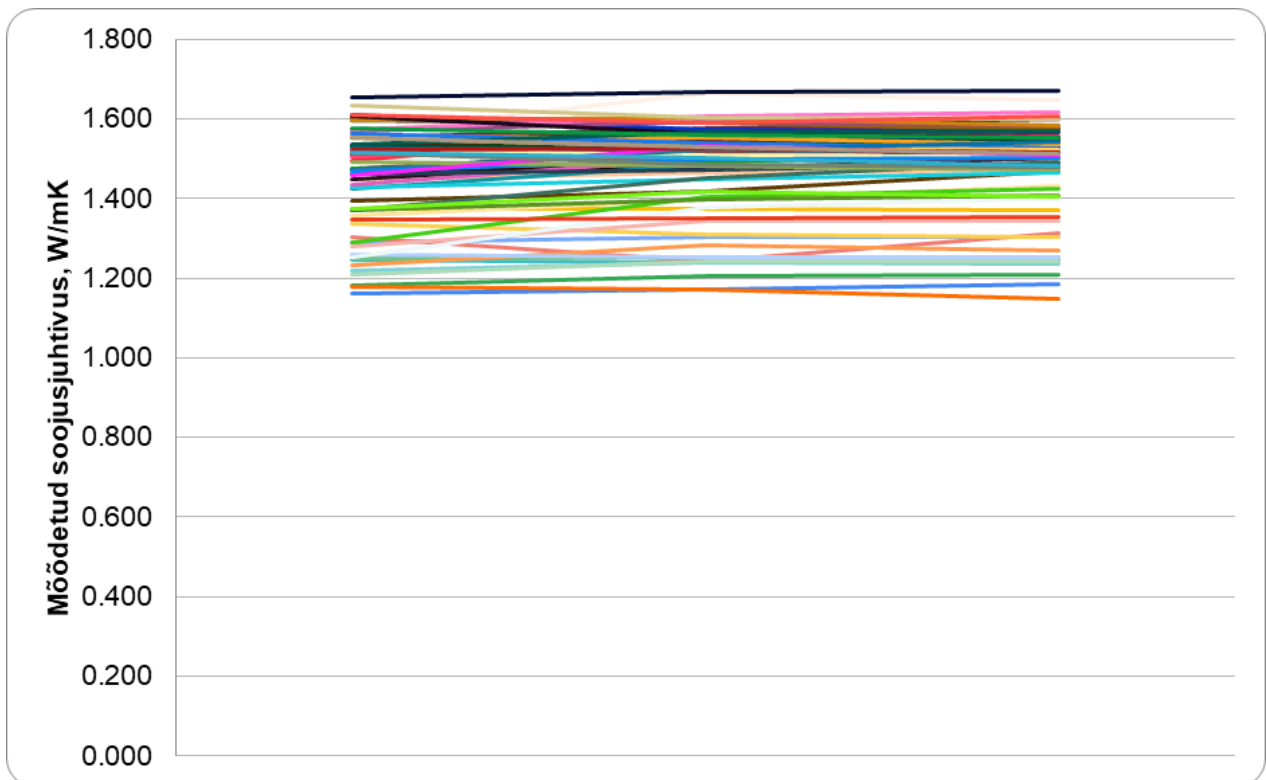
*Joonis 1. Pulberproovide mõõdetud soojusjuhtivuse varieeruvus. Iga joon esindab sama proovi kordusmõõtmiste seeriat.*

Jämedamate puurmete puhul pinnaanduriga mõõtmisel ruumalalisi ebatäpsusi, sarnasel kujul pulbritega, ei esinenud, kuid mõõdetud soojusjuhtivuse näituses oli sees siiski kerge kasvutrend (Joonis y), kuid selle saab omistada anduri pinna mitte piisavale kontaktile – puurmete nurgelised terad ei moodusta ühest siledat pinda, mistõttu ei saa sellisel meetodil ka usaldusväärseid tulemusi.



*Joonis 2. PS anduriga mõõdetud jämedateralised proovid järgivad kasvutrendi sarnaselt pulbritele*

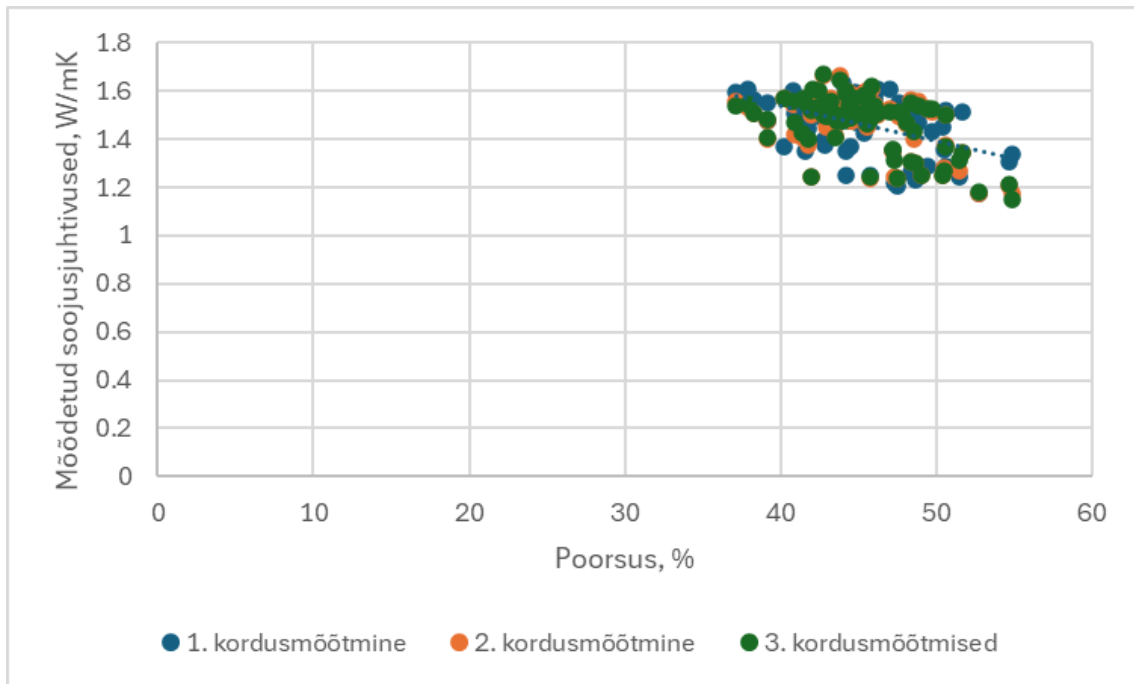
Jämedama materjaliga sooritati mõõtmised ka TLS nõelanduriga. Kokku mõõdeti 73 proovi ning sooritati 219 kordusmõõtmist. Standardhälve oli sellisel mõõtmismeetodil väga madal, mis tähendab, et mõõtmistulemustes ei esinenud suuri varieeruvusi (Joonis 3). Mõõdetud soojusjuhtivused jäid vahemikku 1,17 – 1,6 W/mK ning poorsus püsis  $50 \pm 5$  % juures. Selle meetodi puhul lisaraskust vaja ei läinud, kuid tuli tagada, et anduri nõel oleks tervenisti materjalis. Arvutati ka maatriksite soojusjuhtivused, mis jäid 2,07 ja 3,88 W/mK vahele.



*Joonis 3. Stabiilsed soojusjuhtivused viitavad väikesele standardhälvele*

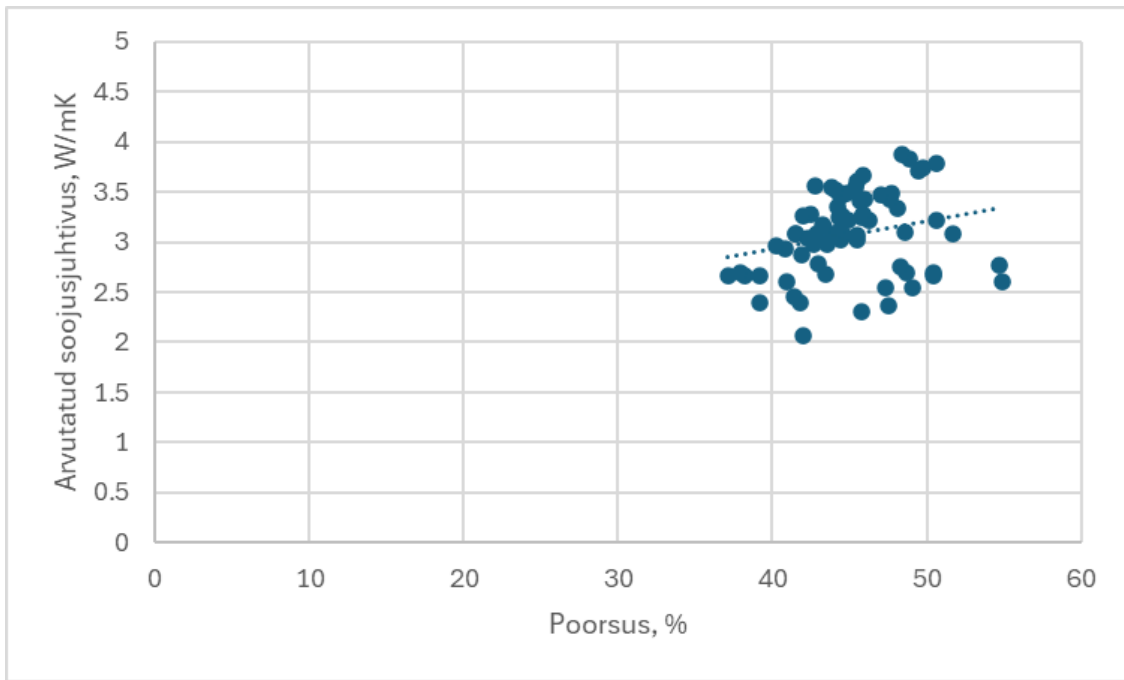
Kuigi pinnaanduriga ja nõelanduriga mõõdetud soojusjuhtivuste väärtused olid sarnased esines materjalidel poorsuse erinevus, mis mõjutas ka arvatatud (mittepoorse) kivimi soojusjuhtivusi. Null-poorsusele viies jäid pulbrite soojusjuhtivuse väärtused liiga madalaks, mis veelkord kinnitas andmete ebatäpsust.

Tulemused korreleeriti vastavalt Spermani moodusele. Mõõdetud tulemused näitasid poorsuse suhtes nõrka negatiivset seost ( $r_s = -0,351$ ), mis tähendab, et poorsuse suurenemisega soojusjuhtivus kahaneb, kuid mitte märkimisväärselt (Joonis 4).



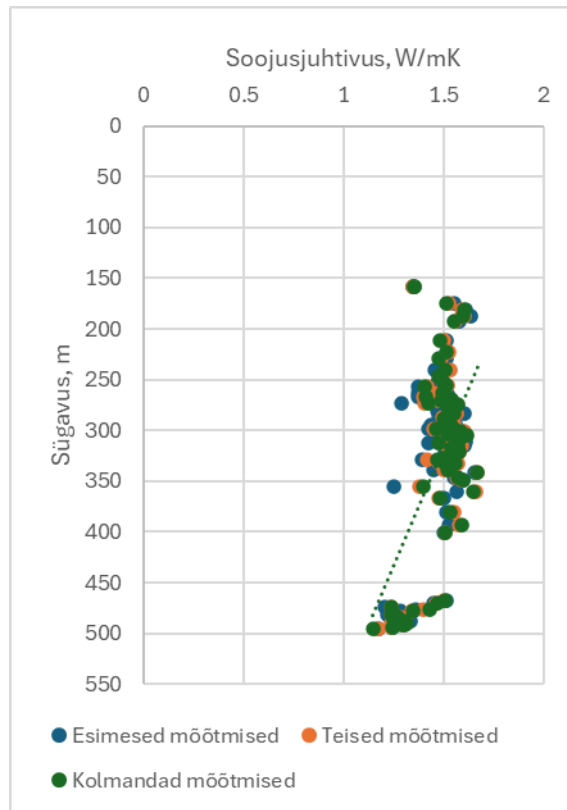
*Joonis 4. Mõõdetud soojusjuhtivused on jagatud korduste kaupa. Näha on nõrka negatiivset trendi poorsuse suurenemise suunas.*

Arvutatud soojusjuhtivused olid aga nõrgalt positiivses seoses ( $r_s = 0,219$ ) (Joonis 5), mis justkui viitaks poorsuse suurenedes ka kasvavale soojusjuhtivusele, kuid seos on nõrk, mistõttu pole mõju väga selge.



*Joonis 5. Arvutatud soojusjuhtivused on nõrgas positiivses seoses poorsusega*

Sügavuse suunas toimub nii mõõdetud (Joonis 5) kui ka arvutatud (Joonis 6) soojusjuhtivuste vähenemine. Sügavused ulatuvad ainult kuni 505 meetrini, siis rõhk ja temperatuur väärtusi oluliselt ei mõjuta – nii lühikese maa peale ei tõuse rõhk piisavalt kõrgele, et soojusjuhtivust muuta. Mõõdetud tulemuste ja sügavuse seos on tugevalt negatiivne ( $r_s = -0,625$ ), mis tähendab, et mõõdetud proovide soojusjuhtivused vähenevad märkimisväärselt sügavuse kasvuga.

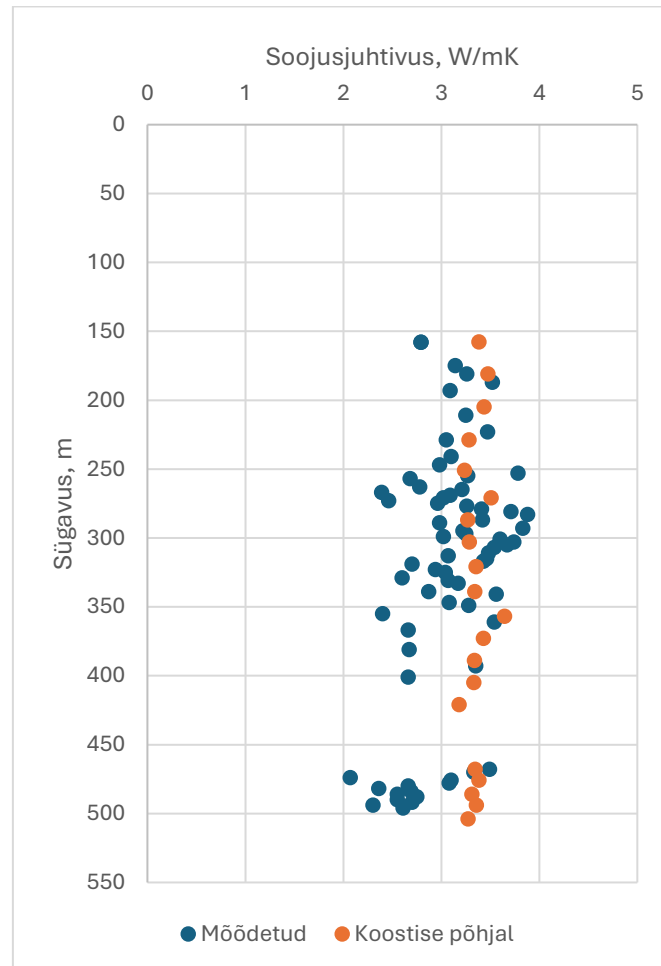


Joonis 6. Mõõdetud soojusjuhtivused kahanevad sügavuse suunas.

Arvutatud mittepoorse kivimi soojusjuhtivuste (Joonis 6) puhul nii tugevat seost ei esinenud ( $r_s = -0,147$ ) ning sügavus suurt mõju soojusjuhtivustele ei avaldanud. Võimalikeks mõjufaktoriteks võib olla pigem mineraalse koostise muutus või puurimisprotsessis puurlahuse muutmine.

Puurlahuseid kasutatakse puuraugu stabiliseerimiseks, jahutamiseks ning eelkõige puurimisjäätmete eemaldamiseks, et vähendada hõõrdumist. Kõige tavalisemalt kasutatakse vesilahuseid. Graafikutel on näha andmepunkte, mis on selgelt sügavamas osas teistest kõvasti madalamate väärtustega. See võib olla tingitud puurlahuse vahetamisega savilahuste peale. Savidel ning savimineraalidel on teistest kivimitest tunduvalt madalamad soojusjuhtivused. On võimalik, et savilahused sisaldasid bentoniidi geeli, mis ka puurmete teradele jäid ning hiljem mõõtmistulemusi mõjutasid. Samuti on võimalik, et proovid jäid korralikult läbipesemata, sest sügavama osa proovikottides oli teiste proovidega võrreldes märgatavalt rohkem tolmu, mis võis samuti panustada soojusjuhtivuse langemisele.

XRD-analüüsi mõõtmistulemused (K.Kirsimäe avaldamata andmed) näitasid küll, sügavuse suunas nii kvartsi kui ka päevakivi sisalduste kerget vähenemist ning vilgu kontsentratsioonide suurenemist, kuid muutus ei ole piisavalt suur, et soojusjuhtivusi vähendada. Mineraloogilise koostise põhjal kontrolliti kaudse soojusjuhtivuse määramismeetodiga, kui usaldusväärsed andmed mõõtmistelt tulid (Joonis 7).



*Joonis 7. Mineraalse koostise põhjal arvatud soojusjuhtivused on stabiilsed ning mõõdetud proovid hajuvad.*

Mineraloogilise koostise põhjal arvatud soojusjuhtivused on sarnaselt mõõtmistulemustele kerges langustrendis sügavuse poole, kuid näha on, et mineraalse koostise põhjal arvatud soojusjuhtivused on stabiilselt kõik  $> 3$  W/mK, olles kõrgeim kõige kvartsirikkamas proovis. Arvatud väärtused on suure hajuvusega, mis võib olla põhjustatud mõõtmisest tulenevalt proovide suurest poorsusest. Siiski on enamus väärtuseid samuti  $> 3$  W/mK, mis annab võimaluse arvata, et laborikatsed suuremas osas õnnestusid.

Mõlemad nii arvutatud kui ka koostise põhjal leitud tulemused piisavalt sarnased rabakivi päris soojusjuhtivusele, et neid võib lugeda usaldusväärseteks tulemusteks, kuid parem oleks kasutada keemilise koostise põhjal arvutatud väärtusi, mille hajuvus peaaegu et puudub, võrreldes mõõdetud väärtustega, kus tekivad kergelt mõõtmise enese käigus sisse vead, mis põhjustavad suuremat hajuvust.

Tulevikus peab proovima ka pulbrite soojusjuhtivusi mõõta nõel-anduriga, et kätte saada potentsiaalselt paremaid soojusjuhtivusi. Lisaks saab puurmete ja pulbrite juurde uurida proovide vee elektrijuhtivust – annab mõista, kas kivimites olev vesi on soolane või tuleb soolsus kivimist endast.

## 5. Järeldused

Magistritöös analüüsiti Tiskre kristalse aluskorra kivimite soojusjuhtivust, keskendudes kivimite mineraalsele koostisele, poorsusele ja termilistele omadustele.

Kvartsisisaldus on üks peamisi soojusjuhtivust määravaid tegureid. Q-rikkad proovid näitasid kõrgemaid soojusjuhtivusi tänu kvartsi kõrgele soojusjuhtivusele (6 W/mK). Kuigi, et päevakivid on ühed peamised kivim moodustajad ei ole nende soojusjuhtivused kuigi kõrged, jäädes 2 – 2,6 W/mK vahele ning juhtivuse varieeruvus sõltus päevakividel enim just keemilisest koostisest. Ka vilgud omasid pigem madalaid soojusjuhtivuse näitajaid, kuid soojuse levimist kontrollis kihtsilikaatidel anisotroopia, mis määras ära paralleelselt ning risti kihti liikuvate soojusenergia kiirused. Klaasjate materjalide puhul peab arvestama suure hajuvusega sest materjalide amorfne struktuur põhjustab soojusenergia hajumist, mistõttu on nende soojusjuhtivused väga madalad.

Poorsus osutus soojusjuhtivuse määramisel kõige tähtsamaks parameetriks – poorsuse arvatud väärtused mõjutasid ka arvatud maatriksi soojusjuhtivuse väärtusi mõjutades eriti just maatriksi soojusjuhtivusi. Mõõdetud proovide puhul oli poorsusefektil suurem osakaal, muutes soojusjuhtivuste väärtusi väiksemaks, samal ajal ise kasvades. Arvatud väärtuste puhul oli poorsuse mõju aga nõrk ning olulist mõju see soojusjuhtivusele ei avaldanud. Oluline on aga märkida, et sarnaste soojusjuhtivuste juures omasid pulberproovid pea poole väiksemat poorsust, mis eeldaks justkui maatriksi soojusjuhtivusele (null-poorsus) lähemal olevatele väärtustele, kuid vee kao ja ruumala muutuse tõttu tulid soojusjuhtivused liiga väikesed, jäädes kõik alla 2,3 W/mK, mis ei ühti kirjandusest leitava rabakivi väärtustega ( $\lambda = 3,5$  W/mK)

Uuringu käigus osutus TLS meetod sobivamaks, kuna see tagas stabiilsemad mõõtmistulemused võrreldes TPS meetodiga. Nõelanduriga tehtud mõõtmistel ei esinenud takistusi sensori paigutamisel, samas kui pinnaanduri puhul oli vajalik tagada hea kontakt proovi pinnaga, korrektne anduripaigutus ning täiendav mehhaaniline surve kilose raskuse abil. Samuti oli oluline, et mõõtmispind oleks võimalikult sile, et vähendada mõõtmisvigu ja vältida õrna anduri kahjustamist. Nõelanduri puhul peab aga kriitiliselt hindama, kas tulemused võivad veel paraneda, kui tagada veel tihedam keskkond ehk luua parem kontakt nõela ja puurmeterade vahel.

Uusi testimisi võiks teha ka peenestatud materjali ja nõelanduriga, et saada stabiilsemaid tulemusi ka üsna homogeensest keskkonnast, kuid katsetada võiks protsessi hoopis epoksüvaiguga – sellega saavutaks stabiilsema ja muutumatu ruumalaga proovi.

Katsetada võiks ka meetodit, kus kivimaterjal pannakse klaasist maatriksisse, sulatatakse ning proovitakse siis soojusjuhtivust mõõta pinnaanduri abil otse tilga pinnalt.

Kuna geotermilisi mõõtmisi on veel vähe tehtud ning tegemist on pilootjaama projektiga, siis on seda kindlasti vaja edasi uurida.

## 6. Kokkuvõte

Käesolev magistritöö uurib Tiskre soojuspuuraugu kivimite soojusjuhtivust, et hinnata analüüsi meetodite sobivust ning hinnata proovide geotermaalset potentsiaali. Analüüs keskendub kivimite mineraalsele koostisele, poorsusele ja temperatuurist sõltuvatele termilistele omadustele.

Uuringutulemused näitavad, et kvartsisisaldus mõjutab oluliselt kivimite soojusjuhtivust, kusjuures kvartsirikkad kivimid juhivad soojust paremini kui vilgukivi ja päevakivid. Poorsuse mõju on tugev, sest suurema poorsusega kivimid juhivad soojust kehvemini õhuga täidetud tühimike tõttu

Lisaks võrreldi aeg-sõltuvaid mõõtmismeetodeid, kus TLS või nõelandur osutus stabiilsemaks ja täpsemaks. Peeneteralistes kivimites ilmnis suurem soojusjuhtivuse varieeruvus, mis oli seotud proovi ruumala muutusega.

Proovid esinesid kahel kujul – puurmetena ning peenestatud materjalina. Kokku mõõdeti 105 proovi ning kordusmõõtmisi sooritati enam kui 550 korda. Kasutati aeg-sõltuvaid meetodeid proovide soojusjuhtivuste määramiseks ning kahte erinevat andurit: nõelandur (*transient line source*) ja pinnaandur (*transient plane source*). Soojusjuhtivus sõltus proovi poorsusest ja mineraalsest koostisest ning tulemused olid seda usaldusväärsemad, mida kindlamalt oli määratud ruumala. Lisaks määrati soojusjuhtivus ka kasutades kaudsetest meetoditest mineraalse koostise põhjal soojusjuhtivuse arvutamist.

Tulemuste suureks mõjutajaks oli poorsus, mis leiti empiiriliste valemitega, kasutades poorsusfunktsioone. Kõrgema poorsusega ( $50\pm 5\%$ ) proovide soojusjuhtivused läksid kokku mineraalse koostise arvutuslike väärtustega, kuid peenestatud materjali tulemus oli ebausaldusväärne ning proovides esines suur varieeruvus. Seetõttu jäeti pulbrite soojusjuhtivuse väärtused kõrvale.

Q-rikkamatel kivimitel registreeriti kõrgemad soojusjuhtivuse näitajad kui teistel proovidel. Vilgu ja päevakivide rikkamad proovid näitavad väiksemaid soojusjuhtivuse väärtuseid. Mõõtmistulemuste põhjal võib öelda, et arvatud soojusjuhtivuste juures sobiksid Tiskre piirkonna aluskorra kivimid madalatemperatuuriliseks energiakasutuseks.

## **Thermal Conductivity of Crystalline rock in Tiskre Borehole Heat Exchanger**

**Grete Raie**

### ***Summary***

This study investigates the thermal conductivity of crystalline rocks in the Tiskre geothermal borehole to assess their geothermal potential. The research evaluates rock samples from various depths, focusing on their mineralogical composition, porosity and thermal behaviour.

In the methodology section, measurements were performed using transient methods, comparing TLS and TPS techniques. Results indicate that quartz-rich formations exhibit higher thermal conductivity, while feldspar- and mica-rich samples show lower efficiency. Additionally, porosity was identified as a key factor influencing heat transfer, with increased porosity leading to reduced conductivity due to air-filled voids.

The discussion elaborates on how the obtained thermal properties impact the feasibility of geothermal applications in Estonia. Findings suggest that the geological composition of the borehole formations is suitable for low-temperature geothermal heating systems. The study concludes by emphasizing the relevance of these results for district heating development and potential future research directions

### **Tänuavaldused**

**Olgu tänatud Argo Jõelet hoole, hoidmise ja juhendamise eest. Suured tänud Lennartile, kes pakkis Arbaveres miljonit kotti, Georg Rahule tänud, et väsimatult all keldris puurmeid analüüsiks peenestas ning tänud ka Ärpsile ja Carmelile XRD analüüside jagamise eest.**

## Kasutatud kirjandus:

- Coquil, T., Fang, J., & Pilon, L. (2011). Molecular dynamics study of the thermal conductivity of amorphous nanoporous silica. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(21–22), 4540–4548
- Hofmeister, A. M. (2012). Thermal diffusivity and thermal conductivity of feldspar group minerals. *American Mineralogist* 97(11–12), 1931–1940
- M.Osako, C.Wang, A.Yoneda et al., 2013. Thermal diffusivity and thermal conductivity of pyroxenes under pressure and the thermal state of subducting slabs
- M.McCombie et al., 2017. Thermal Conductivity of Pyroclastic Soil (Pozzolana) from the Environs of Rome
- Clauser, C., & Huenges, E. (1995). Thermal conductivity of rocks and minerals. In T. J. Ahrens (Ed.), *Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants* (pp. 105–126). American Geophysical Union
- Youyue Zhang et al., 2019. Effect of iron content on thermal conductivity of olivine with implications for cooling history of rocky planets
- J.P. Holman, 2010. Heat Transfer (10. väljaanne)
- F.P Incropera, & D.P DeWitt, 2002. Fundamentals of Heat and mass Transfer (5th ed.). Wiley
- C.Wang, A. Yoneda, M. Osako et al., 2014. Measurement of thermal conductivity of omphacite, jadeite, and diopside up to 14 GPa and 1000 K: Implication for the role of eclogite in subduction slab
- Clark, S.P., 1957. *Am Mineralogist*
- Merriman, J. et al., 2018. Temperature-dependent thermal transport properties of carbonate minerals and rocks
- Miao, S. et al., 2014. Temperature dependence of thermal diffusivity, specific heat capacity, and thermal conductivity for several types of rocks
- Song, J. et al., 2023. Influencing factors of rock thermal conductivity and applicability evaluation of its mixing law predictive models
- Clauser, C. (1988). Opacity – the concept of radiative thermal conductivity. In: Hänel, R., Rybach, L., & Stegena, L. (toim.), *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, lk 143–165.

- Birch, F., and H. Clark, The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition, Part 1, *Am. J. Sci.*, 238(8), 529- 558, 1940.
- Ots, A. (2011). Soojusjuhtivus isolatsioonimaterjalides. Tartu Ülikool
- Ratcliffe, E.H. (1959). Thermal conductivity of fused and crystalline quartz. *British Journal of Applied Physics*, 10(1), 22–25
- Horai, K., Susaki, J., Jun 1, 1989. The effect of pressure on the thermal conductivity of silicate rocks up to 12 kbar
- Abdulagatov, I.M., Emirov, S.N., Abdulagatova, Z.Z., Askerov, S.Y. (2006). Effect of pressure and temperature on the thermal conductivity of rocks. *International Journal of Thermophysics*, 27(4), 1213–1234
- Lin, W., Tadai, O., Hirose, T., Tanikawa, W., Takahashi, M., Mukoyoshi, H., & Kinoshita, M. (2011). *Thermal conductivities under high pressure in core samples from IODP NanTroSEIZE drilling site C0001*. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 185(3–4), 111–120
- Eesti Geoloogiateenistus. (n.d.). *Eesti Geoloogiateenistuse koduleht*. <https://www.egt.ee>
- Thermtest, (n.d.). *Thermiteesti koduleht*. <https://thermtest.com/>
- Sakiyama, T., & Yano, T. (1994). Finite element analysis on the effective thermal conductivity of dispersed systems. *International Journal of Thermophysics*, 15(1), 27–37
- Seipold, U., & Huenges, E. (1998). Thermal properties of gneisses and amphibolites—High pressure and high temperature investigations of KTB-rock samples. *Tectonophysics*, 291(1–4), 173–178
- Beardsmore, G. R., & Cull, J. P. (2001). *Crustal heat flow: A guide to measurement and modelling*. Cambridge University Press
- Horai, K. (1971). Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Journal of Geophysical Research*, 76(5), 1278–1308.
- Clauser, C. (2006). Geothermal energy. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of physical science and technology* (3rd ed.). Academic Press.
- Schön, J. H. (2015). *Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics* (2nd ed.).
- Suft, O., Hagenauer, H., & Bertermann, D. (2025). Relationship between thermal conductivity, mineral composition and major element composition in rocks from Central and South Germany. *Geothermal Energy*, 13(1).

Clauser, C. (2011). Thermal storage and transport properties of rocks, II: Thermal conductivity and diffusivity. In Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-90-481-8702-7\\_67](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8702-7_67)

Sederberg, N. (1965). Thermal conductivity of gases and liquids.

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, **Grete Raie**

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose  
**Tiskre soojuspuuraugu aluskorra kivimite soojusjuhtivus**  
mille juhendaja on Argo Jõelett  
reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace  
kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu  
Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commonsi  
litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada  
ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni  
autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. 4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega  
isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

**Grete Raie**

**27.05.2025**