

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Karmen Vits

Soojuskaamera abil põhjavee väljavoolude uurimine Pudisoo näitel

Magistritöö geoloogias (30 EAP)

Juhendaja: PhD Marko Kohv

Tartu 2023

Soojuskaamera abil põhjavee väljavoolude uurimine Pudisoo näitel

Põhjavee väljavoolud jõgedes on muutumas eluliseks ökosüsteemide kui ka kohalike elanike jaoks kliima soojenemise taustal. Külmad põhjavee väljavoolud pakuvad jahedaveelistele liikidele, näiteks lõhilastele, varjupaika kuumadel suvedel ning aitavad veeorganismidel ellu jääda.

Käesoleva töö eesmärk on kaardistada põhjavee väljavoolu Pudisoo jões, kasutades selleks termokaamerat mehitamata õhusõidukil, kuid mõõta ka jões paiknevate allikate elektrijuhtivust. Põhja- ja pinnavee temperatuuride erinevused on suurimad talvel ja varakevadel ning just siis viidi läbi ka drooniga lendamised ja andmete kogumine.

Märksõnad: *Termaalne infrapuna pilt, põhjavesi, droon, allikad, UAV*

P470 Hüdrogeoloogia, geoplaneering ja ehitusgeoloogia

Using thermal camera to locate groundwater discharge areas in the Pudisoo river, Estonia

Due to climate change groundwater discharges are now becoming more vital for the river ecosystems and local people. Cold groundwater discharges offer thermal refugia during periods of high ambient temperature, such as hot summer days.

This study aims to map groundwater discharges in the Pudisoo river using a thermal camera on an unmanned aerial vehicle (UAV) and to measure springs electrical conductivity. The highest temperature differences between surface and groundwater temperatures are in the winter and early in spring when the survey was conducted and data was collected.

Keywords: *Thermal infrared imagery, groundwater, drone, springs, UAV*

P470 Hydrogeology, geographical and geological engineering

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Teoreetiline taust	5
1.1 Termokaamera olemus	5
1.2 Termokaamera tehnilised omadused	9
1.3 Termokaamerate kasutamine	12
1.4 Põhjavee väljavoolu uurimine termokaameratega.....	14
2. Materjal ja metoodika.....	19
2.1 Uuringuala	19
2.2 Kasutatud aparatuur	21
2.3 Välitööd	26
2.4 Andmete analüüs.....	29
3. Tulemused	31
3.1 Termopildid.....	31
3.2 Põhjavee väljavoolude tüübid.....	36
3.3 Elektrijuhtivus	40
4. Arutelu.....	44
Kokkuvõte	46
Summary	48
Kasutatud materjalid	50

Sissejuhatus

Põhjavee väljavool mängib olulist rolli veeringes, olles oluline veeallikas ökosüsteemide kui ka kohalike inimeste jaoks. Käesoleva töö eesmärgiks on kaardistada allikate paiknemised jões kasutades selleks pinna-ja põhjavee temperatuuride erinevusi ning mõõta jões paiknevate allikate elektrijuhtivusi.

Tänapäevased termokaamerad on väga hea tundlikkusega, mis võimaldab märgata ka väikeseid temperatuurierinevusi üsna kaugelt. Mujal maailmas on varasemalt sama meetodit edukalt kasutatud loomade loendamisel, geoloogilisel ja arheoloogilisel kaardistamisel ning ka põllumajanduses taimede veepuuduse hindamisel. Paarikümne kilomeetri pikkuse ja raskesti läbitava jõeoru kaardistamiseks kulub drooniga vaid mõni tund. Lehevabal ajal õhust tehtud termoseire võimaldab leida suuremaid allikaid ka üsna tiheda metsa alt. Läbi aasta mitmel korral tehtud termoseire aitab allikate püsivuse hindamisel, sest suveks kuivab neist üsna suur osa. Droonilt tehtud vaatlusi täiendatakse järgnevalt maapealsete vaatluste ja mõõtmistega, mis aitavad tulemusi grupeerida ja tõlgendada.

Põhjavee väljavoolualade termokaardistamine annab kiirelt ja odavalt vajalikku teavet hüdroloogias muidu väga raskesti kaardistatava nähtuse osas ja aitab suunata välitöid.

Enne termokaardistamist püstitati kolm hüpoteesi. Esiteks oletatakse, et põhja-ja pinnavee temperatuuride erinevus võimaldab kaardistada põhjavee väljavoolu alasid jões ja jõeorus, mitmekordsete vaatlustega on võimalik eristada ajutisi ja püsivaid allikaid, kombineerituna maapealsete vaatlustega ja elektrijuhtivuse mõõtmisega saab eraldada lange- ja tõusuallikaid.

1. Teoreetiline taust

1.1 Termokaamera olemus

Termokaamera töötab elektromagnetilise spektri soojuskiirguse osas, muutes keskkonnast saabunud selles spektriosas leviva kiirguse inimesele nähtavaks ja tõlgendatavaks pildiks või videoks (Corrigan, 2020). Erinevalt tavalisest fotokaamerast pildistatakse inimese silmale mitte nähtavat soojuskiirgust, mille lainepikkus jääb vahemikku 4-18 μm (Kelly *et al.*, 2019). Tavaline fotokaamera kasutab peegeldunud nähtavat valgust. Seevastu termokaamera ei vaja töötamiseks välist valgusallikat, sest kasutatakse iga absoluutsest nullist soojema keha poolt kiiratavat soojuskiirgust (Corrigan, 2020).

Termokaameraga mõõdetakse saabuva kiirguse intensiivsust - objekti soojenedes kasvab ka soojuskiirguse intensiivsus (*Ibid*). Lisaks objekti temperatuurile mõjutavad aga temast lähtuva soojuskiirguse intensiivsust ka objekti enda omadused ning lisaks veel objekti ja kaamera vahelised keskkonnaparameetrid.

Üheks oluliseks objekti omaduseks on **emissiivsus** (*emissivity*), mis näitab materjali termalse kiirgusvõime efektiivsust (Tarin, 2021). Emissiivsus on suhteline näitaja, kus konkreetset materjali võrreldakse täiusliku musta kehaga (Corrigan, 2020). Emissiivsuse väärtused jäävad vahemikku 0 kuni 1 (reaalsuses 0,01-0,99) (Tarin, 2021). Materjali termalse kiirgusvõime efektiivsus sõltub enamasti materjali omadustest, kuid ka morfoloogiast, karedusest, temperatuurist jne (Corrigan, 2020).

Stefan-Boltzmanni seadus kirjeldab objektide temperatuure ning seda, kui palju objektid kiirgavad kiirgust valguse kujul. See seadus ütleb, et objekti soojusenergia hulk on seotud selle temperatuuri 4-neljanda astmega:

$$P_t = \epsilon \sigma T^4,$$

Kus P_t = mittemusta keha kiirguse koguvõimsus (W/m^2), ϵ = materjali pinna emissiivsus, σ = Stefan-Boltzmanni konstant ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$) ja T = absoluutne temperatuur Kelvinites. See seadus aitab termokaameratel arvutada mittemustade kehade kiirgust, kasutades selleks materjali emissiivsust. (Havens & Sharp, 2016)

Näiteks on kõrge emissiivsus inimese nahal ($\varepsilon = 0.98$), plastikul ($\varepsilon = 0.93$) ja veel ($\varepsilon = 0.95$) (Tarin, 2021), mistõttu on nende temperatuuri mõõtmine termokaameraga lihtsam. Poleeritud ja läikivad objektid, nagu näiteks poleeritud alumiinium ($\varepsilon = 0.1$) on madala emissiivsusega ja seetõttu paistavad termokaamerale oluliselt „külmemana“ võrreldes tegeliku temperatuuriga (Havens & Sharp, 2016). Seega tuleb absoluutsete temperatuuriväärtuste saamiseks seadistada termokaameras õige emissiivsusefaktor, seda saab samuti teha hilisemas järeltöötamise käigus (Corrigan, 2020). Mõneti tähendab see ka seda, et erinevatest materjalide koosneva stseeni termopildistamisel tuleks erinevatele pildi osadele omistada erinev emissiivsusefaktor (Havens & Sharp, 2016).

Kiirguse peegeldumist pinnalt kirjeldab objekti **peegeldusvõime** (*reflectivity*). Vaadeldes materjali pinda lähedalt termokaameraga, siis mõõdetakse nii materjali soojuskiirgust, kui ka pinnalt peegeldunud keskkonnatemperatuuri (Joonis 1) (Tarin, 2021). Peegeldusvõime sõltub materjali pinna karedusest ja morfoloogiast (Corrigan, 2020). Näiteks võib segada siledalt pinnalt temperatuuride mõõtmist objektilt peegelduv ere päikesevalgus. Kõrvalise soojusallika peegeldus suurendab termopildil müra ja muudab temperatuuriväärtusi tegelikkusest. (Tarin, 2021)

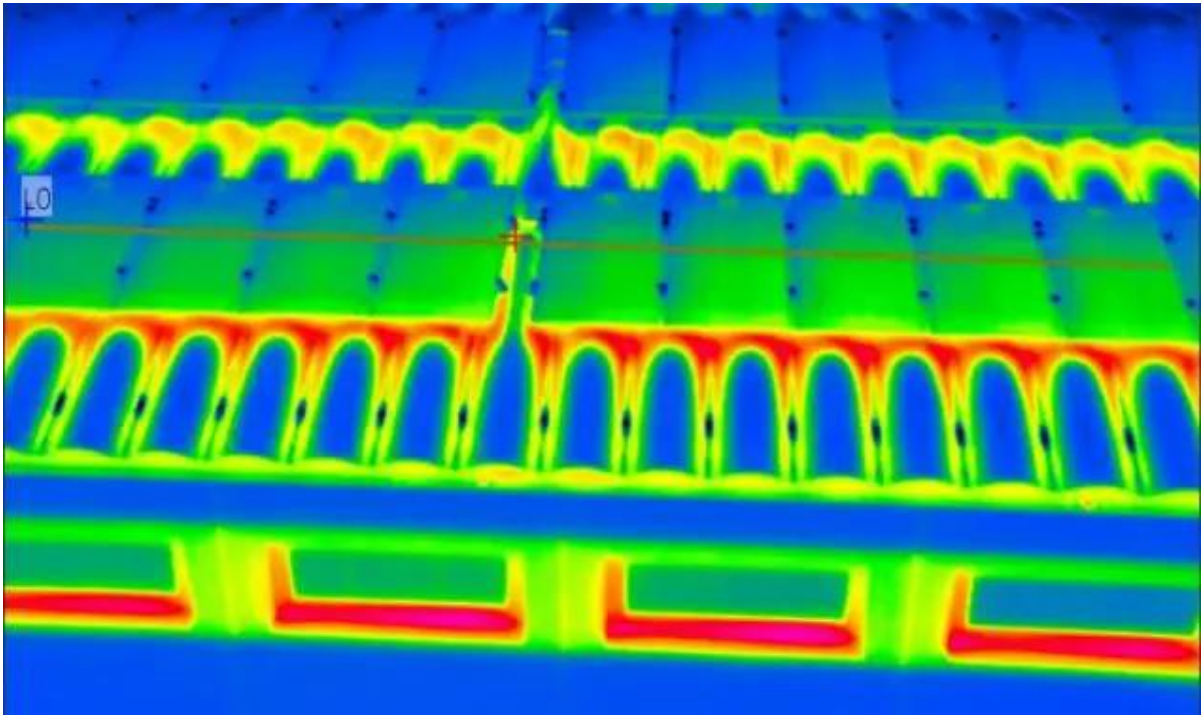


Joonis 1. Mõõtes termokaameraga objekti on see mõjutatud lähedal asuvatest soojusallikatest ning seetõttu ei ole alati mõõdetav temperatuur usaldusväärne (Teledyne FLIR, 2021).

Eemalt tehtavate mõõtmiste tulemusi mõjutavad lisaks objekti omadustele ka keskkonnatingimused (Havens & Sharp, 2016). Üheks oluliseks keskkonnaparametriks on **õhuniiskus**. Mõõtes termokaameraga niiskes keskkonnas, käitub niiske õhk infrapunakiirguse blokeerijana (Teledyne FLIR, 2020). See tähendab, et soojuskiirgus objekti ja termoanduri vahel osaliselt neeldub ning saadav temperatuur on väiksem tegelikkusest. Samuti võib infrapunakiirgus kaduma minna, kui mõõtmine toimub objektist liiga kaugel (Havens & Sharp, 2016). Väliitingimustes tähendab see seda, et parim aeg Eestis põhjavee termoseireks on **püsivate miinuskraadidega**, sest siis näeb termokaamera kaugemale ja üldiselt **madal niiskustase** õhus mõjutab vähem infrapunakiirguse levikut (Teledyne FLIR, 2020).

Termokaamera sensor koosneb paljudest üksikutest sensorelementidest, mis mõõdavad soojuskiirgust konkreetsest ruumi osast (Döpfer *et al.*, 2020). Üksikute pikslite andmete kombineerimisel saame kaamera vaateväljast saabuva soojuskiirguse intensiivsuse “kaardi” (Corrigan, 2020). Mõõtmistulemuste esitamiseks kasutatakse enamasti mõnda nn “pseudovärvi” skaalat: näiteks maksimaalsete temperatuuriväärtuste väljendamiseks pildil punast, keskmiste väärtuste väljendamiseks kollast ning minimaalsete intensiivsuse

tähistamiseks sinist piirkonda (Joonis 2) (Heliguy, 2022). Sel juhul tulevad ka väiksemad temperatuuride erinevused inimsilma jaoks paremini esile.



Joonis 2. Erinevad värvused pildil tähistavad erinevaid temperatuure ehk mida punasem, seda soojem ning mida sinisem, seda külmem on piirkond pildil (Corrigan, 2020).

1.2 Termokaamera tehnilised omadused

Termokaamerate peamised tehnilised parameetrid on: soojustundlikkus (*NETD*) ehk suhteline täpsus, absoluutne täpsus ehk õigsus ja pikslite arv sensoril. Termopildi kvaliteedi määravad: resolutsioon, soojustundlikkus, täpsus, optika omadused ning näitude püsivus.

Termopildi ruumilise detailsuse määrab termokaamera anduri **eraldusvõime** ehk **resolutsioon**. See näitab pikslite arvu sensoril. Pikslite arv koos kaamera optika vaatenurgaga määrab ära, kui detailne termopilt on (DJI Enterprise, 2022). Mida vähem on piksleid, seda väiksem on termokaamera resolutsioon. Kõrge eraldusvõime korral (Joonis 3) on termopilt täpsem ja teravam ning aitab eristada erinevaid objekte ühe kaadri sees. Termokaamerad jagunevad eraldusvõime alusel kolmeks (Opgal, 2018):

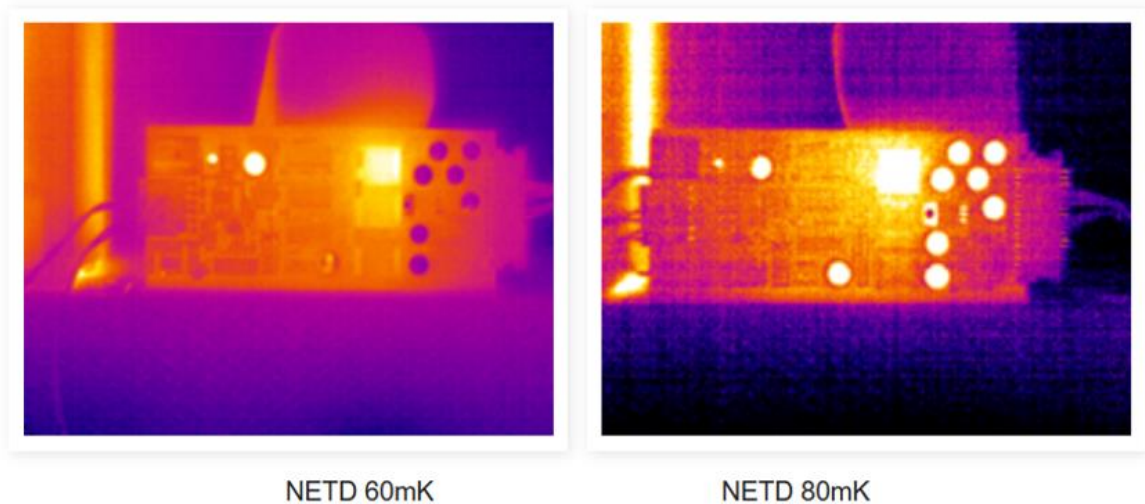
- **Madal resolutsioon** <160 x 120 (kokku 19600 pikslit);
- **Keskmine resolutsioon** 320 x 240 (kokku 76800 pikslit);
- **kõrge resolutsioon** 640 x 480 (kokku 307200 pikslit);



Joonis 3. Mida suurem on pikslite tihedus, seda kõrgem on ka kaamera eraldusvõime sama optika korral, eestindatud (Opgal, 2018) põhjal.

Üheks termokaamera oluliseks tehniliseks omaduseks on detektori **soojustundlikkus** ehk **suhteline täpsus**, mille lühend inglise keeles on *NETD* (*Noise Equivalent Temperature Difference*). See näitab kui väikeseid temperatuuri erinevusi suudab konkreetne termokaamera usaldusväärselt registreerida (Corrigan, 2020). Mida suurem on termokaamera tundlikkus, seda väiksem *NETD* väärtus saadakse ja vastupidi. Suhtelist täpsust väljendatakse tavaliselt millikelvinites (mK). (Havens & Sharp, 2016)

Joonisel 4 on üht ja sama objekti pildistatud kahe erineva termokaameraga. Vasakpoolse kaamera NETD oli 60 mK ning parempoolsel kaameral 80 mK. Näeme, et mida kehvem on detektori suhteline täpsus, seda vähem detaile me pildil eristame ning rohkem on ka müra.



Joonis 4. Vasakul on termokaamera soojustundlikusega 60 mK ja paremal 80 mK (Tarin, i.k.).

Absoluutne täpsus ehk **õigsus** näitab, kui lähedal on termokaameraga saadud temperatuuri väärtused tegelikule absoluutväärtustele (Manullang *et al.*, 2021). Absoluutse temperatuuri arvutamiseks sensori andmetest tehakse laboris konkreetsele kaamerale radiomeetriline kalibreerimine, mis tuvastab seoses teadaoleva objekti temperatuuri ja kaamera üksiku piksli poolt registreeritava signaali vahel (Havens & Sharp, 2016). Radiomeetriliselt kalibreeritud soojuskaamerad on oluliselt kallimad võrreldes kalibreerimata kaameratega (Kelly *et al.*, 2019).

Jahutuseta termokaamerate kasutamisel on ka teatud piirangud, mis tulevad keskkonnatingimuste püsivusest ja termoanduritest (*Ibid*). Kuigi termokaamerad sisaldavad müra minimeerimiseks sisseehitatud mehhanisme, võib mõõtmistel ikkagi tekkida **temperatuuri triivimist** kui ka **vinjetiefekti**. Vinjetiefekti korral on intensiivsus jagunenud pildil ebaühtlaselt ehk pildi servad ja nurgad on jahedamad võrreldes pildi keskosaga (Yuan & Hua, 2022). See on põhjustatud tavaliselt optikast – objektiivi äärest tuleb vähem energiat läbi võrreldes keskosaga. Jahutamata termokaamerad töötavad ümbritseva õhu temperatuuril, mis muudab kaamera tundlikuks temperatuuride muutuste suhtes. See on tavaliselt põhjustatud termoanduri kuumenemisest või kaamera korpuse välisest kiirgussoojenemisest (Dugdale *et al.*, 2019). Temperatuuride triiv põhjustab mõõtmistes madalamat täpsust, sest osa soojuskiirgusest tuleb kaamerast endast (Döpfer *et al.*, 2020).

Seega sõltub termokaamera kasutamine paljuski ka ilmastikutingimustest. Vihma, lume ja udu korral on termokaamera nähtavuse kaugus piiratud, sest mida intensiivsemad on sademed, seda rohkem läheb infrapunasignaali kaotsi (Corrigan, 2020). Lisaks tuleb drooni lendamisel arvestada ka tuulekiirusega, sest tugeva tuule korral võib termoandur kuumeneda/jahtuda ning sel juhul muutuvad mõõdetavad andmed ebatäpseks (Abolt *et al.*, 2018).

Eelnevalt nimetatud tehnilised asjaolud näitavad, et termokaamera poolt tehtud termopildidelt on suhteliselt keerukas absoluutseid temperatuure määrata, eriti kui käsitletakse erinevaid materjale. Selleks, et termopildilt saaks täpseid absoluutseid temperatuuriväärtusi tuleks andmete kogumisel arvesse võtta termokaamera omadusi, mõõdetavat objekti kui ka objekti ja termoanduri vahelist keskkonda. Oluline on ka, et objekti ja kaamera vaheline kaugus oleks mõlemal objektil sama. Samuti võivad keskkonnast tulevad mõjud või optika põhjustatud moonutused mõjutada saadavaid absoluutväärtusi. Samas, suudab termokaamera ühel samal materjalil kindlalt kauguselt tuvastada väga väikseid suhtelisi temperatuuri erinevusi. Suhteline temperatuuriväärtus annab informatsiooni materjali temperatuurimuutuse kohta eri piirkondades. Seetõttu kasutasin käesolevas töös veetemperatuuride võrdlemisel absoluutsete temperatuuride asemel objektide temperatuuride erinevust ehk suhtelisi temperatuuriväärtusi põhjavee väljavoolude tuvastamiseks

1.3 Termokaamerate kasutamine

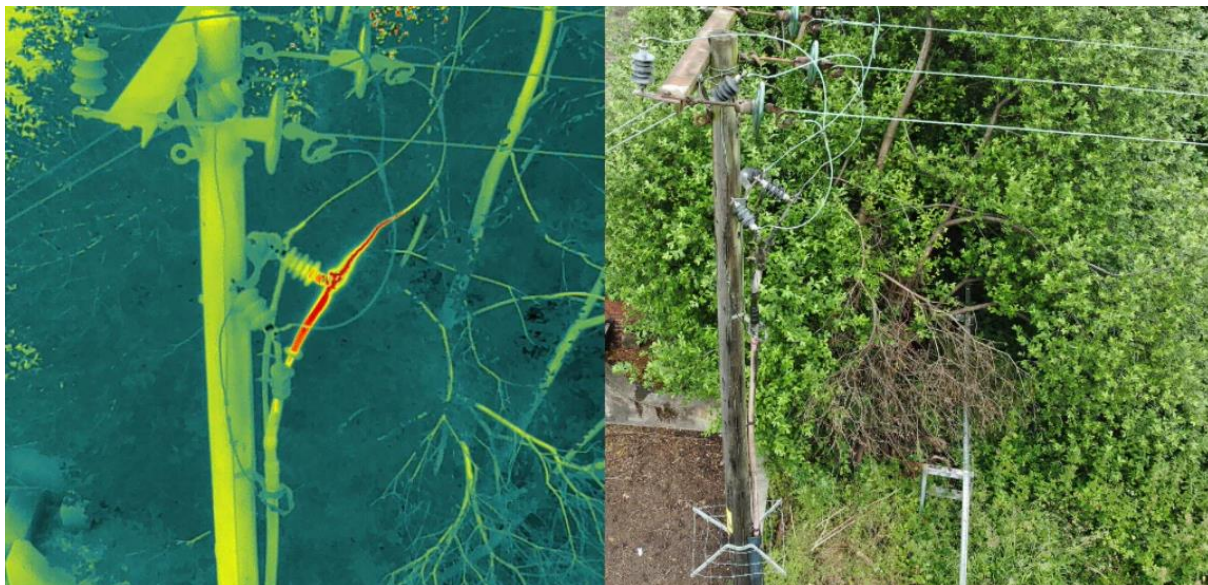
Esialgselt leidsid termokaamerad kasutust sõjanduses öövaatlusvahenditena, ennekõike vaenlase relvastuse ja elavjõu tuvastamiseks. Esimesed termokaamerad, mis olid toodetud sõjaväelaste jaoks, olid rasked, kallid ja mahult suured. (Havens & Sharp, 2016)

Viimastel aastakümnetel on termokaamerate tehnoloogia kiirelt arenenud, muutes kaamerad odavamaks, täpsemaks ja kättesaadavamaks erinevatele rakendustele. (Luximon *et al.*, 2022)

Igapäevaselt kasutatakse täna termokaameraid lisaks sõjandusele veel politseitöös, piirivalvepunktides, metsatulekahjude avastamiseks ja ulatuste hindamiseks (Havens & Sharp, 2016) ning kadunute inimeste otsingus kui ka põllumajanduses karjatamisel (DJI Enterprise, 2022).

Juba aastaid on termokaamera abil uuritud ehitiste soojuskadu ja otsitud veelekked (Gade & Moeslund, 2014). Samuti saab termokaameraid kasutada gaaside (näiteks maagaasi ehk metaani) lekete lokaliseerimiseks, sest sellised lekked on suur risk elanikkonnale ning samuti on metaan oluline kasvuhoonegaas (Xiong *et al.*, 2022).

Enamik elektrisüsteeme vajab rikete vältimiseks stabiilset temperatuuri. Ülekuumenemiste (Joonis 5) puhul aitab termokaamera seire lokaliseerida vigaseid ja katkiseid kohti ilma, et peaks ohtlikuid süsteeme käega katsuma (Gade & Moeslund, 2014).

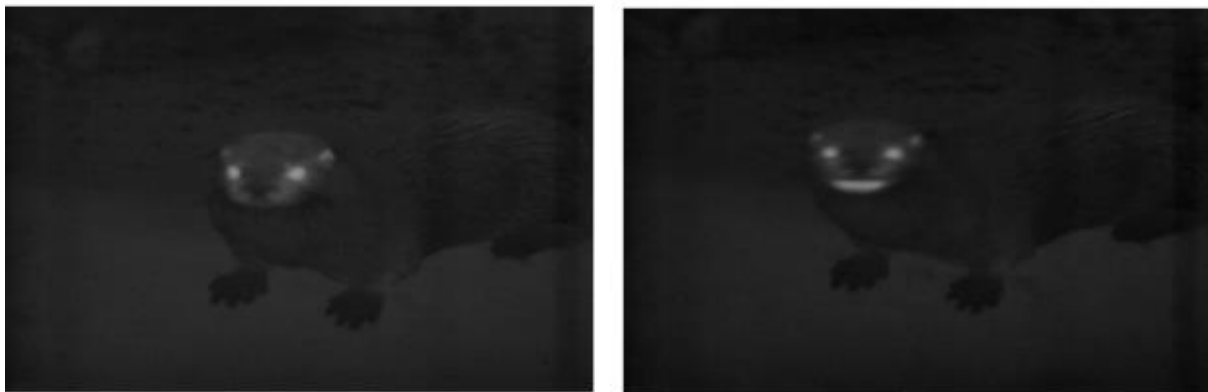


Joonis 5. Termopildil (vasakul) on näha ülekuumenenud kaabli ühenduskoht, mida tavalisel pildil (paremal) näha ei ole (Heliguy, 2022).

Viimastel aastatel on termograafia leidnud rakendust ka meditsiinis, kasutades nahapinnalt lähtuvat infrapunakiirgust (Rajmanova *et al.*, 2015). See on tõhus meetod kehatemperatuuri mõõtmiseks kui ka võimalike haiguste tuvastamiseks (Luximon *et al.*, 2022) ja näiteks diabeetiliste jalahaavandite seisukorra hindamiseks (Villa *et al.*, 2020).

Põllumajanduses saab jälgida termograafia abil taimede veestressi, tuvastada taimedel haigusi kui ka hinnata taimede saagikust kasutades selleks termokaameraid droonil. (Messina & Modica, 2020)

Lisaks taimedele saab termokaamerate abil uurida ka loomastikku. Nii on varasemalt vaadeldud rabalindude pesasid (McKellar *et al.*, 2021), uuritud ämmalahve (Spaan *et al.*, 2019) ja Ameerikas on kasutatud termokaamerat erinevate linnupesade otsimiseks (Stander *et al.*, 2021).



Joonis 6. Termokaamera abil saab öösel loomi jälgida ilma neid segamata. Siin on üles pildistatud saarmast (Havens & Sharp, 2016).

2022. aastal leidsid Goddiyn-Murphy ja teised, et termokaamerad droonil omavad suurt potentsiaali mereprügi jälgimiseks.

Hüdroloogias aitab termokaamera uurida jõgede pinnatemperatuure (Baker *et al.*, 2019) kui ka ülemjooksu süsteeme (Dugdale *et al.*, 2022). Hüdrogeoloogias kasutatakse termokaameraid põhjavee uurimisel. Termokaameraga saab uurida põhjavee väljavoolu merre (Lee *et al.*, 2016) kui ka jõkke (Harvey *et al.*, 2019). Seda teemat aga käsitletakse edasi juba põhjalikumalt järgmises peatükis.

1.4 Põhjavee väljavoolu uurimine termokaameratega

Seoses globaalse kliima soojenemisega on eeldatav, et ka jõgede aastane keskmine veetemperatuur tõuseb (Kuhn *et al.*, 2021; Casas-Mulet *et al.*, 2020). Jõe veetemperatuur on oluline parameeter määramaks jõe ökoloogilist seisundit ja ka selle muutlikust (Kuhn *et al.*, 2021).

Globaalse kliima soojenemise taustal muutuvad stabiilsema temperatuuriga põhjavee väljavooluga alad järjest olulisemaks elupaigaks elusloodusele (Casas-Mulet *et al.*, 2020). Põhjavee väljavool jõe on oluline liikidele, kes on tundlikud temperatuuride muutustele ja eelistavad jahedamat vett. Hapnikurikas jahe vesi aitab soojadel perioodidel veeorganismidel ellu jääda (Kuhn *et al.*, 2021) ning reguleerida toitainete omastamist ja ainevahetust (Pai *et al.*, 2017). Põhjavee stabiilne veetemperatuur kaitseb liike ööpäevaste kui ka hooajaliste kõikumiste eest (Abolt *et al.*, 2018).

Varasemalt on hüdroloogiliste protsesside sh temperatuuri uurimiseks kasutatud andureid ja loggerid, mis mõõdavad veetemperatuuri ühes punktis. Selliste seadmetega on väga keeruline ja kallis katta ühtlaselt tervet jõesängi, et leida üles põhjavee väljavoolu piiratud aladel. (Dugdale *et al.*, 2022)

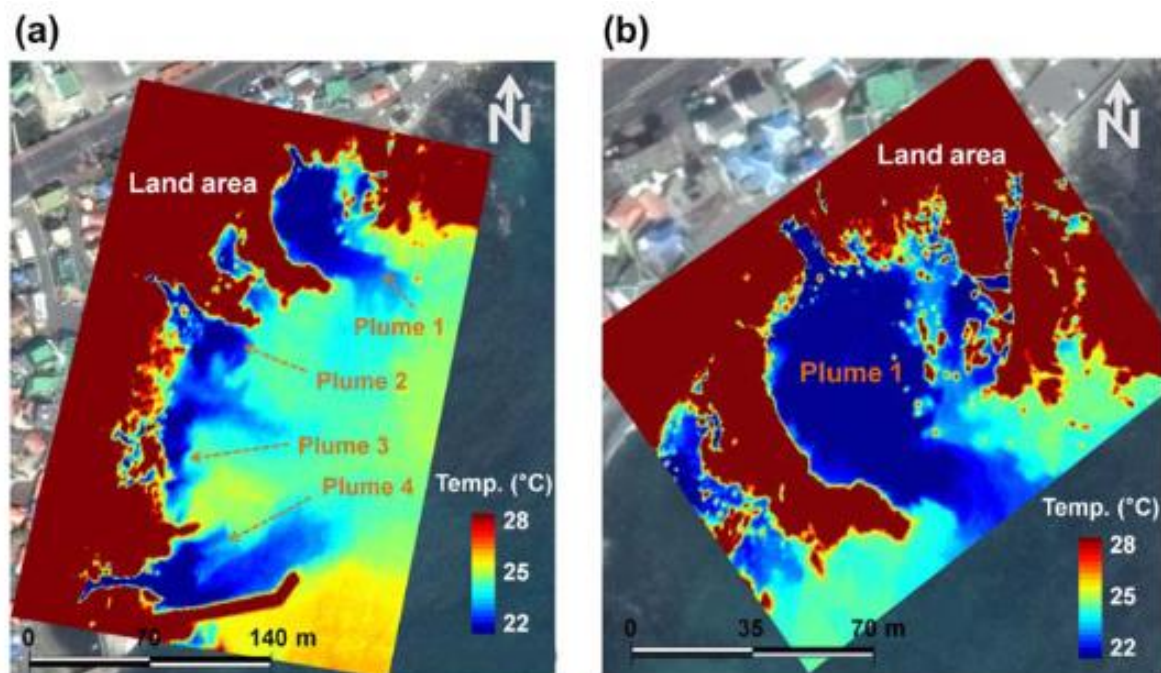
Suurematel aladel ühtlase andmestikuga katmiseks tulevadki mängu termokaamerad, eriti koos mehitamata õhusõidukidega ehk droonidega (Kuhn *et al.*, 2021). Droonid võimaldavad katta andmetega kiiresti suuri ja raskesti ligipääsetavaid alasid. Sel põhjusel on termokaameratega varustatud droonid jõgede temperatuuri ja pinna-või põhjavee väljavoolu iseloomustamiseks efektiivne meetod (Dugdale *et al.*, 2022).

Hooajaliste stabiilsete põhjavee temperatuuride korral on talvekuudel põhjavesi tavalise pinnavee suhtes soojem ja suvel külmem (Marruedo Arricibita *et al.*, 2018). See erinevus tuleb välja ka droonilt tehtud termopiltidel, kus põhjavee väljavoolu alad eristuvad ümbritsevast keskkonnast temperatuurianomaaliaatena (Lee *et al.*, 2016).

Casas-Mulet *et al.* (2020) uurisid Austraalias just külmaveelisi põhjavee alasid, mis suvel pakkusid tundlikele liikidele varjupaika. Uuringuobjektiks võeti Upper Ovens jõgi, kus veebilansis domineerib väljavooluna põhjavesi. Kliimasoojenemise ja põhjavee pumpamise tulemusel aga muutuvad periooditi vooluhulgad väikeseks ning see suurendab ohtu elustikule. Külmaveelised alad jões kaardistati üles kasutades termokaamerat mehitamata õhusõidukil ehk

droonil. Tulemusteks leiti, et külmaveelised alad paiknesid jões ebaühtlaselt ja suurimad soojuse erinevused olid just lisajõgede külmades alades. Autorid jõudsid järeldusele, et külmad alad jões on põhjavee väljavoolud.

Termokaameraga drooni abil saab uurida ka teisi veekogusid. Näiteks kirjeldavad Lee *et al.* (2016) veealuse põhjavee väljavoolu (*submarine groundwater discharge*) Koreas Jeju saare rannikuvööndis. See põhjustas liigsete toitainete jõudmist rannikualadele, mis omakorda soodustas vetikate õitsemist. Jeju saare rannikualal on mere- ja põhjavee temperatuuride erinevus suurim suvel. Drooni kasutades kaardistati termokaamera abil üles põhjavee väljavoolud. Jooniselt 7 on näha, et merevesi on soojem põhjaveest, merevee temperatuur jäi 24-25°C juurde, kuid põhjavee temperatuuriks on 22°C. Autorid näitasid, et drooniga lennukõrgust muutes saab lihtsalt erinevate skaalade ja eraldusvõimega termopilte.

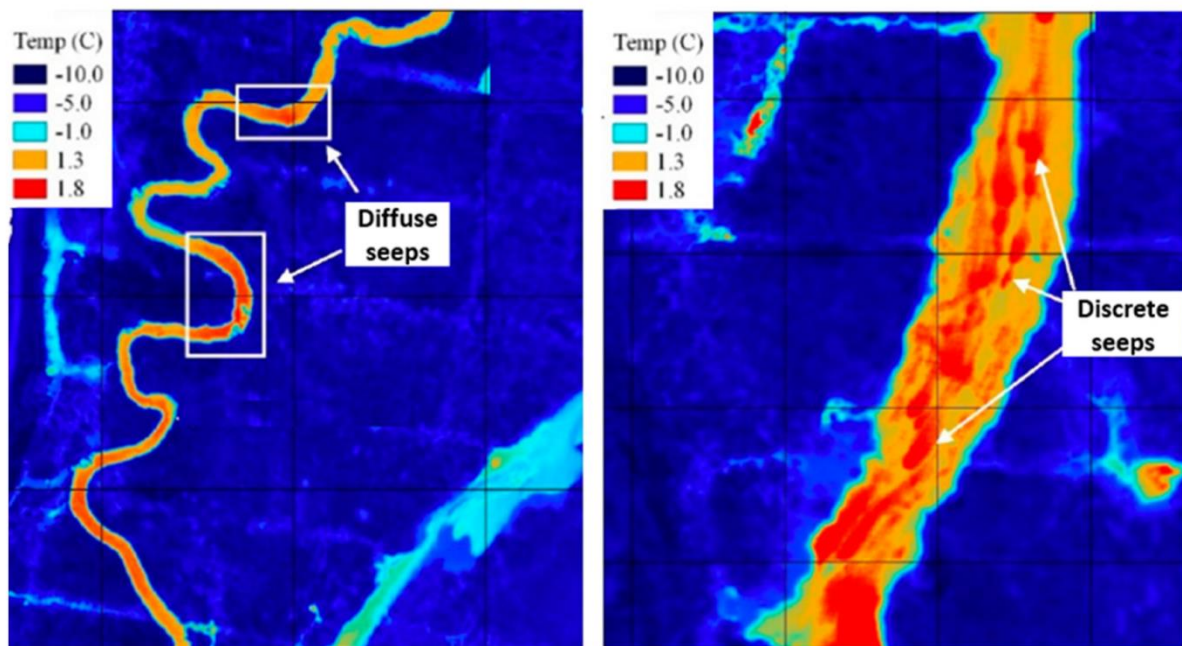


Joonis 7. Pilt a) on kaardistatud drooni abil 2014. aasta suvel 600 m kõrgusel ja pilt b) on detailsem pilt põhjavee väljavoolust 300 m kõrguselt (Lee *et al.*, 2016).

Uurimuse tulemuseks leiti, et droonide eelisteks mehitatud õhusõidukite ees on väga hea manööverdamine, sh vertikaalselt, lennukõrguse lihtne muutmine, madalad kulud, kuid ka võimalus andmeid kiiresti kohe analüüsida (*Ibid*). Lennukõrguse kiire muutumise korral saab ühest punktist mitu erinevat termopilti teha erinevatelt kõrgustelt. Tänapäevased termokaamerad võimaldavad kaugpiloodil reaalajas termopildi vaatamist ning esmast analüüsi.

Lisaks on need varustatud ka zoom võimekusega, mis veelgi lihtsustab leitud soojusanomaaliate kiiret detailvaatlust.

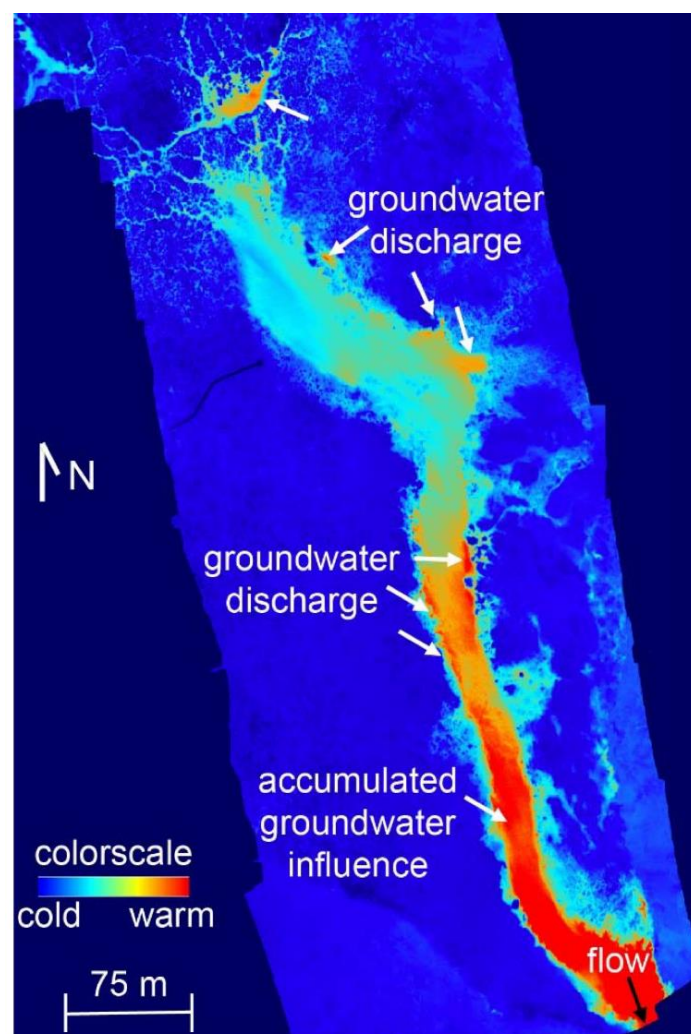
Harvey *et al.* (2019) uurisid põhjavee väljavoolu kasutades selleks termokaamera draoni. Uuringuala asus USAs Massachusettsi osariigis, varasemalt oli see olnud pikalt kasutuses jõhvivate kasvatamiseks. 2019. aasta kevadel tehtud termopiltidelt (Joonis 8) tulevad hästi esile põhjavee väljavoolud ($>1\text{ }^{\circ}\text{C}$) ojas, mis suubub suuremasse jõkke. Pinnavee temperatuur jäi $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ juurde (helesinine värvus joonisel 8). Uuringu tulemusel leiti, et töös kasutatud meetodil on ka paar teatavat piirangut. Esiteks, kui põhjavee temperatuur on sarnane aastase keskmise pinnasetemperatuuriga, siis **kontrast pinna- ja põhjavee vahel termopiltidel on väga väike**. Teiseks, võib taimeistik varjata vaadet objektile, sest termokaamera ei näe sellest läbi. Kolmandaks leiti, et meetod ei ole efektiivne kui andmete kogumine toimub suvel või talvel lume või jää-ga kaetud alalt, sest siis võib tihedam ja külmem põhjavesi vajuda soojema pinnavee alla. Samas töötab selline uuringuviis hästi põhjavee väljavoolude uurimisel raskesti ligipääsetavate objektide puhul.



Joonis 8. Termopildid näitavad soojema põhjavee väljavoolu ojas (Harvey *et al.*, 2019).

See näitab, et antud meetod sobib hästi põhjavee väljavoolude kaardistamiseks, eriti just talvel või varakevadel, kui põhjavesi on pinnaveest tunduvalt soojem.

Briggs *et al.* (2022) uurisid USAs Connecticutis põhjavee väljavoolusid nii droonidele ja paadile kinnitatud või käes hoitavate termokaamerate abil. Kasutades droonidel tehtud termopilte moodustati termopiltidest ortofotomosaigid (Joonis 9). Drooniga lendamised teostati talvel ja varakevadel, sest siis on põhjavesi pinnaseveest tunduvalt soojem. Uuringu tulemustes toodi välja ka asjaolu, et nii kevadel kui ka talvel tehtud drooni lendamistel varjasid jõe kallastel asuvad lehtpuud ja võsastik põhjavee väljavoolusid, sest väljavoolud asusid kohati puujuurte all. Seetõttu kasutati siin uuringus peamiselt veesõidukile kinnitatud termokaamerat. Samuti leiavad autorid, et mehitatud õhusõidukiga termopildistamine on raskendatud piirkondades, kus jõekallas on metsastunud või võsastunud.



Joonis 9. Ortofotomosaik näitab, kuidas jõe veetemperatuur muutub soojemaks põhjavee väljavoolu segunemisel pinnaveega (Briggs *et al.*, 2022).

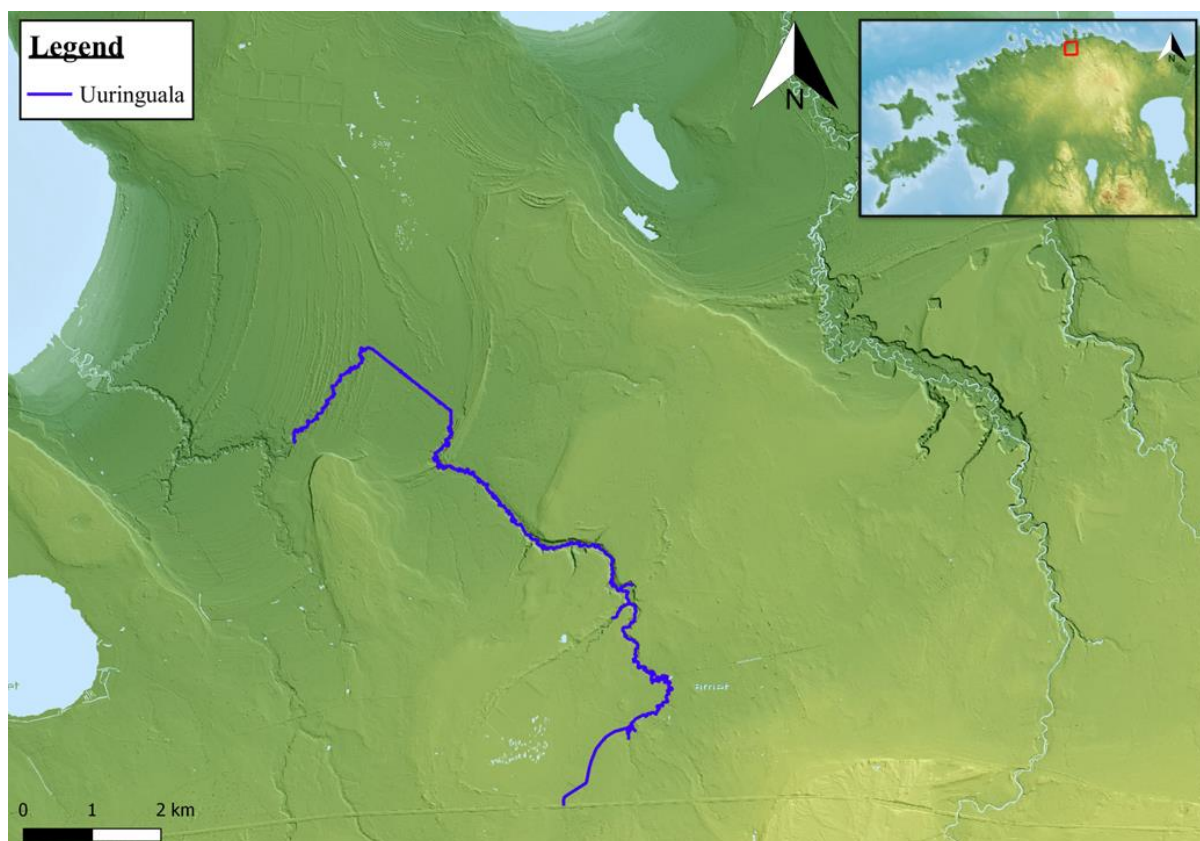
Viimastel aastatel on muutunud tehniliselt hõlpsaks ning majanduslikult vastuvõetamaks kasutada termokaamerat droonil temperatuuri andmete kogumiseks. See meetod muudab

põhjavee väljavoolude kaardistamise ja tuvastamise kiiremaks ning efektiivsemaks. Varasemalt oleks pidanud raskesti läbivat jõeorgu jalgsi läbima ja andmeid koguma, kuid nüüd saab andmed kogutud drooniga ja seda saab teha oluliselt kiiremini. Põhjavee väljavoolud jões tulevad hästi esile just miinuskraadidega ning ilma lehestikuta. Lisaks tuleb võtta arvesse, et kui aastase maapinna keskmine temperatuur on sarnane põhjavee temperatuuriga, siis erinevus põhja- ja pinnavee temperatuuri vahel võib olla liiga väike termopildilt tuvastamiseks.

2. Materjal ja metoodika

2.1 Uuringuala

Uuringuala asub Pudisoo jõe keskjooksul (Joonis 10), mis asub Ida-Harjumaal ning kuulub Lääne-Eesti vesikonda Harju alamvesikonda (Keskkonnaportaal, 2022). Jõgi algab Järvi Pikklaukast ja suubub Kolga lahte (Hang & Aia, 2023). Jõe kogupikkuseks on 32.6 km ja lauge loodesuunalise kallakusega (Hang & Aia, 2023) valgala suuruseks 143.7 km² (Keskkonnaportaal, 2022).



Joonis 10. Uuritav ala Pudisoo jõest on markeeritud sinise joonega, toodud on ka uuringuala paiknemine Eesti kaardil (Aluskaart: Maa-Amet, 2022).

Jõgi on liivase, kuid kohati ka kivise-kruusase põhjaline (Jürgenstein, 2015). Pudisoo jõel on palju lisajõgesid, neist suurimad on Kemba, Kõnnu, Kalme, Punsu oja koos Kolga ja Hara jõega (Hang & Aia, 2023). Jõe ülemjooks asetseb Kõrvemaal, keskjooks kulgeb mööda Harju lavamaad ning jõe alamjooks asub Põhja-Eesti rannikumadalikul (Jürgenstein, 2015).

Valgala aluspõhja moodustavad Kesk-ja Ülem-Ordoviitsiumi lubjakivid, alamjooksul domineerivad Kesk-ja Ülem-Kambriumi savi-ja liivakivid (Hang & Aia, 2023).

Aluspõhjareljeef on tasane (*Ibid*), kuid enamasti kiirevooluline Pudisoo jõgi voolab läbi ka nii edelaosas asuvast Pärlijõe ja idaosas asuvast Kemba orust (Jürgenstein, 2015). Valgala keskosas toimub järsk aluspõhja pealispinna kõrguse muutus, see markeerib mattunud Põhja-Eesti klinti (Hang & Aia, 2023).

Pinnakattes domineerivad Wichseli jäätumise liustiku sulaveesetted, pinnakatte paksus Pudisoo valgjalal ulatub mõnekümnest cm kuni 60 m paksuseni. (*Ibid*)

Aastal 2022 jäi keskmine õhutemperatuur Pudisoo piirkonnas jääb vahemikku 7,1-7,5 °C (Keskkonnaagentuur, 2023), kuid aastal 2021 jäi keskmine temperatuur vahemikku 6,6-7,0 °C (Keskkonnaagentuur, 2022). Uurides aasta keskmisi temperatuure näiteks 10 aasta lõikes näeme, et kliima on muutumas järjest soojemaks.

Pinnalähedase põhjavee temperatuur Eestis jääb 6-7 °C kraadi juurde, olles sarnane aastase keskmisele õhutemperatuurile (Jõelet, 2023).

Uuringuala moodustas nii jõesäng kui tema vahetus läheduses (ca 100m ulatuses) olev jõeorg.

2.2 Kasutatud aparatuur

Välitööde käigus lennutati droone kolmel korral. Esimestel välitöödel kasutati renditud drooni **DJI Mavic 2 Enterprise Advanced** ning järgnevatel kordadel Tartu Ülikooli geoloogia osakonna drooni **DJI Matrice 300 RTK**.

Drooni DJI Mavic 2 Enterprise Advanced (Joonis 11) maksimaalseks lendamiskiiruseks on 20 m/s ning lennuajaks annab tootja ideaaltingimustes 31 minutit (DJI, 2021). Drooni lennuaeg sõltub oluliselt ilmastikust, külmema ilmaga või tugeva tuule korral võib aku kiiremini tühjaks saada. Maksimaalne teeninduslagi merepinnast (*Max Service Ceiling*) on 6 km ning tuulekindluseks (*Max Wind Resistance*) 13,8 m/s (DJI, 2021). Selles töös on lendamised olnud 100-120 m kõrgusel maapinnast. Droon töötab temperatuuridel -10°-st kuni 40°C (DJI, 2021). Selle drooni eeliseks on mugavus ja kompaktsus, sest vajadusel võtab drooni seadistamine ja lendu tõusmine aega vähem kui 1 minut.



Joonis 11. Droon DJI Mavic 2 Enterprise Advanced koos termokaameraga. (DJI, 2021)

Drooni DJI Matrice 300 RTK (Joonis 12) maksimaalseks lennuajaks on 55 minutit ja lendamiskiiruseks 17 m/s (DJI, 2022). Võrreldes DJI Mavic 2 Enterprise Advanced-ga on 300 RTK võimsam, kiirem ning lennata saab kauem ja kaugemale. Maksimaalseks tuuletakistuseks (*Max Wind Resistance*) on 17 m/s ja teeninduslaeks (*Max Service Ceiling*) 7 km (DJI, 2022).

Võrreldes seda drooni DJI Mavic 2 Enterprise Advanced-ga (Tabel 1), suudab see droon lennata ka tugeva vihma või tuule korral. DJI 300 RTK drooni töötemperatuuriks on temperatuuride vahemik -20°-st kuni 50°C-ni (DJI, 2022). Lisaks on sellel droonil olemas ka laserkaugusmõõtja, mis võimaldab mõõta objekti ja drooni vahelist kaugust. Mõlemad droonid

on varustatud RTK (*Real Time Kinematic*) GNSS positsioneerimissüsteemiga, mis võimaldab drooni asukohta pildistamise hetkel fikseerida ca 5 cm täpsusega. RTK süsteemi toimimiseks vajalik parand saadi üle mobiilside Maa-ameti ESTPOS teenusest.



Joonis 12. Drooni DJI Matrice 300 RTK koos termokaameraga Zenmuse H20N (Dronerush, 2023)

Tabel 1. Võrdlus töös kasutatud droonide DJI Mavic 2 Enterprise Advanced ja DJI Matrice 300 RTK vahel.

Droon	DJI Mavic 2 Enterprise Advanced	DJI Matrice 300 RTK
Kaal	u 6.3 kg (koos 2 akuga)	909g (ilma lisadeta)
Maksimaalne õhkutõusmise kaal	9 kg	1.1 kg
Lennuaeg	55 minutit (ilma lisakoormuseta)	Kuni 31 minutit
Töötemperatuur	-20°C kuni 50°C	-10°C kuni 40°C
Maksimaalne kiirus	17 m/s	13,8 m/s
Maksimaalne tuulekiiruse takistus (<i>Max Wind Speed Resistance</i>)	15 m/s; 13 m/s (õhku tõusmisel või maandumisel)	10 m/s
Maksimaalne andmeedastus kaugus	8 km	6 km

DJI Mavic Enterprise Advanced droonile on integreeritud termokaamera **M2EA** (Joonis 11). Antud kaamerasüsteemis on tegelikult kaks kaamerat, lisaks termokaamerale on juures ka tavaline kaamera, mõlemad teevad pilti samaaegselt. Termokaamera suhteliseks täpsuseks on 50 mK, resolutsiooniks **640×512 pikslit** ning kaadrisageduseks 30 Hz (DJI, 2021). Väikse ja kompaktse drooni kohta annab see väga hea kvaliteediga pilte ja videoid. Lisaks on kaameral 16x suum, mis võimaldab uurimisobjekte lähemalt uurida. Mõõtmistel saadud temperatuuride täpsuseks annab tootja $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ning termokaamera suudab mõõta temperatuure vahemikus -40°C kuni 150°C (DJI, 2021).

DJI 300 RTK drooni juurde kuulub termokaamera **Zenmuse H20N** (Joonis 13). Siin on tegemist kvadrokaameraga, kus lisaks kahele termokaamerale on juures ka kaks tavalist kaamerat. Mõlemal kaameratüübil on nii lainurk- kui teleobjektiiviga variant. Termokaamera eraldusvõimseks on **640×512 pikslit**, suhteliseks täpsuseks 50 mK ja mõõdetavate temperatuuriväärtuse täpsuseks on $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (DJI, 2022). Võrreldes eelmise termokaameraga, suudab antud termokaamera 16x suumi asemel sisse suumida kuni 32 korda. Termokaamera Zenmuse H20N suudab mõõta temperatuure vahemikus -20°C kuni 150°C (DJI, 2022).



Joonis 13. Termokaamera Zenmuse H20N (DJI, 2022).

Nii termokaamera M2EA kui ka H20N suhteliseks täpsuseks on 50 mK ja eraldusvõimeks on 640x512 pikslit. Termokaamerate andmed on esitatud Tabelis 2.

Tabel 2. Võrdlus töös kasutatud termokaamerate M2EA ja Zenmuse H20N vahel.

Kaamera tehniline omadus	M2EA DJI Mavic 2 Enterprise Advanced	Zenmuse H20N DJI Matrice RTK 300
Kaal	909g (drooniga)	878±5 g (droonita)
Suurus	322×242×84mm (drooniga)	178x135x161 mm
Soojustundlikus (<i>NETD</i>)	≤50 mK	≤50 mK
Mõõtmiste täpsus	±2°C	±2°C
Töötemperatuur	-20°C kuni 150°C	-20°C kuni 150°C
Termoanduri resolutsioon (IR resolutsioon)	640×512 pikslit	640×512 pikslit
Kaadrisagedus	30 Hz	30 Hz
Spektrivahemik	8-14 µm	8-14 µm

Mõlemad kaamerad on kalibreeritud ja salvestavad termopildi järeltöötlmist võimaldavas .jpeg formaadis. Lisaks tehakse ka samaaegselt tavakaamera pilt. Viimane on väga abiks termopildis välja paistvate objektide identifitseerimisel.

Põhjavee väljavoolusid kaardistati siin töös ka lisaks droonile ka maapealsete meetoditega. Selleks määrati vee elektrijuhtivust. Elektrijuhtivus iseloomustab mineraalide ja soolade sisaldust vees (Hayashi, 2004). Lisaks sõltub elektrijuhtivus veetemperatuurist, kuid enamuse mõõteseadmeid arvutab mõõdetud elektrijuhtivuse automaatselt ümber kindlale temperatuurile (tavaliselt 25°C). Üldiselt on lumesula- ja raba vee elektrijuhtivus vahemikus 10-250 µS/cm, tavalise pinnavee elektrijuhtivuseks ja pinnalähedase põhjavee elektrijuhtivuseks on 400-800 µS/cm (Terasmaa *et al.*, 2020).

Vee elektrijuhtivuse ja -temperatuuri mõõtmiseks kasutati kaasaskantavat multimeetrit WTW ProfiLine 3320 (Joonis 14). Seade suudab mõõta temperatuure vahemikus -5,0°C-st kuni 105,0°C-ni, kuid elektrijuhtivuse mõõteulatuseks on 0,000 kuni 1000 mS/cm (Xylem Analytics, 2018). Siin töös esitatakse elektrijuhtivuse väärtused µS/cm kohta. Mõõtmiste täpsuseks on temperatuuril ± 0,1°C ning elektrijuhtivusel ± 0,5 % (Xylem Analytics, 2018).

Mõõtmisteks asetati mõõtesond veekogusse, seejärel oodati kuni temperatuuri ja elektrijuhtivuse väärtused stabiliseerusid. Mõõdetud parameetrid sisestati tööarvutisse, millega tehti mõõtekohast ka georefereeritud pilt.



Joonis 14. Seade WTW ProfiLine 3320 multiparameeter (paremal) koos kasutatud tööarvutiga (vasakul).

2.3 Välitööd

Uuringualaga tutvuti lähemalt välitöödel, mis toimusid 11.11.2021 (Joonis 15) ja 19.10.2022. Sel ajal ei takistanud puude ja põõsaste lehed jõe veetemperatuuride kui ka elektrijuhtivuste mõõtmist. 11.11.2021 toimunud välitöödel tutvuti nii Pudisoo jõe, kui ka seal elavate kohalikega. Küllastati olulisemaid punkte jõel ning mõõdeti jõe vooluhulka vooluhulgamõõdtjaga.



Joonis 15. 11.11.2021 toimunud välitööd, kus vaadatakse Pudisoo jõge ühes seirepunktis. Pildi autor: Agnes Unt.

19.10.2022 toimunud välitööd algasid vanade seireandurite vahetusega uute vastu. Seejärel mõõdeti Pudisoo jõe erinevates uuringupunktides vooluhulka, kasutades selleks nii vooluhulgamõõdtjat SonTeK RS5 (Joonis 16) kui ka teist voolumõõtmise meetodit, mis selle töö teemaks ei ole. Peale päikese loojumist alustati paari tunni pärast drooni lendamistega (Joonis 17), mille jooksul koguti Pudisoo jõest termopilte ja -videoid, mida hiljem analüüsiti.



Joonis 16 ja 17. 19.10.2022 toimunud välitööd, kus vasakpoolsel pildil toimub jõe vooluhulga mõõtmine ja parempoolsel drooni ettevalmistamine lendamiseks.

Drooniga lendamised toimusid Pudisoo jõe kohal 10.05.2022, 19.10.2022 ja 05.04.2023. Varasemate katsetuste põhjal oli selge, et põhiliseks segajaks on päikesekiirgus, mis võib varjutada kogu muu termosignaali. Nii lennati kas öösel (10.05.2022 ja 19.10.2022) või lauspilves ilmaga (05.04.23). Lendamiste keskmiseks kiiruseks filmimise ajal oli 4-8 m/s ja lennati kõrgustel vahemikus 100-120 m maapinnast. Kaugpiloodiks oli Marko Kohv. Lendamise eesmärgiks oli termopiltide ja -videote saamine Pudisoo jõest. Üldiselt lennati mööda jõge ning jälgiti reaajas edastatavat termopilti, anomaaliate kohal tehti lisaks videole veel termopilte, mida erinevalt videost saab hiljem töödelda.

10.05.2022 tehtud lendamistel tehti termokaameraga kokku 6 termovideot, termopilte ei tehtud. 19.10.2022 tehti kokku 288 termopilti ja 8 erinevat termovideot Pudisoo jõest, 05.04.2023 tehti 363 termopilti ning 4 termovideot. Autor oli välitöödel kaasas 19.10.2022.

Elektrijuhtivuse ja veetemperatuuri mõõtmised (Joonis 18 ja 19) viis läbi autor koos Marko Puksinguga Pudisoo jõel vahemikus 18-19.04.2023. Seejuures mõõdeti eelnevalt termopiltidelt autori poolt tuvastatud huvipakkuvates uuringupunktides vee elektrijuhtivust ja temperatuuri kasutades selleks WTW ProfiLine 3320 multimeetrit. Kokku mõõdeti vee

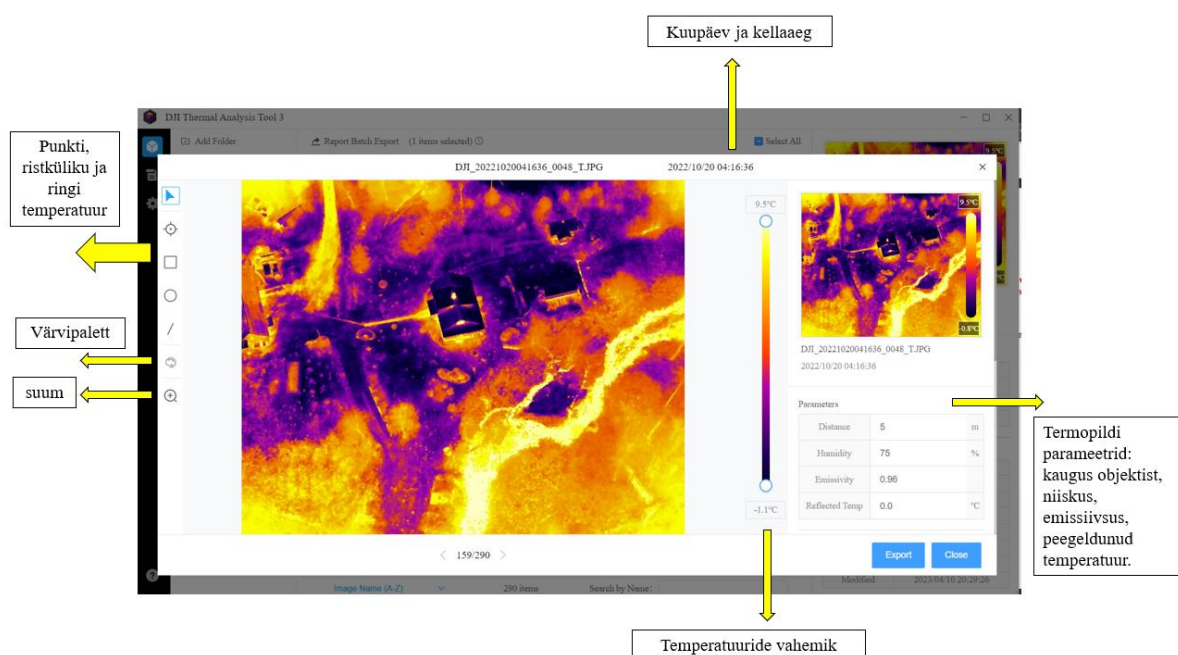
elektrijuhtivust ja -temperatuure 137 erinevas uuringupunktis. Lisaks fikseeriti uuringupunktid georefereeritud fotodega.



Joonis 18 ja 19. Elektrijuhtivuse ja veetemperatuuri mõõtmine Pudisoo jõel 19-20.04.2023.

2.4 Andmete analüüs

Kõiki termopilte töödeldi tarkvaraga DJI Thermal analysis tool 3 (Joonis 20). Tarkvara on loodud kasutatud droonide tootja poolt, mis muudab termopiltide analüüsimise lihtsamaks. See tarkvara võimaldab mõõta termopildil olevatest pikslitest temperatuure nii punkti või ala (ristküliku, ringi) maksimumi meetodina. Temperatuuride vahemikku saab vastavalt vajadusele liigutada, et endale meelepärane vahemik nähtavale jätta. Tarkvara abil saab valida endale sobiva värvipaletti ja muuta erinevaid keskkonnaparameetreid: õhuniiskust, kaugust, emissiivsust jne.

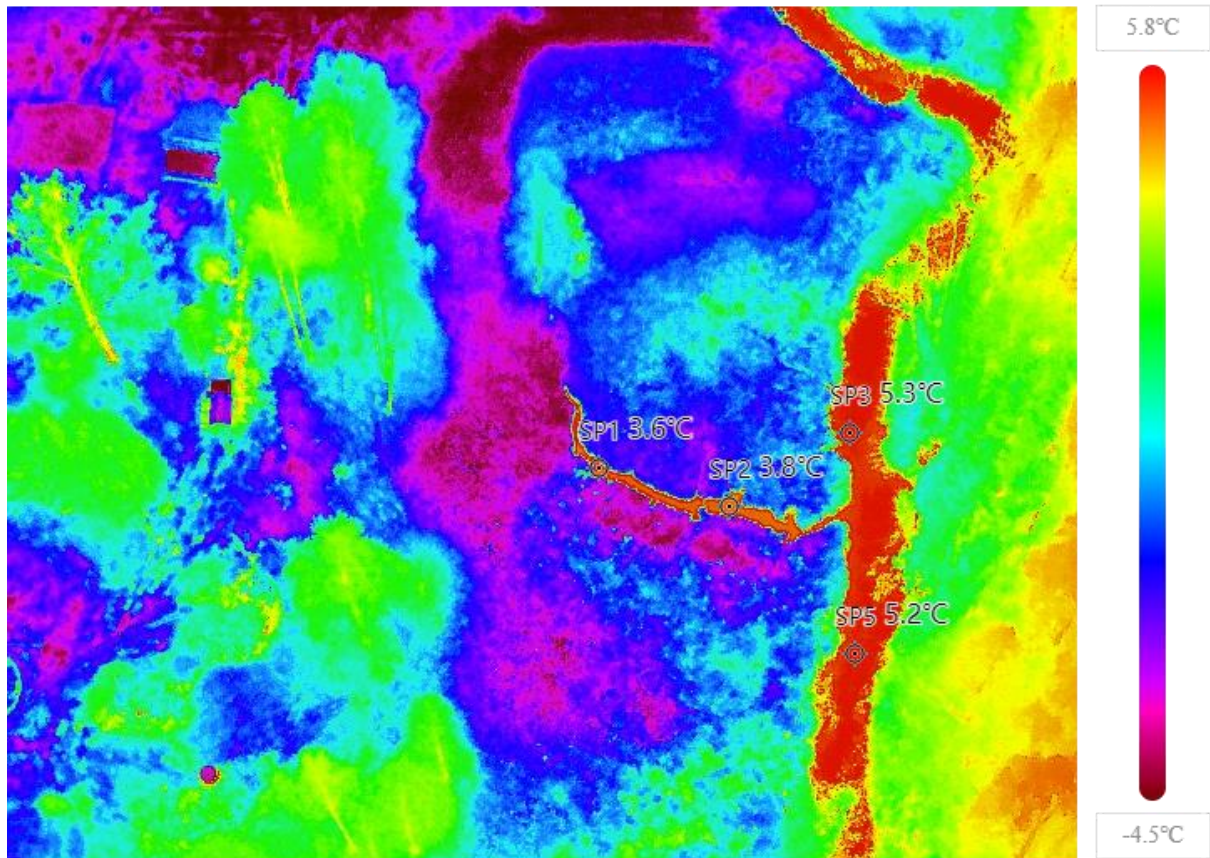


Joonis 20. Tarkvara DJI Thermal analysis tool 3 tööaken koos pildi töötlemise valikutega.

Kõiki termopilte analüüsidis muudeti niiskust vastavalt milline oli suhteline õhuniiskus drooniga lendamisel. Lisaks muudeti kaugust objektist (vaikimisi oli 5m) kui ka emissiivsust. Tarkvara laseb kaugust objektist muuta kuni 25 m, mida ka piltide töötlemisel tehti, kuigi tegelik kaugus objekti ja drooni vahel oli 120 m. Peegeldunud temperatuuri muudeti vastavalt lendamisel olnud õhutemperatuurile. Töös olevate termopiltide puhul on kasutatud värvipaletti *Iron red* ja *Rainbow 1*.

Joonisel 21 on toodud termopilt, kus on kasutatud *Rainbow* värevärvipaletti, sest sel juhul tulevad temperatuuride erinevused paremini esile. 19.10.2022 tehtud termopildilt on näha, et allika temperatuurid jäävad termopildilt mõõdetuna 3,6-3,8°C vahele, kuid jõe veetemperatuur samas kaadris on 5,2-5,3°C. Temperatuuride vahe 1,4-1,7 kraadi kahe mõõtekoha vahel on

igati piisav, et neid termopildilt eristada, sest kasutatud kaamerad tuvastavad teoreetiliselt juba 0,05 kraadist erinevust (50 millikelvinit). Samas ei saa absoluuttemperatuure ilma kalibreerimata usaldada (vt peatükk 2).

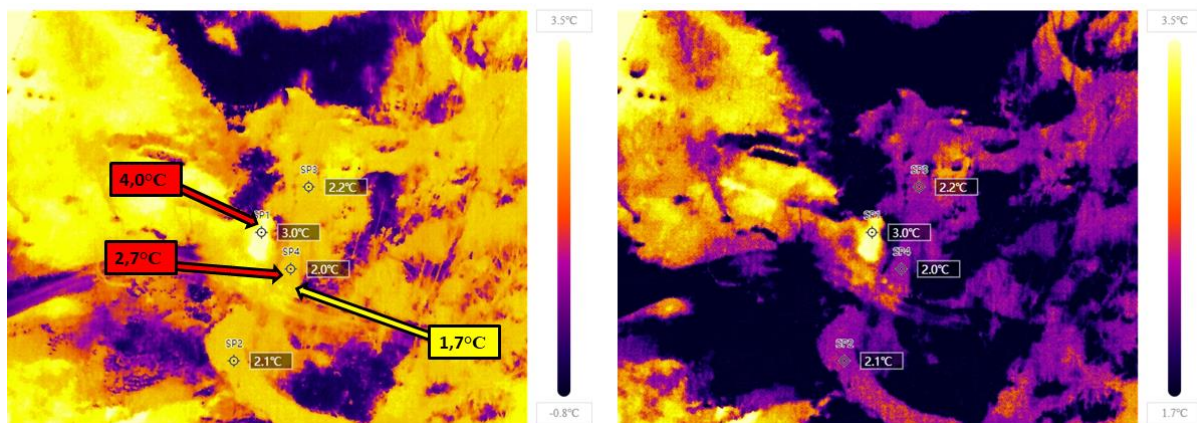


Joonis 21. Termopilt (19.10.22), kus on allika temperatuure (SP1, SP2) võrreldud jõe temperatuuriga (SP3, SP4, SP5). Märkus: jõgi voolab pildil ülevalt alla.

3. Tulemused

3.1 Termopildid

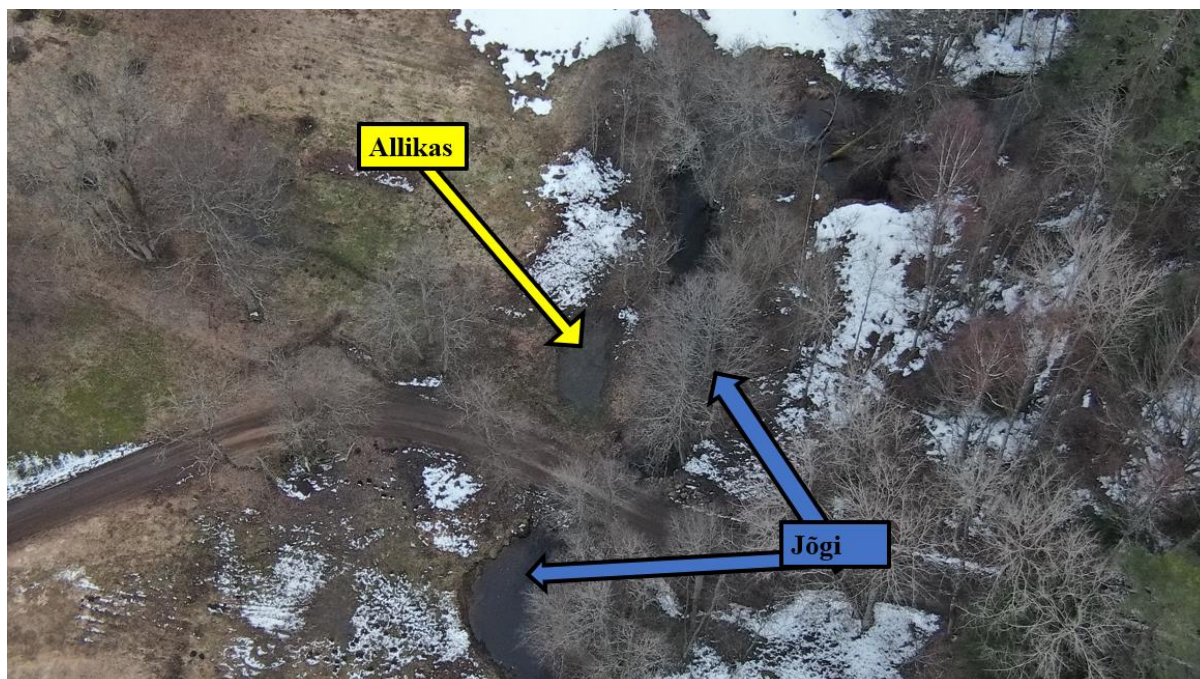
Termovideosid ei saa hiljem töödelda, seetõttu kasutati töötlusteks kahe hilisema lennu jooksul tehtud termopilte. Termopiltidelt suhtelise temperatuuri mõõtmiste täpsuse selgitamiseks vaatame järgnevat näidet, kus lisaks jõe- ja põhjavee temperatuuride erinevustele termopildilt on juurde võetud ka tund aega pärast termopiltide tegemist tehtud otsesed temperatuuri mõõtmised ja kõrval olevast püsiseirepunkti andmetest saadud temperatuur. Joonisel 22 ja 23 on toodud näide allikast, mis asub jõega paralleelselt. Termopildilt saadi allika suhteliseks temperatuuriks 3,0°C (SP1) ja jõe veetemperatuur varieerub vahemikus 2,0-2,2°C (SP2, SP3, SP4). Siinsed suhtelised temperatuurid termopildilt on vahemikus 0,8-1°C. Joonisel 22 on kollase värvusega toodud püsiseirepunktist saadud mõõtmise päeval ja kella ajal saadud absoluutne temperatuur, milleks on 1,7°C. Tund aega pärast drooniga lendamist mõõdetud uuringupunktid on toodud joonisel 22 punase värvusega, kus näeme, et allika temperatuuriks saadi 4,0°C ja jõe veetemperatuuriks 2,7°C.



Joonis 22 ja 23. Termopilt (05.04.2023) enne (vasakul) ja pärast töötlust (paremal) koos suhteliste temperatuuride, absoluutsete temperatuuride (punane ja kollane). Märkus: jõe voolusuund on pildil ülevalt alla.

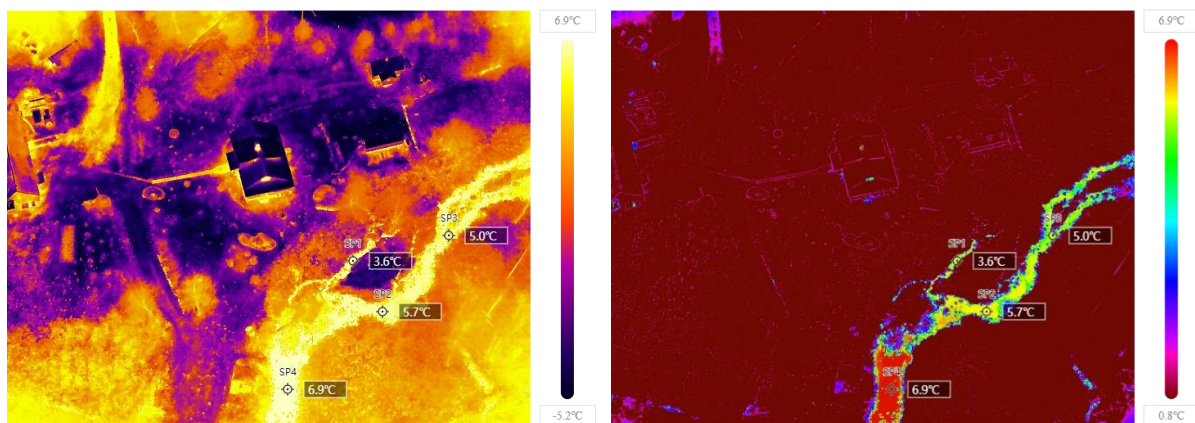
Kui võrdleme Joonisel 22 olevaid allika-jõe temperatuurierinevusi absoluutsete temperatuuridega, ilmneb märkimisväärne sarnasus. Absoluutsete temperatuuride erinevus on umbes 1,3°C, samas kui allika-jõe temperatuuri erinevuseks termopildilt saadi umbes 1°C erinevus. Sellest võime järeldada, et termopildil mõõdetud allika-jõe temperatuurierinevuse abil on võimalik termopildil kaardistada allikate asukohti ja kinnitada nende olemasolu.

Joonisel 24 on näha Joonisel 22 olevat stseeni läbi tavakaamera. Siin on näha, et jõgi on osaliselt puude varjus ning samuti on jõeäärne ala kohati kaetud lumega.



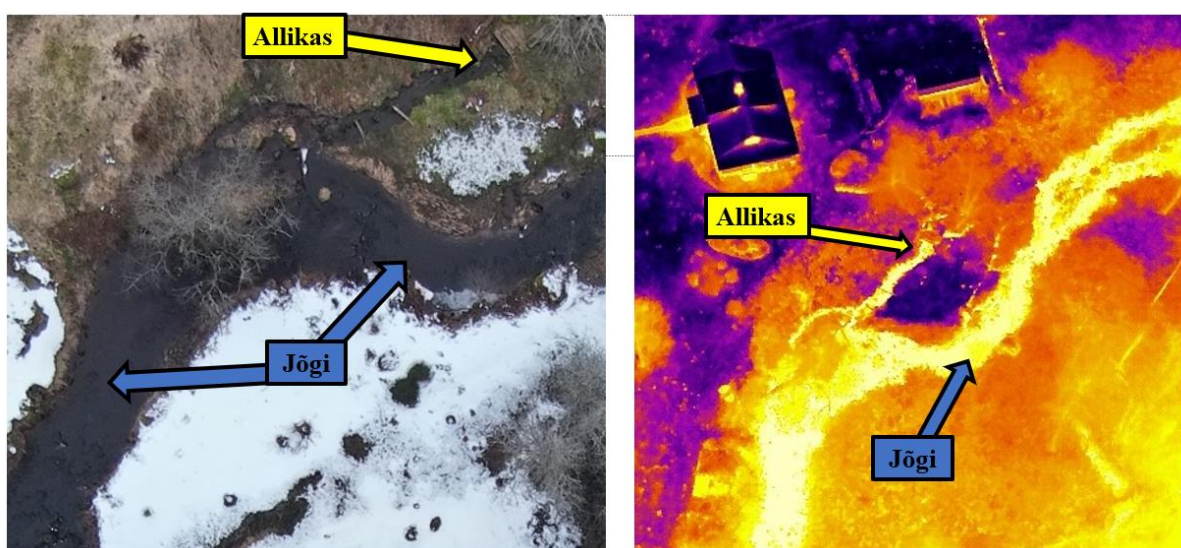
Joonis 24. Tavaline pilt (05.04.2023) kus on näha nii jõge kui ka allikat, mis asub jõe lähedal. Märkus: Jõgi voolab pildil ülevalt alla.

Joonisel 25 ja 26 on toodud näide ühest allikast, mis asub kärestikulisemas jõeoru osas. Kui vaadata Joonist 24 siis näeme, et jõe ja allika suhteline temperatuuride erinevus on $1,4-2,1^{\circ}\text{C}$. Töödeldud pildilt tulevad suhtelised temperatuuride erinevused hästi esile, kus allikas on oranžikas ($\sim 3,6^{\circ}\text{C}$), kuid jõgi ise kollakas-rohkes värviline ($\sim 5,0-5,7^{\circ}\text{C}$). Jõe kärestikuline osa sisaldab palju kive, mis kohati on veest väljas. Joonisel 25 ja 26 olev punkt SP4 temperatuuriga $6,9^{\circ}\text{C}$ on suure tõenäosusega tingitud madalast veetasemest ja veest välja paistvate kivide tõttu ning seetõttu võib tulemus olla eksitav.



Joonis 25 ja 26. Termopilt (19.10.2022) enne (vasakul) ja pärast töölust (paremal), kus põhjavee väljavool (SP1) tuleb paremini esile. Märkus: jõe voolusuund on pildil paremalt vasakule.

Joonisel 27 on esitatud sama allika tavaline pilt ja termopilt. Termopilt on tehtud 19.10.22 ning tavaline pilt 05.04.2023. See tähendab, et termopildi tegemise ajal ei olnud maapinnal lund. Siiski ilmneb tavaliselt pildilt, et allika ümbrusest on lumi ära sulanud, kuigi suurem osa maapinnast on ikka veel lume all.



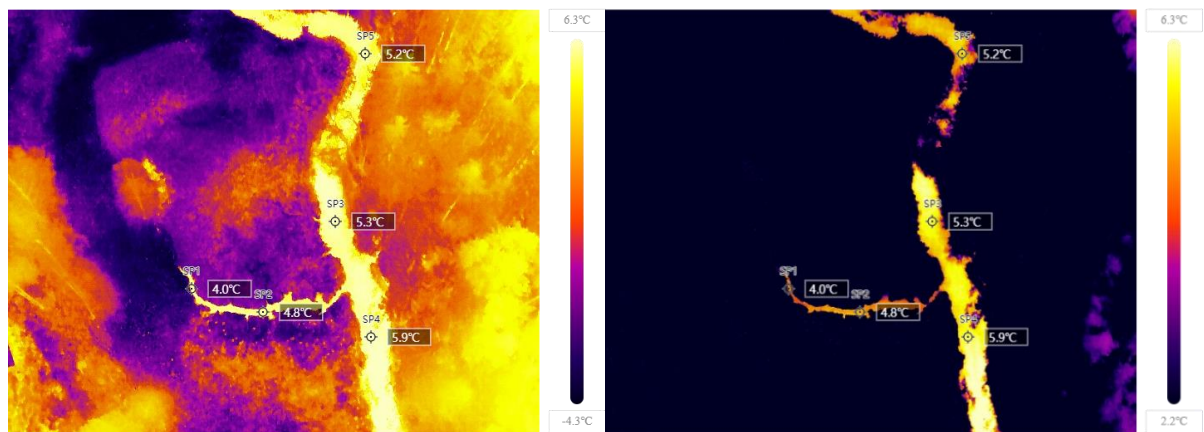
Joonis 27. Tavaline pilt (05.04.2023) ja termopilt (19.10.2022) samast allikast, mis on näidatud kollase joonega.

Kui vaadata ühte allikat Pudisoo jõe mitte kärestikulises osas, siis saame joonise 28 ja 29 puhul jõkke suubuva allika temperatuuriväärtuste vahemikuks 4,0-4,8°C ja jõe temperatuuriväärtused jäid vahemikku 5,2-5,9°C. Seega jäävad pildilt mõõdetud allika-jõe temperatuurierinevused vahemikku 0,4°C-st kuni 1,9°C-ni. Saadud temperatuuriväärtused on

sarnased eelnevalt jõe kärestikulisemas osas saadud tulemustega. See võrdlus näitab, et allika- jõe temperatuurierinevused on sarnased nii kärestikulisel kui ka rahulikumal osal.

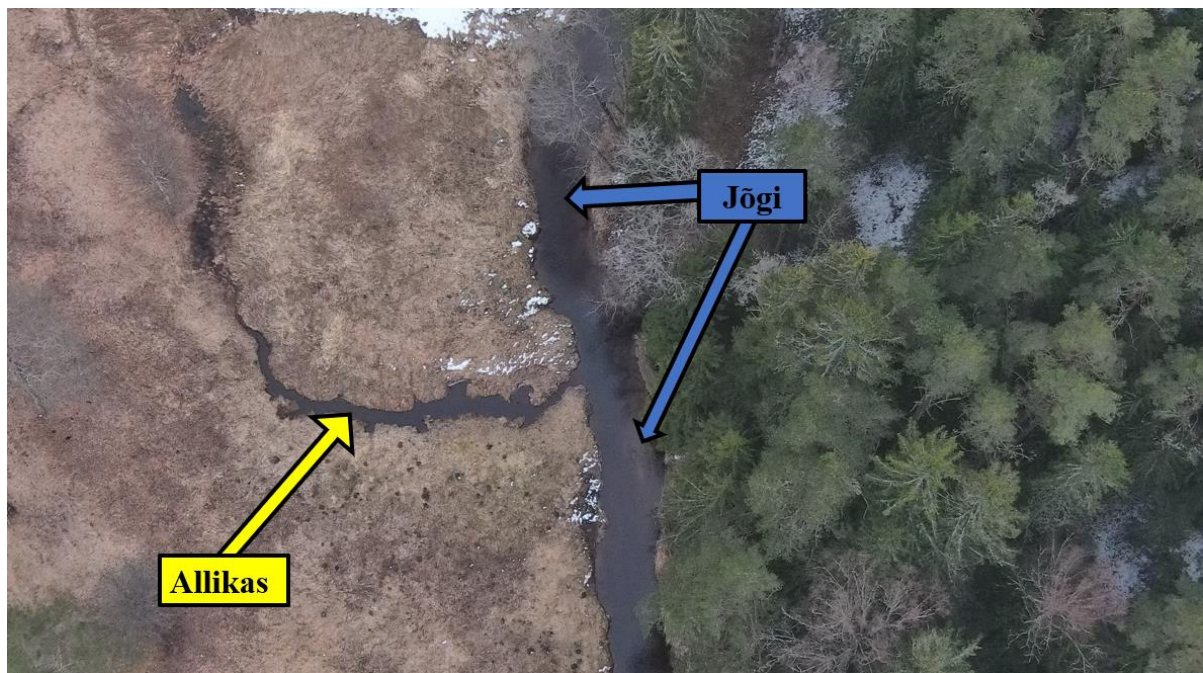
Kui allika vooluhulk on väike ja see on põhisängiga ühendatud, siis toimub allika- ja jõevee segunemine. Segunemise käigus tungib soojem jõevesi allikast algavasse kanalis. Suure allika korral näeme aga, et külmem allikavesi tungib soojema jõevee sisse (Joonis 26).

Jooniselt 29 ilmneb, et peale allika suubumist jõkke muutub jõe veetemperatuur 0,5-0,6°C soojemaks. Kuid see on ebaloogiline, sest allikavee segunemisel jõeveega, peaks temperatuur alanema, mitte tõusma. Antud termopilt on tehtud kaldus nurga all, mis põhjustab geomeetrilisi moonutusi. Selle tulemusena on ülemine osa pildist üldisest külmem, kuna see on sensorist kaugemal.



Joonis 28 ja 29. Termopilt (19.10.2022) enne (vasakul) ja pärast töötlust (paremal), kus põhjavee väljavool (SP1, SP2) tuleb paremini esile. Märkus: jõgi voolab pildidel ülevalt alla.

Jooniselt 30 on hästi ära tuntav allikas ning ka lõik Pudisoo jõest. Võrreldes eelnevate tavaliste piltidega on siin joonisel lund vähem.

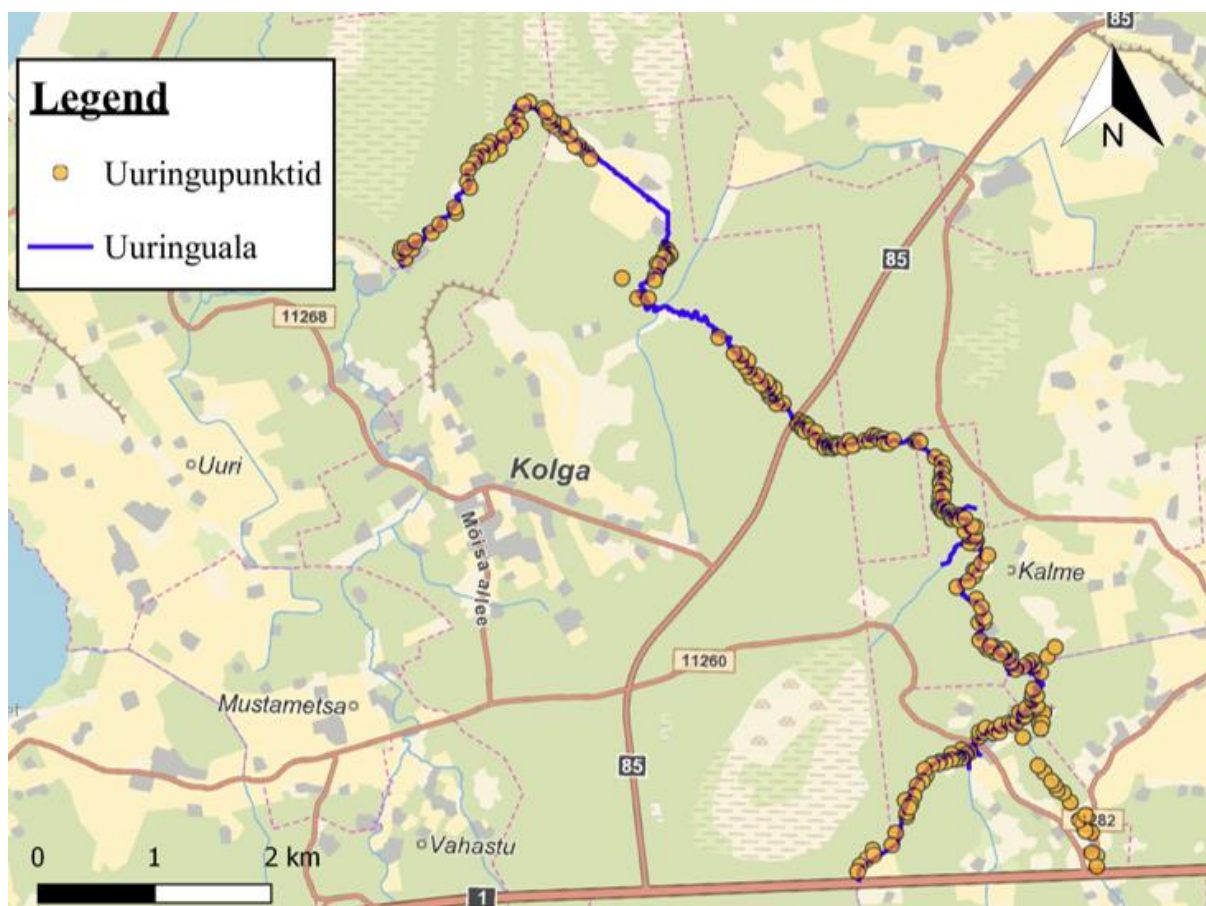


Joonis 30. Tavaline pilt (05.04.2023), kus allikas tuleb hästi esile. Märkus: Jõe voolusuund on ülevalt alla.

3.2 Põhjavee väljavoolude tüübid

Esialgsete termopiltide ja -videote analüüsi tulemusel saadi kokku 283 huvipakkuvat uuringupunkti (Joonis 31). Need punktid klassifitseeriti edasi I- ja II tüübiks ning juhul kui klassifitseerimine ei olnud võimalik nimetati punkt 'tundmatuks'. Seejärel võrreldi uuringupunktide esinemist mõlema lendamise jooksul. Töös võrreldakse punkte, mis olid olemas nii esimese kui ka teise lendamise ajal. Punktid, mis esinesid ainult esimesel või teisel seirel jäeti välja juhul, kui neid ei nähtud ka maapealsel seirel.

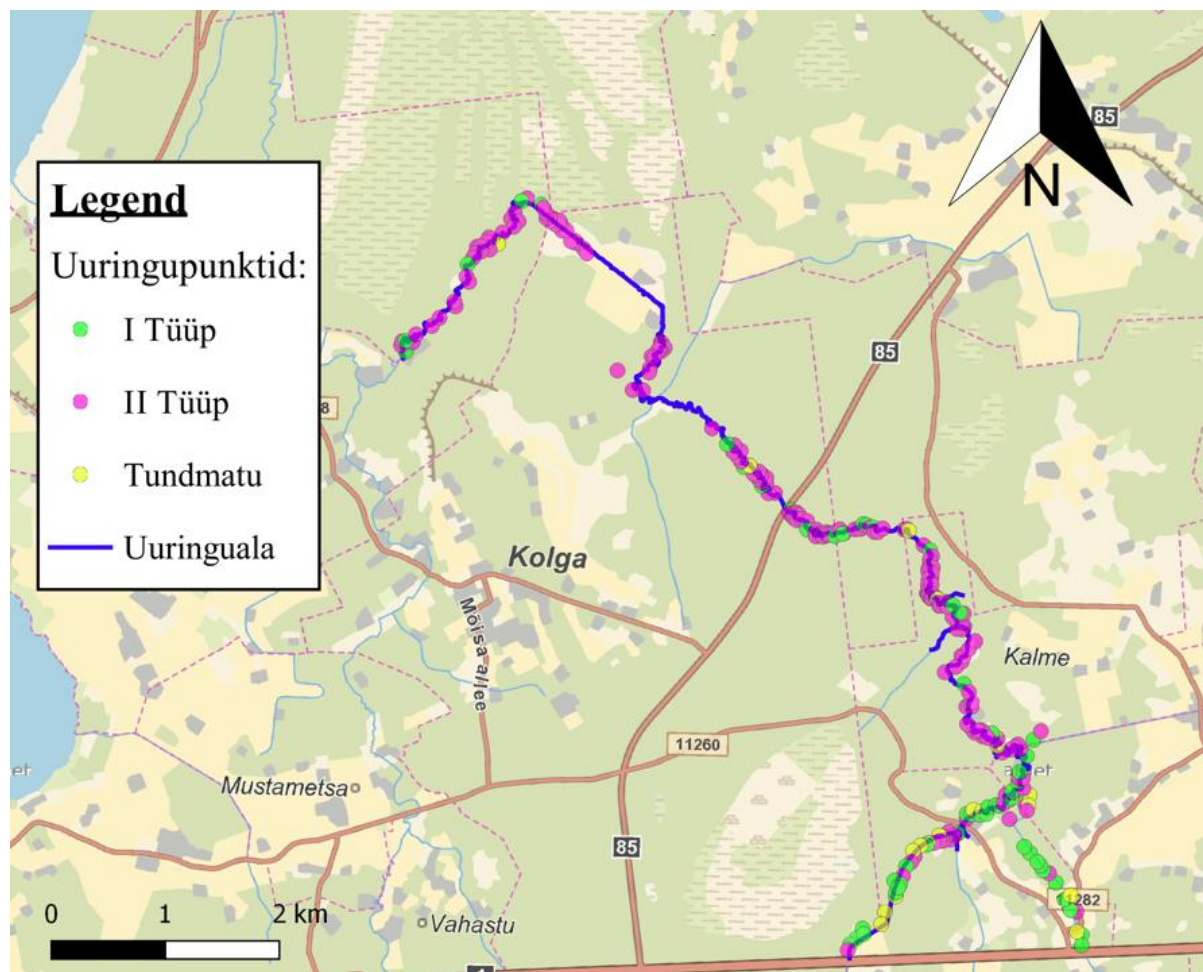
Jooniselt 31 ilmneb, et uuringuala on kokku 2 piirkonda, kust uuringupunkte ei leitud. Sirgel lõigul asetsev piirkond on tehislikult õgvendatud ja süvendatud parema äravoolu tagamiseks. Seetõttu näibki lõik ebaloomulikult sirge võrreldes ülejäänud uuringualaga. Teisel piirkonnal mängis suurt rolli väga tihe taimestik ja metsastumine, mis muutis allikate leidmise raskemaks.



Joonis 31. Drooniga lendamistel saadud termopiltide analüüsil saadud huvipakkuvad uuringupunktid (Aluskaart: Maa-amet, 2022).

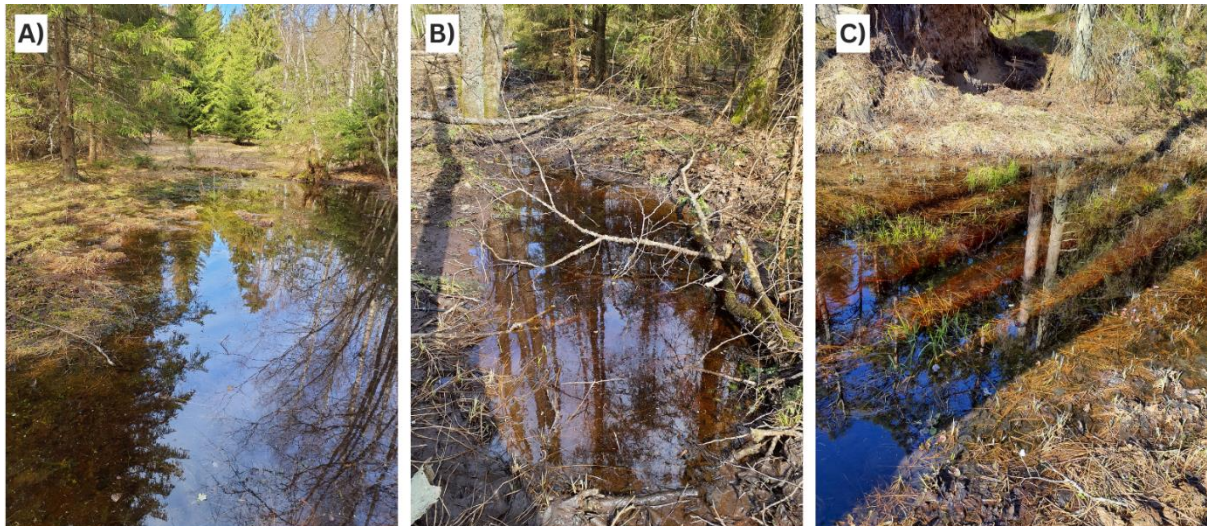
Kui vaadata uuringupunktide jagunemist tüüpide kaupa kaardipildis (Joonis 32), siis näeme, et I tüüp domineerib rohkem lõunapoolses uuringualas. Põhjapoolses uuringualas leidub

peamiselt ainult II tüüpi uuringupunkte ja ainult paar I tüüpi uuringupunkte. Kokku saadi 59 I-tüüpi, 205 II-tüüpi ja 19 tundmatut uuringupunkti.



Joonis 32. Drooni andmetest saadud uuringupunktide jagunemine tüüpide alusel (Aluskaart: Maa-amet, 2022).

Termovideoid ja -pilte analüüsidest täheldati kahte tüüpi allikaid – väiksemad alad jõe lähedal ja väiksed ojad, mis suubusid jõkke. Joonisel 33 on toodud näited I tüübist. I tüüpi allikad on väiksemad veega täidetud alad, mis asetsesid kas kohe jõe ääres või natukene eemal. Välitööde käigus avastati, et mõned uuringupunkti puudusid sealt, kus kaardipildis eeldati nende olemasolu. See viitab asjaolule, et osad allikad võivad kuivemal perioodil ära kuivada ning niiskematel aegadel taas olemas olla.



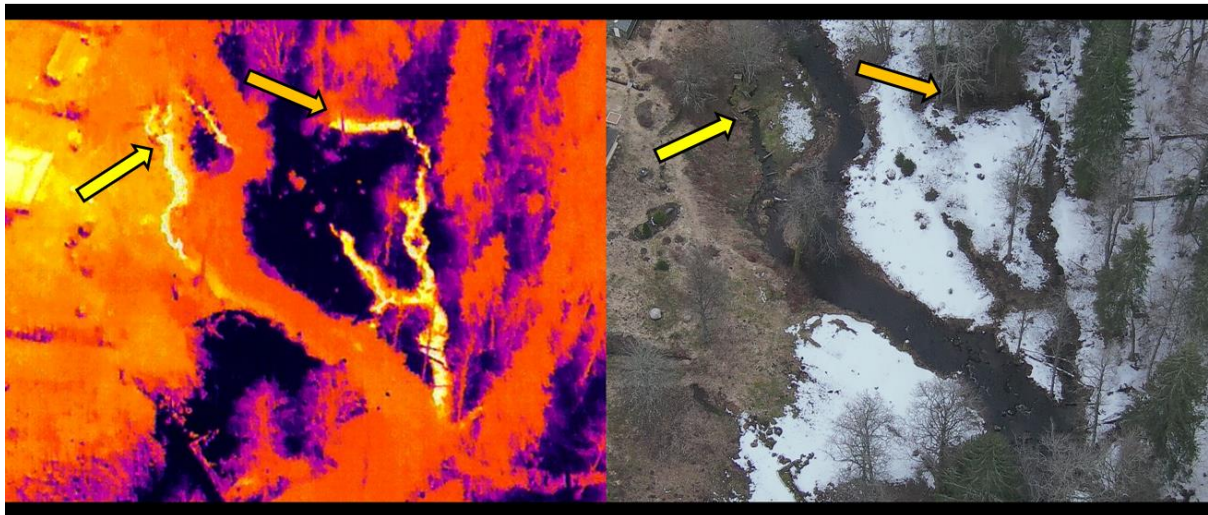
Joonis 33. I tüüpi allikad. Pildid on tehtud autori poolt 19-20.04.2023.

Joonisel 34 on esindatud II tüüpi allikad. Tegemist on allikast algava väiksema ojaga, mis suubub Pudisoo jõkke. Vältööde ajal olid osad ojad ära kuivanud ning nendest punktidest mõõtmisi ei olnud võimalik teha. Seega puuduvad kuivanud ojade kohta andmed.



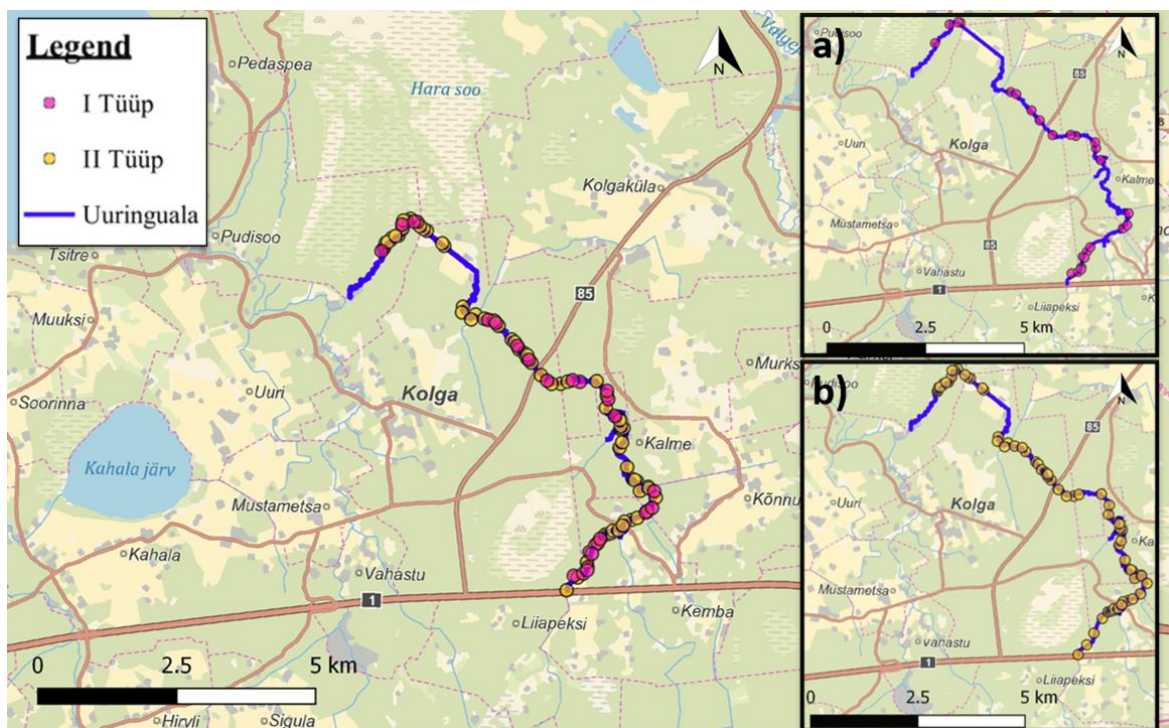
Joonis 34. II tüüpi allikad, mis suubuvad Pudisoo jõkke. Märkus: voolu suund on pildil ülevalt alla. Pildid on tehtud autori poolt 19-20.04.2023.

Kui vaadata II tüüpi allikat termopildilt kui ka tavaliselt pildilt (Joonis 35) näeme, et mõlemal pildil tulevad allikad selgelt esile. Pudisoo jõkke suubuv oja on jõest märgatavalt soojem. Sellest võib eeldada, et allikas on pärit sügavamalt pinnasest ning seetõttu on see ka jõe-veest soojem. Lisaks on märgata, et lumikate on allikate ümbruses ära sulanud ning allikate algus- ja suubumiskohad on hästi nähtavad.



Joonis 35. II tüüpi allikad termopildil (05.04.2023) (vasakul) ja tavalisel pildil (05.04.2023) (paremal). Allikate alguspunktid on markeeritud kollase ja oranži nooltega. Märkus: jõe voolusuund on pildil ülevalt alla.

Joonisel 36 on toodud mõlema allikatüübi esinemine uuringualal ning eraldi on välja toodud, kus I või II tüüp domineerib. Välitööde käigus ilmnas, et I tüüpi allikad esinesid aladel, kus oli vähem metsastumist ning rohkem heinamaad. Seevastu leidsid II tüüpi allikaid erinevatel maastikualadel.

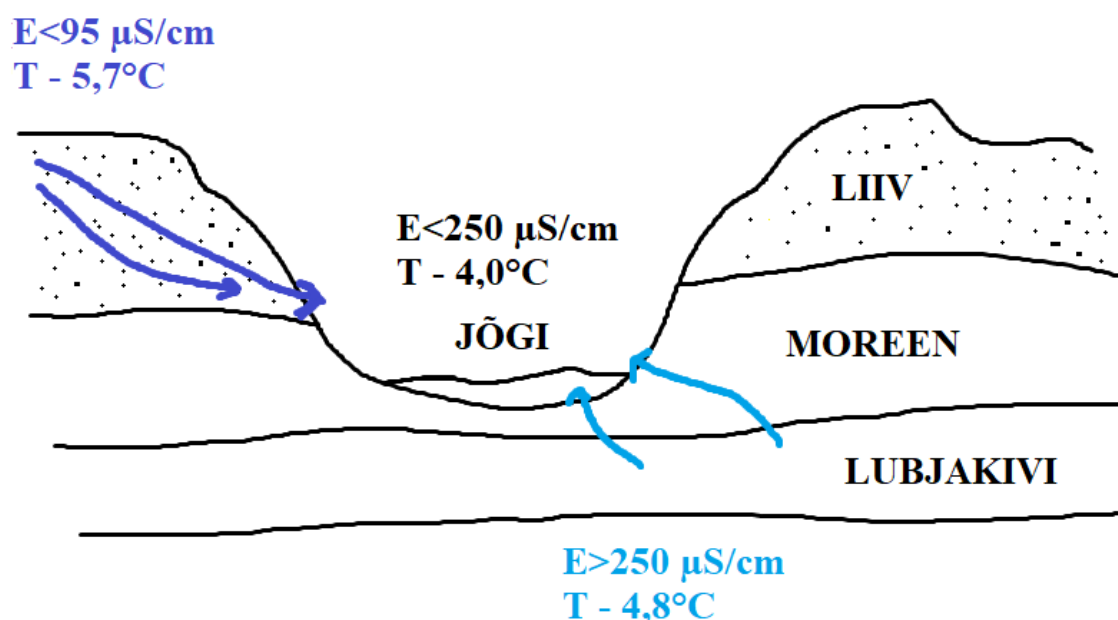


Joonis 36. Allikate tüüpide levik uuringualal, kus joonisel a) on toodud I tüüpi ja b) II tüüpi allikad (Aluskaart: Maa-amet, 2022).

3.3 Elektri juhtivus

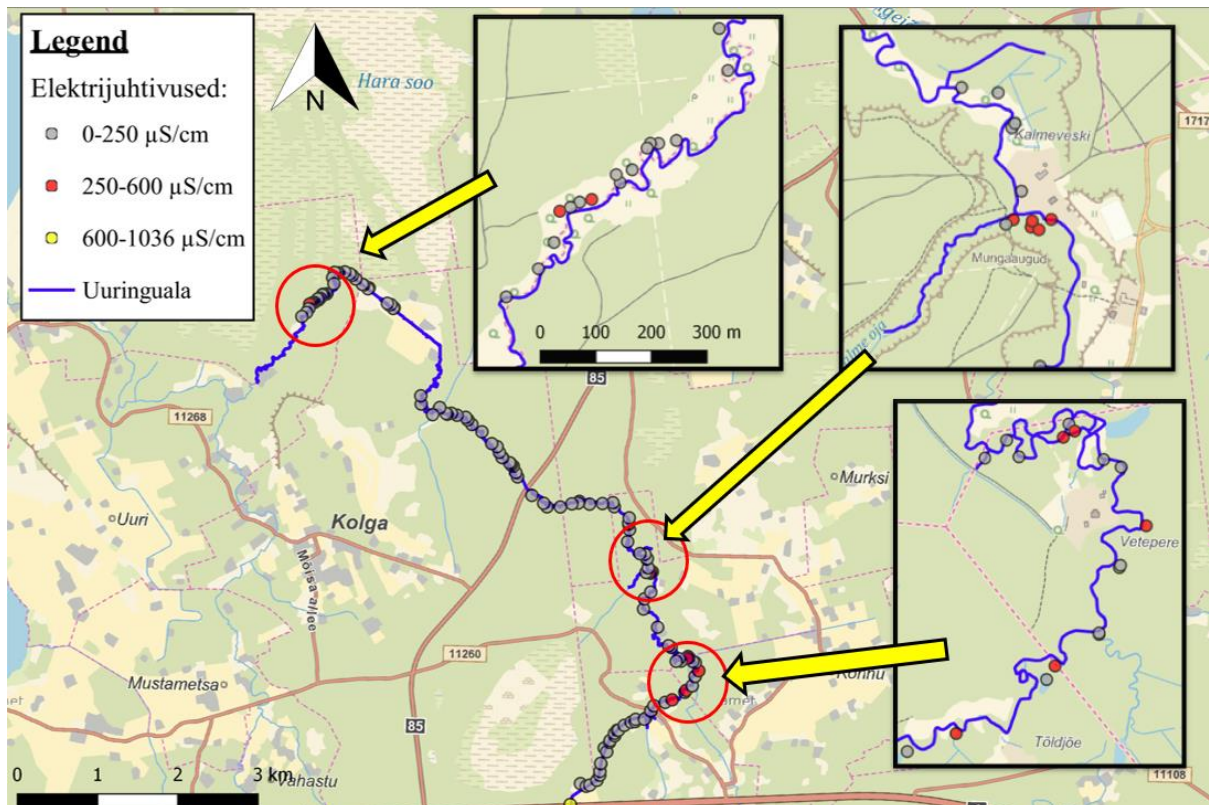
Allikad saab liigitada vastavalt **lange-** ja **tõusuallikaks** (Joonis 37). Siin uuringualal leidub mõlemat tüüpi allikaid. Langeallika (tumesinine joon) puhul liigub vesi nõlva kaudu läbi liiva ja moreeni kihi, enne kui jõuab jõeni. Seda tüüpi allikatele on iseloomulik väike elektri juhtivus. Tõusuallika (helesinine joon) puhul jõuab vesi allikani kaugemalt, läbides moreeni ja võibolla ka lubjakivikihti, mis üldiselt suurendab vee elektri juhtivust.

Joonisel 37 on toodud välja langeallikad, kus elektri juhtivus jääb alla 95 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ning vee temperatuur on keskmiselt u 5,7°C. Pudisoo jõe elektri juhtivus on vahemiku 95-250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ning keskmiseks temperatuuriks on 4,0°C. Tõusuallikad paistavad silma suurema elektri juhtivusega, kus väärtus on suurem kui 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ning keskmine temperatuur on 4,7°C.



Joonis 37. Tumesinise joonega on toodud langeallikas ja helesinisega tõusuallikas, kus on esitatud ka keskmised elektri juhtivuse (E) ja temperatuuriväärtused (T) Pudisoo jõe näitel.

Saadud elektri juhtivuse tulemused jäid vahemikku 24,7–1036 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Jooniselt 38 ilmneb, et uuringualal esineb kolm piirkonda, kus elektri juhtivuse väärtused on märkimisväärselt suuremad kui teistes piirkondades. Need piirkonnad on Raudsilla, Kalmeveski ja Vetepere. Suuremate väärtuste alla kuuluvad kõik väärtused, kus elektri juhtivus on suurem kui 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Selliseid punkte kokku oli 136-st uuringupunktist 12 ca 16,9 kilomeetri pikkusel lõigul.



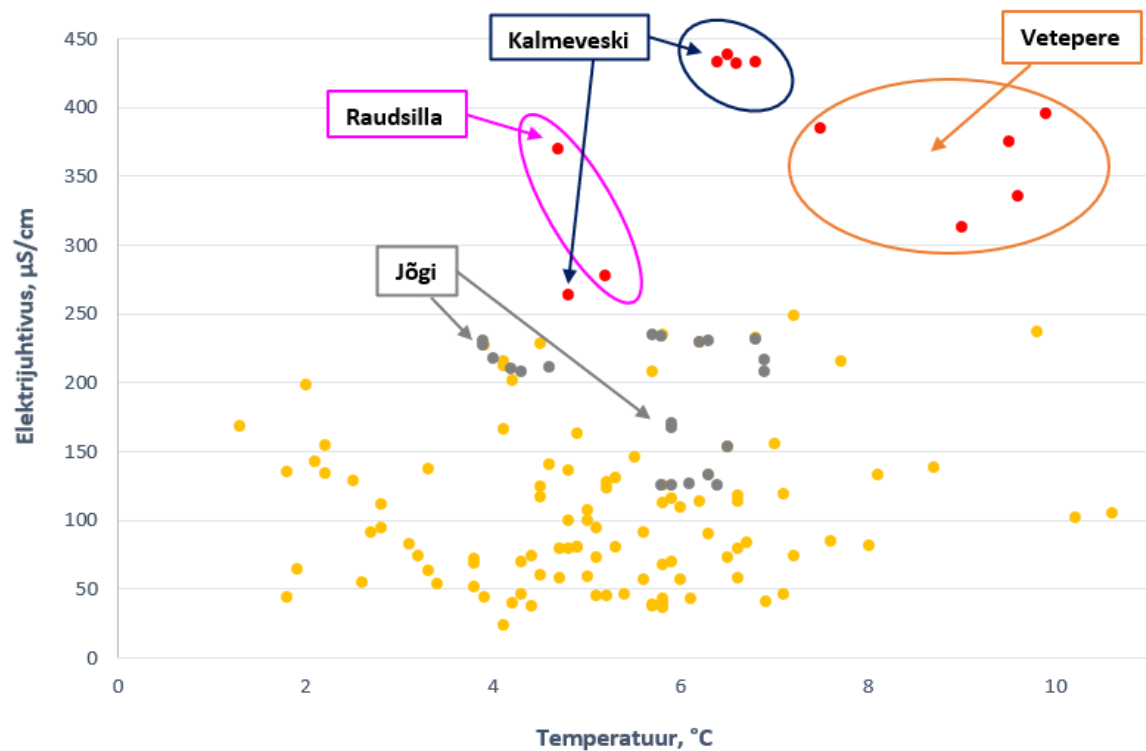
Joonis 38. Uuringualale on märgitud elektrijuhtivuse klasside kaupa uuringupunktid, kus mõõdeti elektrijuhtivust. Märkus: jõe voolusuund on lõunast põhja suunas ning kõik sisse suurendatud alad kasutavat sama skaalat (Aluskaart: Maa-amet, 2022).

Üks anomaalselt kõrge elektrijuhtivusega näit saadi Pudisoo jõe ülemjooksu allikast (Joonis 39), mis jäi kohe Tallinn-Narva maantee kõrvale (Joonis 38, kollane punkt). Seal mõõdeti elektrijuhtivuseks 1036 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ning ojasängis oli ohtralt näha raudhüdroksiide. Kõrge elektrijuhtivus võib olla seal osaliselt olla ka teehoolduseks kasutatavate soolade mõjust, sest allikas oli Tallinn-Narva teekraavis.



Joonis 39. Tallinn-Narva teekraavis olev suure raua sisaldusega allikkas. Pildi autor: Marko Kohv.

Joonisel 40 on toodud välitööde käigus mõõdetud allikate ja jõe (hallid punktid) elektrijuhtivuse väärtused. Välja toodud on kolm suuremate elektrijuhtivuse väärtustega piirkonda: Vetepere, Kalmeveski ja Raudsilla (vt Joonis 38). Näeme, et igale piirkonnale on eristatavad elektrijuhtivuse väärtustest ja vee temperatuuridest alusel.



Joonis 40. Uuringupunktide elektrijuhtivuse sõltuvus temperatuurist, kuhu on lisatud kolme suurima elektrijuhtivusega piirkonnad (Vetepere, Kalmeveski, Raudsilla). Hallid punktid markeerivad jões mõõdetud punkte.

4. Arutelu

Käesoleva töö üheks eesmärgiks oli kaardistada põhjavee väljavoolu Pudisoo jões kasutades selleks pinna- ja põhjavee temperatuuride ning elektrijuhtivuste erinevusi. Saadud tulemused sarnanevad varasemalt tehtud töödega, kus töös kasutatud meetod sobib väga hästi põhjavee väljavoolude kaardistamiseks. Droonile kinnitatud termokaamera abil saab andmed kätte kiiresti ja odavamalt võrreldes mehitatud õhusõidukiga või ainult maapealsete töödega võrreldes. 2016. aastal jõudsid Lee ja teised samale järeldusele, et mehitatud õhusõiduki asemel drooni kasutamine võimaldab andmete kiiret analüüsi ning, et lennukõrguse muutmise korral saab termopilti teha erinevatelt kõrgustelt maapinnast.

Talvel või varakevadel, kui taimestik ei ole veel täielikult välja arenenud ja põhjavesi on pinnaveest tunduvalt soojem, tulevad põhjavee väljavoolud selgemalt jões ja selle vahetus läheduses esile. Siiski, võib tihe taimestik ja metsastumine raskendada põhjavee väljavoolude kaardistamist, sest termokaamera ei näe puust läbi. Nii siin töös kui ka Briggs *et al.* (2022) uuringus raskendas tihe taimestik kohati andmete saamist. Tulevikus, kui peaks tekkima vajadus seda piirkonda lähemalt uurida, siis võiks kasutada selleks maapealseid, käes hoitavaid termokaameraid.

Nii Harvey *et al.* (2019) kui ka käesolevas töös leiti, et kui põhjavee temperatuur on sarnane aastase keskmise pinnatemperatuuriga, siis temperatuuride erinevus termopiltidel on väga väike.

Antud magistritöö käigus töödeldi termopilte ning seejärel analüüsiti saadud pilte suhteliste temperatuuride alusel. Absoluutseid temperatuure termopiltide analüüsil ei kasutatud, sest see nõuaks termokaamera täpset kalibreerimist, kuid samuti tuleks arvestada ka mõõdetava objekti, termokaamera iseärasuste ning ümbritseva keskkonnaga. Seetõttu keskenduti allika-jõe temperatuurierinevustele, sest see võimaldas kohest võrdlust termopildil olevate vee temperatuuride vahel. Harvey *et al.* (2019) kasutasid samat meetodit põhjavee väljavoolude ja pinnaveetemperatuuride iseloomustamiseks. Nemad said enda uuringus allika-jõe temperatuurierinevuseks ligikaudu 1°C, siin töös saadi jäi temperatuurierinevused vahemikku 0,4-1,9°C. Seega, on mõlemas töös saadud temperatuurierinevused sarnased. Selles töös oli mõõdetav temperatuurierinevus mõjutatud drooniga lendamise aastaajast, kuid ka sellest, kas termopilt oli tehtud kaldus nurga alt või otse-alli vaates.

Töö käigus leiti, et kõige täpsem ja efektiivsem on teha termopilt otse-alla vaates, sest vastasel juhul võivad temperatuuriandmed olla eksitavad. Siin töös kasutatud kaldus nurga all tehtud termopildil (Joonis 29) on pildi ülemine osa tunduvalt külmem alumisest osas. See on põhjustatud sensori ja objekti vahelisest kauguse suurest erinevusest pildi alumises ja ülemises osas.

Lisaks droonilt saadud termopiltide analüüsile mõõdeti ka maapinnalt vee elektrijuhtivusi. Selle tulemusel saadi ülevaade uuringualal asuvatest suurimate elektrijuhtivustega piirkondadest. Samuti jagati allikad elektrijuhtivuse tulemuste alusel lange- ja tõusuallikaks. Langeallikatele oli iseloomulik madal elektrijuhtivus ($<95 \mu\text{S}/\text{cm}$) ning tõusuallikatele kõrge elektrijuhtivus ($>250 \mu\text{S}/\text{cm}$). Kohalike elanike suulistel andmetel on just suuremad tõusuallikad kuivaperioodidel jões olulised ja kohati ka ainukeseks veeandjaks, samas kui langeallikad kuivaperioodidel kaovad ja niisketel aegadel on jälle olemas. Aastaringse stabiilse väljavooluga tõusuallikad pakuvad varjupaika jahedaveelistele liikidele, näiteks lõhilastele. Sellisele järeldusele jõudis ka Casas-Mulet *et al.* (2020), kuid erinevalt nende tulemustest, ei paiknenud põhjavee väljavoolud Pudisoo jões ebaühtlaselt.

Mõõdetud elektrijuhtivuse tulemused näitasid, et suurimad väärtused jagunesid uuringualal kolme piirkonda: Vetepere, Kalmeveski ja Raudsilla. Vetepere ja Kalmeveski piirkonnas on pinnakatte paksus väga õhuke, mis tähendab, et aluspõhi on kõrgel ja osati isegi (ca 500 m pikkune lõik Kalmeveskist ülesvoolu) jõe põhjas nähtav. See soodustab tõusuallikate esinemist, sest allikas saab otse aluspõhjast jõkke voolata. Ka Raudsilla piirkonnas tundub aluspõhi olevat maapinnale lähedal ning kohati on aluspõhja uuristatud ka nn koopasaunad, mis võimaldavad põhjavee voolamist allikatena jõkke.

Edasist uurimist vajab veel allikatest lähtuva põhjavee väljavoolu osakaal Pudisoo jõe üldises veebilansis. Selleks saab kasutada erinevaid meetodeid, muuhulgas näites püsiseirejaamadest kogutavad elektrijuhtivuse aegridasid (Stewart *et al.*, 2007). Lisaks vajab ka edasist uurimist ka allikate ja üldise geoloogilise ehituse seose selgitamine uuringualal.

Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli kaardistada põhjavee väljavoole Pudisoo jõel kasutades selleks termokaamerat droonil ja samuti maapealsete mõõtmiste abil saadud elektrijuhtivusi. Töö käigus töödeldi termopilte, mille tulemusel kasutati allika-jõe temperatuurierinevusi põhja-, sademe- ja jõevee eristamiseks. Termopiltide andmeid täiendasid maapealsed elektrijuhtivuse mõõtmised, mis võimaldas kaardistada keskmisest jõeveest suurema elektrijuhtivusega ($>250 \mu\text{S/cm}$) kui ka väiksema elektrijuhtivusega ($<95 \mu\text{S/cm}$) allikate esinemispiirkonnad. Selle abil kirjeldati allikate paiknemisi uuringualal ning samuti hinnati vastavalt allika tüübile nende vooluhulka kahe erineva drooni lendamise käigus kogutud andmete kui ka maapealsete välitööde käigus saadud andmete põhjal.

Töö tulemuste põhjal tehti järgnevad järeldused:

1. Droonile kinnitatud termokaamera abil **saab kaardistada põhjavee väljavoole**. See meetod on kõige efektiivsem talvel või varakevadel, kui on miinuskraadid, sest siis tuleb soojem põhjavesi selgemalt nähtavale külmemas pinnaveekogus. Lisaks leiti, et nendel aastaaegadel on taimestik täielikult välja arenemata, mistõttu ei sega lehestik põhjavee väljavoolude õhust kaardistamist.
2. Töös kasutati allika-jõe temperatuurierinevuste saamiseks samalt kaadril saadud suhtelisi temperatuuriväärtused. Termopiltide analüüsil saadi allika-jõe temperatuurierinevuseks temperatuuride vahemik $0,4-1,9^{\circ}\text{C}$. See väärtus sõltus suuresti sellest, kas termopilt oli tehtud kaldus nurga alt või otse-alla vaates.
3. Juhul, kui põhjavee temperatuur on sarnane aastase keskmise pinnatemperatuuriga, mis Eesti puhul nii on, siis on termopildilt saadavate jõe- ja põhjavee temperatuuride erinevus väga väike.
4. Allikate analüüsil leiti, et Pudisoo jõel leidub nii **lange-** kui ka **tõusuallikaid**. Tõusuallikad on aastaringi stabiilsema vooluhulgaga, mistõttu pakuvad need põhjavee väljavoolud olulist varjupaika jahedaveelistele liikidele, näiteks lõhilastele. Käesoleva töö uuringualalt leiti kokku tõenäoliselt sügavamatest põhjaveekihtidest toituvat 12 tõusu- ning tõenäoliselt uuringu ajal peamiselt lumesulamisveest toituvat 53 langeallikat.
5. Suurimad elektrijuhtivuse (kõik allikad, kus elektrijuhtivus $> 250 \mu\text{S/cm}$) väärtused jagunesid uuringualal kolmeks kindlaks piirkonnaks: Vetepere, Kalmeveski ja

Raudsilla. Allikad on koondunud nendesse piirkondadesse, sest õhukese pinnakatte tõttu on aluspõhi jõe põhja lähedal või kohati tuleb ka lausa jõe põhjas nähtavale ning seetõttu saab põhjavesi aluspõhjast otse jõkke voolata.

Summary

Using thermal camera to locate groundwater discharge areas in the Pudi-soo river, Estonia

This master's thesis aimed to map groundwater discharge areas in the Pudi-soo river using a drone-mounted thermal camera and also utilizing electrical conductivity measurements that were obtained from ground-based measurements. This allowed us to enable the mapping of source regions with higher electrical conductivity ($>250 \mu\text{S}/\text{cm}$). This was used to describe the springs in the study area and also to assess their flow rate based on the data collected during the flights of two different drones and, depending on the springs type.

The following conclusions can be drawn from the results:

1. A thermal camera attached to a drone can be used to map groundwater discharge areas in the Pudi-soo river. It is recommended to use the method either in winter or early in the spring to maximize the temperature contrast between warm groundwater and colder surface water. Similarly, the vegetation coverage is at a minimum in the winter and early in the spring, which provides ideal conditions for mapping groundwater discharge areas in the river.
2. If the groundwater temperature is similar to the annual average surface temperature, which is the case in Estonia, then the temperature difference between the river and groundwater obtained from thermal images is very small.
3. As a result of the analysis of thermal images, the range of $0,4\text{--}1,9^\circ\text{C}$ was obtained for the temperature difference between the groundwater and the river. This was largely dependent on whether the thermal image was taken from an oblique angle or a straight-down view.
4. The analysis of the springs found that in the Pudi-soo river there are both limnocrene and rheocrene springs. Limnocrene springs have a more stable flow throughout the year, so these groundwater outflows provide an important refuge for cool-water species such as salmonids. A total of 12 springs likely deriving from deeper groundwater layers and 53 springs that are likely fed by snowmelt water during the study were found.
5. The highest values of electrical conductivity (all springs with electrical conductivity $> 250 \mu\text{S}/\text{cm}$) were divided into three specific areas in the study area: Vetepere, Kalmeveski and Raudsilla. The springs are concentrated in these specific areas because of the high placement of the bedrock (which at some point is visible from the rivers

bottom) and due to the thin surface cover the groundwater can flow directly from the bedrock into the river.

Kasutatud materjalid

Abolt C, Caldwell T, Wolaver B, Pai H. 2018. Unmanned aerial vehicle-based monitoring of groundwater inputs to surface waters using an economical thermal infrared camera. *Optical Engineering*, 57(05): 1. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.5.053113>.

Baker EA, Lautz LK, McKenzie JM, Aubry-Wake C. 2019. Improving the accuracy of time-lapse thermal infrared imaging for hydrologic applications. *Journal of Hydrology*, 571: 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.053>.

Briggs MA, Jackson KE, Liu F, Moore EM, Bisson A, Helton AM. 2022. Exploring Local Riverbank Sediment Controls on the Occurrence of Preferential Groundwater Discharge Points. *Water*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 14(1): 11. <https://doi.org/10.3390/w14010011>.

Casas-Mulet R, Pander J, Ryu D, Stewardson MJ, Geist J. 2020. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Based Thermal Infra-Red (TIR) and Optical Imagery Reveals Multi-Spatial Scale Controls of Cold-Water Areas Over a Groundwater-Dominated Riverscape. *Frontiers in Environmental Science*, 8.

Corrigan, F. 2020. 10 Thermal Vision Cameras For Drones And How Thermal Imaging Works. Vaadatud: 23.04.2023, <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/9-heat-vision-cameras-for-drones-and-how-thermal-imaging-works/>

DJI Enterprise. 2022. The Basics of Thermal Drones. Vaadatud: 10.04.2023, <https://enterprise-insights.dji.com/blog/thermal-drone-basics>

DJI. 2021. Mavic 2 Enterprise Advanced: User Manual v1.0. Vaadatud: 09.04.2023, https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_2_Enterprise_Advanced/20210331/Mavic_2_Enterprise_Advanced_User_Manual_EN.pdf

DJI. 2022. ZENMUSE H20N: User manual v1.4. Vaadatud: 09.04.2023, https://dl.djicdn.com/downloads/Zenmuse_H20N/UM/20221124/Zenmuse_H20N_User_Manual_en_v1.4.pdf

Dugdale SJ, Kelleher CA, Malcolm IA, Caldwell S, Hannah DM. 2019. Assessing the potential of drone-based thermal infrared imagery for quantifying river temperature heterogeneity. *Hydrological Processes*, 33(7): 1152–1163. <https://doi.org/10.1002/hyp.13395>.

Dugdale SJ, Klaus J, Hannah DM. 2022. Looking to the Skies: Realising the Combined Potential of Drones and Thermal Infrared Imagery to Advance Hydrological Process Understanding in Headwaters. *Water Resources Research*, 58(2): e2021WR031168. <https://doi.org/10.1029/2021WR031168>.

Dronerush. 2023. DJI Matrice 300 RTK. Vaadatud 24.04.2023, <https://www.dronerush.com/product/dji-matrice-300-rtk/>

Döpfer V, Gränzig T, Kleinschmit B, Förster M. 2020. Challenges in UAS-Based TIR Imagery Processing: Image Alignment and Uncertainty Quantification. *Remote Sensing. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 12(10): 1552. <https://doi.org/10.3390/rs12101552>.

Gade R, Moeslund TB. 2014. Thermal cameras and applications: a survey. *Machine Vision and Applications*, 25(1): 245–262. <https://doi.org/10.1007/s00138-013-0570-5>.

Goddijn-Murphy L, Williamson BJ, McIlvenny J, Corradi P. 2022. Using a UAV Thermal Infrared Camera for Monitoring Floating Marine Plastic Litter. *Remote Sensing. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 14(13): 3179. <https://doi.org/10.3390/rs14133179>.

Harvey MC, Hare DK, Hackman A, Davenport G, Haynes AB, Helton A, Lane JW, Briggs MA. 2019. Evaluation of Stream and Wetland Restoration Using UAS-Based Thermal Infrared Mapping. *Water. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 11(8): 1568. <https://doi.org/10.3390/w11081568>.

Havens KJ, Sharp EJ. 2016. *Thermal Imaging Techniques to Survey and Monitor Animals in the Wild*. Academic Press: Boston. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03312-6>

Hayashi M. 2004. Temperature-Electrical Conductivity Relation of Water for Environmental Monitoring and Geophysical Data Inversion. *Environmental Monitoring and Assessment*, 96(1): 119–128. <https://doi.org/10.1023/B:EMAS.0000031719.83065.68>.

Heliguy™ Blog. 2022. In-depth Guide To Thermal Imaging. Vaadatud: 17.05.2023, <https://www.heliguy.com/blogs/posts/guide-to-thermal-imaging>

Jõelet, A. 2023. Suulised andmed. Tartu, 24. Märts.

Kelly J, Kljun N, Olsson P-O, Mihai L, Liljeblad B, Weslien P, Klemedtsson L, Eklundh L. 2019b. Challenges and Best Practices for Deriving Temperature Data from an Uncalibrated UAV Thermal Infrared Camera. *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11(5): 567. <https://doi.org/10.3390/rs11050567>.

Keskkonnaagentuur. 2022. Kliimakaardid: aastane keskmine õhutemperatuur 2022. Vaadatud: 18.05.2023, <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/aastakokkuvotted/>

Keskkonnaagentuur. 2023. Kliimakaardid: aastane keskmine õhutemperatuur 2021. Vaadatud: 18.05.2023, <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/aastakokkuvotted/>

Keskkonnaportaal. 2022. Pärlijõgi / Pudisoo jõgi. Vaadatud: 14.04.2023, <https://register.keskkonnaportal.ee/register/body-of-water/8380270>

Kuhn J, Casas-Mulet R, Pander J, Geist J. 2021. Assessing Stream Thermal Heterogeneity and Cold-Water Patches from UAV-Based Imagery: A Matter of Classification Methods and Metrics. *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 13(7): 1379. <https://doi.org/10.3390/rs13071379>.

Lee E, Yoon H, Hyun SP, Burnett WC, Koh D-C, Ha K, Kim D, Kim Y, Kang K. 2016. Unmanned aerial vehicles (UAVs)-based thermal infrared (TIR) mapping, a novel approach to assess groundwater discharge into the coastal zone. *Limnology and Oceanography: Methods*, 14(11): 725–735. <https://doi.org/10.1002/lom3.10132>.

Luximon A, Chao H, Goonetilleke RS, Luximon Y. 2022. Theory and applications of InfraRed and thermal image analysis in ergonomics research. *Frontiers in Computer Science*, 4.

Manullang MCT, Lin Y-H, Lai S-J, Chou N-K. 2021. Implementation of Thermal Camera for Non-Contact Physiological Measurement: A Systematic Review. *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 21(23): 7777. <https://doi.org/10.3390/s21237777>.

Marruedo Arricibita AI, Dugdale SJ, Krause S, Hannah DM, Lewandowski J. 2018. Thermal infrared imaging for the detection of relatively warm lacustrine groundwater discharge at the surface of freshwater bodies. *Journal of Hydrology*, 562: 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.004>.

McKellar AE, Shephard NG, Chabot D. 2021. Dual visible-thermal camera approach facilitates drone surveys of colonial marshbirds. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(2): 214–226. <https://doi.org/10.1002/rse2.183>.

Messina G, Modica G. 2020. Applications of UAV Thermal Imagery in Precision Agriculture: State of the Art and Future Research Outlook. *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 12(9): 1491. <https://doi.org/10.3390/rs12091491>.

Opgal. 2018. Intro to IR (Part 3): Sensitivity, Resolution and Frame Rate. Vaadatud: 23.04.2023, <https://www.opgal.com/blog/thermal-cameras/intro-to-ir-part-3-sensitivity-resolution-and-frame-rate/>

Pai H, Malenda HF, Briggs MA, Singha K, González-Pinzón R, Gooseff MN, Tyler SW, Team the A. 2017. Potential for Small Unmanned Aircraft Systems Applications for Identifying Groundwater-Surface Water Exchange in a Meandering River Reach. *Geophysical Research Letters*, 44(23): 11,868-11,877. <https://doi.org/10.1002/2017GL075836>.

Rajmanova P, Nudzikova P, Vala D. 2015. Application and Technology of Thermal Imagine Camera in Medicine. *IFAC-PapersOnLine*, 48(4): 492–497. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.07.083>.

Spaan D, Burke C, McAree O, Aureli F, Rangel-Rivera CE, Hutschenreiter A, Longmore SN, McWhirter PR, Wich SA. 2019. Thermal Infrared Imaging from Drones Offers a Major Advance for Spider Monkey Surveys. *Drones*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 3(2): 34. <https://doi.org/10.3390/drones3020034>.

Stander R, Walker DJ, Rohwer FC, Baydack RK. 2021. Drone Nest Searching Applications Using a Thermal Camera. *Wildlife Society Bulletin*, 45(3): 371–382. <https://doi.org/10.1002/wsb.1211>.

Stewart M, Cimino J, Ross M. 2007. Calibration of base flow separation methods with streamflow conductivity. *Ground Water*, 45(1): 17–27. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00263.x>.

Tarin, M. (i. k.). *What is NETD in a thermal camera?* Vaadatud: 10.04.2023, <https://movitherm.com/knowledgebase/netd-thermal-camera/>

Tarin, M. (2021). *Understanding Emissivity: The Key to Accurate Temperature Measurements*. Vaadatud: 10.04.2023, <https://movitherm.com/knowledgebase/what-is-emissivity/>

Teledyne FLIR. 2020. Can Thermal Imaging See Through Fog and Rain? Vaadatud: 23.04.2023, <https://www.flir.eu/discover/rd-science/can-thermal-imaging-see-through-fog-and-rain/>

Teledyne FLIR. 2021. Picking a Thermal Color Palette. Vaadatud: 17.04.2023, <https://www.flir.eu/discover/industrial/picking-a-thermal-color-palette/>

Terasmaa J, Vainu M, Koit O, Puusepp L, Sisask, K, Abreldaal P. 2020. Juhend allikate vabatahtlikuks seireks. Vaadatud 17.05.2023, https://allikad.info/manuals/water_quality_manual_EST.pdf

Villa E, Arteaga-Marrero N, Ruiz-Alzola J. 2020. Performance Assessment of Low-Cost Thermal Cameras for Medical Applications. *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 20(5): 1321. <https://doi.org/10.3390/s20051321>.

Xiong K, Jiang J, Pan Y, Yang Y, Chen X, Yu Z. 2022. Deep Learning Approach for Detection of Underground Natural Gas Micro-Leakage Using Infrared Thermal Images. *Sensors*, 22: 5322. <https://doi.org/10.3390/s22145322>.

Xylem Analyctis. 2018. pH/Cond 3320 operating manual ba77054d03. Vaadatud: 23.04.2023, https://www.xylemanalytics.com/en/File%20Library/Resource%20Library/WTW/01%20Manuals/ba77054e03_3320_pH-Cond.pdf

Yuan W, Hua W. 2022. A Case Study of Vignetting Nonuniformity in UAV-Based Uncooled Thermal Cameras. *Drones*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 6(12): 394. <https://doi.org/10.3390/drones6120394>.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Karmen Vits,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose **„Soojuskaamera abil põhjavee väljavoolude uurimine Pudisoo näitel“**, mille juhendaja on Marko Kohv, 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 Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, 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. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Karmen Vits

19.05.2023