

Maalämpökaivojen vaikutus pohjaveteen

Valtteri Kanninen

Geologia

Pro gradu -tutkielma

Laajuus: 30 op

18.6.2026

Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pääaine: Geologia, maaperägeologia

Tekijä(t): Valtteri Kanninen

Otsikko: Maalämpökaivojen vaikutus pohjaveteen

Ohjaaja(t): Antti Ojala, Eila Hietaharju, Teppo Arola (GTK)

Sivumäärä: 77 sivua + 2 liitettä

Päivämäärä: 18.6.2026

Maalämmön tiedetään vaikuttavan pohjavesiin, mutta tutkimusaihe on vielä uusi ja aikaisempaa tutkimustietoa aiheesta on saatavilla Suomessa rajoitetusti. Tämä tutkimus selvittää, vaikuttavatko maalämpöjärjestelmät lähellä sijaitsevien pohjavesialueiden lämpötilaan. Useat kaupunginkehityshankkeet ovat kiinnostuneita maalämmöstä, sillä maalämmön laajempi käyttöönotto vähentäisi kaupunkien CO₂-päästöjä ja edistäisi osaltaan kaupunkien asettamia hiilineutraalisuustavoitteita.

Tässä tutkimuksessa läpikäydään useamman kunnan pohjavesialueita, joista on olemassa aikaisemmin mitattuja lämpötilahavaintoja. Tutkimusalueeksi valikoitui Varsinais-Suomen harjujakso, joka alkaa Pyhärannan kunnan alueelta ja jatkuu katkeamattomana Kaarinan kaupunkiin saakka. Pohjaveden seurannan lämpötilamittaukset kerättiin Suomen ympäristökeskuksen Hertta-palvelusta, josta havaintoja löytyi neljän kunnan, eli Mynämäen, Maskun, Naantalín ja Turun alueelta.

Lämpötilamittauksista tehtiin kuvaajia, jotka visualisoivat lämpötilan kehitystä eri pohjavesiputkissa. Lämpötilan kehitystä verrattiin ilman lämpötilan kehitykseen, ja lisäksi pohjavesialueista selvitettiin, onko alueilla olemassa maalämpöjärjestelmiä.

Pohjavesialueiden tulokset vaihtelivat paljon. Maskun tuloksissa kehityssuunta oli nouseva, ja tilastollinen analyysi vahvisti havainnot useimmissa tapauksissa. Merkittäviä lämpötilapoikkeamia ei havaittu. Mynämäen tuloksissa lämpötilat vaihtelivat voimakkaasti ja selvää kehityssuuntaa ei ollut havaittavissa. Naantalín tulokset olivat nousevia kuten Maskun tapauksessa, mutta kehityksen suunta oli vaikeammin havaittavissa. Turun tulosten kehityssuunnat vaihtelivat voimakkaasti ja tuloksissa ei ollut yhteneväsyyttä.

Tulokset osoittivat, että vaihtuvat mittauspäivämäärät, aikaisemmat mittaukset ja puutteellinen tieto maalämpöjärjestelmien olemassaolosta vaikeuttivat yhtenäisten johtopäätösten tekoa. Pohjavesistä oli kuitenkin nähtävissä yleistä lämpötilan nousua, joka vastaa yleistä keskilämpötilan nousua maailmassa ja Suomessa. Parempia tuloksia saisi itsetehdyillä mittauksilla, mittauspäivien vakinaistamisella sekä tutkimusalueiden valitsemisella tunnettujen maalämpökokonaisuuksien lähelle.

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	5
2. Maalämpö ja sen sovellukset	7
2.1. Maalämpö	7
2.2. Maalämpöjärjestelmät	13
2.3. Maalämmön keräysjärjestelmät.....	14
2.4. Maalämmön lämmönsiirtonesteet.....	14
2.5. Maalämpöjärjestelmien vaikutus pohjaveteen	15
2.6. Ympäristön vaikutus pohjaveteen.....	16
3. Tutkimusalueet.....	18
3.1. Mynämäen pohjavesialueet (Motelli ja Hiivaniitty)	21
3.2. Maskun pohjavesialue (Humikkala-Alho).....	24
3.3. Naantalin pohjavesialue (Lietsala).....	28
3.4. Turun pohjavesialueet (Munittula ja Lentokenttä)	30
4. Tutkimusaineisto	34
5. Menetelmät.....	36
6. Tulokset	39
6.1. Humikkala-Alho (Masku).....	39
6.1.1. Kankaisten Golf (Hp 2).....	39
6.1.2. Humikkala-Alho (PV301).....	40
6.1.3. Humikkala-Alho/Kankaisten Golf (Hp 4).....	42
6.2. Hiivaniitty (Mynämäki)	42
6.3. Motelli (Mynämäki).....	44
6.4. Lietsala (Naantali)	45
6.4.1. Aurinko_Golf_PVP10 (PVP10).....	45
6.4.2. Aurinko_Golf_PVP11 (PVP11)	47
6.5. Lentokenttä (Turku).....	48
6.5.1. Lentokenttä (PVP C)	48
6.5.2. Lentokenttä (PVP E)	51

6.6. Munittula (Turku).....	53
6.6.1. Lentokenttä (1 C).....	53
6.6.2. Lentokenttä (2 C).....	56
6.6.3. Lentokenttä (3 C).....	59
6.6.4. Lentokenttä (PVPA_2020).....	61
6.6.5. Lentokenttä (PVP H).....	63
6.6.6. Lentoasema (PVP J).....	65
6.7. Yhteenveto tuloksista	66
7. Tulosten tulkinta.....	68
7.1. Maskun tulokset.....	68
7.2. Mynämäen tulokset.....	69
7.3. Naantalin tulokset	69
7.4. Turun tulokset	70
8. Johtopäätökset	71
9. Kiitokset.....	72
10. Lähdeluettelo	73

1. Johdanto

Maalämmön hyödyntäminen energiantuotannossa on nopeasti kasvava ala, mitä pidetään hyvänä vaihtoehtona tavallisille, fossiilisia polttoaineita hyödyntäville energianlähteille. Maalämpö muodostuu Auringon säteilyn ja maapallon sisäisen lämmöntuotannon yhteisvaikutuksesta ja sitä voidaan hyödyntää, kun lämpöenergia saadaan siirrettyä nesteeseen energiantuotantoa varten. (Banks, 2012).

Lämmitykseen liittyvät CO₂ -päästöt ovat merkittävä osa Suomen kaupunkien vuosittaisia kasvihuonepäästöjä, ja maalämmön hyödyntäminen lämmityksessä vähentäisi näitä vuosittaisia kasvihuonepäästöjä merkittävästi. Maalämpö on kuitenkin lämmitysmenetelmänä uudehko ja varsinkin sen pitkäaikaiset vaikutukset ympäristöön ovat vielä melko tuntemattomia.

Tämä pro gradu -tutkimus selvittää maalämpökaivojen mahdollista vaikutusta pohjaveden lämpötilaan. Tutkimus toteutetaan Turun yliopiston ja Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) yhteistyönä osana käynnissä olevaa kaupunkien hiilineutraalisuushanketta (Turun kaupunki, 2024). Hankkeessa kaupungit pyrkivät toiminnassaan siihen, että hiilidioksidipäästöjen ja hiilinielujen päästösumma on korkeintaan nolla aikaisintaan vuonna 2029. Päättökysymyksen lisäksi tämä tutkimus selvittää, vaikuttavatko muut tekijät, kuten ilman lämpötila tai muu ihmistoiminta, pohjaveden lämpötilaan. Mittauksista myös selvitetään, onko saman pohjavesialueen mittauksissa havaittavissa merkittäviä alueellisia eroja.

Pohjavesi, jota hyödynnetään usein talous- ja juomavedeksi, sijaitsee suhteellisen lähellä maanpintaa ja ilman lämpötilan tiedetään vaikuttavan tämän syvyyden pohjavesien lämpötilaan. Esimerkiksi Arolan & Korkka-Niemen (2014) julkaisussa mainitaan, että pohjaveden keskilämpötila vakiintuu n. 8 m syvyydessä. Tätä matalammalla pohjaveden lämpötila on keskiarvoa matalampi keväisin ja keskiarvoa korkeampi syksyisin. Lisäksi pohjavesiputkien sijainti vaikuttaa keskilämpötilaan, sillä kaupunkialueilla tehdyt mittaukset olivat keskimäärin 1,3 °C – 2,0 °C lämpimämpiä. Lisäksi kaupunkien keskusta-alueen pohjavesien keskilämpötilat saattavat olla jopa 3,0 °C – 4,0 °C korkeammalla kuin maaseudulla (Arola & Korkka-Niemi, 2014). Pohjavesille annettujen korkeiden laatuvaatimusten takia pohjavesialueille rakentaminen on tarkasti ohjeistettua ja maalämpöjärjestelmien rakentaminen kyseisille alueille on aina luvanvaraista (Juvonen & Lapinlampi, 2013).

Tämän tutkimuksen painopiste keskittyy Varsinais-Suomen harjuvyöhykkeellä sijaitseville pohjavesialueille. Harjujakso alkaa Kaarinan ja Turun alueelta ja jatkuu Maskun, Mynämäen ja Laitilan läpi päättyen Pyhärannan kunnan alueelle. (GTK, 2026). Tutkimuksen pääaineistona pohjaveden laadun ja lämpötilan tarkastelulle toimii Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämän Hertta-palvelun pohjavesidata. Tiettyjen pohjavesialueiden lämpötilan kehitystä on seurattu aikaisintaan vuodesta 2000 ja näistä lämpötilamittauksista tehdään päätelmiä mahdollisista vaikutuksista, jotka näkyvät pohjavedessä.

2. Maalämpö ja sen sovellukset

2.1. Maalämpö

Geoterminen energia on Auringon säteilyenergian ja maapallon endotermisten eli sisäisten prosessien tuottamaa lämpöä, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi ihmisasutuksessa, maataloudessa sekä erilaisissa teollisuusprosesseissa (Banks, 2012). Termejä geoterminen energia ja maalämpö käytetään joskus vaihtelevasti samasta ilmiöstä, ja esimerkiksi Euroopan Unionin uusiutuvan energian direktiivi 2009/29/EY viittaa geotermisellä energialla ”maankamaraan lämmön muodossa varastoituneeseen energiaan”. Tässä tutkimuksessa käytetään käsitettä maalämpö, ja sillä viitataan matalan syvyyden geotermiseen energiaan, jota hyödynnetään maalämpöpumppujen avulla ihmistoiminnassa, varsinkin pienissä kotitalouksissa. Maalämpö, jota tällaisissa syvyyksissä hyödynnetään, on pääasiassa alle 200 m syvyydessä ja se muodostuu pääasiassa Auringon lämpöenergian varastoitumisesta maa- ja kallioperään (Banks, 2012). Lisäksi enintään n. 100 m syvyydessä maalämpöön vaikuttaa myös kaupunkialueiden hukkalämpö ja ilmaston nouseva keskilämpötila (Bayer *et al.*, 2016).

Kuten yllä mainittu, geoterminen energia muodostuu maapallon sisäisten prosessien sekä Auringon säteilyn yhteisvaikutuksesta. Maan muodostumisen residuaali- eli jäännöslämpö sekä radionuklidien hajoaminen muodostavat geotermistä energiaa maapallon kerrosrakenteessa (Banks, 2012). Suurin lämmönlähde on maapallon mantteli eli vaippa, joka on n. 84 % maapallon tilavuudesta ja tuottaa n. 77 % sisäisestä geoenergiasta. Kuori on tilavuudeltaan vain n. 2 %, mutta tuottaa silti jopa n. 19 % maapallon sisäisestä geoenergiasta. Käänteisesti, maapallon ydin on tilavuudeltaan n. 16 %, mutta tuottaa vain n. 4 % hyödynnettävästä geoenergiasta (Banks, 2012).

Maapallon sisäinen geoenergia siirtyy Banksin (2012) mukaan ylempiin kerroksiin pääasiassa konduktoimalla tai konvektiovirtausten kautta. Lämmön konduktio eli johtuminen tarkoittaa, että lämpöenergia siirtyy maapallon kerrosrakenteessa aineen sisällä. Konvektio taas tarkoittaa, että lämpö siirtyy väliaineen mukana kohti maapallon pintaosia. Kivimateriaalista koostuva maapallon rakenne käyttäytyy pitkällä aikavälillä nestemäisesti varsinkin manttelin alaosissa, vaikka se ei olekaan täysin sulanutta (Banks, 2012).

Geotermiset anomaliat mahdollistavat geotermisen energian tai maalämmön hyödyntämisen alueilla, joilla se olisi muuten kannattamatonta. Tällaisia tektonisia ympäristöjä ovat:

1. Ekstensionaaliset vyöhykkeet, jossa mannerlaatat liikkuvat poispäin toisiinsa nähden. Tällaisia alueita löytyy esimerkiksi valtameren keskiselänteillä, Afrikan suuresta hautavajoamasta ja Rein-joen vajoamalaaksosta. Näissä sijainneissa geoterminen gradientti on korkea ja hyödynnettävää lämpöenergiaa voi löytyä jo matalalta syvyydeltä (Banks, 2012).
2. Törmäävien laattojen ympäristö, jossa raskaampi merellinen laatta ja kevyempi mantereellinen laatta kohtaavat. Raskas merellinen laatta subduktoituu eli työntyy mantereisen laatan alle ja alkaa vajota kohti astenosfääriä. Merellisen kuoren vesipitoisuus oikeissa lämpö- ja paineolosuhteissa aiheuttaa osittaista sulamista. Tämän osittaisen sulamisen takia nouseva magma eli nk. diapiirit lävistävät yllä olevan kallioperän ja aiheuttavat vulkanismia sekä geotermisiä vyöhykkeitä (Banks, 2012).
3. Manttelipluomit, joissa kuumaa kivimateriaalia nousee syvältä manttelista. Nämä yleensä vain pienellä alueella esiintyvät kohteet muodostavat niin kutsuttuja kuumia pisteitä eli ”*hot spot*” -alueita. Kuumien pisteiden vaikutus voi vaikuttaa alueella geologisesti pitkällä aikavälillä ja esimerkiksi Havaijin saarikaari sekä Yellowstonen supertulivuori ovat esimerkkejä kuumien pisteiden aiheuttamasta vulkanismista (Banks, 2012).

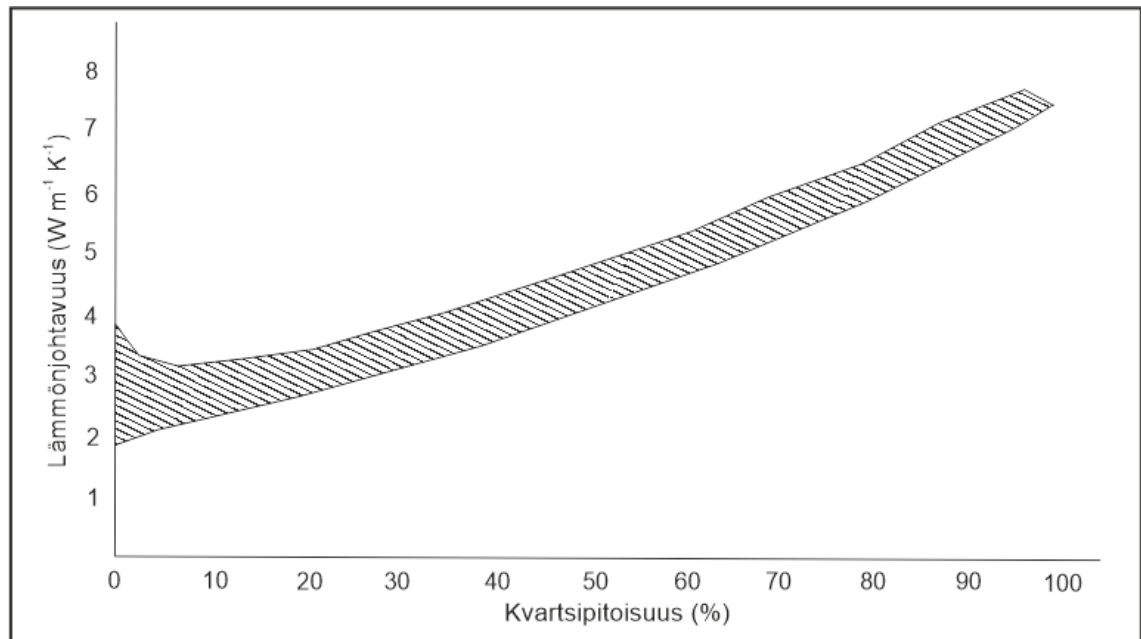
Näiden tektonisten anomalioiden lisäksi, pienempiä geotermisiä muutoksia voivat aiheuttaa:

1. Kivien vaihteleva lämmönjohtokyky. Epätavallisen korkeita geotermisiä gradientteja löytyy paksujen sedimenttipatjojen alta, jotka koostuvat muta- ja kalkkikivistä. Tällaisia alueita löytyy esimerkiksi Pariisista (Boyle, 2004) ja Southamptonista, Isosta-Britanniasta (Banks, 2012). Kivien ja maalajien lämmönjohtokykyä on esitetty alla olevassa taulukossa 1.

Taulukko 1. Kivien ja maalajien erilaisia lämmönjohtavuuksia. Sovitettu Cermak & Rybachin (1982) mukaan.

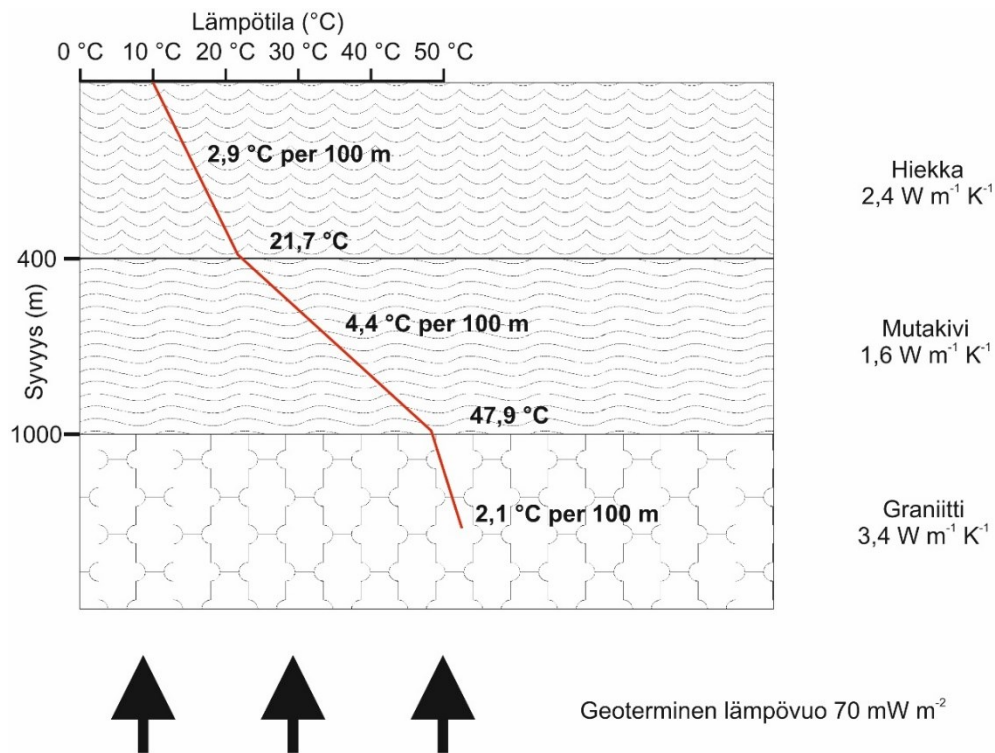
Kivi-/maalajityyppi	Kivi-/maalaji	Lämmönjohtavuus k ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
Magmakivi	Graniitti	3,05
Magmakivi	Granodioriitti	2,65
Magmakivi	Dioriitti	2,91
Magmakivi	Gabbro	2,63
Magmakivi	Basaltti	1,95
Magmakivi	Porfyry	2,82
Magmakivi	Diabaasi	2,64
Sedimenttikivi	Savikivi	2,46
Sedimenttikivi	Hiekkakivi	2,47
Sedimenttikivi	Kalkkikivi	2,29
Sedimenttikivi	Silttikivi	2,04
Sedimenttikivi	Merkelikivi	2,21
Sedimenttikivi	Anhydriitti	4,05
Metamorfinen kivi	Kvartsiitti	4,55
Metamorfinen kivi	Gneissi(t)	2,06–3,24
Metamorfinen kivi	Liuskekivet	2,91–3,80
Metamorfinen kivi	Amfiboliitti	2,46
Metamorfinen kivi	Eklogiitti	3,10
Maalaji	Meri- ja järvisedimentit	0,95
Maalaji	Savi	1,53
Maalaji	Hiekka	1,44

Taulukossa luetellut lämmönjohtavuudet ovat kivilajien keskiarvoja, ja lämmönjohtavuus voi vaihdella paljonkin riippuen kivilajista. Lämmönjohtavuuteen vaikuttavia tekijöitä on esimerkiksi vesipitoisuus, huokoisuus sekä mineraalikoostumus. Sundberg (1991) mainitsee esimerkiksi kvartsipitoisuuden, joka vaikuttaa lämmönjohtavuuteen positiivisesti. Tämä vaikutus näkyy alla kuvassa 1.



Kuva 1. Kvartsipitoisuuden vaikutus lämmönjohtavuuteen. Sovitettu Sundbergin (1991) kuvan mukaan (Liite 2).

Pienempi lämmönjohtavuus on merkittävä tekijä maalämpöä ajatellessa (Banks, 2012). Maapallon prosessien tuottaman lämpömäärän voidaan olettaa olevan samanlainen tietyssä, maalämpöä ajatellen hyödyntämättömässä syvyydessä. Tämä sama lämpömäärä nousee kohti maanpintaa hyödynnettäväksi ja lämpötila muuttuu eri tavalla tiettyä syvyyttä kohti erilaisissa materiaaleissa. Pienemmän lämmönjohtavuuden materiaaleissa, kuten savessa, hiekassa ja sedimenttikivissä, lämpötilagradientti on jyrkempi eli hyödynnettäviä lämpötiloja saavutetaan matalimmissa syvyyksissä (Banks, 2012). Lämmönjohtavuuden ja lämpötilan gradientin suhde on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. "Kakkumalli" lämmön siirtymisestä ja lämpötilagradientista eri maa- ja kivilajien kerroksissa. Sovitettu Banksin (2012) kuvan mukaan.

2. Tiettyjen kivilajien sisäinen lämmöntuotanto. Graniittisissa kivissä toriumin, kaliumin ja uraanin radioaktiivinen hajoaminen ja sulfidien kemiallinen hapettuminen aiheuttavat sisäistä lämmöntuotantoa. (Banks, 2012).

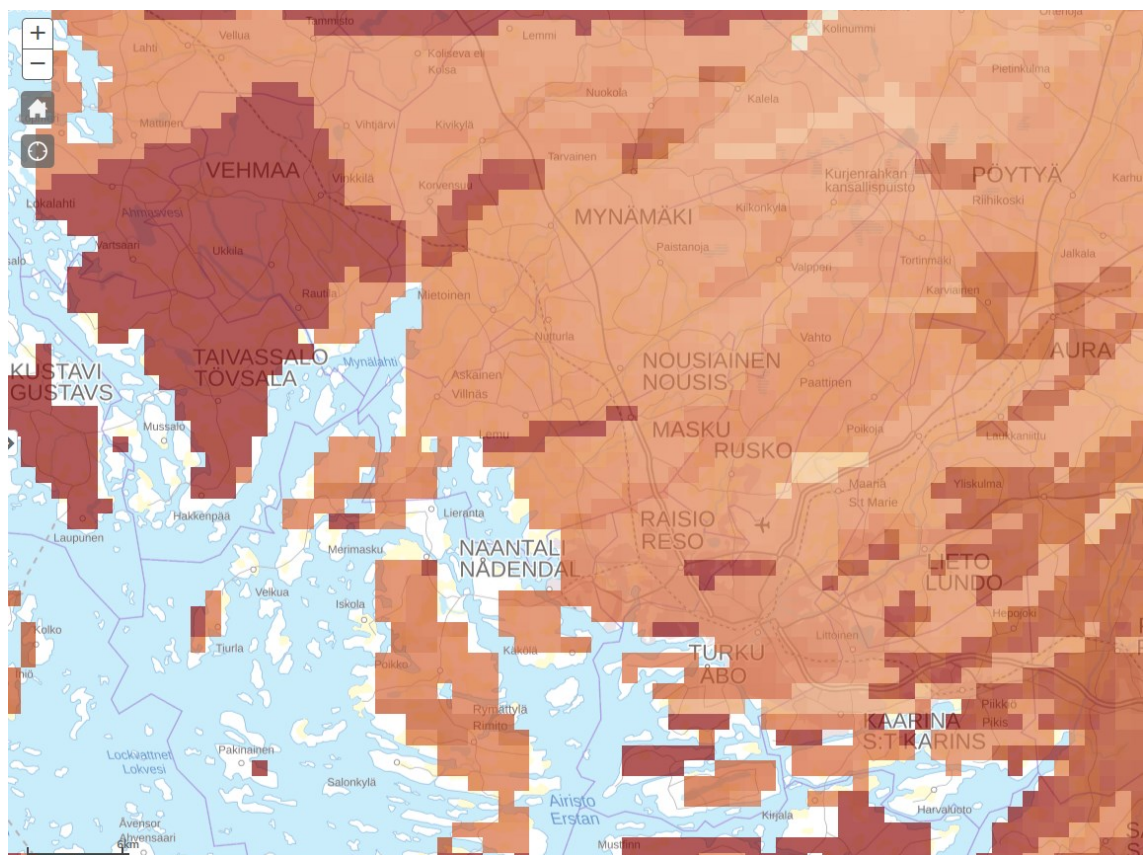
3. Pohjaveden virtaukset, joiden mukana lämpöä voi siirtyä merkittäviä määriä nopeasti uuteen sijaintiin. Geotermisiä anomalioita voi löytyä sijainneista, joissa rikkonaisuus ja rakovyöhykkeet aiheuttavat lämpimän pohjaveden siirtymisen syvemmältä kohti pintaa (Banks, 2012).

4. Ilmaston ja maaston muutokset. Lämpötilan muutos ja mittakaavaltaan pienemmät geologiset prosessit voivat muuttaa alueen geotermistä potentiaalia jopa ihmiselle lyhyessä ajassa. Kylmien sedimenttikerrosten vajoaminen viilentää alueen geotermistä lämpötilaa. Toisaalta jääkauden jälkeinen maankohoaminen, jonka nopeus voi olla useita senttimetrejä vuodessa, nostaa kuorensisäistä, lämmintä materiaalia kohti pintaa (Banks, 2012).

Banksin (2012) mukaan alle 200 m syvyydellä sijaitsevan maalämmön määrää voi lisätä joko luonnollisesti tai tarkoituksellisesti. Lämpötilaa lisää joko Auringon luonnollinen säteily, aurinkopaneeleiden avulla kerätty lämpö, jota voidaan siirtää suoraan maahan,

tai hukkalämpö, jota siirtyy esimerkiksi ilmastoinneista, sähköntuotannosta tai teollisista prosesseista (Banks, 2012).

Suomen suhteellisen kylmien olosuhteiden takia merkittävin matalaan geotermiseen energiaan eli maalämpöön vaikuttava tekijä on vuotuinen keskilämpötila. Maa- ja kallioperän keskilämpötila on keskimäärin kaksi astetta, mutta se vaihtelee maantieteellisen sijainnin mukaan. Lisäksi maa- ja kallioperän lämpötilaan vaikuttaa vuosittainen ilman lämpötila. Lämpötila kuitenkin vakiintuu n. 5–6 asteeseen 14–15 m syvyydessä (SYKE, 2009). GTK (2019) on kartoittanut matalan geotermisen energian potentiaalia Suomessa alle 300 metrin syvyydeltä. Geoenergiapotentiaalin paikkatiedon metadatatassa mainitaan, että kyseisen kartan arviot on luotu laskennallisesti, ja tähän arvioon vaikuttavia maalämpöön vaikuttavia tekijöitä ovat kallio- ja maaperä, ilman keskilämpötila, kallioperän tiheys ja maaperän paksuus (GTK, 2019). Esimerkkikuva matalan geoenergian potentiaalikartasta näkyy alla kuvassa 3.



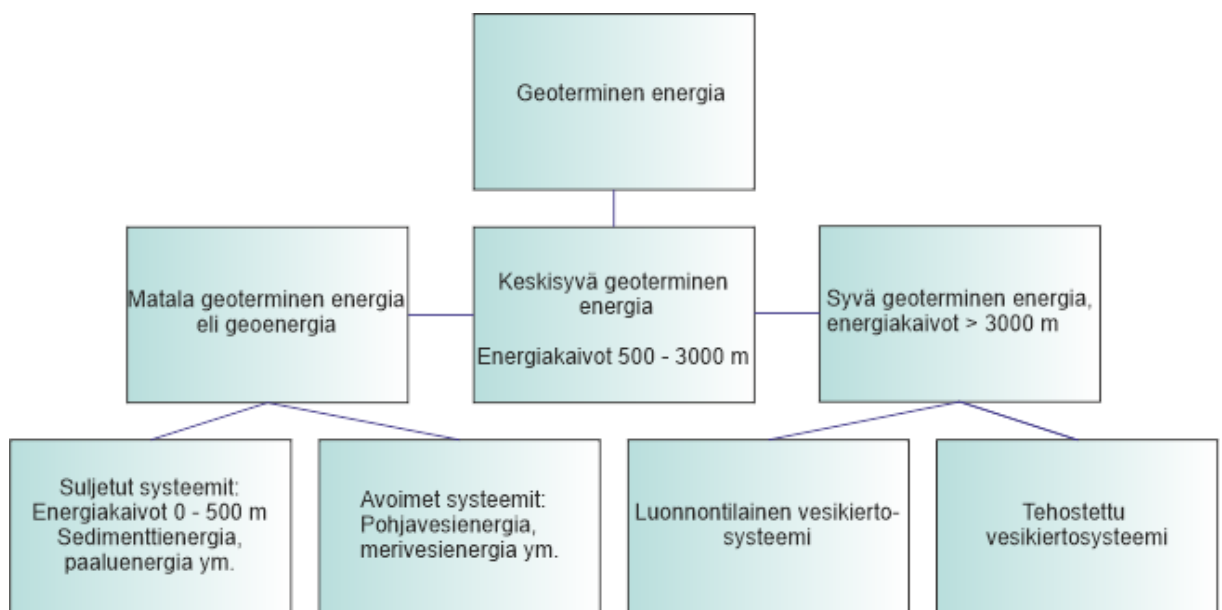
Kuva 3. Geoenergiapotentiaali 300 m syvyydessä Varsinais-Suomen alueelta. GTK Avoin lisenssi Nimeä CC 4.0, sisältää GTK:n 300 m geoenergiapotentiaalın aineistoa, irrotettu 14.6.2026 Maankamara-palvelusta.

Maalämpöä pidetään ympäristöystävällisenä vaihtoehtona ja se on luokiteltu uusiutuvaksi energianlähteeksi (Zhu *et al.* 2017). Maalämmön suosio on myös noussut

viime vuosien aikana juuri sen ympäristöystävällisyyden ja suurentuneen energiatarpeen takia. Maalämpöä voidaan käyttää varsinkin pientaloasutuksissa korvikkeena öljy- ja kaasulämmitykselle ja se voi vähentää hiilidioksidin (CO₂) päästöjä parhaimmillaan 18 % verrattuna kaasulämmitykseen ja jopa 35 % verrattuna öljylämmitykseen (Saner *et al.* 2010).

2.2. Maalämpöjärjestelmät

Maalämpöjärjestelmät voidaan jakaa Banksin (2012) mukaan korkean, keskikorkean ja matalan entalpian järjestelmiin, jotka maalämpöjärjestelmien tapauksessa viittaavat hyödynnettävän maalämmön lämpötilaan. Maalämpöjärjestelmät luokitellaan usein kuitenkin muulla tavalla, sillä lämpötilan luokkarajat eivät ole vakiintuneita ja eivät myöskään kerro maalämpöjärjestelmän mahdollisesta hyödyllisyydestä. Alla olevassa kuvassa 4 on esimerkki, miten geotermisen energian järjestelmät voidaan jakaa niiden toimintasyvyyden avulla.



Kuva 4. Geotermisen energian järjestelmät jaoteltuna toimintasyvyyden mukaan. Sovitettu Teppo Arolan (2026) palaute- ja kommenttiosuuden esimerkistä (Liite 1).

Geotermistä energiaa voidaan Banksin (2012) mukaan hyödyntää joko suoraan tai epäsuoraan. Suoraan hyödynnettävissä järjestelmissä fluidin lämpötila on yleensä

vähintään 150 °C ja nämä järjestelmät ovat yleisiä sähköntuotannossa. Korkean lämpötilan fluidi siirtyy alussa erottelijaan, jolla kostean höyryn tai vesi- ja höyryseoksen vesikomponentti saadaan eroteltua. Höyry siirtyy tämän jälkeen turbiiniin, jonka pyöriminen tuottaa sähkövirtaa. Lisäksi tällaisessa järjestelmässä on käytössä lauhdutin (nk. Condensing unit), jolla turbiinin läpi virrannut höyry muutetaan takaisin nesteeksi. Lauhduttimen läpi käynyt neste voidaan jäähdyttää tai sen lämpöenergia voidaan siirtää suoraan käyttöön. Suoria käyttökohteita ovat esimerkiksi kiinteistö- ja teollisuuslämmitys, uima-altaat sekä maatalouden lämmitystarpeet (Banks, 2012).

Kiinteistöissä matalaa geotermistä energiaa eli maalämpöä voidaan hyödyntää lämpöpumpputekniikan avulla. Kerättyä lämpöenergiaa käytetään ympärivuotisesti lämmittämiseen, jäähdyttämiseen sekä käyttöveden lämmittämiseen (Juvonen & Lapinlampi, 2013). Maalämpöjärjestelmä koostuu kolmesta osasta, joita ovat lämpöpumpun lisäksi siirtoputkisto ja keruupiiri. Keruupiiri asennetaan usein joko maata tai kallioperään, mutta se on mahdollista asentaa myös vesistön pohjasedimenttiin tai rakennuksen paaluihin eli niin kutsuttuihin energiapaaluihin.

2.3. Maalämmön keräysjärjestelmät

Tälle tutkimukselle oleelliset maalämpöjärjestelmät ovat matalan geoenergian järjestelmiä, joilla voidaan lämmittää pienasutusta ja eri kokoisia asuin- ja teollisuuskiinteistöjä (Banks, 2012). Suomessa tällaista maalämpöä kerätään esimerkiksi maalämpökaivon, vaakakeruupiirin tai energiapaalun avulla, yleensä alle 500 m syvyydestä (GTK, 2024).

Tutkimusalueella oletetusti tyypillisin maalämpöjärjestelmä on yllä mainittu maalämpökaivo, joka tunnetaan myös energiakaivona. GTK:n (2024) mukaan sitä voidaan hyödyntää sekä lämmitykseen että jäähdytykseen paikallisesti pienasutuksissa ja myös suuremmissa kiinteistöissä. Kaivon toimintaperiaate perustuu kaivon sisällä olevaan nk. U-putkeen, jossa on lämmönsiirtonestettä. Se sitoo maaperän lämpöä kiertäessään putkistossa, ja kerätty lämpöenergia siirtyy lämpöpumpulle maantasolla, jossa sitä voidaan hyödyntää tarpeitten mukaan (GTK, 2024).

2.4. Maalämmön lämmönsiirtonesteet

Maalämpöpumput, jotka hyödyntävät toimintaperiaatteessaan lämmönsiirtonesteitä, ovat myös käytössä Suomessa. Nykyisin yleisimmät käytössä olevat jäähdytysnesteet ovat joko etanoli- tai kaliumformiaattipohjaisia liuoksia. Suomessa on käytössä esimerkiksi kauppanimellä NATURET-etanolipohjainen maalämpöneste.

NATURET-maalämpöneste sisältää 28,0 % etanolia, minkä lisäksi liuokseen on lisätty 0,6 % propan-2-olia ja 0,6 % butanonia denaturointia varten (NATURET-käyttöturvallisuustiedote, 2021). Ruotsissa on käytössä Ignatowiczin *et al.* (2017) mukaan käytössä samantyyppinen etanolipohjainen vesiliuos, jossa denaturointiaineina on enintään 12 % propyyliä ja *n*-butyyliä. Edellä mainittujen etanolipohjaisten liuosten koostumus vastaa EU:n suosituksia sen myrkyttömyyden ja hyvien termofysikaalisten ominaisuuksien takia (Ignatowicz *et al.* 2017).

2.5. Maalämpöjärjestelmien vaikutus pohjaveteen

Maalämpöjärjestelmien on havaittu muuttavan pohjaveden lämpötilaa esimerkiksi Zhu *et al.* (2017) tekemässä tutkimuksessa eteläisessä Kiinassa. Pohjaveden lämpötilan muutos vaikuttaa monitahoisesti maaperän fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin, jotka liittyvät esimerkiksi veden haihtumisnopeuteen, liuenneen hapen määrään ja kemiallisten reaktioiden laatuun. Zhu *et al.* (2017) tekemässä tutkimuksessa usean vuoden lämmitys alueella pienentää pohjaveden lämpötilaa, mikä hidastaa tai jopa pysäyttää useiden kasvi- ja mikrobilajien kasvun maaperässä. Zhu *et al.* (2017) tekemässä tutkimuksessa seurattiin 40–150 m syviä maalämpökaivoja, jotka sijaitsivat vasta rakennettujen maalämpöjärjestelmien lähellä. Lopputuloksena jo n. 4 kuukauden aikana (marraskuu 2015 – maaliskuu 2016) lämpötila laski n. 1 °C jokaisen kaivon tapauksessa.

Suomessa maalämpöjärjestelmien vaikutusta pohjaveteen ja muuhun ympäristöön on tehty esimerkiksi GTK:n ympäristöriskitarkastelussa (Arola *et al.*, 2021). Maalämpökaivoilla on mahdollisuus vaikuttaa ympäristöön ja pohjaveteen koko sen elinkaaren aikana aina asennuksesta sulkemiseen asti, mutta riskejä pystytään minimoimaan oikeanlaisilla toimenpiteillä ja kattavilla selvityksillä. Kun maalämpökaivo on käytössä, merkittävin riski ympäristölle on mahdolliset lämmönsiirtonesteiden vuodot. Nykyisin Suomessa käytössä oleva lämmönsiirtoneste, etanolipohjainen liuos, on kuitenkin nopeasti biohajoava ja kertymätön (Zhang *et al.*, 2006). Vuotoja on rajoitettu lisäksi maalämpökaivon rakenteessa, sillä vuodon sattuessa nesteen kierto pysähtyy automaattisesti järjestelmässä. Muita, pienempiä riskejä Suomen maalämpökaivoissa on suolaisen veden tai pintaveden sekoittuminen pohjaveteen sekä mikrobiologiset

muutokset. Molemmissa tapauksissa haitat ovat kuitenkin hyvin paikallisia ja lyhytaikaisia (Arola *et al.*, 2021).

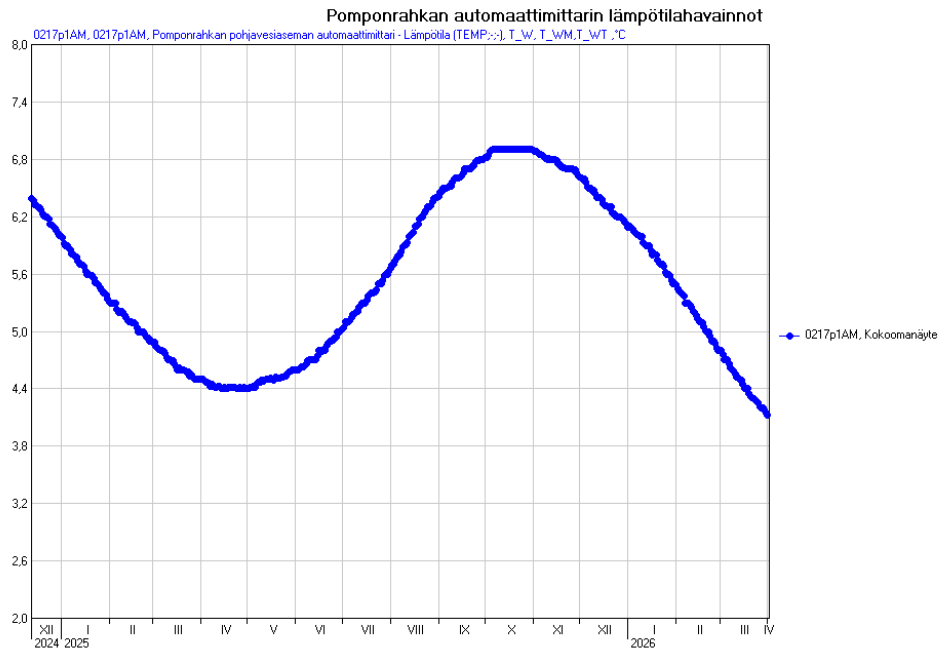
2.6. Ympäristön vaikutus pohjaveteen

Alueen geologia, sään vuodenaikaiset lämpötilan vaihtelut sekä ympäristö- ja ilmastomuutokset aiheuttavat usein merkittäviä vaihteluita pohjaveden laatuun ja lämpötilaan. Khan *et al.* (2025) mukaan tärkeimmät lämpötilaan vaikuttavat hydrogeologiset ominaisuudet ovat akviferin sijaintisyvyys, maankamaran permeabiliteetti eli läpäisevyys ja veden virtausnopeus akviferissa. Syvällä sijaitsevat akviferit kestävät yleensä hyvin lämpötilan muutoksia ja ilmaston lämpötilan muutokset eivät yleensä vaikuta näihin akvifereihin ollenkaan. Lähempänä maanpintaa sijaitsevat akviferit ovat taas alttiimpia ulkoisille muutoksille (Bakker *et al.* 2017).

Khan *et al.* (2025) tekemässä tutkimuksessa yksi tärkeimmistä pohjaveden lämpötilaan vaikuttavista tekijöistä on geotermisen energian lämpövuoto, joka on maapallon sisäosista pintaa kohti nousevaa lämpöä. Se vaikuttaa alueellisesti vaihtelevin määrin pohjaveteen, riippuen sen sijaintisyvyydestä ja muusta alueellisesta geologiasta. Geotermisen energia ei kuitenkaan aiheuta voimakkaita lämpötilan muutoksia lyhyellä aikavälillä, vaan ero on yleensä havaittavissa alueellisessa, ei ajallisessa tarkastelussa (Khan *et al.* 2025).

Vuodenaikojen aiheuttama lämpötilan vaihtelu aiheuttaa merkittävimmän muutoksen lähellä maanpintaa sijaitsevan pohjaveden lämpötilaan, mutta nämä muutokset aiheuttavat yleensä sinikäyrää muistuttavan oskilloivan kuvaajan (Khan *et al.* 2025). Kuvaajan vaihtelevuuden lisäksi havaittavissa oleva lämpötilan kehityssuunta on merkki ulkoisesta vaikutuksesta pohjaveden lämpötilaan (Khan *et al.* 2025). Ilman lämpötilan muutokset vaikuttavat kuitenkin pohjaveden lämpötilaan viiveellä, eli muutokset näkyvät pohjavedessä yleensä vasta myöhemmin (Menberg *et al.* 2014). Viiveen pituuteen vaikuttavat tekijät ovat esim. maa-ainesten paksuus pohjavesimuodostuman päällä, sateisuus ja alueen mahdollinen lumisuus. Menberg *et al.* (2014) mainitsee, että sateisten alueiden hyvin matalalla sijaitsevista pohjavesialueista muutokset voivat näkyä jo saman vuoden mittauksissa, sillä sadevesi kuljettaa lämpöä tehokkaasti pohjavesiin. Suomessa ilmaston lämpötilan kehitykselle on tavallista, että lämpötiloissa on havaittavissa talvi, kevät, kesä ja syksy, eli neljä lämpötilaltaan eroavaa vuodenaikaa (Ilmatieteen laitos, 2021). Vuodenaikojen välinen lämpötila ero saattaa olla erittäin merkittävä, ja esimerkiksi Arolan & Korkka-Niemen (2014) tekemässä tutkimuksessa kevään ja syksyn lämpötilaero näkyy pohjavedessä korkeimmillaan jopa n. 3 °C erona. Näissä Lohjan kaupungissa tehdyissä mittauksissa pohjaveden lämpötila oli keväällä n.

7,5–8,5 °C välillä ja syksyllä n. 9–10,5 °C välillä. Mittaukset olivat alle 8 m syvyydestä, jolloin ilman lämpötila vaikutti vielä pohjaveden lämpötilaan (Arola & Korkka-Niemi, 2014). Tavallinen vuodenajan takia vaihteleva pohjaveden lämpötilan kuvaaja on esitetty alla kuvassa 5.



Kuva 5. Kuvaaja Pomponrahkan automaattimittarin lämpötilahavainnoista. Kuvassa näkyy tyypillinen pohjaveden lämpötilan vuodenaikaisvaihtelu (SYKE, 2024).

Khan *et al.* (2025) mainitsee ilmaston lämpenemisen vaikuttavan merkittävästi pohjaveden lämpötilaan. Lisäksi pohjavesialueen sijainti kaupunkialueilla nostaa pohjaveden lämpötilaan luontaisesti n. 3–4 °C (Arola, 2015). Nousevat lämpötilat vaikuttavat myös epäsuorasti pohjaveteen muuttamalla alueen sateisuutta ja pintaveden lämpötiloja, aiheuttaen samanlaisia veden ominaisuuksien muutoksia kuin viime kappaleessa on mainittuna. Tällaiset muutokset voivat puolestaan vaikuttaa erilaisten aineiden liukoisuuteen, vapauttaen raskasmetalleja, orgaanisia saastuttajia ja ravinteita, kuten nitraatteja ja fosfaatteja (Li *et al.* 2019).

3. Tutkimusalueet

Tutkimusta varten valittiin pohjavesialueita, jotka sijoittuvat Varsinais-Suomen harjujakson alueelle. Harjujakso muodostunut alkaen Kaarinan ja Turun alueella ja se jatkuu rikkonaisena Raision, Maskun, Mynämäen ja Laitilan läpi loppuen Pyhärannassa Selkämeren rannalle (GTK, 2026). Kuva 6 havainnollistaa Varsinais-Suomen harjujakson, joka näkyy GTK:n Maankamara-palvelussa.



Kuva 6. Varsinais-Suomen harjujakso rajattuna mustalla viivalla. Oikea harjualue on merkitty vihreällä värillä ja se jatkuu kuvan vasemmasta yläreunasta oikeaan alareunaan. GTK Avoin lisenssi Nimeä CC 4.0, sisältää GTK:n Maaperä 1:200 000 ja taustakartan aineistoa, irrotettu 4/2026 Hakku-palvelusta.

Varsinais-Suomen harjujakso on muodostunut deglasiaation eli sulamisen aikana viime jääkauden lopussa. Mannerjään osa, joka tunnetaan Itämeren virtauskielekkeenä, vetäytyi koillista kohti ja samalla sulamisvesikanavat syöttivät sedimenttejä mannerjään liikkeen suuntaisesti (Palmu *et al.* 2026). III Salpausselkä, joka kulkee Kemiönsaaresta Hämeenlinnaan, on muodostunut saman Itämeren virtauskielekkeen takia, arviolta n. 11 400–11 500 vuotta sitten (Palmu *et al.* 2026). Harjujakso on muodostunut Itämeren

altaaseen Yoldiameren aikana. Lisäksi myöhempien vaiheiden, kuten Litorinameressä, alue on yhä ollut subakvaattinen eli veden alla. Tämän takia savi kerrostui kallioperästä koostuviin vedenalaisiin laaksoihin, joka näkyy nykyisin harjua ympäröivinä savikkoina (Palmu *et al.* 2026). Alueen kallioperän geologia on kuvissa 7 ja 8, joissa on tutkimusalueen vastaavasti tutkimusalueen kallio- ja maaperäkartta. Suurin osa tutkimusalueen kallioperästä on biotiittiparagneissia, mutta lisäksi Mynämäen kohdalla kallioperässä on pieni alue graniittia ja granodioriittia. Suurempi muutos tapahtuu Laitilan alueella, jossa kallioperä muuttuu rapakivigraniitiksi (GTK, 2026). Tutkimusalueen maaperä on pääasiassa hiekkaa, mutta ympäröivillä alueilla vallitsee savinen maaperä ja kalliopaljastumat.



Kuva 7. Tutkimusalueen kallioperäkartta. Kuvassa vaaleansinisellä biotiittiparagneissi, vaaleanpunaisella graniitti, keltaisella granodioriitti ja kuvioidulla vaaleanpunaisella rapakivigraniitti. GTK Avoin lisenssi Nimeä CC 4.0, sisältää GTK:n Kallioperä 1:200 000 aineistoa, irrotettu 16.6.2026 Hakku-palvelusta.



Kuva 8. Tutkimusalueen maaperäkartta. Kuvassa sinisellä savi, vihreällä hiekka ja punaisella kalliopaljastumat. GTK Avoin lisenssi Nimeä CC 4.0, sisältää GTK:n Kallioperä 1:200 000 aineistoa, irrotettu 16.6.2026 Hakku-palvelusta.

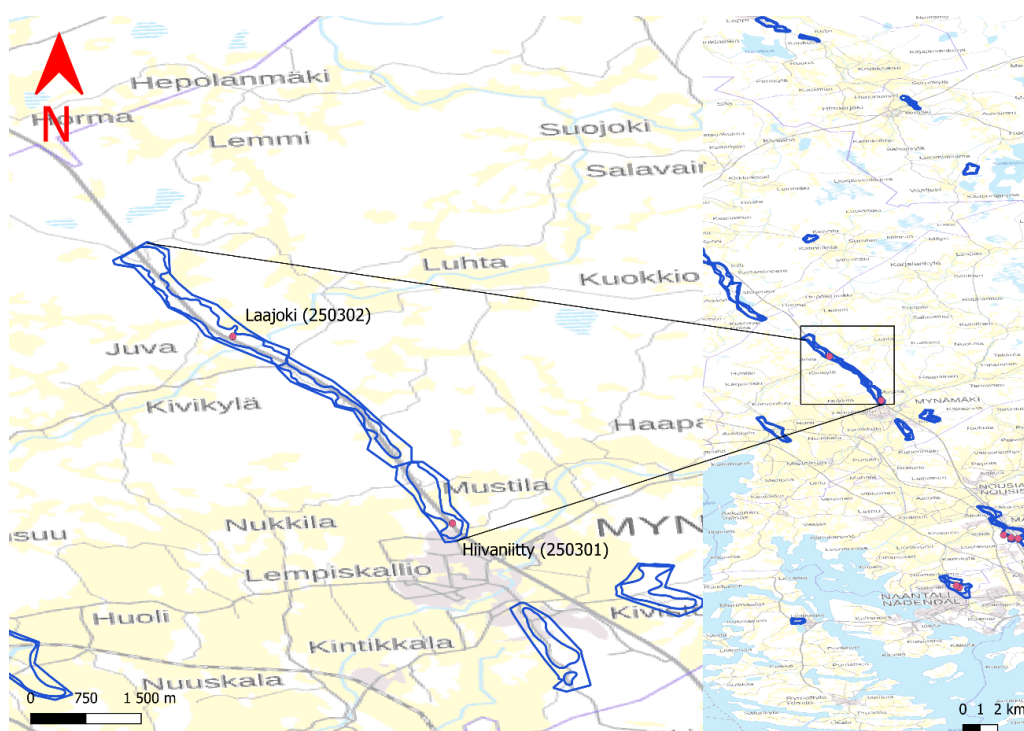
Nykyisin alueen geologisia ominaispiirteitä ovat monet kalliopaljastumat, joiden topografian vaihtelevuus on voimakasta. Harjujakso on rikkonaista, ja sen osien suuruus vaihtelee voimakkaasti. Valtatie 8 on rakennettu harjualueen päälle ja suuri osa harjuhiekoista on poistettu ihmistoiminnan takia alueen tie- ja kaupunki-infrastruktuurien takia (GTK, 2026).

Yhteensä 9 kuntaa sijoittuu Varsinais-Suomen harjujakson alueelle. Kunnat ovat, pohjois-eteläsuunnassa, Pyhäranta, Laitila, Mynämäki, Masku, Rusko, Raisio, Naantali, Turku ja Kaarina. Kaikkien kuntien alueella on pohjavesialueita, mutta kaikkien kuntien pohjavesialueet eivät sisältäneet kelvollisia havaintoja. Koska valittujen kuntien alueella sijaitsee 90 pohjavesialuetta, vain alueet, joilta on tehty lämpötilan havaintoja, käsitellään alla. Tutkimukseen kelvollisia pohjavesialueita oli yhteensä kuusi, joista kaksi oli Mynämäellä, yksi oli Maskussa, yksi oli Naantalissa ja kaksi oli Turusta. Näiltä kuudelta alueelta löytyi yhteensä 15 pohjaveden havaintopaikkaa, jotka käsitellään tässä tutkimuksessa. Kolme havaintopaikkaa löytyi Mynämäeltä, kaksi havaintopaikkaa löytyi sekä Maskusta että Naantalista, ja kahdeksan havaintopaikkaa löytyi Turusta.

Koska useimmat alueista kuitenkin sijaitsevat Varsinais-Suomen harjujaksolla, tutkimuskohteiden geologia ei eroa toisistaan merkittävästi.

3.1. Mynämäen pohjavesialueet (Motelli ja Hiivaniitty)

Alla olevaan kuvaan 9 on merkitty Motellin ja Hiivaniityn pohjavesialueet. Lisäksi pohjavesiputkien sijainnit on merkitty pohjavesialueelle.



Kuva 9. Motellin ja Hiivaniityn pohjavesialueet Mynämäeltä. Lisäksi kuvassa on pohjavesiputket Hiivaniitty (250301) ja Laajoki (250302), jotka on merkitty kuvaan punaisilla pisteillä. Sisemmät siniset viivat kuvaavat pohjavesialueen rajoja ja ulommat pohjaveden muodostumisaluetta. Kuva sisältää Suomen ympäristökeskuksen pohjavesialuerajojen 3/2026 aineistoa ja Maanmittauslaitoksen taustakarttarasterin 3/2026 aineistoa.

Mynämäen kunnan sisällä on kaksi pohjavesialuetta, jotka sisälsivät aikaisempia lämpötilamittauksia (Kuva 9). Ensimmäinen alue on Mynämäen keskustan pohjoispuolella sijaitseva Motellin pohjavesialue. Se on Suomen ympäristökeskuksen (2018) mukaan pinta-alaltaan 1,81 km², josta muodostumisaluetta on 1,06 km². Pohjavettä muodostuu arviolta 1200 m³ ja muodostumiseen liittyy rantaimetytymistä. Pohjavesialue itsessään sijaitsee harjualueella kuten muutkin Varsinais-Suomen

harjuvyöhykkeellä sijaitsevat pohjavesialueet. Harjun pituus on n. 5 km ja leveys on n. 200 m. Harjun maaperä koostuu hyvin vettä johtavasta hiekasta sekä sorasta ja alueen kallioperä on pääasiassa kiillegneissia ja tasarakeista graniittia (GTK, 2026).

Alueen vedenlaatu ja saatavuus on tutkittu vuonna 1993 sekä vuosina 2011–2012. Käyttökelpoista vettä on saatavilla 700–750 m³ d⁻¹, mutta korkeiden fluori- ja alumiinipitoisuuksien takia se ei sovellu talousvedeksi. Motellin pohjavesialueelta saatava vesi johdetaan Laajoen vedenottamolle käsiteltäväksi, ja alue kuuluu tällä hetkellä 1. pohjaveden alueluokkaan eli se luokiteltu vedenhankintaa varten tärkeäksi pohjavesialueeksi (Suomen ympäristökeskus, 2018).

Vaikka pohjavesialueella on havaittavissa määrällisiä ja kemiallisia riskitekijöitä, alueen määrällinen ja kemiallinen tila on kuitenkin tällä hetkellä hyvä (Suomen ympäristökeskus, 2018). Edellä mainitut merkittävimmät riskitekijät on lueteltu taulukossa 1.

Taulukko 1. Motellin pohjavesialueen merkittävimmät kemialliset riskiosatekijät, riskiosatekijöiden suuruudet ja kuvaukset sekä mahdollisesti tunnistetut riskiä aiheuttavat aineet. Sovitettu Suomen ympäristökeskuksen (2018) mukaan.

Riskiosatekijä	Riskin suuruus 0 = ei toimintaa 1 = Ei riskiä/merkityksetön riski 2 = Kohtalainen riski 3 = Suuri riski
Liikennepäästöt	3
Vaarallisten aineiden kuljetukset	2
Maa-ainesten otto	2
Haitallisten aineiden suotautuminen PIMA-alueilta	1
Kemiallinen kokonaisriski	3

Toinen Mynämäen alueella sijaitseva pohjavesialue on Hiivaniitty. Se sijaitsee Motellin pohjavesialueen ja Mynämäen keskustan välissä (Kuva 8). Hiivaniitty kuuluu Varsinais-Suomen harjujaksoon, mikä näkyy alueen geologiassa. Pohjavesialue on Suomen ympäristökeskuksen (2018) mukaan 2,5 km pituinen, luode-kaakko-suuntainen pitkittäisharju, jonka keskiosassa on karkearakeisempaa materiaalia, kuten soraa ja hiekkaa. Maa-aineksen raekoko muuttuu hienommaksi siltiksi ja saveksi harjun reunoille siirtyessä. Pohjavesialue on pinta-alaltaan 1,05 km², josta muodostumisaluetta on 0,54 km². Pohjavettä muodostuu arviolta 600 m³ d⁻¹ ja alueen pohjavesi on tärkeä

vedenhankintaa varten, minkä takia alue on luokiteltu 1. luokan pohjavesialueeksi (Suomen ympäristökeskus, 2018).

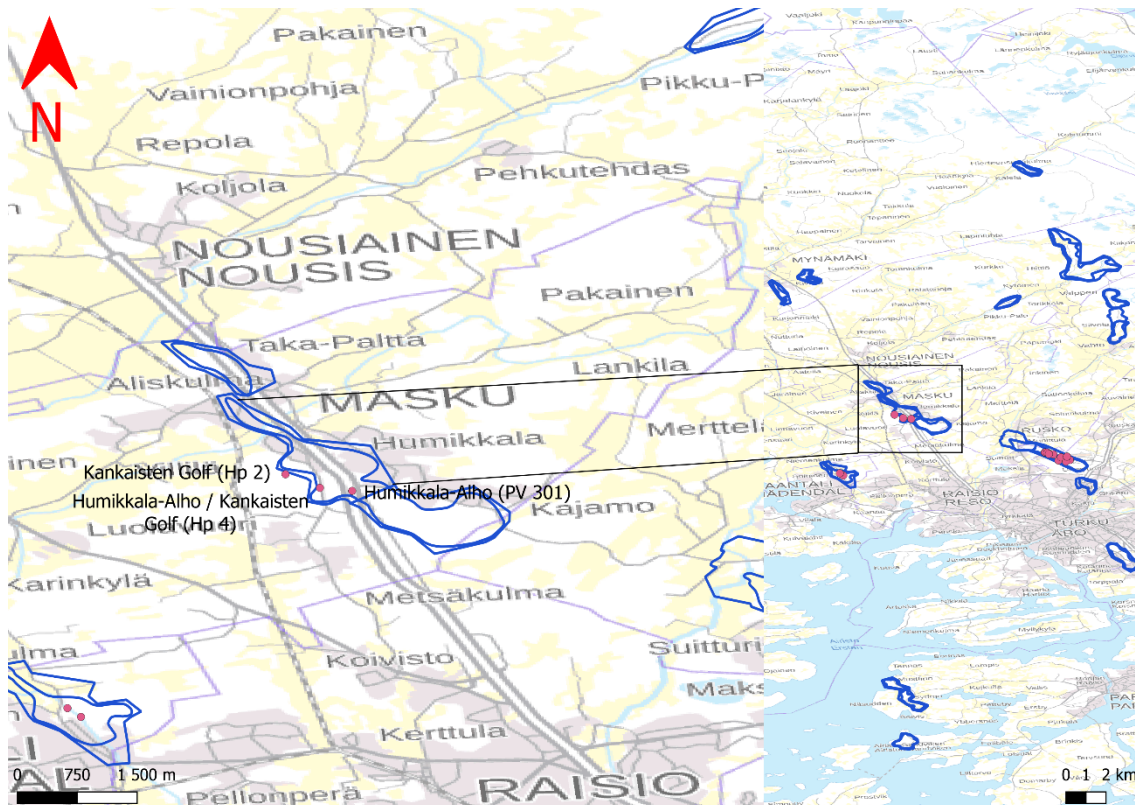
Koska pohjavesialue sijaitsee välittömästi Mynämäen keskustan vieressä, alueen päällä sijaitsee kaupunki-infrastruktuuria, kuten asutusta ja teollisuustoimintoja (Kuva 8). Alueen keskiosassa harjoitetaan maataloutta ja valtatie 8 kulkee suoraan pohjavesialueen päältä. Näiden tekijöiden takia Hiivaniityn pohjavesialue on luokiteltu kemialliseksi riskialueeksi, vaikka alueen kemiallinen tila onkin vielä tällä hetkellä hyvä. Merkittävimpiä kemiallisia riskiosatekijöitä ja niiden suuruuksia on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. Hiivaniityn pohjavesialueen merkittävimmät riskiosatekijät, riskiosatekijöiden suuruudet ja vaikutukset sekä mahdollinen riskiä aiheuttava aine. Sovitettu Suomen ympäristökeskuksen (2018) mukaan.

Riskiosatekijä	Riskin suuruus 0 = Ei toimintaa 1 = Ei riskiä 2 = Kohtalainen riski 3 = Riski on suuri	Riskin vaikutukset	Riskiä aiheuttava haitallinen aine
Haja-asutuksen aiheuttamat päästöt	2	Ravinnekuormitus, mikrobiologinen saastuminen	
Teollisuuden pistemäiset lähteet	2	Kemiallinen kuormitus	
Liikenteen aiheuttamat päästöt	3	Suolakuormitus	Kloridi
Haitallisten aineiden suotautuminen PIMA-alueilta	2	Kemiallinen kuormitus	Lyijy
Kemiallinen kokonaisriski	3		

3.2. Maskun pohjavesialue (Humikkala-Alho)

Humikkala-Alhon pohjavesialue on esitelty alla olevassa kuvassa 10. Lisäksi kuvaan on merkitty tutkimuksessa käytetyt pohjaveden havaintopaikat.

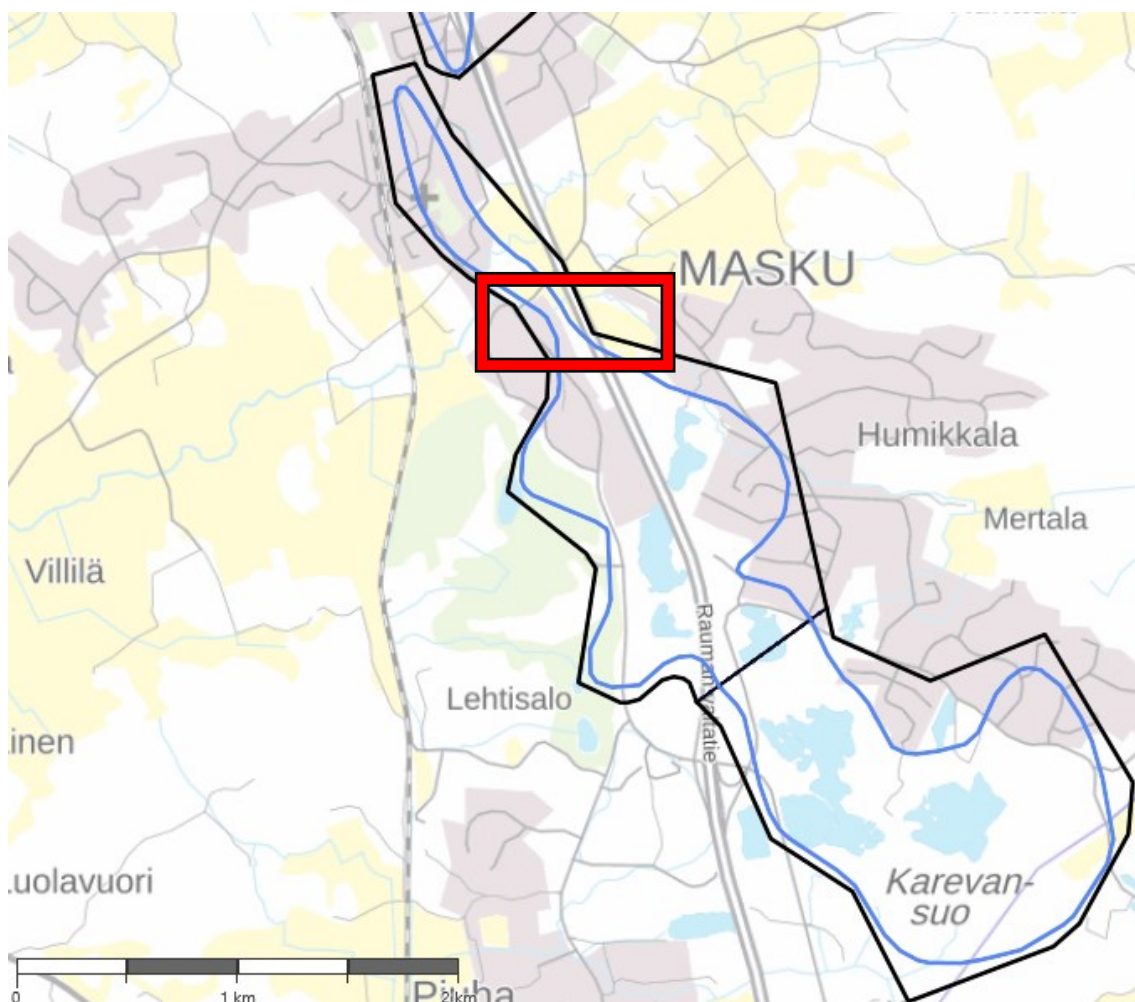


Kuva 10. Humikkala-Alhon pohjavesialueet Maskussa. Lisäksi kuvassa on pohjavesiputket Humikkala-Alho (PV 301), Kankaisten Golf (Hp 2) ja Humikkala-Alho/Kankaisten Golf (Hp 4), jotka on merkitty kuvaan punaisilla pisteillä. Sisemmät siniset viivat kuvaavat pohjavesialueen rajoja ja ulommat pohjaveden muodostumisaluetta. Kuva sisältää Suomen ympäristökeskuksen pohjavesialuerajojen 3/2026 aineistoa ja Maanmittauslaitoksen taustakarttarasterin 3/2026 aineistoa.

Maskussa sijaitseva, tähän tutkimukseen soveltuva pohjavesialue on Humikkala-Alhon pohjavesialue. Se sijaitsee Maskun keskustassa ja on kokonaispinta-alaltaan n. 2,09 km². Muodostumisalueen pinta-ala on 1,42 km² ja pohjavettä muodostuu arviolta 1375 m³/d (Suomen ympäristökeskus, 2018). Pohjaveden havaintopaikat sijaitsevat Kankaisten golfkentällä ja E8-tien vierellä (Kuva 9). Humikkala-Alhon pohjavesialueella on maalämpöjärjestelmiä, mutta Swecon (2025) tekemässä selvityksessä niiden riski vaikuttaa pohjavesialueeseen on todettu pieneksi. Kaksi maalämpöjärjestelmää sijaitsee Swecon (2025) tekemän raportin mukaan alueen pohjois- ja eteläosassa vettä hyvin johtavien maakerrosten alueella. Neljä maalämpöjärjestelmää sijaitsee pohjaveden

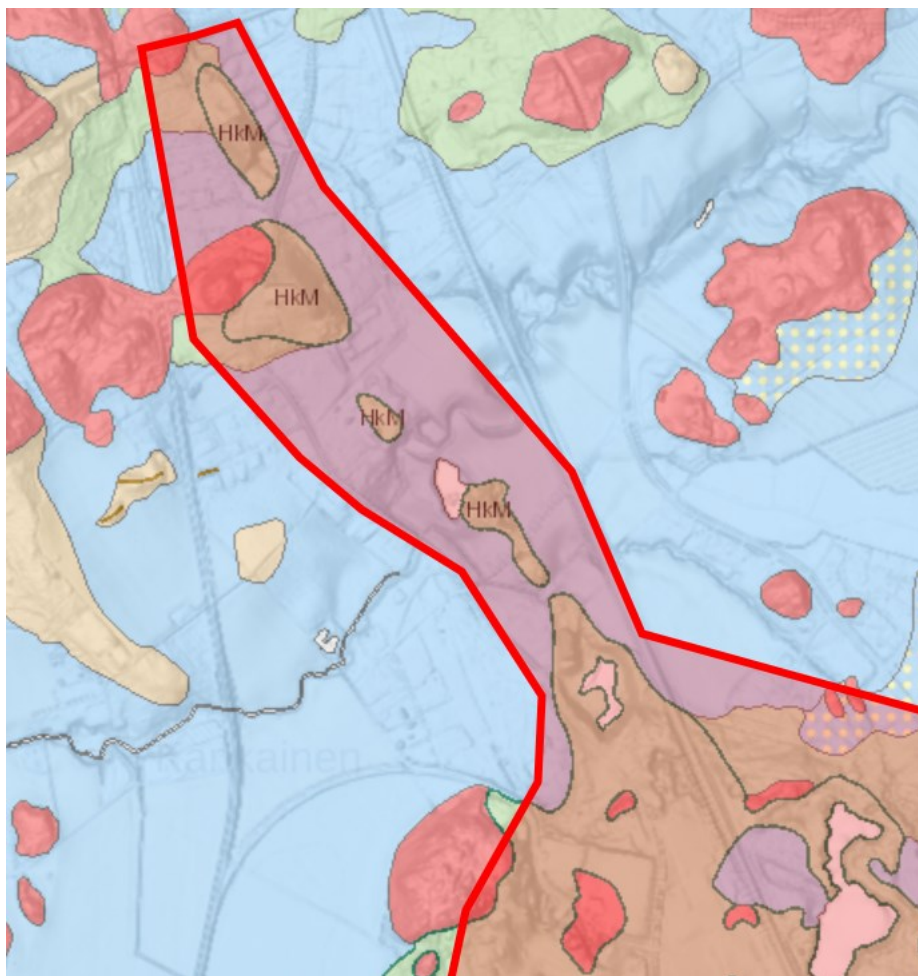
muodostumisalueella, mutta tarkempaa tietoa ei ole saatavilla. Lisäksi pohjaveden virtausta, joka voisi siirtää lämpöä pohjaveden havaintopaikkojen välillä, rajoittaa alueella sijaitsevat pohjavesilammet (Sweco, 2025).

Humikkala-Alhon pohjavesialue kuuluu Varsinais-Suomen harjujaksoon ja pohjavesialue sijaitsee n. 3 km pitkällä, kaakkois-luode-suuntaisella alueella, jonka leveys vaihtelee voimakkaasti. Alue on muodostunut deglasiaatioprosessien aikana, kun jäätikön sulamisvesivirtaus toi paikalle karkeita maalajeja, kuten soraa (Artimo *et al.* 2000). Suurin osa harjusta koostuu hyvin vettä johtavasta sorasta, mutta esimerkiksi pohjavesialueen kapeimmassa kohdassa, mikä esitellään kuvassa 11, kallioperän pinnan päällä on moreenia ja paksuja savikerroksia, minkä takia alueen pohjoisosan vedenjohtavuus on erittäin huono (Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy, 1974).



Kuva 11. Humikkala-Alhon pohjavesialue. Kuvaan on merkittynä alueen kapein kohta, jossa pohjaveden muodostuminen on erittäin heikkoa (Suomen ympäristökeskus, 2018). Kuva sisältää Suomen ympäristökeskuksen pohjavesialuerajojen 3/2026 aineistoa ja Maanmittauslaitoksen taustakarttarasterin 3/2026 aineistoa.

Humikkala-Alhon pohjavesialueen kapeimman kohdan savisuus näkyy myös maaperäkartassa. Itse harjuvyöhyke on pääosin peittynyt saven alle ja tietyissä kohdissa maaperä on kulunut pois ja alla olevat kalliopaljastumat ovat nousseet maanpinnan tasolle. Kuva 12 esittelee Humikkala-Alhon pohjavesialueen maaperäkartan, josta näkee syyn huonolle vedenjohtavuudelle alueen pohjoisosassa.



Kuva 12. Humikkala-Alhon pohjavesialueen pohjoisosan maaperäkartta ja rinnevarjoste. Kartalla vihreä väri kuvaa hiekkaa ja itse harjua, punainen kuvaa kalliopaljastumia ja sininen väri kuvaa savea, joka peittää suurimman osan alueen pohjoisosasta. Pohjavesialue on rajattu punaisella viivalla karttaan. GTK Avoin lisenssi Nimeä CC 4.0, sisältää GTK:n Maaperä 1:20000 / 1:50000, varjostettu korkeusmalli ja pohjavesialueen rajat aineistoa, irrotettu 15.06.2026 GTK:n Lähdepalvelusta.

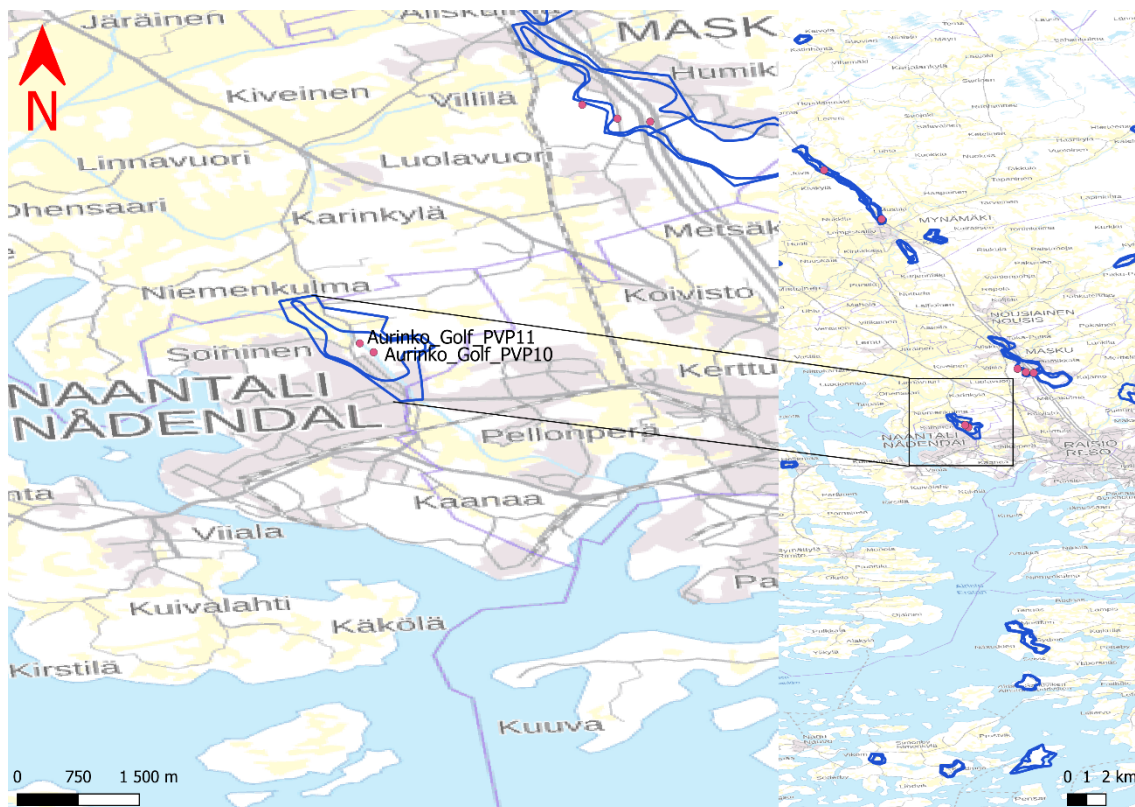
Humikkala-Alhon pohjavesialueen kemiallinen tila on tällä hetkellä huono ja useat riskitekijät uhkaavat alueen tilaa. Suomen ympäristökeskus (2018) on arvioinut aluetta uhkaavia riskitekijöitä ja riskien suuruuksia. Arvio on taulukoitu alle taulukkoon 3.

Taulukko 3. Humikkala-Alhon pohjavesialueen merkittävimmät riskiosatekijät, riskiosatekijöiden suuruudet ja vaikutukset sekä mahdollinen riskiä aiheuttava aine. Taulukko sovitettu Suomen ympäristökeskuksen (2018) mukaan.

Riskiosatekijä	Riskin suuruus 0 = Ei toimintaa 1 = Ei riskiä/merkityksetön riski 2 = Kohtalainen riski 3 = Merkittävä riski	Vaikutukset	Riskiä aiheuttava haitallinen aine
Maatalouden aiheuttamat hajapäästöt	2	Ravinnekuormitus, Orgaaninen kuormitus, Kemiallinen kuormitus	
Rakennetun ympäristön hajakuormitus	2	Ravinnekuormitus, Kemiallinen kuormitus	
Teollisuuden pistemäiset lähteet	2	Kemiallinen kuormitus	
Katujen suolaus	2	Suolakuormitus	
Liikenteen aiheuttamat päästöt	2	Kemiallinen kuormitus, Suolakuormitus	Kloridi
Vaarallisten aineiden kuljetukset	2	Kemiallinen kuormitus	
Maa-ainesten otto	2	Kemiallinen kuormitus	
Haitallisten aineiden suotautuminen PIMA-alueilta	2	Kemiallinen kuormitus	Atratsiini
Kemiallinen kokonaisriski	3		

3.3. Naantalın pohjavesialue (Lietsala)

Alla olevassa kuvassa 13 kuvattuna Lietsalan pohjavesialue ja tutkimuksessa käytetyt havaintopaikat.



Kuva 13. Lietsalan pohjavesialue sekä pohjavesiputket Aurinko_Golf_PVP10 ja Aurinko_Golf_PVP11, jotka on merkitty kuvaan punaisilla pisteillä. Sisemmät siniset viivat kuvaavat pohjavesialueen rajoja ja ulommat pohjaveden muodostumisaluetta. Kuva sisältää Suomen ympäristökeskuksen pohjavesialuerajojen 3/2026 aineistoa ja Maanmittauslaitoksen taustakarttarasterin 3/2026 aineistoa.

Naantalissa sijaitseva Lietsalan pohjavesialue eroaa muista tutkimukseen valituista pohjavesialueista, sillä se ei sijaitse suoraan Varsinais-Suomen harjuvyöhykkeen alueella. Lietsala on kuitenkin hyvin samankaltainen muiden harjuvyöhykkeellä sijaitsevien pohjavesialueiden kanssa (Suomen ympäristökeskus, 2017). Se sijaitsee kalliooperän ruhjevyöhykkeeseen muodostuneen harjun alla, ja alue itsessään on pitkänmuotoinen, kaakko-luode-suunnassa kulkeva pohjavesialue.

Suomen ympäristökeskuksen (2017) mukaan Lietsalan pohjavesialue on muodostunut vanhaan merenpohjaan, minkä takia vesi on melko kloridipitoista. Pohjavesimuodostumaa peittää vaihtelevan paksuinen savikerros, ja muun hienoaineksen, lähinnä siltin, kanssa maaperäkerrosten paksuus on joissain paikoissa

yli 30 m. Karkeampi maa-aines on kerääntynyt lähinnä kumpareisiin hienomman maa-aineksen päälle. Nämä kumpareet toimivat pääasiallisena pintaveden reittinä harjun sisälle, jossa se pääsee muodostamaan pohjavettä. Savialueiden vedenläpäisevyys on Suomen ympäristökeskuksen (2017) mukaan niin huono, että pohjavettä ei käytännössä pääse muodostumaan. Muodostuneen pohjaveden suunta on luoteeseen kohti Koivukummun vedenottamoa, jossa suurin osa pohjavedestä purkautuu pinnalle.

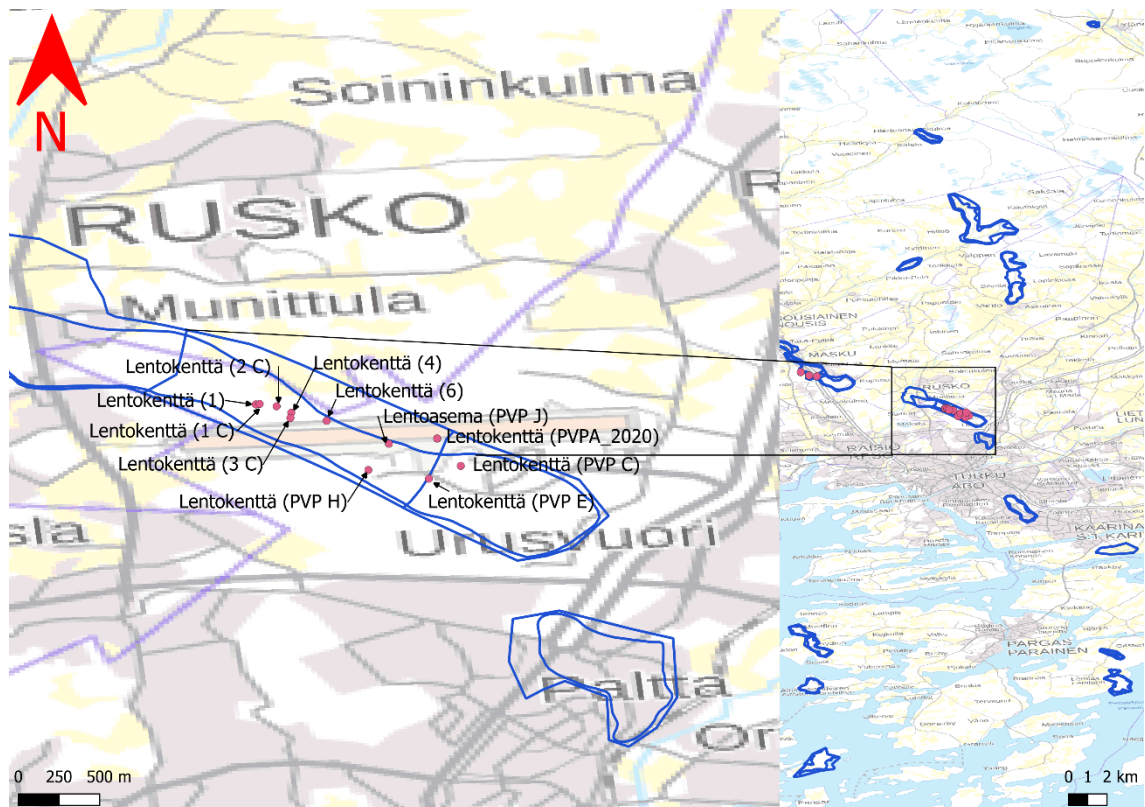
Lietsalan pohjavesialueen pinta-ala on 2,22 km², ja muodostumisalueen pinta-ala 1,06 km². Pohjaveden muodostumisarvio on 700 m³ / d ja pohjaveden kemiallinen sekä määrällinen tila on EU-standardien mukaisesti hyvä (Suomen ympäristökeskus, 2017). Alue on kuitenkin luokiteltu kemialliseksi riskialueeksi, ja vaikuttavat riskitekijät ja niiden suuruudet ovat esiteltynä taulukossa 4.

Taulukko 4. Lietsalan pohjavesialueen riskiosatekijät, riskiosatekijöiden suuruudet ja vaikutukset sekä mahdollinen riski aiheuttava aine. Taulukko sovitettu Suomen ympäristökeskuksen (2017) mukaan.

Riskiosatekijä	Riskin suuruus 0 = Ei toimintaa 1 = Ei riskiä/merkityksetön riski 2 = Kohtalainen riski 3 = Merkittävä riski	Vaikutukset	Riskiä aiheuttava haitallinen aine
Rakennetun ympäristön ja taajama-alueen hajakuormitus	2	Ravinnekuormitus, kemiallinen kuormitus	
Teollisuuden pistemäiset lähteet	2	Kemiallinen kuormitus	
Katujen suolaus	2	Suolakuormitus	
Haitallisten aineiden suotautuminen PIMA-alueilta	2	Kemiallinen kuormitus	
Haitallisten aineiden suotautuminen vanhoilta kaatopaikoilta	3	Kemiallinen kuormitus	Sinkki, Koboltti, Nikkeli
Kemiallinen kokonaisriski	3		

3.4. Turun pohjavesialueet (Munittula ja Lentokenttä)

Munittulan ja Lentokentän pohjavesialueet on esitelty alla olevassa kuvassa 14. Lisäksi kuvaan on merkitty pohjaveden havaintopaikat Lentokenttä 1, 1C, 2C, 3C, 4, 6, PVPA_2020, PVP C, PVP E, PVP H ja PVP J.



Kuva 14. Munittulan sekä Lentokentän pohjavesialueet ja alueelta löydetyt pohjavesiputket, jotka on merkitty kuvaan punaisilla pisteillä. Sisemmät siniset viivat kuvaavat pohjavesialueen rajoja ja ulommat pohjaveden muodostumisaluetta. Kuva sisältää Suomen ympäristökeskuksen pohjavesialuerajojen 3/2026 aineistoa ja Maanmittauslaitoksen taustakarttarasterin 3/2026 aineistoa.

Suurin osa tutkimuksen havainnosta saatiin Turussa sijaitsevien Munittulan ja Lentokentän pohjavesialueilta. Ne sijaitsevat Lentokentän kaupunginosassa, n. 8 km Turun keskustasta pohjoiseen. Pohjavesialueet ovat hydrologisessa yhteydessä toisiinsa, mutta alueiden välissä oleva kalliokynnys, joka sijaitsee Munittulan kaakkoisreunassa ja Lentokentän luoteisreunassa, heikentää tätä hydrologista yhteyttä merkittävästi (Suomen ympäristökeskus, 2019). Molemmat alueet on myös luokiteltu 2E-

pohjavesiluokkaan, sillä vaikka alueiden luokitus on pudonnut 1. pohjavesiluokasta, alueilla on havaittu ekosysteemejä, jotka ovat pohjavesialueista suoraan riippuvaisia. Alueella sijaitsee esimerkiksi Pomponrahkan luonnonsuojelualue ja Isosuon soidensuojeluohjelmaan kuuluva alue, joilla kasvaa pohjavedestä riippuvaisia lajeja, kuten käyrälehtisammalta, kairasammalta ja kiiltosirppisammalta. (Suomen ympäristökeskus, 2019). Turku Energian (2021) mukaan Turun lentokentän alue kuuluu kaukolämmön piiriin, ja alueen maalämpöjärjestelmistä ei ole tietoa.

Näistä kahdesta pohjavesialueesta Munittulan pohjavesialue sijaitsee suurimmilta osin suoraan Turun lentoaseman alapuolella. Munittulan pinta-ala on 1,81 km² ja muodostumisalueen pinta-ala on 1,07 km². Suomen ympäristökeskuksen (2020) arvio muodostuvan pohjaveden määrästä on 1500 m³. Munittulan pohjavesialue kuuluu Varsinais-Suomen harjujaksoon, ja alueen maaperä koostuu pääasiassa savikerroksista, jonka alla on paremmin vettä johtavia maaperäkerroksia, kuten tasalaatuista hiekkaa ja pienikivistä soraa. Sora- ja hiekkakerrokset vaihtelevat kerroksittain Suomen ympäristökeskuksen (2019) mukaan. Ihmistoiminnan ja rakennetun ympäristön takia savikerrokset ovat lentokentän alla painuneet käytännössä vettä läpäisemättömiksi.

Munittulan pohjavesialueen tila on kemiallisesti sekä määrällisesti hyvä, mutta se on luokiteltu kemialliseksi riskialueeksi. Alueella vaikuttavat merkittävimmät kemialliset riskitekijät ja niiden suuruudet on esitelty taulukossa 5.

Taulukko 5. Munittulan pohjavesialueen kemialliset riskiosatekijät, riskiosatekijöiden suuruudet ja kuvaukset sekä mahdollisesti tunnistetut riskiä aiheuttavat aineet. Sovitettu Suomen ympäristökeskuksen (2019) mukaan.

Riskiosatekijä	Riskin suuruus 0 = Ei toimintaa 1 = Ei riskiä / Riski merkityksetön 2 = Kohtalainen riski 3 = Riski on suuri	Vaikutukset	Riskiä aiheuttava haitallinen aine	Riskiä aiheuttava muu aine
Rakennetun ympäristön ja taajama-alueen hajakuormitus	2	Ravinnekuormitus, Kemiallinen kuormitus	MTBE (metyyli-tert-butyylietteri)	Perfluori-1-oktaanisulfonihappo, Perfluori-n-oktaanihappo
Asutuksen pistemäiset lähteet	2	Kemiallinen kuormitus		
Teollisuuden pistemäiset lähteet	2	Kemiallinen kuormitus		
Liikenteen aiheuttamat päästöt	3	Ravinnekuormitus, Kemiallinen kuormitus		
Haitallisten aineiden suotautuminen vanhoilta kaatopaikoilta	2	Kemiallinen kuormitus	Trikloorieteeni ja tetrakloorieteeni	
Kemiallinen kokonaisriski	3			

Lentokentän pohjavesialue, joka sijaitsee välittömästi Munittulan pohjavesialueen kaakkoispuolella, on tutkimuksen Turun pohjavesialueista pienempi. Sen pinta-ala on 1,16 km² ja muodostumisalueen pinta-ala on 0,95 km². Suomen ympäristökeskuksen (2020) arvio muodostuvan pohjaveden määrästä on n. 500 m³ / d. Lentokentän pohjavesialue on geologialtaan hyvin samankaltainen Munittulan pohjavesialueen kanssa. Alue rajoittuu luoteessa edellä mainittuun hydrologista yhteyttä heikentävään kalliokynnykseen, ja kaakossa kallioharjanteisiin. Pohjavesi purkautuu aluetta ympäröiville soille. Maaperäkerrostumat koostuvat vaihtelevista hiekka- ja sorakerroksista ja alueella kasvavat sammallajit ovat riippuvaisia pohjavedestä.

Kuten Munittulan pohjavesialue, Lentokentän pohjavesialueen kemiallinen ja määrällinen tila on hyvä. Erona Munittulaan on kuitenkin se, että Suomen ympäristökeskus (2017) ei ole luokitellut Lentokenttää riskialueeksi. Lentokentän pohjavesialueella on kuitenkin havaittavissa kemiallisia riskitekijöitä, jotka voisivat vaikuttaa alueen tilaan tulevaisuudessa. Merkittävimmät tekijät on esitelty taulukossa 6.

Taulukko 6. Lentokentän pohjavesialueen merkittävimmät kemialliset riskiosatekijät. Sovitettu Suomen ympäristökeskuksen (2017) mukaan.

Riskiosatekijä	Riskin suuruus 0 = Ei toimintaa 1 = Ei riskiä / Riski merkityksetön 2 = Kohtalainen riski 3 = Riski on suuri	Riskin kuvaukset ja vaikutukset	Riskiä aiheuttava haitallinen aine
Rakennetun ympäristön ja taajama-alueen hajakuormitus	2	Kemiallinen kuormitus	
Asutuksen pistemäiset lähteet	2	Kemiallinen kuormitus	
Katujen suolaus	2	Kemiallinen kuormitus, ravinnekuormitus	
Liikenteen aiheuttamat päästöt	2	Kemiallinen kuormitus, ravinnekuormitus	
Kemiallinen kokonaisriski	2		

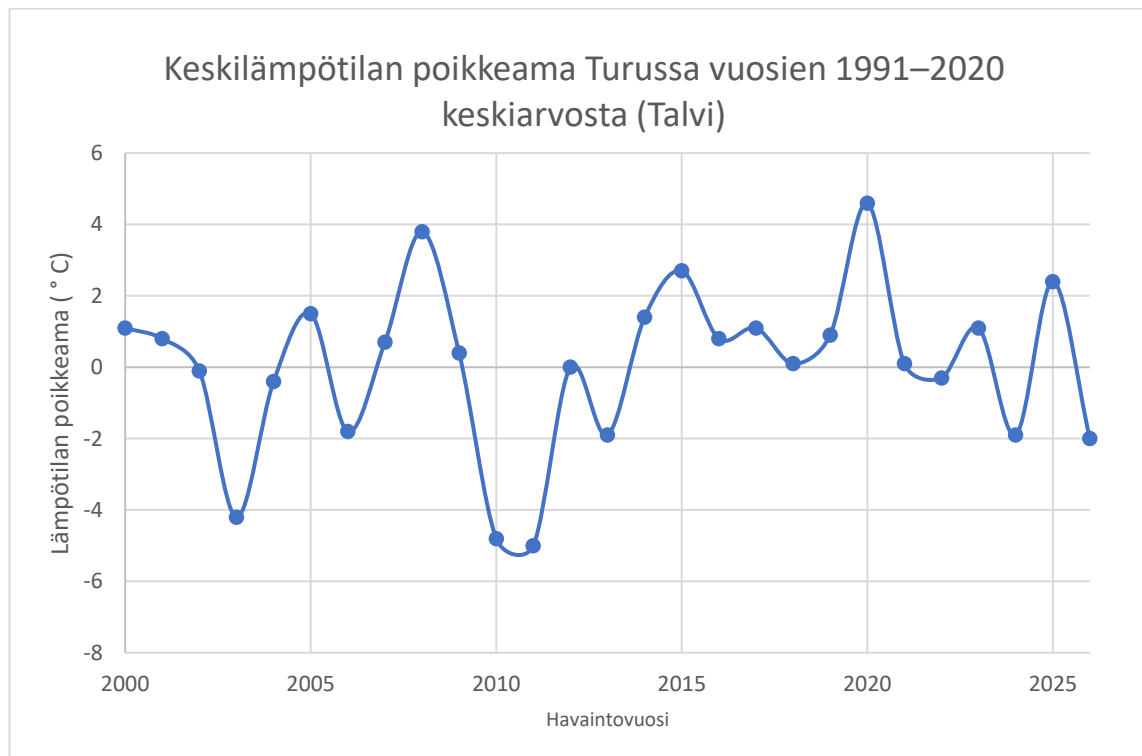
4. Tutkimusaineisto

Tutkimuksen pääasiallisena aineistona toimi Suomen ympäristökeskuksen ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertta, joka sisälsi mittausdatan Varsinais-Suomen harjualueiden pohjavesialueista.

Koska tässä tutkimuksessa käsiteltyjen pohjavesiakviferien syvyys on lähellä maanpintaa ja kaikki tutkimusalueet sijaitsevat lähellä Turkuu, voidaan ilman keskilämpötilan olettaa vaikuttavan pohjaveden lämpötilan kehitykseen. Ilmatieteen laitos (2026) on tilastoinut keskilämpötilan poikkeamia vuosien 1991–2020 keskiarvosta. Kuten pohjaveden lämpötilahavainnotkin, lämpötilan poikkeamat on lajiteltu vuodenaikojen perusteella talven, kevään, kesän ja syksyn poikkeamiin. Nämä lämpötilapoikkeamat vaikuttavat pohjaveden lämpötilaan huomattavasti alle 8 m syvyydessä (Arola & Korkka-Niemi, 2014).

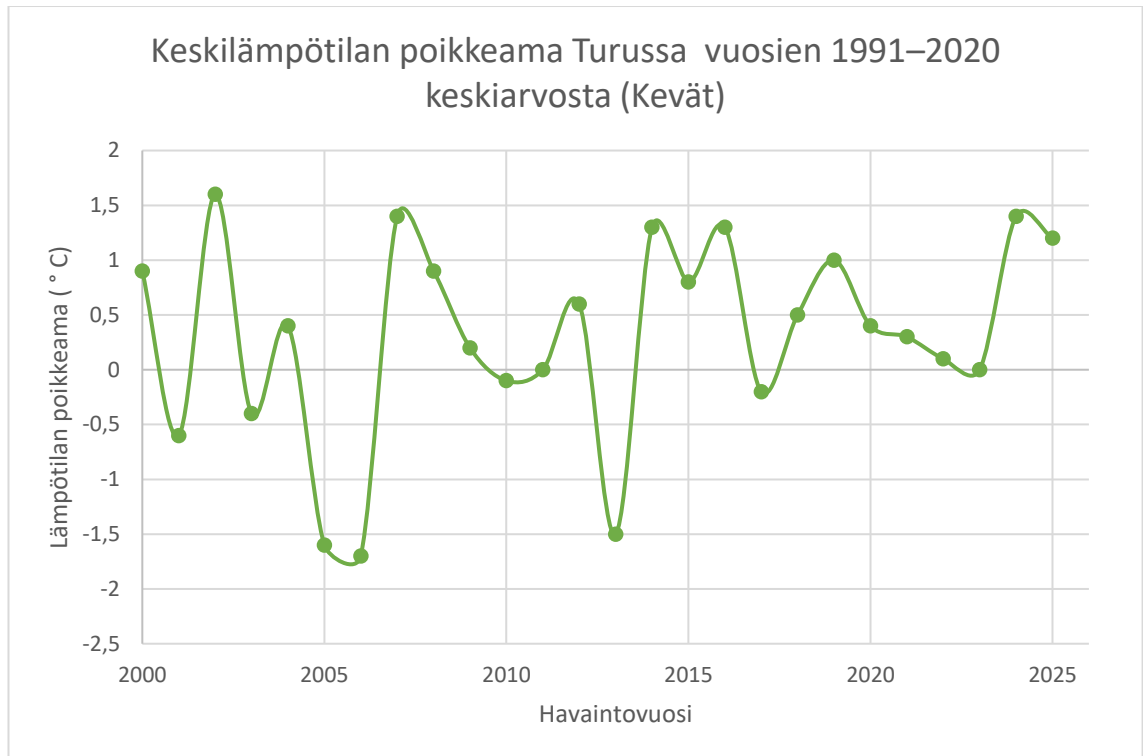
Havainnot itsessään on vuosilta 2000–2026, jolloin kaikki tässä tutkimuksessa käytetyt pohjaveden lämpötilahavainnot on tehty.

Talven lämpötilan poikkeamat mitatuista keskiarvoista voidaan nähdä alla kuvassa 15.



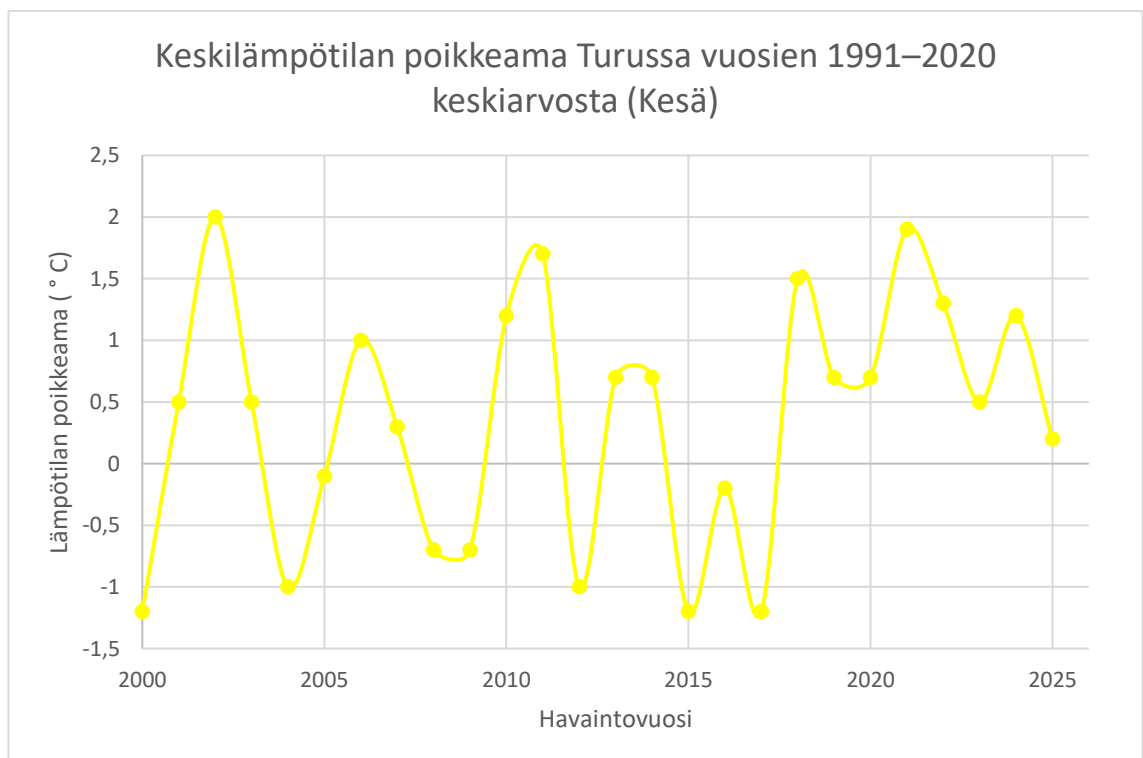
Kuva 15. Keskilämpötilan poikkeama talvella Turussa verrattuna koko maan keskiarvoon. Sovitettu Ilmatieteen laitoksen (2025) datan mukaisesti.

Kevään lämpötilan poikkeamat mitatuista keskiarvoista voidaan nähdä alla kuvassa 16.



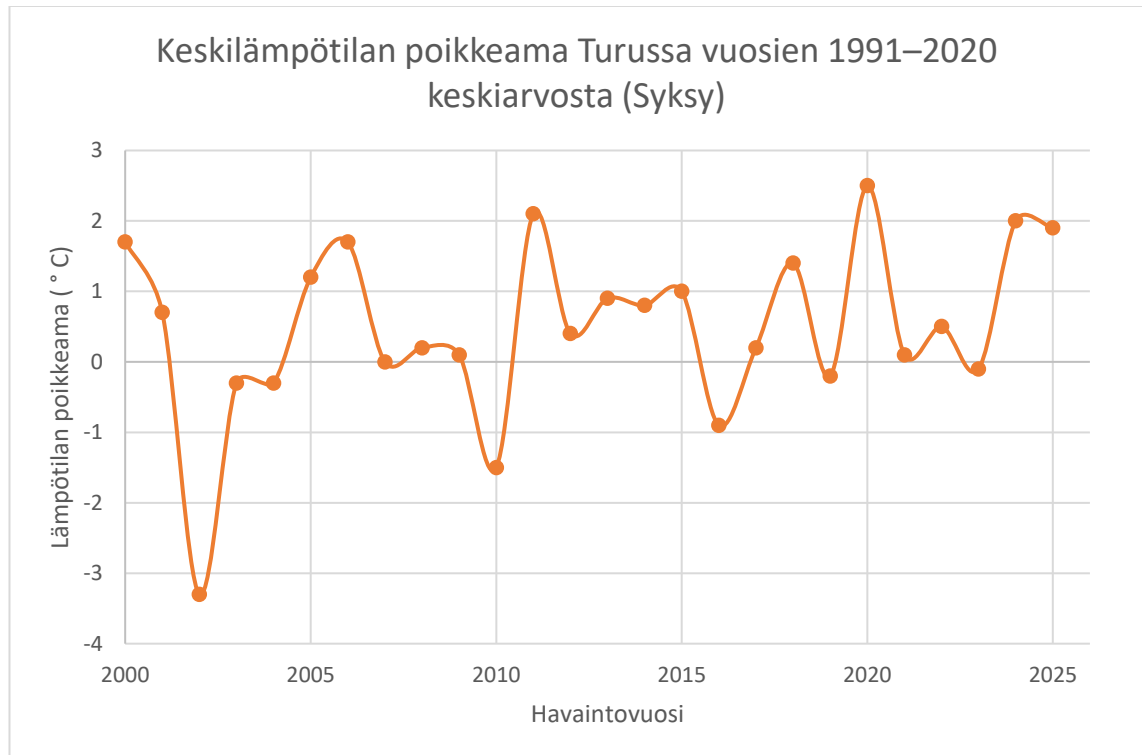
Kuva 16. Keskilämpötilan poikkeama keväällä Turussa verrattuna koko maan keskiarvoon. Sovitettu Ilmatieteen laitoksen (2025) datan mukaisesti.

Kesän lämpötilan poikkeamat mitatuista keskiarvoista voidaan nähdä alla kuvassa 17.



Kuva 17. Keskilämpötilan poikkeama kesällä Turussa verrattuna koko maan keskiarvoon. Sovitettu Ilmatieteen laitoksen (2025) datan mukaisesti.

Syksyn lämpötilan poikkeamat mitatuista keskiarvoista voidaan nähdä alla kuvassa 18.



Kuva 18. Keskilämpötilan poikkeama syksyllä Turussa verrattuna koko maan keskiarvoon. Sovitettu Ilmatieteen laitoksen (2025) datan mukaisesti.

5. Menetelmät

Tutkimusta varten käytettiin Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) ympäristötiedon hallintajärjestelmä Herttaa, joka sisältää avointa dataa esimerkiksi pintavesien tilasta, pohjavesialueiden sijainneista ja vedenlaadusta sekä ympäristön kuormitustekijöistä.

Vesidataa hyödynnettiin yhteensä kymmenestä kunnasta, jotka sijaitsevat Varsinais-Suomen harjuaalueella tai sen välittömässä läheisyydessä. Kunnat, jotka valittiin tutkimukseen, olivat Kaarina, Laitila, Masku, Mynämäki, Naantali, Parainen, Pyhäranta, Raisio, Rusko ja Turku. Kyseiset sijainnit sisälsivät yhteensä 366 pohjaveden havaintopaikkaa, mutta hakua rajoitettiin lisäksi Hertan avulla sijainteihin, jotka sisälsivät

mitattuja lämpötilahavaintoja ja joiden mittaukset on tehty pohjavesiputkista. Tämän haun myötä kelvolliset pohjaveden havaintopaikat rajoittuvat yhteensä 33 sijaintiin.

Aikaisimmissa kappaleissa käsitellään yhteensä kuusi pohjavesialuetta, joilta oli tehty pohjaveden lämpötilahavaintoja.

Kelvollisten sijaintien lämpötiladata jaettiin kuukauden mukaan omiksi havainnoikseen vertailun mahdollistamiseksi. Jako tehtiin taulukon 7 mukaisesti.

Taulukko 7. Pohjavesihavaintojen jako havaintokausiin havaintopäivämäärän mukaan.

Havainnon päivämäärä	Merkattu havaintokausi
1.12.–29.2.	Talvi
1.3.–31.5.	Kevät
1.6.–31.8.	Kesä
1.9.–30.11.	Syksy

Kelvollisia havaintopaikkoja piti vielä rajoittaa havaintojen määrän mukaan. Yhteensä 17 kohteessa havaintoja oli kolme tai vähemmän, jolloin vertailun tekeminen oli vaikeaa tai mahdotonta. Tämän rajoituksen myötä vertailukelpoisia havaintopaikkoja oli yhteensä 15, joista tutkittiin lämpötilan mahdollisia kehitysmuutoksia joko ilmaston tai ihmistoiminnan myötä. Havaintopaikkoja löytyi yhteensä neljän kunnan alueelta, jotka olivat Mynämäki, Masku, Naantali ja Turku. Havaintopaikat jakautuivat kunnittain seuraavasti: 3 kpl Maskun alueella, 2 kpl Maskun alueelta, 2 kpl Naantalien alueelta ja 8 kpl Turun alueelta.

Lämpötilahavainnoista tehtiin viivakuvaajat, joiden avulla voidaan havainnoida, minkälainen lämpötilankehitys on ollut tietyn pohjavesialueen tietyssä pohjaveden havaintopaikassa. Koska tietoa maalämmön käytöstä tai sen olemassaolosta ei löytynyt tutkimukseen valituilta alueilta, päätelmiä muutoksista tehtiin suuruuden ja toistuvuuden perusteella.

Excel-ohjelmalla tehtyihin kuvaajiin lisättiin trendiviiva, joka sovittaa lineaarisen suoran havaintopisteisiin. Lisäksi trendiviivan selitysaste lisättiin kuvaajaan, jolloin oli mahdollista päätellä, kuinka hyvin lineaarinen muutos toteutuu kyseisen mittauspäivän lämpötilan kehityksessä. Edellä mainittu selitysaste eli r^2 -arvo on nimeltään regressiomallin selitysaste. Tämä arvo selittää regressioanalyysissä, kuinka suuri prosenttiosuus selittävistä tekijöistä vaikuttaa selitettävään tekijään (Kaakinen & Ellonen, 2021). Tässä tutkimuksessa selittävät tekijät liittyvät asioihin, jotka muuttavat

pohjaveden lämpötilaa. Koska tietoa alueella mahdollisesti vaikuttavasta maalämpöjärjestelmästä oli huonosti saatavilla, r^2 -arvon avulla tehtävä tulkinta on vahvasti oletettava. Jos pohjaveden lämpötila on noussut merkittävästi seurantajakson aikana, tällöin oletuksena voidaan pitää ilmaston aiheuttamaa lämpenemistä, josta on olemassa jo taustatietoa.

6. Tulokset

Tuloksissa esitellään kuvaajina pohjavesialueiden havaintopaikkojen lämpötilan kehityksen funktiona. Lisäksi kuvaajissa on keskilämpötilan poikkeama Turun alueelta samoilta vuosilta kuin pohjaveden lämpötilamittaukset. Kuvaajissa on lisäksi esitetty r^2 -trendiviiva, jotka kertovat sovituksen todennäköisyydestä ja lämpötilan kehityksestä.

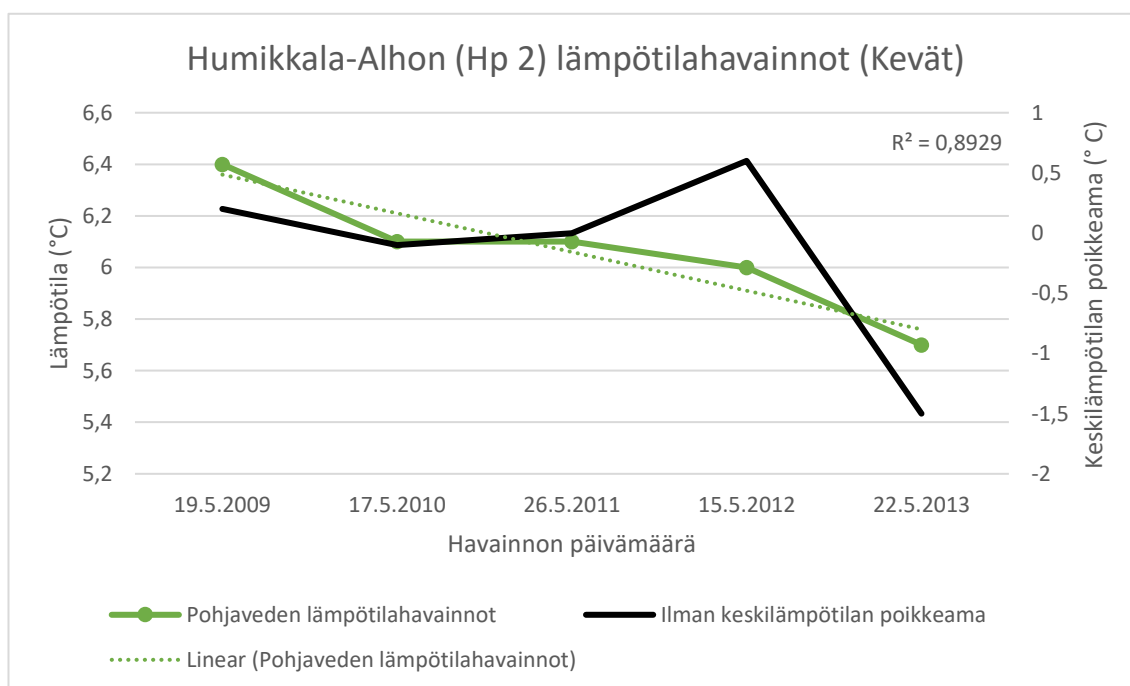
6.1. Humikkala-Alho (Masku)

Humikkala-Alhon pohjavesialueella oli kolme pohjavesiputkea, joista oli tehty lämpötilahavainnointia.

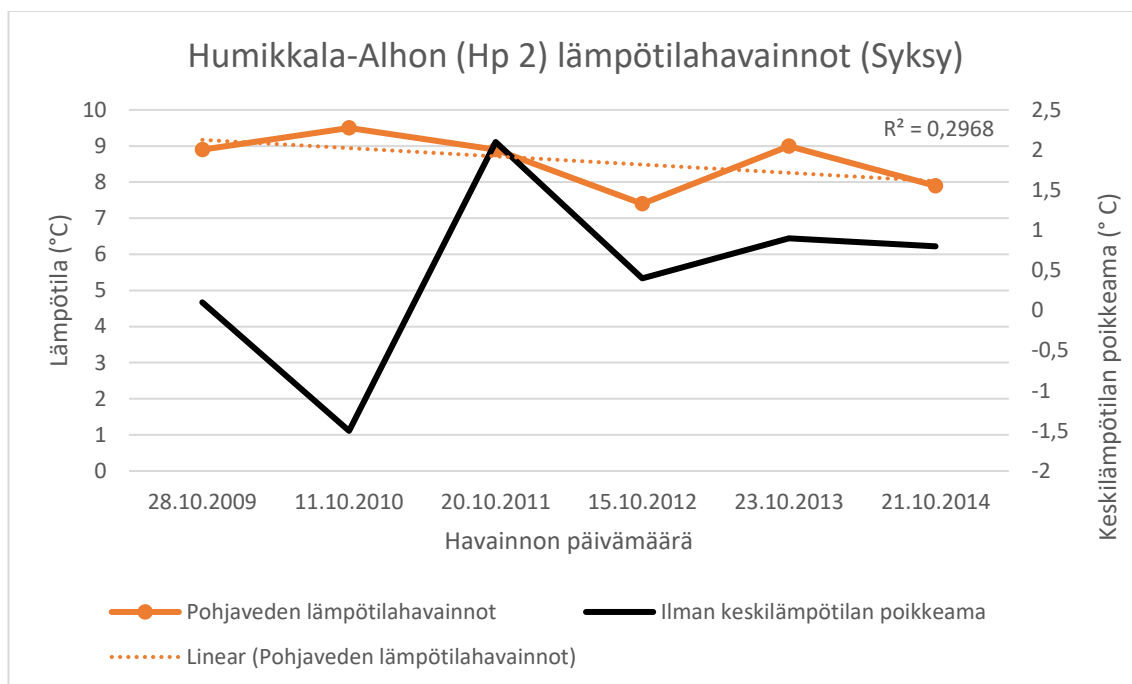
6.1.1. Kankaisten Golf (Hp 2)

Pohjavesiputkesta Hp 2 oli tehty yhteensä 11 havaintoa. Havainnot on jaettu alle sekä kevään että syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 19 sekä 20.

Lämpötilan kehityksen suunta on laskeva ja sovitettu trendiviiva osoittaa kehityksen suunnan luotettavaksi ($r^2 = 0,8929$). Syksyn havainnoissa on myös laskeva kehityssuunta, mutta trendiviivan osuvuus on paljon pienempi ($r^2 = 0,2968$).



Kuva 19. Hp 2 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot keväältä.

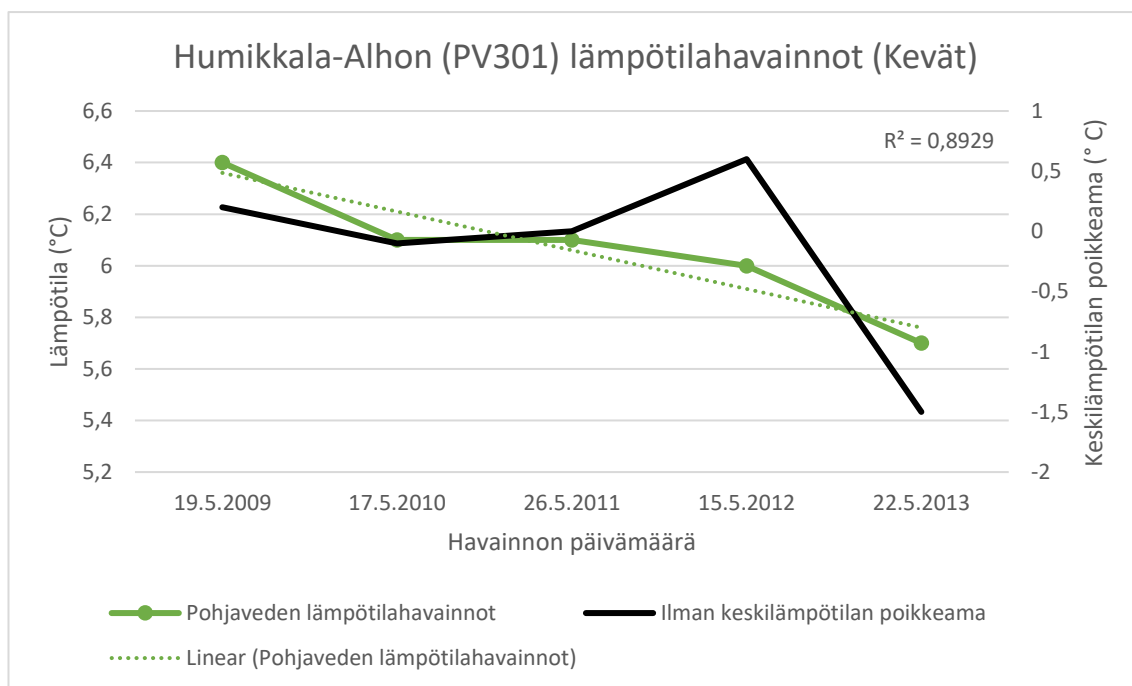


Kuva 20. Hp 2 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot syksyltä.

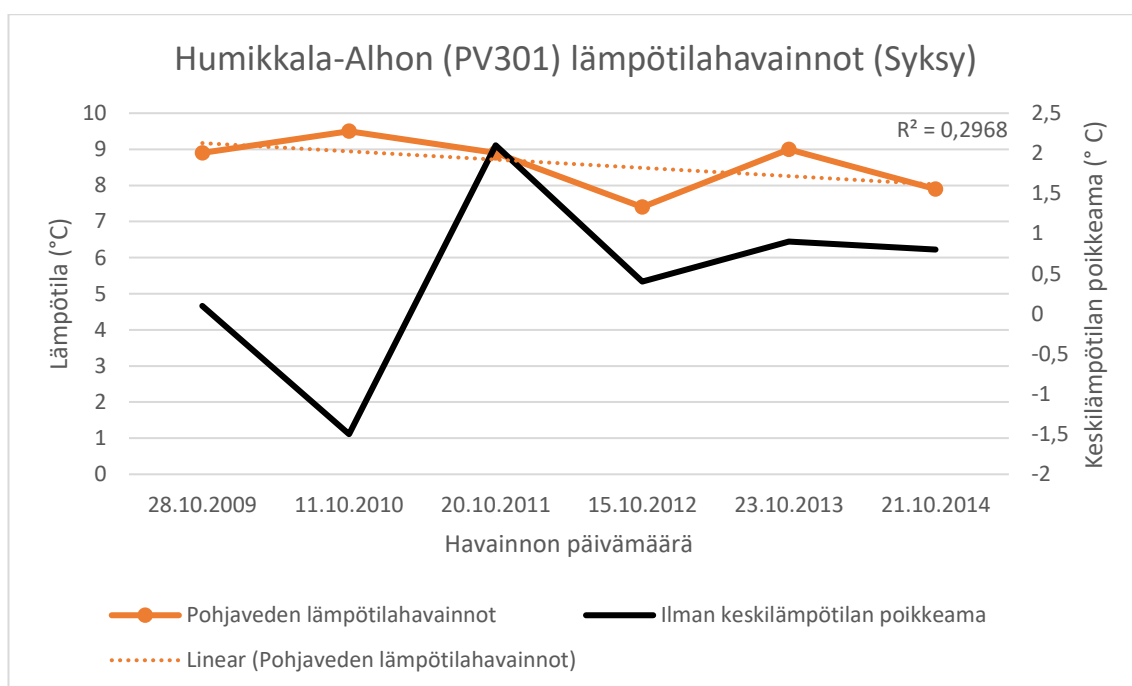
6.1.2. Humikkala-Alho (PV301)

Pohjavesiputkesta PV301 oli tehty yhteensä 11 havaintoa. Havainnot on jaettu alle sekä kevään että syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 21 & 22.

Humikkala-Alhon (PV301) sekä kevään että syksyn havainnot olivat identtisiä Hp 2 -pohjavesiputken kanssa.



Kuva 21. PV301 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot keväältä.

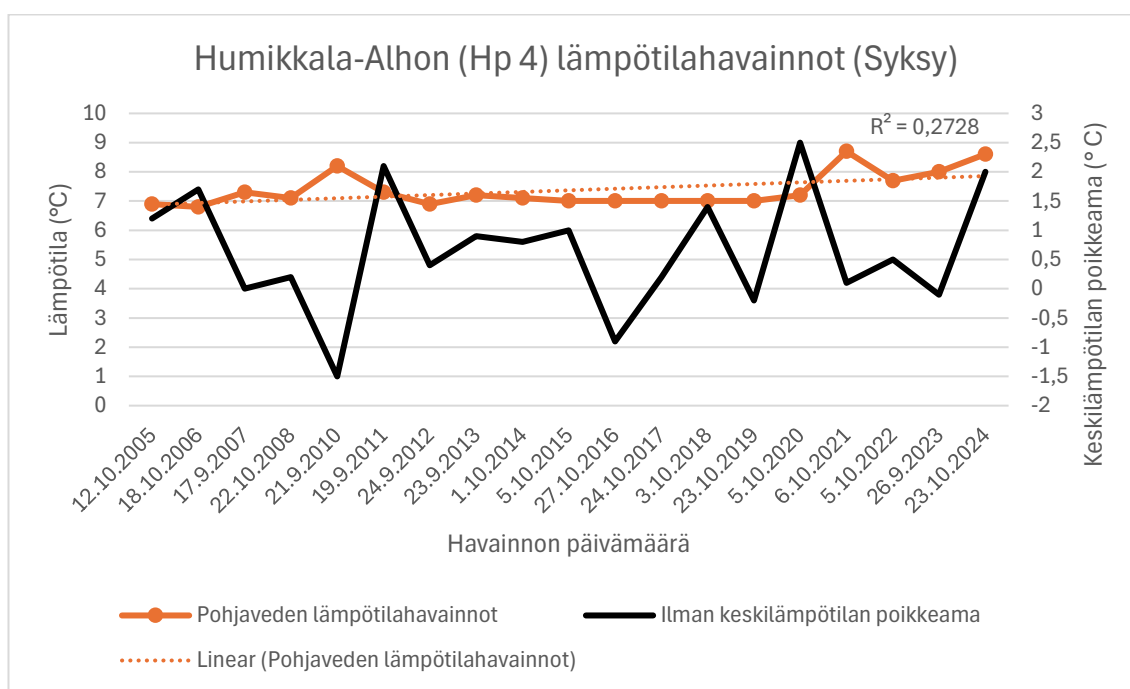


Kuva 22. PV301 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot syksyiltä.

6.1.3. Humikkala-Alho/Kankaisten Golf (Hp 4)

Pohjavesiputkesta Humikkala-Alho/Kankaisten Golf (Hp 4) oli tehty 19 havaintoa. Havainnot on esitetty kuvassa 23.

Hp 4 -pohjavesiputken mittauksissa ei ole havaittavissa merkittäviä muutoksia ja lämpötilassa ei ole selkeää kehityssuuntaa. Keskilämpötilan poikkeama ei näytä vaikuttavan pohjaveden lämpötilan kehitykseen tai muutoksiin.

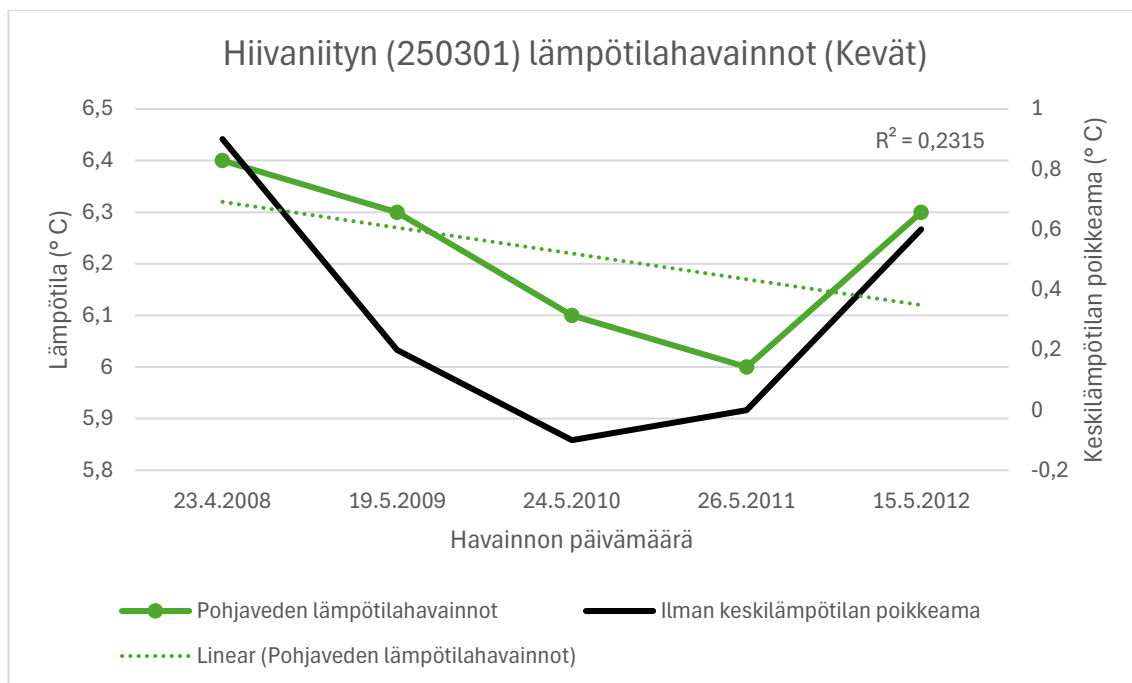


Kuva 23. Hp 4 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot syksyltä.

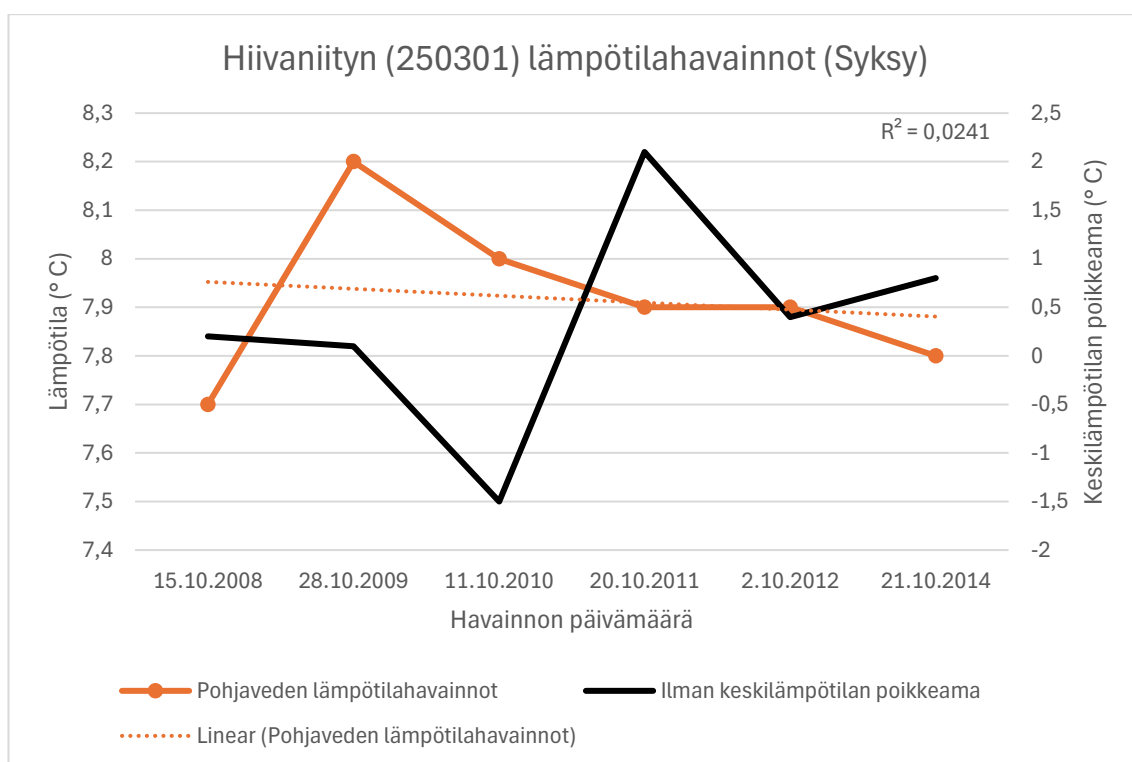
6.2. Hiivaniitty (Mynämäki)

Hiivaniityn pohjavesialueen pohjavesiputkesta 250301 oli tehty yhteensä 11 havaintoa. Havainnot on jaettu alle sekä kevään että syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 24 & 25.

Kevään mittauksen lämpötila on ensin laskenut mittauskauden aikana, mutta mittauskauden lopussa lämpötila nousee nopeasti. Trendiviivan osuvuus on heikko ($r^2 = 0,2315$) vaihtelevan lämpötilan takia, mutta keskilämpötilan poikkeama vastaa erittäin hyvin pohjaveden lämpötilakehitystä. Syksyn havainnoissa ei ole havaittavissa selkeää kehityssuuntaa, ja keskilämpötilan poikkeama ei vastaa pohjaveden lämpötilakehitystä.



Kuva 24. Hiivaniityn 250301 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot keväältä.

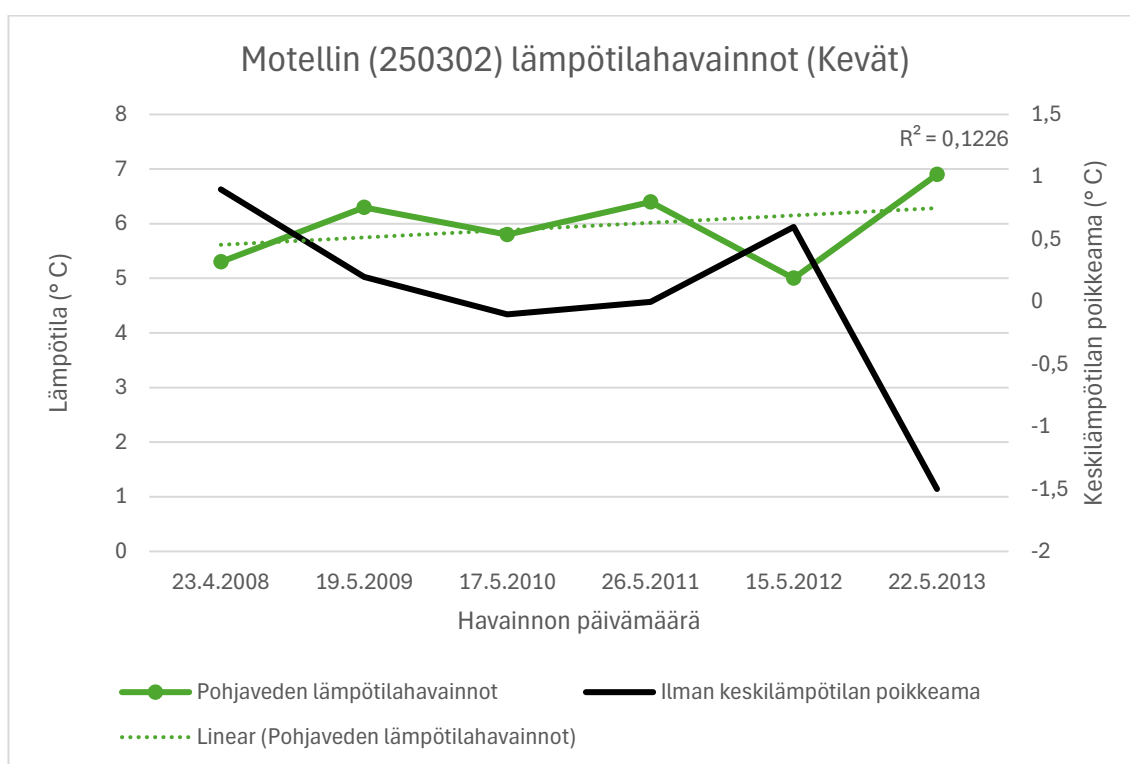


Kuva 25. Hiivaniityn 250301 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot syksyltä.

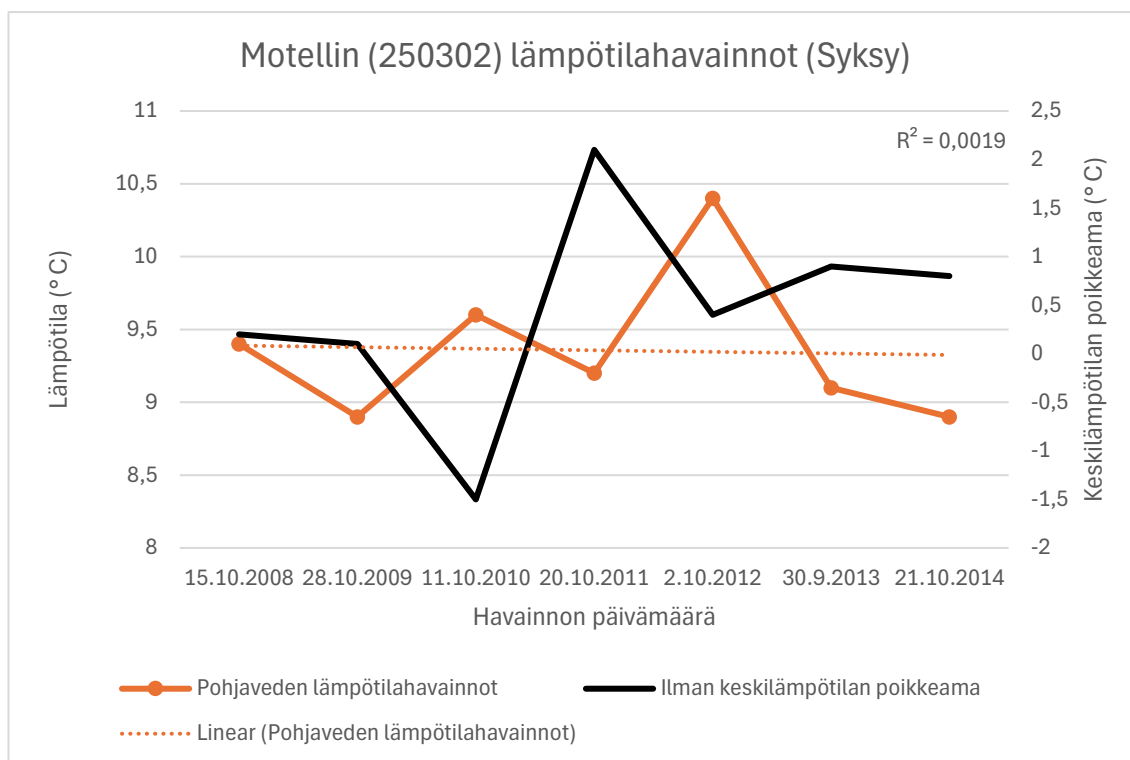
6.3. Motelli (Mynämäki)

Motellin pohjavesialueen pohjavesiputkesta 250302 oli tehty yhteensä 13 havaintoa. Havainnot on jaettu alle sekä kevään että syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 26 & 27.

Motellin kevään mittauksissa ei ole selvää kehityssuuntaa, ja keskilämpötilan poikkeama seuraa huonosti lämpötilan kehitystä. Syksyn havainnoissa pohjaveden lämpötilan kehityssuunta vaihtelee vuosittain. Kehityssuuntaa ei ole nähtävissä ja trendiviivan arvo on hyvin lähellä nollaa ($r^2 = 0,0019$). Pohjaveden lämpötilan vaihtelut seuraavat kuitenkin jollain tarkkuudella ilman lämpötilan muutoksia n. yhden vuoden viiveellä.



Kuva 26. Motellin 250302 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot keväältä.



Kuva 27. Motellin 250302 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot syksyltä.

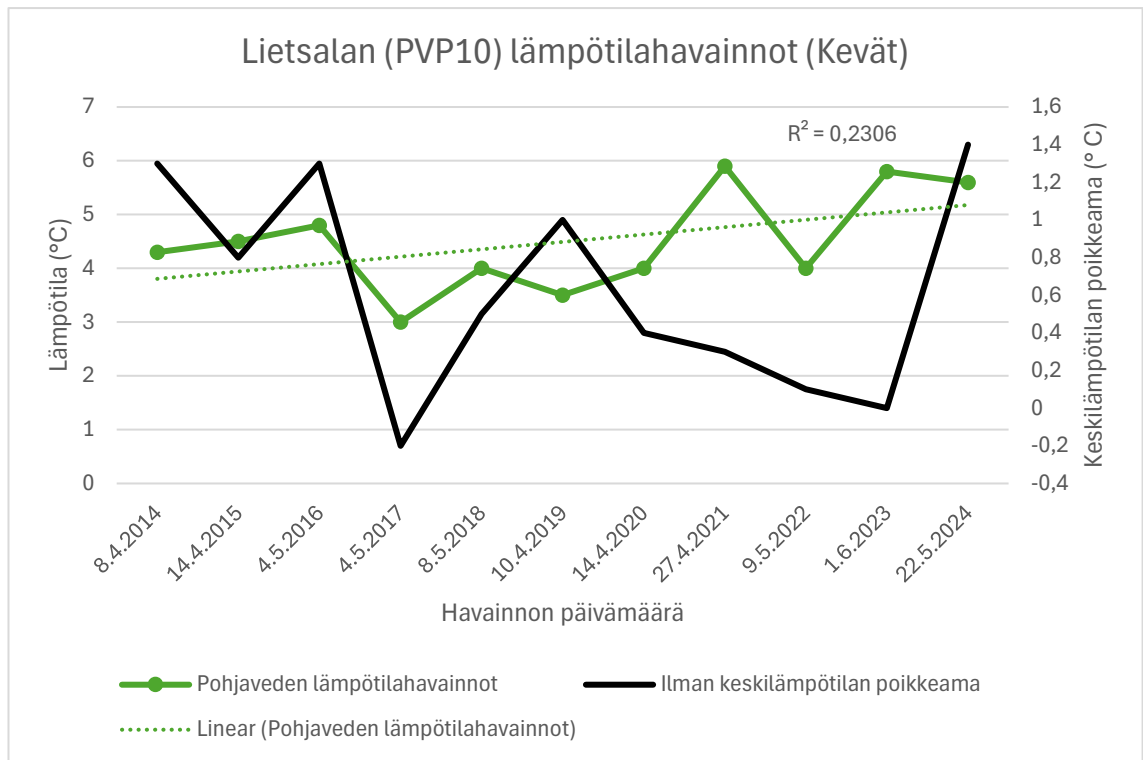
6.4. Lietsala (Naantali)

Lietsalan pohjavesialueella oli kaksi pohjavesiputkea, joista oli tehty lämpötilahavaintoja.

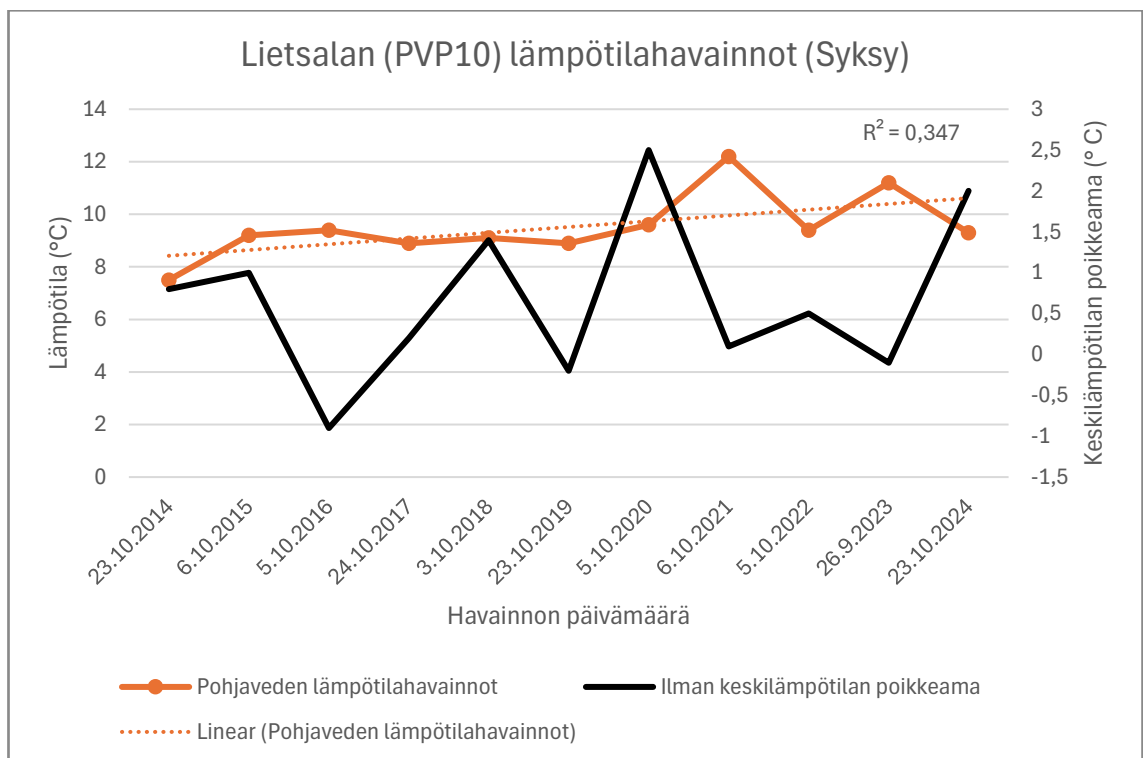
6.4.1. Aurinko_Golf_PVP10 (PVP10)

Pohjavesiputkesta PVP10 oli tehty yhteensä 22 havaintoa. Havainnot on jaettu alle sekä kevään että syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 28 & 29.

Kevään mittauksissa on nähtävissä nouseva lämpötilan kehityssuunta, mutta sen suuruus ja todennäköisyys r^2 -arvon perusteella on melko pieni. Syksyn mittausten tilanne on sama kuin keväällä ja vaikka r^2 -arvo on hieman suurempi, osuvuus on silti melko huono.



Kuva 28. PVP10 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot keväältä.

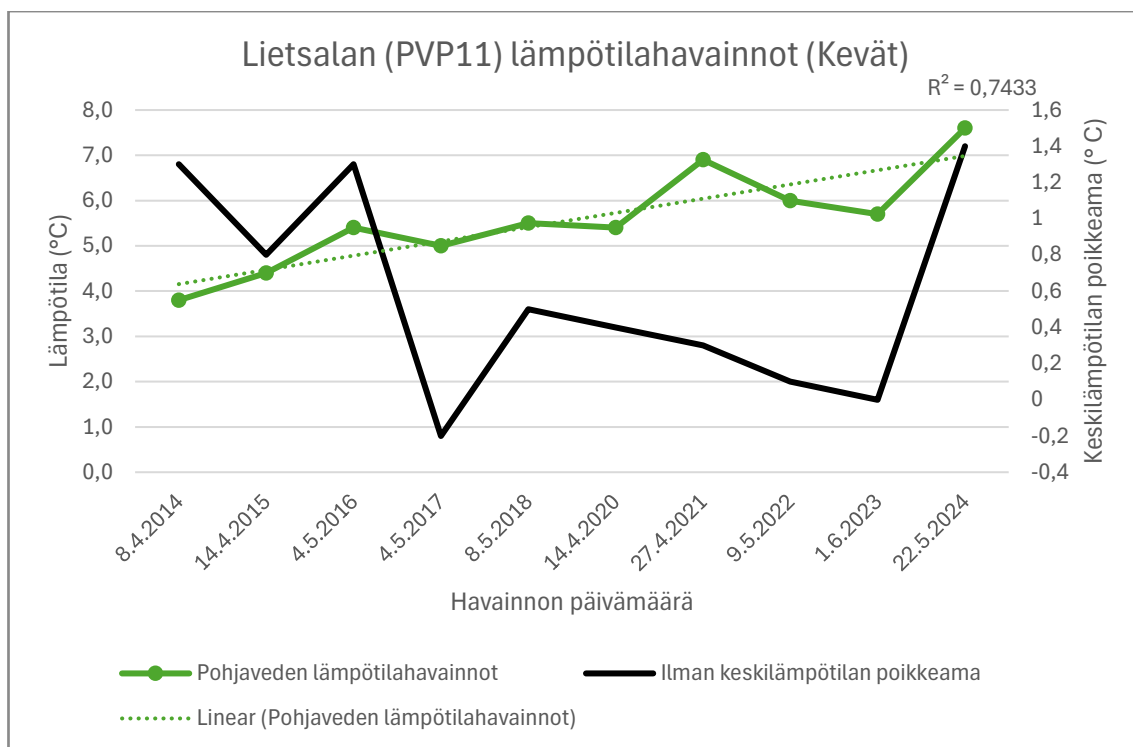


Kuva 29. PVP10 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot syksyiltä.

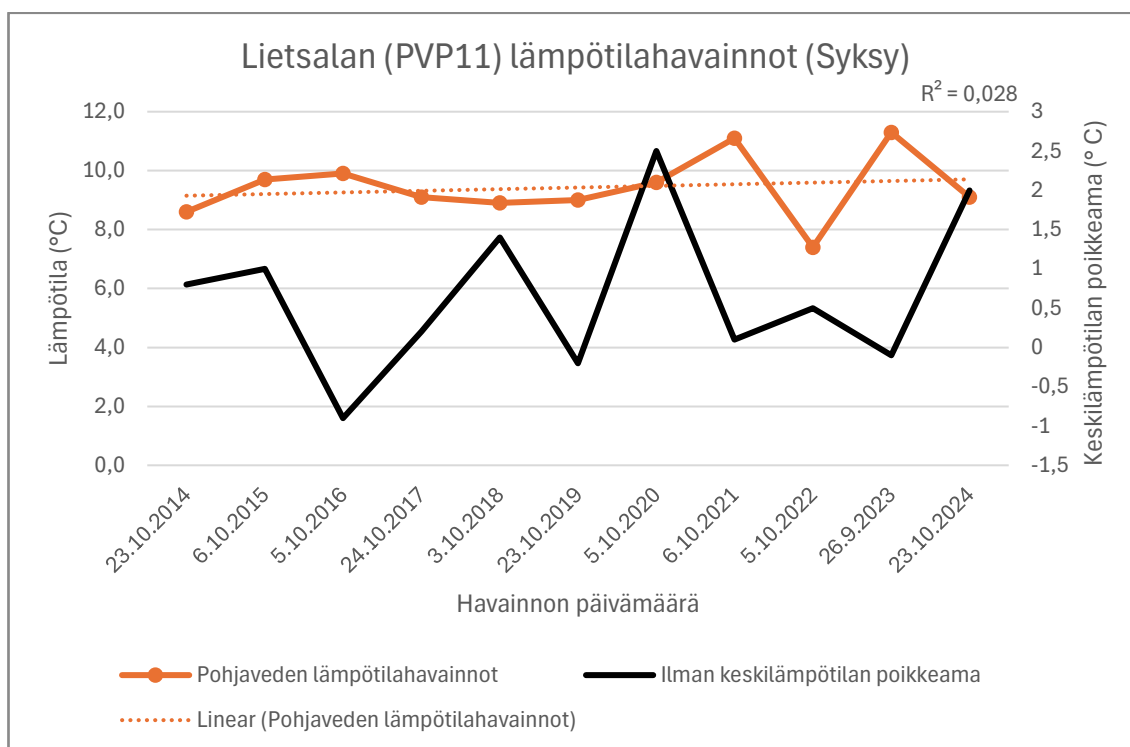
6.4.2. Aurinko_Golf_PVP11 (PVP11)

Pohjavesiputkesta PVP11 oli tehty yhteensä 21 havaintoa. Havainnot on jaettu alle sekä kevään että syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 30 & 31.

Kevään havainnoissa on selkeä nouseva kehityssuunta, ja pohjaveden lämpötilan kehitys voidaan nähdä seuraavan keskilämpötilan poikkeamaa, varsinkin mittausten loppupäässä. Syksyn havaintojen loppupäässä pohjaveden lämpötila seuraa myös keskilämpötilan poikkeamaa n. yhden vuoden viiveellä



Kuva 30. PVP11 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot keväältä.



Kuva 31. PVP11 -pohjavesiputken lämpötilahavainnot syksyltä.

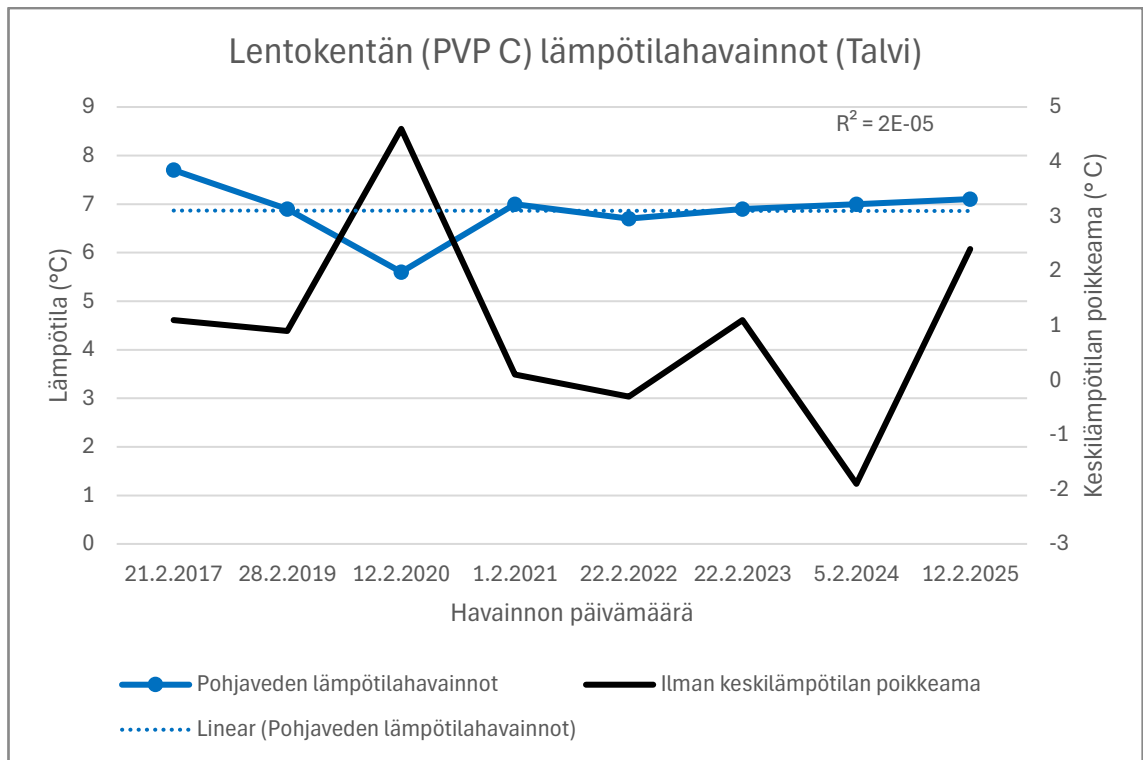
6.5. Lentokenttä (Turku)

Lentokentän pohjavesialueella oli kaksi pohjavesiputkea, joista oli tehty lämpötilahavaintoja.

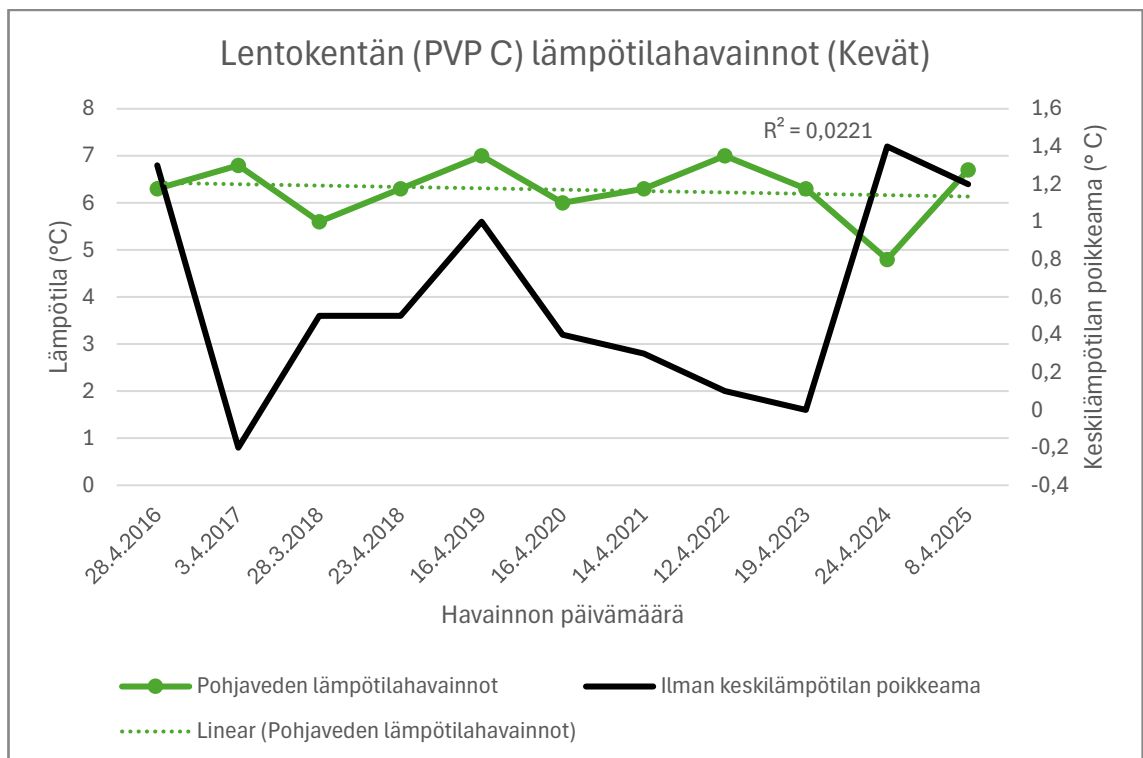
6.5.1. Lentokenttä (PVP C)

Pohjavesiputkesta PVP C oli tehty yhteensä 38 havaintoa. Havainnot on jaettu alle talven, kevään, kesän sekä syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 32–35.

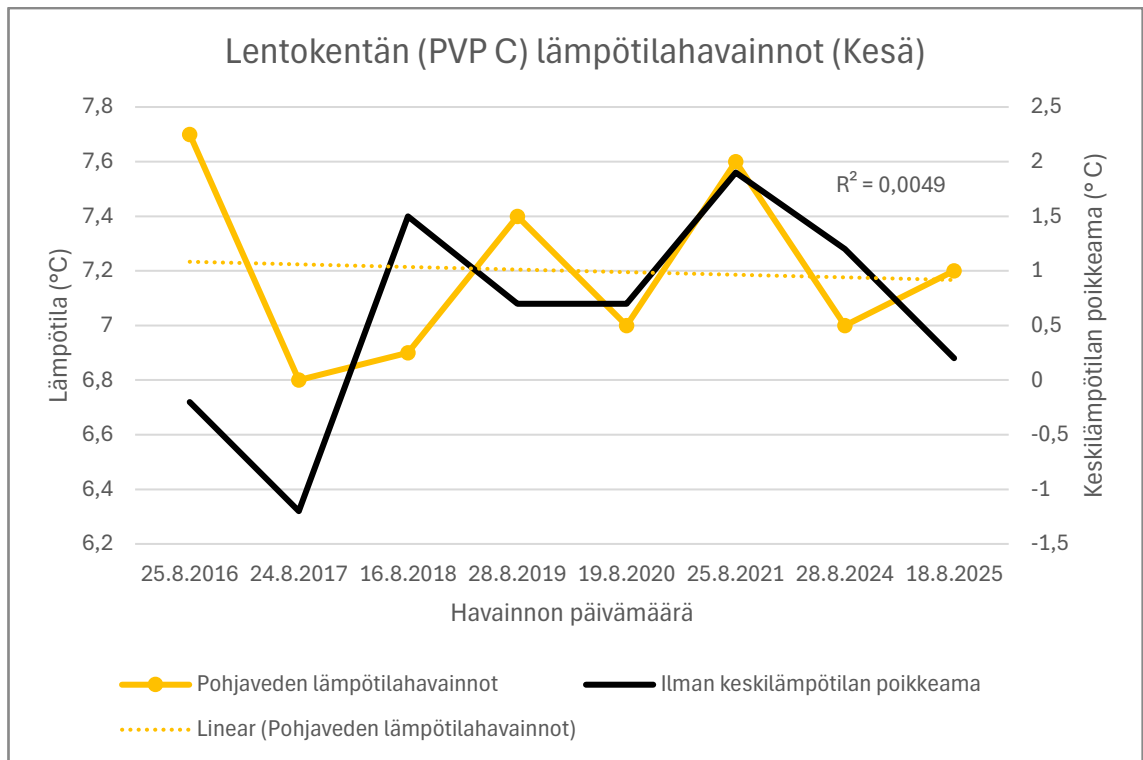
Pohjavesiputken PVP C talven lämpötilamittaukset ovat olleet tasaisia, kevään ja syksyn mittauksissa on ollut pientä vaihtelua vuosittain ja kesän mittauksissa on ollut suuria vaihteluita vuoden mukaan. Muutokset ovat kuitenkin olleet edestakaisia, joten kuvaajissa ei ole havaittavissa selkeää kehityssuuntaa.



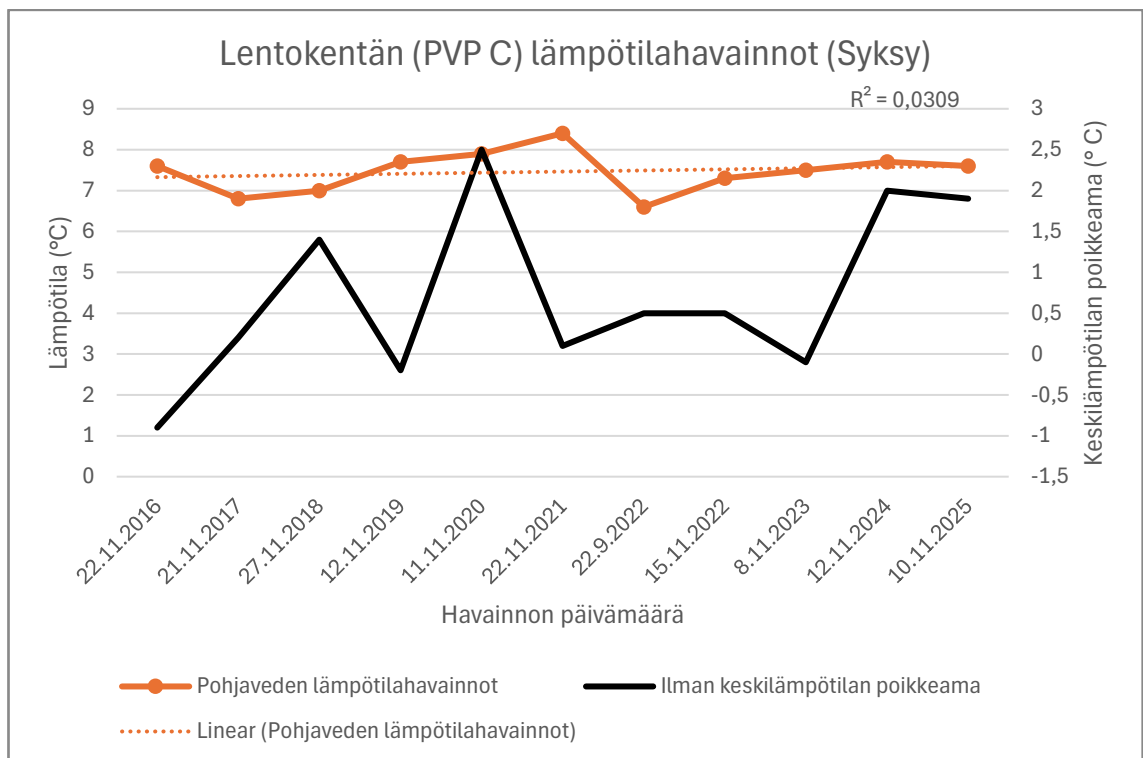
Kuva 32. PVP C -pohjavesiputken havainnot talvelta.



Kuva 33. PVP C -pohjavesiputken havainnot keväältä.



Kuva 34. PVP C -pohjavesiputken havainnot kesältä.

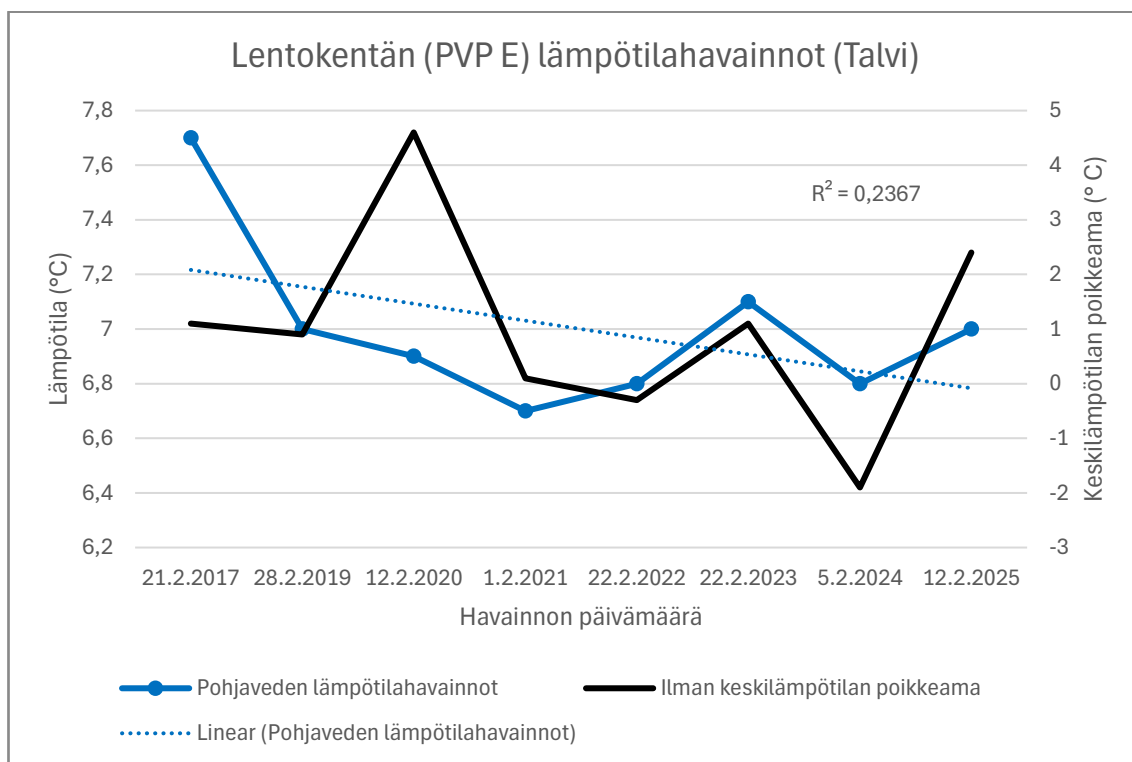


Kuva 35. PVP C -pohjavesiputken havainnot syksyiltä.

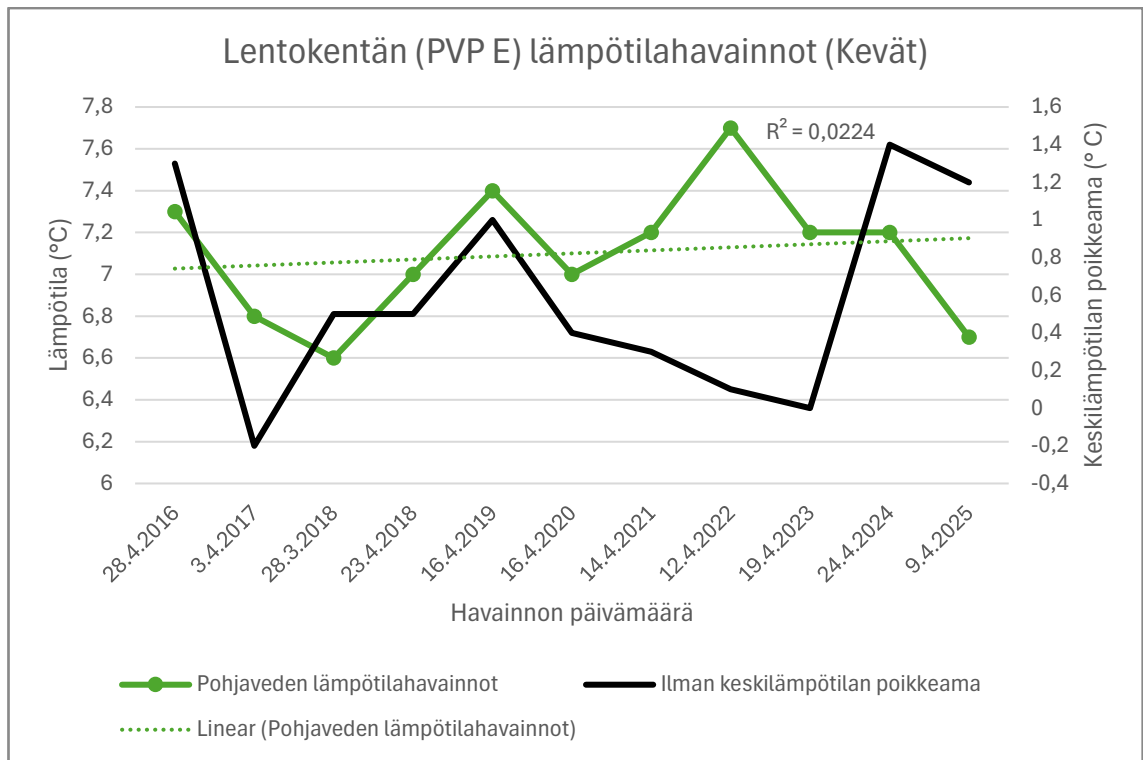
6.5.2. Lentokenttä (PVP E)

Pohjavesiputkesta PVP E oli tehty yhteensä 38 havaintoa. Havainnot on jaettu alle sekä kevään että syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 36–39.

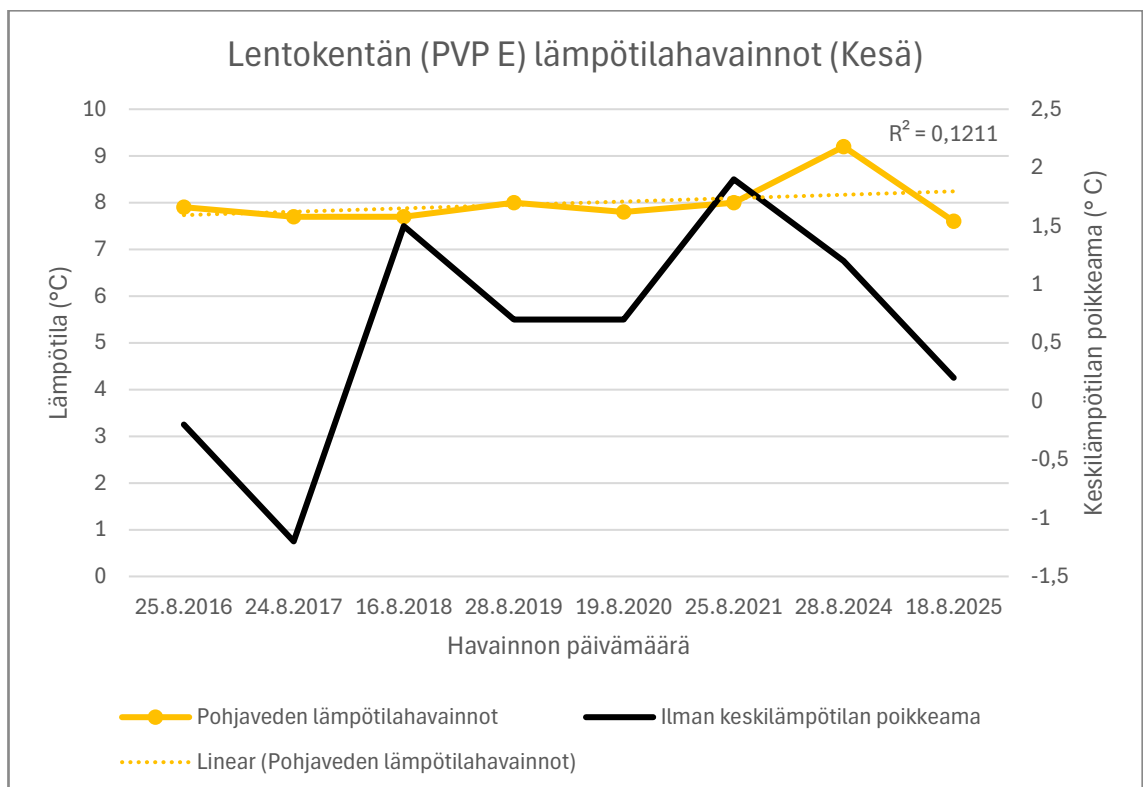
PVP E -pohjavesiputkien lämpötilahavaintojen kehitys vaihtelee voimakkaasti vuodenaikojen mukaan. Kesän havainnot pysyvät lähes muuttumattomina, kun taas kevään, syksyn ja talven lämpötilahavainnot vaihtelevat voimakkaasti. Pohjaveden lämpötila seuraa keskilämpötilan poikkeamia, mutta vain hetkellisesti ja tiettyinä mittauskausina.



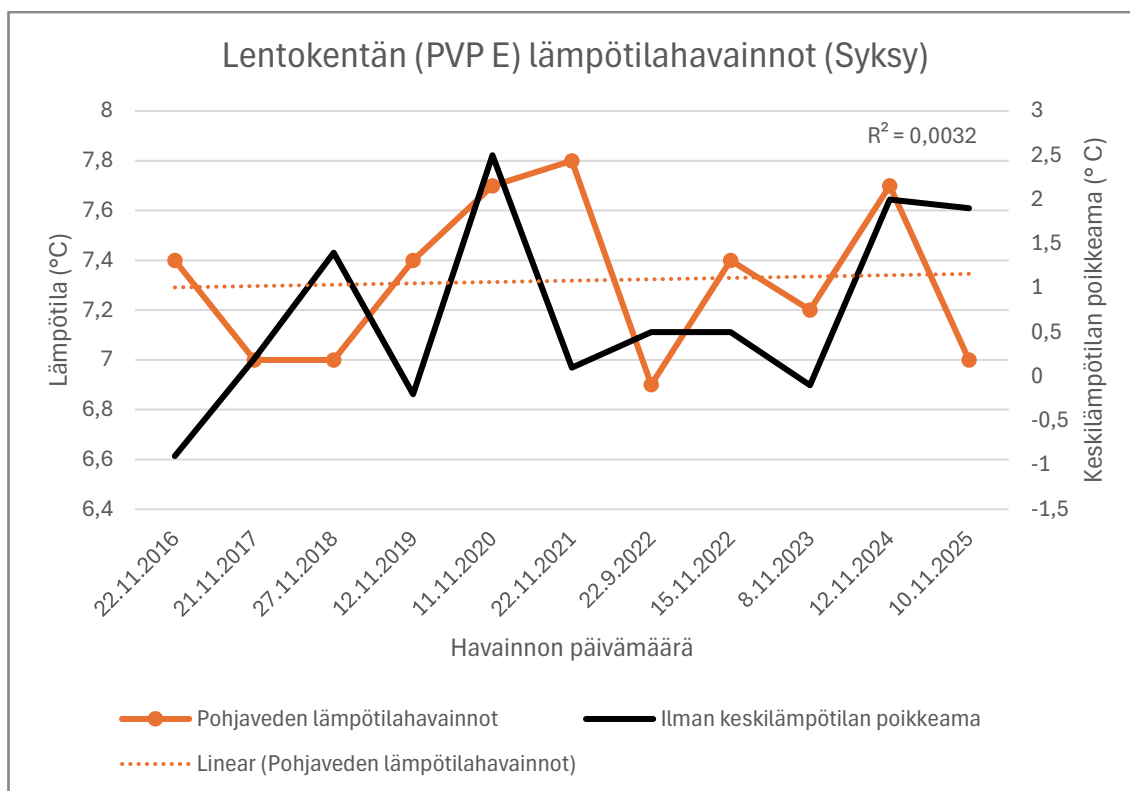
Kuva 36. PVP E -pohjavesiputken havainnot talvelta.



Kuva 37. PVP E -pohjavesiputken havainnot keväältä.



Kuva 38. PVP E -pohjavesiputken havainnot kesältä.



Kuva 39. PVP E -pohjavesiputken havainnot syksyiltä.

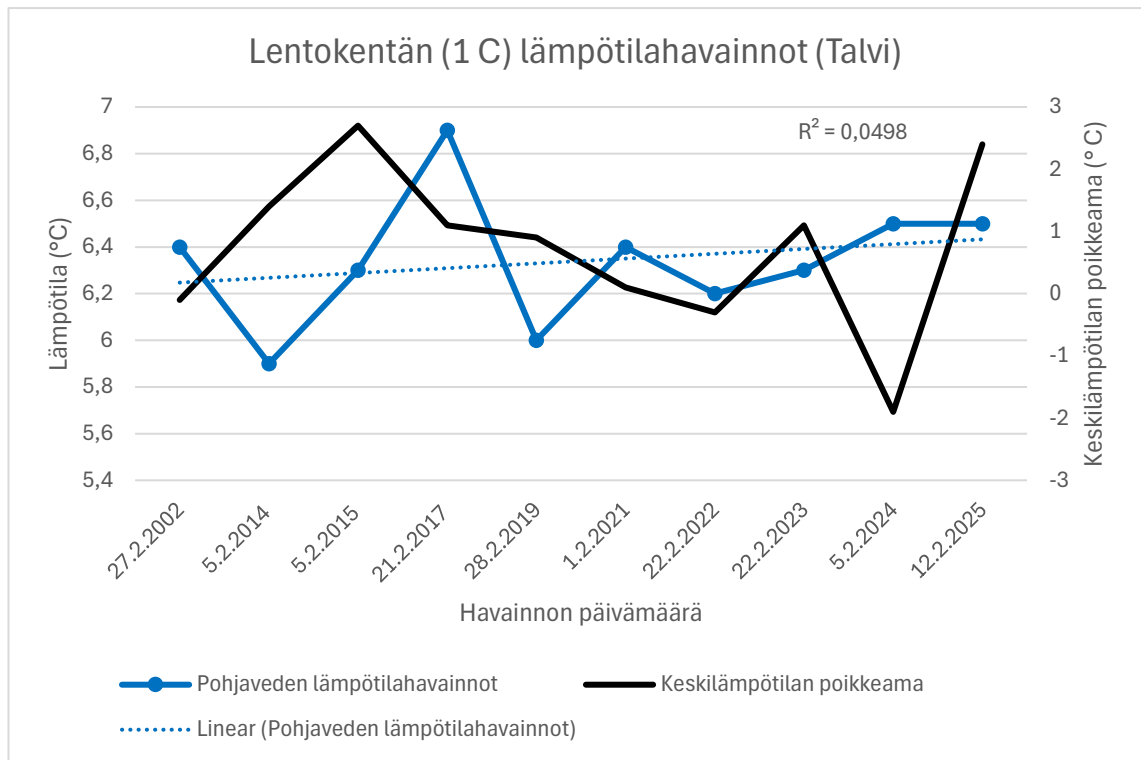
6.6. Munittula (Turku)

Munittulan pohjavesialueella oli kuusi pohjavesiputkea, joista oli tehty lämpötilahavaintoja.

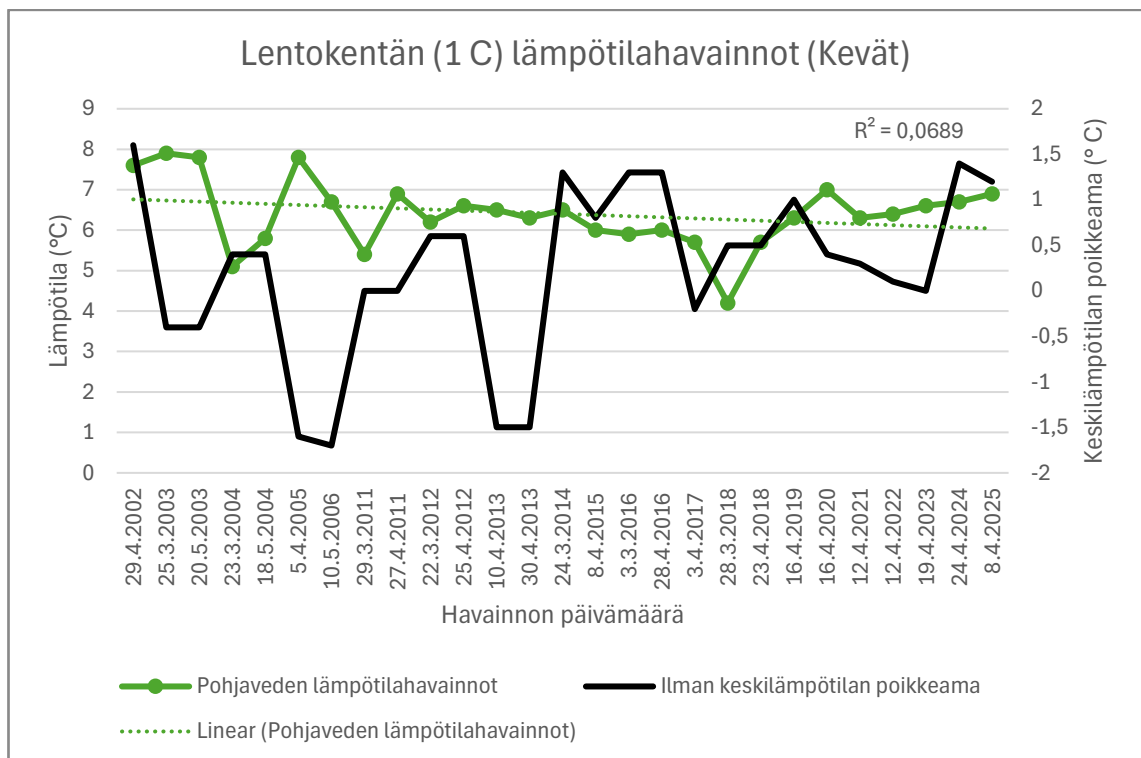
6.6.1. Lentokenttä (1 C)

Pohjavesiputkesta 1 C oli tehty yhteensä 76 havaintoa. Havainnot on jaettu alle talven, kevään, kesän sekä syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 40–43.

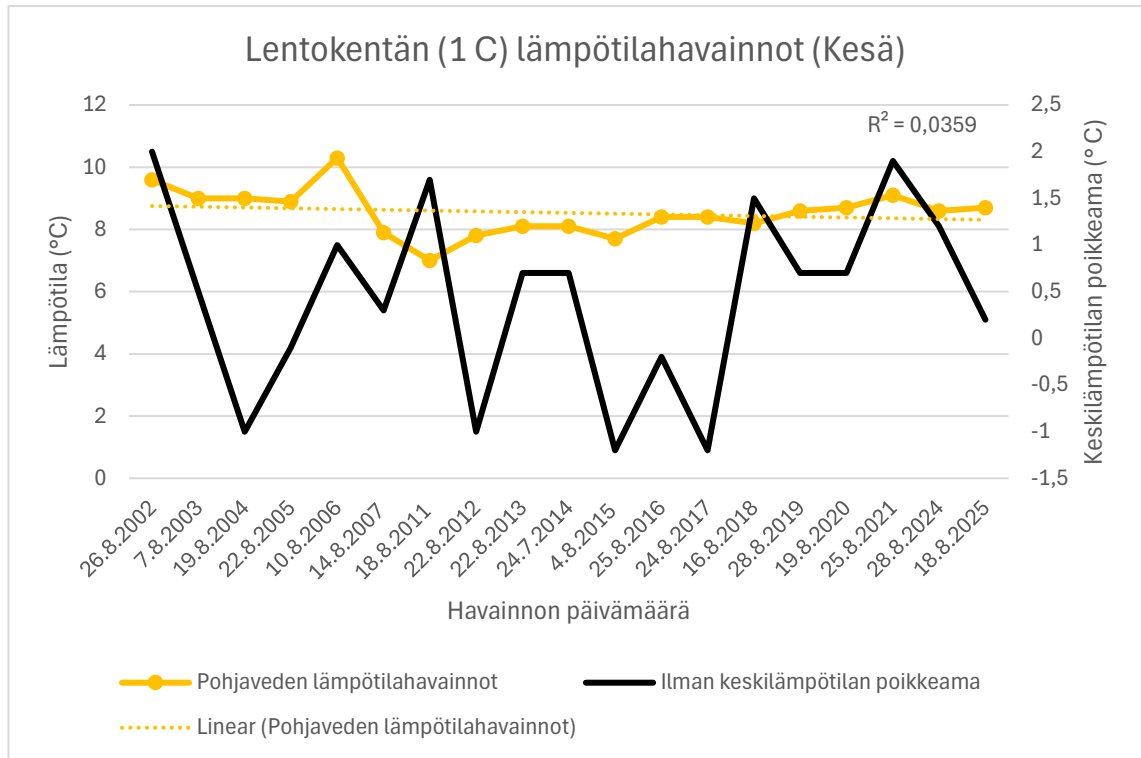
Pohjaveden lämpötilan mittaustulokset vaihtelevat vuodenaikojen välillä ja kehityssuunnissa ei ole yhtenäisyyttä. Keskilämpötilan poikkeaman käyrät eivät myöskään ole yhteneviä



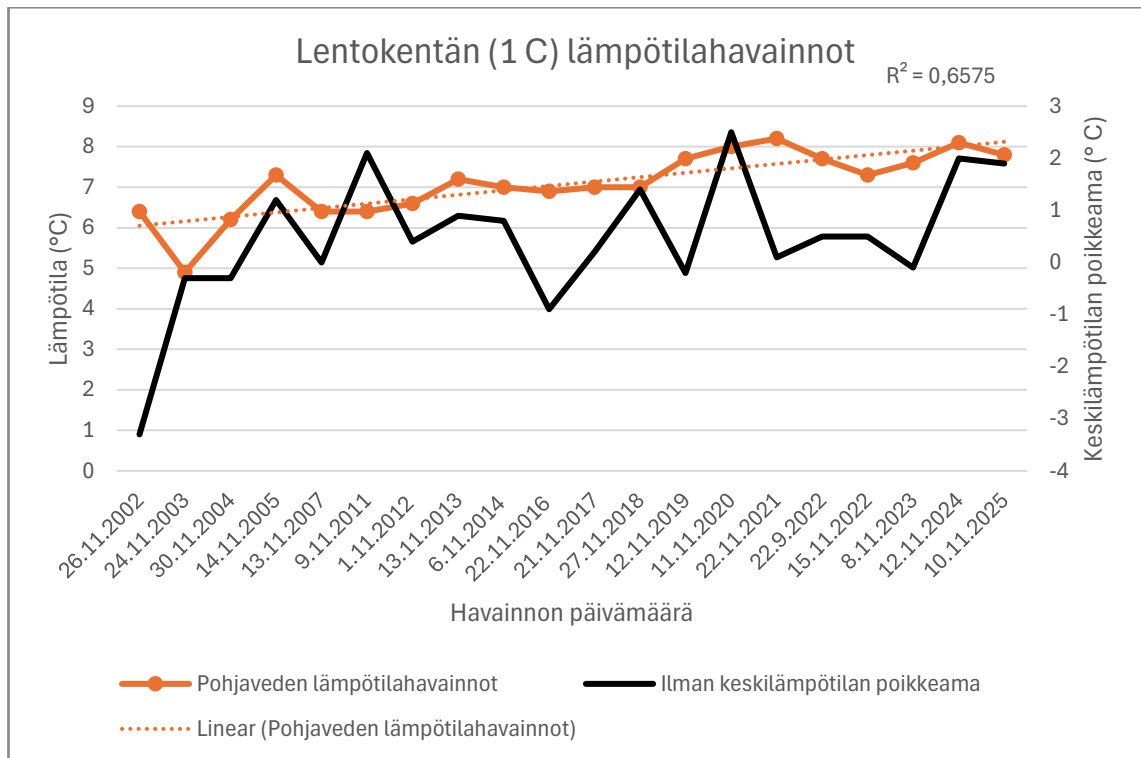
Kuva 40. 1 C -pohjavesiputken havainnot talvelta.



Kuva 41. 1 C -pohjavesiputken havainnot keväältä.



Kuva 42. 1 C -pohjavesiputken havainnot kesältä.

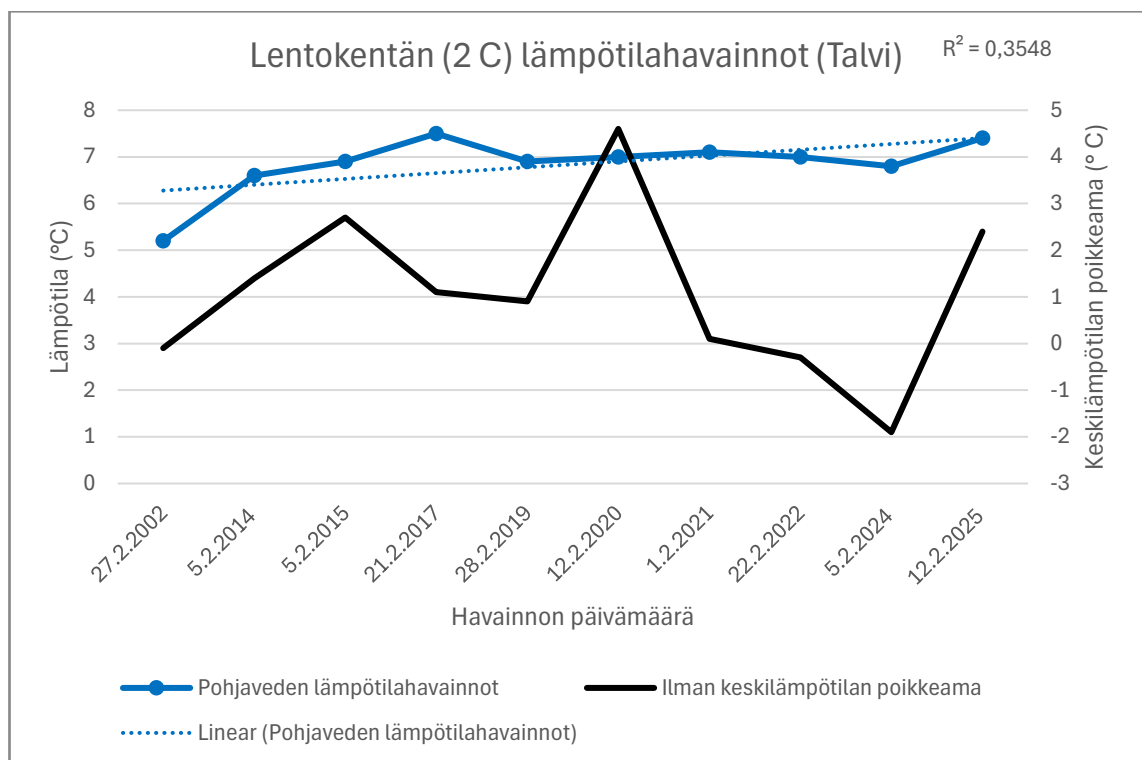


Kuva 43. 1 C -pohjavesiputken havainnot syksyltä.

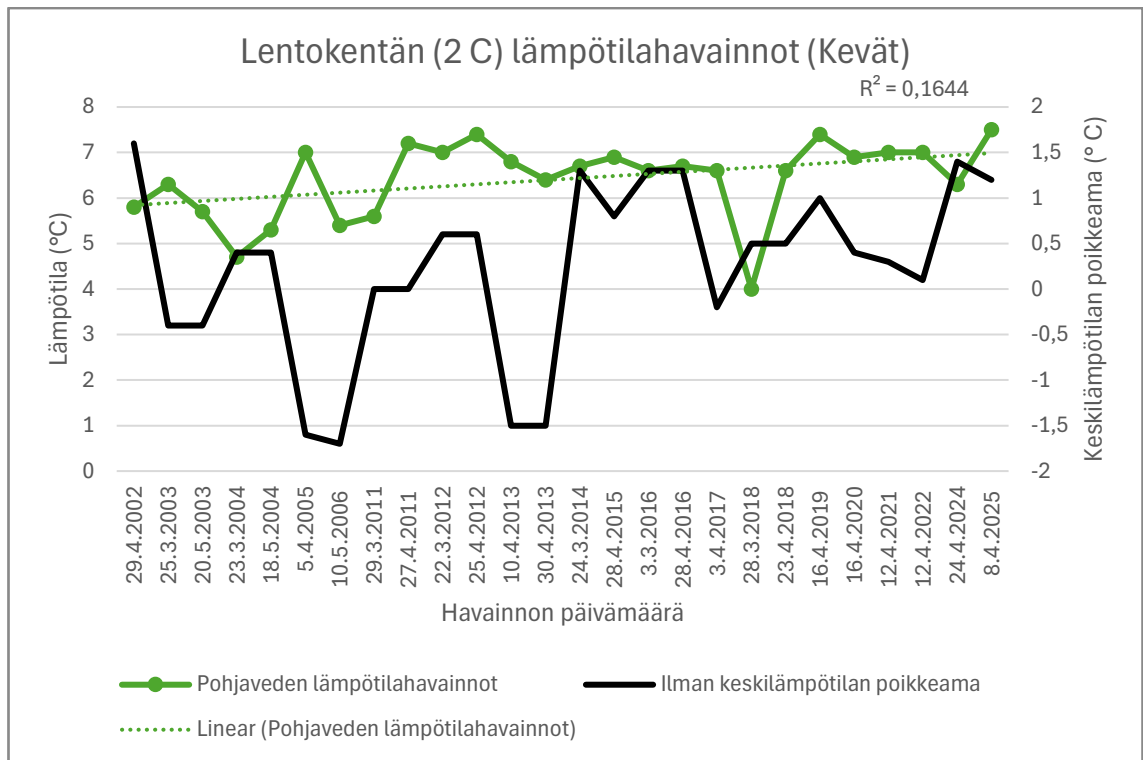
6.6.2. Lentokenttä (2 C)

Pohjavesiputkesta 2 C oli tehty yhteensä 73 havaintoa. Havainnot on jaettu alle talven, kevään, kesän sekä syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 44–47.

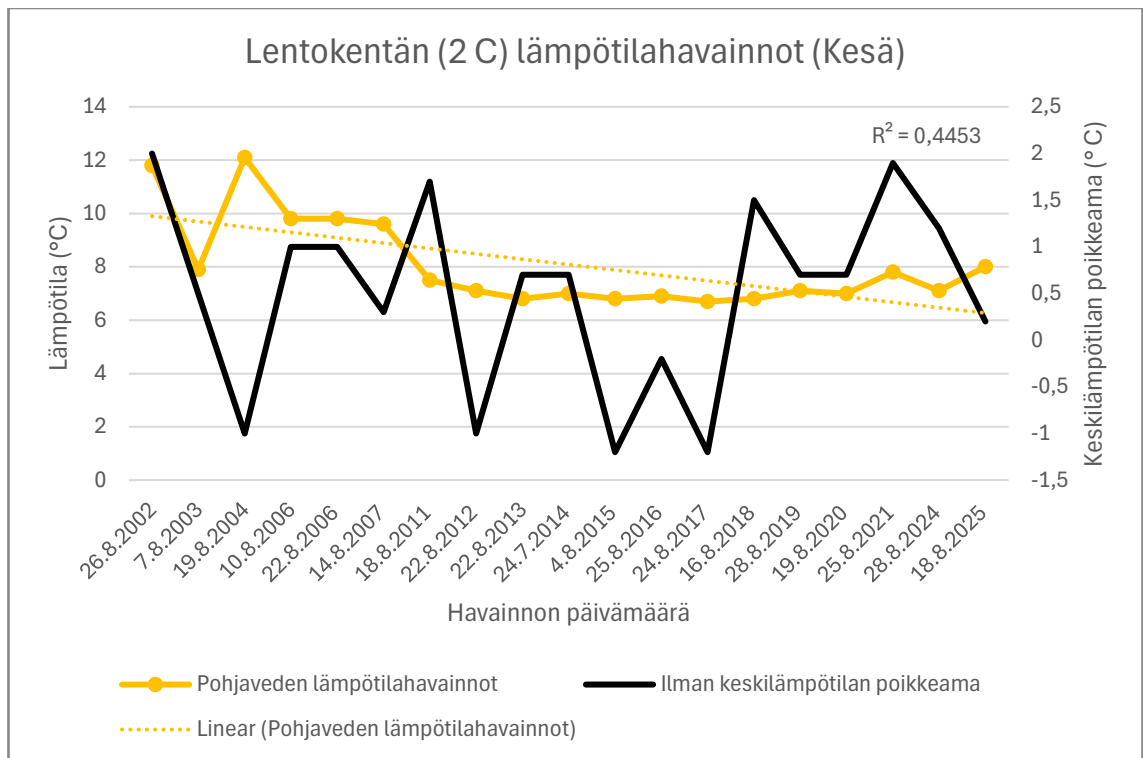
2 C -pohjavesiputken havainnot eivät seuraa selkeästi keskilämpötilan poikkeamia milläkään vuodenaajalla. Selvimmät kehityssuunnat ovat talven ja kesän mittauksissa, mutta kehityksen suunta on näissä tapauksissa päinvastainen.



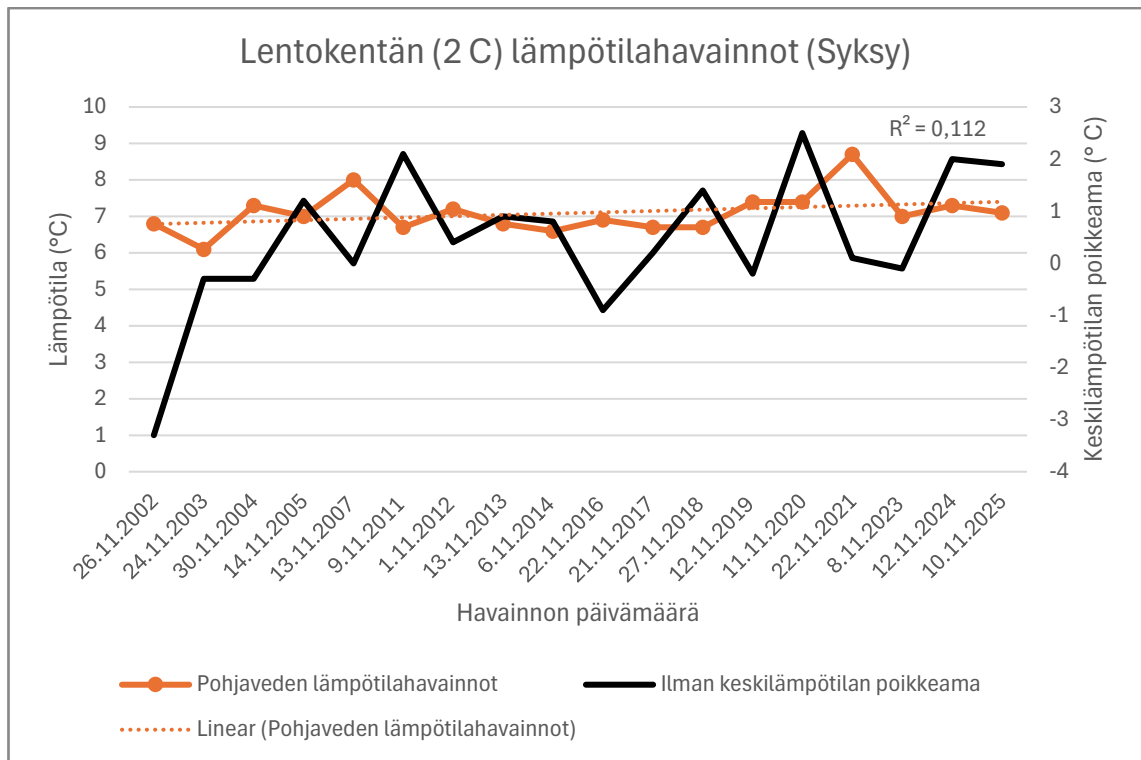
Kuva 44. 2 C -pohjavesiputken havainnot talvelta



Kuva 45. 2 C -pohjavesiputken havainnot keväältä



Kuva 46. 2 C -pohjavesiputken havainnot kesältä.

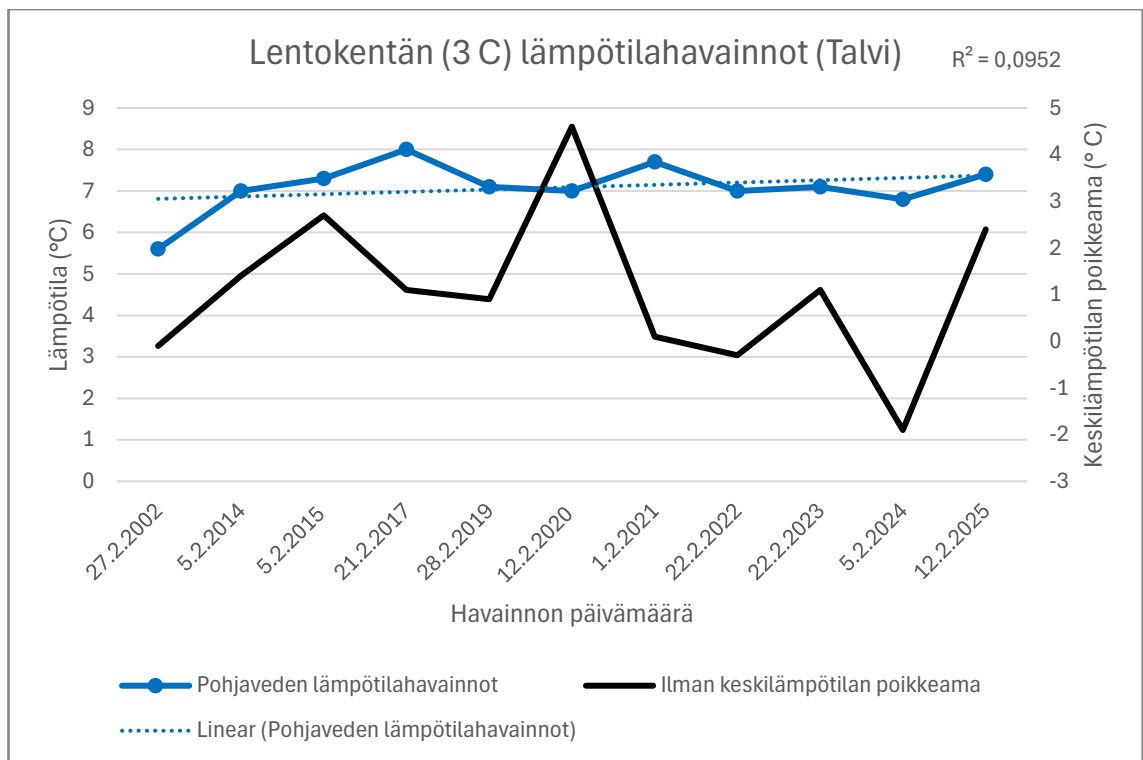


Kuva 47. 2 C -pohjavesiputken havainnot syksyltä.

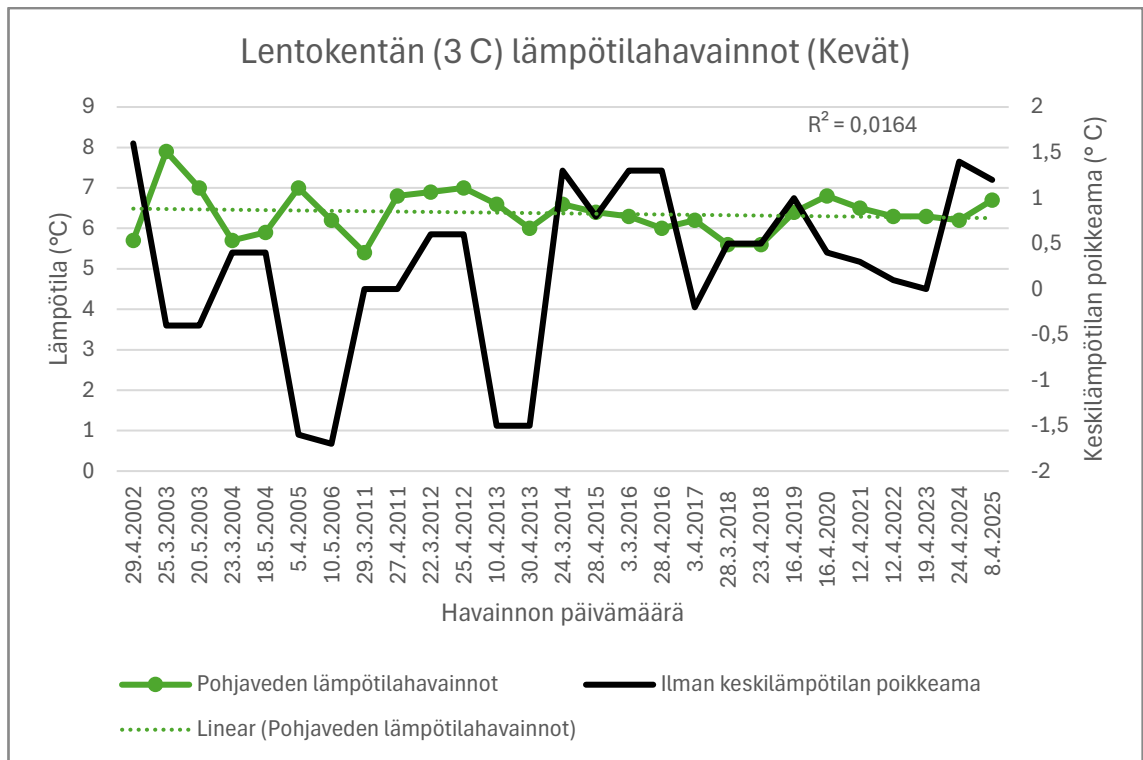
6.6.3. Lentokenttä (3 C)

Pohjavesiputkesta 3 C oli tehty yhteensä 76 havaintoa. Havainnot on jaettu alle talven, kevään, kesän sekä syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 48–51.

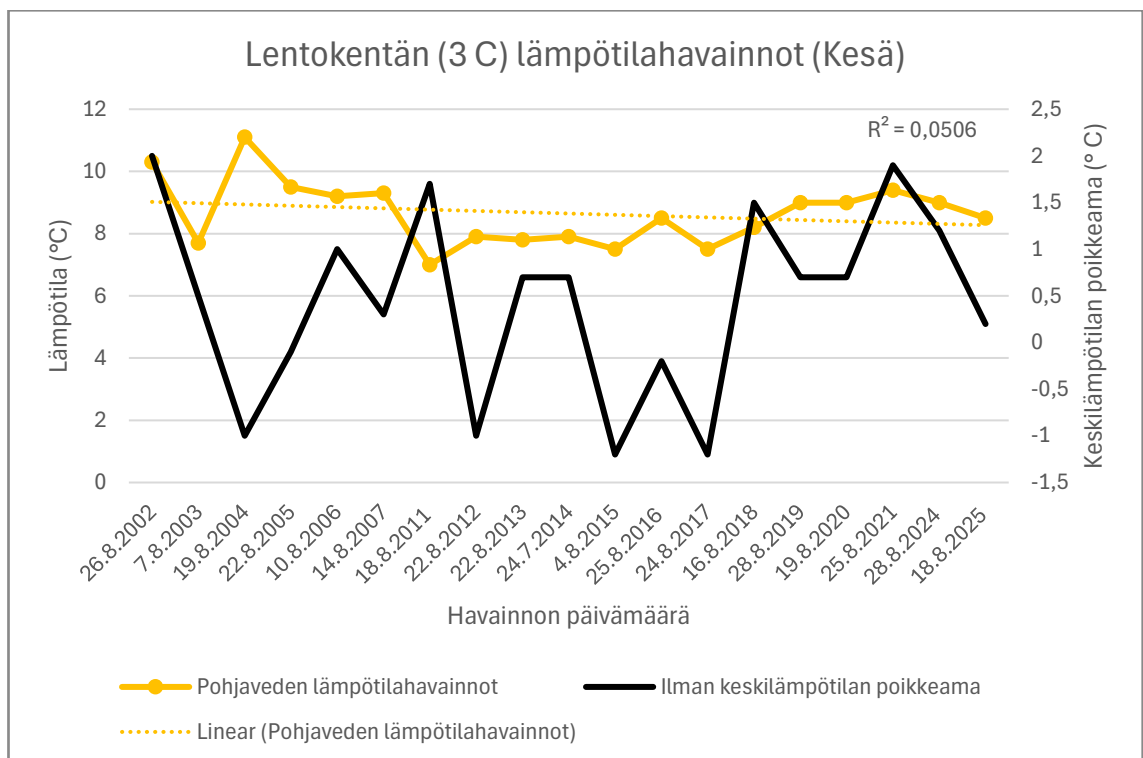
Pohjavesiputken 3 C havainnoista ainoastaan syksyn havainnoissa on selkeä, nouseva kehityssuunta. Muissa mittauksissa kehityssuuntaa on vaikea sanoa ja ilman keskilämpötilan poikkeamalla ei ole merkittävää yhteneväisyyttä pohjaveden lämpötilan kehitykseen.



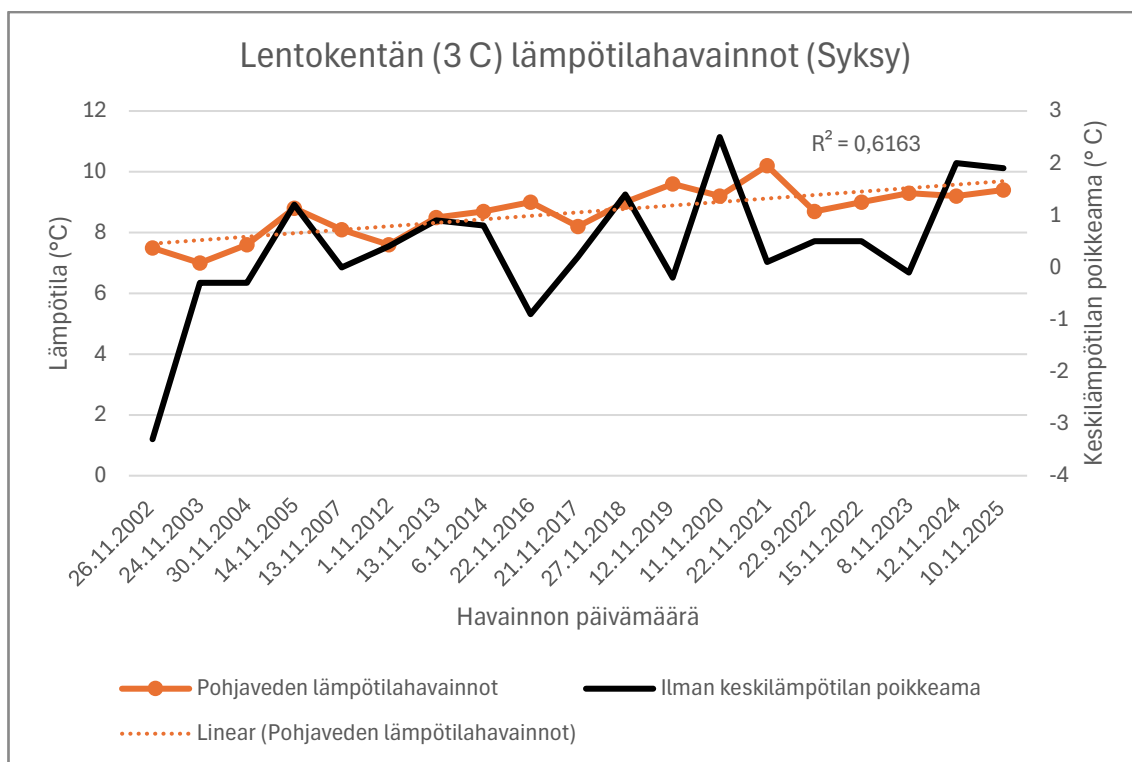
Kuva 48. 3 C -pohjavesiputken havainnot talvelta.



Kuva 49. 3 C -pohjavesiputken havainnot keväältä.



Kuva 50. 3 C -pohjavesiputken havainnot kesältä.

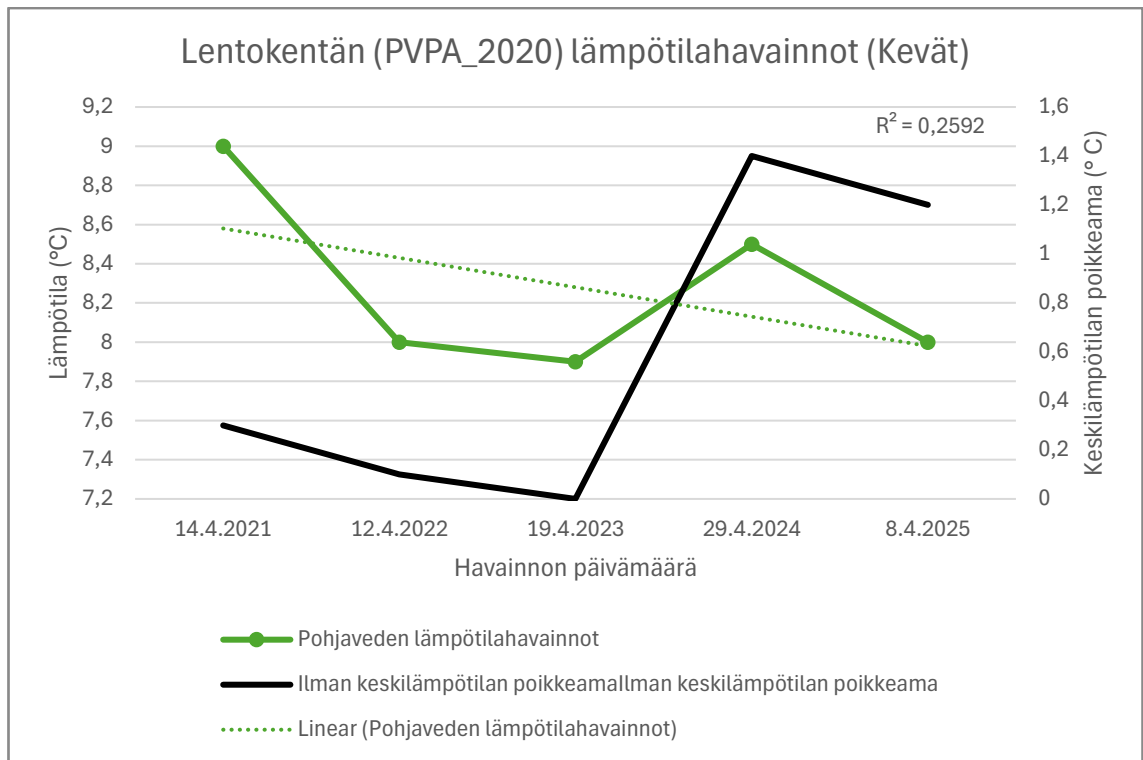


Kuva 51. 3 C -pohjavesiputken havainnot syksyiltä.

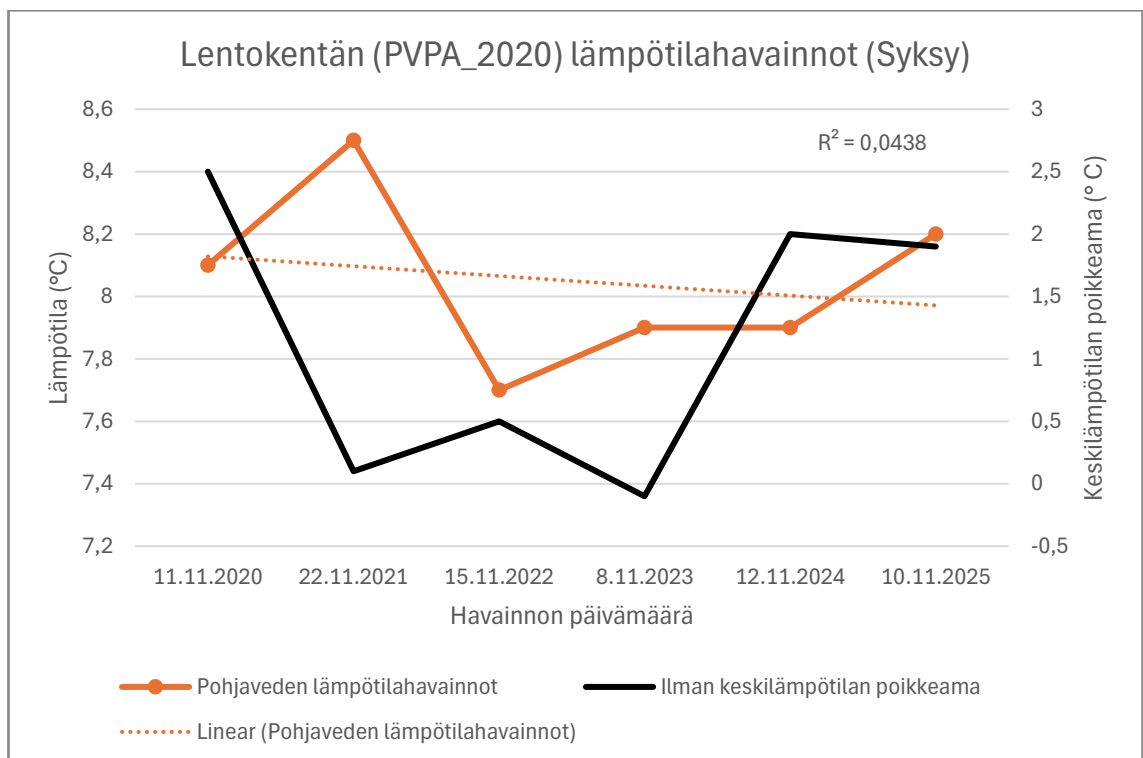
6.6.4. Lentokenttä (PVPA_2020)

Pohjavesiputkesta PVPA_2020 oli tehty yhteensä 11 havaintoa. Havainnot on jaettu alle kevään ja syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 52 & 53.

PVPA_2020-pohjavesiputken mittaustulokset keväältä seuraavat ilman keskilämpötilan poikkeamaa jollain tarkkuudella. Muutokset eivät kuitenkaan ole yhtä voimakkaita pohjaveden lämpötilassa. Syksyn havaintojen kehityssuuntaa ja ilman lämpötilan mahdollista vaikutusta ei pysty sanomaan kuvaajan perusteella.



Kuva 52. PVPA_2020-pohjavesiputken havainnot keväältä.

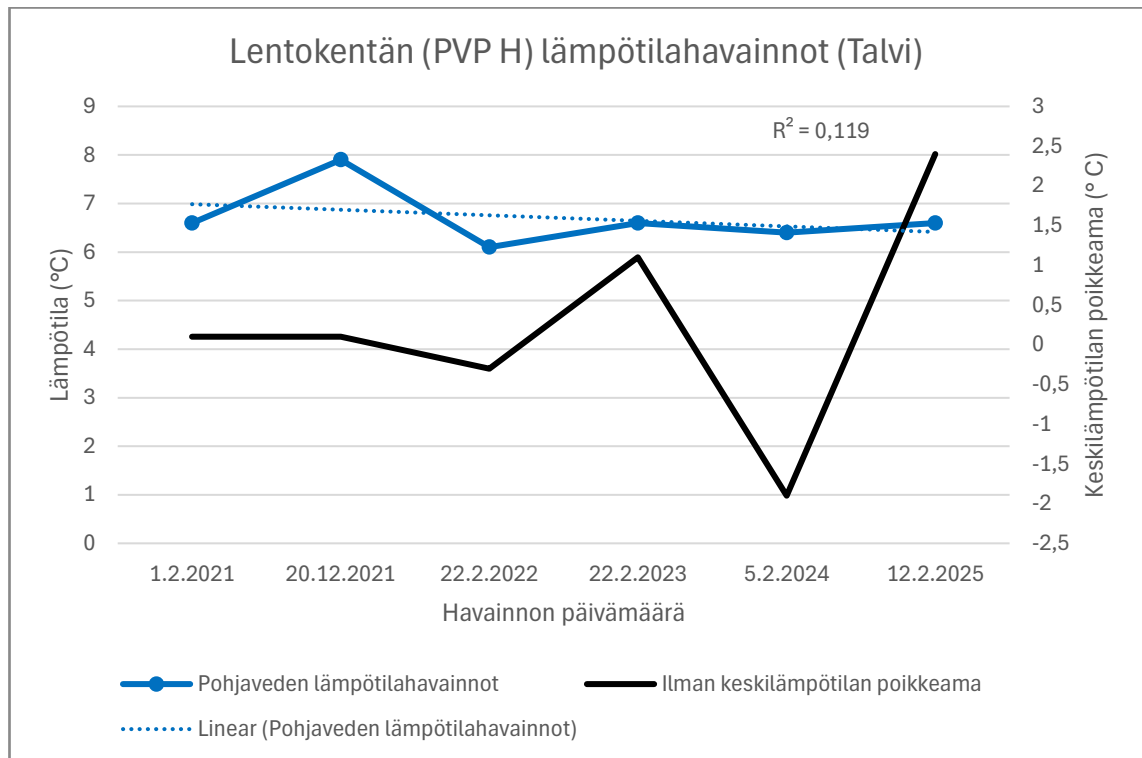


Kuva 53. PVPA_2020-pohjavesiputken havainnot syksyiltä.

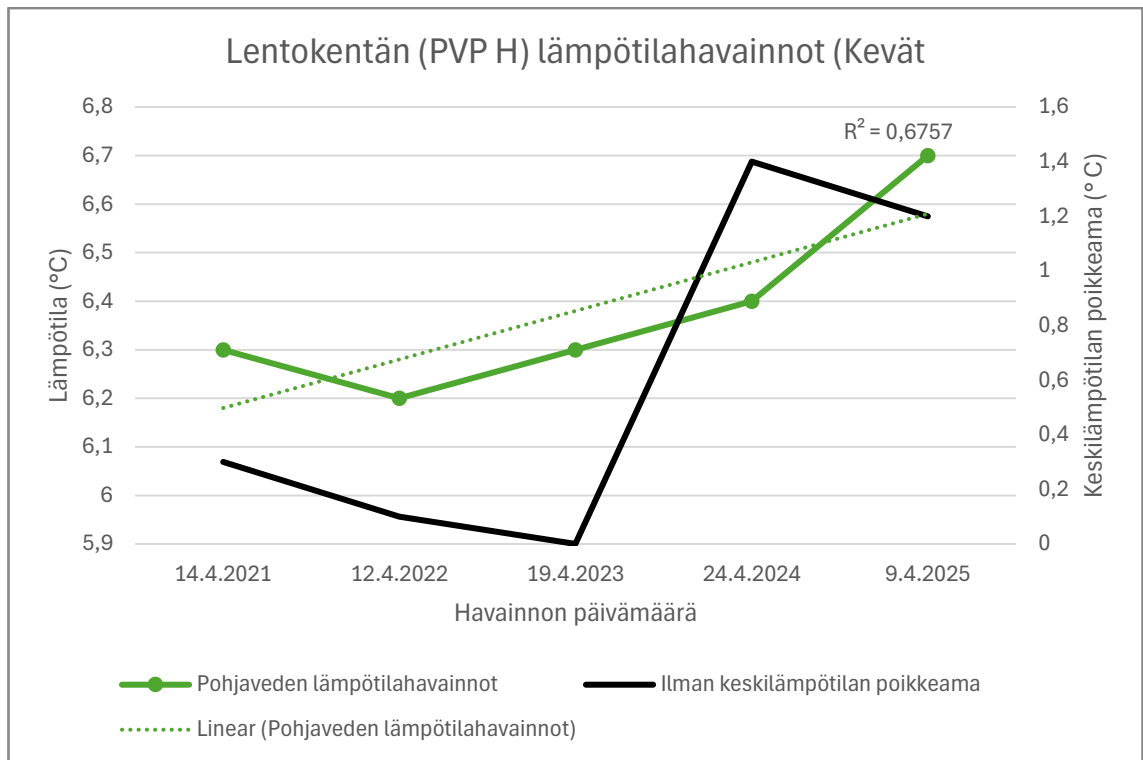
6.6.5. Lentokenttä (PVP H)

Pohjavesiputkesta PVP H oli tehty yhteensä 17 havaintoa. Havainnot on jaettu alle talven, kevään sekä syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 54–56.

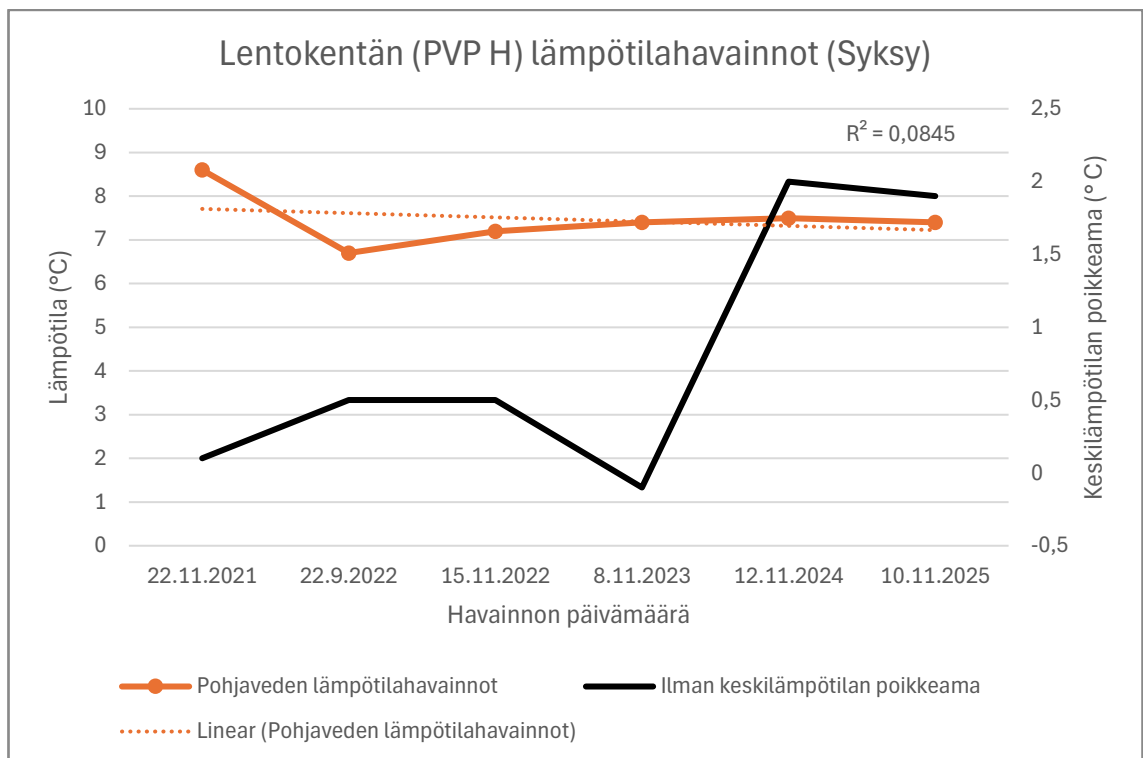
PVP H-pohjavesiputken havainnoista vain kevään mittauksissa on havaittavissa selvä, nouseva kehityssuunta. Talven ja syksyn mittaustulokset ovat pysyneet tasaisina, ja ne eivät ole muuttuneet ilman keskilämpötilan poikkeamien mukana.



Kuva 54. PVP H -pohjavesiputken havainnot talvelta.



Kuva 55. PVP H -pohjavesiputken havainnot keväältä.

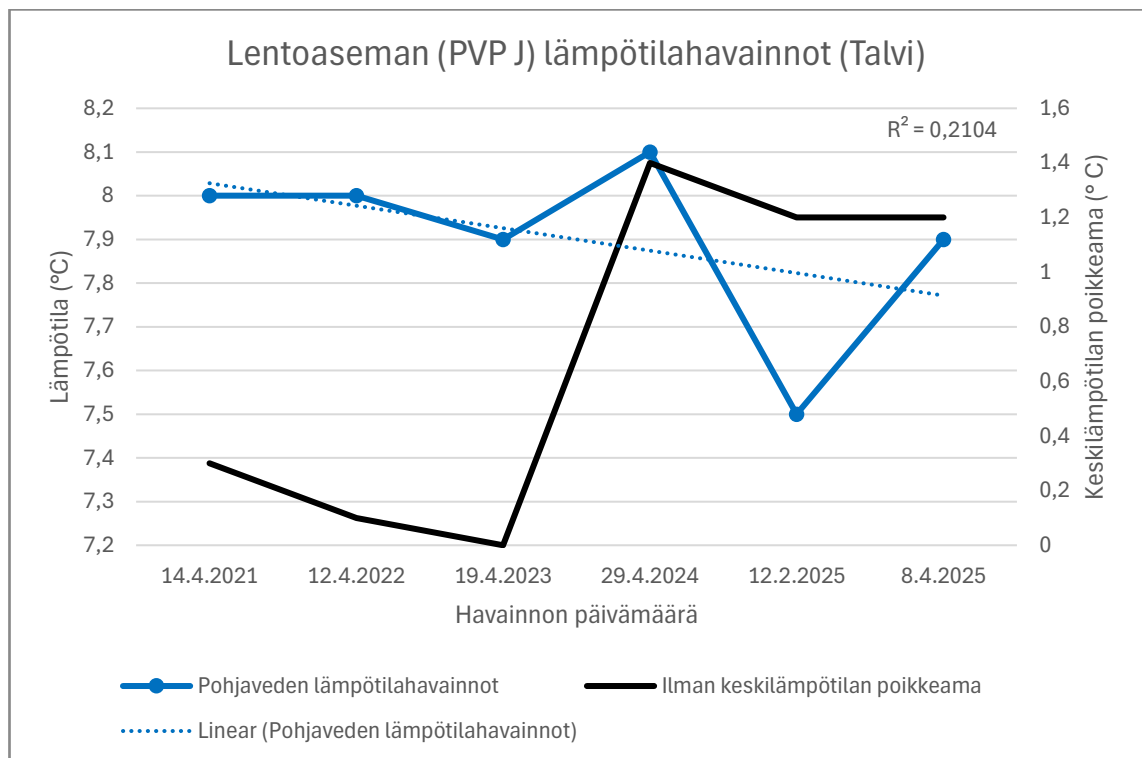


Kuva 56. PVP H -pohjavesiputken havainnot syksyiltä.

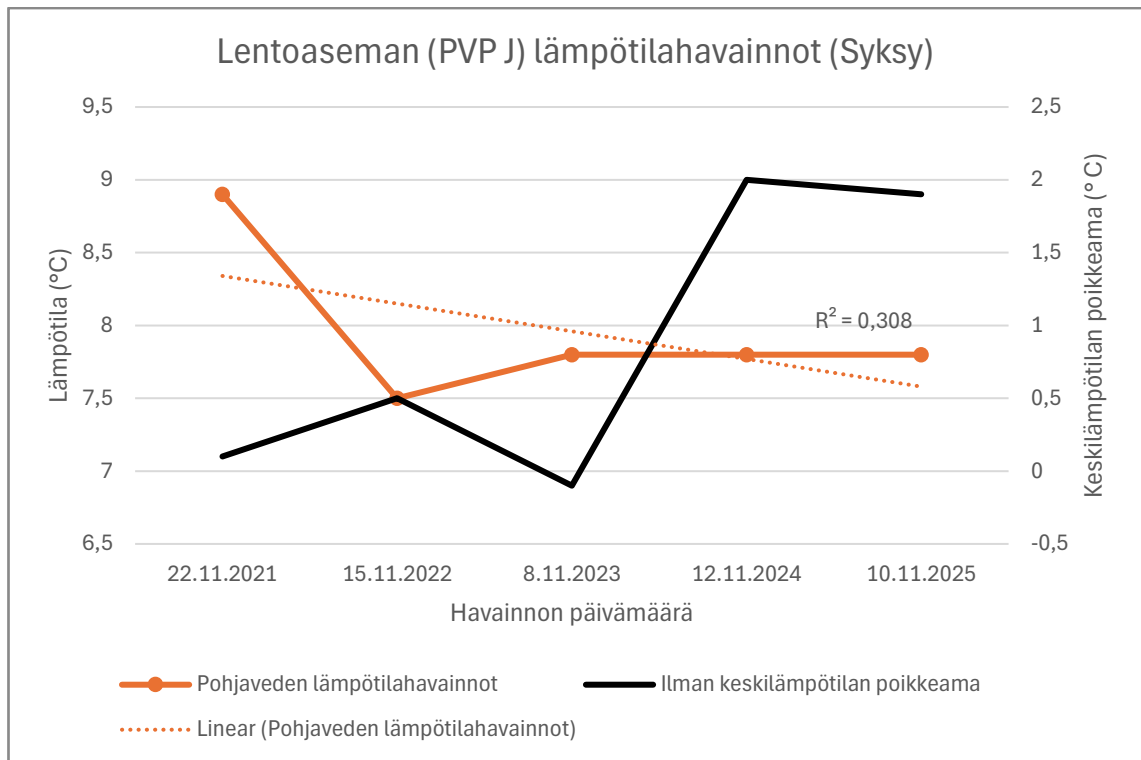
6.6.6. Lentoasema (PVP J)

Pohjavesiputkesta PVP J oli tehty yhteensä 11 havaintoa. Havainnot on jaettu alle talven sekä syksyn tuloksiin ja ne esitellään kuvissa 57 & 58.

PVP J -havaintoputken lämpötilan kehityssuunnat ovat laskevia. Tuloksissa on voimakkaita muutoksia mittausvuosien välillä, mutta ajankohta vaihtelee mittauskauden mukaan.



Kuva 57. PVP J -pohjavesiputken havainnot talvelta.



Kuva 58. PVP J -pohjavesiputken havainnot syksyiltä.

6.7. Yhteenveto tuloksista

Lämpötilahavaintoja oli tehty yhteensä neljän kunnan alueelta. Vain havaintokaudet, joilta oli tehty viisi tai useampi havainto ovat mukana yllä olevissa kuvaajissa. Taulukko 8 esittelee yhteenvedon havaintopaikoista, ja havaintojen määrästä sekä kausista.

Taulukko 8. Tiivistelmä havaintopaikkojen nimistä, havaintojen määrästä ja kelpvollisista havaintokausista.

Havaintokunta	Havaintopaikan nimi	Havaintojen määrä	Havaintokaudet
Masku	Kankaisten Golf (Hp 2)	11	Kevät ja syksy
Masku	Humikkala-Alho (PV301)	11	Kevät ja syksy
Masku	Humikkala-Alho/Kankaisten Golf (Hp 4)	19	Syksy
Mynämäki	Hiivaniitty	11	Kevät ja syksy
Mynämäki	Motelli	13	Kevät ja syksy
Naantali	Aurinko_Golf (PVP 10)	22	Kevät ja syksy
Naantali	Aurinko_Golf (PVP 11)	21	Kevät ja syksy
Turku	Lentokenttä (PVP C)	38	Talvi, kevät, kesä ja syksy
Turku	Lentokenttä (PVP E)	38	Talvi, kevät, kesä ja syksy
Turku	Lentokenttä (1 C)	76	Talvi, kevät, kesä ja syksy
Turku	Lentokenttä (2 C)	73	Talvi, kevät, kesä ja syksy
Turku	Lentokenttä (3 C)	76	Talvi, kevät, kesä ja syksy
Turku	Lentokenttä (PVPA_2020)	11	Kevät ja syksy
Turku	Lentokenttä (PVP H)	17	Talvi, kevät ja syksy
Turku	Lentoasema (PVP J)	11	Kevät ja syksy

7. Tulosten tulkinta

7.1. Maskun tulokset

Kankaisten Golf (Hp 2) ja Humikkala-Alho (PV301) sijaitsevat maantieteellisesti toistensa lähellä ja niissä toteutetut mittaukset oli tehty samoina päivinä (Kuvat 19–22). Todennäköisesti tämän takia mittaustulokset molemmista havaintopaikoista olivat identtisiä. Kevään mittausten trendiviivan kulmakerroin oli negatiivinen, eli lämpötilan kehityssuunta oli alaspäin. Tätä tukee korkea r^2 -arvo, 0,8929, jolloin lämpötilan kehityksen suuntaa voidaan pitää luotettavana. Samojen sijaintien syksyn tuloksissa on myös laskeva kehityssuunta, mutta trendiviiva on loivempi ja selitysaste on paljon heikompi, $r^2 = 0,2968$. Koska alueen maalämpöjärjestelmät sijaitsevat joko kauempana havaintopaikoista tai niiden sijaintia ei tiedetä, päätelmiä niiden vaikutuksesta pohjaveden lämpötilaan ei voi tehdä ja merkittävin vaikutus pohjaveden lämpötilaan tulee todennäköisesti ilman lämpötilan kehityksestä.

Kevään mittaukset on toteutettu vuosien 2009–2013 välillä. Keskilämpötilan poikkeama on ollut näinä vuosina negatiivinen Turun alueella talvella ja keväällä. Syksyn mittaukset on tehty vuosien 2009–2014 välillä, jolloin keskilämpötilan poikkeama on ollut positiivinen kesällä ja syksyllä. Veden korkea ominaislämpökapasiteetti on saattanut heikentää veden lämpenemistä lämpimistä kausista riippumatta, jolloin lämpötilan kehityksen suunta on ollut vielä laskeva.

Humikkala-Alhon (Hp 4) mittaukset oli suoritettu eri aikaan kuin kahdessa muussa Maskun havaintopaikassa. Mittaukset (Kuva 23) olivat suoritettu syksyllä vuosien 2005–2024 välillä ja trendiviivan suunta on nouseva, mutta selitysaste eli r^2 -arvo on melko pieni, 0,2728. Kesällä 2010 ja 2021 tehdyt mittaukset ovat olleet mittaushistoriassa poikkeuksellisen lämpimiä, ja ne ovat voineet olla syynä seuraavan syksyn korkeisiin mittaustuloksiin. Muuten lämpötilan kehitys vastaa ilmaston yleistä lämpenemistä, joka vaikuttaa myös Suomessa.

7.2. Mynämäen tulokset

Hiivaniityn (250301) kevään ja syksyn mittaukset vaihtelivat voimakkaasti ja molempien mittausten kuvaajiin sovitetut trendiviivat saivat matalan selityssasteen. Selityssasteet olivat vastaavasti 0,2315 keväällä (Kuva 24) ja 0,0241 syksyllä (Kuva 25). Vuosi 2008 oli poikkeuksellisen lämmin Turun alueella, ja lämpötilapoikkeama pieneni vähitellen vuoteen 2011 asti. Vuosi 2012 oli jälleen poikkeuksellisen lämmin. Tämä lämpötilakehitys vastaa Hiivaniityn kevään havaintoja todella hyvin ja tämän takia pohjaveden lämpötilakehitys on todennäköisesti muuttunut ilman lämpötilan mukaan.

Syksyn havainnot eivät noudata ilman lämpötilan muutoksia (Kuva 25). Vuonna 2009 pohjaveden lämpötila on ollut korkeimmillaan, mutta lämpötilapoikkeama kyseisenä vuonna on ollut negatiivinen kaikkina vuodenaikoina. Lisäksi tämä yksittäinen mittaustulos heikentää kuvaajan r^2 -arvoa, sillä silmämääräisesti lämpötilan kehitys on ollut laskeva vuoden 2009 jälkeen. Alueella ei ole tietoa maalämpöjärjestelmistä, mutta näytteenottoa paikka sijaitsee lähellä Mynämäen keskustaa. Tästä tiedosta huolimatta yksittäisen mittausanomalian syy ei ole tiedossa.

Motellin pohjavesialueen kevään tuloksista on havaittavissa lievää lämpötilan nousua, mutta kuvaajasta (Kuva 26) saatu r^2 -arvo 0,1226 antaa huonon ennustettavuuden lämpötilan kehitykselle. Lämpötilan kehitys ei näytä seuraavan ulkolämpötilan muutoksia, mutta tutkimuksessa käytetyt lämpötilatilastot ovat saatavilla vain Turun alueelta, joten Mynämäen alueiden erilainen geologia ja lämpötilan kehitys ja erilainen geologia ovat saattaneet vaikuttaa eri tavalla pohjaveteen. Hiivaniityn pohjavesialue on savipeitteinen, kun taas Motellin pohjavesialueella on kalliopaljastumia ja karkeampia maalajeja, kuten hiekkaa ja moreenia.

Syksyn havainnoissa (Kuva 27) pohjaveden lämpötila vaihtelee erittäin voimakkaasti ja trendiviivasta ei voi kertoa lämpötilan kehityksen suuntaa. Selityssasteen arvo on 0,0019 eli erittäin lähellä nollaa. Vuonna 2012 tehty mittaus on ollut poikkeuksellisen lämmin, mutta tämä tulos ei vastaa Turun alueen lämpötilan poikkeamaa vuonna 2012. Myös muut lämpötilahavainnot osuvat huonosti Turusta tehtyihin ilman lämpötilan havaintoihin.

7.3. Naantalin tulokset

Naantalin alueen pohjavesihavainnoissa oli havaittavissa pääasiallinen kasvava lämpötilan kehitys. Molemmat Aurinko_Golf_PVP10 -havaintopaikan mittaukset keväältä ja syksyltä (Kuva 28 & 29) osoittivat kasvavan kehityssuunnan trendiviivan avulla.

Selitysaste näille kuvaajille oli keväällä 0,2306 ja syksyllä 0,347. Trendiviiva osuu siis parhaimmillaan vain kohtalaisesti lämpötilamittauksiin. Aurinko_Golf_PVP11 -havaintopaikan kevään havaintojen trendiviiva on nouseva ja selitysaste on merkittävä, 0,7433 (Kuva 30). Toisaalta saman havaintopaikan syksyn havainnot eivät osoita kehityssuuntaa lämpötilassa ja selitysasteen arvo on vain 0,028 (Kuva 31).

Lämpötilan havainnot korreloivat ilman lämpötilan havaintojen kanssa tiettyinä vuosina, mutta esimerkiksi kaikissa mittauksissa havaittu vuoden 2021 huomattavan korkea lämpötila ei korreloi lainkaan Turun lämpötilapoikkeamien kanssa kyseisenä vuonna. Koska Lietsalan pohjavesialueen maalämpöjärjestelmistä ei löytynyt julkista tietoa, lämpötila-anomalioiden syy jää epäselväksi. Pohjavesialueiden lämpenevistä kehityssuunnista voi kuitenkin havaita ilmaston lämmittävän vaikutuksen, ja keskilämpötilan yleisen nousun, joka on havaittavissa varsinkin viime vuosina.

7.4. Turun tulokset

Turun pohjavesialueilta saadut tulokset olivat vaihtelevia. Selvä nouseva lämpötilan kehitys oli havaittavissa havaintoputken 1 C syksyn (Kuva 43) mittauksissa ($r^2 = 0,6575$), havaintoputken 3 C syksyn (Kuva 51) mittauksissa ($r^2 = 0,6163$) ja havaintoputken PVP H kevään (Kuva 55) mittauksissa ($r^2 = 0,6757$). Lisäksi r^2 -arvo osoitti jonkinlaisen nousevan lämpötilan kehityksen havaintoputken 2 C talven (Kuva 44) mittauksissa ($r^2 = 0,3548$).

Päinvastoin muutamassa mittauksessa oli havaittavissa laskeva lämpötilan kehitys. Mittaukset olivat havaintopaikan 2 C kesän (Kuva 46) mittaukset ($r^2 = 0,4453$), havaintopaikan PVPA_2020 kevään (Kuva 52) mittaukset ($r^2 = 0,2592$), havaintopaikan PVP J talven (Kuva 57) sekä syksyn (Kuva 58) mittaukset (r^2 -arvot vastaavasti 0,2104 talvella ja 0,308 syksyllä) ja havaintopaikan PVP E talven (Kuva 36) mittaukset ($r^2 = 0,2367$).

Muissa Turun alueella tehdyissä mittauksissa ei ollut havaittavissa kehityssuuntaa, sillä lämpötilan vaihtelut olivat voimakkaita ja trendiviivan osuvuus oli erittäin huono ($r^2 < 0,10$) tai vaihtelua ei ollut havaittavissa, eli lämpötilan havainnot pysyivät samanlaisina. Koska Ilmatieteen laitokselta saadut lämpötilatilastot ovat mitattu Turun alueelta, pohjavesiputkien mittaukset vastasivat ilman lämpötilakehitystä hyvin ja osuvuus oli luonnollisesti parempi kuin muiden kuntien alueella.

8. Johtopäätökset

Maalämmön ja ilman lämpötilan tiedetään vaikuttavan matalan syvyyden pohjavesiin aikaisempien tutkimusten perusteella. Tässä tutkimuksessa tulokset olivat kuitenkin vaihtelevia, ja lämpötilan kehitykset saattoivat vaihdella myös samalla havaintopaikalla riippuen mittausvuodenajoista. Tulosten epäyhtenäisyyteen vaikutti todennäköisesti mittausjaksojen epäsäännölliset pituudet, vaihtelevat mittauspäivämäärät sekä mittausten eroavat määrät eri vuodenaikoina. Ilman lämpötilan tilastoja, joita käytettiin mahdollisena selittävänä tekijänä, oli saatavilla vain Turun alueelta, mikä saattoi vaikuttaa varsinkin Mynämäen, Maskun ja Naantalin alueilta tehtävissä tulkinnoissa. Tarkempia päätelmiä pohjaveden lämpenemisestä olisi mahdollista tehdä, jos mittauksia pääsisi tekemään henkilökohtaisesti ja tutkimusalueella olevista maalämpöjärjestelmistä olisi saatavilla tietoa. Lisäksi veden lämpötilan muutoksia olisi hyvä seurata useamman vuoden ajan ja mittaukset pitäisi suorittaa saman kuukauden ja parhaimmillaan vielä saman päivän aikana mahdollisimman luotettavan aikasarjan saamiseksi.

9. Kiitokset

Haluan kiittää tämän tutkimuksen mukana olleita henkilöitä:

Professori Antti Ojalaa, lehtori Eila Hietaharjua ja asiantuntija Teppo Arolaa Geologian tutkimuskeskukselta, jotka toimivat ohjaajinani tämän tutkimuksen aikana.

Väitöskirjatutkija Samuel Bronsteinia, joka lähetti minulle sijaintitiedot tutkimuksessa käytetyistä pohjavesiputkista ja auttoi Hertta-palvelun käytössä sekä tiedon etsimisessä.

10. Lähdeluettelo

- Arola T., 2015: *Groundwater as an energy resource in Finland*. Unigrafia. Helsinki, 34 s.
- Arola T. & Korkka-Niemi K., 2014: The effect of urban heat islands on geothermal potential: examples from Quaternary aquifers in Finland, *Hydrogeology Journal*, ISSN 1431-2174, 1953 – 1967
- Arola T., Luoma S., Korhonen K., Jarva J., Leppäharju N. & Hagström M., 2021: *Energiakaivon asennus ja käyttö – Ympäristöriskitarkastelu*, Geologian tutkimuskeskus, Espoo, 37 s.
- Artimo A., Salonen V-P., Lintu, J. & Saraperä S. 2000: *Valtatien 8 uudelleenlinjauksen pohjavesivaikutukset Maskun kunnan Humikkala-Alhon pohjavesialueella*, Turun yliopisto, Turku
- Bakker, M., Schaars, F., & Hughes, J. D. 2017: Heat as a tracer to determine streambed water fluxes. *Ground Water*, 55(1), 96-110.
- Banks D., 2012: *An introduction to thermogeology: Ground source heating and cooling*, Wiley-Blackwell, Oxford, 526 s.
- Bayer P., Rivera J. A., Schweizer D., Schärli U., Blum P. & Rybach L. 2016: Extracting past atmospheric warming and urban heating effects from borehole temperature profiles, *Geothermics*, 289 – 299.
- Bonte M., 2013: *Impacts of shallow geothermal energy on groundwater quality: A hydrochemical and geomicrobial study of the effects of ground source heat pumps and aquifer thermal energy storage*, Vrije University, Amsterdam, 178 s.
- Boyle G., 2004: *Renewable energy*, Oxford University Press, Oxford, 452 s.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/29/EY, annettu 23 päivänä huhtikuuta 2009. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/29/oj/fin>
- Ignatowicz M., Melinder Å. & Palm B., 2017: *Properties of different ethyl alcohol based secondary fluids used for GSHP in Europe and USA*, IGSHPA Technical/Research Conference and Expo, Denver, 10 s.
- Ihanamäki P., Hakala A. & Valtanen M., 2017: *Kaarningon pohjavesiselvitys*, Ramboll, Turku, 42 s.
- Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy. 1974: *Kankaisten kartano, Pohjavesitutkimus*, Lahti, 5 s.

Khan A., Aun M., Khan M. S., Shakeel S., Singh N. & Hussain A., 2025: Impact of Climate Change on Groundwater Temperature: A Sustainable Approach, *Bulletin of Pure and Applied Sciences Geology* Vol. 44F, 58 – 80.

Käyttöturvallisuustiedote, 2021: NATURET -17 / NATURET -17 GEOSAFE-maalämpöneste -17 °C, 13 s.

Li, X., Zhang, Y., Guo, J., & Wang, J. 2019: Influence of temperature on heavy metal mobility and bioavailability in contaminated sediment. *Environmental Pollution*, 251, 699-708.

Lienau, P., 1998: *Geothermal direct use engineering and design guidebook*, Oregon Institute of Technology, Oregon, 456 s.

Menberg K., Blum P., Kurylyk B. L. & Bayer P., 2014: Observed groundwater temperature response to recent climate change, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4453–4466

Palmu J. P., Pitkäranta R., Hovikoski J., Ojala, A. Valkama M. & Väänänen T., 2026: *Salpausselkien alueen yhteenvetoraportti*, Geologian tutkimuskeskuksen tutkimustyöraportti 1/2026, Espoo, 337 s.

Saner D., Juraske R., Kübert M., Blum P., Hellweg S. & Bayer P., 2010: *Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems*, teoksessa Renewable and Sustainable Energy Reviews

Sweco, 2025. *Maskun pohjavesialueiden suojelusuunnitelma: Linnavuori, Humikkala-Alho ja Karevansuo.*, Masku, 102 s.

Zhang Y., Khan I. A., Chen X-H. & Spalding R. F., 2006: Transport and degradation of ethanol in groundwater, *Journal of Contaminant Hydrology*, Volume 82, 3 – 4, 183 – 194.

Zhu K., Fang L., Diao N. & Zhaohong F., 2017: *Potential underground environmental risk caused by GSHP systems*, 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air conditioning, Jinan, 7 s.

Suomen ympäristökeskus, Janne Juvonen (toim.), 2009: *Lämpökaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa*, 47 s.

Geologian tutkimuskeskus, Maankamara-palvelu: <https://gtkdata.gtk.fi/maankamara/> Tieto haettu 2026, sivu päivitetty 2026.

Geologian tutkimuskeskus, Geoenergialoikka, Geotermisen energian muodot ja sanastoa: <https://projektit.gtk.fi/geoenergialoikka/geotermisen-energian-muodot-ja-sanasto/>, tieto haettu 12.06.2026, sivu päivitetty 2024.

Geologian tutkimuskeskus, Geoterminen energiapotentiaali: 300 m geoenergiapotentiaali: https://tupa.gtk.fi/paikkatieto/meta/geoterminen_energiapotentiaali_300_m_geoenergia_potentiaali.html, Tieto haettu 14.06.2026, sivu päivitetty 02.07.2019.

Ilmatieteen laitos, Ilmastollinen vertailukausi 1991–2020: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmastollinen-vertailukausi>, Tieto haettu 11.06.2026, sivu päivitetty 2021.

Ilmatieteen laitos, Lämpötila- ja sadetilastoja vuodesta 1961: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tilastoja-vuodesta-1961>, Tieto haettu 2026, sivu päivitetty 2025.

Kaakinen M. & Ellonen N., 2021: Regressioanalyysi. Teoksessa *Kvantitatiivisen tutkimuksen verkkokäsikirja*. Tietoarkisto, Tampereen yliopisto: <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvanti/regressio/analyysi/> Tieto haettu 13.03.2026, sivu päivitetty 2021.

Turku Energia, 2021: Maalämpö vai kaukolämpö - kumpi kannattaa Turun seudulla?: <https://www.turkuenergia.fi/valopilkku/maalampo-vai-kaukolampo-kumpi-kannattaa-turun-seudulla> Tieto haettu 3.5.2026, sivu päivitetty 26.11.2021.

Suomen ympäristökeskus, Hertta-palvelu, Hiivaniityn pohjavesialue: <https://www.syke.fi/fi/ymparistotieto/kartta-ja-tietopalvelut/avoimet-ymparistotietojarjestelmat>, Tieto haettu 2025, sivu päivitetty 2018.

Suomen ympäristökeskus, Hertta-palvelu, Humikkala-Alhon pohjavesialue: <https://www.syke.fi/fi/ymparistotieto/kartta-ja-tietopalvelut/avoimet-ymparistotietojarjestelmat>, Tieto haettu 2025, sivu päivitetty 2018.

Suomen ympäristökeskus, Hertta-palvelu, Lentokentän pohjavesialue: <https://www.syke.fi/fi/ymparistotieto/kartta-ja-tietopalvelut/avoimet-ymparistotietojarjestelmat>, Tieto haettu 2025, sivu päivitetty 2017.

Suomen ympäristökeskus, Hertta-palvelu, Lietsalan pohjavesialue: <https://www.syke.fi/fi/ymparistotieto/kartta-ja-tietopalvelut/avoimet-ymparistotietojarjestelmat>, Tieto haettu 2025, sivu päivitetty 2017.

Suomen ympäristökeskus, Hertta-palvelu, Motellin pohjavesialue:
<https://www.syke.fi/fi/ymparistotieto/kartta-ja-tietopalvelut/avoimet-ymparistotietojarjestelmat>, Tieto haettu 2025, sivu päivitetty 2018.

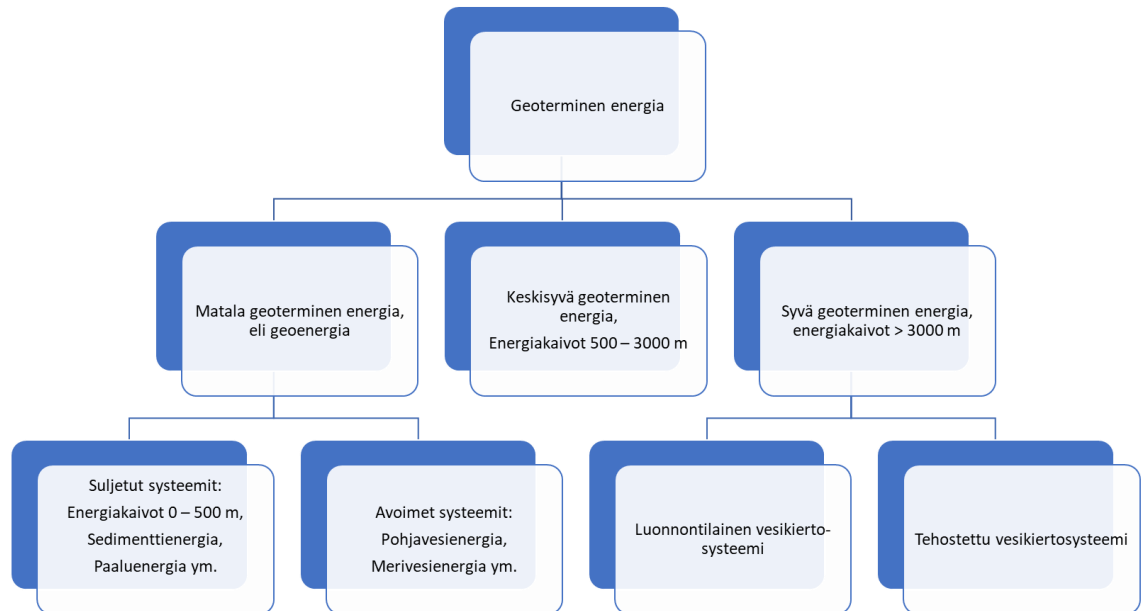
Suomen ympäristökeskus, Hertta-palvelu, Munnittulan pohjavesialue:
<https://www.syke.fi/fi/ymparistotieto/kartta-ja-tietopalvelut/avoimet-ymparistotietojarjestelmat>, Tieto haettu 2025, sivu päivitetty 2019.

Suomen ympäristökeskus, Hertta-palvelu, Pomponrahkan pohjavesiaseman automaattimittari: *<https://www.syke.fi/fi/ymparistotieto/kartta-ja-tietopalvelut/avoimet-ymparistotietojarjestelmat>*, Tieto haettu 2025, sivu päivitetty 2024.

Turun kaupunki, Kaupungin ilmastotyö, Hiilineutraali Turku: *<https://www.turku.fi/ilmasto-ja-luontokaupunki/kaupungin-ilmastotyö>*, Tieto haettu 3.6.2026, sivu päivitetty 2024.

Liitteet

Liite 1: Teppo Arolan jättämä esimerkkikuva kommentoituun pro gradun versioon.



Liite 2: Sundbergin (1991) julkaisun alkuperäiskuva kvartsipitoisuuden vaikutuksesta lämmönjohtavuuteen.

