



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Pohjaveden lämpötilamuutokset Virttaankankaalla

Erika Näsi

Maantiede
LuK-tutkielma
Laajuus: 6 op

4.2.2025

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

LuK-tutkielma

Pääaine: Maantiede

Tekijä: Erika Näsi

Otsikko: Pohjaveden lämpötilamuutokset Virttaankankaalla

Ohjaaja: Joni Mäkinen

Sivumäärä: 38 sivua

Päivämäärä: 4.2.2025

Pohjavettä muodostuu Suomessa reilusti yli tarpeen ja käyttämästämme vedestä suurin osa onkin pohjavettä. Ilmastonmuutoksella on havaittu olevan useita vaikutuksia ympäristöön ja muutoksia hydrologiseen kiertoon on jo havaittu. Tästä aiheutuvat vaikutukset yhteiskunnille ovat merkittävät. Muualla maailmalla on jo nyt suuria haasteita riittävästä, puhtaasta juomavedestä ja vettä joudutaan esimerkiksi säännöstelemään kuivina aikoina.

Tutkielman tavoitteena on tutkia Etelä-Suomessa sijaitsevan Virttaankankaan alueen pohjaveden lämpötiloja ja niissä tapahtuvia ajallisia muutoksia. Virttaankangas kuuluu Säkylänharju-Virttaankankaan pohjavesialueeseen ja siellä sijaitsee Turun Seudun Vesi Oy:n omistama tekopohjaveden tuotantolaitos. Yhtiö tuottaa talousvettä Turulle sekä ympäryskunnille. Lisäksi pyritään selvittämään, mitkä tekijät vaikuttavat tekopohjaveden lämpötilaan.

Aineistona työssä käytetään TSV Oy:n toimittamaa Virttaankankaalla sijaitsevien pohjavesikaivojen lämpötila-aineistoa 2011–2018. Mukana on pääosin tekopohjaveden tuotantoon käytettäviä kaivoja sekä kaksi kaivoa, jotka tuottavat luonnollista pohjavettä. Toisena aineistona käytetään ympäristöhallinnon avoimista tietojärjestelmistä ladattua lämpötiladataa pohjaveden havaintoputkista samalta alueelta. Lämpötilahavainnoista laskettiin tunnusluvut, joiden perusteella havaintopaikkoja vertailtiin ja saatiin käsitys niiden ominaisuuksista. Tämän lisäksi havainnoista luotiin diagrammit, jotta voitiin tarkastella ajallista muutosta ja eritoten lämpötilan vuodenaikaista vaihtelua.

Tuloksista voitiin havaita eri havaintopisteiden eroavaisuudet vuodenaikoina. Aineistosta erottui selvästi poikkeavia havaintopisteitä, mutta niiden erilaiselle lämpötilakäyttäytymiselle ei voitu tarjota varmoja syitä. Aineiston perusteella lämpötilat kohosivat hieman, mutta tulos on epävarma lyhyen tarkasteluajanjakson ja tuotannon käynnistymisen aiheuttamien poikkeavuuksien vuoksi. Pohjaveden lämpötilojen muutosta on tutkittu jo paljon, mutta paikallisella tasolla tapahtuvia muutoksia sekä siitä aiheutuvia vaikutuksia olisi tärkeää tutkia lisää laadukkaana talousveden varmistamisen näkökulmasta.

Avainsanat: pohjavesi, pohjaveden lämpötila, Virttaankangas, tekopohjavesi, ilmastonmuutos

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Teoreettinen viitekehys	6
2.1	Pohjaveden muodostuminen	6
2.1.1	Tekopohjaveden muodostuminen	7
2.1.2	Tekopohjaveden ympäristövaikutukset	9
2.1.3	Virttaankankaan tekopohjavesiprosessi	9
2.2	Pohjaveden lämpötila	10
2.2.1	Pohjaveden lämpötilan vuodenaikainen luonnollinen vaihtelu	11
2.2.2	Lämpötilaan vaikuttavat tekijät	11
2.2.3	Pohjaveden lämpeneminen	12
3	Tutkimusalueen kuvaus	14
4	Aineistot ja menetelmät	17
4.1	Aineistot	17
4.1.1	Turun Seudun Vesi Oy:n havainnot	17
4.1.2	Havaintoputket	19
4.1.3	Kokemäenjoen raakavesi	20
4.2	Menetelmät	20
5	Tulokset	22
5.1	Lämpötilojen tunnusluvut	22
5.1.1	Kaivojen lämpötilojen tunnusluvut	22
5.1.2	Havaintoputkien lämpötilojen tunnusluvut	23
5.2	Lämpötila ajallisena muuttujana	24
5.2.1	Kaivoalueiden lämpötilavaihtelu	24
5.2.2	Havaintoputkien lämpötilavaihtelu	26
5.3	Raakaveden ja tekopohjaveden lämpötilavertailu	28
6	Tulosten tarkastelu	29
7	Pohdinta	32
8	Johtopäätökset	33
	Lähteet	34

1 Johdanto

Suomessa on runsaat pohjavesivarannot ja niitä on tutkittu paljon. Pohjavettä muodostuu päivittäin 5,4 miljoonaa kuutiota, josta käytössä on vain reilu 10 % (Pohjavesialueet 2022). Luonnollisen pohjaveden hyödyntämien vesilaitosten lisäksi on Suomessa 25 tekopohjavesilaitosta. Yksi tekopohjavesilaitoksista sijaitsee Loimaan Alastarolla, Virttaankankaalla ja on yksi Suomen tutkituimpia pohjavesialueita sen erikoisen syntytapansa vuoksi. Turun kaupunkiseutu halusi turvata vedensaannin aloittamalla tekopohjaveden tuotannon Virttaankankaalla vuonna 2011. Täyteen tuotantoon siirryttiin vuoden 2013 joulukuussa (Velvoitetarkkailuraportti 2017, 2018).

Ilmaston lämpenemisellä tiedetään olevan useita vaikutuksia hydrologiseen kiertoon (mm. Bates ym. 2008; Green ym. 2011). Pohjaveden pilaantuminen tunnetaan huomattavasti paremmin ja pohjaveden liikkäytön aiheuttama suolaantuminen on ongelma eri puolilla maailmaa (mm. Ferguson & Gleeson 2012). Myös pohjaveden ehtyminen tai häviäminen ovat teollistuvan maailmamme suurimpia ongelmia. Geologian Tutkimuskeskus onkin maininnut ilmastonmuutoksen vaikutuksen pohjaveteen yhtenä ajankohtaisena tutkimusteemana (Pohjaveden muodostuminen ja pohjavesivarannot s.a.). Fossiilisten pohjavesien eli paleovesien hyödyntäminen ei ole kestävä ratkaisu veden saatavuuden turvaamiseksi. Pohjoisilla leveyspiireillä, talvien lumipeitteet muuttuvat jatkuvasti harvinaisemmaksi ilmiöksi, suojasäät ja talven vesisateet yleistyvät (Lumi vähenee Suomessa s.a.)

Menberg ym. (2014) havaitsivat Saksassa kaupunkimaisessa ympäristössä tehdyssä tutkimuksessaan pohjavesien lämpötiloissa nousua vuosina 1970–2010. Mastrocicco ym. (2018) saivat myös lämpötilan nousua puoltavia tuloksia, mutta loppupäätelmissä todettiin, että aihe vaatii lisää tutkimusta eikä tuloksista voitu vetää mitään merkittäviä johtopäätöksiä. Suomessa on kerätty pohjaveden lämpötiladataa, mutta sitä ei ole käytetty kovin laajalaisesti. Helmisaari ym. (2003) tekivät tutkimuksen tekopohjaveden tuotannosta, missä samalla mitattiin myös lämpötilaa. Tuloksia tarkasteltiin lähinnä tekopohjaveden tuotannon kannalta ja miten lämpötila tasaantui imeyttämisen aikana. Hietula (2018) tarkasteli pro gradussaan matalapohjavesien lämpötilamuutosta havaintosarjojen 1960–1999 ja 2000–2017 välillä, minkä tuloksena havaittiin lämpötilojen kohonneen 0,5 °C. Pohjaveden lämpötilaa on tarkkailtu myös geotermisen energiapotentialin valossa (mm. Arola 2015, Hietula 2018).

Tutkielmassa tarkastellaan Virttaankankaan tekopohjavesilaitoksen tuotantokaivojen lämpötiloja yhdessä Kokemäenjoen raakaveden ja tutkimusalueen luonnollisen pohjaveden lämpötilojen kanssa. Yleisellä tasolla tarkastellaan tekopohjaveden ja luonnollisen pohjaveden vuodenaikaista lämpötilakäyttäytymistä. Tarkemmalla tarkastelulla tavoitteena on löytää mahdollisia muutossuuntia pohjaveden lämpötiloissa.

Tavoitteeseen pyritään seuraavien tutkimuskysymysten avulla:

- Millaista vaihtelua sekä luonnollisen pohjaveden että tekopohjaveden lämpötiloissa on tapahtunut?
- Mitkä tekijät vaikuttavat tekopohjaveden lämpötilaan?

2 Teoreettinen viitekehys

2.1 Pohjaveden muodostuminen

Suomessa pohjavesi muodostuu pääsääntöisesti sateesta ja sulaneesta lumesta (Kinnunen 2005: 78). Vuotuinen sadanta on keskimäärin 500–700 mm/v. Sadevesi imeytyy suoraan maaperään, mutta kapillaari-ilmiön ja kasvillisuuden kautta vettä kuitenkin siirtyy takaisin maanpinnalle, josta se haihtuu takaisin ilmakehään. Jäljelle jäänyt vesi valuu maaperässä, kunnes se saavuttaa pohjavesivyöhykkeen muodostaen pohjavettä. Vyöhyke kyllästää maa- ja kallioperän huokokset kokonaan vedellä. Kaikki maaperässä oleva vesi ei siis ole automaattisesti pohjavettä. Vettä, joka sijaitsee maanpinnan ja pohjavesivyöhykkeen yläosan välissä, kutsutaan maavedeksi (Prince 1998: 7; Kinnunen 2005: 78).

Maaperään imeytyvän veden määrään vaikuttaa maa- ja kallioperän läpäisevyys eli maa- ja kallioperän kyky johtaa vettä (Korkka-Niemi & Salonen 1996: 43). Veden liikettä eri maalajeissa voidaan kuvata hydraulisella gradientilla. Darcyn lain mukaan pohjaveden pinnan hydraulinen korkeus laskee veden kulkeman matkan kasvaessa (Darcys law s.a.). Tästä johdettu vedenjohtavuuskerroin on tärkein pohjavesigeologisia olosuhteita kuvaava parametri (Korkka-Niemi & Salonen 1996). Jokaisella aineksella on oma vedenjohtavuuskerroin ja se kuvaa nesteen virtausvastusta huokoisessa väliaineessa. Siihen vaikuttavat mm. nesteen ominaispaino, viskositeetti, joka kasvaa veden lämpötilan noustessa sekä väliaineen ominaisuudet, kuten raekoko, sen muoto ja tiiviys.

Lisäksi tärkeä tekijä on huokoisuus. Maaperän kiinteä mineraaliaine ja orgaaninen materiaali jättävät kiteiden väliin tyhjää tilaa eli huokoisuutta, joka täyttyy ilmalla ja vedellä (Korkka-Niemi & Salonen 1996: 27–28). Huokokset voidaan jakaa kahteen tyyppiin: primääri ja sekundääri (Airaksinen 1978; Korkka-Niemi & Salonen 1996: 28). Primäärihuokokset ovat syntyneet geologisten prosessien tuloksina samanaikaisesti maa- tai kallioperän synnyn aikana. Sekundäärihuokokset ovat syntyneet maa- tai kallioperän synnyn jälkeen sedimentteihin tai kallioperään geologisten prosessien, esimerkiksi rakoilu ja liukeneminen, tai maaperän muokkautumisen tuloksena, esimerkiksi kuivumisrakoilu ja kasvien juurien tekemät huokokset.

Akviferi eli pohjavesimuodostuma on maa- tai kallioperässä oleva pohjaveden kyllästämä vyöhyke, josta voidaan pumpata vettä käyttöön (Kinnunen 2005: 152). Akviferejä on vapaita ja paineellisia sen mukaan, rajoittaako niitä yläpuolelta vettä läpäisemätön kerros vai ei

(Airaksinen 1978: 47–48). Vapaassa akviferissa vedenpinta ei rajoitu mihinkään läpäisemättömään kerrokseen eli akvikludiin, esimerkiksi savikerros, eli vesi on vapaata pohjavettä. Paine vedenpinnassa on sama kuin vallitseva ilmanpaine. Paineellista akviferiä rajoittaa yläpuolelta akvikludi, jolloin puhutaan salpavedestä. Paineellisessa akviferissä pinnan paine on suurempi. Artesinen kaivo syntyy, jos rajoittavan kerroksen läpi laitetaan putki ja vesi virtaa paineen vuoksi maanpinnalle. Orsivesiakviferit ovat pienempiä vyöhykkeitä, joita rajoittaa alapuolelta akvikludi, jonka alapuolella varsinainen pohjavesivyöhyke sijaitsee.

Pohjaveden muodostumisalue kattaa sade- ja pintavesien valuma-alueen, johon muodostuu pohjavesiallas (Korkka-Niemi & Salonen 1996: 40). Eri muodostumisalueita erottaa pohjavedenjakaja. Ne eivät mukaile maanpinnalla sijaitsevia pintavedenjakajia, vaan saattavat jopa muuttua kaivojen ja imeyttämisen vuoksi. Muodostumisalueiden rajojen tunteminen on tärkeää, sillä ne vaikuttavat pintavesien valuma-alueiden tavoin antoisuuteen, suojeleusuunnitelmien tekoon, likaantumisen vaikutuksien arviontiin ja suunniteltaessa tekopohjavesihankkeita. Pohjavesialtaissa voi sijaita useita akviferejä, jotka ovat yhteydessä toisiinsa.

Pohjaveden pinta on lähestulkoon vaakatasossa, mutta mukaillen maanpinnan muotoja (Korkka-Niemi & Salonen 1996: 41–43). Veden liikettä maaperässä ohjaa paine, joten vesi virtaa suuremmasta kohti pienempää painetta pinnan vieton suuntaan. Veden virtausnopeus vaihtelee luonnollisissa olosuhteissa 1,5m/vrk–15m/vrk.

2.1.1 Tekopohjaveden muodostuminen

Tekopohjavesi on pohjavettä, joka tuotetaan lisäämällä olemassa olevan pohjavesivesiesiintymän antoisuutta imeyttämällä siihen käsittelemätöntä tai esikäsiteltyä pintavettä (Artimo ym. 2007: 97). Tekopohjaveden muodostuksella voidaan sekä lisätä pohjaveden määrää, että puhdistaa pintavettä edullisesti ja yksinkertaisesti (Korkka-Niemi & Salonen 1996: 134). Prosessin tärkeimpänä tavoitteena on orgaanisen hiilen poistuminen vedestä suotautumisen aikana (Hakoniemi & Tantu 2010). Tuotantomenetelmää on käytetty jo 1800-luvulla Euroopassa, kun koleraepidemian takia pintavettä oli pakko käsitellä (Kivimäki 1992: 10–12). Suomeenkin prosessi rantautui jo 1900-luvun alussa ja ensimmäinen tekopohjavesilaitos aloitti toimintansa 1970 Lappeenrannassa.

Tekopohjavettä voidaan muodostaa joko suorasti tai epäsuorasti (Kivimäki 1992: 13, Korkka-Niemi & Salonen 1996: 134). Suora menetelmä tarkoittaa pintaveden johtamista pohjavesialueelle, jossa se imeytetään pohjavedeksi. Epäsuorassa menetelmässä pohjaveden antoisuutta kasvatetaan asentamalla kaivot lähelle pintavesistöä, jolloin vedenottoa kaivosta lisäämällä ja siten pohjavedenpintaa alentamalla aiheutetaan pintaveden tehokkaampaa imeytymistä. Akviferin antoisuutta voidaan siten lisätä 2-10 kertaiseksi luonnollisesta (Korkka-Niemi & Salonen 1996: 134). Suorat menetelmät jaetaan pintaimeytysmenetelmiin, joita ovat sadetus, allas-, oja-, rinne- ja uomaimetyys sekä syväimeytysmenetelmiin, joita ovat kuilu-, kuoppa-, kaivo- ja monitoimikaivoimeytys. Suomessa yleisimmät muodot ovat allas- ja kuoppaimetyys sekä sadetus (Kivimäki 1992). Epäsuorissa menetelmissä kaivoja asetetaan riviin joen tai järven rannalle, ja kaivoista pumppaamalla alennetaan luonnollisen pohjaveden pintaa vesistön vedenpintaa alemmaksi, mikä nopeuttaa vesistöä imeytyvää pohjavettä (Kivimäki 1992: 13).

Tekopohjaveden imeytys vaatii tietyntyyppiset olosuhteet, etenkin maaperän suhteen. Oleellisin kriteeri on veden virtausnopeus muodostumassa, mistä voidaan päätellä veden viipymä eli aika joka vedeltä kestää kulkeutua imeytyksestä vedenottamolle (Kivimäki 1992: 36–37). Suomessa tuotantolaitoksia onkin rakennettu pitkittäisharjuille, sekä esimerkiksi Salpausselkien alueelle, sillä niiden virtausolosuhteet tunnetaan hyvin ja ne ovat helposti ennustettavissa. Harjujen reunoilla on usein huonosti vettäläpäiseviä kerroksia, jotka edesauttavat veden virtaamista harjussa pitkittäissuunnassa. Toisena kriteerinä ovat riittävä ja laadukas raakavesilähde. Tekopohjaveden muodostumisalueen koon ja vedenläpäisevyysominaisuuksien tulee olla riittävät ja lisäksi veden imeyttämässä aiheutuvat pohjaveden pinnanvaihtelut eivät saa aiheuttaa haittaa ympäristössä (Korkka-Niemi & Salonen 1996: 135). Raakaveden laadulle ei ole olemassa mitään virallisia laatuvaatimuksia, viitteellisiä arvoja löytyy, mutta maaperän erilaisten ominaisuuksien takia tilanteet tutkitaan aina tapauskohtaisesti. Merkittäviä tekijöitä raakaveden laadussa ovat väri, orgaanisen aineksen, ravinteiden ja kiintoaineen määrä (Kivimäki 1992: 20–21). Veden suuri humuspitoisuus tukkii suodattimia ja liettää imeytysaltaita. Useasti raakavettä käsitellään etukäteen, jotta lietettä siirtyisi pohjavesialueelle mahdollisimman vähän. Myös liian matalalla oleva pohjaveden pinta aiheuttaa ongelmia ja Suomen maaperässä sen pitäisi olla 10 m maanpinnan alapuolella, jotta vesi ehtii suodattua tarpeeksi.

2.1.2 Tekopohjaveden ympäristövaikutukset

Tekopohjaveden tuotannosta aiheutuu myös ongelmia. Uudet hankkeet vaativat runsaasti tutkimuksia, kuten koepumppauksia, imeytyksiä, vedenlaadun seuranta ja merkkiainekokeita (Artimo ym. 2007). Mikäli raakavesi saastuu esimerkiksi sinilevillä, saattaa tämä aiheuttaa maaperän ja sitä kautta pohjavesiesiintymän saastumisen (Hakoniemi & Tantu 2010). Vedentuotanto vaatii ympärilleen myös jonkin verran rakentamista, imeytystavasta riippuen. Helmisaari ym. (2003) toteavat sadetusimeytyksen olevan lähimpänä luonnontilaista sen vaatimien vähäisten maanmuokkausten takia. Maisemaa ei tarvitse muokata samalla tavalla kuin rakennettaessa imeytysaltaita. Helmisaari ym. (1999) tutkivat sadetusimeytyksen vaikutuksia metsämaahan ja kasvillisuuteen 3 vuoden aikana. Sadetuskokeilun päätteeksi metsämaan pH oli kohonnut, pohjaveden rautapitoisuus väheni ja aluskasvillisuus oli kärsinyt eroosiosta. Puustolle sadetus aiheutti positiivisia vaikutuksia. Tiedossa oli jo ennakkotietoina, että talviaikaan pohjaveden imeytys nostaa maan lämpötilaa ja alentaa kesällä. Maaperän lämpötilalla on vaikutusta kasvillisuuteen ja esimerkiksi kasvien vaipuminen talvilepoon saattaa häiriintyä ja puolestaan aikaistaa keväällä alkavaa kasvua.

2.1.3 Virtaankankaan tekopohjavesiprosessi

Turun seudun riittämätön raakavesi ja Aurajoen vedenlaadun ongelmat johtivat päätökseen vuonna 1974 alkaa etsiä soveltuvaa pohjavesialuetta kaupungin vedensaannin turvaamiseksi (Artimo ym. 2007). Erinäisten välivaiheiden jälkeen, vuonna 1999 kaivettiin esille vanhat suunnitelmat Virtaankankaan tekopohjavesihankkeen toteuttamiseksi. Tekopohjavesi alkoi virrata turkulaisten hanoista loppuvuodesta 2011. Lisäksi vettä käyttävät Turun 8 ympäryskuntaa.

Virtaankankaalla tuotantoprosessi alkaa Huittisista raakavedenottamolta (Mälkki 2003b). Kokemäenjoesta ohjataan raakavettä esikäsittelylaitokselle, jossa vettä käsitellään mekaanis-kemiallisesti. Siitä poistetaan kiintoainesta siivilöimällä, saostamalla sekä suodattamalla. Tämän jälkeen vesi pumpataan raakavesijohtoa pitkin 29 kilometriä Virtaankankaalle. Tekopohjavesilaitoksen alueella on 7 imeytysaluetta, joilla on yhteensä 19 imeytysallasta, joihin raakavesi ohjataan (kuva 1, Velvoitetarkkailuraportti 2019). Vesi imeytyy itseksensä altaan pohjan läpi, joka osaltaan suodattaa vielä esikäsittelystä jäljelle jäänyttä humusta. Altaat tyhjennetään säännöllisesti kertyneen humuksen ja levän poistoa varten. Altaista osa on tyhjillään, jotta maaperä saa kuivahtaa välillä. Vesi virtaa maaperässä keskimäärin kolmen

kuukauden ajan, eri tuotantokaivoilla on oma virtausmalleista ja lämpötilojen vaihtelusykleistä johdettu viipymäärä. Tänä aikana vedestä poistuu vielä viimeiset epäpuhtaudet. Vettä pumpataan viideltä kaivoalueelta yhteensä 13 tuotantokaivosta puhtaan veden säiliöön, josta se johdetaan painovoiman avulla siirtolinjassa noin 60 km Turun Saramäkeen ja Liedon Laakkarissa sijaitseviin kalliosäilöihin. Ennen jakelua, vesi desinfioidaan UV-valolla ja klooriamiinilla laadun säilyttämiseksi (Veden pitkä matka kuluttajalle s.a.). Säiliöistä vesi pumpataan vesijohtoverkkoihin käyttäjille, mikä saattaa kestää useita viikkoja.



Kuva 1. Raakaveden imeytysallas Virttaankankaalla (Turun Seurun Vesi Oy)

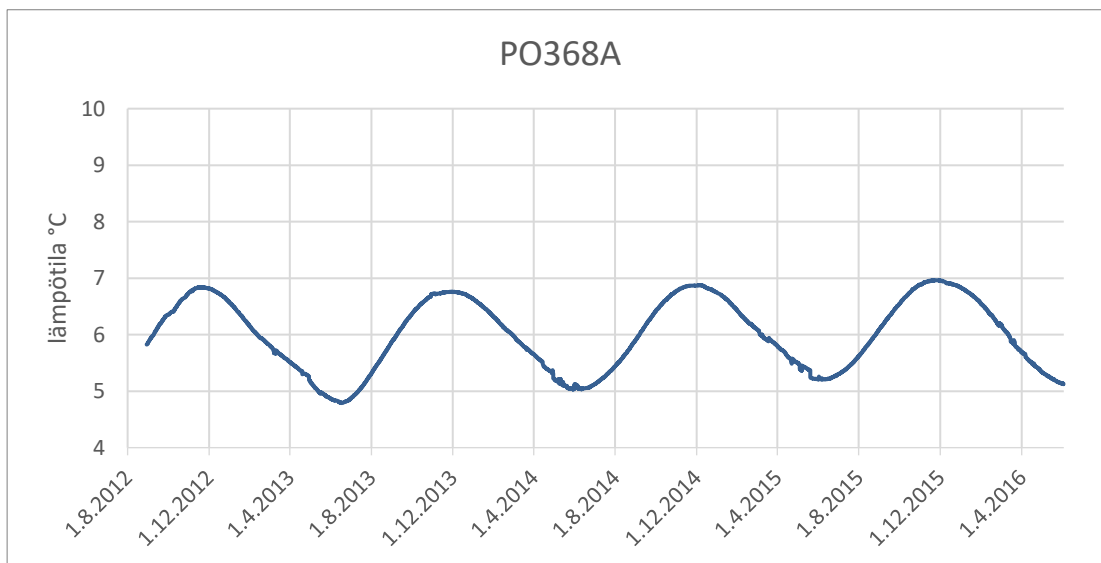
2.2 Pohjaveden lämpötila

Pohjaveden lämpötila on tärkeä veden laatuun vaikuttava tekijä (Green ym. 2011). Pohjaveden lämpötilaan vaikuttaa eniten alueella vallitsevat ilmasto-olot (Mustonen 1986: 118). Pohjaveden lämpötilaa kontrolloi lisäksi maaperän ominaisuudet ja eritoten lämmönjohtavuus (Illmer ym. 2003). Maaperän oma lämpökapasiteetti lieventää lämpötilan muutosnopeutta, minkä takia lämpöenergian viipymä on selkeästi pitempiaikainen kuin veden viipymäaika. Uudenmaan läänissä ilman keskilämpötila on +5,4 °C, harjujen pohjavesi +5,4 °C ja kalliokaivojen vesi +6,4 °C. Lapissa vastaavat luvut ovat -2 °C, +4,4 °C ja +5,4 °C. Etelä-Suomen pohjavedet ovat noin 1 °C lämpimämpiä kuin vallitsevan ilman lämpötila ja pohjoisempaan mentäessä ero kasvaa (Korkka-Niemi & Salonen 1996: 96). Kalliopohjaveden

korkeampi lämpötila saattaa johtua kontaktittomuudesta ilman kanssa sekä viipymästä. Natukka (1966) esittää Suomen akvifereissä pohjaveden lämpötilan vaihtelevan yleisesti välillä +2 °C–+11 °C. Vuodenaikainen lämpötilanvaihtelu vaikuttaa noin 10 metrin syvyyteen asti ja sitä syvemmillä lämpötilavaihtelu on pientä tai lähes stabiili (Banks 2012).

2.2.1 Pohjaveden lämpötilan vuodenaikainen luonnollinen vaihtelu

Tammi-helmikuu ovat Suomessa tilastollisesti kylmintä aikaa (Kuukausitilastot 2010). Talvisin pohjavettä ei oikeastaan synny, sillä maaperän ylin kerros on jäässä eli roudassa (Korkka-Niemi & Salonen 1996). Pohjaveden pinnat laskevat ja esimerkiksi vuoden 2018 erittäin kuivan kesän jälkeen olikin uhkana yksittäisistä kaivoista veden loppuminen talven aikana (Kaivoja voi ehtyä 2018). Pohjaveden lämpötila on korkeimmillaan loppusyksystä-alkutalvesta, loka-marraskuun tienoilla, kun kesän aikana satanut lämmin vesi saavuttaa pohjavesivyöhykkeen (kuva 2). Ilman alkaessa viilentyä ja roudan muodostuessa alkaa pohjaveden lämpötila laskea. Se jatkaa laskuaan kesään asti, sillä silloin kevään kylmät sulamisvedet saavuttavat vyöhykkeen.



Kuva 2. Luonnollisen pohjaveden lämpötila havaintoputkessa PO368A vuosina 2012–2016. (Lähde: Turun Seudun Vesi Oy, mukailen)

2.2.2 Lämpötilaan vaikuttavat tekijät

Jotta vesi saavuttaa kemiallisesti hyvän laadun, vaatii se tarpeeksi pitkän viipymän maaperässä. Lämpötilan vaihtelu ei ole niin yksiselitteistä kuin muiden pohjaveden kemiallisten ominaisuuksien arviointi. Luonnollisessa pohjavedessä sitä ei pysty säätelemään, mutta tekopohjavesilaitokset voivat imeytysalueiden ja kaivojen sijoittelulla säädellä veden

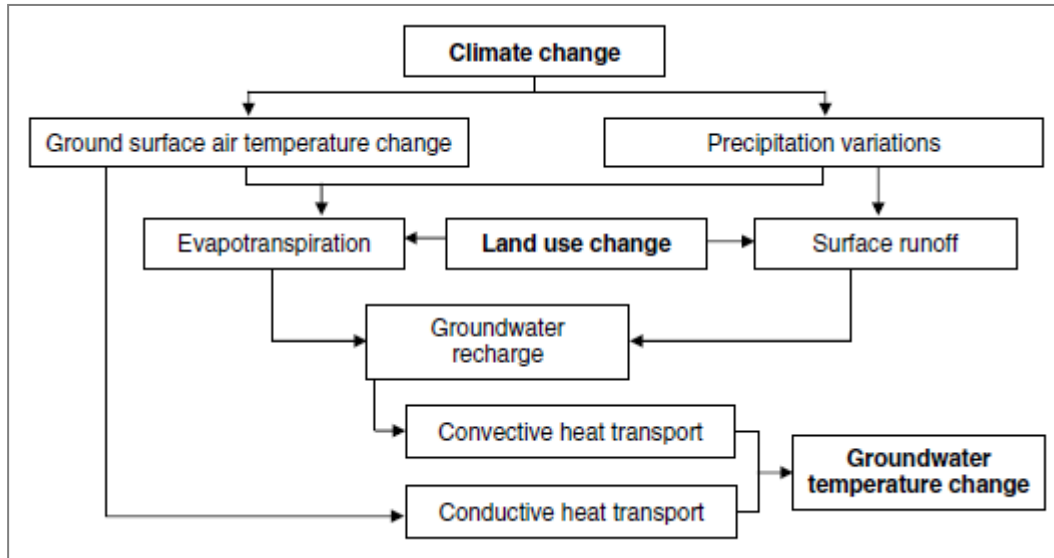
viipymää. Turun Seudun Veden tuotantokaivojen viipymät on laskettu merkkiainekokeilla, joilla voidaan melko luotettavasti määrittää imeytys- ja kaivoalueen välinen virtausaika (Artimo ym. 2007). Virttaankankaan kaivojen arvioidut viipymät vaihtelevat 2,5-6 kuukauden välillä. Helmisaari ym. (2003: 93) havaitsivat tutkimuksessaan sadetusimeytystä hyödyntävässä tekopohjavesihankkeessa lämpötilojen tasaantumisen olevan epävarma tekijä veden viipymän arvioinnissa. Veden todellinen viipymä mitattiin olevan lyhyempi kuin lämpötiloista havainnoituna. ”Maaperän lämpökapasiteetti vaimentaa lämpötilojen muutosnopeutta, mistä johtuen lämpöenergian viipymäaika on huomattavasti pidempi kuin veden viipymäaika ”(Helmisaari ym. 2003: 93). Tutkimuksessa havaittiin, että havaintoputkissa lähellä sadetusalueita pohjaveden lämpötila oli lähellä raakaveden lämpötilaa. Mitä kauemmas sadetusalueesta siirryttiin, vuodenaikaisvaihtelu lämpötiloissa pieneni. Myös Turun Seudun Veden suullisessa tiedonannossa huomautetaan lämpötilan viipymän olevan pidempi verrattuna veden viipymään. Imeytetyn raakaveden viipymän tulisi olla vähintään 30–60 vrk, jotta vesi ehtii puhdistua riittävästi (Korkka-Niemi & Salonen 1996: 136).

Toinen merkittävä tekijä on raakaveden lämpötila. Luonnollinen pohjavesi muodostuu sateesta ja lumesta, tekopohjavesi muodostetaan pintavesistön vedestä. Virttaankankaalla Kokemäenjoen raakaveden lämpötilalla on vaikutusta. Veden esikäsitteily ehtii tasata lämpötilaa ennen sen johtamista Virttaankankaalle imeyttämistä varten.

2.2.3 Pohjaveden lämpeneminen

Pitkään ajateltiin maaperän suojelevan pohjavesiä lämpenemiseltä, mutta nopeasti etenevän ilmastonmuutoksen on jo havaittu nostavan pohjavesien lämpötiloja (mm. Figura ym. 2011, Menberg ym. 2014, Benz ym. 2018, Hemmerle & Bayer 2020) ja pienet pohjavesiesiintymät lämpenevät oletettavasti nopeammin kuin laajat ja paljon vettä sisältävät akviferit (Jyväskylä ym. 2015). Ilmastonmuutoksen aiheuttama pohjaveden lämpenemisen vaikutukset vedenlaatuun tunnetaan vielä heikosti (Green ym. 2011, Kløve ym. 2014). Aasian alueella tehdyissä tutkimuksissa lämpötilan nousua selittävät ilmastonmuutos ja rakentaminen (mm. Gunawardhana & Kazama 2011, Benz ym. 2018). Herb ym. (2008) mukaan päällystetyt pinnat ovat lämpötiloiltaan keskimäärin lämpimämpiä kuin kasvipeitteiset pinnat ja niiden lämpöenergia siirtyy matalien pohjavesien kautta puroihin vaikuttaen siellä ekosysteemeihin. Matalat pohjavesiesiintymät ovat vuorovaikutuksessa maanpinnalla vallitsevan ilmaston kanssa, mutta syvällä olevat pohjavedet saavat lämpöä geotermisestä lämmöstä (Taylor &

Stefan 2009). Samassa artikkelissa todettiin urbaanin kehityksen tulevan vaikuttamaan pohjaveden lämpötiloihin moninaisesti. Kuvassa 3 on yksinkertaisesti kuvattuna ilmastonmuutoksen vaikutuksia pohjaveden lämpötilamuutoksiin. Sekä maanpinnan lämpötilamuutos että sadannan muutokset vaikuttavat lämmön konvektioon akviferiin.



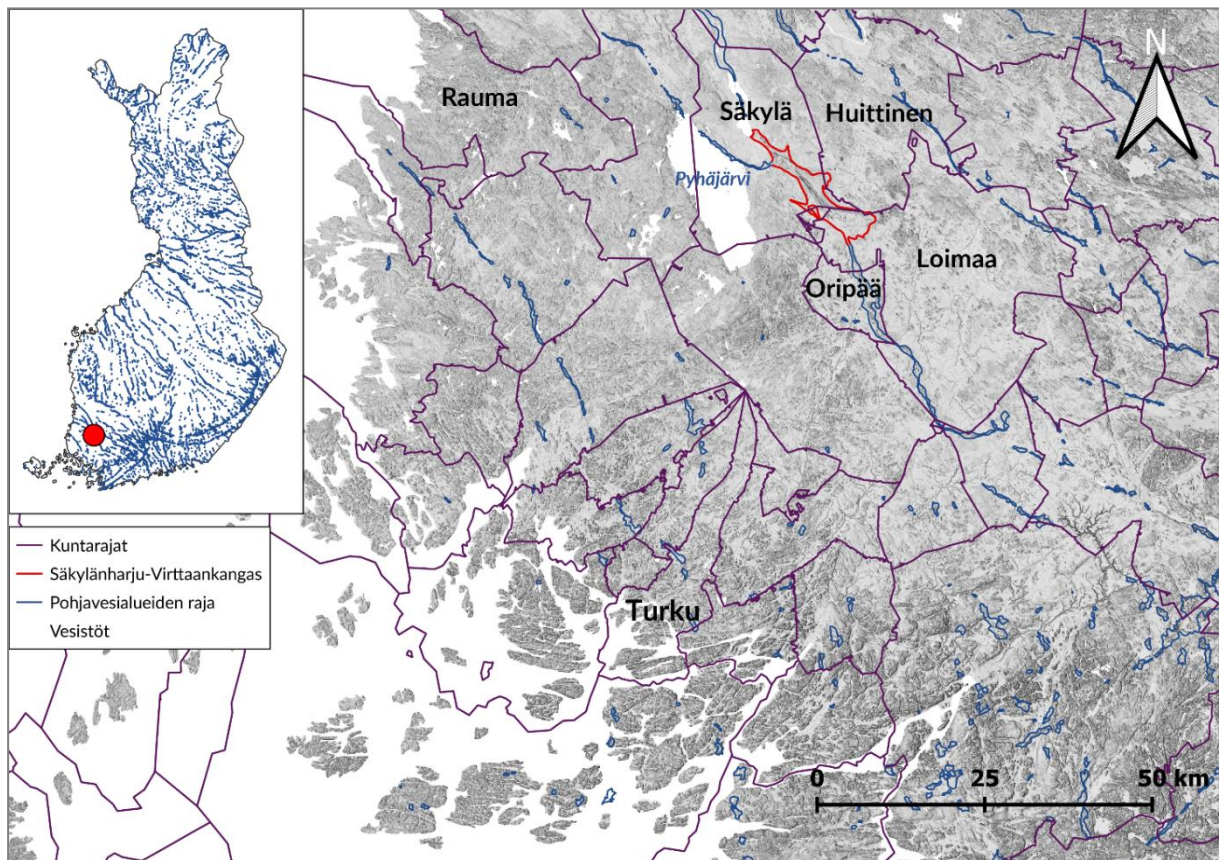
Kuva 3. Ilmastonmuutoksen ja maankäytön muutosten vaikutus pohjaveden lämpenemisessä (Gunawardhana & Kazama 2011)

Suomessa hakkuiden on havaittu nostavan pohjaveden lämpötilaa, kun oletettavasti puusto ei enää varjosta maata ja täten auringon lämmittävä vaikutus siirtyy maaperästä pohjaveteen (Britschgi ym. 2022).

Tutkimuksissa on pystytty hyvin tarkasti mittaamaan pohjaveden kohonneita lämpötiloja. Gunawardhana & Kazama (2011) arvioivat Japanissa tehdyn pohjaveden lämpötilamuutoksia tarkastelevan tutkimuksen perusteella, pohjaveden lämpötilojen kohoavan vuoden 2006 tasolta 1,2–3,3 °C vuoteen 2080 mennessä, kun tarkastelussa otettiin huomioon monia ilmastomalleja ja niiden skenaariot ilmaston lämpenemisen skenaarioiksi. Mikäli maanpinnan lämpeneminen tapahtuu 80 vuoden tarkasteluperiodin aikaisella tahdilla ja sademäärä pysyy entisellään, pohjaveden lämpötila nousisi 1,6 °C vuoteen 2080 mennessä.

3 Tutkimusalueen kuvaus

Tutkimusalue kuuluu Suomen pohjavesigeologisen aluejaon mukaan Salpausselkien ja muiden reunamuodostumien sekä niihin liittyvien syöttöharjujen alueeseen (Korkka-Niemi & Salonen 1996: 58). Juurikin jäätikön ja reunadeltojen kontaktiin syntyneet syöttöharjut mahdollistavat maan runsaimmat pohjavesivarat. Virttaankangas kuuluu Säkylänharjun ja Oripääkankaan kanssa osaksi lounaisen Suomen suurinta harjujaksoa, joka yltyä 3. Salpausselältä Pohjanlahdelle asti (Artimo ym. 2007, kuva 4). Virttaankangas ja Säkylänharju muodostavat yhdessä luode-kaakko-suuntaisen, noin 20 km pitkän, 2,5 km leveän ja 10–50 metriä korkean selänteen, joka on merkattuna karttaan punaisella rajauksella (Säkylänharju-Virttaankangas hydrogeologinen kuvaus 2018; Mälkki 2003a).

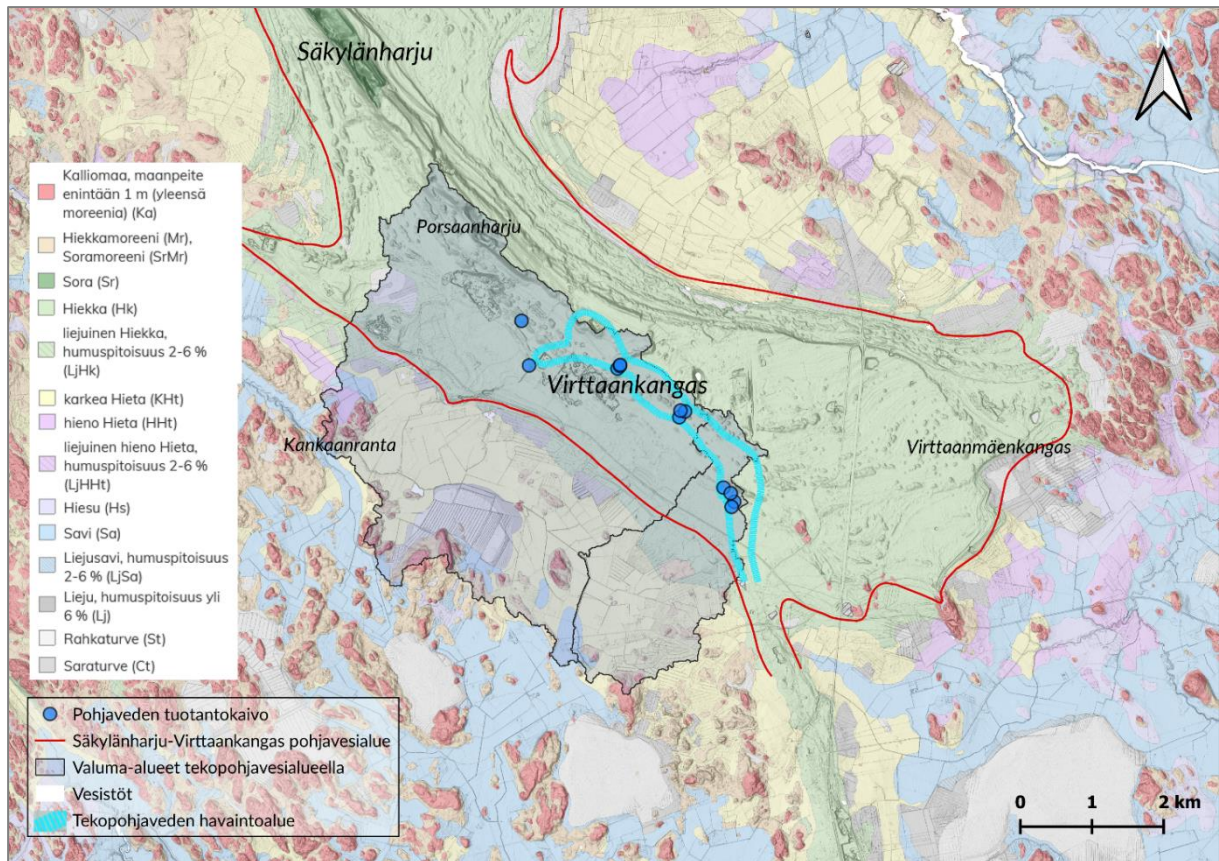


Kuva 4. Tutkimusalue sijaitsee Säkylänharju-Virttaankangas-harjujaksolla, joka on merkattuna karttaan punaisella. (Valtio-, kuntarajat ja varjostettu korkeusmalli MML, pohjavesialueet ja vesistöt SYKE)

Erityisen piirteen alueelle tekee kallioperässä oleva ruhjevyöhyke, joka kulkee Virttaankankaan Kankaanjärveltä etelään, Virttaan kylän suuntaa (Artimo ym. 2003). Ruhjeen leveys on eteläosassa vain kymmeniä metrejä, mutta Kankaanjärven kohdalla se on kasvanut jo 100–150 metriä leveäksi. Syvyydeltään ruhje on jopa 90 metriä (Artimo ym. 2007).

Säkylänharju edustaa saumaharjua eli se on muodostunut jäätikön reunalle, kahden jäätikkökielekkeen väliin sulamisvesikanavien kuljettamasta materiaalista (Mäkinen 2003). Harju on muodostunut vuodenaikaisissa sykleissä, jolloin keväisin ja kesäisin kerrostuivat paksummat sora- ja hiekkakerrokset ja talvisin kerrostuivat hienommat sedimentit.

Jään vetäytymisen ja glasioisostaattisen maankohoamisen seurauksena rannikkoprosessit muovasivat Säkylänharjun ja Virttaankankaan alueita (Mäkinen & Räsänen 2003). Virttaankangas syntyi rantavoimien uudelleen kerrostaessa Säkylänharjun glasiifluvialista hiekkaa ja soraa, muodostan spit-splatform -rakenteen eli hiekkakannaksen (Mäkinen & Räsänen 2002). Kuvassa 5 näkyy vihreällä Virttaankankaan rantahiekkakerrostumat (Artimo ym. 2007). Tämän hiekkakerroksen korkean huokoisuuden ja vedenjohtavuuden takia tekopohjavesilaitoksen imeytys- ja tuotantokaivot on sijoitettu tälle alueelle tai sen välittömään läheisyyteen. Paikoin hyvin vettä johtavien kerrosten paksuus kallioruhjeen kohdalla kasvaa yli 40 metrisiksi. Virttaankankaan koillispuolella sijaitsee glasiolakustrisia savi- ja silttikerroksia, joiden yläpuolella on orsivesiä (Artimo ym. 2003). Pohjavesi purkautuu luonnollisesti Myllylähteeseen sekä Kankaanrannan lähteisiin. Virttaankankaalla sijaitseva Kankaanjärvi on entinen suppa, joka on täyttynyt osittain vedellä (Mäkinen 2004).



Kuva 5. Virttaankankaan ja lähialueen maaperäkartta, jossa on merkattuna myös pohjaveden tuotantokaivot sekä valuma-alueet, joilla kaivot sijaitsevat. Neonsinisellä on merkattuna tekopohjaveden esiintymisalueen rajat (TSV Oy). (Maalajit ja varjostettu korkeusmalli MML, pohjavesialueen raja ja valuma-alueet SYKE)

Haasteita pohjavedentuotannolle aiheuttavat alueen rikkonaisuus kalliokynnysten ja vettä heikosti johtavien maalajien takia, mutta eri akviferien välillä oletetaan olevan yhteyksiä (Artimo ym. 2007). Harjun ydin kulkee pitkin kallion ruhjetta minkä lisäksi ytimen sivuilta löytyi MUKH-rakenteita (morphologically undetectable kettle holes) eli piilosuppia (Mäkinen 2004, Maries ym. 2017). Piilosupat eroavat sedimentologialtaan ympäröivästä materiaalista. Jäätikön sulamisvaiheessa siitä irtosi jäälohkareita, jotka hautautuivat harjuainekseen jättäen jälkeensä suuren supan. Suppa täyttyi reunoilta romahtaneesta aineksestä sekä päälle kerrostuneista rantakerrostumista. Alueen piilosupat voivat ylettyä kallioperään asti (Maries ym. 2017). Piilosoppien havaitseminen on merkittävää, sillä ne vaikuttavat pohjaveden virtaussuuntaan käänteisesti ja pidentävät pohjaveden viipymää (Ahokangas ym. 2020).

4 Aineistot ja menetelmät

4.1 Aineistot

4.1.1 Turun Seudun Vesi Oy:n havainnot

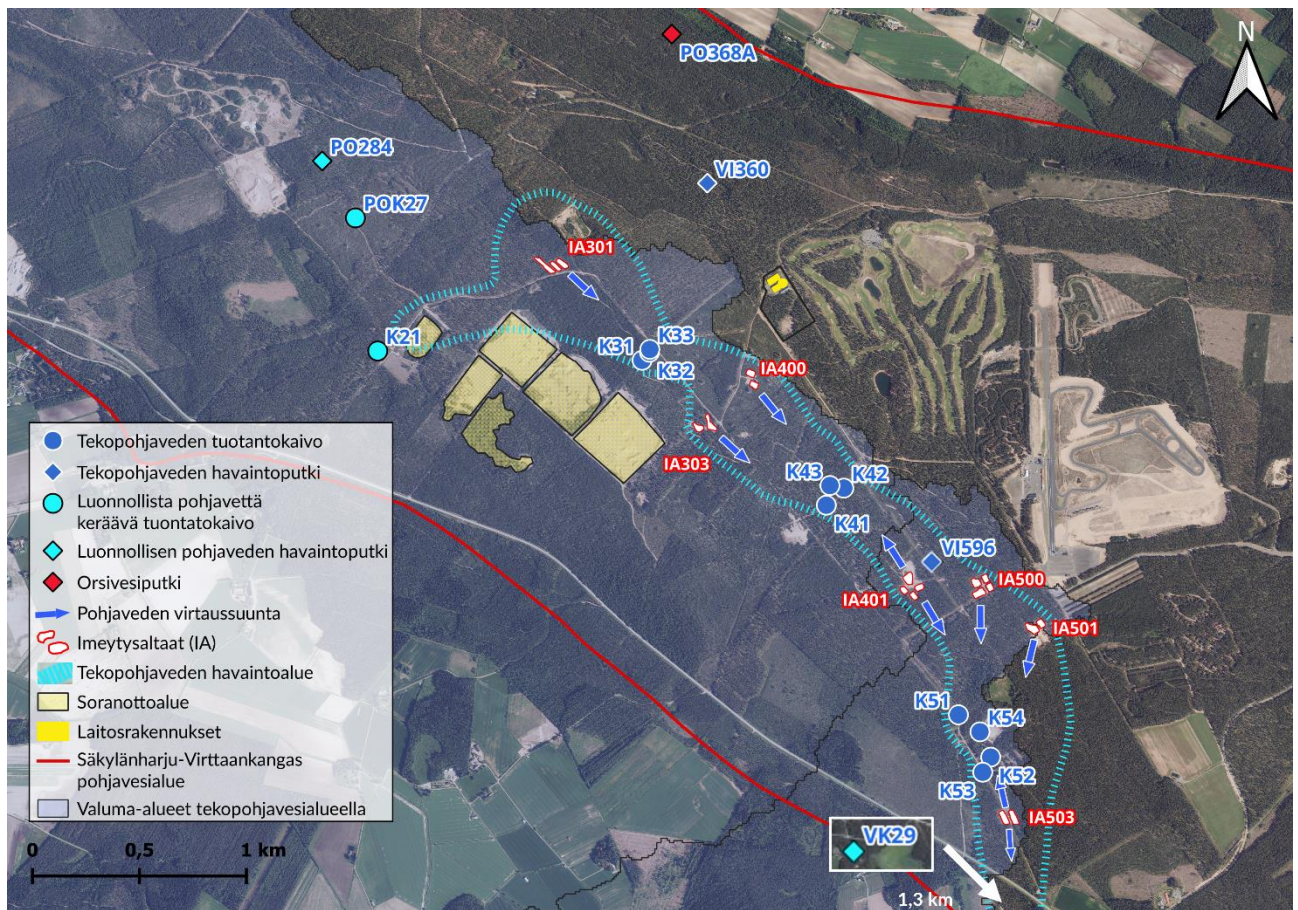
Turun Seudun Vesi Oy (TSV) on suorittanut Virttaankankaan alueella vuodesta 1999 asti omaa vedenlaadun seurantaa yhdellä vedenottamolla (Artimo ym. 2007). Vuodesta 2002 saakka on tehty systemaattista pohjavedenlaadun seurantaa alueen kaivoista, lähteistä ja pohjavesiputkista. Alue on yksi Suomen tutkituimpia juurikin massiivisen tekopohjavesihankkeensa takia. Ensin dataa kerättiin suunnittelutyötä varten ja nykyään sitä kerätään niin lain velvoitteesta, jotta veden laatua pystytään tarkkailemaan kokonaisvaltaisesti, kuin myös vapaaehtoisen seurantaohjelman puitteissa.

Tutkielmani aineisto on TSV:n tuottamaa ja käsittelemää tekopohjaveden tuotannon seurantaan liittyvää. Tekopohjaveden Virttaankankaalla sijaitsevat tuotannon osat ovat kuvattuna kuvassa 6. Virttaankankaalla on 12 tuotantokaivoa, joista muodostunut tekopohjavesi pumpataan puhdasvesisäiliöön siirtoa varten. Kaivot on sijoitettu neljälle kaivoalueelle, kaivojen numeroinnin mukaisesti VO20-VO50. Käytössäni on lämpötiladata hieman kaivosta riippuen vuosilta 2011–2018. Lämpötila on mitattu noin kerran kuukaudessa koko vuoden ajan. Aineistoni kattaa 10 tuotantokaivoa sijaiten kolmella eri kaivoalueella (taulukko 1). Lisäksi ovat kaivot POK27 sekä VIK21, jotka keräävät luonnollista pohjavettä tekopohjavesialueen luoteispuolella. Kokemäenjoen ja Virttaankankaan pohjaveden väliset isotooppierot tunnetaan pitkäaikaisen seurannan takia hyvin, minkä perusteella voidaan todeta, ettei kaivoissa ole tekopohjaveden vaikutusta (Artimo ym. 2007: 28). Näiden kaivojen lämpötiloihin vertailen tekopohjaveden lämpötiloja.

Taulukko 1. Tekopohjaveden tuotantokaivot (Lähde: Turun Seudun Vesi Oy)

Kaivot	Veden laatu	Kaivoalue	Viipymä kuukausina
POK27	Luonnollinen pohjavesi	VO21	
VIK21	Luonnollinen pohjavesi	VO20	
VIK31	Tekopohjavesi	VO30	6
VIK32	Tekopohjavesi	VO30	2,5
VIK33	Tekopohjavesi	VO30	
VIK41	Tekopohjavesi	VO40	4,5
VIK42	Tekopohjavesi	VO40	3,5
VIK43	Tekopohjavesi	VO40	3,5 *
VIK51	Tekopohjavesi	VO50	5,5
VIK52	Tekopohjavesi	VO50	5 *
VIK53	Tekopohjavesi	VO50	5
VIK54	Tekopohjavesi	VO50	5,5
* veden viipymääriviossa on epävarmuutta			

Tekopohjavesi virtaa imeytysaltaista pääosin kohti etelää, harjuytimen mukaisesti (kuva 6) sekä kohti tuotantokaivoja. Kaivojen sijoittelulla on voitu vaikuttaa veden valuminen haluttuun suuntaan. Valuma-alueiden rajoista näkee, kuinka tekopohjavesilaitos on sijoitettu kokonaisuudessaan niin, että vesi valuu Virttaankankaan eteläpuolelle.



Kuva 6. Tekopohjaveden tuotanto Virttaankankaalla muodostuu imeytysaltaista (numeroidut IA-alueet), tuotantokaivoista (numeroidut K-pisteet) sekä pohjaveden havaintoputkista (vinoneliöt). (Pohjaveden tuotantoaineisto TSV Oy, pohjavesialueen rajat ja valuma-alueet SYKE, ilmapuva MML)

4.1.2 Havaintoputket

Muodostuneen pohjaveden lämpötiladatan tueksi latasin pohjavesitietojärjestelmästä (POVET) Varsinais-Suomen ELY-keskuksen ylläpitämien havaintoputkien lämpötiladataa. POVET kuuluu ympäristöhallinnon ympäristötiedon hallintajärjestelmään (Hertta), johon kootaan kattavasti tietoa ympäristön tilasta. Virttaankankaalla sijaitsee useita havaintoputkia. Valitsin sijainniltaan poikkeavia putkia, joista löytyisi kattava lämpötiladata (taulukko 2). Havaintoputkia on 5, joista putkessa VI596 on loggereita 4 eri korkeudella. Putkista PO284, PO368A ja VK29 sijaitsevat tekopohjavesialueen ulkopuolella, joten niissä näkyy luonnollisen pohjaveden lämpötila. Putki VI360 sijaitsee tekopohjavesialueen pohjoispuolella ja kartalta tarkasteltuna tekopohjavesialueen ulkopuolella. TSV:n Putki PO368A sijaistee orsivesivyöhykkeessä. Muut putket sijaitsevat joko tekopohjavesialueella tai sen ulkopuolella. Putkissa virtaavan veden tekopohjavesipitoisuudesta ei ole tarkempaa tietoa, mutta lämpötiladataa tarkastellessa täytyy tarkastella myös niiden sijaintia suhteessa

imeytysalueisiin. Putkissa on mittalaitteet, jotka mittaavat veden laatua neljästi päivässä, 6 tunnin välein. Lämpötiladataa oli saatavilla vuosilta 2012–2016.

Taulukko 2. Havaintoputkien tiedot (Lähde: POVET)

Putken koodi	Tyyppi	Putken yläpää m (N2000)	Sijainti
PO284	pohjaveden havaintoputki	110,45	tekopohjavesialueen ulkopuolella
PO368A	orsivesiputki	98,4	tekopohjavesialueen ulkopuolella
VK29	pohjaveden havaintoputki	88,43	tekopohjavesialueen ulkopuolella
VI360	pohjaveden havaintoputki	111,99	tekopohjavesialueella
VI596 (4 loggeria)	pohjaveden havaintoputki	105,81	tekopohjavesialueella

4.1.3 Kokemäenjoen raakavesi

Turun Seudun Vesi Oy tarkkailee veden laatua jo raakaveden esikäsittelylaitoksella, jossa myös veden lämpötilaa tarkkaillaan. Tärkeä tietoa tutkielman valossa, on tiedostaa raakaveden lämpötilan tasaantuminen esikäsittelyprosessin aikana. Vesi on siis melko tasalämpöistä saapuessaan Virttaankankaalle. Tämän vuoksi tarkastelussa on mukana myös täysin luonnollista pohjavettä tarkkailevia havaintoputkia ja kerääviä kaivoja. Pohjavesi saattaa siis olla huomattavan eri lämpöistä pumpattaessa imeytysaltaisiin verrattuna sadeveden lämpötilaan. Esikäsittelylaitokseen otettavaa Kokemäenjoen veden lämpötilaa tarkkaillaan kerran tunnissa. Tässä tutkielmassa käsitellään lämpötila-aineistoa vuosilta 2012–2019.

4.2 Menetelmät

Tutkielmassa tarkasteltiin pohjaveden lämpötilojen vaihtelua tilastollisesti Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Kaikki lämpötilahavainnot, kaivoista sekä havaintoputkista, järjesteltiin omiin tiedostoihin. Ensin lämpötilahavainnot tarkasteltiin tunnuslukujen avulla. Tuotantokaivoista kerättiin taulukkoon lämpötilahavaintojen keskiarvo, maksimi- ja minimiarvot, vaihteluväli sekä kaivon arvioitu viipymä. Havaintoputkista koostettiin samat arvot, paitsi veden viipymäaika, joka on kaivoille määritetty arvo. Lämpötilan keskiarvot on laskettu kunkin havaintopisteen kaikista havainnoista kuten myös maksimi- ja minimilämpötilat. Ääripäähavainnot eivät välttämättä ole keskenään samalta vuodelta vaan

voivat olla mistä tahansa havainnointijaksolta. Vaihteluväli on laskettu maksimin ja minimin erotuksena, tällöin se kuvaa veden tasalaatuisuutta.

Tuotantokaivojen tunnuslukutarkastelulla voitiin vertailla kaivojen lämpötilojen ääriarvoja sekä saada pohjatietoa kaivojen sekä kaivoalueiden välisistä eroista. Tämän jälkeen havainnot visualisoitiin diagrammeiksi, joista on helpompi havaita ajallisia muutoksia. Lämpötilojen vaihtelun vertailu onnistuu, kun samassa diagrammissa on kuvattuna useamman kaivon havainnot. Kaivoalueittainen tarkastelu mahdollistaa lähellä toisiaan sijaitsevien kaivojen keskinäisen lämpötilakäyttäytymisen tarkastelun.

Havaintoputkien tunnuslukutaulukosta oli mahdollista tarkastella luonnollisen ja tekopohjaveden lämpötilojen eroavaisuuksia suotautumisen aikana ennen kuin vesi sekoittuu akviferissä olevaan veteen. Lisäksi havainnot tarkasteltiin diagrammista visuaalisesti ja havainnoitiin ajallisia muutoksia. Lämpötiloissa tapahtuvaa muutosta tutkittiin näiden lisäksi Excelin tarjoamalla trendiviiva-työkalulla, joka osoittaa aineistossa tapahtuvaa lineaarista muutosta viivana.

5 Tulokset

5.1 Lämpötilojen tunnusluvut

5.1.1 Kaivojen lämpötilojen tunnusluvut

Tarkasteltaessa Virttaankankaan kaivojen lämpötiladatan suureita, voidaan huomata suurta vaihtelua niin kaivoalueiden välillä kuin kaivoalueiden sisälläkin (taulukko 3). Kaivojen lämpötilan keskiarvo vaihtelee välillä 6,43–8,91 °C eli 2,47 °C. Keskiarvoltaan kylmimmät lämpötilat painottuvat luonnollista pohjavettä kerääviin kaivoihin, POK27 ja VIK21, joiden veden keskilämpötila on 6,64 °C ja 6,43 °C. Tekopohjavesialueella sijaitsevista kaivoista kylmin vesi on kaivoissa VIK52 ja VIK53, joissa veden keskilämpötila on 7,06 °C ja 6,95 °C. Keskiarvoltaan lämpimin vesi on kaivossa VIK32, 8,91 °C, jossa on myös maksimiarvoista lämpimin vesi, 14,3 °C. Veden maksimi- ja minimilämpötiloissa on suurta vaihtelua. Luonnollisen pohjaveden kaivoissa on minimiarvoiltaan lämpimintä vettä, 6,3 °C molemmissa, mutta niissä on myös pienin vaihteluväli 0,6 °C ja 1,5 °C.

Kaivoalueittain tarkasteltaessa, alueella VO30 vesi on lämpimämpää ja alueella VO40 viileämpää kuin muilla alueilla. Alueella VO30 on neljästä tunnusluvusta 3 korkeinta, keskiarvo, maksimi ja vaihteluväliltään suurin. Alueella esiintyy myös kylmin vesi kaivoista mitattuna eli 4,3 °C havainto kaivossa K31.

Tekopohjavettä sisältävien kaivojen vaihteluvälin yhteyttä viipymään tarkasteltiin korrelaatiokertoimen kautta. Korrelaatiokertoimeen otettiin huomioon kaikki muut kaivot paitsi luonnollisen kaivoveden kaivot POK27 ja VIK21 sekä tekopohjavesikaivo VIK33 puuttuvan viipymätiedon takia. Yhdeksän kaivon vaihteluvälin ja viipymän korrelaatiokerroin oli -0,423 eli muuttujien välillä on kohtalainen negatiivinen korrelaatio. Tämä tarkoittaa veden lämpötilavaihtelun ja viipymän olevan käänteisessä suhteessa toisiinsa: veden viipymän pidentyessä myös lämpötilan vaihteluväli pienenee ja päinvastoin. Korrelaatio ei ole voimakas, mutta kuitenkin havaittavissa.

Taulukko 3. Kaivojen lämpötilojen tunnusluvut on värjätty sarakkeittain siten, että sininen väri edustaa matalimpia arvoja ja punainen korkeimpia kyseisessä sarakkeessa. Kaivot POK27 ja VIK21 edustavat luonnollista pohjavettä. @Turun Seudun Vesi Oy

Kaivo	Keskiarvo °C	Max °C	Min °C	Vaihteluväli (max-min)	Viipymä kk
POK27	6,64	6,9	6,3	0,6	
VIK21	6,43	7,8	6,3	1,5	
VIK31	7,61	8,8	4,3	4,5	6,0
VIK32	8,91	14,3	5,1	9,2	2,5
VIK33	7,39	10,7	5,4	5,3	
VIK41	7,29	9,3	6,0	3,3	4,5
VIK42	7,61	9,4	6,1	3,3	3,5
VIK43	7,87	11,2	5,7	5,5	3,5*
VIK51	8,52	11,2	5,1	6,1	5,5
VIK52	7,05	8,5	5,8	2,7	5*
VIK53	6,95	8,8	6,1	2,7	5,0
VIK54	7,50	10,4	5,1	5,3	5,5

5.1.2 Havaintoputkien lämpötilojen tunnusluvut

Taulukossa 4 on kuvattuna havaintoputkien lämpötilojen tilastolliset tunnusluvut. Kolme ensimmäistä havaintoputkea, PO368A, VK29 ja PO284 sisältävät tekopohjavesialueen ulkopuolista pohjavettä eli niiden lämpötiloja voidaan verrata kahteen tekopohjavettä sisältävään putkeen, VI360 ja VI596. Putki VI596 sijaitsee aivan imeytysalueiden välittömässä läheisyydessä mistä johtuen havainnot ovat selkeästi korkeampi verrattuna muihin havaintoputkiin sekä tuotantokaivoihin. Lämpötilat näyttävät pienenevän mentäessä putkessa alemmas, eritoten keskiarvoa tarkasteltaessa. Maksimi- ja minimiarvot eivät pienene asteittain, vaan putken keskivaiheilla on pientä vaihtelua. Selkeästi kuitenkin pinnalla on lämpimämpää ja pohjalla viileämpää.

Putken VI596 selvästi lämpimimpien havaintojen jälkeen, toiseksi lämpimintä vettä on putkessa PO248, jonka keskiarvo on 6,82 °C. Kylmintä vesi on tekopohjavettä havainnoivassa putkessa VI360, 5,77 °C. Maksimilämpötiloiltaan luonnollinen pohjavesi on kaikki saman lämpöistä, 7,0 °C, kun tekopohjavesiputkessa VI360 vesi on lämpimimmilläänkin vain 5,9 °C. Minimilämpötilat vaihtelevat välillä 4,8–6,6 °C. Kylmintä ja tasalämpöisintä vettä on putkessa VI360, 0,3 °C vaihteluvälillä.

Taulukko 4. Havaintoputkien lämpötiladatan tunnusluvut taulukoituna, jossa kolme ensimmäistä riviä edustaa luonnollista pohjavettä ja putket VI360 sekä VI596 loggereineen edustaa tekopohjavettä.
@POVET

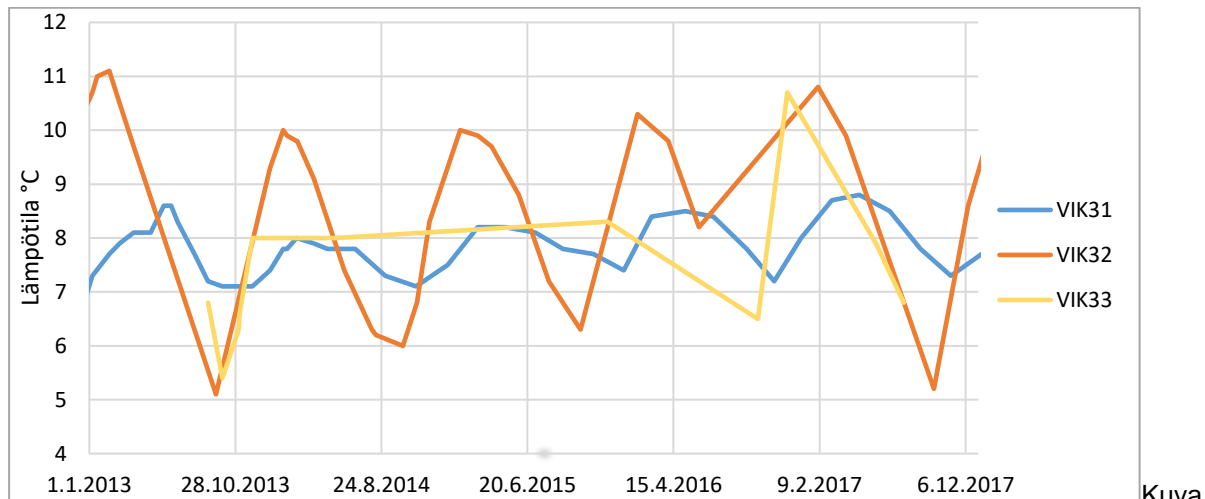
Kaivo	Keskiarvo °C	Max °C	Min °C	Vaihteluväli (max-min)
PO368A	6,01	7,0	4,8	2,2
VK29	6,18	7,0	5,2	1,8
PO284	6,82	7,0	6,6	0,4
VI360	5,77	5,9	5,6	0,3
VI596	15,31	20,6	8,8	11,8
VI596_2	14,48	20,5	7,6	13,0
VI596_3	13,93	20,6	7,2	13,4
VI596_4	13,04	20,1	7,5	12,5

5.2 Lämpötila ajallisena muuttujana

Lämpötiladiagrammien tarkastelussa on syytä ottaa huomioon alkupään epäsäännölliset havainnot, jotka tasoittuvat vuoden 2013 lopulla tekopohjavesilaitoksen aloittaessaan täyden tuotannon. Siitä eteenpäin tuotanto on ollut kokoaikaista. Yksittäisissä kaivoissa tai havaintoputkissa on saattanut olla häiriöjaksoja, jolloin havaintoja puuttuu välistä.

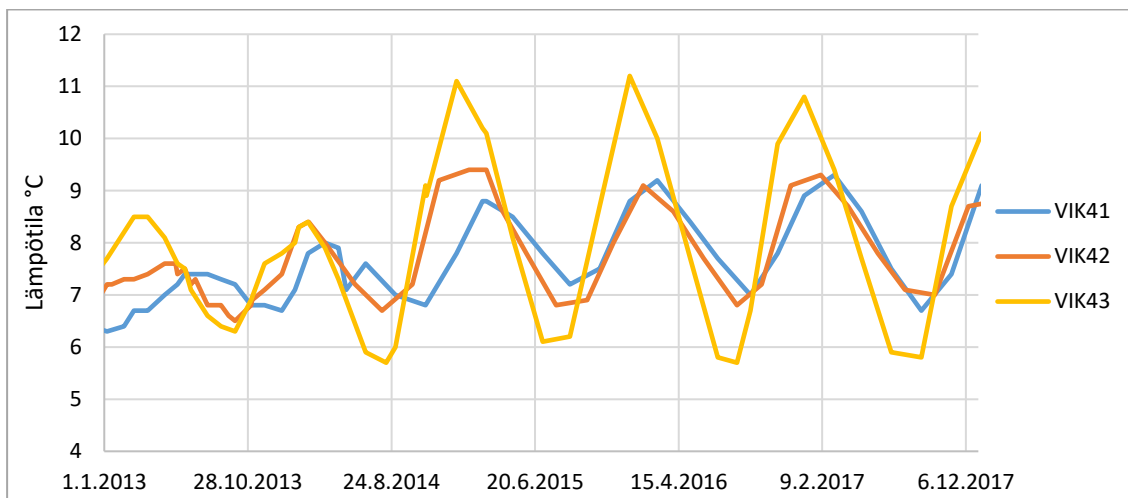
5.2.1 Kaivoalueiden lämpötilavaihtelu

Kaivoalueella VO30 kaivojen VIK31 ja VIK32 lämpötilavaihtelu on syklistä, kaivon VIK32 kuitenkin reagoidessa hieman aikaisemmin (kuva 7). Kaivon VIK33 epäsäännöllisyyttä selittää vähäinen havaintojen määrä, 11 kappaletta. Kaivossa VIK32 vaihtelu on amplitudiltaan suurempaa ja sen vaihteluväli oli suurin, 9,2 °C. Kaivolla VIK31 vaihteluväli oli vain puolet tästä, 4,5 °C, mikä näkyy myös lämpötilakäyrässä kuvassa 7.



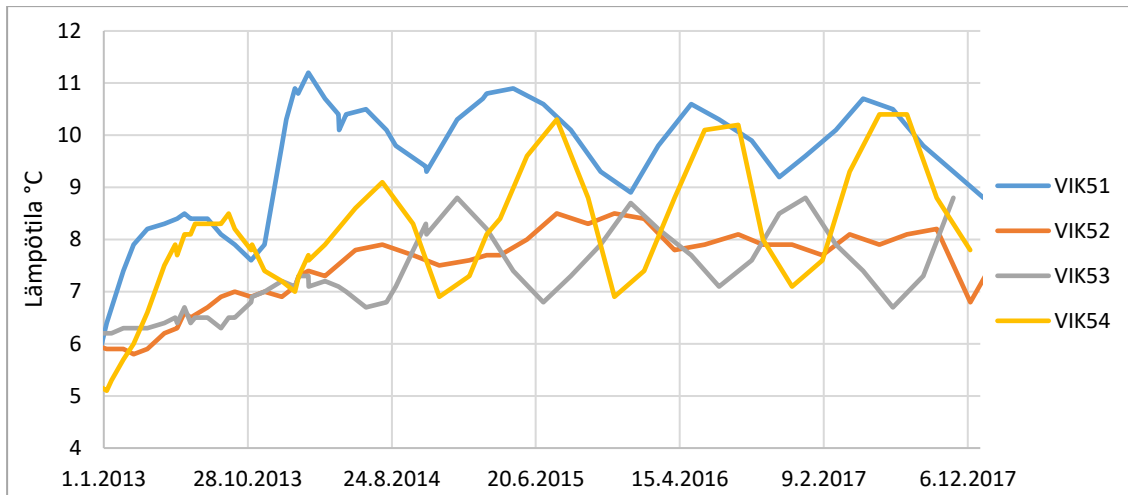
7. Kaivoalueen VO30 tekopohjaveden tuotantokaivojen lämpötilavaihtelu vuosina 2013–2018

Kaivoalueella VO40 vaihtelu on huomattavasti tasalaatuisempaa kuin kaivoalueella VO30 (kuva 7 ja 8). Keskenään kaivoalueilla VO30 ja VO40 syklisyys toistaa ajallisesti melko samoja nousuja ja laskuja. Alueella VO40 kaivot ovat samanlaisessa rytmissä, joskin kaivo VIK 43 vaihteluväli on selkeästi korkeampi kuin kahdella muulla, nimittäin 5,5 °C, kun kaivoilla VIK41 ja VIK42 vaihteluväli oli vain 3,3, °C. Kaivossa VIK43 lämpötila saavuttaa huippunsa hieman ennen kahta muuta kaivoa, keskimäärin tammikuun alussa. Kartalta tarkasteltaessa, kaivoalue saa vetensä kahdesta suunnasta, mikä voi osaltaan selittää lämpötilojen eriaikaista lämpötilahuippujen esiintymistä.



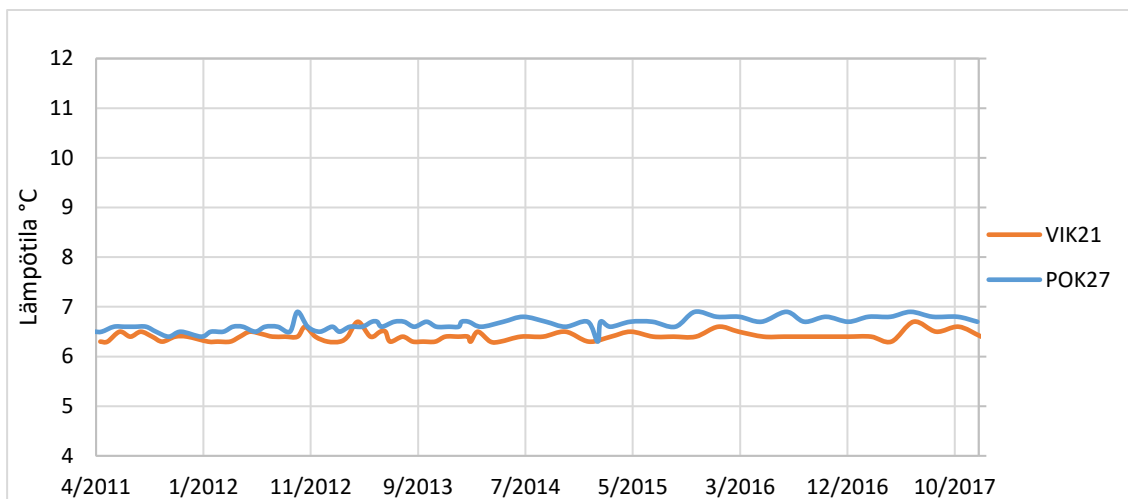
Kuva 8. Kaivoalueen VO40 tekopohjaveden tuotantokaivojen lämpötilavaihtelu vuosina 2013–2018

Kaivoalueen VO50 lämpötilakäyrät eroavat kahdesta edellisestä huomattavasti (kuva 9). Alueen kaikilla kaivoilla on omanlaisensa syklisyys. Kaivolla VIK51 on selkeä syklisyys, joka on edellä esitettyjä kaivoja hieman myöhäisempi, korkeimmat lämpötilat asettuvat toukokuun alun tienoille. Kaivossa VIK54 on myös syklisyyttä, mutta se on hyvin eriaikainen muihin kaivoihin verrattuna, sillä lämpötila saavuttaa maksimilämpötilansa elokuun aikana mikä poikkeaa täysin muista kaivoista. Kaivo VIK53 noudattaa samaa syklisyyttä kaivoalueiden VO30 ja VO40 kanssa. Kaivo VIK52 käyrästä ei löydy mitään selkeää syklisyyttä vaan lämpötila vaihtelee epätasaisesti.



Kuva 9. Kaivoalueen VO50 tekopohjaveden tuotantokaivojen lämpötilavaihtelu vuosina 2013–2018

Luonnollisen pohjaveden lämpötila tuotantokaivoissa VIK21 ja POK27 ovat hyvin tasaisia läpi koko tarkasteluajanjakson (kuva 10). Kaivot sijaitsevat tekopohjavesialueen luoteispuolella, joten harjuytimessä virtaava vesi virtaa juurikin näiden kaivojen suunnasta kohti kaakkoa ja tekopohjaveden tuotantoaluetta. Lämpötilassa ei näy edes tarkemmalla tarkastelulla syklisyyttä eli lämpötila on hyvin stabiili. Lämpötila vaihtelee 6 ja 7 °C välillä. Verrattuna tekopohjavettä kerääviin kaivoihin, luonnollinen pohjavesiakviferi on tasalämpöisempi eikä siitä pysty erottamaan vuodenaikojen vaikutusta.



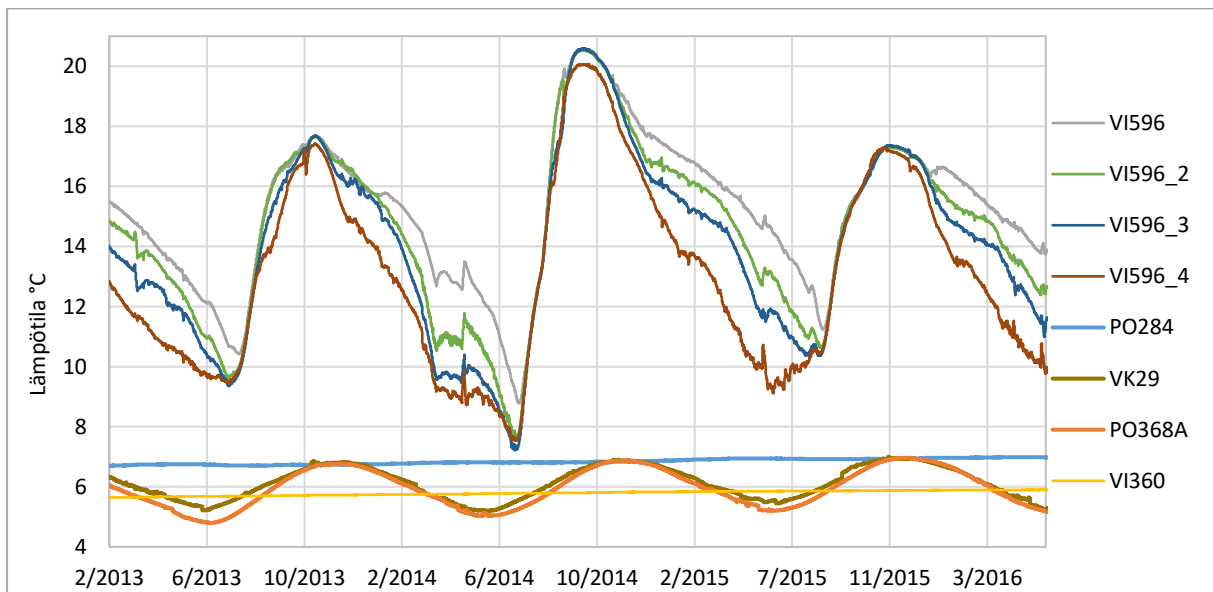
Kuva 10. Luonnollista pohjavettä keräävien kaivojen lämpötilavaihtelu vuosina 2011–2017

5.2.2 Havaintoputkien lämpötilavaihtelu

Havaintoputkien lämpötilavaihtelut ovat paljon yksityiskohtaisempia, sillä aineistoa on mitattu huomattavasti tiheämmällä välillä kuin kaivoveden lämpötiloja. Kuvassa 11 erottuu selkeästi suurella vaihteluvälillä havaintoputki VI596 ja sen neljä loggeria. Kuvan alalaidassa

näkyä muiden havaintoputkien maltillisempi vaihtelu tai lähes olematon lämpötilavaihtelu suorina viivoina. Hieman paksummilla viivoilla visualisoidut putket PO284, VK29 ja PO368A edustavat luonnollista pohjavettä. Huomionarvoista on, että kaksi viimeksi mainittua havaintoputkea sijaitsevat toisistaan 5,6 km päässä, mutta niissä on silti lähes identtinen lämpötilakäyrä.

Lähes suorina viivoina kuvassa 11 näyttäytyvät luonnollista pohjavettä edustava putki PO284 ja tekopohjavettä havainnoiva VI360. Hyvin pienellä mittakaavalla tarkasteltaessa, putkessa PO284 lämpötila kohoaa lähtöarvosta kokonaisuudessaan 0,5 °C, eikä lämpötilassa näy kuin pienen pientä syklisyyttä. Koska putkien syvyydet eivät ole tiedossa, voi tasainen lämpötila olla luonnollinen ilmiö sillä tarpeeksi syvällä oleva pohjavesi on lämpötilaltaan suhteellisen stabiili. Verrattuna kuitenkin selkeästi syklisiin putkiin VK29 ja PO368A, erittäin putken stabiili lämpötila selkeästi. On mahdollista, että anturi on vioittunut. Putkessa VI360 ei ole minkäänlaista syklisyyttä, veden lämpötila on ainoastaan kohonnut 0,3 °C, joten on mahdollista, että tässäkin putkessa on vioittunut anturi.

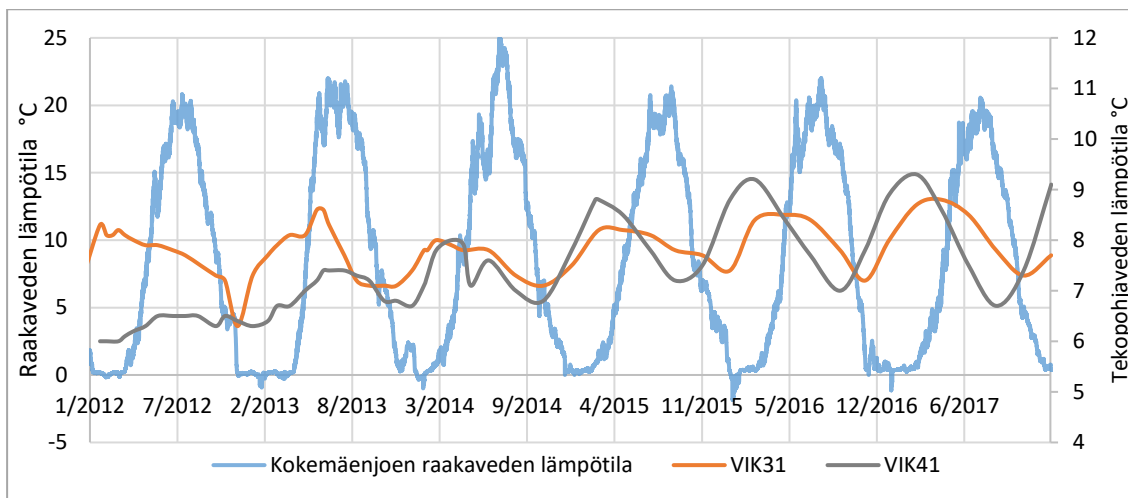


Kuva 11. Havaintoputkien lämpötilavaihtelu vuosina 2013–2016

Havaintoputki VI560 ja sen yhteensä neljä loggeria noudattelee luonnollisen pohjaveden syklisyyttä. Virtaankankaalla imeytyvä vesi lämpenee heinäkuusta loppusyksyyn, lokamarraskuun tienoille asti. Tämän jälkeen alkaa hitaampi viileneminen. Vesi viilenee melko tasaisesti kesä-heinäkuuhun asti. Syvimmällä olevaan loggeriin VI596_4 tallentuu viileimmät lämpötilat ja ylimpänä, lähellä pintaa olevana loggeriin päinvastoin lämpimimmät lämpötilat.

5.3 Raakaveden ja tekopohjaveden lämpötilavertailu

Raakaveden lämpötilaa on verrattu kuvassa 12 kahteen tekopohjavettä keräävään kaivoon, VIK31 ja VIK41. Kaivolla VIK 31 on Virttaankankaan pisin arvioitu viipymä, 6 kk ja kaivolla VIK41 4,5 kk. Raakaveden lämpötila on mitattu ennen veden siirtymistä esikäsitteilyyn. Kuvassa 12 raakaveden lämpötila noudattaa vuodenaikoja reaaliajassa eli vesi on lämpimintä kesällä ja viileintä talvella. Raakavesi myös lämpenee ja kylmenee melko symmetrisesti.



Kuva 12. Raakaveden ja tekopohjaveden lämpötilat kaivoissa vuosina 2013–2017

Kaivoveden lämpötila käyttäytyy taasen lähes päinvastoin, kun vesi on lämpimintä loppupalvesta. Pohjaveden lämpötilavaihtelu on paljon vähäisempää ja maltillisempaa verrattuna pintavesistöön. Aika, joka raakavedeltä kuluu päätyä tuotantokaivoon, ei ole tiedossa. Tällä kuvaajalla voidaan siis lähinnä havainnoida raakaveden ja tekopohjaveden vuodenaikaisvaihtelun ajallista eroa.

6 Tulosten tarkastelu

Virtaankankaalla tuotantokaivojen lämpötilavaihtelu on hyvin kaivokohtaista. Luotettavan datan määrä rajautuu lähes kaiken aineiston kanssa vain noin kolmeen vuoteen, sillä aineistojen ensimmäiset vuodet sisältävät runsasta vaihtelua lämpötiloissa. Tämä johtunee tekopohjavesilaitoksen käynnistymisestä, minkä vuoksi imeytyvän ja akviferissä olevan tekopohjaveden määrä ei ole vielä tasautunut. Tuotannon stabiloiduttua, alkaa lämpötilavaihtelu löytää säännöllisempää syklisyyttä. Kaivojen lämpötiloja tarkasteltaessa, vaikuttaisi tuotannon stabiloituneen vuodesta 2015 eteenpäin. Tämän vuoksi tuloksissa kaksi ensimmäistä vuotta edustavat hyvin epävarmoja havaintoja.

Kaivojen suhteellisen tasainen keskiarvojakauma indikoi veden lämpötilan tasautumista samalla tavalla koko Virtaankankaan alueella. Joskin kaivojen viipymissä olevat suuret vaihtelut, 2,5 kuukaudesta 6 kuukauteen, on otettava huomioon. Lämpötilojen tunnuslukuja tarkasteltiin myös visuaalisesti kartalla. Kaivoalueella VO50 kaivoissa on keskiarvoltaan sekä hyvin viileitä että lämpimiä kaivoja (taulukko 3). Kaivoalueella on myös kaivoista toiseksi pisimmät viipymäajat 5 ja 5,5 kuukautta. Viiden kuukauden viipymäajan kaivoilla VIK52 ja VIK53 on veden vaihteluväli tekopohjavesistä kaikista pienin, 2,7 °C. Samalla kaivoissa VIK51 ja VIK54 on lyhyempi viipymä, 5 kuukautta, mutta veden vaihteluvälit ovat 6,1 °C ja 5,3 °C. Puolen kuukauden ero viipymässä aiheuttaa yli 2,5 °C eron vaihteluvälissä. Kuvassa 9 on nähtävissä selkeästi kuinka eri aikoina veden lämpötilahuiput ilmenevät alueen kaivojen kesken. Tälle kaivoalueen kaivojen keskinäiselle lämpötilojen erilaisuudelle ei pystytty löytämään tämän tutkielman lähtöaineiston pohjalta varmaa syytä. Syytä olisi mahdollista kartuttaa ainakin kaivojen antoisuuden sekä kaivojen tarkemmasta sijoittumisesta suhteessa alueen geologisiin yksiköihin. Kaksi muuta kaivoaluetta, VO30 ja VO40, ovat yhdenmukaisempia lämpötilan syklisyydeltään ajallisesti tarkasteltuna (kuvat 7 ja 8). Tässä tutkielmassa todetut havainnot eivät ole täysin yhtenevät vuoden 2017 Velvoitetarkkailuraportin (2018: 19) kanssa, mutta hyvin samansuuntaiset. Raportissa todetaan lämpötilan vaihdelleen voimakkaimmin kaivoilla VIK32, VIK43 ja VIK54. Selitykseksi tälle kerrotaan, näiden kaivojen saavan vetensä suoraviivaisinta reittiä imeytysaltailta ja tekopohjavettä sekä luonnollista pohjavettä sekoittuu näin vähemmän kuin muissa kaivoissa.

Kaivojen yhteydessä tarkasteltu korrelaatiokerroin viipymän ja vaihteluvälisen välillä oli -0,423, joka tarkoittaa kohtuullista negatiivista korrelaatiota arvojen välillä. Käytännössä

viipymän pidentyessä, veden lämpötilääripäät tasoittuvat ja veden vaihteluväli pienenee. Korrelaatio ei kuitenkaan välttämättä osoita näiden kahden havainnon syys-seuraussuhdetta. Korrelaation olemassaolon todentamiseen tarvittaisiin pitkäaikaisempaa dataa sekä kaivojen viipymän tarkastelu uudemman kerran. Tässä tutkielmassa ilmoitetut viipymät ovat Turun Seudun Vesi Oy:n ilmoittamia arvioita, jotka perustuvat juurikin lämpötilan muutoksiin kaivoissa.

Havaintoputkissa esiintyi myös jonkin verran epävarmuutta. Putkissa PO284, PO368A ja VK29 esiintyy luonnollista pohjavettä. Tekopohjavettä havainnoidaan putkilla VI596 (4 loggeria) sekä orsivesikerroksessa sijaitseva VI360. Jälkimmäinen putki sijaitsee kuitenkin yli 400 metrin päässä alueesta, jolla tekopohjavettä on havaittu olevan (kuva 6). Kahdella toisiaan lähinnä sijaitsevalla putkella, PO368A ja VI360, on etäisyyttä alle kilometri, mutta niiden lämpötilakäyrät ovat täysin erilaiset. Putki VI360 sijaitsee Virttaankankaan koillisella puolella, jossa sijaitsee runsaasti savi- ja silttikerroksia, jotka salpaavat akviferejä. Tämä saattaa olla syynä tasaiseen lämpötilaan, kun akviferiin ei suotaudu uutta vettä yhtä tehokkaasti kuin harjuytimen alueella. Orsivesiputki PO368A taasen sijaitsee juurikin näiden vettä heikosti johtavien kerrosten päällä, joten se on paremmin vuorovaikutuksessa ilman lämpötilan kanssa ja näin ollen lämpötilakäyrässä näkyy selkeää syklistä.

Tekopohjavesialueella sijaitsevasta havaintoputkesta VI596 on tallentunut hyvin tarkat havainnot, joilla imeytettävän veden lämpötilaa voidaan tutkia tarkasti sekä havainnoida lämpötilan muutosta eri syvyyksissä. Havaintoputkessa tapahtuu jyrkkä veden lämpeneminen syksyn aikana, kun kesällä imeytetään lämmintä vettä ja se ehtii lämmitä vielä imeytysaltaassa. Lisäksi maaperään varastoitunut lämpö lämmittää vettä imeytyessään. Alimmat loggerit ovat tallentaneet matalampia lämpötiloja, mikä selittyisi lämpötilan alenemisella veden suotautuessa vajovesivyöhykkeessä. Erityisesti vuonna 2014 vesi kääntyy lämpenemään jyrkästi ja lämpötila kohoaa edellistä ja seuraavaa vuotta n. 2 °C korkeammalle. Vuosi 2014 oli Suomen mittaushistorian toiseksi lämpimin vuosi (Vuoden 2014 säät, 2015). Veden maltillisempaan viilenemiseen vaikuttavia tekijöitä voivat olla viilenevä sää, maaperän jäähtyminen kesän jäljiltä sekä maan routaantuminen.

Lämpötilan nousua tarkasteltiin Excelin tarjoaman lineaarisen trendiviivan avulla. Kaikilla kaivoilla trendiviiva oli lineaarisesti kasvava paitsi kaivolla VIK32. Positiivinen suuntaviiva osoittaa lämpötilojen kasvaneen havaintojen alusta alkaen. Samalla myös Kokemäenjoen raakaveden lämpötila on ollut hienoisessa kasvussa vuosina 2012–2018. Tekopohjaveden

lämpötilojen kasvussa on otettava huomioon havaintojen suhteellisen pieni määrä vuositasolla sekä vain muutaman vuoden tarkasteluajanjakso. Tekopohjavesilaitos on aloittanut täysimittaisen tuotannon samaan aikaan ensimmäisten havaintojen kanssa eli kaivojen lämpötilasykleistä päätellen ensimmäiset 2 vuotta ovat hyvin epävarmoja havaintoja. Trendiviivan nousu kuitenkin jo muutaman vuoden havaintoajanjaksolla antaa viitteitä lämpötilojen kehityksestä.

7 Pohdinta

Pohjaveden lämpötilassa tapahtuu vaihtelua ja se on erilaista luonnollisen ja tekopohjaveden välillä. Luonnollinen pohjavesi aaltoilee tasaisesti noudattaen pohjaveden tunnettua lämpötilasykliä. Tekopohjavedessä ilmenee niin ikään syklisyyttä, mutta eri tahdissa. Tekopohjaveden tuotanto perustuu tuotantokaivojen runsaaseen vedenottoon, mikä tehostaa veden imeytymistä maaperään. Tällöin pohjaveden luontainen lämpötilasyklisyys häiriintyy, kun maaperään imeytetään jotakin muuta kuin esimerkiksi sadannan myötä tulevaa vettä. Imeytettävä vesi ei kuitenkaan eroa radikaalisti lämpötilaltaan sadevedestä.

Tekopohjaveden lämpötilaan vaikuttaa moni tekijä. Tässä tutkielmassa ei ollut tiedossa raakaveden lämpötila esikäsitteilyn jälkeen. Lämpötila tasaantuu prosessin aikana ja vielä imeytysaltaissa veden ollessa kontaktissa ulkoilman kanssa. Tuotantokaivojen viipymissä oli selkeitä eroja, mikä osaltaan vaikuttaa pohjaveden lämpötilaan. Nopeasti suotautuva vesi ei ehdi tasata lämpötilaa vaan saavuttaa tuotantokaivon mahdollisesti ennen lämpötilan asettumista lopulliseen lämpötilaansa.

Pohjaveden lämpenemisen mahdolliset haitat eivät ole vielä kattavasti tiedossa. Pohjaveden lämpötilan on jo havaittu kohoavan varsinkin rakennetuilla alueilla. Hietula (2018) pohti pro gradu -tutkielmassaan matalapohjaveden sisältämän geotermisen energian hyödyntämisen potentiaalia Suomessa. Menetelmällä hyödynnetään matalien pohjavesien sisältämä lämpöenergia lämmitykseen sekä viilennykseen. Arola (2015) toteaa väitöskirjassaan, miten lämmittämiseen voitaisiin käyttää pohjavettä sen geotermisen energian takia ja veden viilennyttyä, pumpattaessa takaisin maaperään, viilentynyt vesi voisi viilentää myös maaperää. Tämä voisi tarjota ratkaisun urbaanien alueiden lämpeneviin pohjavesiin. Monet pohjaveden lämpenemistä käsittelevät tutkimukset ovat keskittyneet juurikin urbaaneihin alueisiin, joten Virttaankankaan kaltaiset, syrjäisemmällä alueella, luonnonympäristössä sijaitsevat pohjavesialueet eivät ole yhtä edustettuina tutkimuksissa.

8 Johtopäätökset

- Luonnollisen pohjaveden lämpötila vaihtelee havaintoputkissa hyvin tasaisesti vuodesta toiseen eli syklisyys on melko symmetristä. Tekopohjaveden lämpötila eroaa luonnollisesta, mutta siinä esiintyy omanlainen säännönmukaisuutensa vuoden aikana.
- Jotta voidaan varmistua lämpötilan pidempiaikaisesta muutoksesta, on tarkasteltava pidempää ajanjaksoa, jossa ei ole mukana tekopohjavesilaitoksen ensimmäiset vuodet.
- Pohjaveden lämpötilan muutosten vaikutuksista tarvitaan lisää tutkimusta, sillä ilmastonmuutoksen on jo nyt tunnistettu vaikuttavan hydrologiseen kiertoon. Pohjaveden lämpötila vaikuttaa sen kemialliseen koostumukseen, mikä voi vaikuttaa sen käytettävyyteen yhteiskunnan tarpeisiin.

Lähteet

- Ahokangas, E., J. Mäkinen, A. Artimo, A. Pasanen & H. Vanhala (2020) Interlobate esker aquifer characterization by high resolution seismic reflection method with landstreamer in SW Finland. *Journal of Applied Geophysics* 2020: 177, 104014. DOI 10.1016/j.jappgeo.2020.104014
- Airaksinen, J. U. (1978) *Maa- ja pohjavesihydrologia*. 248 s. Kustannusosakeyhtiö Pohjoinen, Oulu.
- Arola, T. (2015) *Groundwater as an energy resource in Finland*. 34 s. Helsingin yliopisto, Helsinki.
- Artimo, A., J. Mäkinen, R. C. Berg, C. C. Abert & V-P. Salonen (2003) Three-dimensional geologic modeling and visualization of the Virttaankangas aquifer, southwestern Finland. *Hydrogeology Journal* 2003: 11, 378–386. DOI 10.1007/s10040-003-0256-6
- Artimo, A., O. Puurunen, S. Saraperä & I. Ylander (2007) *Geologinen informaatio tekopohjavesihankkeen toteuttamisessa – Pohjavesitutkimukset Virttaankankaalla*. 98 s. Turun Seudun Vesi Oy, Turku.
- Banks, D. (2012) *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. 526 s. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu & J.P. Palutikof (2008) *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 210 s. IPCC Secretariat, Geneva.
- Benz, S. A., P. Bayer, G. Winkler & P. Blum (2018) Recent trends of groundwater temperatures in Austria. *Hydrology and Earth System Sciences* 22: 6, 3143–3154. doi.org/10.5194/hess-22-3143-2018
- Britschgi, R., S. Piirainen, S. Joensuu, J. Juvonen, P. Ala-aho, T. Karvonen, M. Kauppila, J. Keränen, H. Marttila, M. Nieminen, T. M. Nieminen, J. Rintala, T. Ronkainen, A-K. Ronkanen, P. Rossi, T. Räsänen & S. Tuominen (2022). *Metsätalouden pohjavesivaikutukset – MEPO-hankkeen loppuraportti 2021*. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022: 4. 183 s.
- Darcys law (s.a.) *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/Darcys-Law> 30.3.2019
- Ferguson, G. & T. Gleeson (2012) Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature climate change* 2012: 2, 342–345. DOI: 10.1038/NCLIMATE1413

- Figura, S., D. Livingstone, E. Hoehn & R. Kipfer. (2011). Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation. 5 s. *Geophysical Research Letters* 38: 23, L23401.
- Green, T. R., M. Taniguchi, H. Kooi, J. J. Guardak, D. M. Allen, K. M. Hiscock, H. Treidel & A. Aureli (2011) Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology* 405: 3-4, 532–560.
DOI:10.1016/j.jhydrol.2011.05.002
- Gunawardhana, L. N. & S. Kazama (2011) Climate change impacts on groundwater temperature change in the Sendai plain, Japan. *Hydrological Processes* 25: 17, 2665–2678. doi:10.1002/hyp.8008
- Hakoniemi, R. & U. Tantu (2010) Imeytyskaivot tekopohjaveden muodostamisessa. *Vesitalous* 2010: 5, 32–34.
- Helmisaari, H-S., J. Derome, V. Kitunen, A-J. Lindroos, I. Lumme, S. Monni, P. Nöjd, L. Paavolainen, E. Pesonen, M. Salemaa & A. Smolander (1999) Veden imeytyksen vaikutukset metsämaahan ja kasvillisuuteen sekä vajo- ja pohjaveden laatuun. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 721*. METLA, Vantaa.
<http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1667-X>
- Helmisaari, H-S., K. Illmer, T. Hatva, A-J. Lindroos, I. Miettinen, J. Pääkkönen & R. Reijonen (2003) Tekopohjaveden muodostaminen: imeytystekniikka, maaperäprosessit ja veden laatu. TEMU-tutkimushankkeen loppuraportti. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 902*. METLA, Vantaa.
<http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1895-8>
- Hemmerle, H. & P. Bayer (2020) Climate Change Yields Groundwater Warming in Bavaria, Germany. *Frontiers in earth science* 8: 11, 575894. doi.org/10.3389/feart.2020.575894
- Herb, W. R., B. Janke, O. Mohseni & H. G. Stefan (2008) Ground surface temperature simulation for different land covers. *Journal of Hydrology* 356: 3, 327–343.
doi:10.1016/j.jhydrol.2008.04.020
- Hietula, S. (2018) Suomen matalapohjaveden lämpötila, siihen vaikuttavat tekijät ja valtakunnallisen lämpötilakartoituksen käytökelpoisuus geoenergiapotentiaalın arvioinnissa. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, geotieteiden ja maantieteen laitos. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-201904081601>
- Illmer, K., T. Hatva, A-J. Lindroos, J. Päällönen, R. Reijonen & H-S. Helmisaari (2003) Pohjavesivyöhyke Teoksessa Helmisaari, H-K. ym. (toim.): Tekopohjaveden

- muodostaminen: imeytystekniikka, maaperäprosessit ja veden laatu. TEMU-tutkimushankkeen loppuraportti, 169–171.
- Jyväsjärvi, J., H. Marttila, P. M. Rossi, P. Ala-Aho, B. Olofsson, J. Nissel, B. Backman, J. Ilmonen, R. Virtanen, L. Paasivirta, R. Britschagi, B. Kløve & T. Muotka (2015) Climate-induced warming imposes a threat to north European spring ecosystems. *Global Change Biology* 2015: 21, 4561–4569. DOI:10.1111/gcb.13067
- Kaivoja voi ehtyä (2018) Alueviesti 24.11.2018. <https://alueviesti.fi/2018/11/24/kaivoja-voi-ehtya/> 23.3.2024
- Kinnunen, T. (2005; toim.) Pohjavesitutkimusopas - käytännön ohjeita. Suomen Vesiyhdistys ry. 194 s. <http://www.vesiyhdistys.fi/pdf/Pohjavesiopas.pdf> 27.3.2019
- Kivimäki, A-L. (1992) Tekopohjavesilaitokset Suomessa. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja A 98. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki. <http://hdl.handle.net/10138/155122>
- Kløve, B., P. Ala-Aho, G. Bertrand, J. J. Gurdak, H. Kupfersberger, J. Kværner, T. Muotka, H. Mykrä, E. Preda, P. Rossi, C. B. Uvo, E. Velasco & M. Pulido-Velazquez (2014) Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology* 518: 10, 250–266. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.06.037
- Korkka-Niemi, K. & V.-P. Salonen (1996) Maanalaiset vedet - pohjavesigeologian perusteet. 181 s. Täydennyskoulutuskeskus, Turun yliopisto.
- Kuukausitilastot (2010) Ilmatieteen laitos, Helsinki. <https://ilmatieteenlaitos.fi/kuukausitilastot> 29.3.2019
- Lumi vähenee Suomessa (s.a.) Ilmatieteen laitos <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/lumi-vahenee/> 27.3.2024
- Mäkinen, J. & M. Räsänen (2002) Early Holocene regressive spit-platform and nearshore sedimentation on a glaciofluvial complex during the Yoldia Sea and the Ancylus Lake phases of the Baltic Basin, SW Finland. *Sedimentary Geology* 158: 25-56.
- Mäkinen, J. (2003) Time-transgressive deposits of repeated depositional sequences within interlobate glaciofluvial (esker) sediments in Köyliö, SW Finland. *Sedimentology* 50: 2, 327-360. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00557.x>
- Mäkinen, J. (2004) The sedimentology and depositional history of the Säskylänharju-Virttaankangas interlobate glaciofluvial complex in SW Finland. 27 p. *Annales Universitatis Turkuensis Ser AII* 173. Painosalama Oy, Turku, Finland.
- Mälkki, E. (2003a) Virttaankankaan ja sen lähialueiden pohjavesigeologiset olosuhteet, perusselvitys. Asiantuntijalausunto, osa I. Hyvinkää. 34 s.

- Mälkki, E. (2003b) Virttaankankaan tekopohjavesilaitoksen toimivuuden ja maaperän vesimuutosten sekä niiden ympäristövaikutusten arviointi. Asiantuntijalausunto, osa II. Hyvinkää. 40 s.
- Maries, G., E. Ahokangas, J. Mäkinen, A. Pasanen & A. Malehmir (2017) Interlobate esker architecture and related hydrogeological features derived from a combination of high-resolution reflection seismics and refraction tomography, Virttaankangas, southwest Finland. *Hydrogeology journal* 23, 829-845. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1513-9>
- Mastrocicco, M., G. Busico & N. Colombani (2018) Groundwater temperature trend as a proxy for climate variability. *EWa International Conference* 27. – 30.6.2018. Lefkada Island, Greece.
- Menberg, K., P. Blum, B. L. Kurylyk & P. Bayer (2014) Observed groundwater temperature response to recent climate change. *Hydrology and Earth System Science* 18, 4453–4466.
- Mustonen, S. (1986; toim.) Sovellettu hydrologia. 503 s. Suomen Vesiyhdistys r.y., Helsinki.
- Natukka, A. (1966) Harjujemme pohjavesien laadusta. *Vesitalous* 1966: 1.
- Pohjavesialueet (2022) *Vesi.fi*. <https://www.vesi.fi/vesitieto/pohjavesialueet/> 27.3.2024
- Prince, M. (1985) *Introducing groundwater*. 2. p. 278 s. Chapman & Hall, London.
- Säkylänharju-Virttaankangas hydrogeologinen kuvaus (2018) *Pohjavesitietojärjestelmä*. <https://www.p2.ymparisto.fi/scripts/povetarea/povetarea.asp> 3.4.2019
- Taylor, C. A. & H. G. Stefan (2009) Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization. *Journal of Hydrology* 375: 3, 601–612. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.009
- Veden pitkä matka kuluttajalle (s.a.) Turun Seudun Vesi Oy. <https://turunseudunvesi.fi/vedenmatka/> 27.3.2024
- Velvoitetarkkailuraportti 2017 (2018) Turun Seudun Vesi Oy. 38 s. https://turunseudunvesi.fi/sites/default/files/tekopohjavesijarjestelman_velvoitetarkkailuraportti_2017_ilman_karttoja_0.pdf 28.3.2019
- Velvoitetarkkailuraportti 2019 (2020) Turun Seudun Vesi Oy. 26 s. https://www.turunseudunvesi.fi/wp-content/uploads/2020/12/tekopohjavesijarjestelman_velvoitetarkkailuraportti_2019_ilman_karttoja_pienennetty.pdf 27.3.2024
- Vuoden 2014 säät (2015) Ilmatieteen laitos <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-2014> 23.3.2024