

Pauli Sormunen

**Hydrogeologinen WSN-ympäristömonitorointi:
Tapaustutkimus Kaitforsin patoalueen pohjavesien
korkeusseurannan pilottijärjestelmästä**

Tietotekniikan
pro gradu -tutkielma
22. elokuuta 2017

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Kokkolan yliopistokeskus Chydenius

Tekijä: Pauli Sormunen

Yhteystiedot: pauli.sormunen@outlook.com

Puhelinnumero: 050 3597 165

Ohjaaja: Ismo Hakala

Työn nimi: Hydrogeologinen WSN-ympäristömonitorointi: Tapaustutkimus Kaitforsin patoalueen pohjavesien korkeusseurannan pilottijärjestelmästä

Title in English: Hydrogeological WSN environmental monitoring: A case study on groundwater level monitoring pilot system at Kaitfors reservoir

Työ: Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

Sivumäärä: 72+8

Tiivistelmä: Tämän pro gradu -tutkielman tavoitteena on selvittää Kaitforsin patoalueelle toteutetun pohjavesien monitorointiin Kokkolan yliopistokeskus Chydeniuksessa kehitetyn pilottijärjestelmän näkökulmasta, millaisin menetelmin vedenkorkeuksien ja veden laadun monitorointia voidaan IoT:n ja langattomien sensoriverkkojen asettamista lähtökohdista automatisoidusti suorittaa. Tämän lisäksi tutkimuksen tavoitteena on selvittää automatisoidun ympäristömonitoroinnin nykytilaa ja siihen kytkeytyviä kehityssuuntauksia. Tutkimuksessa perehdytään myös Kaitforsin patoalueelle asennetun pilottijärjestelmän IEEE 802.15.4 -standardiin perustuvaan langattoman sensoriverkon toimintaan ja siihen kytkeytyneiden sensorinoodien virrankulutukseen.

Tutkimus toteutettiin tapaustutkimuksena, jossa hyödynnettiin sekä laadullisia että määrällisiä tutkimusmenetelmiä. Tutkimustulosten mukaan automatisoidun ympäristömonitoroinnin hyödyntämisen kokonaisuus on olemassa oleviin monitorointitarpeisiin suhteutettuna hyvin vähäinen. Tutkimus osoittaa myös, että nykyistä laajempaan automatisoituun ympäristömonitorointiin on havaittavissa selkeitä siirtymäsuunnitelmia. Tämän myötä automatisoitu monitorointi tulee korvaamaan vielä nykyisin seurantatyössä hyvin laajamittaisesti tarvittavan manuaalisen työn osuutta. Tutkimus osoittaa myös, että WSN-ympäristömonitoroinnissa käytettävät sensortechnologiat tulee energiatehokkuuden ohella arvioida myös luotettavuuden ja pitkäikäisyyden näkökulmasta. Lisäksi tutkimus osoittaa pilottijärjestelmän kaltaisten WSN-sovellusten verkko- ja järjestelmäratkaisujen soveltuvan hyvin pitkäaikaiseen autonomiseen pohjavesiseurantaan.

Avainsanat: langattomat sensoriverkot, langaton tekniikka, hydrogeologia, pohjavesi, vedenkorkeus, ympäristömonitorointi

Abstract: The purpose of this master's thesis was to examine – from the perspective

of the groundwater level monitoring pilot system that has been developed in Kokkola University Consortium Chydenius and installed at Kaitfors reservoir – what kind of methods can be used in automated water level and water quality monitoring with existing IoT- and WSN-technologies. Another aim of this study is to clarify the present adaptation state of automated environmental monitoring in general and its development trends. In addition, this thesis also examines the operation of the pilot system installed in the Kaitfors reservoir utilizing wireless sensor network based on IEEE 802.15.4 -standard and electric power usage of the connected sensor nodes.

Research has been conducted as a case study and both qualitative and quantitative research methods have been used. Research shows, that the adaptation level of automated environmental monitoring is low, when put in the context of actual needs for monitoring information as a whole. Furthermore, the research clarifies, that current policies will lead to higher adaptation levels of automated environmental systems in the near future. This in turn will lead to lower needs for manual labor still needed in monitoring efforts today. Research also indicates, that it is paramount to assess sensor technologies applicable to WSN environmental monitoring from the point of reliability and longevity in addition to energy efficiency. Research shows that WSN-solutions such as the developed pilot system are well suited for long-term autonomous groundwater level monitoring.

Keywords: wireless sensor networks, wireless technology, hydrogeology, groundwater, water level, environmental monitoring

Copyright © 2017 Pauli Sormunen

All rights reserved.

Sanasto

ADC	Analog-to-Digital Converter
AES	Advanced Encryption Standard
BLE	Bluetooth Low Energy
BOD	Biochemical Oxygen Demand
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CSV	Comma-Separated Values
DOC	Dissolved Organic Carbon
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FFD	Full-Function Device
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPv6	Internet Protocol version 6
ISM	Industrial, Scientific and Medical
Li-SOCl ₂	Lithium-Thionyl Chloride
LQI	Link Quality Indicator
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Personal Area Network
MAC	Media Access Control
M2M	Machine to Machine
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
O-QPSK	Offset Quadrature Phase-Shift Keying
OPC UA	OPC Unified Architecture
P2P	Peer-to-Peer
PAN	Personal Area Network

pH	Potential of Hydrogen
RAM	Random-Access Memory
Redox	Reduction-Oxidation Reaction
RFD	Reduced-Function Device
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTC	Real-Time Clock
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolet
WSN	Wireless Sensor Network

Sisältö

Sanasto	i
1 Johdanto	1
1.1 Pilottihankkeen taustat	2
1.2 Pilottijärjestelmän yleiskuvaus	3
1.3 Pilottijärjestelmän hyödyt	3
2 Vesistöjen seurannan nykytila	5
2.1 Automaatioaste	5
2.2 Alueellinen kattavuus	5
2.3 Kokonaisseuranta	6
2.4 Vedenlaatu	7
2.5 Vedenkorkeuden mittaaminen	9
2.5.1 Lasertekniikka	9
2.5.2 Ultraäänisensorit	10
2.5.3 Paineanturit	11
2.5.4 Sensoritekniikan valinta	13
2.6 Seurantatavoitteet	13
2.6.1 Seurantatavoitteiden analyysi	13
2.6.2 Automatisoinnin rajat	14
2.6.3 Staattinen vs. liikkuva	16
3 WSN-ympäristösovellukset	18
3.1 WSN-ympäristösovellusten haasteet	18
3.2 Virranhallinta	20
3.3 Standardointi	21
3.4 Käytettävyys	24
3.5 Hinta	26
3.6 Skaalautuvuus	27
3.7 IEEE 802.15.4	28

4	Pilottijärjestelmä	32
4.1	Laitteisto	33
4.1.1	Yhdyskäytävä	33
4.1.2	Sensoriverkko	35
4.1.3	Sensorinoodit	36
4.2	Asennusympäristö	39
4.3	Asennuskuvaus	41
4.4	Kalibrointimittaukset	43
4.5	Virrankulutusmittaukset	47
4.6	Noodin elinikä – pariston kapasiteetti	49
4.7	Sensoriverkon toiminta	52
4.8	Noodien paristojen jännitevaihtelut	57
4.9	RSSI-arvojen analyysi	59
4.10	Yhteenveto	63
5	Johtopäätökset	64
	Lähteet	67
	Liitteet	
A	Paineanturi 1 – mittaustulokset	
B	Paineanturi 2 – mittaustulokset	
C	Paineanturi 3 – mittaustulokset	
D	Kalibrointikuvaajat 2 ja 3	
E	Yhdistetty RSSI-kuvaaja	
F	Sensorinoodin jännitevaihtelut	
G	Pitkän aikavälin lämpötilahavainnot	
H	Sensorinoodien rinneasennus	

1 Johdanto

Kaitforsin vesivoimalaitoksen patoalueelle toteutettiin kevään 2017 aikana pohjavesien korkeusmittausten automatisointiin tähtäävä WSN-pilottihanke. Tämän tutkielman tekijä osallistui projektin toteutukseen ja läpivientiin yhteistyössä Kokkolan yliopistokeskus Chydeniuksen kanssa. Pilottihankkeen lopputulemana patoalueelle asennettiin pohjavesien seurantajärjestelmä, joka koostui kolmesta sensorinoodista ja mobiiliverkkoyhteyksin varustetusta yhdyskäytävästä.

Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää millaisin menetelmin vesistöjen ja pohjavesien automatisoituja korkeusmittauksia voidaan toteuttaa. Tämän lisäksi vesien seurantatoimen automatisointimahdollisuuksia tutkitaan myös veden laatu-
mittausten näkökulmasta.

Tutkielman alkuosassa selvitetään Kaitforsin vesivoimalaitoksen patoalueen pohjavesien korkeusmittausten automatisointiin tähtäävän pilottihankkeen asettamista lähtökohdista, millä tavoin Suomessa suoritetaan vedenpinnan korkeuksien sekä veden laadun seuranta, ja millaisin menetelmin tämänkaltaisia seurantatoimia voidaan automatisoidusti toteuttaa. Tähän kytkeytyviä tutkimuskohteita ovat muun muassa viranomaistaholta tehtävän ympäristömonitoroinnin yleinen automaatioaste sekä siinä käytetyt teknologiat ja menetelmät. Tämän selvitystyön taustoittamana pyritään myös selvittämään, millaisia odotuksia ja mahdollisia kehityssuuntauksia ympäristömonitorointiin saattaa IoT:n ja langattomien sensoriverkkojen osalta tulevaisuudessa kohdistua.

Tutkielmassa tutustutaan lisäksi WSN-ympäristösovellusten yleiseen määrittelyyn. Sen kautta pyritään luokittelemaan ja arvioimaan pilottihankkeessa kehitettyä mittaajärjestelmää. Täten tutkielmassa esitetäänkin kaksi toisistaan selkeästi eroavaa tutkimuskysymystä. Ensimmäkin tutkielmassa pyritään selvittämään WSN-ympäristösovellusten tulevia tarve- ja kehityssuuntauksia. Toisekseen tutkielmassa verrataan yliopistokeskus Chydeniuksen vedenpinnan korkeusmittauksiin kehittämää pilottijärjestelmää WSN-ympäristösovelluksista alan tutkimustyössä esitettyihin paradigmoihin.

1.1 Pilottihankkeen taustat

Kaitforsin vesivoimalaitoksen patoalueelle 1.1 ELY-keskuksen tilauksesta valmisteltavassa ja yliopistokeskus Chydeniuksen toteuttamassa pilottihankkeessa asennetaan vesistöallasta rajaavan patovallin ulkorinteeseen korkeustasoltaan laskevassa ja vesistöaltaasta ulospäin suuntautuvassa järjestyksessä kolme langattomasti viestivää mittausrakennetta. Mittausrakennet on varustettu paineanturein, ja niillä pyritään mittaamaan jatkuvatoimisesti pohjaveden vaihtelevia pinnankorkeuksia. Patovalli itsessään sisältää jo ennestään useita mittaustarkoituksiin rakennettuja mittausrakennuksia, joista pohjavedenpintaa on ennen hankkeen aloitusta käynyt mittaamassa erillinen kenttähenkilöstö tarkkailualueeseen kohdistuvien seurantavelvoitteiden mukaisin seurantajaksoin.



Kuva 1.1: Kaitforsin patoallas. (Koostettu Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan 3/2017 aineistosta: Creative Commons 4.0 [9].)

Käynnistetyn pilottihankkeen tarkoituksena on siis rajatussa mittakaavassa automatisoida tarkoitukseen ositetulla patoseinämällä tehtävät pohjavedenpinnankorkeuteen liittyvät mittausprosessit sekä laatia niistä saadun mittausdatan siirtoon,

tallennukseen ja esittämiseen sellaiset kokonaisratkaisut, jotka parhaalla mahdollisella tavalla vastaisivat hankkeen tilaajan alueen pohjavesiin kohdistuviin seurantarpeisiin.

1.2 Pilottijärjestelmän yleiskuvaus

Kehitettävässä järjestelmässä mittauksia suorittavat noodit lähettävät mittaushavaintonsa 802.15.4-verkon ylitse lähistöllä sijaitsevaan yhdyskäytävälaitteeseen. Yhdyskäytävä puolestaan lähettää saamansa viestit GPRS-mobiiliyhteyden ylitse yliopiston verkossa sijaitsevalle palvelimelle. Tämän lisäksi yhdyskäytävä tarjoaa suoraan paikan päällä tehtävään tietojenluentaan langattomat M2M-kommunikointiyhteydet minkä tahansa soveltuvan OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) -yhteensopivan laitteen kanssa.

OPC UA:n ansiosta mittaushavainnot voidaan lukea suoraan mittauspaikalla sijaitsevalta yhdyskäytävältä tähän toimintaan auktorisoidun henkilön toimesta. Tällöin tietojen luentaan ei vaadita erillistä Internet-yhteyttä. Tähän liittyvän toiminnallisuuden johdosta järjestelmään kuuluva yhdyskäytävä ei ole pelkästään erilaisten verkkojen väliseen tiedonvälitykseen rajautuva elementti, vaan myös tietoa säilövä ja sitä tarvittaessa tarjoava palvelinlaite. Järjestelmän tekniset yksityiskohdat esitetään tarkemmin luvussa 4

1.3 Pilottijärjestelmän hyödyt

Pilottihankkeen kaltainen automatisoitu mittausmenetelmä ei vaadi erillistä mittaushenkilöstöä. Lisäksi automatisoidut mittaukset voidaan suorittaa halutuun aikaväliin ympärivuotisesti, minkä ansiosta laitteiden kohdealueelta voidaan kerätä hyvin kattava ja edustava pitkän aikavälin mittausaineisto. Tämänkaltaiset IoT- ja WSN-sovellukset tarjoavatkin oikein toteutettuina hyvät mahdollisuudet erilaisten pohjavesiympäristöjen pitkäaikaisseurantaan. Niissä tapauksissa, joissa veden korkeustasojen mittauksia ei ole toistaiseksi automatisoitu, mittauksia suorittaa aina erillinen kenttähenkilöstö liikuteltavilla vedenpinnan korkeusmittareilla.

Mikäli pilottihankkeesta saatavat kokemukset ovat positiivisia, niin eräitä mielekkäitä sovelluksen käyttö- ja edelleenkehityskohteita voisivat jatkossa olla muun muassa talous-, teollisuus- tai kasteluvesien kannalta keskeiset akviferialueet, erilaiset turve-, kaivos- ja louhosalueet sekä muut yleisen ympäristönseurannan kan-

nalta kiinnostavat mittausympäristöt. Tarkkailun kohteena voisivat tällöin olla niin maanpäälliset kuin maanalaiset vesiolosuhteet, sekä eri tavoin rakennetun ympäristön kautta muokatut, uudelleenohjatut tai padotut vesistöt. Myös esimerkiksi kiviasteollisuuden liete- ja saostusaltaat sekä niihin kytkeytyvien ympäristövaikutteiden seurantahankkeet voisivat soveltua hyvin tämän pilottihankkeen kaltaisten sovellusten asennuskohteiksi.

2 Vesistöjen seurannan nykytila

Tämän luvun alkuosassa tutustutaan vesistöjen seurannan automaatioasteen nykytilaan. Tästä viitekehyksestä tutustutaan myös automatisoitujen mittausjärjestelmien alueelliseen kattavuuteen ja keskeisimpiin seurantakohteisiin niin vesien laadun kuin korkeusmittaustenkin osalta. Tämän jälkeen tässä luvussa tutustutaan automatisoituihin mittauksiin soveltuviin sensoritekniikoihin sekä niihin perusteisiin, joihin sensorivalintoja tehtäessä tulisi perehtyä. Luvun loppuosa kattaa automatisoitujen mittausjärjestelmien analyysin siitä näkökulmasta, missä määrin ympäristömonitoroinnin asettamiin mittaushaasteisiin kyetään olemassa olevin teknologisin edellytyksin tehokkaasti vastaamaan sekä millaisia kehityssuuntauksia tämänkaltaisissa automatisointihankkeissa on nähtävissä ja mihin ne perustuvat.

2.1 Automaatioaste

Tarvaisen et al. [43, s.3] mukaan sekä pohja- että pintavesien korkeusmittaukset ja niihin liittyvät yleiset pitkän aikavälin seurannat ovat Suomessa jo melko kattavasti automatisoituja. Tästä huolimatta useissa kohteissa hyödynnetään edelleen mekaanisia limnigrafeja sekä myös erillisen kenttähenkilöstön tekemiä suoria havaintoja [40, s.9]. Seurantatoiminnan automatisointi tulee vedenpinnan tasoseurantojen ohella laajenemaan jatkossa yhä enenevästi myös vedenlaadun seurantaan, josta Suomessa onkin jo tehty melko paljon kattavaa soveltuvuus- ja selvitystyötä. [43, s.3,12].

2.2 Alueellinen kattavuus

Viranomaisseurannassa hyödynnettävien automatisoitujen mittausasemien määrä ei kuitenkaan ole kaiken kaikkiaan kovin suuri. Se kattaa vesistöjen osalta kokonaisuudessaan Suomen ympäristökeskuksen vuonna 2013 julkaisemien tietojen mukaan vain noin 175 mittalaitetta, kun vedenkorkeutta havaitsevia mittausasemia on kokonaisuudessaan noin 310 [41, s.1–2]. Tämän johdosta niillä saavutettavan maantieteellisen mittausresoluution voidaan katsoa jäävän sangen alhaiseksi. Mittausa-

semien sijoituskohteet on toki valittu niiden yleisen edustavuuden mukaan, mutta siitä huolimatta niiden kokonaismäärä on Suomen pinta- ja vesistöalaan suhteutettuna melko vähäinen.

Pintavesiasemia on kuitenkin huomattavasti enemmän kuin pohjavesiasemia. Orvomaan et al. [32, s.1] mukaan pohjavesiasemia onkin Suomessa kaikkiaan vain 80 kappaletta. Toisaalta myös pohjavesiasemia on pyritty automatisoimaan pinnan- korkeuksien mittaustoiminnan suhteen, mutta manuaalisesti tehtävä työn osuus on niissä silti vielä merkittävässä asemassa [43, s.9] [40, 60].

Edulliset, liki ylläpitovapaat, pitkäikäiset ja tarvittaessa myös uudelleensijoitettavat sensorinoodit soveltuvat näiltä osin käytettäväksi myös niissä tilanteissa, joissa yksittäisten ja toisistaan etäällä sijaitsevien mittausasemien tuottama alueellinen kattavuus muutoin jäisi varsin rajalliseksi [31, s.143]. Lisäksi erityis- ja kriisitilanteissa – sekä niihin etukäteen valmistautuessa – nopeasti asennettavat, itsenäisesti verkottuvat ja operoivat mittalaitteet puoltavat useissa eri olosuhteissa niiden laajempaa käyttöönottoa. Näille järjestelmille soveltuvia käyttötapauksia voivat edustaa esimerkiksi kevättulviin varautuminen ja näihin liittyvä tehostettu vesistöjen tarkkailu tai erilaisten teollisuus-, kaivos- tai liikennöintionnettomuuksista aiheutuvat sekä vesistöjä että pohjavesiä uhkaavat vierasainevaaratilanteet.

2.3 Kokonaisseuranta

Sekä pinta- että pohjavesien seurantaan kuuluu pinnankorkeuksien ohella myös muita mittauskohteita. Pintavesien osalta seurannassa kerätään tietoa myös veden lämpötilasta, siihen liittyvästä jäätilanteesta ja virtaamasta. Pohjavesiin kohdistuu myös muun muassa maankosteuden, routaisuuden ja laadun seurantavelvoitteet. [43, s.9]. Horppilan [16, s.5] mukaan esimerkiksi järvien vedenlaadun perusseurantaan kuuluvat muun muassa pH:n, ravinnekuorman, happimäärän, sameuden, näkösyvyyden, sähkönjohtavuuden ja alkaliniteetin selvittäminen. Tietyissä kohteissa voidaan toteuttaa myös niin sanottua intensiiviseurantaa, joissa yhdistyvät sekä tavanomaista tiheämmät seurantavälit että laajemmat mittauskohteet, jotka voivat muodostua niin yksittäisistä alkuaineista kuin erilaisista yhdisteistäkin [16, s.3–5].

2.4 Vedenlaatu

Niiltä osin kuin pinta- ja pohjavesien seurannassa automatisointi on keskittynyt pääasiassa pinnan korkeuksien mittauksiin, on veden laadun tarkkailu puolestaan jäänyt tästä automatisointikehityksestä jälkeen [43, s.2]. Manuaalisesti tehtävät vedenlaatumittaukset jäävätkin vaaditun manuaalisen työn vuoksi vasteajoiltaan ja seurantatiheydeltään informaatioanniltaan korkeuksien seurannan varjoon [40]. Tämä on ympäristöön kohdistuvien todellisten monitorointitarpeiden osalta varsin huolestuttavaa. Varsinkin, kun huomioidaan, millaisilla reagointinopeuksilla hälyttävästi muuttuviin vedenlaatutilanteisiin tulisi kulloinkin reagoida, jotta erityyppiset uhkatekijät saataisiin mahdollisimman tehokkaasti ehkäistyä jo heti niiden alkulähteillä, tai vaihtoehtoisesti muutoin rajoittaa ne vaikutuksiltaan mahdollisimman tehokkaasti.

Huttulan et al. [17, s.10–11] mukaan veden laatuun liittyvistä tekijöistä on automaattiasemilla kerätty tutkimuskokemusta eritoten veden pH:n, happipitoisuuksien, sameuden ja sähkönjohtavuuden osalta. Soveltuvia anturiteknologioita muidenkin suureiden mittaamiseen on kuitenkin olemassa, kuten taulukko 2.1 osoittaa.

Näin ollen moderni sensoriverkkoteknologia mahdollistaa edullisten, akkukäyttöisten ja keskenään kommunikoivien mittausnoodien hyödyntämisen ainakin osittaisessa vedenlaadun seurannassa. Sen avulla voitaisiin kustannustehokkaasti kattaa suuriakin mittausalueita siten, että niiltä saatava mittausdata voidaan käsitellä, luokitella ja lukea tarvittaessa jopa liki reaaliaikaisesti. Huttula et al. [17, s.16] kuitenkin esittää, että antureiden hinnoissa ja niiden elinkaarikustannuksissa voi esiintyä huomattavan paljon vaihtelua, joka liittyy muun muassa niiden laatuun, ylläpitotarpeeseen ja lisäominaisuuksiin, kuten joidenkin sameusantureiden automatisoituihin paineilmapuhdistuksiin. On kuitenkin ilmeistä, että erityisiä mahdollisuuksia automatisoitujen mittausasemien tulevien käyttöönottoasetelmien osalta näyttäytyykin juuri erityyppisissä monimittausnoodeissa, jotka kykenisivät keräämään pinnankorkeuksien lisäksi tietoja muun muassa pohjaveden sähkönjohtavuudesta ja sen partikkelipitoisuuksista.

On syytä selvittää missä määrin ja kuinka monimuotoisesti seuranta voidaan tehdä myös yksinomaan tiettyihin anturiteknologioihin tukeutumalla. Kuten taulukko 2.1 osoittaa, niin esimerkiksi optiset mittausmenetelmät soveltuvat useiden eri suureiden mittaamiseen. Tämä tiettyihin anturiteknologioihin sitoutuminen saattaisi olla sangen merkittävässä asemassa siinä, kuinka rajatuilla anturivalinnoilla pyrittäisiin hillitsemään automatisoituihin mittausasemiin liittyviä kokonaiskustan-

Taulukko 2.1: Automaattimittauksiin soveltuvat anturit Huttulan et al. [17, s.10–11] mukaan.

Mitattava suure	Anturimenetelmä
A-klorofylli	-Fluorometri -Optinen spektri
BOD	-Respirometri
Bakteerimäärä	-Fluoresenssi
Sinilevät	-Leväpigmenttien fluoresenssi
Bioanturit	-Elävän organismin reaktiot
Happipitoisuus	-Sähkökemialliset ja puoliläpäisevät kalvot -Optiset anturit
pH, Redox-potentiaali & Lämpötila	-Potentiometrinen
Vedenkorkeus	-Paineanturi -Matalataajuustutka -Ultraäänianturi
Sameus	-Optiset anturit
Kiintoainepitoisuus	-Optiset anturit -Tiheysanturit -Säteilyanturit
Sulfaatti & Ammonium	-Ioniselektiivinen anturi -Analysaattori/fotometri
Nitraatti	-Ioniselektiivinen anturi -Analysaattori/fotometri -Optinen UV-VIS -alueen mittaus
Totaalifosfori, DOC, Fenolit, Ksyleeni & Tolueeni	-Optinen UV-VIS -alueen mittaus
Kloraatti, Fosfaatti & Rauta	-Analysaattori/fotometri
Sähkönjohto	-Sähköinen
Hiilivedyt	-Fluorometri
Nitriitti	-Optinen UV-alueen mittaus

nuksia. Tätä ei kuitenkaan voida tehdä mittausasemiin liittyvien seurantapotentialien kustannuksella.

2.5 Vedenkorkeuden mittaaminen

Huttula et al. [17, s.10] nimeää vedenkorkeusmittauksiin soveltuviksi tekniikoiksi painantureiden ohella myös ultraääni- ja tutkamenetelmät. Näiden lisäksi käyttökelpoisia vedenkorkeuksien mittausmenetelmiä ovat muun muassa kapasitiiviset, kelluke- ja lasertekniikat [12, s.48–49] [27, s.897–898]. Pohjavedenkorkeuksien mittaamiseen ultraääni- ja tutkamenetelmät soveltuvat lähinnä vain erityistapauksissa, sillä esimerkiksi korkeusmittauksiin tarkoitettujen muovisten pohjavesiputkien sisähalkaisija on tyypillisesti joko 32 tai 52 millimetriä [37, s.16]. Sen sijaan laatunäytteenotossa käytettävien pohjavesien sisähalkaisija on vähintään 52 millimetriä [37, s.16].

Ultraääni- ja tutkatekniikat vaativat riittävän esteetöntä mittausympäristöä, jotta ääni- ja radioaallot eivät heijastuisi lähiympäristöstään ei-toivotusti ja täten myös havaintoja vääristäen. Lasertekniikassa vastaavanlaisia ongelmia ei esiinny, sillä niiden säteessä ei esiinny merkittävää hajontaa. [27, s.897–898]

2.5.1 Lasertekniikka

Lasertekniikassa etäisyyden määrittämisessä hyödynnetään pääasiassa kahta eri menetelmää. Ensimmäinen mittausmenetelmä perustuu lasersäteen lähetyksen ja sen paluuheijastuksen kokonaismatka-ajan keston. Koska valonnopeus on vakio, niin lasersäteen matka-ajan kestosta voidaan suoraan laskea etäisyys mitattavaan kohteeseen. Toinen mittausmenetelmä perustuu kolmiomittaukseen, jossa etenevä lasersäde vinoutetaan ja ohjataan erilliseen vastaanottimeen. [30, s.1]

Kirkkaiden pohja- tai avovesien korkeuksien mittaamiseen lasertekniikalla voidaan kuitenkin katsoa liittyvän joitain kyseiselle tekniikalle ominaisia rajoitteita. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että tämänkaltaisen vesiympäristön heijastavuusominaisuudet eivät ole sellaisenaan lasertekniikalle erityisen otollisia [27, s.899]. Tämä ongelma voidaan kuitenkin kiertää sijoittamalla mitattavan veden pinnan korkeuksien vaihtelun mukaan vapaasti liikkuvia ja soveltuvien heijastinpinnoin varusteltuja poijuja [23, s.1], jotka ovat eri putkikokoihin mitoitettuja. Tällöin lasertekniikka soveltunee varsin hyvin pohjavesiputkien yhteydessä käytettäväksi, mutta se edellyt-

tää tällöin myös sitä, että pohjavesiputket ovat täysin suoria, jotta lasersäde voidaan kohdistaa pohjaveteen esteettömästi [27, s.899]. On oletettavaa, että kapeimmissa pohjavesiputkissa näin ei välttämättä aina ole, sillä esimerkiksi rinteissä pohjavesiputkiin voi riittävän pitkän ajan kuluessa kohdistua hitaiden maa-aineisvaluntojen johdosta pohjavesiputkea taivuttavia voimia.

Lasertekniikan eduiksi voidaan korkean mittaustarkkuuden ohella lukea muun muassa se, että se on niin sanottu kontaktiton mittausten menetelmä [30, s.1], eli se ei vaadi suoraa kontaktia mittauksen kohteena olevaan väliaineeseen, eli tässä tapauksessa veteen. Tällöin voidaan välttyä vesiasennuksesta antureille mahdollisesti aiheutuvilta ongelmilta. Lasertekniikalla toteutettu vedenkorkeuksien seuranta ei myöskään edellyttäisi erillisten ulkoisten fysikaalisten muuttujien, kuten ilman kosteuden, ilmanpaineen tai lämpötilan selvittämistä [27, s.899], jolloin luotettavien mittaustulosten saavuttamiseksi ei täytyisi turvautua useisiin eri sensoritekniikoihin. Lasertekniikalla toteutetuissa mittaustulosten järjestelmissä ei myöskään täytyisi selvittää pohjaveden pinnankorkeutta erillisillä vedenkorkeusmittareilla ennen järjestelmän asennusta, kuten esimerkiksi paineantureiden tapauksessa, joissa asennuksen aikainen paineanturilukema täytyy suhteuttaa erikseen mitattuun pohjavedenkorkeuteen. Lasertekniikalla toteutettu sensorinoodi voitaisiin todennäköisesti mitoittaa ongelmattomasti myös suoraan pohjavesiputkien kansiosaksi, jolloin se sijaitisi suoraan pohjaveden pinnankorkeuden määrittämissä, joka nopeuttaisi huomattavasti järjestelmien asennusta ja käyttöönottoa, koska asennuksessa ei tarvita muuta tekniikkaa eikä erillisten kaapelointien mitoituksia. Tämä edesauttaisi myös tällä tavoin toteutettujen järjestelmien mahdollisia uudelleensijoittamistoimenpiteitä.

2.5.2 Ultraäänisensorit

Ultraäänisensoreita käytetään varsin laajalti erilaisissa sovelluskohteissa etäisyyksien selvittämiseen, vaikkakin ultraäänipohjaisia järjestelmiä voidaan hyödyntää myös tätä monipuolisemminkin rooleissa, kuten erilaisissa kuvannustehtävissä [14, s.399] [45, s.45]. Tsagouriasin et al. [45, s.45] mukaan niiden hyvinä puolina nähdään muun muassa kyseiseen sensoritekniikkaan kytkeytyvät matalat hankinta- ja käyttöönottokynnykset sekä varsin monipuolisiin mittaustehtäviin soveltuva mittausala – vaikkakin ultraäänisensoreiden hyödyntämisessä täytyykin erikseen huomioida eräitä fysikaalisia lainalaisuuksia luotettavien mittaustulosten saamiseksi. Tietyin varauksin ne soveltuvat hyvin myös WSN-ympäristösovelluksiin ja niitä onkin näiltä

osin käytetty esimerkiksi tulvavaroitusjärjestelmissä, joissa mittausten luotettavuus on erittäin tärkeässä asemassa.

Gueuning et al. [14, s.399] mukaan ultraäänisensoripohjainen etäisyysmittaus perustuu joko lähetetyn ja mitattavasta kohteesta heijastuneen signaalin kokonaismatka-ajan laskentaan tai vaihtoehtoisesti yhtäjaksoisesti lähetettävien ääniaaltojen ja niiden vastaanoton jälkeen tehtävän vaihesiirtymän laskentaan. Vaihesiirtymän laskentaan perustuva menetelmä on näistä tarkin, mutta tapauksissa joissa nämä kaksi eri menetelmää on yhdistetty on saavutettu jopa alle 1 mm mittaustarkkuuksia [14, s.399].

Edellä esitetyn toimintakuvausten ohella ultraäänisensoreihin liittyy kuitenkin eräitä fysikaalisen maailman ja sen lainalaisuuksien sanelemia ongelmia, joihin liittyvien tekijöiden kompensointi edellyttäisi myös muuta nooditasolla samanaikaisesti hyödynnettävää sensoritekniikkaa. Tämä aiheutuu yksinomaan siitä, että äänennopeus ei ole vakio, vaan sen nopeus riippuu sen väliaineen ominaisuuksista, joissa ääni etenee. Tämä tarkoittaa sitä, että sellaisilla tekijöillä, kuten ilman kosteudella, lämpötilalla ja ilmanpaineella on merkitystä siinä, kuinka ultraäänisensoreilla kerättävää dataa tulisi kompensoida, jotta tuloksia voitaisiin pitää ehdottoman luotettavina. Tämänkaltaiset tekijät eivät toki ole välttämättä erityisen ongelmallisia kaikissa sovelluskohteissa – kunhan nämä tekijät on muutoin laitteiden käyttöönotossa huomioitu – mutta niiden voidaan katsoa olevan sangen merkityksellisiä silloin, kun tämän tekniikan avulla pyritään mahdollisimman tarkkoihin mittaustuloksiin. Esimerkiksi yksinomaan lämpötilanvaihtelun vaikutus ääniaaltojen nopeuteen on noin $0.17\%/C^{\circ}$ [45, s.46].

2.5.3 Paineanturit

Paineantureilla on varsin vakiintunut asema veden korkeustasojen monitorointijärjestelmissä, ja tässä toimessa hyödynnetään tyypillisesti kahta eri anturityyppiä, joiden mittausmenetelmät eroavat hieman toisistaan. Niissä sensoriin kohdistuvaa vedenpainetta verrataan joko tyhjiöön tai paikalliseen ilmanpaineeseen. Suhteellisen ilmanpaineen mittausmenetelmässä paineanturi havaitsee vedenpaineen ohella erikseen myös veden yläpuolella vallitsevan ilmanpaineen. Absoluuttisessa – eli tyhjiöön suhteutetussa mittausmenetelmässä – vesipatsaan yläpuolella vallitseva ilmanpaine täytyy selvittää erillisellä ilmanpaineanturilla tarkan mittaustuloksen saavuttamiseksi, sillä veden yläpuolella vallitseva ja ajallisesti vaihteleva ilmanpaine vaikuttaa luonnollisesti myös sen alapuolella sijaitsevaan vapaaseen veteen. [39,

s.56]

Paineantureiden toiminnallinen kuvaus on esitettävissä sangen yksinkertaisesti. Paineanturit muuntavat ympäröivän vedenpaineen arvoltaan tunnetuksi signaaliksi, jonka suuruus puolestaan ilmaisee tietyn tunnistettavissa olevan painearvon. Vesipatsaan paineen ja ilmanpaineen ohella mittaustapahtuman tarkkuuteen liittyvät myös mitattavan veden ominaisuudet, jotka vaikuttavat suoraan veden tiheyteen. Hyvissä paineantureissa veden lämpötila luonnollisesti huomioidaan signaalinmuodostuksen yhteydessä. Tämän lisäksi mittauksissa voidaan huomioida esimerkiksi veden suolapitoisuus, mutta pohjavesien korkeusseurannassa tämä ei tyypillisesti ole tarpeen hyvän mittaustuloksen saavuttamiseksi. [39, s.56]

Paineantureiden laajamittainen käyttö veden pinnankorkeuksien monitorointi-sovelluksissa antaisi olettaa, että tämä anturityyppi soveltuisi hyvin kyseiseen toimintaan. Paineantureihin liittyy kuitenkin tiettyjä tekijöitä, joiden merkitys automatisoiduissa ja paineanturein toteutetuissa mittausjärjestelmissä on syytä tunnistaa.

Sorensenin et al. [39, s.56] vuonna 2011 julkaistujen ja yli kolmen kuukautta kestävien kenttätutkimusten perusteella kapean mittausalun paineantureiden tarkkuuden osoitettiin olevan tyypillisesti ± 10 mm. Tähän tutkimukseen oli valittu markkinajohtoisin perustein paineantureita kaikkiaan 14 eri valmistajalta. Erikseen saman tutkimuksen piirissä tehdyt laboratoriotutkimukset puolestaan osoittivat, että kaikkiaan viidessä absoluuttista mittaumenetelmää käyttävässä paineanturissa operointilämpötilan kompensointi oli toteutukseltaan heikkoa. Tämän lisäksi antureiden mittaustuloksissa havaittiin ilmenevän sekä lineaarista että epälineaarista siirtymää. [39, s.56]

Tehtyjen havaintojen perusteella paineantureiden tarkkuuden katsottiin riippuvan erityisesti sekä paineantureiden ilmoitetusta mittaussvälistä että antureiden käytämästä mittaumenetelmästä. Parhaimpia tarkkuustuloksia tavoitettiin paineantureilla, jotka olivat gauge-tyyppisiä, eli veden ohella myös suoraan vapaaseen ilmanpaineeseen yhdistettyjä, ja joiden ilmoitettu mittaussväli oli alaltaan rajatuin. [39, s.58]

Sorensen et al. [39, s.56] katsoivat tutkimuksen ensisijaisesti osoittavan, etteivät eri valmistajien paineanturit ole keskenään vertailukelpoisia, eivätkä ne myöskään kaikissa tapauksissa tarjoa yhtenäisiä mittaustuloksia, jonka johdosta paineantureiden määrittäminen ja kalibrointi tulisi kattavasti sitouttaa jonkin soveltuvan yhtenäistandardin piiriin. Sorensen et al. [39, s.60] toteavat myös, että erityisesti automatisoitavien ja harvoin fyysisesti läpikäytävien järjestelmien osalta tulisi sensoreihin

liittyvät mittaussiirtymät huomioida kenttäolosuhdelähtöisesti tavalla, joka takaisi riittävät standardoimisasteet, joiden varaan edellä esitetyn kaltaisen paineanturitekniikan huollon hyödyntäminen voisi perustua myös pitkäaikaisessa mittaus-toiminnassa.

2.5.4 Sensoritekniikan valinta

Olemassa oleva sensoritekniikka mahdollistaa vaihtoehtoisia menetelmiä sekä veden laadun että veden korkeusmittausten suorittamiseen. Ei kuitenkaan ole irrelevanttia, millaisiin sensoritekniisiin ratkaisuihin näissä mittauksissa päätetään tukeutua. Aiottuihin toimintaympäristöihin ja seurantatehtäviin sopimattomat sensorivalinnat – tai vaihtoehtoisesti – niiden tehtävään soveltumaton käyttöönotto – voivat mitä suurimmassa määrin tuottaa mittavia vaikeuksia erilaisten automatisoitujen vesistöjenseurantahankkeiden onnistumiselle. Onkin siis ensiarvoisen tärkeää, että sensorivalintoja tehtäessä kartoitetaan kattavasti kunkin vaihtoehtoisen sensorityypin toimintaedellytykset niissä ympäristöissä, joissa niiden on lopulta määrä toimia. Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että jo automatisointiin tähtäävien kehitysprosessien alkuvaiheissa tulee riittävissä määrin perehtyä olemassa oleviin sensoriteknologioihin, jotta niiden vahvuudet ja heikkoudet voidaan asianmukaisesti analysoida laitteiden tuleviin asennusympäristöihin suhteutettuina esimerkiksi SWOT-analyysin kaltaisina menetelmin.

Pohjavesiseurannan automatisointihankkeissa kannattaa luonnollisesti hyödyntää jo olemassa olevia pohjavesiputkia ja niihin soveltuvia sensoriteknologioita. Seurantatarkoituksiin asennettuja pohjavesiputkia on Rintalan et al. [37, s.17] esittämän arvion mukaan kaikkiaan noin 20 000. Tämä määrä on myös vahvasti kasvava, sillä uusia pohjavesiputkia korkeuksien ja laadunseurantaan asennetaan satamäärin vuosittain eri toimijatahojen toimesta [37, s.17].

2.6 Seurantatavoitteet

2.6.1 Seurantatavoitteiden analyysi

Horppilan [16, s.3] mukaan vesistöjen vedenlaatuun liittyvien seurantaohjelmien tulee tuottaa riittävissä määrin tietoa eri vesisysteemien kokonaistilasta, jotta niihin liittyvien arviointien pohjalta voidaan sekä laatia että toteuttaa kuhunkin eri kohteeseen soveltuvat vesienhoitosuunnitelmat. Automatisoitujen asemien kannal-

ta tarkasteltuna tämä edellyttää sitä, että kerättävä data on tarpeeksi monipuolista. Tällöin automatisoinnin uudet siirtymävaiheet olisivat jo lähtökohtaisesti hyvin kokonaisvaltaisia, jotta odotetut kustannushyödyt voitaisiin parhaalla mahdollisella tavalla saavuttaa.

Seurantatavoitteiden osalta on varsin selvää, että niin pinta- kuin pohjavesien seurannassa on vuosien varrella tehty selvää toiminnan painottamista täysin automatisoitujen mittausasemien suuntaan. Tämän automatisointiprosessin voidaan katsoa vähentävän seurantaan kytkeytyviä henkilöstökustannuksia sekä pitkän aikavälin operatiivisia kokonaiskustannuksia. Tähän liittyvät WSN- ja IoT-teknologiat ja niille asetetut odotukset edellyttävät, että käytetyt laitteet kykenevät luotettavaan ja pitkäaikaiseen autonomiseen monitorointiin.

Jotta pinta- ja pohjavesien nykymuotoiset seurantatavoitteet saavutettaisiin mahdollisimman kattavasti, niin myös vedenpinnan laatuun kytkeytyviä tekijöitä tulee lähitulevaisuudessa mitata yhä enenevässä määrin tarkoituksenmukaisilla automaattisilla mittausasemilla. Mitä monipuolisemmiksi laitteet ja niissä hyödynnetyt sensoriteknologiat käyvät, niin sitä tarpeettomammaksi ympäristön ja vesistöjen seurannassa vielä nykyiselläänkin tehtävä manuaalinen työ vaihe vaiheelta käy.

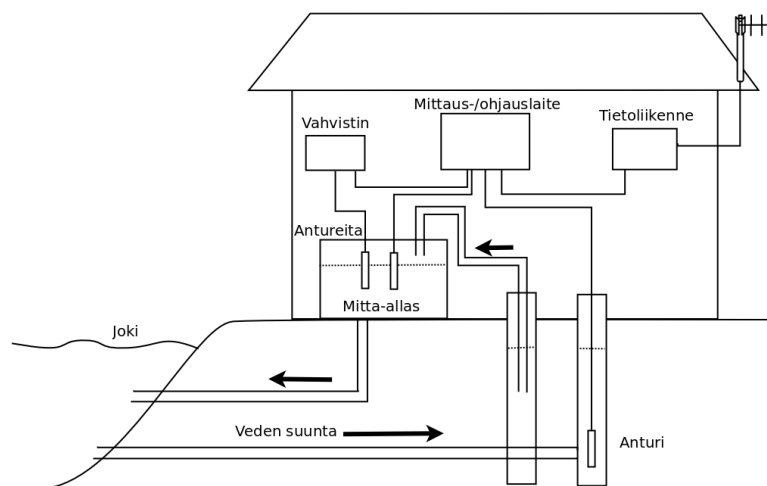
2.6.2 Automatisoinnin rajat

Juntura [21, s.41] esittää, että automaattisiin mittauslaitteistoihin liittyvät huolto- ja kalibrointikustannukset saattavat muodostua ongelmallisiksi automatisoinnin kokonaiskustannusten osalta. Onkin syytä huomioida, että mittalaitteiden huoltotoimenpiteisiin voi liittyä suuriakin kustannuksia. Tämän voidaan myös katsoa suoraan liittyvän käytettyjen sensortyyppien kompleksisuuteen. Esimerkiksi jotkin sijoituskohteet ja anturityypit saattavat edellyttää myös säännöllisiä manuaalisia puhdistustoimia siitäkin huolimatta, että laitteissa olisi hyödynnetty jo joitain automaattisia puhdistusjärjestelmiä [10, s.11]. Näin on kuitenkin toimittava, jotta mittalaitteiden keräämien tulosten oikeellisuus ei ajan mittaan kärsisi [21, s.41].

Huoltotoimien ohella joihinkin automatisoituihin mitta-asemiin on liitetty myös varsin kattavaa manuaalista vertailunäytteidenottoa, joista kerätyt näytteet on erikseen analysoitu erillisissä laboratorioissa. Näin on toimittu, koska on haluttu varmistaa, ettei automatisoitujen mittausasemien pitkän aikavälin mittaustuloksiin pääse sisältymään vääriä mittaustuloksia. Esimerkiksi Kyrönjoella vuonna 1997 käytöön otettuihin automatisoituihin mittausasemiin vuosien 2003–2008 välisenä aikana kohdistettujen luotettavuustutkimusten perusteella havaittiin, että automatisoi-

tujen mittausasemien tuloksissa esiintyi jonkin verran hajontaa manuaalisesti otettuihin vertailunäytteisiin verrattuna, eikä kaikkia tuloksia voitu pitää luotettavina.[5, s.2]

Seurantatutkimuksessa olleita mittausasemia oli kaikkiaan viisi ja useimmilla niistä mitattiin lämpötilaa, sähkönjohtavuutta, pH:ta, vedenkorkeutta ja virtaamaa. Tämän lisäksi joillain asemilla mitattiin myös kiintoaineita, sameutta, happitasoa ja A-klorofylliä. Mittausongelmat korostuivat kuitenkin erityisesti pH:n tapauksessa, jonka tulokset eivät olleet minkään mittausaseman osalta luotettavia. Kaikilla asemilla ei tosin hyödynnetty samanlaista mittauskalustoa, eikä kaikkia asemia myöskään oltu otettu käyttöön samanaikaisesti. Myös paikoin käytössä olleiden automaattisten puhdistimien välillä oli eroavaisuuksia. Kyrönjoen automatisoitujen mittausasemien luotettavuutta oli kuitenkin arvioitu jo vuosina 1998–2000, jolloin samaiset ja jo tuolloin toiminnassa olleet mittausasemat arvioitiin luotettaviksi. Tehdyn luotettavuustutkimuksen tuloksista on kuitenkin todettavissa, että uudempien antureiden havaittiin olleen luotettavampia, kuin jo pitkään toiminnassa olleiden. [5, s.2,11,14,69–70] Tämän voidaan tulkita merkitsevän sitä, että anturitekniikassa tulee laadun ja uudenaikaisuuden lisäksi kiinnittää erityistä huomiota myös pitkäikäisyyteen. Kyseisistä mitta-asemista kannattaa myös huomioida niiden kompleksisuus, joka ilmenee kuvasta 2.1.



Kuva 2.1: Liki 20-vuotias Kyrönjoen mitta-asematyyppi Aspia [5, s.17] mukaillen.

Vaikka veden laatuun kytkeytyviä tekijöitä kyettäisiinkin yhä enenevässä määrin jatkossa seuraamaan täysin automatisoidusti – niin myös lähitulevaisuudessa ja teknologian edelleen kehittyessä – jouduttaisiin joissakin veden laatuun liittyvis-

sä selvityksissä turvautumaan edelleen perinteisiin laboratorioihin ja niissä tehtäviin tutkimuksiin. Niiltä osin kun veden laadun seuranta ei kyetä toteuttamaan täysin automatisoidusti vaihtelevissa kenttäolosuhteissa, on kuitenkin mahdollista, että jotkin sovellukset kykenisivät ainakin osittain tai muutoin toiminnoiltaan rajallisemmassa muodossa edesauttamaan seurantaprosessien suorittamista. Näissä tapauksissa lienee mahdollista, että soveltuvilla IoT-sovelluksilla voitaisiin kenties suorittaa myös näytteenottotyötä, kuten Huttula et al. [17, s.45] on ehdottanut tehtävän eräiden meriin laskevien jokien kuormitusseurannassa – sen sijaan, että automatisoidut mittausasemat tuottaisivat itsenäisesti vain valmista mittausdataa.

Pelkästään näytteidenottotoimintaakin suorittavat IoT-laitteet voisivatkin tarjota merkittäviä hyötylähtökohtia perinteisempään ja manuaalisesti tehtävään työhön verrattuna. Vesistöt saattaisivatkin näiltä osin tarjota erittäin hyvät puitteet tämänkaltaisten laitteiden kehitystyöhön. Esimerkiksi vedenpinnan päällä itsenäisesti liikkuvat IoT-laitteet voisivat kenties edetä pitkiäkin matkoja erilaisissa joki- ja järvi-systeemeissä samanaikaisesti kattavaa mittaus- ja keräystoimintaa suorittaen. Tällöin mittauksissa ei enää tarvitsisi nykyiseen tapaan rajoittautua pelkkiin staattisesti sijoitettuihin mittausasemiin. Tämä edesauttaisi eräiden merkittävien seuranta-työhön liittyvien ongelmien ratkaisussa – kuten paremman alueellisen kattavuuden saavuttamisessa.

2.6.3 Staattinen vs. liikkuva

Amundson et al. [4, s.238–239] esittää, että liikkuvien sensorinoodien hyödyt kytkeytyvät muun muassa niiden laajaan alueelliseen kattavuuteen, uudelleensijoittumismahdollisuuksiin sekä optimaalisten lähetys- ja vastaanottoaikojen hyödyntämiseen. On kuitenkin myös varsin ilmeistä, että liikkuvien sensorinoodien virrankulutusodotteet, verkkovaatimukset ja paikannusedellytykset eroavat staattisista sensorinoodeista [4, s.239].

On myös syytä huomioda, että autonomisesti liikkuvat laitteet saattaisivat oleellisesti vähentää myös seurantatyössä tarvittavien laitteiden kokonaismäärää, sillä perinteisesti WSN:n piirissä kytkeydytään varsin usein niihin peruslähtökohtiin, että seuranta-alueisiin liittyvää mittausresoluutiota määritetään melko suoraviivaisesti asennettavien sensorinoodien määrällä. Näin ollen voisi olla mahdollista, että joissain tapauksissa näitä spatiaalisia lähtökohtia tarkasteltaisiinkin – ei siis laitemäärän – vaan niiden mobilititeetin kautta. Esimerkiksi jos mittaushavaintoja ei tarvittaisi kovin tiheällä aikavälillä kustakin määritetystä mittauspisteestä, niin ei lie-

ne mitään merkittävää syytä sille, miksei mittauksia tällöin suorittaisi – olosuhteiden niin salliessa – jokin yksittäinen tai useampi suoraan vesistöissä liikkuva laite. Tämä myös osaltaan mahdollistaisi siirtymisen toiminnallisesti kattavampaan laitekantaan, koska suurien laitemäärien sijasta voitaisiin keskittyä enemmän yksittäisten laitteiden laatuun ja niiden ominaisuuksiin.

Ajatuksena tämä ei ole täysin uusi [26, s.1], sillä asiaa on myös WSN:n piirissä jo jossain määrin tutkittu. On kuitenkin syytä huomioida, että vesistöjen seurannassa tämän kaltaiset applikaatiot voisivatkin olla erityisen käyttökelpoisia, sillä esimerkiksi avovesiympäristöihin kytkeytyvien laitteiden etenemiskykyyn liittyvät konstruktiot voitaneen pitää verrattain yksinkertaisina, joka osaltaan edesauttaisi myös niiden tuottamiseen liittyvien kustannusten hallintaa.

Kuvassa 2.2 esitetään esimerkinomaisesti, kuinka itsenäisesti liikkuvien laitteiden navigointiohjausta voitaisiin määrittää avovesistöihin soveltuvalla tavalla. Vesistöissä liikkumisen tueksi tarvitaan paikannustietojen lisäksi myös muuta tekniikkaa, jotta laitteet kykenisivät kiertämään tielleen osuvia esteitä. On kuitenkin huomioitava, että myös tätä vaadittavaa lisäteknikkaa voitaneen hyödyntää erilaisten mittausten ja mallintamisten teossa. Lienee esimerkiksi mahdollista, että joillain antureilla olisi useampia jaettuja tehtäväalueita, jolloin ne suorittaisivat sekä mittaus-toimintaan että etenemisseurantaan liittyviä tehtäviä. Sensorit, kuten kamerat tai tutkat, voisivat kenties soveltua erinomaisesti näihin toiminnallisesti jaettuihin tehtäviin.



Kuva 2.2: GPS-suunnistus jokisysteemissä. (Koostettu Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan 3/2017 aineistosta: Creative Commons 4.0 [9].)

3 WSN-ympäristösovellukset

Tässä luvussa tutustutaan WSN-ympäristösovellusten keskeisiin haasteisiin ja erityispiirteisiin, joiden voidaan katsoa olevan keskeisessä asemassa ympäristömonitorointiin kohdentuvassa WSN-sovelluskehityksessä.

3.1 WSN-ympäristösovellusten haasteet

Oliveiran et al. [31, s.147] mukaan ympäristönseurantaan keskittyvässä WSN-sovelluskehityksessä ei voi tukeutua yksinomaan teknologiseen osaamiseen, vaan sen ohella on myös kokonaisvaltaisesti ymmärrettävä suoraan niitä ekosysteemejä, joissa sovellusten on lopulta määrä toimia. Tämän voidaan tulkita tarkoittavan käytännössä sitä, että WSN-ympäristösovellusten kehitystyötä tulee lähestyä riittävän monitieteisesti, jotta kehitystyössä kyettäisiin kiinnittämään huomiota riittävän laajoihin ongelmakenttiin.

WSN-ympäristösovellusten tulisi olla mahdollisimman ei-intrusiivisia niin epäorgaanisen kuin orgaanisenkin luonnon suhteen, jotta ne eivät yhtäältä häiritsisi oman ekosysteeminsä luonnontointoja, mutta eivät toisaalta myöskään itse – esimerkiksi sijoituksensa tai asennustapansa johdosta – vääristäisi niitä havaintoja, joita niiden on määrä kerätä. Esimerkiksi on mahdollista, että ekosysteemejä asuttavan eliöstön toiminta saattaisi paikoin kyetä muodostamaan mittaustuloksia vääristäviä ongelmia joko väärin valituille, sijoitetuille tai suojatuille sensoreille. Tästä syystä WSN-ympäristösovelluksiin liittyvä ongelmanasettelu ei voi olla yksinomaan teknologinen. Lähestymistavan tulee olla riittävän monipuolinen, jotta kehitettävät laitteet kykenisivät sekä sulautumaan että toimimaan parhaimmalla mahdollisella tavalla omissa asennusympäristöissään.

Oliveira et al. [31, s.148–149] listaa 10 eri osa-aluetta, joista kukin asettaa uniikit haasteensa WSN-ympäristösovelluksille. Nämä ovat nähtävissä taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1: WSN-ympäristösovellusten haasteet Oliveiran et al. [31, s.148–149] mukaan.

Haaste	Selite
Virranhallinta	Kriittisessä asemassa erityisesti vaikeapääsuisillä alueilla. Perinteisten akkuteknologioiden lisäksi huomioitava myös uudet/vaihtoehtoiset virran varastointi- ja keräysmenetelmät
Skaalautuvuus	On kyettävä toteuttamaan erilaisiin ja olosuhteiltaan vaihteleviin ympäristöolosuhteisiin myös noodimäärältään vaihtelevia sensoriverkkoja.
Etähallinta	Laitteiden tulee olla etähallittavissa. Tämä on erityisen tärkeää niiden sensorinoodien ja -verkkojen osalta, jotka sijaitsevat vaikeapääsuisillä alueilla.
Käytettävyys	Langattomien sensoriverkkojen asennuksen, käyttöönoton ja ylläpidon tulee olla mahdollisimman vaivatonta. Ratkaisut voivat tällöin perustua niin Plug and Play -tekniikkaan kuin erillisiin ohjelmisto-ratkaisuihinkin, kuten sidosryhmä- ja käytettävyyslähtöisesti kehitettyihin rajapintoihin.
Standardisointi	IEEE 802.15.4 keskeisessä asemassa. Muutoinkin jopa eri laitetoimittajilta hankittavien laitteiden oltava keskenään yhteensopivia.
Tuki Mesh-reititykselle	Tiedonvälityksen oltava luotettavaa ja tehokasta.
Laitteiden koko	Olemassa olevat paristoteknologiat ja käytettyjen radiolaitteiden tehokkuus keskeisessä asemassa.
IP-yhteensopivuus	IoT-mallin mukaisesti yksittäiset sensorinoodit suoraan tavoitettavissa IP-protokollalla. IPv6:n hyödyntäminen.
Hinta	Tuotettavien laitteiden tulee olla edullisia, jotta niiden laaja käyttöönotto mahdollistuu. Tässä yhteydessä on huomioitava myös laitteiden mahdollinen kertakäyttöisyys.
Monipuolinen sensorivalikoima	Perinteisesti on tukeuduttu vain hyvin suppeaan sensorivalikoimaan. On kuitenkin pyrittävä laajentamaan entuudestaan käytettyä sensorikantaa, vaikka tähän prosessiin kytkeytyisikin useita uusia ongelmalähteitä, kuten esimerkiksi videonäytteiden keruun ja niiden lähetyksen osalta.

3.2 Virranhallinta

Popovicin et al. [33, s.194] mukaan WSN-järjestelmien suunnittelun merkittävimmät rajoitukset muodostuvat käytettävissä olevien laitteiden ja niiden eri osatekijöiden, kuten radiopiirien, sensoreiden, aktuaattoreiden ja mikrokontrollereiden virrankulutusvaatimuksista. Yksittäisten laitteistokomponenttien osalta ovat monipuoliset radiotekniikat jo varsin pitkään olleet merkittävässä osassa WSN-sovellusten eteen tehdyssä tutkimus- ja kehitystyössä niihin liittyvien – ja usein myös varsin merkittävien – virrankulutusvaatimusten johdosta. On kuitenkin syytä huomioida etteivät WSN-sovelluksissa käytettävät radiotekniikat ole aina välttämättä kaikkein suurimpia yksittäisiä virrankulutuskohteita, sillä WSN-sovellukset ovat lopulta aina kokonaisuuksia, joiden kokonaisvirrankulutus määrittyy useammasta eri osatekijästä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että joissain sovelluksissa suurimpia yksittäisiä virrankuluttajia voivat olla esimerkiksi jotkin käytössä olevista sensoreista tai kenties noodeihin sisällytetyt järeät prosessointiratkaisut ja niiden aktiivinen käyttö. [33, s.194]

Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että vaikka WSN-sovellusten suunnittelussa pyrittäisiinkin mahdollisimman vähävirtaisiin kokonaisuuksiin – esimerkiksi huolellisin komponenttivalinnoin ja käyttämällä järjestelmän resursseja mahdollisimman energiatehokkaasti, vaikkapa järjestelmien unitiloja ja sovelluskohtaisesti parhaimpia tiedonsiirtomenetelmiä hyödyntäen – on laitteiden joka tapauksessa saatava tarvitsemansa käyttöenergia luotettavasti siten, että laitteiden toiminta-ajoille asetetut vaatimukset täyttyvät, olivatpa nämä sitten mitä tahansa. WSN-sovellukset, jotka operoivat erillisten akustojen tai esimerkiksi erilaisten paikallisesti sähköä generoivien järjestelmien, kuten aurinkopaneelien, varassa – täytyy suunnitella käytännöllisten, mutta samaan aikaan tyypillisesti myös jollain tapaa rajallisten energiabudjettien ehdoilla, joiden tekniset yksityiskohdat ovat viime kädessä kehitettävien järjestelmien kokonaiskustannusten sanelemia. Tämän vuoksi teknisiä ratkaisuja ei virrankulutuksenkaan osalta aina voida tehdä sovelluskohtaisesti parhaimpiin menetelmiin tukeutuen.

Oliveira et al. [31, s.148] korostavat muun muassa toimintaympäristöstä kerättävän energian olevan vaihtoehtoisten energian varastointiratkaisujen ohella merkittävässä asemassa niiden mahdollisten toteutusratkaisujen osalta, joilla langattomien sensorinoodien elinikää voidaan maksimoida. Tästä tarkastelunäkökulmasta Popovici et al. [33, s.195] toteavat, että ympäristöstä kerättävää energiaa voidaan tavanomaisten ladattavien akkujen sijaan säilöä esimerkiksi superkondensaattorei-

den avulla, joiden hyvinä puolina Ibrahim et al. [18] toteavat olevan muun muassa niiden teknisen kestävyuden ja korkean hyötysuhteen, mutta joiden kenties merkittävin haittapuoli koostuu niiden nopeasta itsepurkautumisasteesta, joka on noin 5 prosenttia päivässä. Ibrahim et al. [18] mukaan erilaisiin säilöntätekniikoihin – olivatpa nämä sitten kemiallisia, mekaanisia tai lämpöön perustuvia – ei kuitenkaan voida tukeutua tasapuolisesti, sillä niiden todellinen käyttökelpoisuus riippuu sovellusten ohella myös niiden yleisestä kehitysasteesta, toimivuudesta, kustannuksista ja toimintaskaalasta. Energiaa voidaan toisaalta myös tuottaa monin eri tavoin, kuten sähkömagneettisin, pietso-, valo- tai lämpösähköisin menetelmin [33].

Niin sähkön varastointiin kuin sen tuottamiseen liittyvät tekijät ovat erottamaton osa sovellusten kokonaistoimivuutta, mutta niiden väliset keskinäiset riippuvuudetkin voivat olla hyvinkin merkittäviä. Sillä todennäköistä on, että käyttöön valitun varastointiratkaisun mielekkyys riippuu osaltaan myös niistä menetelmistä, joilla sähköä voidaan lokaalisti – ja täten ympäristösidonnaisesti – generoida. Tällöin toiminnassa vaikuttavia osatekijöitä voivat olla esimerkiksi energian tehokas generointiaika/vuorokausi tai varastoitavan energian määrä/minuutti tai varastoinnin tehokkuus suhteessa latausvirtaan. Tämänkaltaiset tekijät voivat kehitystyön osalta edellyttää hyvin laaja-alaista tasapainoilua järjestelmiltä edellytettyjen toiminnallisuuksien, olemassa olevien teknologioiden, niiden saatavuuden ja niihin liittyvien hankintakustannusten, kuten myös kokonaisjärjestelmän elinkaarikustannusten välillä. On kuitenkin hyvä myös huomioda, että vaikka kerättävää energiaa pyritään useimmissa tähän toimintaan perustuvissa WSN-sovelluksissa jollain tapaa varastoimaan – myös sellaisten pitkäikäisten WSN-ratkaisujen eteen tehdään aktiivista kehitystyötä, joiden toiminta perustuu yksinomaan suoraan ympäristöstä kerättävään energiaan [2, s.303].

3.3 Standardointi

Uusien teknologioiden kehittyminen tarjoaa useita mahdollisuuksia sille, kuinka uudet innovaatiot otetaan käyttöön ja millaisin puittein niiden laajempi leviäminen tapahtuu. Tämä on monella tapaa nähtävissä siinä, kuinka erilaiset teknologiat arkipäiväistyvät, osoittavat muutosvoimaisuutensa ja sulautuvat merkittäväksi elämämme osaksi. Tähän teknologian leviämismenettelyyn liittyy kuitenkin monimuotoista vaihteellisuutta, joka on usein hyvin nähtävissä ilmiöiden historiallisen tarkastelun kautta. Liittyivätkö teknologiset edistysaskeleet sitten jatkuvan säh-

kövirran tuottamiseen, sähkövalaistuksen yleistymiseen, polttomoottorien ja autojen aikakauteen tai WLAN-tekniikan laajempaan käyttöönnottoon, niin on aina yhtä lailla selvää, ettei niiden laajempi leviäminen ole tyypillisesti ollut välitöntä tai yksittäislähtöistä, vaan useiden eri osatekijöiden yhteisvaikutuksen muovaamaa ja täten luonteeltaan evolutionaarista. Teknologinen kehitys ja uusien tuotteiden tai menetelmien laajamittainen käyttöönotto kytkeytyvätkin monella tapaa siinä, että niihin perustuva kehitystyö – kuten myös niiden tuottaminen ja käyttö – voidaan kestäväällä tavalla yhdenmukaistaa, eli standardoida. Vallitseviksi valikoituvat standardit tai markkina-asemaltaan sellaisiksi luettavat käytänteet – eivät kuitenkaan ole välttämättä kuluttajien tai markkinatilanteiden kannalta kaikilta osin ideaaleja. Tähän liittyen Weitzel et al. [46, s.2] kuitenkin esittää, että itsessään heikkojen standardien markkinavoittoisuutta on selvästi parempien vaihtoehtojen läsnä ollessa vaikea todentaa asiassa vaikuttavien lukuisien eri epävarmuustekijöiden, kuten vaihtoehtoisten tulevaisuussennusteiden ja tehtyihin valintoihin liittyvien ennakoimattomuus- ja ohjaustekijöiden johdosta.

WSN:n piirissä esiintyy useita eri standardeja, jotka vaikuttavat monella eri tavalla siihen, kuinka eri laitteet kommunikoivat ja verkottuvat keskenään. Tästä näkökulmasta Oliveira et al. [31, s.149] katsovatkin WSN:n laajemman adaptaatioasteen riippuvan pitkälti siitä, kuinka hyvin eri laitevalmistajien laitteet toimivat keskenään. Tämä edellyttää kuitenkin sitä, että laitteet perustuvat joihinkin jaettuihin standardeihin, jotka mahdollistavat ongelmattoman yhteenliittämisen. Laitteiden kysyntä riippuu siis niiden yhteensopivuudesta.

Standardointiin liittyvää problematiikkaa voidaankin tämän johdosta lähestyä taloustieteessä määritellyn verkostovaikutuksen kautta, jolla tarkoitetaan sellaista markkinatilannetta, jossa jonkin tarjolla olevan tuotteen tai palvelun yleistyminen on vahvasti kytköksissä siihen, kuinka monta käyttäjää sillä jo entuudestaan on [46, s.1]. Weitzelin et al [46, s.1] mukaan tämänkaltaiset vahvat verkostovaikutukset määrittävät IT-alan kaltaisia markkinoita erityisen suuresti, mikä johtuu pääasiassa siitä, että niiden puitteissa tapahtuvan tietojenvaihdon sekä niihin liittyvien erilaisten lisäarvoa tuovien elementtien tulee olla keskenään yhteensopivia.

Weitzelin et al. [46, s.1] mukaan useat keskenään kilpailevat standardit altistuvat perinteisistä markkinanäkökulmista tarkastellen muun muassa seuraaville markkinavaikutteille:

- Kysyntäjohtoiset vaikutteet estävät lopulta eri standardien kesken vallitsevan tasapainotilan, jonka seurauksena yksi standardi nousee lopulta määrääväksi

monopoliasemaan.

- Useisiin kilpaileviin standardeihin liittyvä instabiliteetti estää keskenään yhteensopimattomien standardien yhtäaikaisen olemassaolon, joka voi nopeastikin nostaa yhden standardin johtoasemaan, jolloin muihin standardeihin tukeutuneet toimijat jäävät eristetyksi sellaisten tuotteiden piiriin, joita ei enää tulevaisuudessa tueta.
- Erinomaistenkin standardien menestyminen on epävarmaa, mikäli erilaiset toimijatahot ovat haluttomia kantamaan varhaismaksuja-asemaan liittyviä riskejä.
- Tiettyjä standardeja promotoivat tahot voivat käyttää vaikutusvaltaansa näiden käyttöönottokynnyksen laskemiseksi tavalla, joka voi olla markkina-aseman kannalta hyvinkin merkittävää ja kauaskantoista.
- Täysin vapaiden markkinoiden olemassaolo ja täten siihen tyypillisesti liitettävät puhtaasti rationaaliset valikoitumisperusteet ovat reaalityössä jossain määrin kyseenalaisia, jolloin niihin liittyvien valikoitumisprosessien ei voida katsoa olevan sellaisenaan täysin kuluttaja- tai asiakaslähtöisiä.

Merkittävimmät WSN-standardit pohjautuvat MAC- ja PHY-kerrokset määrittelevään IEEE 802.15.4 -standardiin, joka esitellään tarkemmin luvussa 3.7. Näitä IEEE 802.15.4:ään pohjautuvia standardeja ovat muun muassa ZigBee, WirelessHart, ISA100.11a ja 6LoWPAN. Näiden teknisissä toteutuksissa ja niiden kattamissa ominaisuuksissa on eroavaisuuksia, vaikkakin niiden tärkeimpien WSN-tavoitteiden, kuten energiankulutuksen optimoinnin ja skaalautuvuuden voidaankin yleistetysti katsoa olevan hyvin samankaltaisia. Näiden standardien eroavaisuudet tulevat kuitenkin ilmi muun muassa niiden valikoiduissa sovelluskohteissa, jotka ZigBeen tapauksessa kohdistuvat kaupallisiin ympäristöihin ja toisaalta WirelessHART:n sekä ISA100.11a:n tapauksessa puolestaan teollisiin ympäristöihin. 6LoWPAN on täysin avoin standardi, joka IPv6-yhteensopivuuden johdosta on nähtävissä WSN:tä laajemmin myös eräänä IoT:n merkittävänä osatekijänä [2, s.325,331-332]. IPv6-yhteensopivuuden hyviin puoliin Oliveira et al. [31, s.149] katsovat lukeutuvan muun muassa protollan avoimuuden ja tunnettavuuden sekä olemassa olevien hallinta- ja kehitystyökalujen hyödyntämismahdollisuudet.

3.4 Käytettävyys

Laitteiden käytettävyyteen liittyvät tekijät jäävät valitettavan usein teknisten toteutusten varjoon niin kuluttajalaitteissa kuin ammattijärjestelmissäkin. Kyseisen aihepiirin keskiössä ovat hieman laajemmin määriteltynä muun muassa sellaiset käyttäjäkokemuksen piiriin kytkeytyvät seikat, kuten kuinka palveluita käytetään, millä tavoin komentoja voidaan antaa, kuinka tietoa esitetään tai millaisia viiveitä jonkin toimintokäskyn annon ja sen halutun seurauksen välillä esiintyy. [38, s.1–2,7–9]

Nielsenin [28, s.26] mukaan käytettävyyden voidaan perinteisesti katsoa muodostuvan viidestä eri osatekijästä, joihin lukeutuvat järjestelmien opittavuus, tehokkuus, muistettavuus, virheensieto ja käyttäjätyytyväisyys. Opittavuudella Nielsen viittaa siihen, että järjestelmien käyttöönoton tulisi olla vaivatonta, jonka puolestaan tulisi johtaa myös tehokkuus-aspektin mukaiseen nopeaan tuottavuuteen. Järjestelmien muistettavuus määrittyy siten, että vaikka järjestelmän käyttö ei ole yhtäjaksoista, niin sen käyttöä tulee voida jatkaa vaivattomasti myöhemmin, vaikka viimeisestä käyttökerrasta olisikin jo runsaasti aikaa ilman, että käyttämättömyys johtaisi tällöin väistämättä tilanteeseen, jossa järjestelmään tulisi perehtyä kattavasti uudelleen. [28, s.26]

Järjestelmien tulisi myös olla mahdollisimman virheresistantteja. Tämän voidaan katsoa sisältävän sekä järjestelmien sisäisistä että ulkoisista tekijöistä johtuvien virheiden ja niiden seurausten minimoinnin. Mahdollisista virheistä tulee myös voida palautua mahdollisimman tehokkaasti. Virheiden ei kuitenkaan missään tapauksessa tule johtaa mittaviin oheisvaikutuksiin, kuten väärän tiedon kerääntymiseen tai järjestelmien täyteen toimimattomuuteen. Käyttäjien tulee tämän lisäksi voida kaikissa tilanteissa kokea järjestelmien käyttö miellyttäväksi. [28, s.26]

Näiltä osin Oliveiran et al. 3.1 WSN-käytettävyyslinjausten voidaan katsoa ulotautuvan Nielsenin määrittymisen mukaisiin opittavuus- ja tehokkuus-aspekteihin. Nielsenin edellä esitetty käytettävyysmäärittely on tätä laajempi, mutta sen voi kuitenkin katsoa edustuvan hyvin niitä osatekijöitä, joiden huomioiminen on perinteisten käytettävyyslinjausten ohella tärkeässä asemassa myös WSN:n ja IoT:n tapauksessa.

Hassenzahlin et al. [15, s.95] mukaan käyttäjäkokemuksen keskiössä olevat teknologiat joutuvat ensinnäkin vastaamaan ja toisaalta tulemaan myös määritetyiksi, niin käyttäjien tiedostetuista kuin tiedostamattomistakin vaikutteista, järjestelmiin lähtökohtaisesti kytkeytyvistä ominaispiirteistä, kuten niiden monimutkaisuudesta ja niihin liittyvistä toiminnallisuuksista sekä siitä ympäristöstä tai kontekstista, jon-

ka puitteissa järjestelmien käyttö kulloinkin tapahtuu. Tämä määrittäminen tuokin hyvin esille sen, kuinka moniulotteisiin haasteisiin käyttäjäkokemuksen suunnittelutyössä joudutaan vastaamaan.

Rowlandin et al. [38, s.3–5] mukaan IoT:hen kytkeytyvään käyttäjäkokemukseen liittyy useita erityistekijöitä ja haasteita, koska toiminnallisuudet jakautuvat useiden eri laitteiden piiriin, jolloin hallittavuuteen ja tietojenvaihtoon liittyvistä tekijöistä voi muotoutua hyvinkin monimuotoisia. Tähän liittyvät verkostoitumiselementit nostavatkin merkittävään asemaan tällöin muun muassa käyttäjäkokemuksen palvelukeskeisyyden, johon liittyviin reaaliaikaisuusodotuksiin voi olla teknologiatasolla hyvinkin vaikeaa vastata, etenkin niissä tapauksissa, joissa jatkuvaa saavutettavuutta ei voida edes lähtökohtaisesti taata, koska kaikessa verkkotoiminnassa on myös varauduttava mahdollisiin häiriöihin tai mikäli laitteiden toimintasyklit eivät tätä mahdollista. Esitettävyyden- ja hallittavuuselementtien keskiössä on kuitenkin eri lähteistä kerättävä data, joka ei välttämättä sellaisenaan ole edes käyttäjien tarkasteltavissa. IoT:n tapauksessa käyttäjäkokemus muotoutuukin useista keskenään monimuotoisesti vaikuttavista tekijöistä. [38, s.4–17]

Siinä missä IoT:n puitteissa toteutetut järjestelmät voivat olla suoraan kontrolloitavissa erilaisten rajapintojen kautta, kuten vaikkapa IoT-valvontakameroihin kirjautumisen ja suoratoiston tarkastelun mahdollistavien verkkosivustojen välityksellä, saattavat ne kuitenkin – erilaisten WSN-järjestelmien ohella – olla jo lähtökohtaisesti käyttäjien suoran interaktion tavoittamattomissa. Tämänkaltaisten järjestelmien toiminnallisuus voikin siis rajautua yksinomaan käyttäjille tarpeellisten tietosisältöjen tuottamiseen, joiden tarkastelu tapahtuu tätä varten laadittujen palvelurakenteiden, kuten verkkosivujen kautta. Tämänkaltaisissa palveluissa eri lähteistä kerättyä tietoa voidaankin tarjota suoraan käyttäjien tarpeisiin sovitettuna. Tämän myötä itse fyysiseen ympäristöön asennetuista järjestelmistä voikin muotoutua loppukäyttäjälle varsin näkymättömiä.

Pilottihankkeen kaltaisten järjestelmien osalta käytettävyyttä voidaan luonnollisesti pohtia sellaisista lähtökohdista, jotka liittyvät esimerkiksi kerättyyn raakadataan ja sen esittämiseen. Tarkastelun keskiössä voisivat tällöin olla ne toimenpiteet, kuten tiedon rakenteellinen järjestely tai tiettyjen tietoalkioiden etsiminen, joka tehdään Internetin ylitse saavutettavalla verkkopalvelimella tai M2M-tyyppisesti jonkin soveltuvan asiakaslaitteen ja yhdyskäytävän välillä. Mikäli käytettävyyttä lähtökohtia tarkasteltaisiin myös tätä kokonaisvaltaisemmin, on varsin luontevaa havaita, että myös järjestelmän fyysiset asennusvaiheet voidaan ulottaa käyttäjäkoke-

muksen piiriin. Tuotelähtökohtaisuutta voidaan tällöin käyttäjäkokemuksen ja käytettävyyden osalta ulottaa myös sellaisiin sidosryhmiin, joilla ei kenties tavanomaisen järjestelmäkehityksen näkökulmasta välttämättä lainkaan kuultais. Tämänkaltaisia toimijoita voivat edustaa muun muassa laitteiden asennuksista ja ylläpidosta vastaava tekninen henkilökunta.

3.5 Hinta

Franklin et al. [3, s.68] mukaan yleisen taloudellisen kehityksen päätekijä koostuu yksinomaan teknologisen muutoksen kokonaisasteesta, jossa vahvin muutosvaikutin voi ilmetä kahdessa vaihtoehtoisessa muodossa, joita ovat joko täysin uusien teollisuusalojen ilmestyminen tai uusien teknologioiden kehittyminen jo entuudestaan olemassa olevien teollisuusalojen piiristä. Niin WSN:n kuin IoT:nkin voidaan katsoa määrittävän sekä entuudestaan olemassa olleiden että täysin uusien ajatusten, menetelmien ja toimintatapojen varaan. Näiden molempien – ja osin myös keskenään pitkälti linkittyneiden – kehityssuuntauksien tapauksessa, voidaan niille asetettujen kaupallisten ennako-odotusten ja projisoitujen kasvunäkymien olevan huomattavan suuria, vaikkakin eräitä keskeiseen asemaan nousseita ennusteita onkin jo jossain määrin pyritty maltillistamaan [29]. Perustelluille tutkimuslähtökohdille nojaavilla näkemyksillä on tietysti aina painoarvoa, mutta samaan aikaan on myös huomioitava ne kontekstit, joista ne saavat alkunsa. On kuitenkin selvää, että alan vahva kasvu jatkuu. Tässä kehityksessä tuotteiden hinnoittelu on jo lähtökohtaisesti sangen merkittävässä asemassa, kuten myös ne rakenteet ja taloudelliset realiteetit, joista markkinat ja tuotteiden hintaperusteet käytännössä syntyvät.

Laitteiden hinnalla sekä niihin liittyvillä kokonaiskustannuksilla, kuten erilaisien oheispalveluiden tuotto- ja kulurakenteilla on merkitystä sekä kuluttajille – olivatpa nämä sitten yksityishenkilöitä tai erilaisia organisaatioita – että tuotteiden tarjoajille. Erilliskäytösten kehittäminen – olkoon kehittäjä tahokin mikä hyvänsä – vaatii yleensä suuren määrän kehitystyötä ja muuta taloudellisesti mittavaa toimintaa, joiden merkitys laitteiden ja järjestelmien loppuhinnoittelulle voi olla monin verroin merkittävämpää kuin lopputuotteissa itsessään olevat komponentit tai niihin liittyvät kokoonpanokustannukset antaisivat ymmärtää. Voittoa tavoittelevien tuottajien on kyettävä myymään laitteita ja niihin kytkeytyviä palveluita riittävällä volyyminä yleinen kilpailuympäristö huomioon ottaen tai tuotannossa on vaihtoehtoisesti erikoistuttava siten, että pienillä toimitusmäärillä ja tämän mukaisilla hinnoittelu-

perusteilla voidaan ylläpitää kannattavaa ja kasvuun tähtäävää yritystoimintaa.

Tavallisten kuluttajatuotteiden piirissä volyyymikauppa ja markkinapohjainen hinnoittelu voivat hyvinkin yhdistyä tavalla, jossa yritystoiminnan perinteiset yleiset edellytykset täyttyvät siten, että uudet tekniikat – olivatpa nämä sitten esimerkiksi IoT-pohjaisia kahvinkeitin tai WSN:n näkökulmista kehitettyjä ilmastointijärjestelmiä – kykenevät menestymään merkityksellisesti olemassa olevien markkinarealiteettien pohjalta. Tämä kuitenkin saattaa olla huomattavasti vaikeammin toteutettavissa esimerkiksi kehitettävän pilottijärjestelmän kaltaisissa ympäristösovelluksissa, joissa olemassa olevien sovellustarpeiden ja erilaisten tuottajaosapuolten omien intressien ja toimintaedellytysten välillä voi jo lähtökohtaisesti vallita varsin merkittäviä kohtaanto-ongelmia. Näitä kohtaanto-ongelmia voivat aiheuttaa niin pienialaiset kokonaismarkkinat kuin niissä myös mahdollisesti vaikuttavat jakautuneisuus- ja heterogeenisuusaspektitkin. Onkin aiheellista pohtia, kuinka hyvin tietyt järjestelmälähtöiset intressinäkökulmat ja esimerkiksi pilottihankkeen kaltaiset ympäristömonitorointijärjestelmätarpeet voivat kohdata parhaalla mahdollisella tavalla siten, että tästä näkökulmasta myös WSN:ään usein liitetyt edullisuusnäkökulmat ovat sellaisenaan saavutettavissa myös kaupallisissa ympäristöissä.

3.6 Skaalautuvuus

WSN-verkon skaalautuvuudella tarkoitetaan sitä, että siinä olevien nooidien määrää voidaan vapaasti säädellä tarpeen mukaan [1, s.1]. Tässä piilevä erityishaaste liittyy myös monella tapaa siihen, että skaalautuminen ei yksinomaan tarkoita verkon noodimäärien maantieteellisesti laajentuvaa tai supistuvaa levittäytymistä, vaan se sisältää myös nooidien alueelliseen mittausresoluutioon, eli nooidien tiheyteen vaikuttavia tekijöitä, joissa nooidien sijoittelu ei ole välttämättä kovin yhdenmukainen. Skaalautuvuus sitoutuukin näiltä osin hyvin merkittävällä tavalla WSN-verkkojen perusluonteeseen, sillä yksittäiset WSN-verkot voivat muodostua hyvinkin vaihtelevista noodimääristä [31, s.148], joiden sensorialuerajauksessa, sijoittumisessa ja toimintaperusteissa voi esiintyä huomattavaa hajontaa.

Esimerkiksi hyvin tiheään noodisijoitukseen mitoitetuilla maantieteellisellä alueella sijaitsevien nooidien toimintaympäristö ja toimintaedellytykset eroavat merkittävällä tavalla niistä WSN-verkoista, joissa samainen noodimäärä kattaa monin verroin suurempia maantieteellisiä alueita. Noodikannaltaan tiheään ja harvaan sijoitettujen sensoriverkkojen välillä on merkittäviä eroavaisuuksia siinä, kuinka noo-

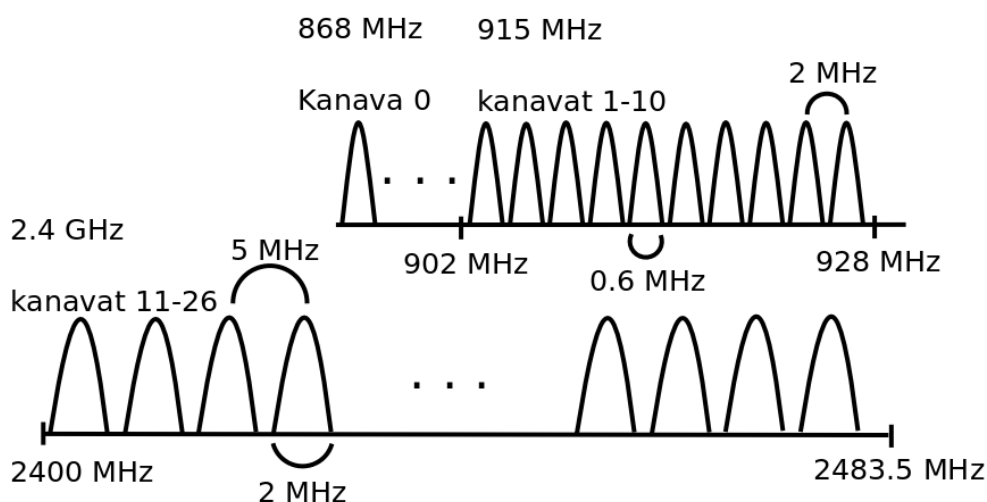
dimäärään lisääntyminen tai vastaavasti niiden määrän vähentyminen – vaikuttaa verkon kokonaistoiminnan asettamiin operationaalisiin vaatimuksiin, kuten viestien välitykseen liittyvään virrankulutukseen, optimaalisiin reititysratkaisuihin ja verkossa tapahtuvan tiedonvälityksen luotettavuuteen, mutta samaan tapaan skaalautumisen suhteen ongelmallisiksi osa-alueiksi voivat myös muodostua verkon nooditiheyteen liittyvät vaihtelut-, rakenne- ja hajaantumisyöhykkeet verkon eri osien välillä.

Alazzawin et al. [1, s.1] mukaan WSN-verkoissa käytettyjen reititysprotokollien tulisikin tukea kattavalla tavalla verkkoon liitetyissä noodimäärissä tapahtuvia muutoksia verkon suorituskyvyn siitä häiriintymättä. Alazzawi et al. [1, s.1] toteaa myös, että nooditasolla vallitsevat rajalliset resurssit nousevat reitityksen kannalta varsin merkittävään asemaan, jolloin soveltuviin reititysprotokollisiin nojautuminen on välttämätöntä, jotta keskeisiin skaalautuvuushaasteisiin kyetään asianmukaisesti vastaamaan. Mikäli WSN-verkko laaditaan alusta alkaen tiettyjen spatiaalisten lähtökohtien perusteella, niin tällöin tietysti voidaan sitoutua valittuja verkkotyyppäjä parhaiten palveleviin teknisiin ratkaisuihin esimerkiksi käytettyjen verkkoprotokollien osalta, mutta tämänkaltaisista tilanteista voi tulla sangen ongelmallisia eritoten silloin, kun verkkojen noodijaottelu ja niiden toimintaympäristö on huomattavan heterogeeninen tai mikäli se muotoutuu sellaiseksi ajan kuluessa muun muassa paristojen ehtymisen seurauksena, kuten kuvassa 3.1.

3.7 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 on LR-WPAN-standardi, joka on monella tapaa langattomien sensoriverkkojen kehityksen ja käyttöönoton keskiössä. Sen päätavoitteet on asetettu matalaenergiseen, alhaisen käyttöönottokynnysasteen omaavaan ja edulliseen langattomaan teknologiaan, jossa verkkoratkaisut perustuvat ensisijaisesti mataliin tiedonsiirtonopeuksiin. Vaikka IEEE 802.15.4 on langattomien sensoriverkkojen näkökulmasta erittäin tärkeässä asemassa, se sisältää kuitenkin OSI-protokollapinon mukaiset määritykset vain fyysiselle kerrokselle ja MAC-kerrokselle. IEEE 802.15.4-standardin pohjalle rakentuu kuitenkin useita laajemmin määritettyjä standardeja, kuten 6LoWPAN, ZigBee ja Wireless HART, joissa on keskitytty ylempien OSI-kerrosten määrittelyyn. [8, s.8]

Alkuperäinen IEEE 802.15.4-2003 -standardi [19] tukee 868 MHz:n ja 915 MHz:h taajuusalueiden lisäksi myös globaalia 2.4 GHz:n ISM-taajuutta. Siinä alimpaan taa-

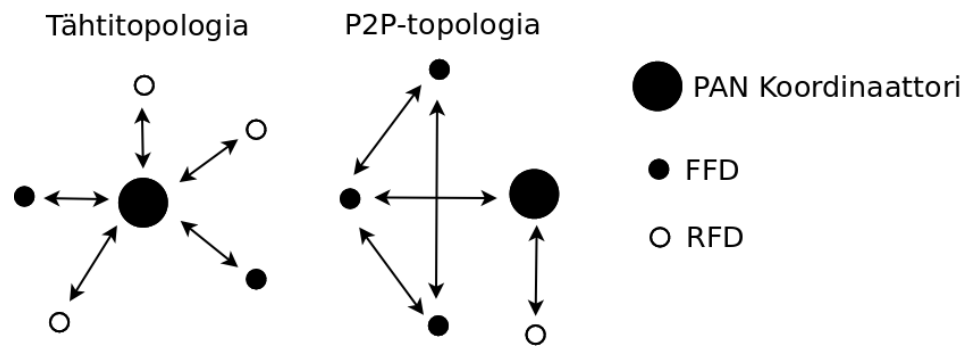


Kuva 3.2: IEEE 802.15.4-2003 taajuusalueet ja kanavat Tenninaa et al. [44, s.8] mukailleen.

komentokehykset. [8, s.10]

IEEE 802.15.4:n loogisten laitteiden jaottelu kattaa PAN-koordinaattorin, koordinaattorin ja verkon pelkistetyimmän laitetypin, joka ei lainkaan suorita verkon edistyneimpiä toimintoja, kuten reititystä. Se kykeneekin operoimaan verkossa vain koordinaattorien välityksellä. PAN-koordinaattori sen sijaan on sensoriverkon keskeisin laitetyyppi, sillä se vastaa verkkoalueen määrittämisestä. Se voi myös toimia yhdyskäytävänä hallinnoimansa sensoriverkon ja muiden verkkojen välillä. Koordinaattorit kykenevät keskinäiseen reititysyhteistyöhön, mutta sen lisäksi ne toimivat merkittävässä roolissa myös sensoriverkon itsenäisessä järjestäytymisessä. Näiden laitetyyppien erilaisista resurssivaateista johtuen ne voidaan jakaa joko FFD-laitteisiin, jotka ovat niin sanottuja täyden toiminnon laitteita, tai RFD-laitteisiin, joiden toiminnallisuudet ovat rajatummalla. Käytännössä nämä eroavat toisistaan siinä, että FFD-laitteet kattavat täydet MAC-kerroksen palvelut. Tuetut IEEE 802.15.4:n verkkotopologiat ilmenevät kuvasta 3.3. [22, s.49]

Laajalle levittäytyneissä verkoissa viestinvälityksen tehokkuutta voidaan edesauttaa toimivin sensoriverkon sisäisin reititysmenetelmin. Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että sensorinoodit – omien toimintojensa ohella – myös välittävät eteenpäin muilta noodeilta saapuvaa dataa. Tähän IEEE 802.15.4 -standardin mukaiset FFD-laitteet kykenevät. Reititystehtävät asettavat kuitenkin omat haasteensa niitä suorittaville noodeille. Lisääntyneet prosessointi- ja verkkotoimintovaatimukset heijastuvat suoraan muun muassa sellaisiin tekijöihin, kuten laitteiden tekniseen



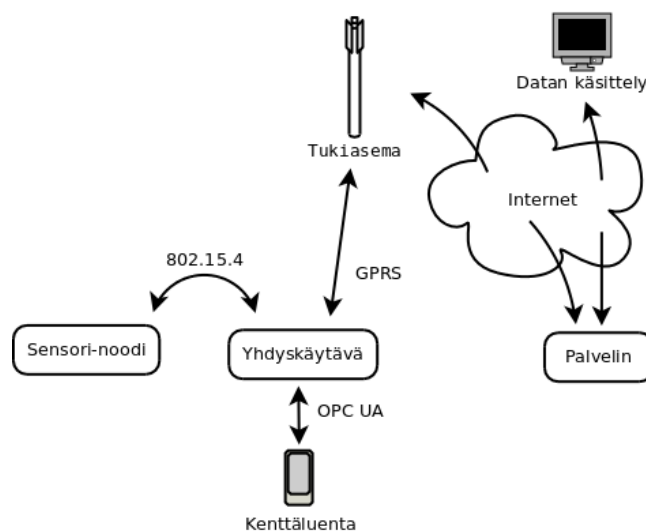
Kuva 3.3: IEEE 802.15.4 verkkotopologiat Kohvakan et al. [22, s.49] mukaan.

kompleksisuuteen ja niiden virrankulutukseen. Heterogeenisesti levittäytyneissä WSN-verkoissa ei myöskään voida taata sitä, että reitityksen aiheuttama lisäkuormitus leviäisi tasaisesti eri nooidien kesken.

4 Pilottijärjestelmä

Tässä luvussa esitellään aluksi pilottijärjestelmän tekniset yksityiskohdat sekä tutustutaan pilottijärjestelmän asennuympäristöön ja sen kenttäasennuskuvaukseen. Tämän jälkeen tässä luvussa esitetään paineantureiden kalibrointimittaukset, sensorinoodien virrankulutusmittaukset, sensorinooodeissa käytettävä paristoteknologia ja sensorinoodien elinikäennusteet, asennetun sensoriverkon toimintaan liittyvät datasarjat sekä niihin pohjautuvat havainnot ja tulkinat.

Pilottijärjestelmässä sensorinoodit välittävät mittaushavaintonsa IEEE 802.15.4-verkko-protokollaan tukeutuen suoraan yhdyskäytävälle. Pilottijärjestelmässä yhdyskäytävä välittää sille saapuvat mittaushavainnot mobiiliverkon välityksellä Internetin ylitse dedikoidulle palvelimelle. Tämän palvelimen tietokannassa olevia datasarjoja voidaan tarkastella tarkoitusta varten laaditun verkkosivuston kautta, joka mahdollistaa haluttujen datasarjojen tarkastelun graafisina kuvaajina sekä niiden lokaalin tallennuksen CSV-tiedostoformaattissa. Sensoriverkon yhdyskäytävä toimii myös itsessään palvelinlaitteena sillä se sallii kentällä tehtävän M2M-kommunikaation minkä tahansa OPC UA -yhteensopivan laitteen kanssa. Pilottijärjestelmän verkkoarkkitehtuuri on esitetty kuvassa 4.1



Kuva 4.1: Verkkoarkkitehtuuri.

4.1 Laitteisto

4.1.1 Yhdyskäytävä

Yhdyskäytävä pohjautuu Raspberry Pi 3 Model B -kehitysalustaan, joka on Broadcom BCM2837 -piirisarjaan perustuva yhden piirilevyn tietokone [34]. Yhdyskäytävä hyödyntää suoraa verkkovirtaa, mutta se on varustettu myös varavirtalähteellä, joka kykenee pitämään yhdyskäytävän toiminnassa myös mahdollisten sähkökatkosten aikana. Yhdyskäytävässä käytetyn kehitysalustan virrankulutus on laitedokumentation [35] mukaan noin 700 mA, kun liitettyjen lisälaitteiden virrankulutusta ei huomioida. Yhdyskäytävän virrankulutukseen vaikuttavat kuitenkin – erilaisten muunnos- ja siirtohäviöiden ohella – myös järjestelmään kytketyt erillisverkkoratkaisut, jotka koostuvat 802.15.4-verkon osalta Atmelin AT86RF212-radiopiiristä ja mobiiliyhteyksien osalta ZTE:n USB-mobiiliverkkosovittimesta.

Yhdyskäytävälle ei ole tehty virrankulutusmittauksia, koska se on asennuskohteessaan kytketty suoraan verkkovirtaan, eikä laitteen edellyttämä virrankulutus ole tällöin sovelluksen kannalta samaan tapaan merkittävässä asemassa, kuin litiumparistojen varassa toimivissa sensorinooodeissa. Kuvasta 4.2 on nähtävissä yhdyskäytävän komponenttien kotelointi- ja sijoitusratkaisut. Alla esitetään yhdyskäytävän tärkeimmät tekniset ominaisuudet:

- Ensisijainen virtalähde: Verkkovirta
- Varavirtalähde: Lyijyakku (12V, 5.0 Ah)
- Kehitysalusta: Raspberry Pi 3 Model B – yhden piirilevyn tietokone;
 - Piirisarja: Broadcom BCM2837
 - CPU: ARM Cortex-A53 1.2 GHz, 64-bit
 - RAM: 1 Gt
 - Verkkoyhteydet: 10/100 Ethernet, 802.11n, Bluetooth 4.1 ja BLE. [36]
- Käyttöjärjestelmä: Raspbian 32-bit
- 802.15.4-sensoriverkko: Atmelin AT86RF212-radiopiiri
- Mobiiliverkko: ZTE:n USB-sovitin



Kuva 4.2: Yhdyskäytävä asennuspaikassaan.

4.1.2 Sensoriverkko

Sensorinoodien ja yhdyskäytävän välinen langaton verkko pohjautuu IEEE 802.15.4 -standardiin. Sekä sensorinoodissa että yhdyskäytävässä käytetään samaa Atmelin AT86RF212-radiopiiriä, joka on suunniteltu IEEE 802.15.4 -verkkostandardin mukaisesti verkkoratkaisuihin. Sensorinoodien tapauksessa kyseinen radiopiiri on integroitu suoraan noodeissa käytettyyn ZigBit 900 -moduuliin. AT86RF212-radiopiiri tukee Euroopan vapaan ISM-radiotaajuuden (863–870 MHz) lisäksi myös Kiinassa käytettävää 779–787 MHz:n taajuusaluetta ja vastaavasti Pohjois-Amerikassa käytettävää 902–928 MHz:n taajuusaluetta. [6]

Atmelin AT86RF212-radiopiiri tukee IEEE 802.15.4 -standardissa määriteltyä BPSK-modulointia 20 ja 40 kbit/s nopeuksilla ja O-QPSK-modulointia 100 ja 250 kbit/s nopeuksilla. Tämän lisäksi sensoriverkon laitekannassa käytettävässä radiopiirissä voidaan hyödyntää erillisiä patentoituja tiedonsiirtomenetelmiä, joiden avulla on ilmoitettu suurimmillaan saavutettavan jopa 1000 kbit/s -tiedonsiirtonopeudet. [6]

Langattoman viestiliikenteen salaus on ensiarvoisen tärkeässä asemassa luonnollisesti myös langattomien sensoriverkkojen sovellusratkaisuissa. Laitteissa, joissa käytettävät mikrokontrollerit ovat tyypillisesti mahdollisimman vähävirtaisia ja täten myös prosessointinopeuksiltaan varsin rajallisia, niin ohjelmistopohjaiset salausmenetelmät eivät ole erityisen käyttökelpoisia niihin liittyvien raskaiden prosessointivaatimusten johdosta. Tätä silmällä pitäen AT86RF212-radiopiiri sisältää rautatasolla toteutetun tuen 128-bittiselle AES-lohkosalausmenetelmälle [6].

AT86RF212-radiopiirin suurinta maksimikantavuutta ei ole ilmoitettu valmistajan tuotekohtaisessa dokumentaatiossa, mutta samaa radiopiiriä käyttävän ZigBit 900 -moduulin radion maksimikantaman on ilmoitettu olevan yli 6 kilometriä, kun lähettimen ja vastaanottimen välillä vallitsee suora näköyhteys, mutta tämä oletettavasti edellyttää tällöin sitä, että käytössä on suurin mahdollinen lähetysteho, joka on ZigBit 900 -moduulin tapauksessa 11 dBm [7]. On hyvä huomioida, että mitä suurempia lähetystehoja tiedonsiirto eri laitteiden välillä edellyttää, niin sitä suurempaa on myös radioliikenteeseen liittyvä virrankulutus. AT86RF212-radiopiirin teknisessä dokumentaatiossa ilmoitetut virrankulutustiedot ilmenevät alla olevasta taulukosta 4.1.

Taulukko 4.1: AT86RF212-radiopiirin virrankulutusominaisuudet valmistajan tuotetietojen [6] mukaan.

Toiminta	Virrankulutus
Radiovastaanotto	9.2 mA
Radiolähetys (5 dBm)	17 mA
Virransäästötila	0.2 μ A
Radiopiirin käyttöjännite: 1.8–3.6 V	

4.1.3 Sensorinoodit

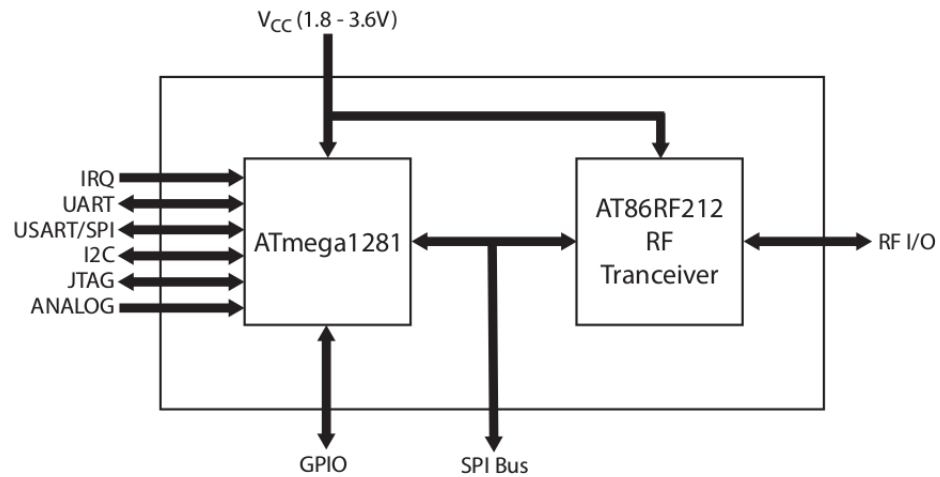
Sensorinoodit pohjautuvat Atmelin ZigBit 900 (ATZB-900-B0) -moduuliin. ZigBit 900 koostuu ATmega1281V-mikrokontrollerista ja AT86RF212-radiopiiristä. Kyseinen ATmega1281V-mikrokontrolleri toimii 4 MHz:n kellotaajuudella ja siinä on 8 kilotavua RAM-muistia. Mikrokontrollerin Flash-muistin koko on 128 kilotavua ja EEPROM-muistin määrä on 4 kilotavua. [7]

Taulukko 4.2: ZigBit 900:n virrankulutusominaisuudet valmistajan tuotetietojen [7] mukaan.

Toiminta	Virrankulutus
Radiovastaanotto	15 mA
Radiolähetys (5 dBm)	20 mA
Virransäästötila	6 μ A
Moduulin käyttöjännite: 1.8–3.6 V	

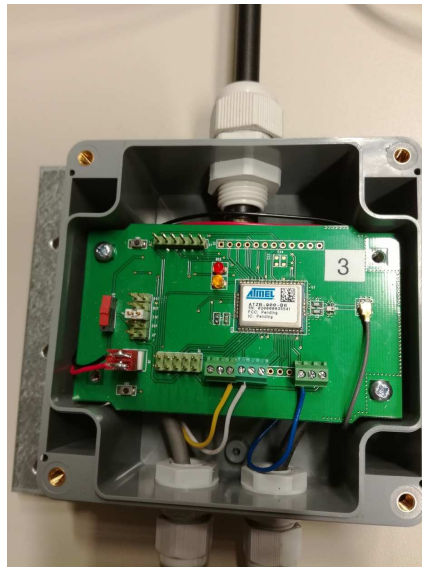
ATmega1281-mikrokontrollerin ja AT86RF212-radiopiirin välinen kommunikointi tapahtuu SPI-väylän kautta, kuten alla olevasta ZigBit 900-moduulin lohkokaaviosta 4.3 voidaan havaita. Ulkokäyttöön soveltuen ZigBit 900-moduulin operationaalinen toimintalämpöalue ulottuu -40 celsiusasteesta +85 celsiusasteeseen [7].

Sensorinoodi saa virtansa erillisestä paristokotelosta, jossa on kaksi rinnankytkettyä 3.6 voltin litiumparistoa, joiden yhteenlaskettu nimellinen maksimikapasiteetti on valmistajan ilmoittamien tietojen mukaan 17 Ah. Kuvassa 4.4 on koteloitu sensorinoodi, jonka kansiosa on poistettu. Kyseisestä kuvasta on havaittavissa ZigBit 900 -moduuli, joka rautatasolla vastaa noodin keskeisimmistä toiminnoista, kuten tiedon käsittelystä ja sen siirrosta radioteitse. Sensorinoodin yläosaan on kiinnitetty langattomissa yhteyksissä käytettävä dipoli-antenni ja sensorinoodin alaosaan on paineanturin sekä erillisen paristokotelon kaapelointien tuloliitännät.



Kuva 4.3: ZigBit 900 moduulin lohkokaavio valmistajan tuotetietojen [7] mukaan.

Sensorinooideissa käytetään 0 dBm:n lähetystehoä, jolloin pelkän ZigBit 900 -moduulin virrankulutuksen tulisi edellä esitettyihin valmistajan tuotetietoihin perustuen olla radiolähetysten aikana alle 20 milliampeeria. Sensorinoodien kokonaisvirrankulutus muodostuu ZigBit 900 -moduulin ohella myös siihen liitetystä muusta tekniikasta. Sensorinoodien virrankulutukseen tutustutaan tarkemmin luvussa 4.5.

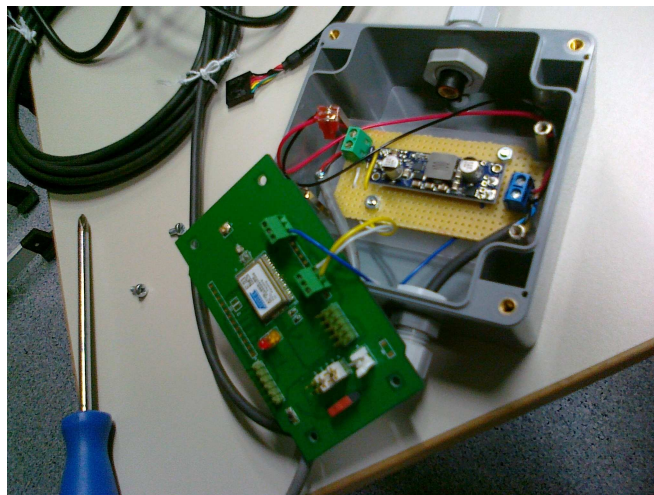


Kuva 4.4: Sensorinoodi.

Sensorinoodit mittaavat vedenpinnan korkeuksia Gemsin 2200-sarjan painean-

turilla. Kyseisen paineanturin ympäristön ilmanpaineeseen suhteutettu mittausalue on 0–1 baaria. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että tällä paineanturilla voidaan mitata maksimissaan noin 10-metrinen vesipatsas. Paineanturi vaatii vähintään 7 voltin käyttöjännitteen, mutta sensorinoodeissa sille tarjotaan kuitenkin ilmoitettua minimivaatimusta suurempi 9 voltin käyttöjännite. Kyseisen paineanturin maksimi-jännite on 35 voltia. Koska sensorinoodin 3.6 voltin litiumparistot ovat rinnankytketyt, niin jännite joudutaan erikseen korottamaan paineanturin jännitevaatimukseen sopivaksi. Tämä tehdään sensorinoodeihin integroidun step-up-konvertterin avulla. Step-up-konvertteri aktivoidaan tarpeen mukaan, eli vedenkorkeusmittaus-ten ajaksi, erillisellä MOSFET-transistorilla. Paineanturin ulostulosignaali on 4–20 mA. [13]

Sensorinoodeihin on myös integroitu paristojännitteen monitorointi. Monitorointi on toteutettu siten, että moduulin ADC-pinniin ohjattu paristojännite alennetaan vastuksin ADC:lle soveltuvaan jännitearvoon 0–1.1 V. Jännitemittauksen jälkeen saadut ADC-arvot voidaan konvertoida laskennallisesti pariston todellista ulostulojännitettä vastaaviksi. Paristojännitteet lähetetään mitattujen vedenkorkeuksien ohessa yhdyskäytävälle. Noodien paristojännitteitä käsitellään kattavammin luvussa 4.8. Alla olevasta kuvasta 4.5 ovat havaittavissa yllä esitetyt ja sensorinoodin kokoonpanovaiheessa ZigBit 900 -moduulin alle jäävät komponentit.



Kuva 4.5: ZigBit 900 -moduulin alle asennusvaiheessa jäävä step-up-konvertteri.

4.2 Asennusympäristö

Sensorinoodit asennettiin vesivoimalaitosta vierustavaan patorinteeseen ja yhdyskäytävä puolestaan asennettiin vesivoimalaitoksen edustan aidatun muuntaja-alueen ulkopuolella sijaitsevaan linjapylvääseen, josta saatiin myös yhdyskäytävän vaatima verkkovirta. Yhdyskäytävä sijaitsee noin 50–60 metrin päässä rinneasenteisista sensorinooodeista. Sensorinoodien ja yhdyskäytävän välillä vallitsee suora näköyhteys, joten laitteiden väliseen radioliikenteeseen ei myöskään kohdistu radioyhteyksiä varjostaviin konstruktioihin liittyviä ongelmia. Kuvasta 4.6 on nähtävissä asennuskohteen karttamuotoinen ympäristökuvaus ja asennettujen laitteiden sijainnit.



Kuva 4.6: Asennusympäristön karttakuvaus. (Koostettu Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan 5/2017 aineistosta: Creative Commons 4.0 [9].)

Vesivoimalaitoksen turbiinin ja generaattorin sähköntuotanto sekä sähkön muunto- ja siirtolinjat voivat mahdollisesti aiheuttaa jonkin verran interferenssiä sensorinoodien ja yhdyskäytävän välisen radioliikenteeseen, sillä sensoriverkko sijaitsee niiden välittömässä läheisyydessä. Asennusympäristöä voidaan näin ollen pitää jokseenkin haasteellisena radioympäristönä, vaikkakaan näiden mahdollisten häiriölähteiden vaikutusta sensoriverkon käyttämään taajuusalueeseen ei kuitenkaan ole

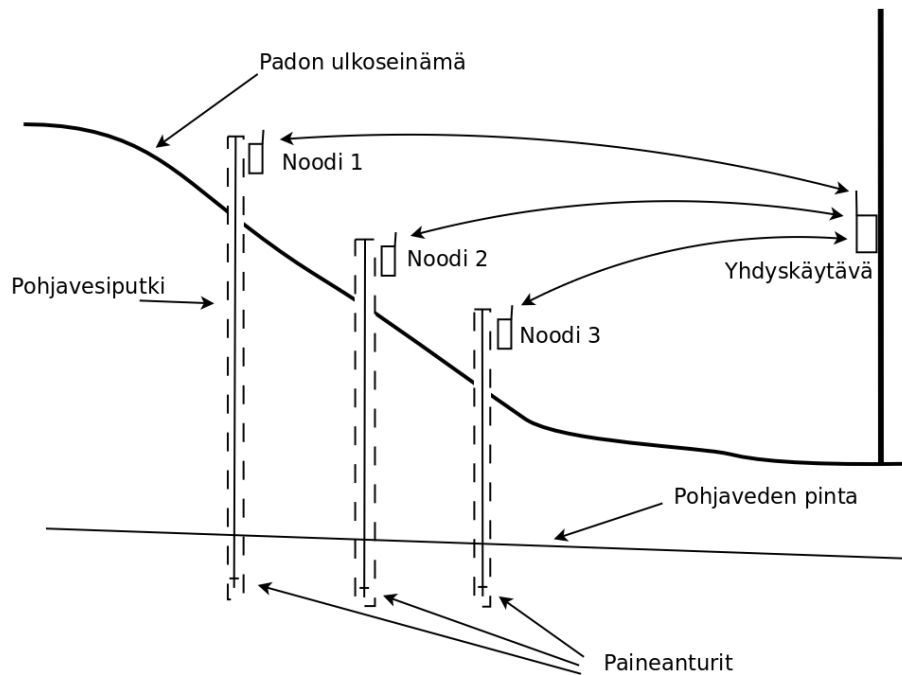
pyrityt todentamaan erikseen suoritettavin mittauksin. Laitteasennusten jälkeen sensorinoodien ja yhdyskäytävän välisen viestinnän on kuitenkin todettu toimivan ongelmattomasti. Kuvasta 4.7 on havaittavissa aidattu muuntaja-alue. Kyseisen kuvan oikeasta reunasta on myös nähtävissä linjapylväs, johon yhdyskäytävä on kiinnitetty.



Kuva 4.7: Vesivoimalaitoksen muuntaja ja kantaverkkoon kytkeytyvät voimalinjat.

4.3 Asennuskuvaus

Vesivoimalan patovalli sisältää jo entuudestaan lukuisia pohjavesiputkia, joista pohjavesien korkeuksien vaihteluita ja vesistöalueen hydrologista tilaa on kyetty seuraamaan. Vesivoimalan välittömässä läheisyydessä sijaitsevia pohjavesiputkia käytettiin pilottisovelluksen asennuskohteina. Sensorinoodit asennettiin patoseinämään alla olevan kuvan 4.8 osoittamalla tavalla.



Kuva 4.8: Asennuskuvaus.

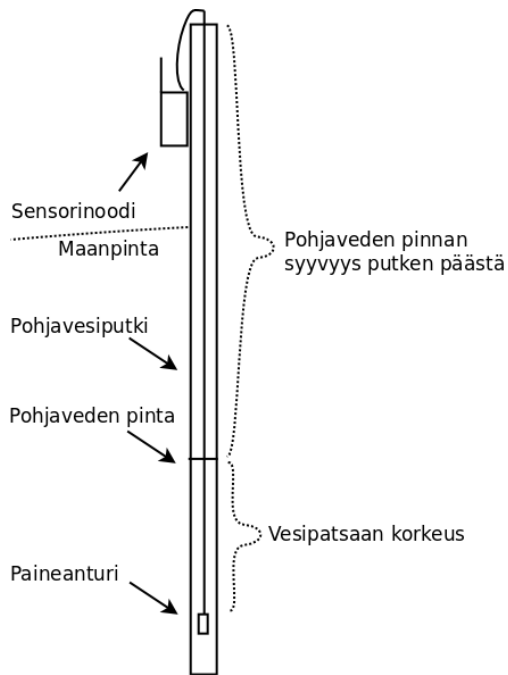
Kuvasta 4.9 on havaittavissa kenttäasennettu sensorinoodi. Kyseinen kuva osoittaa, kuinka sensorinoodi ja siihen kytketty erillinen paristokotelo on kiinnitetty suoraan patoalueella entuudestaan olleeseen pohjaveden havaintoputkeen. Havaintoputkeen lasketun paineanturin kaapelointi on läpiviety havaintoputken kansiosasta siten, että havaintoputken sisäosa on eristetty luonnonympäristön ja sen vaihtelevien sääolosuhteiden vaikutuksilta.

Pilottijärjestelmään kuuluvan sensorinoodin asennus edellyttää, että havaintoputkikohtainen vedenpinnan korkeus tunnetaan ennen kuin paineanturi lasketaan pohjavesiputkeen. Kenttäasennusten yhteydessä pohjaveden pinnankorkeudet selvitetiin erillisellä pohjaveden pinnankorkeusmittarilla, jossa pohjavesiputkeen laskettavan mittanauhan päässä oli veteen reagoiva anturi, joka osoitti pohjavesikos-



Kuva 4.9: Kenttäasennettu sensorinoodi.

ketuksen äänimerkillä. Järjestelmän pohjavesimittausten osalta tämä tarkoittaa sitä, että kun pohjaveden havaintoputkikohtainen pinnankorkeus tunnetaan, niin kenttäasennetun sensorinoodin ilmoittaman vesipatsaan korkeus voidaan jatkossa korreloida tämän tunnetun pohjaveden ensihavaintokorkeuden kanssa. Eli, mikäli painanturi olisi alkujaan asennettu siten, että sen yläpuolella on tunnetun korkuinen vesipatsas ja pohjaveden pinnankorkeus on asennuksen yhteydessä selvitetty ja kirjattu osaksi järjestelmän toimintaa, niin jatkossa kun painanturin yläpuolisen vesipatsaan korkeus muuttuu, niin pohjaveden pinnankorkeuden sen hetkinen todellinen taso voidaan laskea asennushetkisten vedenpinnan korkeustietojen ja havaitun muutoksen perusteella. Alla olevasta pohjavesiputken poikkileikkauksevasta 4.10 on havaittavissa asennusaikaisesti kirjattavat pohjaveden pinnankorkeuden laskentamuuttujat.



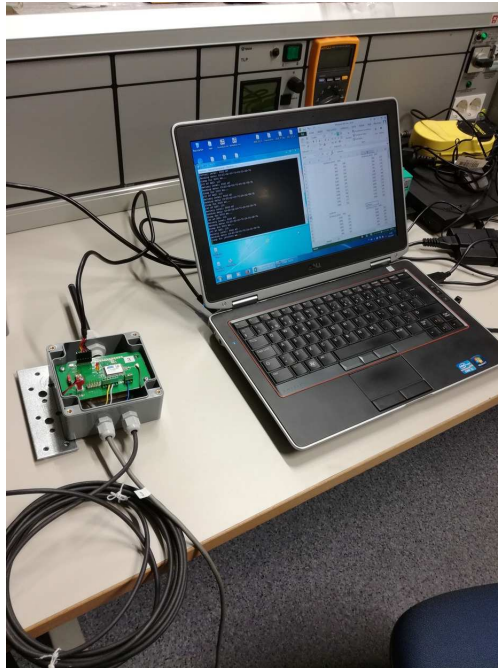
Kuva 4.10: Sensorinoodiasenteisen pohjavesiputken läpileikkaus.

4.4 Kalibrointimittaukset

Sensorinooideissa käytettäville paineantureille tehtiin kalibrointimittaukset Centria-ammattikorkeakoulun laboratoriossa. Antureiden kalibrointimittauksilla kyetään tuottaa kullekin anturille soveltuvat kalibrointi-arvot, jotta sensorinoodien tuotta-

ma mittausarvot olisivat mahdollisimman tarkkoja. Kalibrointimittauksilla varmistetaan myös antureiden oikea toiminta ja niihin liittyvän mittausvirheen suuruus.

Kalibrointimittaukset suoritettiin siten, että kalibroittavat anturit sijoitettiin kukin vuorollaan tarkoitusta varten laadittuun havaintoputkeen, jossa olevaa vesimäärää voitiin säädellä kontrolloidusti. Havaintoputkessa olevan vesipatsaan korkeutta korotettiin aluksi portaattain 13 eri korkeudelle 100–2500 millimetrin havaintovälillä 200 millimetrin korotuksin. Kun korkein tavoitekorkeus oli saavutettu, niin havaintoputkessa olevaa vesimäärää laskettiin portaistetusti 5 eri korkeudelle 500 millimetriä kerrallaan, kunnes alin mitattava tavoitekorkeus oli jälleen saavutettu. Jokaiselta eri tarkastelukorkeudelta kirjattiin ylös havaintoputkessa olevan vesipatsaan todellinen korkeus ja anturin niistä tuottama ADC-arvo sekä vesipatsaan korotus- että laskuvaiheessa.

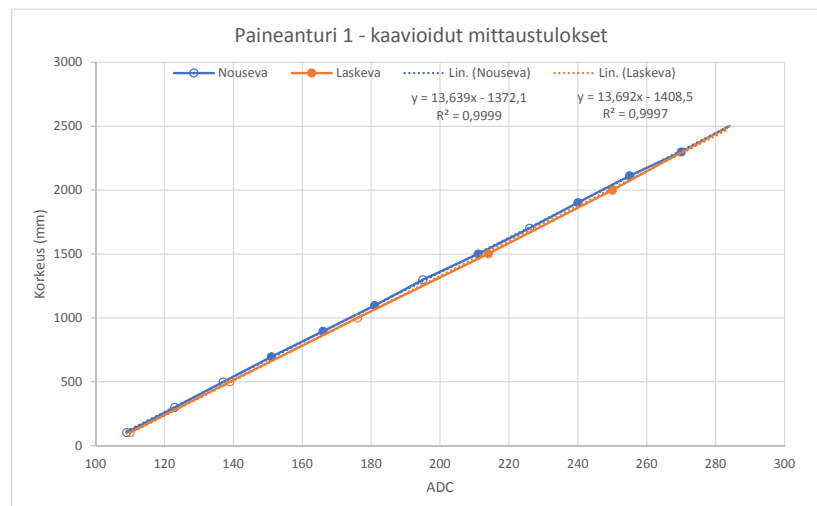


Kuva 4.11: Vesipatsaan korkeuksien ja ADC-arvojen kirjaaminen.

Kirjatuista tuloksista laadittiin paineanturikohtaiset pistekaaviot, joihin myös kuvattiin kaaviosta lasketut regressioyhtälöt ja niiden seliteasteet (R^2) sekä nousevalle että laskevalle havaintosarjalle. Saatujen regressioyhtälöiden avulla laskettiin regressiosuorien prosentuaalipoikkeamat laskevien ja nousevien sarjojen välille 9-bittisen ADC:n täydelle vaihteluvälille 0–511.

Kaavioista 4.12 ja 4.13 ilmenevät ensimmäisen kalibrointimittauksen kohteena

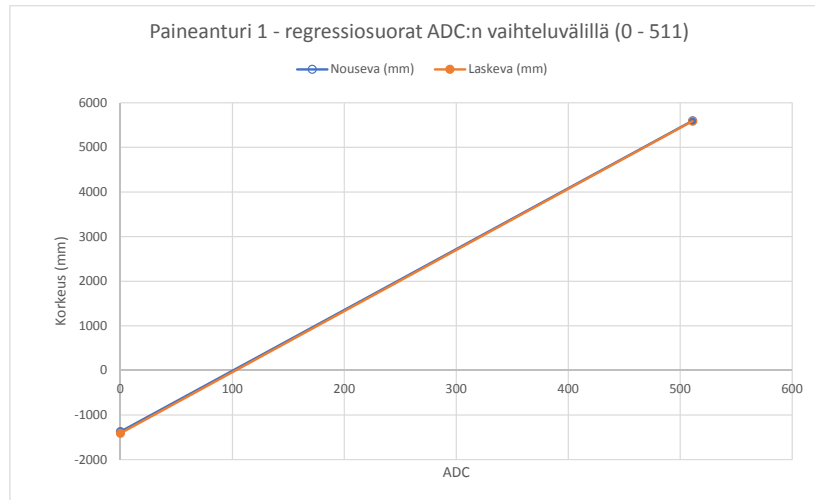
olevan paineanturin kaavioidut mittaustulokset ja havaintosarjojen pohjalta lasket-
 tujen regressiosuorien tarkastelukaaviot. Kaavioista voidaan havaita, että painean-
 turi 1:n laskennallisilla regressioyhtälöillä on hyvin korkea selitysvaiva – nousevan
 sarjan R^2 arvo on 0.9999 ja laskevan sarjan R^2 arvo on 0.9997. Taulukosta 4.12 il-
 menee, että nousevien ja laskevien havaintosarjojen välillä ei esiinny pilottijärjestel-
 män näkökulmasta merkittävää hystereesiä. Laskevan ja nousevan havaintosarjan
 regressiosuorien keskiarvopoikkeama paineanturi 1:n osalta noin 0.35 prosenttia.
 ADC-arvolla 0 poikkeama on suurin, eli noin 0.65 prosenttia ja suurimmalla ADC-
 arvolla poikkeama on vain noin 0.04 prosenttia.



Kuva 4.12: Paineanturi 1 – kaavioidut tulokset.

Paineanturi 2:n nousevan sarjan regressioyhtälön R^2 arvo on 1, eli havaintopis-
 teiden ja regressiosuoran välinen yhteys on erittäin suoraviivainen. Paineanturi 2:n
 laskevan sarjan R^2 arvo on puolestaan 0.9998. Paineanturi 2:n laskevan ja nousevan
 havaintosarjan regressiosuorien keskiarvopoikkeama on noin 0.38 prosenttia eron
 ollessa pienimmällä ADC-arvolla noin 0.74 prosenttia ja vastaavasti suurimmalla
 ADC-arvolla noin 0.03 prosenttia.

Paineanturi 3:n tapauksessa sekä nousevan että laskevan sarjan regressioyhtä-
 löiden R^2 selitearvo on 0.9999. Paineanturi 3:n osalta laskevan ja nousevan sarjan
 regressiosuorien keskiarvopoikkeama on noin 0.54 prosenttia. Tällöin ero pienim-
 mällä ADC-arvolla on noin 1.05 prosenttia ja suurimmalla ADC-arvolla ero on noin



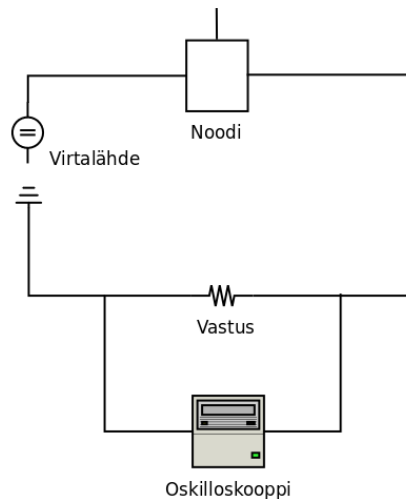
Kuva 4.13: Paineanturi 1 – regressiosuorat.

0.03 prosenttia. Koska nousevaan sarjaan on sisällytetty laskevaan sarjaan verrattuna enemmän havaintopisteitä (nousevassa sarjassa 13 ja laskevassa sarjassa 6), voidaan nousevan sarjan regressioyhtälöitä pitää näistä edustavimpana.

Koska pilottihankkeessa käytettävät paineanturit on otettu käyttöön jo noin 10 vuotta sitten, ja kun huomioidaan myös, ettei niiden ylläpitoon ole sovellettu säännöllistä huolto-ohjelmaa, voi niiden aiemman käyttöhistorian ja vaihtelevien toimintaympäristö- ja säilytysolojen olettaa muodostaneen joitain variaatioita niiden käytännön mittaus- ja toimintavarmuuteen. Suoritetut kalibrointimittaukset osoittavat, että antureiden tuloksissa esiintyy hieman hystereesiä. Tästä huolimatta paineanturit näyttävät reagoivan vesipatsaan korkeusmuutoksiin melko lineaarisesti ja erot nouseviin ja laskeviin sarjoihin pohjautuvien regressiosuorien välillä ovat suurimmillaan paineanturi 3:n tapauksessa noin prosenttiyksikön luokkaa. Suoritettujen mittausten perusteella kaikki kolme paineanturia kuitenkin toimivat pilottisovellukselle asetettujen toimintavaatimusten näkökulmasta hyväksyttävällä tavalla. Riittävän toimintatarkkuuden varmistamisen ohella on suoritettujen kalibrointimittausten avulla kyetty myös laatimaan kullekin paineanturille soveltuvat kalibrointiarvot.

4.5 Virrankulutusmittaukset

Virrankulutusmittaukset suoritettiin kahdelle eri noodille yliopistokeskus Chydeniuksen tiloissa. Virrankulutusmittauksissa käytettiin alla olevan kuvan 4.14 mukaista mittaussuunnitelmaa. Mittaukset suoritettiin HP:n Infinium-oskilloskoopilla, jonka kaistanleveys on 1.5 GHz ja näytteenottotaajuus 8 GSa/s. Mittauksessa käytetyn resistorin vastusarvo on 10 ohmia.

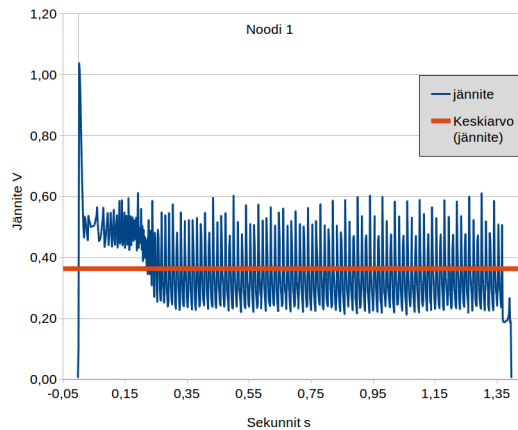


Kuva 4.14: Virrankulutusmittausten mittaussuunnitelma.

Kuvassa 4.15 esitetään sensorinoodi 1:n oskilloskooppimittausten tulokset. Kuvaajasta on havaittavissa sensorinoodin käynnistysvaiheessa ilmenevä hetkellinen virrankulutuspiikki, joka on kuvaajassa suuruudeltaan 1.038 V. Tämän jälkeen noodin virrankulutus keskimääräisesti laskee. Kuvaajasta on havaittavissa, että noin 0.25 sekuntia käynnistytyn jälkeen jännitearvoissa esiintyy huomattavan tiheää huojuntaa 200:n ja 600 millivoltin välillä, joka ilmeisesti aiheutuu paineantureita varten noodeihin asennetun step-up-konvertterin toiminnasta. Tämän sensorinoodin kokonaistoiminta-aika on noin 1.4 sekuntia ja jännitteen aritmeettinen keskiarvo on heräämis- ja unitilojen välisenä toiminta-aikana noin 364 millivolttia.

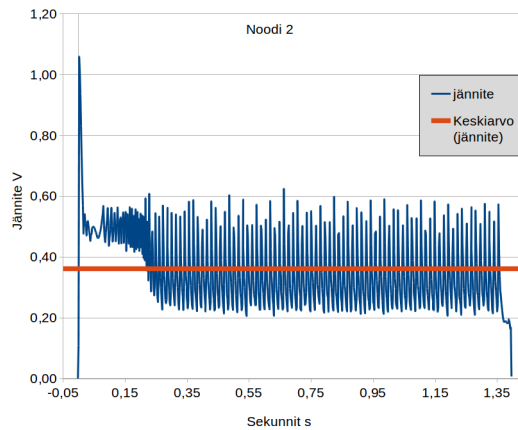
Kuvassa 4.16 esitetään sensorinoodi 2:n oskilloskooppimittausten tulokset. Esiitettyjen kuvaajien vertailusta ilmenee, että molempien sensorinoodien virrankulutusominaisuudet ovat pääosin melko samankaltaiset. Myös sensorinoodin 2:n toiminta-aika on noin 1.4 sekuntia. Keskimääräinen jännite on noin 361 millivolttia ja käynnistysvaiheessa esiintyvä maksimijännite 1.059 V.

Sensorinoodi 1:n virrankulutus on keskimääräiseen jännitearvoon pohjautuen



Kuva 4.15: Oskilloskoopin taulukoitu mittausdata noodille 1.

$\frac{364mV}{10\Omega} = 36.4mA$. Sensorinoodi 2:n virrankulutus on vastaavasti $\frac{361mV}{10\Omega} = 36.1mA$. Koska ZigBit 900 -moduulin virrankulutus jää 0 dBm:n lähetysteholla alle 20 milliampeeriin [7], voidaan sensorinoodeissa käytettävien erilliskomponenttien, kuten step-up-muuntimen sekä paineanturin ja erilaisten häviöiden virrankulutusosuu- den katsoa olevan yli 16 milliampeeria, eli lähes puolet sensorinoodin kokonaisvir- rankulutuksesta. Sensorinoodi 1:n mitattu virrankulutus unitilassa on 0.35 milliam- peeria ja sensorinoodi 2:n puolestaan 0.30 milliampeeria.



Kuva 4.16: Oskilloskoopin taulukoitu mittausdata noodille 2.

4.6 Noodin elinikä – pariston kapasiteetti

Sensorinoodeissa käytetään EVE-merkkisiä 3.6 voltin Li-SOCl₂ primääriparistoja, joiden nimellisvaraus on 8.5 Ah. Kukin sensorinoodit saa virtansa kahdesta rinnankytketystä paristosta. Pariston todellinen hyötykapasiteetti riippuu kuitenkin monesta eri tekijästä, kuten sille asetettavan kuormituksen suuruudesta, käyttölämpötilasta ja sensorinoodien toiminnallisesti vaihtelevista käyttöjaksoista. Pilottijärjestelmässä käytettävän pariston kapasiteetti – kuten myös sen tarjoama ulostulojännite – laskee merkittävästi kun kuormitus, eli virrankulutuksen suuruus kasvaa tai kun pariston operointilämpötila vaihtoehtoisesti laskee. Merkittävimmät kapasiteettivaikutukset ilmenevätkin näiden kahden eri tekijän yhteisvaikutuksissa. [11]

Sensorinoodeissa käytettävästä paristosta voidaan valmistajan tuotetietojen [11] mukaan hyödyntää +25 celsiusasteen lämpötilassa noin 7.2–8 Ah mikäli pariston keston arviointimenetelmänä käytettäisiin sensorinoodien maksimivirrankulutusta siten, että tämän kuormituksen oletettaisiin olevan jatkuvaa. Sensorinoodien toimintajaksot ovat kuitenkin maksimivirrankulutuksen suhteen pulssityyppisiä ja suurin osa niiden toiminta-ajasta kuluu virransäästötilassa. Noodien toimintaa kuvataan tarkemmin luvussa 4.7.

Koska keskimääräisen maksimivirrankulutuksen kokonaiskesto on sensorinoodien kuudella päiväkohtaisella aktiivisuussyklillä vain noin 8.4 sekuntia, joka vuositasolla tarkasteltuna vastaa kokonaisuudessaan vain noin 51 minuutin käyttöaikaa, niin tämä arviointimenetelmä ei ole sellaisenaan ja sensorinoodien reaaliympäristöihin suhteutettuna kovin hyödyllinen. Sensorinoodien virransäästötilan virrankulutus on puolestaan niin matalaa, että se ei itsessään vaikuta merkittävästi pariston hyötykapasiteettiin.

On todennäköistä, että sensorinoodien käyttöympäristön lämpötila muodostaa merkittävimmän yksittäisen pariston kapasiteettiin sitoutuvan vaikutustekijän. Toimintaympäristön lämpötilalla onkin hyvin suuri merkitys sensorinoodeissa käytetyn pariston tarjoamaan hyötykapasiteettiin. Esimerkiksi -30 celsiusasteessa ja 4 milliampeerin jatkuvalla virrankulutuksella pariston ilmoitettu kapasiteetti on 4 Ah. Mikäli jatkuva virrankulutus nousee samassa lämpötilassa 100 milliampeeriin, niin pariston tarjoama kapasiteetti on tällöin vain 1 Ah. Virrankulutuksen kasvu myös laskee pariston kapasiteettia sitä tehokkaammin, mitä matalammaksi pariston käyttölämpötilat käyvät. Operointilämpötilat vaikuttavat vastaavankaltaisesti myös paristojen tarjoamaan ulostulojännitteeseen, joka olisi esimerkiksi -30 celsiusasteessa 4 milliampeerin virralla 3.2V ja vastaavasti 100 milliampeerin virrankulutuksella

vain noin 2.4V. Purkuvirran suuruuden ja siitä seuraavan kapasiteetin alenemisen perusteella tämän paristotyypin voikin katsoa soveltuvan sellaisiin järjestelmiin, joiden virrankulutus on pääosin varsin matalaa, etenkin mikäli ne sijoitetaan luonnonympäristöihin. Kyseisen pariston suurin suositeltu yhtäjaksoinen purkuvirta onkin vain 150 milliampeeria. Lyhytkestoisen ja pulssimuotoisen purkuvirran suuruus voi kuitenkin olla jopa 300 milliampeeria. [11]

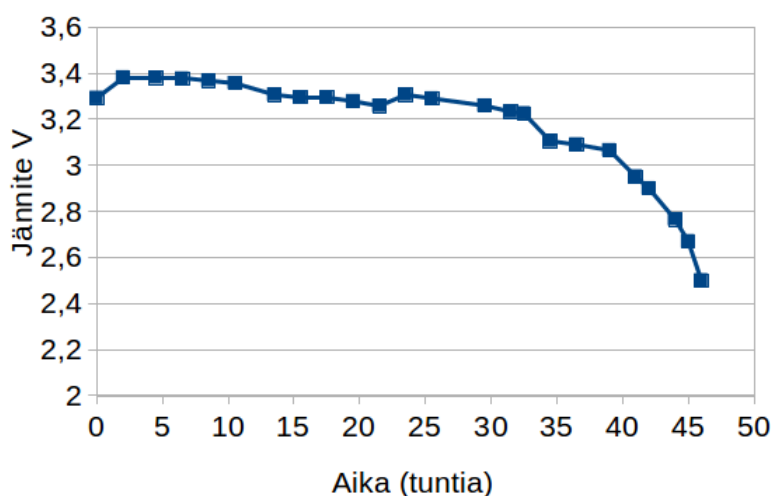
Pilottijärjestelmän asennuskohteen vuoden keskilämpötila on Ilmatieteen laitoksen vuosien 1981–2010 pitkän aikavälin aineiston mukaan noin 2–3 celsiusastetta [20], joka virransäästötilan virrankulutukseen suhteutettuna rajaisi yhden pariston teoreettisen hyötykapasiteetin noin 6 ampeerituntiin. Pilottijärjestelmän todellisessa asennusympäristössä saavutettava kapasiteetti lienee kuitenkin huomattavasti tätä alhaisempi, kun ympäristön reaaliset olosuhdevaihtelut ja noodien aktiivisuussykliä kuormitusvaikutukset huomioidaan. Paristotyypille soveltuva opeointilämpötila-alue on kuitenkin hyvin laaja alkaen -60 celsiusasteesta ja päättyen +85 celsiusasteeseen [11].

Pariston ennustetun hyötykapasiteetin kautta voidaan laskea siihen pohjautuva noodin teoreettinen elinikä. Noodien aktiivisuusajan suhteellinen osuus: $\frac{8.4s}{86400s} \times 100\% \approx 0.01\%$. Noodi 1:n mitattu virrankulutus aktiivitulassa 36.4 mA ja unitilassa 0.35 mA. Tällöin vuorokausittainen virrankulutus on eri toimintajaksoilla $T_{aktiivinen} = 36.4 \text{ mA} \times 0.0001 \times 24 \text{ h} = 0.08736 \text{ mAh}$ ja $T_{unitila} = 0.35 \text{ mA} \times 0.9999 \times 24 \text{ h} = 8.39916 \text{ mAh}$, joiden yhdistetty energiankulutus on $0.08736 \text{ mAh} + 8.39916 \text{ mAh} = 8.48652 \text{ mAh}$. Sensorinooodeissa käytetään kahta rinnankytkettyä litiumparistoa ja niiden vuoden keskilämpötilaan suhteutettu yhteiskapasiteetti on edellisessä kappaleessa esitetyn arvion perusteella noin 12 Ah. Tähän kapasiteettiarvoon perustuva noodien teoreettinen elinikä on tällöin $\frac{12000mAh}{8.48652mAh} \approx 1414$ vuorokautta eli noin 3.9 vuotta.

Sensorinooodeissa käytettävälle paristotyypille suoritettiin kuormitustestaus, jossa paristoa purettiin yhtäjaksoisella 100 milliampeerin virralla. Kuormitustestaus suoritettiin tavanomaisessa huonelämpötilassa. Mittaukset suoritettiin 5 perättäiselle vuorokaudelle jaksotettuna siten, että yhdessä vuorokaudessa suoritettun kuormituksen kokonaiskesto aika oli 6.5–11 tuntia. Mittaukset suoritettiin 1–4 tunnin välein tyypillisen mittausvälin ollessa 2 tuntia. Paristojännitteet mitattiin Fluken 83 III - yleismittarilla.

Kuvassa 4.17 esitetään pariston kuormitustestauksen tulokset. Kyseisestä kuvasta voidaan havaita kuormituksen aikasen paristojännitteen laskevan melko sään-

nönmukaisesti, vaikka ensimmäinen ja välittömästi kuorman kytkemisen jälkeen mitattu kuormitusjännite onkin suuruustasoltaan odotettua alhaisempi, joka antaisi ymmärtää, että kuormituksen lisääminen lepojännitteeseen tasaantuneeseen paristoon laskisi lyhyellä kytkennän jälkeisellä aikavälillä pariston jännitettä merkittävästi alemmaksi, kuin mihin se kuormituksen jatkuessa kuitenkin lopulta vakiintuu.



Kuva 4.17: Kuormitustestaus.

Li-SOCl₂-paristoissa onkin dokumentoitu ilmenevän kuvatun kaltaista käyttöönoton jälkeistä tasausviivettä suurilla kuormitusrvoilla, mutta tätä passivaatioilmiötä ei kuitenkaan pitäisi esiintyä, mikäli paristoa kuormitetaan jatkuvasti mikroampeeritasolla tai vaihtoehtoisesti riittävällä päivittäisellä pulssikuormituksella. Lämpötila ja pariston käyttämättömyyden kokonaissaika vaikuttavat kuitenkin passivaatioilmiön muodostumiseen. [42, s.4] Kyseinen ilmiö on kuitenkin hyvä huomioida, koska se voi merkittäväällä tavalla vaikuttaa pariston kapasiteetin käytettävyyssarvioinnissa sellaisissa sovelluskohteissa, joissa käyttö ei ole luonteeltaan jatkuvaa ja joissa paristot saattavat altistua varsin vaihteleville ääriämpötiloille.

Lisäksi kuvaajasta on myös havaittavissa, että kolmannen mittausvuorokauden tulokset aikavälillä 23.5–32.5 tuntia poikkeavat hieman suuruustasoltaan edeltävistä mittausarvoista. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, ettei kuormitustestausta suoritettu koneellisesti ilmastoidussa ja lämpösäädellyssä huonetilassa, jonka johdosta huonelämpötilassa esiintyi mahdollisesti hieman päivittäistä vaihtelua, joka puoles-

taan on hieman vaikuttanut vuorokausittaisiin jännitetasoihin.

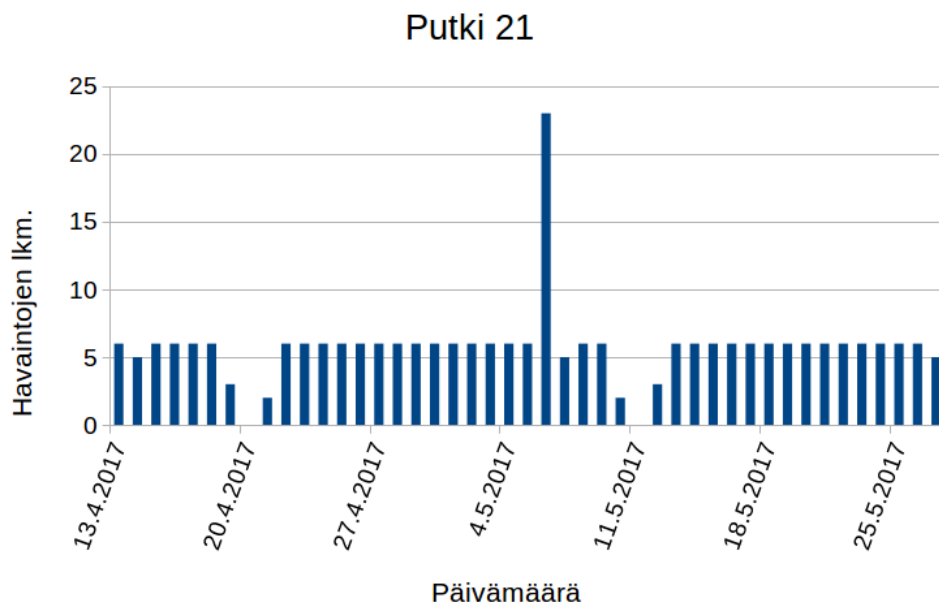
Kuormituksen aikainen jännitetaso on laskenut alle 3 volttiin jo 41 tunnin jälkeen. 46 tunnin jälkeen pariston jännite on enää vain 2.5 V, jossa pariston kapasiteetin voidaan valmistajan tuotetietojen [11] mukaan katsoa jo melkein täysin ehtyneen, vaikkakin pariston valmistaja sallii pariston purkamisen aina siihen saakka, kunnes kuormitusjännite laskee 2 volttiin. Kuormitustestauksen tulosten perusteella pariston käytännön kapasiteetin voidaan kuitenkin katsoa olevan – valmistajan tuotetietoihin suhteutettuna – odotusten mukainen.

4.7 Sensoriverkon toiminta

Pilottijärjestelmässä sensoriverkkoon liittyvä, eli asennuskohteessa aktivoitu noodit, kuuntelee radioliikennettä saadakseen yhdyskäytävältä synkronointiviestin, jota se lähettää jatkuvasti 5 sekunnin välein. Tämä synkronointiviesti sisältää sekä yhdyskäytävän verkko-osoitteen että globaalin ajan. Synkronointiviestin vastaanoton jälkeen, noodit suorittaa alustavan testimittausarjan, jossa veden korkeutta mitataan toistuvasti 10 sekunnin välein kokonaisuudessaan kahden minuutin ajan. Näiden alustustoimien jälkeen noodit siirtyy tavanomaiseen toimintatilaan, jossa noodit operoi säännöllisessä syklissä, jossa veden korkeusmittausta ja havaintojen eteenpäinlähetyksestä seuraa 4 tunnin unitila. Tähän sykliin liittyvässä tietojen lähetystapahtumassa noodit välittää mittaushavaintonsa yhdyskäytävälle. Noodit lähettää havaintonsa vain kerran syklittäistä mittaustapahtumaa kohden, eikä se odota kuittausviestiä yhdyskäytävältä lähettämäänsä viestiin, vaan se siirtyy välittömästi unitilaan heti viestin lähetysten jälkeen. Tämä tarkoittaa sitä, että mikäli viesti ei saavu yhdyskäytävälle, niin kyseisen syklin noodikohtainen mittaustiedot menetetään.

Kaaviot 4.18, 4.19 ja 4.20 esittävät vuorokausittaisien ja pohjavesiputkikohtaisten pohjaveden korkeusmittausten määrää, jotka on onnistuneesti viety yhdyskäytävän välityksellä pilottihankeessa käytetyn palvelimen tietokantaan 13.4.2017–27.5.2017. Mittaushavaintojen kuljetusprosessin ollessa onnistunut on noodeilta rekisteröityt tietokantaan vuorokauden aikana yhteensä 6 neljän tunnin välein lähetettyä mittaustapahtumaa. Järjestelmän asennuksen jälkeisessä toiminnassa noodikohtaiset lähetykset tapahtuvat kolmen putkiasenteisen noodin osalta muutaman minuutin etäisyydellä toisistaan. Vuorokausittaiset lähetystapahtumat alkavat näiden noodien osalta seuraavalla aikajaottelulla, kun lähetystapahtumat pyöristetään lähimpään tasatuntiin: 01:00, 05:00, 09:00, 13:00, 17:00 ja 21:00. Noodeissa ei ole RTC-kelloa,

joten lähetystapahtumien ajoitus tapahtuu yksinomaan noodien univaiheiden jaksoittamina, koska noodeja ei aikasynkronoida niiden aktivoitilustuksen jälkeen. Noodien sykli toistuu sellaisenaan, kunnes niiden paristovirtalähde ei enää kykene ylläpitämään niiden toimintaa.

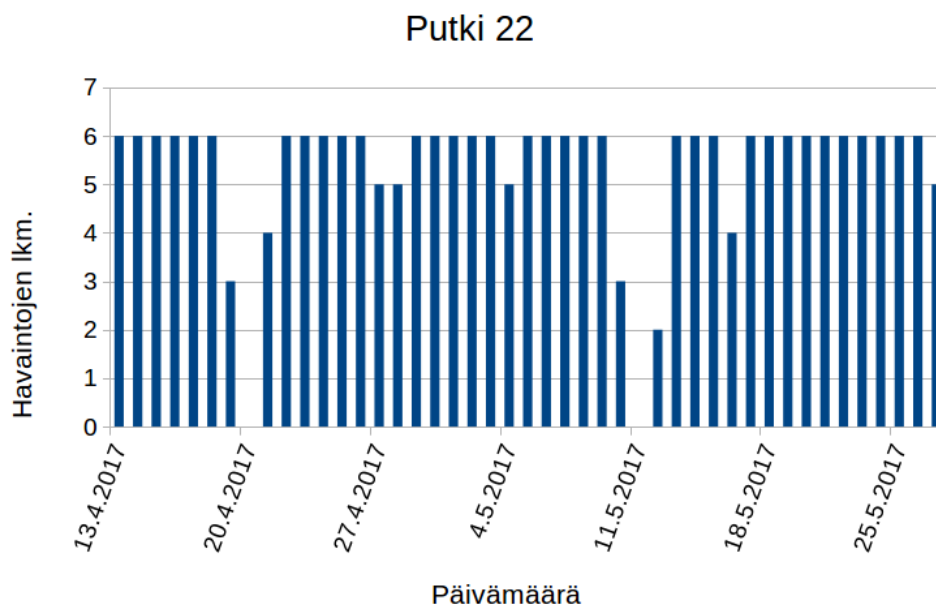


Kuva 4.18: Päivittäisten vedenkorkeusmittausten määrä havaintoputkesta nro 21.

Pohjavesiputki 21 on asennusrinteen ylin pohjavesiputki. Kahden alempana sijaitsevan pohjavesiputken sarjanumeroinnit nousevat järjestyksessä niiden suhteellisen sijaintikorkeuden mukaisesti. Näihin pohjavesiputkiin liitettyjen sensorinoodien tuottamissa havaintosarjoissa on yhdenmukaiset epäjatkavuudet aikaväleillä 19.–21.4.2017 ja 10.–12.5.2017.

Pohjavesiputken 21 osalta lähetykset katkevat 19.4.2017 klo 08:52 lähetetyn havainnon jälkeen ja jatkuvat jälleen 21.4.2017 klo 17:49. Tämän noodin unijakso on havaintosarjan katkeamisen aikana siirtynyt eteenpäin noin tunnilla. Muiden noodien lähetysojitukset ovat pysyneet lähes ennallaan myös havaintosarjakatkoksen jälkeen. Havaintoputkien 22 ja 23 havaintosarjat katkeavat ja jatkuvat lähes yhdenmukaisesti. Näiden noodien osalta lähetykset katkeavat 19.4.2017 noin klo 08:50 jälkeen ja jatkuvat 21.4.2017 noin klo 08:50.

Seuraavan havaittavan epäjatkavuuden osalta pohjavesiputki 21:n havaintosarjoissa on katkos joka alkaa 10.5.2017 klo 05:58 jälkeen ja päättyy 12.5.2017 klo 13:58.



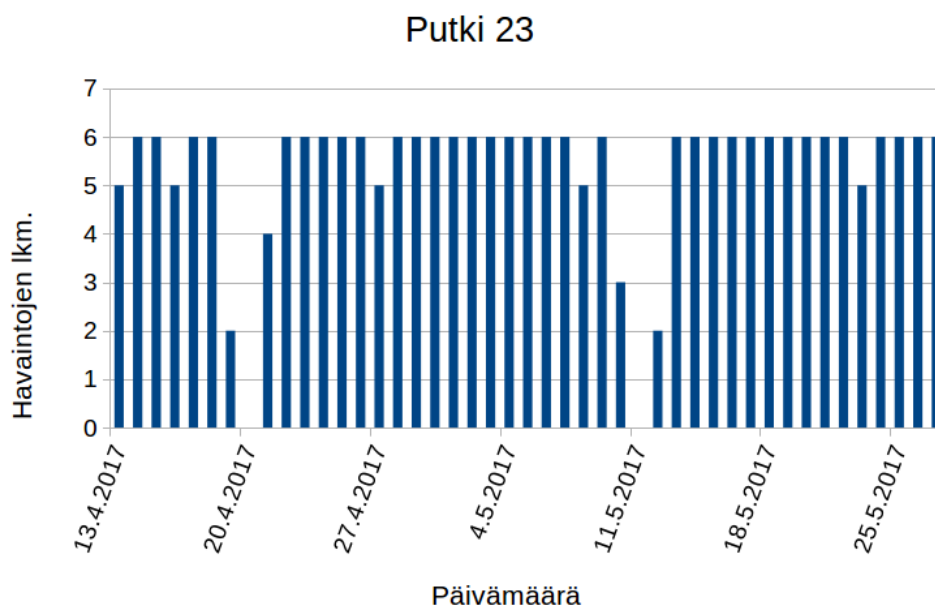
Kuva 4.19: Päivittäisten vedenkorkeusmittausten määrä havaintoputkesta nro 22.

Pohjavesiputkien 22 ja 22 osalta katkos havaintosarjoissa on jälleen varsin yhdenmukainen – se alkaa 10.5.2017 noin klo 08:55 jälkeen ja päättyy 12.5.2017 noin klo 16:55.

Pohjaveden korkeusmittausten ohella noodit välittävät eteenpäin myös niiden mittaamia paristojännitetietoja. On huomionarvoista, että näissä noodien ilmoittamissa jännitearvoissa havaintoja on tallentunut tietokantaan aikavälillä 19.4.–21.4.2017, jolloin pohjaveden korkeustietoja ei puolestaan ole tallentunut tietokantaan. Sen sijaan aikavälin 10.5.–12.5.2017 katkokset havaintosarjoissa koskevat yhtälailla sekä pohjaveden korkeus- että jännitehavaintoja. Sensoreiden ilmoittamia jännitehavaintoja käydään läpi tarkemmin luvussa 4.8.

Havaintosarjoissa esiintyneiden katkosten aiheuttajaksi ilmeni asiaa tutkittaessa palvelinpuolella vaikuttanut ohjelmistovirhe. Mikäli nämä edellä esitetyt ja kaikkien kolmen noodin havaintosarjoissa yhtäaikaisesti esiintyvät laajat katkokset jätetään tietokantaan tallentuneiden lähetysten tarkastelussa huomioimatta, on kullakin noodilta tallentunut tietokantaan tyypillisesti 5–6 lähetystä vuorokausittain. Tähän tarkastelumenetelmään perustuen vuorokausittaisten tietokantaan tallentuneiden lähetysten osuus on pohjavesiputken 21 tapauksessa noin 92 prosenttia sekä pohjavesiputkien 22 ja 23 tapauksissa noin 87 prosenttia. On hyvä huomioida, että

vaikka nämä yksittäiset havaintosarjakatkokset ovat voineet jäädä kirjautumatta tietokantaan – kun koko tiedonsiirtoketju huomioidaan – useistakin eri syistä johtuen, voi edellä mainittu ohjelmistovirhe – joko yksinomaan tai vain eräänä asiaan mahdollisesti vaikuttaneena osatekijänä – selittää myös näiden tapausten osalta niiden ilmenemistä.



Kuva 4.20: Päivittäisten vedenkorkeusmittausten määrä havaintoputkesta nro 23.

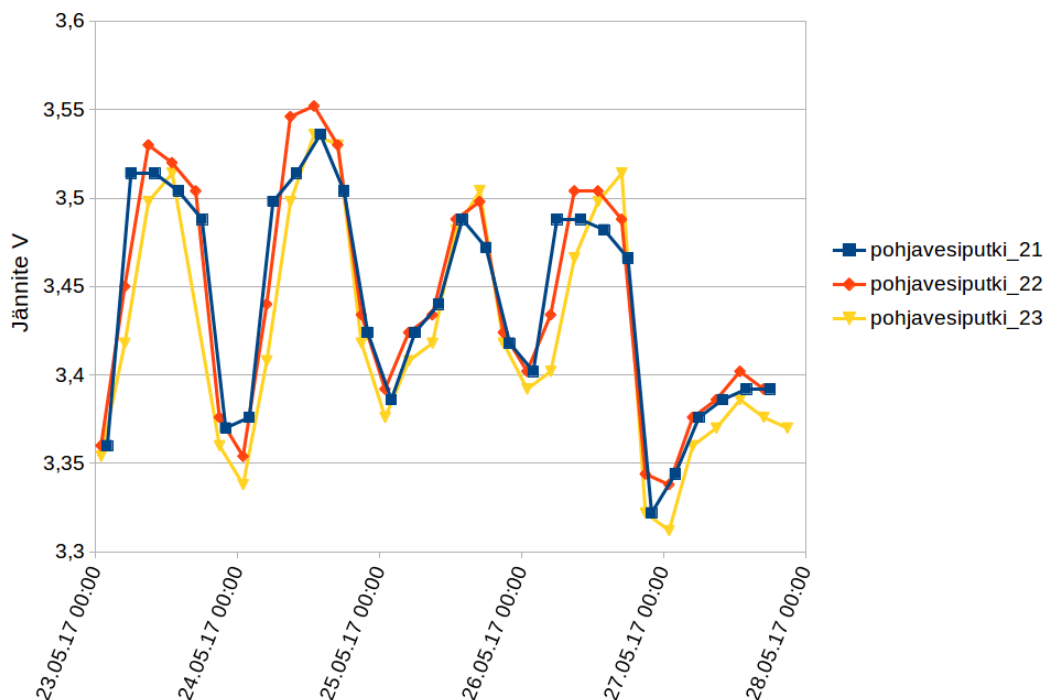
Tämän tarkastelujakson puitteissa noodien kelloissa tapahtui eteenpäinsiirtymää siten, että pohjavesiputken 21 kiinnitetyn noodin lähetysaika siirtyi eteenpäin 57 minuutilla 20.4. ja 7 minuuttia 6.5. Kyseisellä noodilla lähetysajat siirtyivät tarkastelujakson loppuun mennessä eteenpäin kokonaisuudessaan 69 minuutilla. Pohjavesiputken 22 tapauksessa noodin lähetysajat siirtyivät eteenpäin kokonaisuudessaan 3 minuutilla ja pohjavesiputken 23 tapauksessa lähetysajat edistivät seuranta-kauden loppuun mennessä kokonaisuudessaan 4 minuuttia. Pilottijärjestelmässä noodien lokaaleissa kelloissa tapahtuvat siirtymät ovat ennako-odotusten mukaisia. Pilottijärjestelmän toteutuksessa on huomioitu, että mikäli noodien lähetysajat haluttaisiin pitää yhtäjaksoisesti samankaltaisina, tulisi niitä tällöin aikasynkronoida säännöllisin väliajoin myös alun järjestelmään liittymisen jälkeen. Pilottijärjestelmän tavoitteiden ja järjestelmän luonteen näkökulmasta tämä ei kuitenkaan ole tarpeen. Verkon toimintatarkastelun tuloksissa on kuitenkin näiltä osin syytä huo-

mioida, etteivät noodien lokaalissa ajanpidossa esiintyneet siirtymät ole vaikuttaneet tällä tarkastelujaksolla noodien vuorokausittaisiin maksimilähetysmääriin.

Pohjavesiputkeen nro 21 kiinnitetyn sensorinoodin kuvassa 4.18 esitetyssä havaintosarjassa 6.5.2017 esiintyvä anomalia selittyy sillä, että sensorinoodin unijaksojen ylläpidossa näyttää ilmenneen poikkeamia. Näiden seurauksena kyseinen noodi on oletettavasti päätenyt käynnistämään itseään useampaan kertaan vajaan 10 minuutin pituisen aikajakson kuluessa. Tämän seurauksena mittaushavainnot on lähetetty yhden tavanomaisen havaintojakson aikana yhdyskäytävälle yhteensä 18 kertaa. Tästä syystä noodilta on rekisteröitynyt tietokantaan päiväkohtaisia havainnot kokonaisuudessaan 23 kappaletta. Ilmiö ei ole toistunut kyseisen sensorin osalta tarkastellun havaintojakson aikana. Ilmiöstä on myös havaittavissa, että yhdyskäytävä välittää tietokantaan kaikki vastaanottamansa sensorihavainnot riippumatta siitä, minkälaisen aikajakson kuluessa ne vastaanotetaan. On kuitenkin todennäköistä, että vastaavankaltainen ilmiö on noodin lähetysajoissa tapahtuneiden tavanomaista suurempien kertasiirtymien perusteella tapahtunut myös 20.4., vaikkakaan tätä ei voida suoraan todentaa kyseisen ajankohdan kattaneen havaintosarjakatkoksen johdosta.

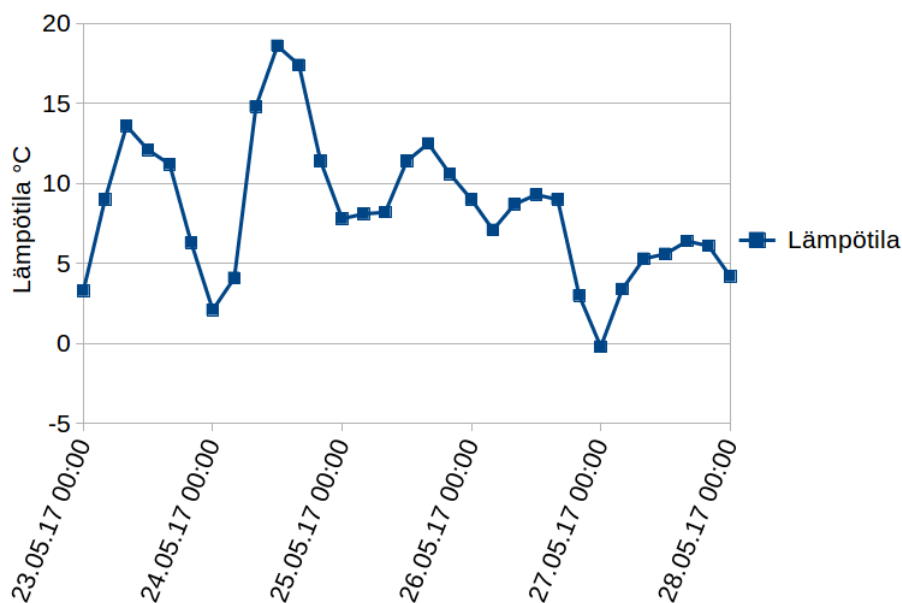
4.8 Noodien paristojen jännitevaihtelut

Alla olevassa kuvassa 4.21 on esitetty 23.–27.5.2017 havaintosarjoihin perustuva noodien paristojännitteen yhdistetty jännitevaihtelukuvaaja. Kuvassa 4.22 on puolestaan esitetty saman aikavälin lämpötilakuvaaja, jonka lämpötiladata on peräisin asennuspaikkaa lähinnä olevalta Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemalta, joka toimii Kokkola-Pietarsaaren lentoaseman yhteydessä. Kyseinen säähavaintoasema sijaitsee noin 13 kilometrin päässä pilottijärjestelmän asennuspaikasta. Näitä kuvaajia vertailemalla on selvästi havaittavissa vuorokausittaisen lämpötilavaihtelun vaikutus paristojen jännitearvoihin. Öisin vallitsevan kylmän sään aikana paristojen jännitteet alenevat ja päiväsaikaan ne vastaavasti nousevat. Yhdistetystä paristojännitekuvaajasta on myös selvästi havaittavissa, että lämpötilan vaikutus paristojen jännitearvoihin korreloi yhdenmukaisesti eri noodien välillä.



Kuva 4.21: Sensorinoodien yhdistetty paristojännitekuvaaja.

Alla olevan lämpötilakuvaajan 4.22 lämpötilahavainnot on koostettu noodien aktiivisuusajaksia vastaaviksi siten, että kuvaajan lähtöaineistossa esiintyvät lämpötilapisteen sijaitsevat noin tunnin mittaisen aikajakson etäisyydellä noodien aktiivisuusjaksoista. Paristojännite- ja lämpötilakuvaajista on myös nähtävissä, kuinka

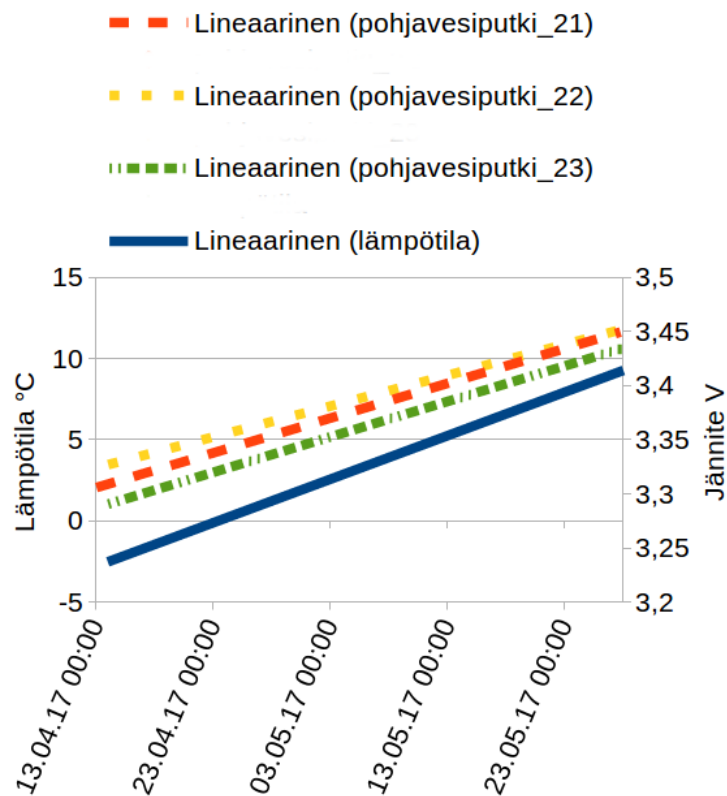


Kuva 4.22: Kokkola-Pietarsaaren lentoaseman yhteydessä olevan sääaseman lämpötilahavainnot 23.–28.5.2017. (Koostettu Ilmatieteen laitoksen avoimen datan 6/2017 tietoaaineistosta: Creative Commons 4.0 [9].)

aikavälillä rekisteröidyt lämpötilan maksimi- ja minimiarvot korreloivat keskenään varsin suoraviivaisesti. Tarkkailujaksolla rekisteröity ylin jännitearvo on noin 3.55 V havaintoputkeen 22 kiinnitetyssä sensorinoodissa. Saman sensorinoodin alin tarkkailujaksolla rekisteröity jännitearvo on noin 3.34 V. Näitä vastaavat lämpötilahavainnot ovat noin 19 ja 0 celsiusastetta.

Kuvassa 4.23 esitetään paristojännitteiden ja lämpötilan pitkän aikavälin kehitys 14.4.2017–27.5.2017. Kuvaajasta on nähtävissä, kuinka sään kokonaislämpeneminen on kyseisen seurantajakson aikana nostanut pariston jännitearvoja selvällä korrelaatioosuhteella siitäkin huolimatta, että sensorin paristokapasiteetin on täytynyt tämän yli kuukauden mittaisen käyttöjakson aikana laskea.

Tehdyt havainnot tukevat kyseisen paristoteknologian jännitteiden lämpötilasidonnaisuutta. Ne toisaalta myös osoittavat, että ainakin pilottijärjestelmän kaltaisten matalaenergisten laitteiden tapauksessa paristojen jännitearvoja voitaisiin käyttää ympäristön lämpötilatiedon aproksimointiin, kunhan pitkän aikavälin kapasiteetti-vaikutukset pariston jännitetasoihin riittävässä määrin huomioidaan.

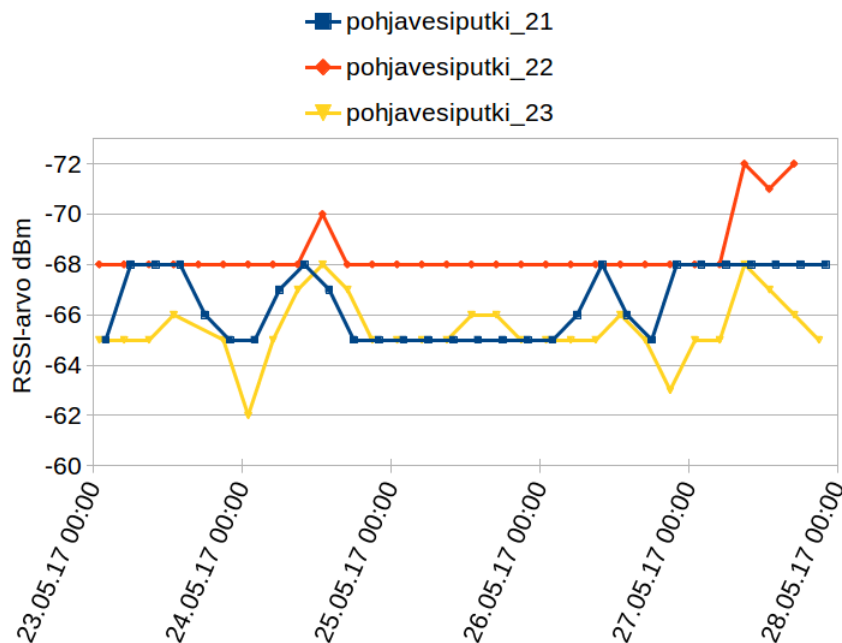


Kuva 4.23: Paristojännitteiden ja lämpötilan pitkän aikavälin kehitys. (Lämpötilan trendiviiva koostettu Ilmatieteen laitoksen avoimen datan 6/2017 tietoaineistosta: Creative Commons 4.0 [9].)

4.9 RSSI-arvojen analyysi

Kuvassa 4.24 esitetään sensorinoodien yhdistetty RSSI-arvokuvaaja aikaväliltä 23-27.5.2017. Kuvaajasta on havaittavissa, että sensorinoodikohtaisissa RSSI-arvoissa esiintyy ajoittaista vaihtelua. Kuvaajasta ilmenee myös, että sensorinoodeihin yhdistetyt RSSI-arvot korreloivat osin keskenään, vaikkeivät ne variaatioiltaan olekaan täysin yhdenmukaisia. Kuvaajassa 4.25 on esitetty saman aikavälin RSSI-arvojen tallennushetkiin suhteutettu ilman lämpötila ja suhteellinen ilmankosteus. Suhteellisen ilmankosteuden avulla ilmaistaan prosentuaalisesti, kuinka paljon ilmassassa esiintyy kaasumuotoista vettä tietyssä lämpötilassa. Mikäli suhteellinen ilmankosteus nousee 100 prosenttiin, tarkoittaa se tällöin sitä, että ilmassassa pidättämässä vedessä alkaa tapahtua faasimuutoksia, eli veden tiivistymistä neste-muotoon. Ilmassa esiintyvän kaasumuotoisen veden maksimimäärä riippuu ilman lämpötilasta. Lämmin ilmassa kykenee pidättämään enemmän kaasumuotoista

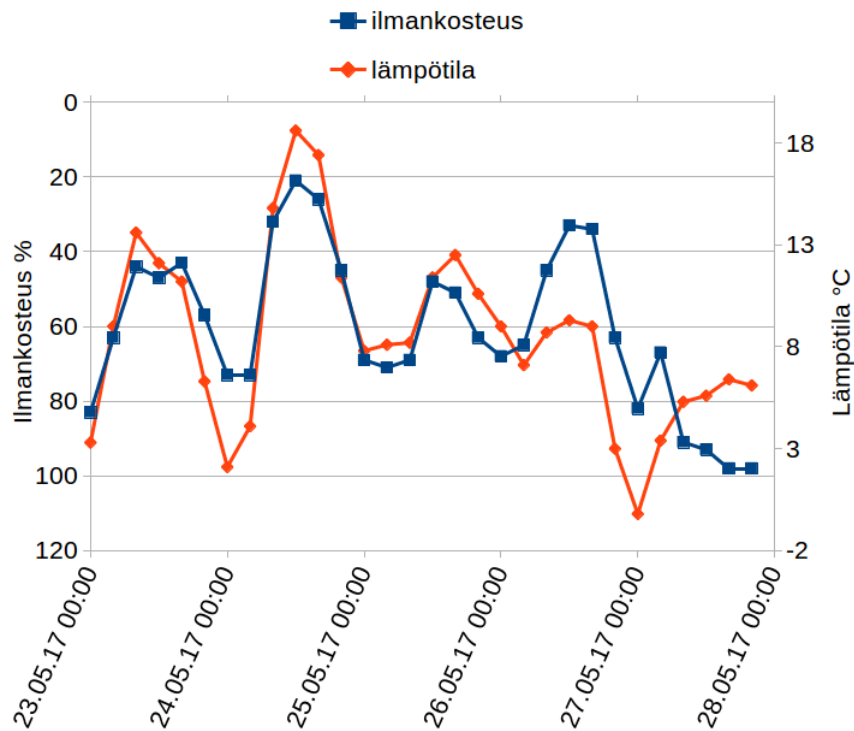
vettä kuin kylmä ilmassa, mikä taas toisaalta tarkoittaa myös sitä, että mikäli kylmän ja lämpimän ilmassan pidättämä vesimäärä olisi identtinen, olisi tällöin kylmän ilmassan suhteellinen ilmankosteus näistä korkein.



Kuva 4.24: Sensorinoodien yhdistetty RSSI-kuvaaja.

Lämpötilakuvaajasta 4.25 on nähtävissä, kuinka lämpötila korreloi tarkkailujakson aikana vahvasti suhteellisen ilmankosteuden kanssa aina siihen saakka, kunnes suhteellinen ilmankosteus nousee tarkkailujakson viimeisen vuorokauden aikana lähes 100 prosenttiin. RSSI-kuvaajaa sekä yhdistettyä ilmankosteus- ja lämpötilakuvaajaa vertailemalla, voidaan havaita, kuinka lämpötiloissa esiintyvät huippukohtat limittyvät osin myös mitattujen RSSI:n ääriarvojen kanssa. Havaittu ilmiö ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteinen, sillä esimerkiksi pohjavesiputkeen 23 kiinnitetyn sensorinoodin RSSI-arvot eivät reagoi vuorokauden lämpötilamaksimeihin 23.5.2017 ja 25.5.2017.

Havaittu ilmiö indikoi, että RSSI-arvot heikkenevät lämpötilan noustessa. Tarkkailujakson korkein havaittu lämpötila on +18 celsiusastetta ja matalin -0.2 celsiusastetta. Pohjavesiputkeen 21 kiinnitetyn sensorinoodin RSSI-arvot vaihtelevat -65:n ja -68 dBm:n välillä. Pohjavesiputkiin 22 ja 23 kiinnitettyjen sensorinoodien RSSI-arvot vaihtelevat vastaavasti -68 ja -72 sekä -62 ja -68 dBm:n arvoväleillä. Pohjavesiputkeen 21 kiinnitetyn sensorinoodin keskimääräinen RSSI-arvo on noin -64 dBm.



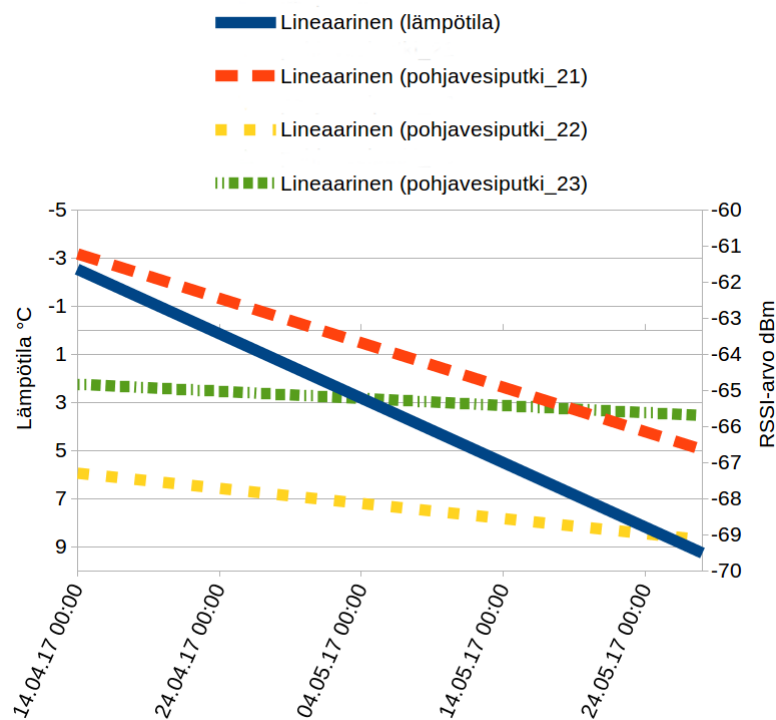
Kuva 4.25: Ilmankosteus ja lämpötila. (Koostettu Ilmatieteen laitoksen avoimen datan 6/2017 tietoaaineistosta: Creative Commons 4.0 [9].)

Pohjavesiputkiin 22 ja 23 kiinnitettyjen sensorinoodien keskimääräiset RSSI-arvot ovat vastaavasti noin -68 ja noin -65 dBm:ää.

RSSI-arvojen sekä ympäristön lämpötilan ja ilmankosteuden välisestä yhteydestä on kuitenkin olemassa olevaa tutkimustietoa (ks muun muassa 2.4 GHz:n taajuusalueen kattavat tutkimukset [24] ja [47]). Mitralaxisin et al. [25, s.367–368] mukaan yksinomaan lämpötilalla voi olla merkittävä vaikutus havaittaviin RSSI-arvoihin siitä syystä, että korkeiden lämpötilojen seurauksena piireissä esiintyy enemmän vuotovirtaa, joka johtaa myös radiopiireissä signaalin voimakkuuden heikkenemiseen.

RSSI-arvojen tuloksien tarkastelussa tulee huomioida, että vaikkakin sensorinoodit sijaitsevat muutamien metrien etäisyydellä toisistaan ja yhdyskäytävään nähden myös samassa suunnassa, niin eroavat niiden korkeustasot toisistaan rinneasen-teisuudesta johtuen. Asennuspaikan jyrkkä patorinne ei myöskään taustoita ylimpään pohjavesiputkeen nro. 21 kiinnitettyä sensorinoodia toisin kuin pohjavesiputkien 22 ja 23 tapauksessa.

Kuvassa 4.26 esitetään lämpötilan ja RSSI-arvojen kehitys 14.4.2017–27.5.2017. Trendiviivoista on nähtävissä, kuinka lämpötilan nousu on johtanut tämän edellistä pidemmän tarkastelujakson aikana RSSI-arvojen heikentymiseen. RSSI-arvojen laskeminen on ollut suurinta pohjavesiputkeen 21 kiinnitetyn sensorinoodin tapauksessa. Pohjavesiputkeen 23 kiinnitetyn sensorinoodin osalta RSSI-arvojen lasku on ollut kaikkein vähäisintä. Vaikka RSSI-arvojen heikkenemistä voitaisiin joissain tapauksissa selittää paristojen kapasiteetin ehtymisellä [25, s.366–367], ei tämän tarkastelujakson piirissä ole todennäköistä epäillä ilmiön aiheuttajaksi tätä selitystekijää, kun sensorinoodien lyhyet käyttöjaksot ja niihin liittyvä sängen vähäinen virrankulutus huomioidaan. Lisäksi, kuten luvussa 4.8 osoitettiin, ovat sensorinoodien mitatut paristojännitteet käytännössä kasvaneet tällä samalla tarkastelujaksolla kevään etenemisestä johtuvan sään keskimääräisen lämpenemisen johdosta.



Kuva 4.26: RSSI-arvojen ja lämpötilan pitkän aikavälin kehitys. (Lämpötilan trendiviiva koostettu Ilmatieteen laitoksen avoimen datan 6/2017 tietaineistosta: Creative Commons 4.0 [9].)

4.10 Yhteenveto

Pilottijärjestelmän toiminnasta kerätyn data-aineiston perusteella RSSI-arvojen ja ympäristön lämpötilan välillä esiintyy tavanomaista korrelaatiota. Korrelaatio osoittaa, että korkeat lämpötilat vaikuttavat RSSI-arvoihin heikentävästi. Tämä ilmiö aiheutuu todennäköisesti ainakin osittain lämpötilan vaikutuksesta piireissä esiintyvään vuotovirtaan. Tulosten perusteella sensorinoodien ja yhdyskäytävien sijoituksessa on syytä mahdollisuuksien mukaan huomioida ympäristön lämpötilavaikutteet, kuten suora auringonvalolle altistuminen, jotta laitteiden suorituskyky kyettään ympäristösidonnaisesti optimoimaan, vaikka RSSI-arvot pysyivätkin todetusta heikkenemisestään huolimatta yleistasoltaan varsin hyvinä.

Testauksen aikana pilottijärjestelmässä havaittiin palvelinpuolella vaikuttanut ohjelmistovirhe, jonka seurauksena vedenkorkeuksien havaintosarjoissa esiintyi kaksi laajempaa ja erillistä katvealuetta. Tietokantaan oli jäänyt tallentumatta myös muutamia yksittäisiä lähetyksiä, jotka liittyvät mahdollisesti edellä todettuun ohjelmistovirheeseen. Näiden tapausten taustalla tosin voivat osin vaikuttaa myös muutkin syyt, kuten asennuskohteessa mahdollisesti esiintyvä interferenssi tai muutoin jossain kohdassa tiedonsiirtoketjua ilmenneet satunnaiset häiriöt. Tiedonsiirtoa sensoreilta tietokantaan voidaan kuitenkin kerättyjen tulosten perusteella pitää onnistuneena.

Kenttäasennuksen osalta on syytä huomioida, että pilottijärjestelmä toteutettiin jo entuudestaan pitkäkestoisessa ympäristökäytössä olleiden paineantureiden avulla. Tämän voidaan katsoa heijastuneen jossain määrin negatiivisesti myös niillä kerättyyn mittaustietoon, jota ei kaikilta osin voitu pitää ehdottoman luotettavana. Tämä osoittaa toisaalta myös sen, että sensoreiden ikääntyminen koskee myös veden korkeuksien seurannassa käytettäviä paineantureita, vaikkakin sen on todettu liittyvän korostuneesti erityisesti eräisiin veden laatumittauksissa käytettäviin sensoritekniikoihin.

Pilottijärjestelmän edelleenkehityksen kannalta keskeisimpien toiminta-alueiden voidaan katsoa liittyvän noodimäärien ja lähetysväylyksien kasvaessa P2P-reitityksen toteutukseen, sensorinoodien adaptoituvuuteen lähetystehoihin, kuittausviesteihin, markkinoilla olevien paineantureiden ja vaihtoehtoisesti hyödynnettävien sensoritekniikoiden ominaisuuskartoitukseen, noodien mahdolliseen aikasynkronointiin sekä virrankulutuksen jatko-optimointiin.

5 Johtopäätökset

Ympäristön seurannan automatisointi on osa laajempaa automatisointikehitystä. Tämä alati nopeammin etenevä ja uusia muotoja saava toimintojen automatisointi, verkottuminen sekä suuriin informaatiomääriin ja niiden käsittelyyn perustuva kehityskulku on näkyvissä yhtä lailla niin teollisuudessa, erilaisissa infrastruktuureissa kuin kodeissammekin. Kaikilla ympäristöillä – ovatpa nämä sitten rakennettuja tai luonnonympäristöjä – on omat erityispiirteensä, jotka ovat läsnä myös siinä, millaisia toimintoja, mitattavia muuttujia, erityisintressejä, toimintavaikeuksia, mahdollisuuksia ja toimijoita niihin jo lähtökohtaisesti liittyy.

Ympäristösovellusten erityispiirteet ovat varsin monimuotoiset. Tämä johtuu muun muassa siitä, että mahdollisuutemme vaikuttaa kontrolloivasti elolliseen ja elottomaan luontoon ovat tyypillisesti melko rajalliset. Vuodenaikojen vaihtelut, sään ääri-ilmiöt, ympäristön kemialliset olosuhteet, veden ja aineksen kierto sekä elävien organismien toiminta asettavat kukin osaltaan, mutta myös vuorovaikutteisesti, merkittäviä haasteita niitä laitteistoja ja järjestelmiä kohtaan, jotka monitorointitarkoituksissa sijoitamme luonnonympäristöihin – olivatpa niiden mittauskohteet mitä tahansa.

Teknologisesti laajamittainen kehitys muun muassa paristoteknologioissa, mikrokontrollereissa, käyttöenergian in-situ-generoinnissa ja langattomissa tietoverkoissa mahdollistaa itsenäisten, pitkäikäisten, luotettavien ja komponenteiltaan edullisten sensoriverkkojen hyödyntämisen ympäristön seurannassa. Tämä tosin edellyttää, että niin järjestelmien sijoituskohteet ja niissä vaikuttavat ympäristömuuttujat kuin myös toiminnassa käytettävät teknologiat – kaikkine rajoitteineen, mahdollisuuksineen ja ominaisuuksineen – tunnetaan ja osataan huomioida sekä järjestelmien suunnittelussa että niiden toteutuksessakin.

Tämä tutkimus osoittaa, että ympäristön valvontatoimijoilla on paitsi halukkuutta, myös selkeitä toimintalinjauksia automatisoitujen monitorointijärjestelmien käyttöönottoon siirtymisestä vallitsevaa nykytilannetta laajemmin ja monipuolisemmin myös sellaisissa ympäristöissä, jotka edellyttävät toiminnassa käytettäviltä laitteilta riippumattomuutta erillisistä fyysisistä infrastruktuureista, kuten sähkönjakelusta ja kiinteistä tietoliikenneyhteyksistä. Tämän automatisointikehityksen ja siihen liit-

tyvien pyrkimysten perimmäiset syyt pohjautuvat melko järjestelmällisesti kattavamman kokonaisseurannan mahdollistamiseen – niin alueellisen mittausrésoluution kuin aiempaa tiheämmän tiedonkeruuvälin näkökulmasta – sekä manuaalisesti tehtävän työn kokonaisuuden vähentämiseen.

Pinta- ja pohjavesien monitoroinnin tapauksessa tämä käytännössä tarkoittaa sekä veden korkeuksien että myös vedenlaadun seurantatyön nykyistä laajamittaisempaa automatisointia. Teknologisesta näkökulmasta tämän automatisointiprosessin suurimmat esteet eivät mahdollisesti liity – melko traditionaalisista WSN-näkökulmista poiketen – merkittävässä määrin sellaisiin tekijöihin, kuten siinä käytettävien laitteiden virrankulutukseen, niiden radio- ja viestintäyhteyksiin tai niiden riittävään ympäristöltä suojaamiseen, vaan hieman korostuneesti toiminnassa käytettäviin sensoreihin. Toki edellä mainitut osa-alueet ovat luonnollisesti kriittisessä osassa niin pinta- kuin pohjavesien monitorointijärjestelmissä, mutta mikäli toiminnassa käytettävät sensorit eivät ole luotettavia, tarkkoja ja riittävässä määrin erilaisilta ympäristörasitteilta suojattuja, eivät niitä hyödyntävät järjestelmät lopulta kykene vastaamaan niille esitettyihin mittaushaasteisiin. Mikäli sensorit valitaan väärin perustein, päätyvät ne ympäristömonitorointijärjestelmien laajemman käyttöönoton pullonkauloiksi.

Tätä järjestelmäproblematiikkaa voidaanakin perustella esimerkein. Mikäli sensoreihin liittyy esimerkiksi tiheään aikavälin uudelleenkalibrointitarpeita tai muita erikseen vaadittuja huoltotoimia, jotka edellyttävät manuaalista työtä, niin vähentävät ne tällöin väistämättä automatisoiduilla monitorointijärjestelmillä tavoitettavia kustannussäästöjä. Tähän liittyen on myös mahdollista, että ne jopa lisäävät toiminnan kokonaiskustannuksia, mikäli automatisointi on johtanut määrällisesti aiempaa suurempiin operointikohteisiin. On toisaalta myös huomioitava, että jos tämänkaltaisissa tapauksissa edellytetyt huoltotoimet ovat lisäksi huomattavan kompleksisia, niin tämä asettaa myös omat lisävaatimuksensa niitä suorittavalle henkilöstölle. Kerättyjen mittaushavaintojen aiempaa suurempi määrä voi tosin kompensoida järjestelmien suoria ylläpitokustannuksia, mutta mikäli merkittävänä automatisoituihin järjestelmiin siirtymisperusteena ovat nimenomaan kustannussäästöt, on tämä lähtökohta loogisesti kestävä. Tästä näkökulmasta järjestelmien sensorivalintojen tulisi erityisesti tukea laitteiden autonomisen toiminnan pitkäikäisyyttä ja ylläpitopiippumattomuutta.

Jos järjestelmien suunnittelussa ja toteutuksessa kyetään välttämään myös sensoritekniset sudenkuopat, niin muutoin olemassa olevan teknologian voidaan kat-

soa olevan siinä määrin kehittynyttä, että laajamittaisia automatisoituja ympäristöjärjestelmiä on kannattavaa ja mahdollista ottaa käyttöön myös nykyistä laajamittaisemmin. On myös syytä huomioida, että sensoriteknologiassa tapahtunut yleiskehitys saattaisi mahdollistaa myös vaihtoehtoisten sensoriteknologioiden hyödyntämisen sellaisissa mittauskohteissa, joissa on perinteikkäästi sitouduttu vain tiettyjen sensoritekniikoiden piiriin.

Näiltä osin mielekkäät jatkotutkimuskohteet liittyvätkin pohjavesien korkeusmittausten tapauksessa lasertekniikkaan ja veden laatumonitoroinnin osalta tähän toimeen soveltuviin optisiin järjestelmiin. Pienenergisien lasertekniikan soveltuvuus ympärivuotiseen pohjavesien korkeuksien seurantaan tulisi kartoittaa ja tutkia mahdollisimman kattavasti niin teknisten kuin taloudellistenkin tekijöiden näkökulmasta. Tämänkaltainen kontaktiton sensoriteknologia saattaisi osoittautua nykyisin varsin usein hyödynnettävää paineanturitekniikkaa tarkemmaksi ja häiriöttömämmäksi eritoten pitkän aikavälin mittaus toiminnassa.

Veden laatumonitoroinnin osalta olisi syytä tutkia optisiin mittausmenetelmiin liittyvät hyödyntämismahdollisuudet. Tähän aihealueeseen liittyvien tutkimusten voisi katsoa olevan ympäristömonitoroinnin kannalta erittäin merkittävässä asemassa, sillä optiset mittausmenetelmät soveltuvat useiden eri mittaussuureiden seurantaan, joka saattaisi mahdollistaa kompaktien ja yhtenäisten monimittausjärjestelmien kehittämisen, jotka ovat sekä energia- että kustannustehokkaita. Useiden erillisten ja vain yhtä mittauskohdetta seuraavien antureiden erillishyödyntäminen optisten järjestelmien sijaan ei välttämättä ole mielekästä niihin liittyvien huolto- ja virrankulutusvaatimusten johdosta etenkin siinä tapauksessa, mikäli kyseisten kaltaisten antureiden pitkänaikavälin luotettavuuteen liittyy todennettuja ongelmia.

Kaitforsin patoalueelle asennetun pilottijärjestelmän kenttätestaus osoittaa, että pilottijärjestelmän teknisiä ratkaisuja voidaan pitää WSN-ympäristösovellusten näkökulmasta onnistuneina. Järjestelmä mahdollistaa säännöllisesti ja seurantatavoitteiden näkökulmasta tarkoituksenmukaisin havainnointivälein mitattavan pohjaveden korkeustiedon keräämisen ja etätallennuksen. Sensorinoodit kyetään myös pitämään pitkäkestoisesti toimintakuntoisina yksinomaan edullisiin akkuteknologioihin perustuen ja verkon toiminta on osoittautunut luotettavaksi.

Tutkimuksessa tuotettiin hyödyllistä tietoa, jota voidaan käyttää pilottijärjestelmän jatkokehitykseen. Tämän lisäksi tutkimuksen tuloksia on mahdollista hyödyntää myös laajemmin avo- ja pohjavesiin liittyvien WSN-ympäristömonitorointisovellusten kehitys- ja suunnittelutyössä sekä aiheeseen liittyvässä tutkimuksessa.

Lähteet

- [1] ALAZZAWI, L. K., ELKATEEB, A. M., RAMESH, A., JA ALJUJAR, W. Scalability analysis for wireless sensor networks routing protocols. *Julkaisusarjassa 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops/Symposium* (2008), IEEE, ss. 139–144.
- [2] ALDINI, A., BARTHE, G., JA GORRIERI, R. *Foundations of Security Analysis and Design V: FOSAD 2007/2008/2009 Tutorial Lectures*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [3] ALLEN, F., JA GALE, D. Diversity of opinion and financing of new technologies. *Journal of Financial Intermediation* 8, 1 (1999), 68–89.
- [4] AMUNDSON, I., JA KOUTSOUKOS, X. D. A survey on localization for mobile wireless sensor networks. *Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments LNCS 5801* (2009), 235–254.
- [5] ASP, T. Automaattisen vedenlaadun seurantajärjestelmän luotettavuus ja toimivuus Kyrönjoella. Pro Gradu, Jyväskylän yliopisto, 2009. URL: https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/22747/URN_NBN_fi_jyu-201001191048.pdf?sequence=1, viitattu 31.3.2017.
- [6] ATMEL. AT86RF212-radiopiiri. URL <http://www.atmel.com/images/doc8168.pdf>, viitattu 2.5.2017.
- [7] ATMEL. ZigBit: ATZB-900-B0 – datasheet. URL <http://www.atmel.com/Images/doc8227.pdf>, viitattu 1.5.2017.
- [8] BURATTI, C., MARTALO, M., VERDONE, R., JA FERRARI, G. *Sensor Networks with IEEE 802.15.4 Systems: Distributed Processing, MAC, and Connectivity*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [9] CREATIVE COMMONS 4.0. Lisenssiehdot. URL <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>, viitattu 26.3.2017.

- [10] ELY-KESKUS. Virtavesien vedenlaadun jatkuvatoiminen mittaaminen – käytännön opas, 2015. URL https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/120177/Opas%205_2015_Virtavesien%20vedenlaadun%20jatkuvatoiminen%20mittaaminen.pdf?sequence=2, viitattu 30.3.2017.
- [11] EVE. ER26500 Technical Specification. URL <http://www.farnell.com/datasheets/1445889.pdf>, viitattu 12.7.2017.
- [12] FRADEN, J. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer, 2004.
- [13] GEMS. 2200-sarjan paineanturi. URL http://www.gemssensors.com/~media/files/resources/na_english/catalogpages/catalog_h_2200series-2600series.ashx, viitattu 16.6.2017.
- [14] GUEUNING, F., VARLAN, M., EUGENE, C., JA DUPUIS, P. Accurate distance measurement by an autonomous ultrasonic system combining time-of-flight and phase-shift methods. Julkaisusarjassa *Quality Measurements: The Indispensable Bridge between Theory and Reality. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1996. IMTC-96. Conference Proceedings (1996)*, IEEE, ss. 399–404.
- [15] HASSENZAHL, M., JA TRACTINSKY, N. User experience – a research agenda. *Behaviour & Information Technology* 25, 2 (2006), 91–97.
- [16] HORPPILA, P. *Ympäristön tilan seurantaohjelma 2016*. Tekninen raportti, ELY-keskus, 2016. URL: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/121875/Raportteja%2024%202016.pdf?sequence=5>, viitattu 22.3.2017.
- [17] HUTTULA, T., BILALET DIN, E., HÄRMÄ, H., KALLIO, K., LINJAMA, J., LEHTINEN, K., LUOTONEN, H., MALVE, O., VEHVILÄINEN, B., JA VILLA, L. *Ympäristön seurannan menetelmien kehittäminen – Automatisointi ja muut uudet mahdollisuudet*. Tekninen raportti, Suomen ympäristökeskus, 2009. URL: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/39796/SYKEra_13_2009.pdf?sequence=1, viitattu 28.3.2017.
- [18] IBRAHIM, H., ILINCA, A., JA PERRON, J. Energy storage systems – characteristics and comparisons. *Renewable and sustainable energy reviews* 12, 5 (2008), 1221–1250.

- [19] IEEE. IEEE Standard 802.15.4-2003. URL <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.4-2003.html>, viitattu 21.8.2017.
- [20] ILMATIETEEN LAITOS. Vuoden keskilämpötila ja vuosisade 1981-2010. URL <http://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>, viitattu 12.7.2017.
- [21] JUNTURA, E., AARNIO, E., KERÄTÄR, K., NENONEN, O., VÄISÄNEN, T., SAVOLAINEN, M., HELLSTEN, S., VIRTANEN, M., KOPONEN, J., INKALA, A., JA YLINEN, H. *Jatkuvatoiminen mittausjärjestelmä veden laadun ja ainetaseiden seurantaan*. Tekninen raportti, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1997. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1997/T1848.pdf>, viitattu 30.3.2017.
- [22] KOHVAKKA, M., KUORILEHTO, M., HÄNNIKÄINEN, M., JA HÄMÄLÄINEN, T. D. Performance analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for large-scale wireless sensor network applications. Julkaisusarjassa *Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor and ubiquitous networks* (2006), ACM, ss. 48–57.
- [23] LIU, M., GAI, Z., ZHAO, J., CUI, X., YANG, L., CHU, S., JA YANG, J. Development of laser water level measuring system without cooperative target. Julkaisusarjassa *2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics* (2012), IEEE, ss. 1–3.
- [24] LUOMALA, J., JA HAKALA, I. Effects of temperature and humidity on radio signal strength in outdoor wireless sensor networks. Julkaisusarjassa *2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)* (2015), ss. 1247–1255.
- [25] MITRALEXIS, G., JA GOUMOPOULOS, C. Web based monitoring and irrigation system with energy autonomous wireless sensor network for precision agriculture. Julkaisusarjassa *Ambient Intelligence: 12th European Conference, AmI 2015, Athens, Greece, November 11–13, 2015, Proceedings* (2015), Springer, ss. 361–370.
- [26] MUNIR, S. A., REN, B., JIAO, W., WANG, B., XIE, D., JA MA, J. Mobile wireless sensor network: Architecture and enabling technologies for ubiquitous computing. *21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops 2* (2007).
- [27] NIELSEN, D. M. *Practical Handbook of Environmental Site Characterization and Ground-Water Monitoring, Second Edition*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2005.

- [28] NIELSEN, J. *Usability Engineering*. Elsevier, 1994.
- [29] NORDRUM, A. Popular Internet of Things forecast of 50 billion devices by 2020 is outdated. *IEEE Spectrum* 18 (2016). URL <http://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/internet/popular-internet-of-things-forecast-of-50-billion-devices-by-2020-is-outdated>, viitattu 8.5.2017.
- [30] NORGIA, M., GIULIANI, G., JA DONATI, S. Absolute distance measurement with improved accuracy using laser diode self-mixing interferometry in a closed loop. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 56, 5 (2007), 1894–1900.
- [31] OLIVEIRA, L., JA RODRIGUES, J. Wireless sensor networks: a survey on environmental monitoring. *Journal of Communications* 6, 2 (2011), 143–151.
- [32] ORVOMAA, M., JA MÄKINEN, R. *Pohjaveden mittaaminen*. Tekninen raportti, Suomen ympäristökeskus/Vesikeskus, 2015. URL: <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B47AFF373-0905-4AC6-B568-D72B5DBE1753%7D/76332>, viitattu 22.3.2017.
- [33] POPOVICI, E., MAGNO, M., JA MARINKOVIC, S. Power management techniques for wireless sensor networks: a review. Julkaisusarjassa *Proceedings of the 2013 5th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces* (2013), IEEE, ss. 194–198.
- [34] RASPBERRY PI FOUNDATION. BCM2837. URL <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/bcm2837/README.md>, viitattu 17.4.2017.
- [35] RASPBERRY PI FOUNDATION. Power supply. URL <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/power/README.md>, viitattu 17.4.2017.
- [36] RASPBERRY PI FOUNDATION. Raspberry pi 3 model b. URL <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>, viitattu 17.4.2017.
- [37] RINTALA, J., JA SUOKKO, T. *Pohjavesinäytteenotto – Nykytila ja kehitystarpeet*. Tekninen raportti, Suomen ympäristökeskus, 2008. URL: <https://helda.>

- helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38376/SY_48_2008.pdf, viitattu 23.5.2017.
- [38] ROWLAND, C., GOODMAN, E., CHARLIER, M., LIGHT, A., JA LUI, A. *Designing connected products – UX for the Consumer Internet of Things*. O'Reilly, Sebastopol, CA, 2015.
- [39] SORENSEN, J. P., JA BUTCHER, A. S. Water level monitoring pressure transducers – a need for industry-wide standards. *Groundwater Monitoring & Remediation* 31, 4 (2011), 56–62.
- [40] SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS. Hydrologisen seurannan kenttätöiden toimintakäsikirja 2017. URL <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B38AA8CA8-B638-4DC9-A6EE-91E3B4BB88DF%7D/112245>, viitattu 15.3.2017.
- [41] SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS. Vesistöjen vedenkorkeuden mittaaminen, 2013. URL <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BBEC4EF10-B5F1-4345-915F-B50F8A5F6562%7D/76335>, viitattu 15.3.2017.
- [42] TADIRAN BATTERIES. Technical Brochure LTC-Batteries. URL <http://www.tadiranbatteries.de/pdf/Technical-Brochure-LTC-Batteries.pdf>, viitattu 28.7.2017.
- [43] TARVAINEN, M., KOTILAINEN, H., JA SUOMELA, J. *Uudet menetelmät vesistöjen seurannassa – mahdollisuudet ja haasteet*. Tekninen raportti, ELY-keskus, 2015. URL: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/120174/RA%2086_2015_Uudet%20menetelm%3%A4t%20vesist%3%B6jen%20seurannassa.pdf?sequence=2, viitattu 14.3.2017.
- [44] TENNINA, S., KOUBAA, A., DAIDONE, R., ALVEZ, M., JURCIK, P., SEVERINO, R., TILOCA, M., HAUER, J.-H., PEREIRA, N., DINI, G., BOUROCHE, M., JA TOVAR, E. *IEEE 802.15.4 and ZigBee as Enabling Technologies for Low-Power Wireless Systems with Quality-of-Service Constraints*. Springer, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2013.
- [45] TSAGOURIAS, N., PAFILIS, I., KOSMATOPOULOS, C., JA LAOPOULOS, T. Accurate measurement of delay-time for ultrasonic signals monitoring applications. Julkaisusarjassa *IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications* (2005), IEEE, ss. 45–50.

- [46] WEITZEL, T., WENDT, O., JA WESTARP, F. Reconsidering network effect theory. *ECIS 2000 Proceedings* (2000).
- [47] WENNERSTRÖM, H., HERMANS, F., RENSFELT, O., ROHNER, C., JA ÅKE NORDÉN, L. A long-term study of correlations between meteorological conditions and 802.15.4 link performance. *Julkaisusarjassa 2013 IEEE International Conference on Sensing, Communications and Networking (SECON)* (2013), IEEE, ss. 221–229.
- [48] ZHENG, J., JA JAMALIPOUR, A. *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*. WILEY, Hoboken, New Jersey, 2009.

A Paineanturi 1 – mittaustulokset

Noodi 1

Nouseva

Korkeus (mm)	ADC
104	109
300	123
499	137
697	151
897	166
1098	181
1300	195
1501	211
1702	226
1903	240
2113	255
2300	270
2502	284

Laskeva

Korkeus (mm)	ADC
104	110
500	139
1000	176
1503	214
2000	250
2502	284

Regressiosuorat

ADC	Nouseva (mm)	Laskeva (mm)	Ero-%
0	-1372,1	-1408,5	0,654534992
511	5597,429	5588,112	0,041647516

Regressiosuorien keskiarvopoikkeama-%

0,348091254

Kuva A.1:

B Paineanturi 2 – mittaustulokset

Noodi 2

Nouseva

Korkeus (mm)	ADC
102	108
302	124
499	139
699	154
899	169
1100	184
1300	200
1500	215
1700	231
1900	246
2102	262
2304	277
2500	292

Laskeva

Korkeus (mm)	ADC
100	109
500	141
1000	180
1500	218
2000	255
2500	292

Regressiosuorat

ADC	Nouseva (mm)	Laskeva (mm)	Ero-%
0	-1308,9	-1348,4	0,743235615
511	5355,562	5361,03	0,025511842

Regressiosuorien keskiarvopoikkeama-%

0,384373728

Kuva B.1:

C Paineanturi 3 – mittaustulokset

Noodi 3

Nouseva	
Korkeus (mm)	ADC
104	110
300	125
501	138
702	155
898	170
1100	186
1302	201
1500	216
1698	231
1900	246
2100	261
2302	277
2500	293

Laskeva	
Korkeus (mm)	ADC
100	112
499	142
999	181
1500	219
2000	256
2500	293

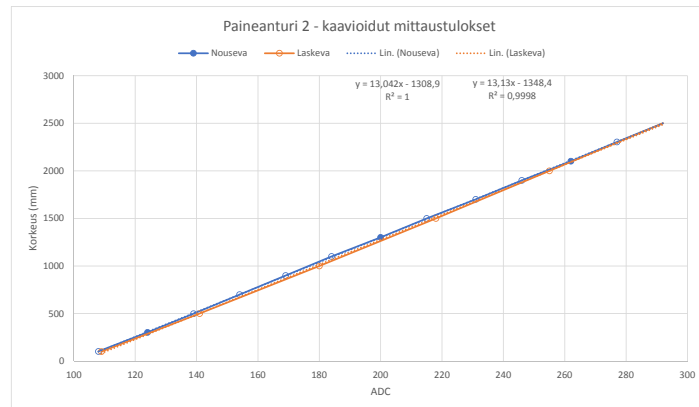
Regressiosuorat

ADC	Nouseva (mm)	Laskeva (mm)	Ero-%
0	-1329,9	-1386,9	1,049028269
511	5367,777	5375,163	0,034376065

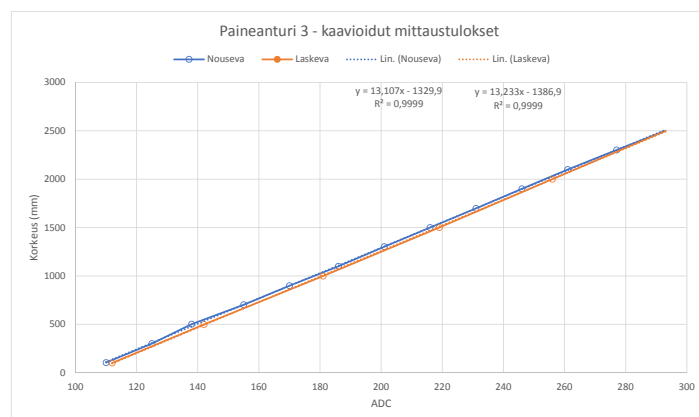
Regressiosuorien keskiarvopoikkeama-%
0,541702167

Kuva C.1:

D Kalibrointikuvaajat 2 ja 3

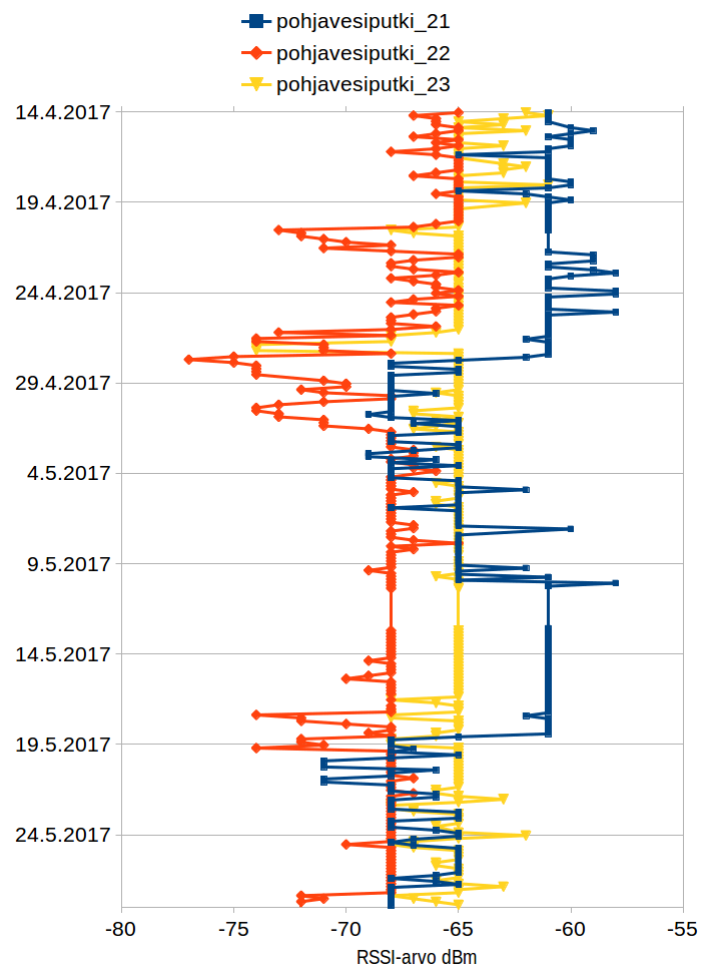


Kuva D.1: Paineanturi 2 – kaavioidut tulokset.



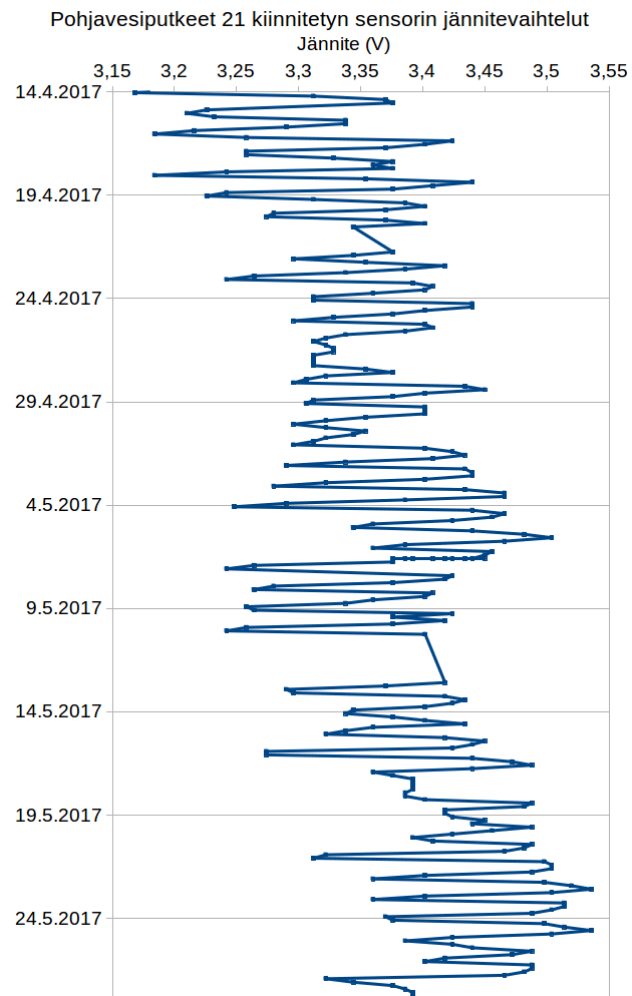
Kuva D.2: Paineanturi 3 – kaavioidut tulokset.

E Yhdistetty RSSI-kuvaaja



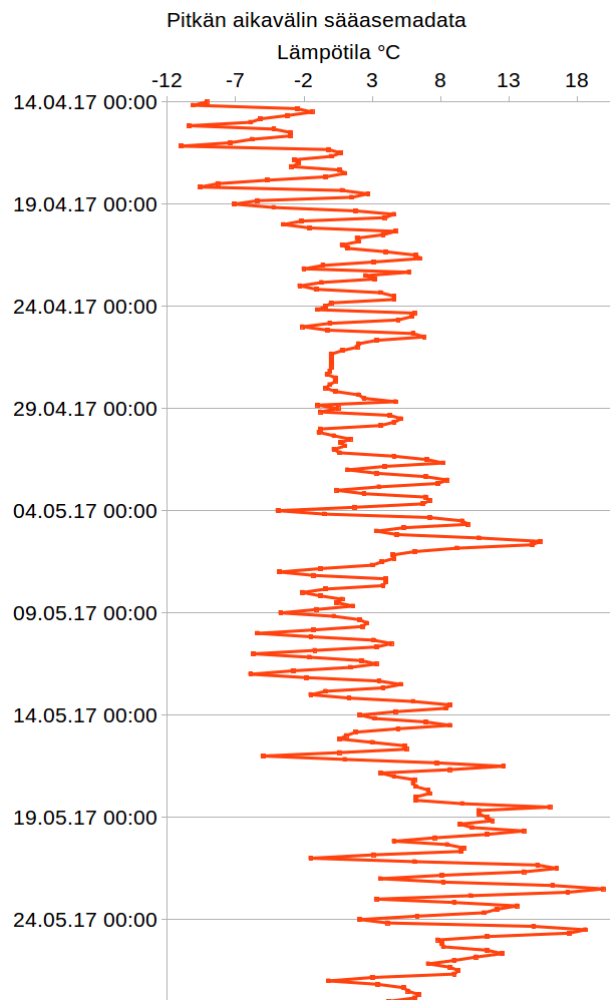
Kuva E.1: Sensorinoodien yhdistetty pitkän aikavälin RSSI-kuvaaja.

F Sensorinoodin jännitevaihtelut



Kuva F.1: Sensorinoodin jännitevaihtelut aikavälillä 14.4.2017–27.5.2017.

G Pitkän aikavälin lämpötilahavainnot



Kuva G.1: Kokkola-Pietarsaaren lentoaseman yhteydessä olevan sääaseman lämpötilahavainnot aikavälillä 14.-27.5.2017. (Koostettu Ilmatieteen laitoksen avoimen datan 6/2017 tietaineistosta: Creative Commons 4.0 [9].)

H Sensorinoodien rinneasennus



Kuva H.1: Sensorinoodien rinneasennus.