

Pekko Niemi

INTERNET OF THINGS –SENSOREIDEN HYÖDYNTÄMINEN SÄHKÖNJAKELU- VERKON KUNNONHALLINASSA

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Diplomityö
Kesäkuu 2019

TIIVISTELMÄ

PEKKO NIEMI: Internet of Things –sensoreiden hyödyntäminen sähköjaketuverkon kunnonhallinnassa
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Kesäkuu 2019

Internet of Things (myöh. IoT, suom. esineiden internet) tai teollinen internet ja niihin liittyvät teknologiat tarjoavat täysin uudenlaisia mahdollisuuksia toiminnan tehostamiseen tuomalla aiempaa enemmän älyä laitteisiin tai esineisiin. Älykkäiden laitteiden potentiaali toiminnan tehostamisessa on niin suuri, että niiden yleistymistä teollisuudessa pidetään neljäntenä teollisena vallankumouksena. Kunnossapitoa on sähköverkoalalla toteutettu aikaan perustuvalla ehkäisevällä kunnossapitostrategialla, mutta IoT-sensoreiden avulla siirtymä kohti kuntoon perustuvaa ennakoivaa kunnossapitoa olisi mahdollista.

Työssä tutkittiin, miten IoT-sensoreita voidaan hyödyntää sähköjaketuverkon kunnonhallinnassa, ja arvioitiin sensoreiden asennuksen, eli sensoroinnin, vaikutuksia kunnossapitotoiminnan tehokkuuteen. Tutkimus pohjautui sähköverkkoyhtiö Elenia Oy:n asiantuntijoiden kanssa pidettyihin haastatteluihin ja kirjallisuustutkimukseen. Työn tavoitteina on määrittää mitä komponentteja voidaan sensoroida, minkälaisilla sensoreilla komponenttien kuntoa voidaan seurata ja kuinka kannattavaa sensorointi on taloudellisesti.

Sensoroitavat komponentit määriteltiin asiantuntijahaastatteluiden avulla. Sensoroinnin soveltuvuutta arvioitiin lisäksi aiempien tutkimuksien perusteella. Tunnistetuista komponenteista soveltuvimmat ovat puisto- ja kiinteistömuuntamot sekä päämuuntajat, sillä niiden vikaantumisten vaikutukset ovat vakavia ja vikaantumisten ennakointi on mittauksilla mahdollista monissa tapauksissa hyödyntäen esimerkiksi ääntä tai lämpötilaa. Voimajohtojen pylväiden kallistuksen seuranta taas vähentäisi pylväiden kaatumisriskiä, joka syntyy harusten kunnon heikentyessä. Sensoreiden ominaisuuksille määritettiin useita vaatimuksia, joista tärkeimmät ovat helppo asennettavuus myös jälkiasennuksena komponentteihin sekä pitkä toiminta-aika. Muun muassa sensorin antureille ja lähetystiheyksille määritettiin tarkemmat vaatimukset komponentteittain perustuen aiempien tutkimusten tuloksiin. Vaatimusten perusteella muuntamoiden sensoroinnista muodostettiin ehdotus, jossa tehtiin sopivia teknologiavalintoja sensoreille ja muille järjestelmän osille.

Työssä sensoroinnin kannattavuutta arvioitiin puistomuuntamoilla pääasiassa keskeytyksistä aiheutuvan haitan kustannusten vähentymisen perusteella saatavien säästöjen ja sensorijärjestelmän aiheuttamien kulujen mukaan. Tarkastelun perusteella kannattavuus voidaan jo nykyisessä tilanteessa saavuttaa tarkemmilla kohdevalinnoilla. Huomioimalla lisäksi sensoroinnin avulla saatava muu säästö, esimerkiksi vakavista vioista syntyneiden vahinkojen kuluissa, IoT-sensorijärjestelmän käyttöönotto voidaan todeta jo nykyisillä kustannuksilla lähes kannattavaksi ja tulevaisuudessa hyvinkin kannattavaksi kustannuskehityksen myötä, kunhan sen toiminta voidaan tutkimusten avulla varmentaa.

Avainsanat: Internet of Things, IoT, sähköverko, kunnonhallinta

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

PEKKO NIEMI: Utilizing Internet of Things sensors in distribution network maintenance
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Electrical Engineering
June 2019

Internet of Things (IoT) or Industrial Internet and its' related technologies offer completely new possibilities for more efficient operations by bringing more intelligence to devices or objects. The potential of smart devices to improve efficacy is so huge that Industrial Internet is considered as one of the driving forces of the fourth industrial revolution. Power network maintenance is mostly based on time-based preventive strategy, but with the help of IoT sensors, the shift towards condition-based predictive maintenance strategy would be possible.

This thesis examined how IoT sensors could be used in power network maintenance and assessed the impact of them on maintenance performance. The research is based on literature research and interviews with experts from distribution network company Elenia Oy. The goals of this research are to determine in which components of the electricity network should IoT sensors used, what requirements are needed for sensors and is installing them profitable economically.

Components that should have IoT sensors installed were defined based on expert interviews. In addition, the suitability of sensing was assessed based on previous studies. Substation and distribution transformers were identified as the some of the most potent components for sensing as their faults can cause wide outages and the failure prevention with IoT sensors should be possible. Monitoring the inclination of posts of the power lines with IoT sensors would reduce risks of them tilting and falling causing outages is also one possible application for IoT sensors. Several different requirements were defined for sensors so that they could be used in electricity network environment, some of which are easy installation by technician with retrofit possibilities to in-use components and long operation times for sensors. Based on the requirements and definitions previously made, a proposal was made for distribution transformer sensing by making suitable choices for technologies used in IoT sensing system.

The profitability of IoT sensors was evaluated with distribution transformer sensing. Evaluation was mainly based on the savings on cost of interruptions and cost of the IoT sensor system. Based on the analysis, profitability can be already achieved when selecting sensing targets carefully. The development of sensing costs are also positive and the profitability is going to increase over time making sensing of larger populations of components profitable. There still needs to be more studies to verify how well IoT sensors can predict faults based on the data gathered from the component.

Keywords: Internet of Things, IoT, distribution network, maintenance

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Elenia Oy:lle Kunnonhallinta-tiimissä ja työ aloitettiin syyskuussa 2018. Diplomityön aihe oli hyvin mielenkiintoinen ja ajankohtainen, mikä piti yllä korkeaa motivaatiota tutkimus- ja kirjoitusprosessien aikana.

Työn ohjausryhmään Elenialta kuului kunnonhallinta- ja turvallisuuspäällikkö Turo Iho-
nen ja kunnossapitoinsinööri Henri Niemi, joita haluan kiittää tuesta, ohjauksesta ja rakentavista kommentteista työn aikana, ja Turoa työn tarkastamisesta. Haluan kiittää myös työn tarkastajaa professori Pekka Verhoa useissa tapaamisissa annetuista kommentteista ja kehitysideoista sekä työn tarkastamisesta. Kiitokset lisäksi kaikille muille Elenian asi-
antuntijoille, jotka antoivat oman panoksensa tähän työhön liittyen.

Tampereella, 20.6.2019

Pekko Niemi

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SENSOROINNIN TOIMINTAYMPÄRISTÖ	4
2.1	Sähköverkon rakenne.....	4
2.2	Lainsäädäntö, viranomaisvalvonta ja standardit	7
3.	SÄHKÖVERKON KUNNOSSAPITO JA TOIMINTAVARMUUS	13
3.1	Sähköverkon kunnossapito.....	13
3.2	Verkon käyttövarmuus ja vikaantuminen	15
4.	INTERNET OF THINGS JA TEOLLISEN INTERNETIN SENSORIT.....	17
4.1	Tiedon arvo	17
4.2	Internet of Things ja teollinen internet	21
4.3	Internet of Things –sensorijärjestelmän rakenne.....	23
4.4	Käytössä olevia IoT-ratkaisuita.....	26
5.	ELINKAARIKUSTANNUSLASKENTA.....	30
6.	SÄHKÖVERKON SENSOROINTI.....	33
6.1	Sensorointijärjestelmän yleiset vaatimukset	33
6.2	Mahdollisia kohteita sensoroinnille	36
6.2.1	Muuntamot	39
6.2.2	Muuntajat.....	43
6.2.3	Reaktorit	45
6.2.4	Katkaisijat ja erottimet	47
6.2.5	Sähköasemien akustot	50
6.2.6	Jako- ja haaroituskaapit	51
6.2.7	110 kV voimajohdon pylväät	52
6.3	Yhteenvedo sensoroitavista komponenteista	53
7.	EHDOTUS PUISTOMUUNTAMOIDEN SENSOROINNISTA.....	54
8.	SENSOROINNIN KANNATTAVUUS	59
8.1	Kustannukset	59
8.1.1	Sensorit.....	59
8.1.2	Tietoliikenne	61
8.1.3	Datavarasto, analytiikka ja laitehallinta	61
8.2	Säästöt ja muu lisäarvo	63
8.3	Haasteet kannattavuuden arvioinnissa	65
8.4	Sensoroinnin kannattavuuslaskelma	65
8.5	Kannattavuuslaskennan tulokset	79
8.6	Käytännön testitulokset.....	81
9.	JATKOKEHITYS	87
10.	YHTEENVETO.....	89
	LÄHTEET	93

LIITE A: Puistomuuntamon vikapuu ja sensorointimahdollisuudet

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Sähköverkkojärjestelmän rakenne (Elenia 2018).</i>	4
Kuva 2.	<i>Elenia Oy:n verkkoalue (Muokattu Elenia 2019b)</i>	5
Kuva 3.	<i>Energiaviraston valvontamenetelmät (Energiavirasto 2018c)</i>	10
Kuva 4.	<i>Data-informaatio-tietämys-viisaushierarkiapyramidi (Mukaiillen Kortelainen, Hanski et al. 2017, Rowley 2007, s. 164)</i>	18
Kuva 5.	<i>Tiedon arvo eri tasoilla (Muokattu Salo 2013)</i>	19
Kuva 6.	<i>Tiedon arvoketjun vaiheet ja siirtymisiin mahdollistavat teknologiat (Muokattu Raynor, Cotteleer 2015)</i>	20
Kuva 7.	<i>Tallennustilan määrän kehitys 100 USA:n dollarin suhteen (Tsai 2017)</i>	21
Kuva 8.	<i>Gartnerin vuoden 2015 uusien teknologioiden hype-käyrä (Gartner 2015)</i>	23
Kuva 9.	<i>Teollisen internetin teknologiapino (Collin, Saarelainen 2016, s. 143)</i>	24
Kuva 10.	<i>Amazonin AWS IoT -alustan perusrakenne (Amazon Web Services 2018)</i>	25
Kuva 11.	<i>Kunnossapidon tason ja kustannusten suhde toisiinsa (Woodward 1997)</i>	32
Kuva 12.	<i>Taajuusanalyysi puistomuuntamossa tapahtuvasta koronapurkauksesta (UnSeen Technologies 2018)</i>	41
Kuva 13.	<i>Mahdollisia teknologioita sensorointijärjestelmässä (Muokattu Collin, Saarelainen 2016)</i>	54
Kuva 14.	<i>Järjestelmäkaavio Fingridin sensorointijärjestelmästä (Kuosa 2018)</i>	55
Kuva 15.	<i>Keskimääräinen sensorin säästö vikaantumisen ennakoinnin todennäköisyyden suhteen</i>	71
Kuva 16.	<i>Ainoastaan taajama-alueelle asennettujen sensorien keskimääräinen säästö vikaantumisen ennakoinnin todennäköisyyden suhteen</i>	72
Kuva 17.	<i>Keskimääräinen sensorin säästö vuotuisen vikatiheyden suhteen</i>	73
Kuva 18.	<i>Keskimääräinen säästö vikakeskeytyksen keston suhteen</i>	73
Kuva 19.	<i>Keskimääräinen säästö vika-alueelle jäävien taajama-alueen muuntamoiden määrän suhteen</i>	74
Kuva 20.	<i>Keskimääräinen säästö per kohde vianrajaukseen kuluvan ajan suhteen</i>	75
Kuva 21.	<i>Keskimääräinen säästö per kohde taajama-alueella sijaitsevan muuntamon keskitehon suhteen</i>	76
Kuva 22.	<i>Keskimääräinen säästö per kohde haja-asutusalueella sijaitsevan muuntamon keskitehon suhteen</i>	76

Kuva 23.	<i>Elenian puistomuuntamoita sisältävien johtolähtöjen keskimääräinen säästö</i>	77
Kuva 24.	<i>Sensori kiinnitettynä puistomuuntamon oveen</i>	81
Kuva 25.	<i>Puistomuuntamo 1:n lämpötila (Digita 2019a).....</i>	82
Kuva 26.	<i>Puistomuuntamo 1:n suhteellinen ilmankosteus (Digita 2019a).....</i>	82
Kuva 27.	<i>Puistomuuntamo 1:n kiihtyvyys (Digita 2019a)</i>	83
Kuva 28.	<i>Puistomuuntamo 2:n lämpötila (Digita 2019a).....</i>	83
Kuva 29.	<i>Puistomuuntamo 2:n suhteellinen ilmankosteus (Digita 2019a).....</i>	84
Kuva 30.	<i>Puistomuuntamo 2:n kiihtyvyys (Digita 2019a)</i>	84
Kuva 31.	<i>Puistomuuntamo 2:n valoisuus (Digita 2019a).....</i>	85
Kuva 32.	<i>Valoisuusanturin testaustulokset</i>	86
Kuva 33.	<i>Kiihtyvyyssanturin testaustulokset.....</i>	86

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AES	engl. Advanced Encryption Standard, lohkosalausmenetelmä
AMR	engl. Automatic Meter Reading, automaattinen mittarin luenta
AWS	engl. Amazon Web Services, Amazonin pilvipalvelu
CPS	engl. Cyber Physical System, sulautettu järjestelmä
DITV	Data, informaatio, tietämys, viisaus. Tiedon tasot
KAH	Keskeytyksestä aiheutuva haitta
LoRaWAN	engl. Long Range Wide Area Network, IoT-tiedonsiirtoprotokolla
LPWAN	engl. Low Power Wide Area Network, tiedonsiirtoteknologia
IoT	engl. Internet of Things, esineiden internet
NB-IoT	engl. Narrow-band IoT, IoT-tiedonsiirtoprotokolla
SCADA	engl. Supervisory Control And Data Acquisition, käytönvalvontajärjestelmä

1. JOHDANTO

Digitalisaatio muuttaa maailmaa hyvin nopeasti, ja muutosta tapahtuu kaikkialla. Yritysmaailma ei ole poikkeus, vaan digitalisaatio on vahvasti muuttamassa vanhoja toimintatapoja ja tarjoamalla uusia liiketoimintamahdollisuuksia ja toimintamalleja. Monet kuluttajatuotteet ja -palvelut ovat siirtyneet digimaailmaan muun muassa e-kirjojen muodossa. Elokuvien ja musiikin suoratoistopalvelut ovat esimerkkejä uusista liiketoimintamahdollisuuksista, joita aiemmin ei ole voitu tarjota.

Valmistavan teollisuuden tapauksessa muutoksen vahvuus on niin voimakasta, että voidaan puhua neljännestä teollisesta vallankumouksesta tai *Industrie 4.0*:sta (suom. Teollisuus 4.0). Termi *Industrie 4.0* tulee Saksan valmistavan teollisuuden kilpailukyvyn vahvistamista varten vuonna 2011 aloitetusta yhteishankkeesta, jossa on mukana edustajia yrityksistä, politiikasta ja yliopistomaailmasta. (Hermann, Pentek et al. 2016, Collin, Saarelainen 2016) Neljännen teollisen vallankumouksen ensisijaisena mahdollistajana toimii älykkäiden laitteiden liittäminen vanhoihin tuotantokoneisiin (Kagermann et al. 2013, s. 5). Internet of Things (myöh. IoT, suom. esineiden internet) ja siihen liittyvät laitteet, kehittyneet tietoliikenneteknologiat, pilvipalvelut ja data-analytiikka tarjoavat yrityksille keinoja kehittää uusia palveluita tai omaa toimintaansa. IoT-laitteilla tuotantoprosessista saadaan kerättyä paljon tarkkaa tietoa ja data-analytiikan avulla esimerkiksi pullonkauloja, hävikkiä ja kunnossapidon kustannuksia voidaan vähentää (Collin, Saarelainen 2016).

Teollisen internetin sovelluksia on jo ollut käytössä sähköverkkoalalla AMR-mittareiden muodossa jo pitkään ja vuosien aikana kerätyt kokemukset ovat niiden suhteen olleet myönteisiä. Sähköverkon toiminnasta AMR-mittareilla kerättävä tieto on hyvin arvokasta verkkoyhtiölle ja sitä voidaan hyödyntää erilaisissa tilanteissa, kuten sähkön laadun seurannassa tai vikapaikan indikoinnissa. (Elenia 2019a)

IoT-sensoreiden potentiaali sähköverkon kunnonhallinnassa on tunnustettu Elenia Oy:n lisäksi muun muassa Fingrid Oy:n toimesta ja niihin liittyviä tutkimus- ja kehitysprojekteja on aloitettu viime vuosien ajan (Elenia 2019a, Fingrid 2018a). Tarkempi tieto verkon tilasta ja laitteiston kunnosta mahdollistaa perinteisen aikaan perustuvan ehkäisevän kunnossapidon siirtymän kohti kuntoon perustuvaa ennakoivaa kunnossapitoa, mikä tehostaisi kunnossapitoa ja parantaisi käyttövarmuutta ja turvallisuutta.

Tämän työn ensimmäisenä tavoitteena on selvittää, mihin sähköjakeluverkon komponentteihin IoT-sensoreita tulisi asentaa. Kannattavuus perustuu komponentin kriittisyyteen ja sensoroinnin teknisen toteutuksen vaatimukseen. Tuloksena muodostetaan esitys komponenteista, joiden sensorointia kannattaisi tutkia tarkemmin.

Työn toisena tavoitteena on määritellä teknisiä vaatimuksia sähköverkossa käytettäville sensoreille. Sähköverkko poikkeaa toimintaympäristönä perinteisestä valmistavasta teollisuudesta paljon, joten teollisuudessa käytettyjä IoT-sensoreita ei voida käyttää ilman muutoksia. Ulkona sijaitsevan sähköverkon komponentin ympäristöolosuhteet ovat todella haasteelliset sensoreille sään ääriolosuhteiden takia. Lisäksi sensoreiden asennus on merkittävässä osassa sensoroinnin taloudellisen kannattavuuden takia, joten sensorien asennus ja tarvittava dokumentointi on oltava mahdollisimman yksinkertaista ja nopeaa.

Kolmantena tavoitteena on laskea sensoroinnin taloudellista kannattavuutta. Kannattavuuslaskennan tulosten perusteella voidaan arvioida, kannattaako sensorointijärjestelmää lähteä rakentamaan jo nykyisillä teknologioilla vai onko syytä odottaa kustannusten laskua edelleen. IoT-sensoreiden käytöstä sähköverkon kunnonhallinnassa ei ole aiempaa kokemusta ja monissa tapauksissa sensoroinnin luomaa lisäarvoa on vaikea määritellä luotettavasti etukäteen. Tämä asettaa haasteita kannattavuuslaskentaan. Sensoroinnin päätarkoituksena on estää verkkokomponenttien vikaantumisia, jolloin sen mahdolliset vaikutukset vikakeskeytysten aiheuttamiin kustannuksiin antavat melko luotettavan kuvan kannattavuudesta. Sensoreilta kerätty data voi olla tulevaisuudessa huomattavan arvokasta, kun tietoja pitkältä ajalta voidaan yhdistellä ja muodostaa täysin uutta ymmärrystä komponenttien elinkaareen vaikuttavista tekijöistä.

Työn alussa kuvataan sensoroinnin toimintaympäristöä tarkemmin. Luvussa 2 esitellään suomalaisen sähköverkon rakennetta ja sähköverkkoliiketoimintaan liittyvää lainsäädäntöä ja regulaatiota. Kolmannessa luvussa on kuvattu sähköverkon kunnonhallintaa, mahdollisia kunnossapitostrategioita ja kunnonhallinnan vaikutuksia verkon vikaantumisiin ja käyttövarmuuteen.

Luvussa 4 perehdytään IoT-sensorijärjestelmän rakenteeseen ja järjestelmän käytöstä saatavien hyötyjen perusteisiin. Sensorijärjestelmä koostuu useista erilaisista teknologioista, joista IoT-sensarit ovat vain yksi osa. Lisäksi luvussa esitellään käytössä olevia IoT-ratkaisuita sähköverkko- ja muilta toimialoilta. Luvussa 5 esitellään elinkaarikustannuslaskennan teoriaa kannattavuuslaskelmien muodostamisen tueksi.

Luvussa 6 kuvataan määriteltyjä sensorijärjestelmän ja sensorien yleisiä vaatimuksia ja esitellään asiantuntijahaastatteluiden perusteella tunnistettuja sensoroitavia komponentteja. Komponenteilla tapahtuvia ilmiöitä kuvataan tarkemmin ja määritellään niiden perusteella vaatimuksia asennettaville sensoreille. Vaatimusten perusteella muodostetaan ehdotus puistomuuntamoiden sensoroinnin toteutuksesta luvussa 7. Ehdotuksessa tehdään tarvittavia teknologiavalintoja, joilla sensorijärjestelmä kannattaisi rakentaa.

Luvussa 8 lasketaan ehdotuksen mukaisen puistomuuntamoiden sensorijärjestelmän taloudellinen kannattavuus. Laskentamalli perustuu keskimääräiseen Elenian vuoden 2028 verkkorakenteen mukaiseen johtolähtöön, kun suunnitellut verkon investoinnit on toteutettu. Laskennassa analysoidaan, kuinka paljon sensoroinnilla saadaan sen elinkaaren aikana säästöjä vikaantumisista aiheutuvista kuluista. Käytetyille laskentaparametreille tehdään herkkyysanalyysit ja tulosten pohjalta muodostetaan tavoitehinta yksittäisen muuntamon sensoroinnin kustannuksista.

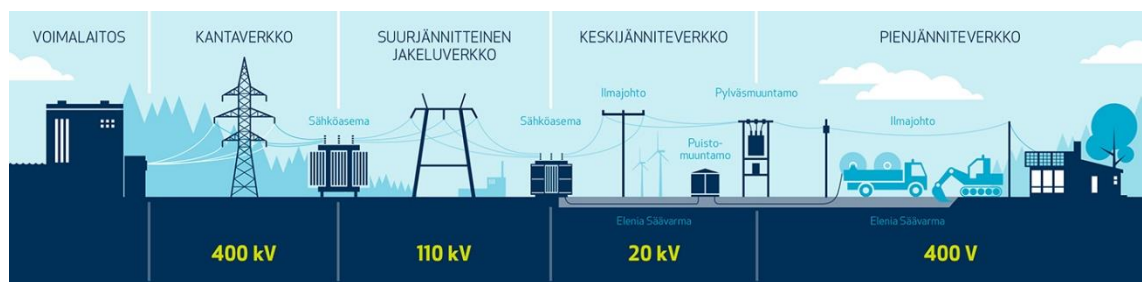
Työn aikana ilmenneitä jatkokehitystarpeita esitellään luvussa 9. IoT-sensoreista ei ole vielä paljon käyttökokemuksia sähköverkkoalalla, jolloin tutkimuksessa joudutaan turvautumaan erilaisiin oletuksiin. Näitä oletuksia tulee varmentaa ja tarvittaessa tehdä uusia laskelmia, jos oletukset osoittautuvat virheellisiksi jatkotutkimuksissa. Viimeisessä luvussa työn aikana saavutetut tulokset vedetään yhteen.

2. SENSOROINNIN TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Sähköverkkoliiketoiminta Suomessa on reguloitu toimiala, sillä verkkoyhtiöt ovat luonnollisessa monopoli-asemassa lain mukaisesti. Regulaation tärkein tavoite on valvoa sähkönsiirron hinnoittelun kohtuullisuutta. Regulaation avulla sähköverkkoyhtiöitä lisäksi kannustetaan kehittämään toimintaansa. Sähköverkko-omaisuuden sijainti ja määrä asettavat myös ovat haasteensa verkko-omaisuudenhallinnalle. Toimintaympäristö poikkeaa huomattavasti omaisuuden sijainnin perusteella valmistavasta teollisuudesta, jossa Internet of Things –sensoreita on jo hyödynnetty esimerkiksi kunnonhallintaprosessien tehostamisessa. Tässä luvussa esitellään sähköverkon rakennetta, regulaatiota ja lainsäädäntöä tarkemmin.

2.1 Sähköverkon rakenne

Sähköverkon muodostaa kantaverkko ja sähkönjakeluverkko. Sähköverkkojärjestelmään kuuluu verkon lisäksi voimalaitokset ja asiakkaat. Kuvassa 1 on kuvattu yksinkertaistettu sähköjärjestelmän rakenne. Suuret voimalaitokset liittyvät suoraan kantaverkkoon ja asiakkaat jakeluverkkoon. Sähköverkon eri osissa nimellisjännitetasot vaihtelevat sähkön siirtokykytarpeen mukaan. Suurilla jännitteillä sähköenergiaa voidaan siirtää selvästi enemmän ja pidempiä matkoja verrattuna pienjänniteisiin. Toisaalta suurjänniteverkon komponentit ovat selvästi kustannuksiltaan suurempia ja teknistaloudellisen optimoinnin seurauksena sähköverkossa käytetään useita eri jännitetasoja. (Lakervi, Partanen 2009) Tuotanto- ja kulutuspuoleiden välissä sähköverkossa on paljon eri tyyppisiä komponentteja. Kuvassa 1 on esitetty erilaisia sähköverkon komponentteja, kuten pylväitä, johtoja, sähköasemia ja muuntamoita. Näiden lisäksi erityisesti kytkin- ja suojauslaitteet ovat verkon turvallisen ja tehokkaan toiminnan kannalta tärkeitä.

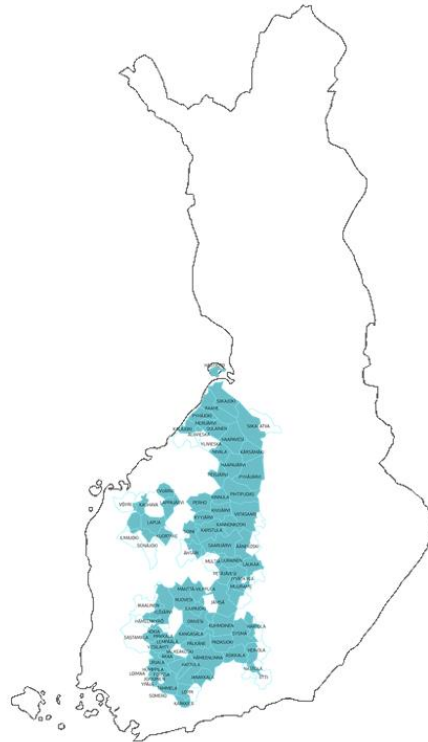


Kuva 1. Sähköverkkojärjestelmän rakenne (Elenia 2018)

Kantaverkon nimellisjännite on vähintään 110 kV ja suurin nimellisjännite kantaverkossa on 400 kV. Suomessa kantaverkon järjestelmävastaavana toimii Fingrid Oy. Kantaverkon järjestelmävastaava vastaa kantaverkon toimivuudesta ja käyttövarmuudesta Suomen sähkömarkkinalain asettamien vaatimusten mukaisesti (*Sähkömarkkinalaki 588/2013.*).

Kantaverkkoon kytkeytyvien voimalaitosten, tehtaiden ja suurjännitteisten jakeluverkkojen pitää täyttää kantaverkon järjestelmävastaavan asettamat vaatimukset ennen liittymistä. (Fingrid 2018) Kantaverkko toimii sähköjärjestelmän runkona ja suurimmat sähköenergiamäärät siirretään kantaverkossa.

Sähkönjakeluverkkoyhtiöitä Suomessa on yli 70 ja jokainen verkkoyhtiö operoi ja hallinnoi luonnollisen monopoliaseman takia sähköverkkoa omalla alueellaan (Energiavirasto 2018b). Kuvassa 2 on esitetty Elenia Oy:n verkkoalue.



Kuva 2. Elenia Oy:n verkkoalue (Muokattu Elenia 2019b)

Elenia Oy:tä kutsutaan maaseutuverkkoyhtiöksi. Nimitys tulee siitä, että suurin osa sen sähköverkosta sijaitsee asemakaava-alueen ulkopuolella. Helen Oy on taas esimerkki kaupunkiverkkoyhtiöstä, sillä sen sähköverkko sijaitsee lähes täysin kaupunkialueella. Kaupunki ja haja-asutusalue eroavat merkittävästi toimintaympäristöinä; sähköverkon pituus per asiakas on moninkertainen ja kaapelointiaste voi olla täysin eri tasolla kaupungeissa. Esimerkiksi Elenian sähköverkon pituus per asiakas on noin 167 m/asiakas ja kaapelointiaste pien- ja keskijänniteverkossa alle 50 %, kun taas Helenin vastaavat luvut ovat 16 m/asiakas ja yli 98 %. (Energiavirasto 2018a) Haja-asutusalueella keskijännitejohdot kulkevat myös usein metsien läpi, jolloin sähköverkko on vikaantumisalttiimpi sääolosuhteiden, kuten lumen tai kovien tuulien, takia.

Jakeluverkko koostuu yleisimmin 110 kV suurjännitteisestä jakeluverkosta, 20 kV keskijänniteverkosta ja 0,4 kV pienjänniteverkosta. Myös muita jännitetasoja, kuten 10 kV tai

1 kV, on käytössä haja-asutusalueilla ja kaupungeissa. Suurin osa sähköenergian asiakkaista liittyy pienjänniteverkkoon (alle 1 kV), mutta asiakkaat, joilla on suuret huipputehot, kuten tehtaat, voivat liittyä myös keski- (1 kV-36 kV) tai suurjänniteverkkoon (yli 36 kV) tarpeensa mukaan (SFS-EN 50160). Esimerkiksi Elenialla on pienjänniteverkon kulutuksen verkkopalvelusopimuksia 417 867, keskijänniteverkon kulutuksen sopimuksia 277 ja suurjänniteverkon kulutuksen sopimuksia 18. (Energiavirasto 2018a)

Tuotantolaitokset liittyvät sähköverkkoon usein keskijännite- tai suurjännitetasoilla, mutta viime aikoina kovasti yleistyneet hajautetut uusiutuvat energiantuotantoratkaisut, kuten pienet tuulivoimalat ja erityisesti aurinkopaneelit, ovat lisänneet verkkoyhtiöiden pienjänniteverkon tuotannon verkkopalvelusopimusten määrää huomattavasti, mikä ilmenee Energiaviraston julkaisemista sähköverkkotoiminnan tunnusluvuista. Esimerkiksi Elenialla oli 1567 pienjänniteverkon tuotannon verkkopalvelusopimusta vuonna 2017, kun vastaava luku oli 621 vuonna 2016. Myös monella muulla verkkoyhtiöllä sopimusten määrä on vähintään tuplaantunut samana aikana ja kaikkien Suomen verkkoyhtiöiden pienjänniteverkon tuotantoverkkopalvelusopimusten määrä on kasvanut 3949 sopimuksesta 8507 sopimukseen, joten kasvu on tällä hetkellä suurta valtakunnallisesti. (Energiavirasto 2018a, Energiavirasto 2017) Hajautettu sähköntuotanto tuo verkkoyhtiöille uusia teknisiä haasteita sähköverkon toiminnan kannalta ehdottoman tärkeän kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpitämisessä ja verkon pitkän aikavälin kehityksessä. Aiemmin sähköverkko on suunniteltu olettaen kulutuksen ja tuotannon olevan erillään toisistaan, mutta nykyään verkon kulutuspisteet voivatkin muuttua tuotantopisteiksi väliaikaisesti, kun asiakkaan oma sähköenergiantuotanto ylittää oman kulutuksen ja asiakas haluaa syöttää ylimääräisen energian sähköverkkoon. Tämä muutos on yksi merkittävimmistä ajureista sähköverkon siirtymiseen kohti älyverkkoa (engl. Smart grid). (Pahkala, Uimonen et al. 2018)

Sähköverkon rakenne on suunniteltu niin, että verkon vikaantuminen aiheuttaisi mahdollisimman vähän haittaa asiakkaille. Pienjänniteverkon vikaantumisen ei tule aiheuttaa kyseistä pienjänniteverkon osaa laajempaa keskeytystä sähkönjakelun keskeytyksistä syntyvän asiakashaitan minimoinnin takia. Keskijänniteverkko on varsinkin taajama-alueella rakenteeltaan silmukoitua säteittäisen sijaan, jotta sähkönjakelu voidaan varmistaa varasyöttöyhteyksien kautta, jos ensisijainen syöttö kokee vikaantumisen. Verkon solmupisteet ovatkin verkon toiminnan ja suojausten kannalta tärkeimpiä kohtia. (Lakervi, Partanen 2009)

Kantaverkon, suurjännitteisen jakeluverkon ja keskijänniteverkon liityntäpisteissä sijaitsee sähköasemia. Sähköasemilla sijaitsevat muuntajat muuttavat ja usein myös säätelevät jännitetasoa ja syöttävät sähköenergiaa kantaverkosta jakeluverkkoon tai toisinpäin. Sähköasemat ovat jakeluverkon tärkein osa sähkönsiirron kannalta, sillä muuntajien lisäksi sähköasemilla on paljon erilaisia kytkin-, mittaus- ja suojauslaitteita, joilla voidaan varmistaa sähköverkon turvallinen ja mahdollisimman häiriötön käyttö. Sähköasemien rakenteeseen ja laitteistoon toki vaikuttaa sen sijainti verkossa, keskeisimmillä asemilla on

useita eri johtolähtöjä, jotka syöttävät eri verkon osia. Näiden asemien vikaantumisten vaikutukset ovat hyvin laajat sähköverkossa, joten investoinnit niiden toimintavarmuuden parantamiseksi ovat usein hyvin kannattavia. Tuotantolaitoksetkin liittyvät usein sähköverkkoon sähköaseman kautta, jotta niiden erottaminen sähköverkosta tarvittaessa olisi turvallista. Laitteistokokoonpanosta ja aseman koosta riippuen sähköaseman arvo voi olla jopa useita miljoonia. (Elovaara, Haarla 2011)

Keskijännite- ja pienjänniteverkon liityntäpisteissä on jakelumuuntamoita. Muuntamot voidaan jaotella muutamaa tyyppiin niiden rakenteen perusteella, joista yleisimmät ovat pylväs-, puisto- ja kiinteistömuuntamo. Muuntamoiden yhteyteen voidaan muuntajan lisäksi sijoittaa erottimia, joilla keskijänniteverkon tilaa voidaan ohjata. Erottimia voidaan sijoittaa myös erikseen verkon solmupisteisiin, jotta sähköverkon vikaantuessa vikaantunut alue saadaan erotettua verkosta mahdollisimman pieneksi. Pienjänniteverkossa sähköä voidaan jakaa asiakkaille suoraan muuntamoilta tai jako- tai haaroituskaappien välityksellä. Jako- ja haaroituskaappien erona on suojaustoiminnot, eli sulakkeet, jotka löytyvät vain jakokaapeista.

Verkon solmupisteiden lisäksi vikaantumisten vaikutuksia minimoidaan lisäämällä verkkoon erillisiä kaukokäyttöisiä verkkokatkaisijoita, joilla vian sattuessa vika-alueella voidaan rajata pienemmäksi, ja erottimia, joilla verkon kytkentätilaa ja syöttösuuntia voidaan muuttaa. Kaukokäyttölaitteita voidaan hyödyntää myös vian paikantamisessa, mikä nopeuttaa korjausta. (Lakervi, Partanen 2009)

2.2 Lainsäädäntö, viranomaisvalvonta ja standardit

Suomessa sähköverkkotoiminta on luvanvaraisessa paikallisessa monopoliasemassa. Tämä tarkoittaa sitä, että tietyllä alueella toimii ainoastaan yksi jakeluverkkoyhtiö. Energiavirasto on lain asettama viranomainen, joka myöntää sähköverkkoluvat ja valvoo sähkönsiirtomaksujen hinnoittelua. Samalla se valvoo, että verkkoyhtiöt toimivat lain vaatimusten mukaisesti. (Energiavirasto 2018b) Tärkeimmät tähän työhön liittyvät lait ovat sähköturvallisuuslaki ja sähkömarkkinalaki.

Sähköturvallisuuslaki (1135/2016) asettaa erilaisia vaatimuksia turvallisuudesta sähkölaitteille, sähkölaitteistoille ja sähkö- ja käyttötöihin. Lain 6. pykälä sisältää yleiset vaatimukset sähkölaitteille ja -laitteistoille:

”Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että:

- 1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa;*
- 2) niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä;*
- 3) niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti.*

Jos sähkölaite tai -laitteisto ei täytä 1 momentissa säädettyjä edellytyksiä, sitä ei saa saattaa markkinoille, luovuttaa toiselle eikä ottaa käyttöön.” (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016.)

Sähköverkkoyhtiölle on sähkölaitteiston haltijana erillisiä vaatimuksia asetettu sähköturvallisuuslain kolmannessa luvussa. Lain luvussa asetetaan sähkölaitteistojen turvallisuudelle täytettäväksi olennaiset vaatimukset, jotka ovat suojaus sähköiskuilta, suojaus tulipaloilta ja kuumuutta vastaan, suojaus muilta haittavaikutuksilta, erityislaitteistojen ja -olosuhteiden vaatimukset, eri laitteistojen keskinäinen yhteensopivuus, olennaiset rakennevaatimukset ja tarpeelliset merkinnät ja asiakirjat. (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016.)

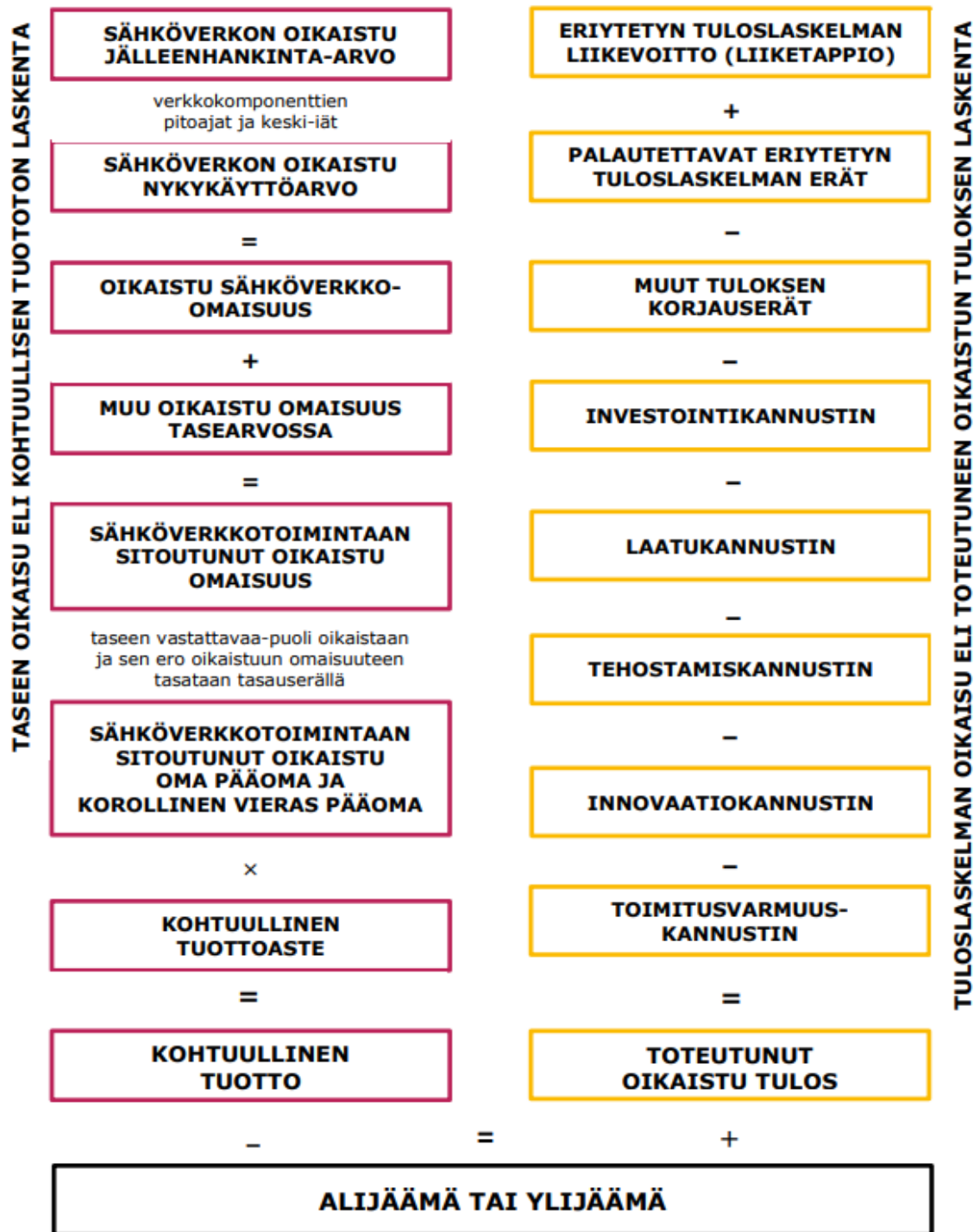
Laki myös asettaa verkkoyhtiöt toimimaan sähköturvallisuusviranomaisen asettamien standardien mukaisesti. Standardeista saa kuitenkin poiketa, jos standardeja vastaava turvallisuustaso saavutetaan muilla menetelmillä. (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016.) Suomen sähköturvallisuusviranomaisena toimii Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Keskeisimmät sähkölaitteistojen turvallisuuteen ja asennuksiin liittyvät standardit ovat *SFS 6000 Pienjännitesähköasennukset*, *SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset* ja *SFS 6002 Sähköturvallisuus*. Standardit vastaavat pitkälti vastaavia eurooppalaisia ja kansainvälisiä standardeja. (Tukes 2018)

Uudistettu sähkömarkkinalaki tuli voimaan 2013. Uudistettu sähkömarkkinalaki asettaa sähköverkkoyhtiöille erilaisia vaatimuksia muun muassa laatuun, hinnoitteluun ja toimitusvarmuuteen. Jakeluverkonhaltijan on suunniteltava, rakennettava ja ylläpidettävä sähköverkkonsa niin, että se täyttää järjestelmävastaavan kantaverkkohaltijan luotettavuus- ja käyttövarmuusvaatimukset. Sähköverkkoa pitää myös kehittää ja verkkoyhtiön on laadittava ja toimitettava verkon kehittämissuunnitelma Energiavirastolle. Kehittämissuunnitelmassa ilmaistaan yksityiskohtaisesti kaikki suunnitellut toimet seuraaviksi kahdeksi vuodeksi, jotka edistävät sähkömarkkinalain pykälien 51 ja 119 asettamien vaatimusten saavuttamista. Kehittämissuunnitelma päivitetään kahden vuoden välein ja Energiavirasto voi vaatia yhtiötä muuttamaan suunnitelmaa, jos Energiavirasto katsoo sen olevan riittämätön täyttämään laissa asetettuja vaatimuksia. (Sähkömarkkinalaki 588/2013.)

Sähkömarkkinalaki muutti aikaisempia toimitusvarmuusvaatimuksia pykälässä 51 niin, että pykälän 119 mukaisesti vuoteen 2028 mennessä jakeluverkon vioittuminen myrskyjen tai lumikuormien johdosta ei aiheuta asemakaava-alueella sähköverkon käyttäjille yli 6 tuntia kestävää keskeytystä sähköntoimituksessa. Muilla verkon alueilla keskeytyksen kesto ei saa ylittää 36 tuntia. (Sähkömarkkinalaki 588/2013.)

Tämä vaatimus on kiihdyttänyt sähköverkkoinvestointeja, jotta toimitusvarmuuskriteerit voidaan täyttää. Jarmo Partasen Työ- ja elinkeinoministeriölle toteuttamassa selvityksessä kerrotaan, että Suomen verkkoyhtiöt investoivat yhteensä noin 3 miljardia euroa sähköverkon toimitusvarmuuden parantamiseen vuosien 2016 ja 2028 välisenä aikana (Partanen 2018).

Energiavirasto valvoo jakeluverkkoyhtiöitä ja valvonnan tarkoituksena on varmistaa sähkötoimituksen lainsäädännöllisten vaatimusten täyttäminen ja sähkönsiirtohinnoittelun kohtuullisuus. Näiden valvontaa varten Energiavirasto on luonut valvontamallin, joka varmistaa hinnoittelun kohtuullisuuden samalla kannustaen verkkoyhtiöitä toiminnan kehittämiseen ja vaatimusten täyttämiseen. Valvontamallissa valvonta on jaettu 4 vuoden pituisiksi jaksoiksi ja valvontamenetelmiä voidaan päivittää 4 vuoden välein valvontajaksojen pituuden mukaisesti. Kuvassa 2 on esitetty yhteenveto nykyisen valvontajakson 2016 – 2019 ja seuraavan jakson 2020 – 2023 käytössä olevat valvontamenetelmät. (Energiavirasto 2018c)



Kuva 3. Energiaviraston valvontamenetelmät (Energiavirasto 2018c)

Huomio tässä työssä tulee kiinnittää valvontamenetelmän kannustimiin ja erityisesti laatu-, tehostamis- ja innovaatiokannustimiin, joilla on suoria vaikutusmahdollisuuksia IoT-sensoroinnin kannattavuuteen. Laatumuutosten kannustaa verkkoyhtiöitä saavuttamaan sähkömarkkinalain edellyttämät toimitusvarmuusvaatimukset. Lisäksi kannustimen tavoitteena on kannustaa verkkoyhtiöitä kehittämään sähkönsiirtoa ja -jakelua lain asettamaa vähimmäistasoa paremmaksi. Laatumuutosten muodostuu vertailutason ja ny-

kyisen valvontajakson toteutuneiden keskeytyskustannuksien välisenä erotuksena. Keskeytyskustannukset lasketaan taulukon 1 mukaisilla arvoilla. Jos verkkoyhtiö onnistuu pienentämään keskeytyksistä aiheutuvia kustannuksia valvontajaksolla verrattuna vertailutasoon, verkkoyhtiön oikaistusta tuloksesta vähennetään erotuksen verran, mikä taas lisää verkkoyhtiön varsinaista sallittua tuottoa. Jos keskeytyskustannukset ovat vertailutasoa suurempia, vaikutus on päinvastainen. Kannustimen kautta verkkoyhtiöiden toimet keskeytyskustannusten vähentämiseen liittyen vaikuttavat suoraan myös yhtiön sallitun tuoton määrään. (Energiavirasto 2018c)

Taulukko 1. Keskeytyksestä aiheutuneen haitan yksikköhinnat (Energiavirasto 2018c)

Odottamaton keskeytys		Suunniteltu keskeytys		Aikajälleen-kytkentä	Pikajälleen-kytkentä
$h_{E,odott}$	$h_{W,odott}$	$h_{E,suunn}$	$h_{W,suunn}$	h_{AJK}	h_{PK}
€ / kWh	€ / kW	€ / kWh	€ / kW	€ / kW	€ / kW
11,0	1,1	6,8	0,5	1,1	0,55

Odottamattomasta keskeytyksestä aiheutuvan keskimääräisen haitan laskenta tehdään seuraavalla kaavalla:

$$KAH_{odott} = P_k \cdot (h_{E,odott} \cdot t_v + h_{W,odott}) \cdot KHI \quad (1)$$

jossa

$h_{E,odott}$ = toimittamatta jääneen energian hinta (€ / kWh),

P_k = keskimääräinen irtikytketty teho (kW),

t_v = vian aiheuttama keskeytysaika (h),

$h_{W,odott}$ = irtikytketyn tehon hinta (€ / kW),

ja KHI on laskentavuoden kuluttajaindeksi perusteella laskettu kerroin vuoden 2005 kuluttajaindeksi ollessa perustaso. (Energiavirasto 2018c) Kerroin vuoden 2019 kuluttajaindeksien mukaan on noin 1,22.

Suunnitellussa keskeytyksessä käytetään vastaavaa kaavaa, mutta toimittamatta jääneen energian hinta ja irti kytketyn tehon hinnat muuttuvat taulukon 1 mukaisesti pienemmiksi. Yhden vian korjaamisessa suunnitellut keskeytykset ovat kestoltaan myös odottamattomia keskeytyksiä lyhyempiä, sillä vikakeskeytysaikaan kuuluva matka-aika vika-paikalle jää pois.

Tehostamiskannustin kannustaa verkkoyhtiöitä toimimaan kustannustehokkaasti. Kustannustehokkuus määritellään toimintaan käytettyjen panosten ja saatujen tuotosten suhteena. Kannustimen panoksina käytetään muuttuvana panoksena kontrolloitavissa olevia operatiivisia kustannuksia ja kiinteänä panoksena sähköverkon jälleenhankinta-arvoa. Tuotoksiksi määritetään siirretyn energian määrä, sähköverkon kokonaispituus, käyttöpaikkojen määrä ja keskeytyskustannukset, jotka mallinnetaan laskennassa haitakkeina tai ei-toivottuina tuotoksina. (Energiavirasto 2018c)

Verkkoyhtiöitä kannustetaan kehittämään ja käyttämään uusia innovatiivisia ratkaisuita verkkotoiminnassaan innovaatiokannustimen avulla. Näiden innovaatioiden käyttöönotto vaatii tutkimus- ja kehityspanostuksia ja innovaatiokannustimen kautta niistä syntyvät kohtuulliset kustannukset voidaan vähentää liikevaihdosta sallien korkeamman tuloksen. Innovaation on tuotettava uutta tietoa tai oltava uusi teknologia, tuote tai toimintatapa, jota sähköverkkotoiminnassa voidaan hyödyntää. Innovaation tulokset on oltava julkisia ja mahdollisia hyödyntää muiden verkkoyhtiöiden toimesta. (Energiavirasto 2018c)

Laatu-, tehostamis- ja innovaatiokannustimista on mahdollisia synergiahyötyjä saatavilla, kun uuden innovaation käyttö vähentää keskeytyskustannuksia tai pienentää operatiivisia kustannuksia. IoT-sensoreiden tavoitteena on vähentää keskeytyksiä ja tehostaa kunnonhallintaa siirtymällä aikaperusteisesta kunnossapidosta kohti kuntoon perustuvaa kunnossapitoa. IoT-sensoreiden käyttöönotto sähköverkossa voidaan lisäksi niiden mahdollistaman uuden toimintatavan tai teknologian käytön takia luokitella innovaatioksi, joten sensoroinnin kehitykseen saadaan valvontamallin kautta tukea jopa kolmesta eri kannustimesta.

3. SÄHKÖVERKON KUNNOSSAPITO JA TOIMINTAVARMUUS

Verkkoon investoidaan tällä hetkellä vuosittain satoja miljoonia euroja, jotta lain vaatimat toimitusvarmuuskriteerit täyttyvät vuoteen 2028 mennessä kaikkialla Suomessa. Verkkoomaisuuden hallinta on verkkoyhtiöiden merkittävimpiä toimintoja ja sen merkitys tulee vain kasvamaan omaisuuden kasvavan arvon ja komponenttien pitkän käyttöiän johdosta. Omaisuudenhallintaprosessi voidaan jakaa verkon kehittämis-, kunnossapito- ja käyttötoimintoon. (Lakervi, Partanen 2009)

Sähköverkon kunnonhallinta on oleellinen osa verkko-omaisuuden kokonaishallintaa. Kunnossapidon tarkoituksena on estää verkon vioittuminen ja ylläpitää komponenttien teknistaloudellista käyttöikä. Laki, viranomaisvalvonta ja standardit asettavat lisäksi erilliset vaatimukset sähköverkon turvallisuudesta ja kunnossapidosta verkkoyhtiöille.

Useat verkkoyhtiöt ovat ulkoistaneet kunnossapitotoimiaan urakoitsijakumppaneille. Tällöin kunnossapitotöiden suunnittelu, tilaus ja seuranta jäävät verkkoyhtiön vastuulle ja urakoitsija huolehtii varsinaisten huoltotoimenpiteiden suorittamisesta ja tietojen raportoinnista. Verkkoyhtiön ja urakoitsijan välinen yhteistyö on siis tärkeä osa onnistunutta verkon kunnonhallintaan.

3.1 Sähköverkon kunnossapito

Kunnossapidolle on useita erilaisia määritelmiä. Tässä työssä käytetään SFS-EN 13306:2017 standardin mukaista määritelmää. Standardi määrittelee kunnossapidon seuraavasti: ”Kunnossapito koostuu kaikista kohteen eliniän aikaisista teknisistä, hallinnollisista ja liikkeenjohdollisista toimenpiteistä, joiden tarkoituksena on ylläpitää tai palauttaa kohteen toimintakyky sellaiseksi, että kohde pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon” (Suomennos Järviö 2007). Teknisiä toimenpiteitä on muun muassa laitteen huoltotoimenpiteet tai tarkastukset. Hallinnollisiin toimenpiteisiin kuuluu esimerkiksi kunnossapito-ohjelmien suunnittelu ja toteutus. Resurssien allokointi ja budjetointi ovat esimerkkejä liikkeenjohdollisista toimenpiteistä.

Kunnossapitotoimenpiteitä voidaan lajitella eri ryhmiin. Lajittelu voi ottaa kantaa esimerkiksi toimenpiteen tarkoitukseen tai ajoitukseen. Mahdollisia kunnossapitolajeja ovat muun muassa korjaava kunnossapito (engl. corrective maintenance), ehkäisevä kunnossapito (preventive maintenance) ja ennakoiva kunnossapito (predictive maintenance). Ehkäisevää kunnossapittoa voidaan toteuttaa kuntoon perustuen (Condition based maintenance, CBM) tai aikaan perustuen (Time based maintenance, TBM). (Järviö 2007)

Korjaavassa kunnossapidossa laite huolletaan vasta tarpeen vaatiessa eli usein vikaantumisen jälkeen eikä laitteen kuntoa seurata. Kuntoon perustuvassa kunnossapidossa laitteen kuntoa seurataan muun muassa tarkastuksin ja tehdään toimenpiteitä, jos kunto on heikko. Aikaan perustuvaan kunnossapitoon kuuluu määräaikaishuollot, joissa laite huolletaan riippumatta sen kunnosta ja jotka toteutetaan toistuvasti tietyin välein. (Lakervi, Partanen 2009) Ennakoivassa kunnossapidossa laitteen kunnan kehitystä pyritään ennustamaan ja ajoittamaan tarvittavat huoltotoimenpiteet ennen laitteen vikaantumista (Ulbert 2015).

Korjaavan kunnossapidon ylläpitokustannukset ovat hyvin pienet, sillä ainoat kustannukset syntyvät vikaantuneen komponentin korjauksesta tai vaihdosta. Toiminnan häiriöt tai keskeytyminen voivat aiheuttaa merkittäviä välillisiä tai välittömiä kustannuksia, jos laite on toiminnalle kriittinen. Strategia ei kuitenkaan sovi käytettäväksi sähköverkkoympäristössä lähes ollenkaan, sillä suurin osa sähköverkon laitteista on tehokkaan ja turvallisen sähkönsiirron kannalta kriittisiä.

Kuntoon perustuvan kunnossapidon implementointi vaatii paljon tietoa ja kokemusta, jotta siitä saadaan tehokas. Tämä on usein hankalaa toteuttaa kustannustehokkaasti kaikille komponenteille, sillä tiedon kerääminen ja hallinta ovat kalliita toteuttaa. (Jurvansuu et al. 2013) Verkkoyhtiöille on kerääntynyt ajan mittaan valtavasti tietoa komponenttien kunnosta ja luotettavuuksista, mutta näiden tietojen hallinta ei ole tarpeeksi hyvällä tasolla, jotta niitä voitaisiin hyödyntää kaikessa toiminnassa.

Kunnossapitostrategia muodostuu usein eri kunnossapitolajien yhdistelmistä, jotta kunnossapitotoiminta olisi tarpeeksi hyvällä tasolla kustannustehokkaasti. Mahdollisia strategioita on muun muassa luotettavuuspohjainen kunnonhallinta (Reliability centered maintenance, RCM) tai käyttöomaisuuden hallinta (Asset Management). Luotettavuuspohjaisen strategian avulla voidaan välttää tai ainakin vähentää vakavia ja yllättäviä vikaantumisia kriittisissä laitteissa ajoittamalla ehkäiseviä huoltotoimenpiteitä ennen vikaantumisia. (Järviö 2007)

Strategian valinnassa on otettava huomioon eri reunaehdot. Lainsäädäntö antaa vaatimukset sähkölaitteiston turvallisuudesta ja toimitusvarmuudesta ja esimerkiksi kunnossapitobudjetti ja pitkät käyttöiät asettavat teknistaloudellisia rajoja valintatilanteeseen. Tämän takia kaikkia verkon komponentteja ei voida tarkistaa tai huoltaa jatkuvasti, eikä laitteita myöskään voida jättää huoltamatta säännöllisesti. Komponentit voivat vikaantua hyvin monesta eri syystä ja jokaisen komponentin jatkuva tarkastaminen ja kunnan seuranta perinteisin menetelmin tulisi verkkoyhtiölle todella kalliiksi, sillä niitä voi olla hyvin paljon maantieteellisesti laajasti levittyneinä.

Suunniteltu huoltotoimenpide on kuitenkin aina halvempi kuin vikahuoltotyö jo pelkääntään työn kustannuksissa. Jos vikaantuminen aiheuttaa lisäksi keskeytyksen sähkönjakelussa, kustannukset ovat vielä huomattavasti korkeammat mahdollisten vakiokorvausten ja asiakkaan kokeman haitan takia (Energiavirasto 2018c).

Yhtä ja samaa strategiaa ei siis kannata käyttää jokaiselle verkon komponentille, vaan strategiat valitaan erikseen esimerkiksi kriittisyysluokituksen perusteella. Toiminnalle kriittisimpien laitteiden kuntoa on syytä seurata perusteellisesti, jotta ne eivät vikaannu ja aiheuta mittavia häiriöitä sähköverkon toiminnalle tai vaaranna turvallisuutta. Näille komponenteille on kannattavaa siis valita kuntoon perustuva kunnossapitostrategia, jossa niiden kuntoa seurataan aktiivisesti. Toiset komponentit eivät ole kriittisiä toiminnalle ja niitä kannattaa korjata vasta vikaantumisen ilmaantuessa. (Lakervi, Partanen 2009)

Sähköverkkoliiketoiminnassa useimmille komponenteille tehdään kuntotarkastuksia, joiden perusteella määritetään komponentin kunto ja suunnitellaan tarvittavat huoltotoimenpiteet. Monilla komponenteilla tarkastusväli on useita vuosia eikä komponentin kunnosta saada tarkkaa kuvaa tarkastuksien välissä mitenkään. Nykyisin ainoastaan laitteen toimivuus voidaan todeta etänä, mikä on todettu riittävän verkon käytön toimivuuden kannalta tähän asti. Aktiivisemmän kunnonvalvonnan pitää siis olla hyvin kustannustehokasta, jotta siitä saatava lisäarvo olisi riittävän kannattavaa.

3.2 Verkon käyttövarmuus ja vikaantuminen

Käyttövarmuudella mitataan, kuinka luotettavaa sähkönjakelu on. Käyttövarmuuteen vaikuttaa sähkönjakelun keskeytykset. Sähköverkon komponentin vikaantuminen voi aiheuttaa sähköntoimitukseen katkon asiakkaille. Vikaantumisen vaikutukset vaihtelevat paljon riippuen komponentin tyypistä ja sijainnista. Sähkömarkkinalaki asettaa vaatimukset vakiokorvauksista, jotka verkkoyhtiön on maksettava asiakkaille, kun sähkökatkoksen kesto on pitkä. Lisäksi keskeytyksistä aiheutuvaa haittaa arvioidaan taulukossa 1 esitettyjen tietojen mukaisesti laatukannustimessa sähköverkkoliiketoiminnan regulaatiomallissa. (Lakervi, Partanen 2009, Energiavirasto 2018c)

Sähköverkon sijainti voi vaikeuttaa viankorjaustoimia, sillä tarkan vikapaikan ja -syyntä löytäminen voi vaatia sähköasentajan näköhavainnon maastosta. Nykyaikaiset sähköverkon käytönvalvontaohjelmistot osaavat paikantaa vian eri laskenta- ja todennäköisyysmenetelmin kohtalaisen tarkasti ja erottaa sen muusta sähköverkosta, mutta vikaantumisen syy voi välillä olla täysin tuntematon. Maastokäynnit pidentävät vian vaikutusaikaa ja vaikutusajat ovat selvästi pidempiä haja-asutusalueilla, sillä etäisyydet ovat pidempiä ja verkko voi sijaita vaikeakulkuisessa maastossa, kuten metsässä.

Yleistyvä hajautettu sähköenergian tuotanto tuo tulevaisuudessa paljon muutoksia sähköverkkoyhtiöiden toimintaan. Esimerkiksi keskeytyksestä aiheutuva haitta voisi tulevaisuudessa laajentua kattamaan myös asiakkaan oman tuotannon menetykset, mikä osaltaan

lisäisi pienjänniteverkon toimintavarmuuden vaatimuksia. Lisäksi kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpitäminen vaatii tulevaisuudessa uusia älykkäitä ratkaisuita kulutuksen säätelyyn, kun pelkkä tuotannon säätely ei enää takaa tasapainoa, jolloin tulevaisuuden älykäs sähköverkko toimii alustana erilaisille palveluntuottajille (Työ- ja elinkeinoministeriö 2019).

Verkkokomponenteille voidaan laskea vikataajuuksia perustuen verkkoyhtiön vikadokumentaatioon. Komponenttien vikataajuuksia tarvitaan laskettaessa keskeytyksestä aiheutuvaa haittaa, jonka pienentäminen on verkostoautomaatio- ja myös IoT-sensorointi-investointien kannattavuustarkastelussa tärkeässä osassa. Energiateollisuus ry julkaisee vuosittain Suomessa toimivien verkkoyhtiöiden sähkönjakelun keskeytyksistä tilastoja. Tilastojen perusteella vuonna 2017 avojohtoverkossa tapahtui noin 7 vikaa 100 kilometriä kohden, maakaapeliverkossa noin 1 vika 100 kilometriä kohden ja muuntamoilla 0,6 vikaa 100 kappaletta kohden. (Energiateollisuus ry 2018) Vikataajuudet ovat pysyneet hyvin samanlaisina verrattuna vuonna 2005 valmistuneen LuoVa-projektissa määritettyihin vikataajuuksiin eri verkon osissa, vaikka verkon rakenne on muuttunut huomattavasti vuosien aikana (Verho, Pylvänäinen et al. 2005). Investointilaskennassa verkkoyhtiön tulee kuitenkin hyödyntää omaa vikatilastointia, sillä Suomessa verkkoyhtiöiden verkkojen rakenteet eroavat merkittävästi toisistaan, minkä vaikutus hukkuu keskimääräisiä arvoja käytettäessä.

Verkkokomponenteilla on hyvin erilaisia vikaantumismekanismeja ja vaikutuksia riippuen komponentin tyypistä ja rakenteesta. Vikaantumismekanismien ja vaikutusten analyysin (engl. Failure Modes and Effects Analysis, FMEA) avulla komponentin vikaantumisen syyt ja seuraukset ovat selvillä ja analyysin tuloksien perusteella voidaan suunnitella tarvittavia toimenpiteitä vikaantumisten ehkäisemiseksi. Yleinen tapa kuvata eri komponenttien analyysien tuloksia on vikapuu, jossa komponentin eri vikaantumismekanismit ja seuraukset on kuvattu puurakenteen avulla. (Franzén, Karlsson 2007)

Vikapuu toimii erinomaisena työkaluna IoT-sensorointikohteita pohdittaessa, sillä sen avulla on helppo arvioida, mitkä vikaantumismekanismit on mahdollista havaita sensoreilla ja minkälaisia vaikutuksia sensoroinnilla on laitteen toimintavarmuuteen olisi. Liitteessä A on esitetty työtä varten muodostettu vikapuu puistomuuntamolle. Vikapuussa on merkitty katkoviivalla ne puistomuuntamon komponentit ja vikaantumismekanismit, joita olisi mahdollista havainnoida sensoreilla. Vikaantumismekanismeille on arvioitu tapahtumien todennäköisyyksiä asiantuntija-arvion ja aiemman tutkimuksen perusteella. Niille on myös merkitty mahdollinen sensorin tyyppi, millä vikaantumista voitaisiin havainnoida, ja arvio sensorin hinnasta, joka riippuu ilmiön monimutkaisuudesta. Tällä menetelmällä on mahdollista arvioida puistomuuntamon sensoroinnin mahdollisuuksia ja kannattavuutta.

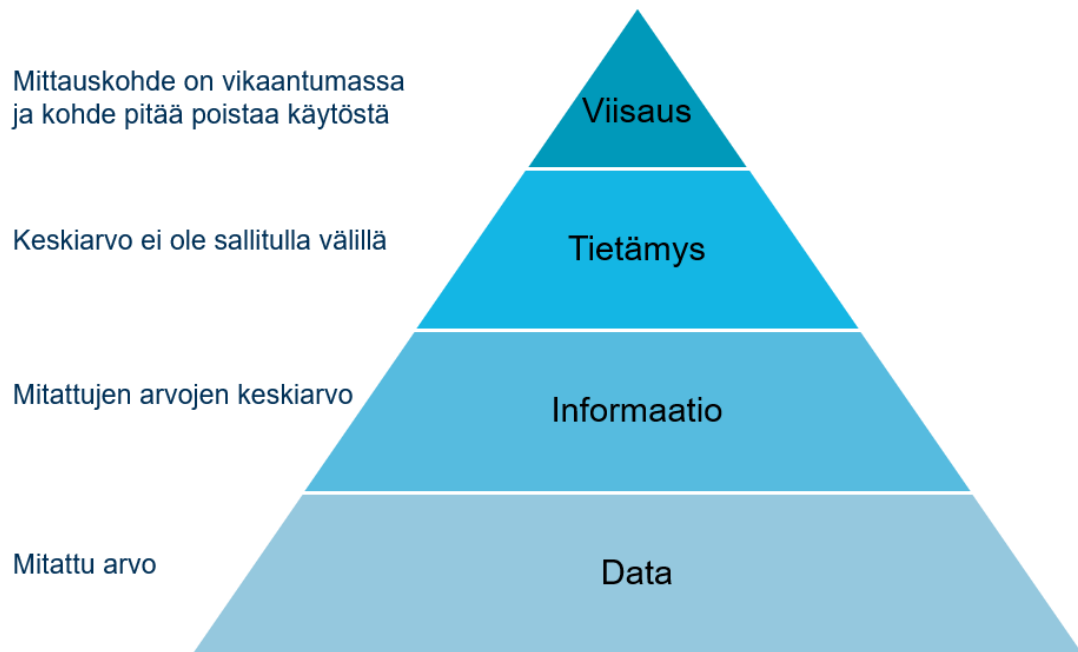
4. INTERNET OF THINGS JA TEOLLISEN INTERNETIN SENSORIT

Internet of Things tai teollisen internetin hyödyntäminen perustuu sen avulla kerättävän tiedon arvoon. IoT sisältää useita teknologioita, joiden muodostama kokonaisuus tuottaa arvokasta tietoa päätöksentekotilanteisiin. IoT-järjestelmän rakentaminen vaatii useiden erilaisten teknologioiden hallintaa, sillä järjestelmä koostuu muun muassa sensoreista, tietoliikenteestä ja analytiikasta. Tässä luvussa esitetään, miten tiedon arvo muodostuu, miten IoT-järjestelmä rakentuu ja minkälaisia IoT-ratkaisuita on käytössä sähköverkko- ja muilla toimialoilla.

4.1 Tiedon arvo

Muun muassa Ackhoffin (1989) ja Martinsuon ja Kärrin (2017, s. 21) esittämä data, informaatio (engl. information), tietämys (engl. knowledge) ja viisaus (engl. wisdom) hierarkia eli DITV-hierarkia (engl. DIKW hierarchy) on ollut jo pitkään tiedonhallinnan ja tietojärjestelmien kirjallisuuden ja opetuksen peruselementti. Hierarkian eri tasojen nimitykset kuvaavat tiedon luonnetta. Hierarkiasta on olemassa erilaisia variaatioita ja siitä käytetään myös muita nimityksiä kuten informaatiohierarkia (engl. information hierarchy) tai tietopyramidi (engl. knowledge pyramid), sillä hierarkia visualisoidaan usein pyramidina. (Rowley 2007, s. 163-164)

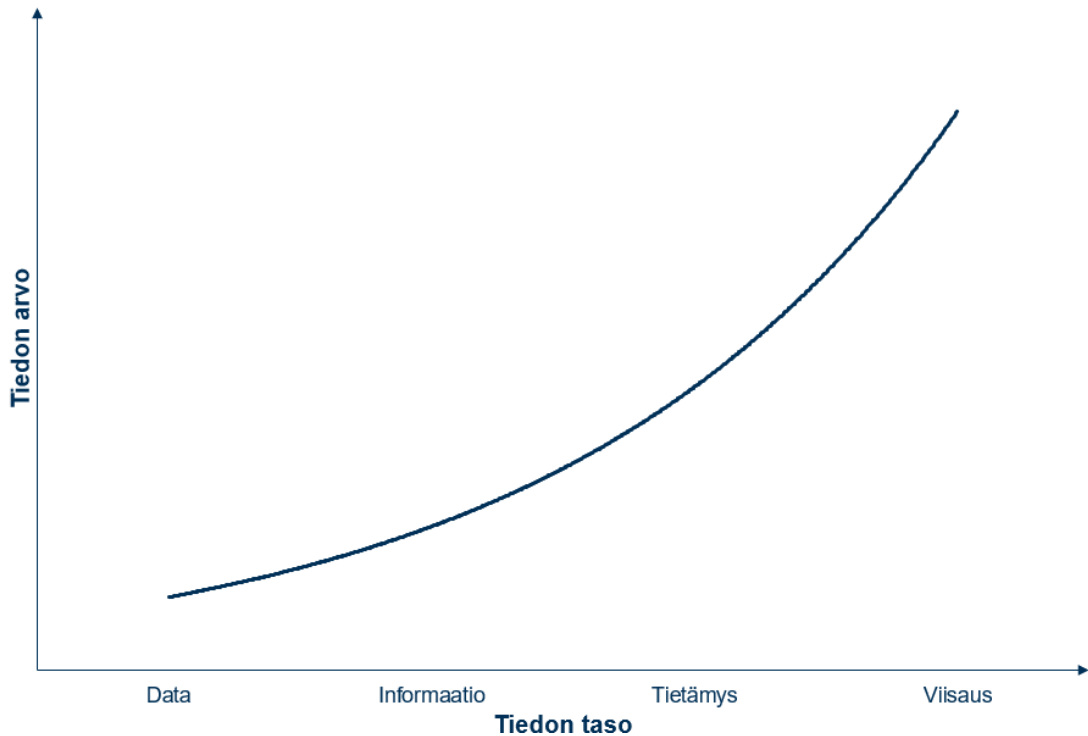
Kuvassa 4 on esitetty DITV-hierarkia pyramidina. Kuva sisältää myös mahdolliset esimerkit tiedon luonteesta eri tasoilla. Data voi olla esimerkiksi tallennettuja arvoja ja havaintoja. Datan yksinkertaisella analysoinnilla ja prosessoinnilla saadaan datasta muodostettua informaatiota. Informaatiosta muodostuu tietämystä havaitsemalla tai tulkitsemalla trendejä tai muita merkkejä. Viisauteen kuuluu kyky muodostaa eri vaihtoehtoja ja tehdä niistä optimaaliset päätökset saatavilla olevan tietämyksen perusteella. (Kortelainen, Hanski et al. 2017, s. 33)



Kuva 4. *Data-informaatio-tietämys-viisaushierarkiapyramidi (Mukaiillen Kortelainen, Hanski et al. 2017, Rowley 2007, s. 164)*

DITV-hierarkiapyramidi kuvaa tiedon eri tasojen suhteita toisiinsa. Pyramidin alin taso on data ja se toimii perustana koko pyramidille. Dataa pitää kerätä paljon, jotta tietämystä tai viisautta voidaan muodostaa. Yksittäisellä datapisteellä on mahdotonta huomata mittauskohteen epänormaalia käytöstä, kun taas tuhansista datapisteistä voidaan jo havaita trendejä tai poikkeustilanteita.

Tiedon kompleksisuus ja arvo kasvavat hierarkian tasojen välillä. Datan kerääminen on yksinkertaista eikä se itsessään ole arvokasta ja tietämyksen muodostaminen vaatii jo asiantuntijuutta ja laajempaa ymmärrystä asiasta, josta data on kerätty. (Kortelainen, Hanski et al. 2017) Kuvassa 5 kuvataan tiedon tason ja sen arvon välistä suhdetta. Tiedon korkeammilla tasoilla tieto on arvokkaampaa, koska sitä voi silloin hyödyntää päätöksenteossa tai toimenpiteissä paremmin.



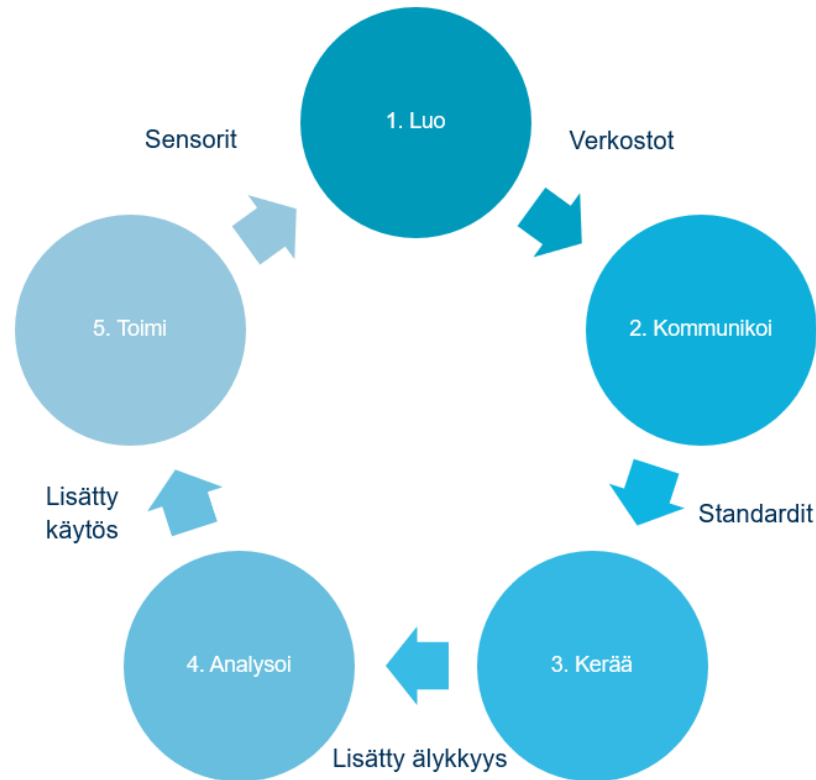
Kuva 5. Tiedon arvo eri tasoilla (Muokattu Salo 2013)

Tiedon arvo muodostuu DITV-hierarkian perusteella erilaisten analyttisten menetelmien avulla. Yksinkertaistetusti menetelmät voidaan nimittää datan kokoamiseksi ja koostamiseksi, informaation tulkitsemiseksi ja tietämyksen perusteella toimimiseksi. Perinteisesti tiedon käsittelijänä on toiminut ihminen, mutta tietokoneiden ja algoritmien kehittyessä ihminen on siirtynyt käsittelijästä tietokoneen antaman tiedon tulkitsejäksi. Dataa kertyy niin paljon, että ihmisen ei ole ollenkaan kannattavaa itse käsitellä ja koostaa datasta informaatiota, kun tietokoneet suoriutuvat helposti ja nopeasti tästä. Yleensä myös virheiden määrän datan käsittelyssä oletetaan pienentyvän, kun inhimilliset virheet jäävät käsittelyvaiheesta pois.

Tiedon arvon kasvu IoT-sovelluksissa perustuu Raynorin ja Cotteleerin (2015) mukaan silmukoituun arvoketjuun, joka on esitetty kuvassa 6. Heidän esittelemässä arvoketjussa on 5 eri vaihetta ja se sisältää lisäksi vaiheiden välillä siirtymiseen mahdollistavat teknologiat. Arvoketjun vaiheet ovat luominen, kommunikoiminen, aggregointi, analysointi ja toimiminen.

Ensimmäisenä vaiheena on luominen. Sillä tarkoitetaan datan keräämistä sensoreilla fyysisestä tapahtumasta tai tilasta. Toisena vaiheena on kommunikointi, joka tarkoittaa kerätyn datan siirtämistä paikasta toiseen. Kolmantena vaiheena on aggregointi, eli tiedon kerääminen yhteen eri lähteistä tai eri aikoina. Analysointivaiheessa ilmiöistä kerätystä tiedosta havaitaan tai erotetaan riippuvuussuhteita tai malleja, joiden avulla voidaan ennustaa, kuvata tapahtumia tai toimintamääryksiä. Viimeisessä vaiheessa toimitaan analysointivaiheen tulosten perusteella, esimerkiksi tekemällä tarvittavia huoltotoimenpiteitä

tai muita muutoksia. Toimien jälkeen ketju aloitetaan uudelleen uuden tiedon luomisesta muutoksien vaikutuksista. (Raynor, Cotteleer 2015)

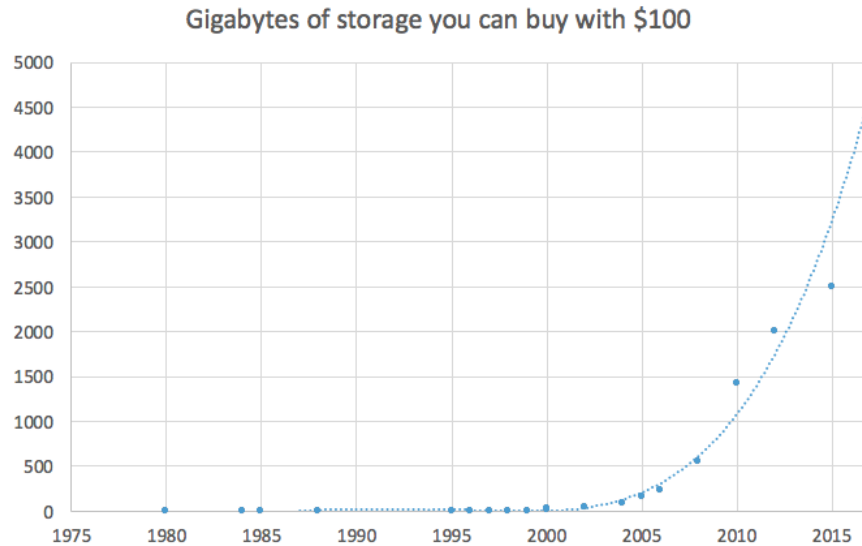


Kuva 6. Tiedon arvoketjun vaiheet ja siirtymisiin mahdollistavat teknologiat (Muokattu Raynor, Cotteleer 2015)

Raynorin ja Cotteleerin ketjun vaiheiden välillä olevat teknologiat ovat sensorit, tietoverkot, standardit, lisätty äly (engl. augmented intelligence) ja lisätty käyttäytyminen (engl. augmented behavior). He määrittelevät sensorit laitteiksi, jotka luovat sähköisen signaalin fyysisestä tilasta tai tapahtumasta. Tietoverkot ovat taas keino siirtää kyseinen sähköinen signaali. Standardit ovat yleisesti hyväksytyjä tapoja toimia. Kehittyneellä älyllä tarkoitetaan analyttisiä keinoja, joilla ilmiöiden suhteita toisiinsa voidaan kuvata, ennustaa ja hyödyntää. Tämä tarkoittaa siis muun muassa data-analytiikkaa ja tekoälysovelluksia. Kehittynyt käyttäytyminen kuvaa teknologioita ja toimintamalleja, jotka parantavat määriteltujen toimintojen noudattamista. Esimerkiksi koneiden väliset rajapinnat mahdollistavat inhimillisten virheiden syntymistä, kun prosessit optimoituvat automaattisesti. (Raynor, Cotteleer 2015)

IoT-sensoroinnin peruseriaate liittyy vahvasti edellä kuvattuun DITV-hierarkiaan ja arvoketjuun. IoT-sensorien edullinen hankintahinta mahdollistaa niiden asentamisen laajasti eri kohteisiin kustannustehokkaasti, jolloin dataa voidaan kerätä paljon. Dataprocessoinnin ja data-analytiikan avulla datasta voidaan muodostaa tietämystä päätöksentekotilanteisiin. Tulevaisuudessa korkealuokkaisia koneoppimismenetelmiä hyödyntäen myös päätöksenteko voi olla mahdollista automatisoida.

Kasvavat datamäärät tarvitsevat jatkuvasti enemmän tallennustilaa. Digitalisaation yhtenä merkittävimpana mahdollistajana voidaan pitää tallennustilan kustannusten huomattavaa putoamista. Kuvassa 7 on esitetty, kuinka paljon tallennustilaa 100 USA:n dollarilla pystyi ostamaan eri vuosina. Kasvu on ollut 2000-luvulla räjähdysmäinen, sillä vuonna 2005 yksi gigatavu tallennustilaa maksoi noin 2,5 dollaria ja vuonna 2015 enää noin 0,02 dollaria. (Tsai 2017)



Kuva 7. Tallennustilan määrän kehitys 100 USA:n dollarin suhteen (Tsai 2017)

Valtavien datamäärien prosessointi ja analysointi vaatii paljon prosessointitehoa. Pilvipalveluomittajat tarjoavat kustannustehokkaita ratkaisuita datamäärien tallentamiseen ja prosessointiin. Tällöin yrityksen ei tarvitse itse omistaa palvelininfrastruktuuria. Pilvipalveluissa sensoreilta kerätty data voidaan prosessoida ja varastoida sopivassa muodossa jatkokäsittelyä varten. Dataa voidaan tämän jälkeen hyödyntää analytiikkasovelluksissa, joita voidaan prosessoida pilvipalvelun palvelimilla, jolloin tiedon arvo kasvaa ja sitä voidaan käyttää päätöksentekotilanteissa.

4.2 Internet of Things ja teollinen internet

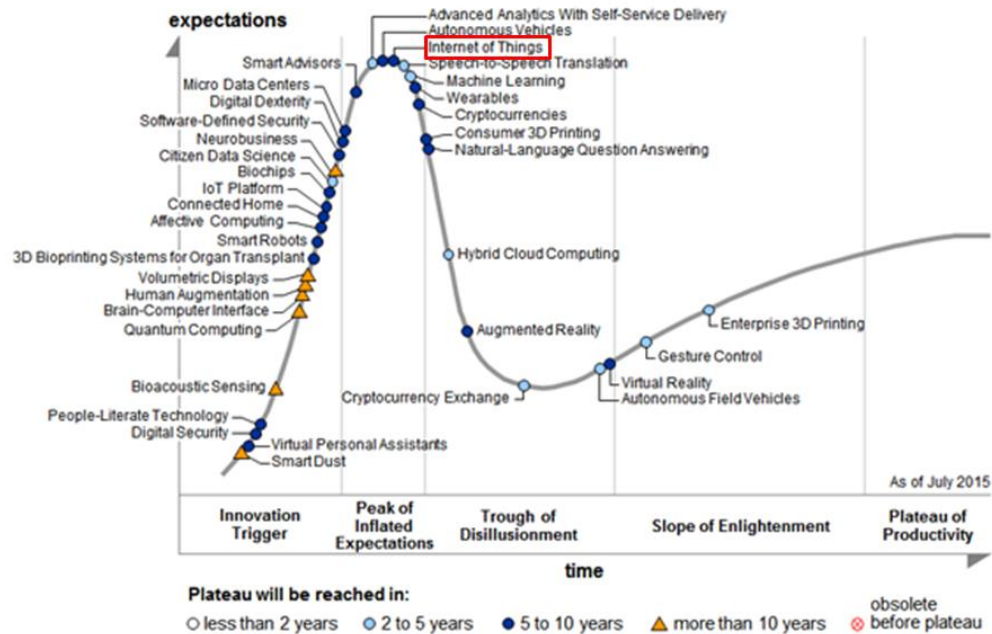
Internet of Things on hyvin laaja käsite ja sille on olemassa paljon erilaisia määritelmiä, sillä termillä viitataan sekä fyysisiin laitteisiin että infrastruktuuriin laitteiden ympärillä. Gartnerin määritelmän mukaan IoT tarkoittaa fyysisten esineiden verkkoa, jossa esineillä on kyky kommunikoida ja havainnoida tai vuorovaikuttaa sisäistä tilaansa tai ulkoista ympäristöään. Se voidaan myös määritellä maailmanlaajuisena infrastruktuurina, joka mahdollistaa fyysisten ja virtuaalisten esineiden yhdistelyn eri tietoliikenneteknologioiden avulla (ITU, 2018). Internet of Things ja teollinen internet ovat terminä hyvin läheisiä ja monissa yhteyksissä ne voivat tarkoittaa samaa. Collin ja Saarelainen erottelevat

kirjassaan Internet of Things:in yksiselitteisesti kuluttajien esineiden internetiksi ja teollisen internetin (Industrial IoT, IIoT) teollisuuden esineiden internetiksi, johon sisältyy myös julkinen infrastruktuuri. (Collin, Saarelainen 2016, s. 31)

Tässä työssä IoT-sensoreilla tarkoitetaan laitteita, jotka havainnoivat ympäristöönsä erityyppisten antureiden avulla ja lähettävät kerättyä tietoa itsenäisesti suoraan tietojärjestelmiin hyötyyn nähden kohtalaisilla kustannuksilla. Kerättyä dataa analysoimalla toinen laite tai tietojärjestelmä voi tehdä esim. tarvittavaa ohjausta tai varoittaa ihmisiä epänormaalista toiminnasta. Pelkkä sensorien asennus ei siis riitä, vaan sensoroinnin eli sensoreiden asentamisen hyödyn realisointi vaatii lisäksi toimivaa tietoliikennettä, tietojärjestelmiä ja data-analytiikkaa. (Collin, Saarelainen 2016, s. 143)

Internet of Things tai teollinen internet ovat olleet viime vuosina erityisen suosittuja ja keskustelua herättäviä. Teolliselta internetiltä odotetaan hyvin paljon; sitä pidetään neljäntenä teollisuuden vallankumouksena, mikä tulee tehostamaan tuotantoa, pienentämään kustannuksia ja parantamaan asiakaskokemusta. Saksassa aloitettiin jo vuonna 2011 *Industrie 4.0* nimellä kulkeva yhteishanke, jossa on mukana teollisuusalan yrityksiä, yliopistoja ja politiikan edustajia. (Hermann, Pentek et al. 2016, Collin, Saarelainen 2016, s. 37)

Innostus Internet of Things:iin ja teolliseen internetiin on ollut huomattavaa ja kuvassa 8 esitetyn Gartnerin vuoden 2015 ”uusien teknologioiden hype-käyrän” perusteella IoT:ta hehkutus oli huipussaan ja se oli ajautumassa Gartnerin mukaan seuraavaksi ”pettymyksen kuiluun”, jolloin todetaan, että kaikkia IoT:lle asetettuja odotuksia ei voidakaan saavuttaa ja usko teknologiaan tällöin hiipuu. (Gartner 2015) Keskustelu aiheen ympärillä erityisesti kuluttajapuolella onkin selvästi hiipunut, mikä voi olla syy siihen, että Gartnerin uudemmassa arviossa vuodelta 2018 *Internet of Things* terminä on kokonaan hävinnyt ”hype-käyrästä”. Sen sijaan IoT-alustat ovat olleet heidän mukaansa vuonna 2018 suurimman hehkutuksen kohteina. (Gartner 2018)



Kuva 8. Gartnerin vuoden 2015 uusien teknologioiden hype-käyrä (Gartner 2015)

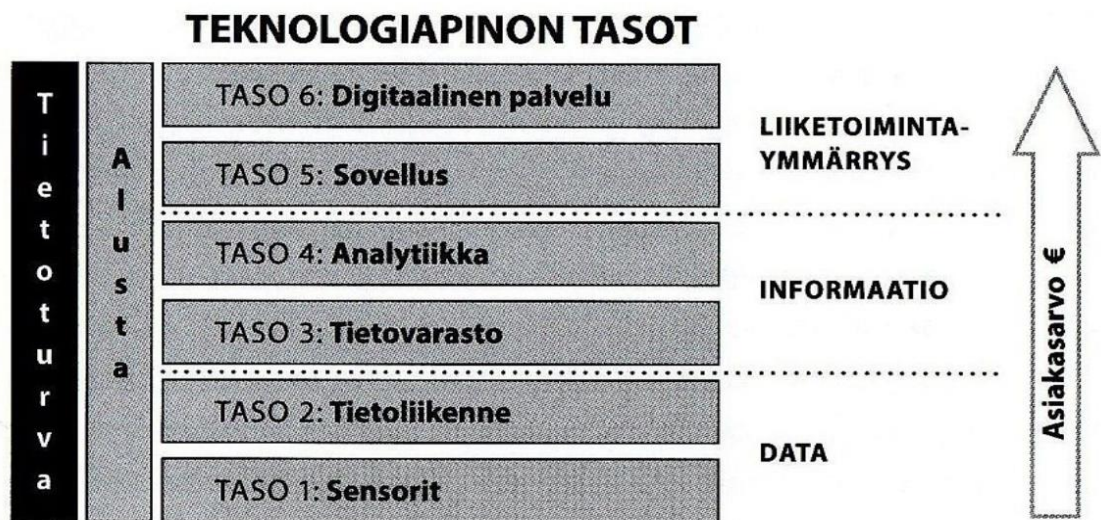
IoT-alustat ovat laajojen sensorijärjestelmien rakentamisen kannalta hyvin tärkeitä. Suurimmat pilvipalvelutarjoajat ovat kehittäneet omia IoT-alustojaan, joita yritykset voivat hyödyntää omien järjestelmiensä pohjana. Hehkutus niiden ympärillä onkin ymmärrettävää niiden merkittävyyden takia.

4.3 Internet of Things –sensorijärjestelmän rakenne

Collinin ja Saarelaisen mukaan teollinen internet ei ole itsessään mikään teknologia, vaan eri teknologioiden yhteiskäytöstä muodostuva kokonaisuus. Tällä hetkellä kaiken kattava kokonaisratkaisua ei ole saatavilla mistään, vaan teollista internetiä tavoittelevat organisaatiot joutuvat itse rakentamaan saatavilla olevista osista toimivan kokonaisuuden tai ostamalla ne erillisenä palveluna. Teolliseen internetiin liittyvät teknologiat esitellään heidän kirjassaan teknologiapinon avulla. Teknologiapino kuvaa, mitkä teknologiat muodostavat teollisen internetin kokonaisuuden ja miten ne linkittyvät toisiinsa. (Collin, Saarelainen 2016, s.141-143)

Alla kuvassa 9 on esitetty teollisen internetin teknologiapino. Teknologiapinon ensimmäisenä tasona on sensorit. Sensoreiden keräämä data ympäristöstään luo pohjan teolliselle internetille. Toisella tasolla on tietoliikenne, jonka avulla sensoreiden keräämä data voidaan siirtää tietovarastoon, joka on kolmannen tason teknologia. Tietovarastoon on syytä pystyä siirtämään tietoa myös muualtakin kuin sensoreilta. Esimerkiksi toiminnanohjausjärjestelmät tai muut käytössä olevat järjestelmät voivat tuottaa hyödynnettävissä olevaa dataa. Neljännessä tasossa analytiikka käsittelee tietovarastoon tallennettua dataa

erilaisin menetelmin. Jos tietovarasto ja analytiikka molemmat toimivat pilvipalvelussa, analytiikassa voidaan helposti hyödyntää pilvilaskenta- ja big data-analytiikkaratkaisuita. Analytiikan avulla saatuja tuloksia voidaan esittää erilaisten sovellusten, kuten mobiili- tai business intelligence (BI) -sovellusten, kautta. Sovellusten avulla tieto tuodaan helposti ymmärrettävään ja saatavilla olevaan muotoon tiedon hyödyntäjille. Viimeisellä tasolla on digitaalinen palvelu, joka ei Collinin ja Saarelaisen mukaan ole pelkästään osa teknologiapinoa, vaan se muodostaa pinosta lopullisen kokonaisuuden. Digitaaliset palvelut liittyvät vahvasti yrityksen liiketoimintaprosesseihin ja tuovat myös uusia liiketoimintamalleja asiakkaille, toimittajille ja muille organisaation sidosryhmille. (Collin, Saarelainen 2016, s. 143)



Kuva 9. Teollisen internetin teknologiapino (Collin, Saarelainen 2016, s. 143)

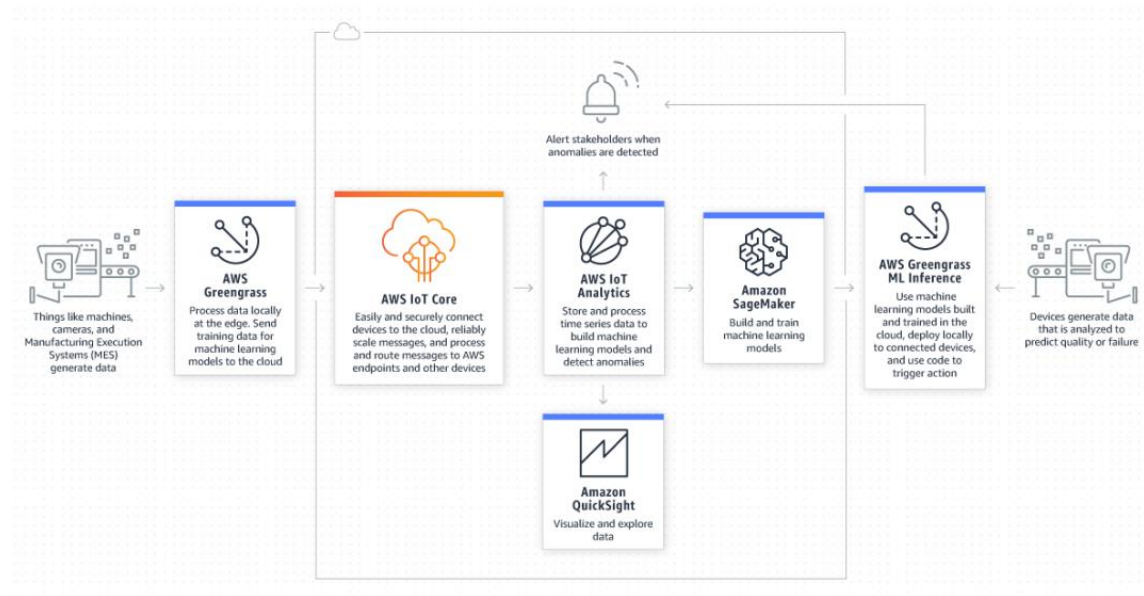
Kuvassa 9 esitetyssä teknologiapinossa asiakas- ja samalla tiedon arvo kasvaa korkeammilla tasoilla, luvussa 4.1. esitetyn DITV-hierarkiapyramidin mukaisesti (kuva 2). Pyramidin ylimmät tasot tietämys ja viisaus on kuvassa 9 yhdistetty liiketoimintaymmärrykseksi. Termi on hyvä yleistyks korkeamman tason tiedosta teollisesta internetistä puhuttaessa, sillä informaatiosta jalostettu tietämys tai viisaus tarjoavat päätöstilanteisiin parempaa ymmärrystä liiketoiminnasta, mikä johtaa parempiin päätöksiin.

Teknologiapinon perusteella teolliseen internetiin liittyy useita erilaisia teknologioita. Tämä tuo organisaatioille oman haasteensa, sillä koko teknologiapinoa on pystyttävä hallitsemaan tehokkaasti. Tähän tarkoitukseen on kehitetty erilaisia IoT-alustoja, joita voidaan hyödyntää myös teollisen internetin ratkaisuisissa. (Collin, Saarelainen 2016)

IoT-alustat toimivat nimensä mukaisesti alustana erilaisille IoT-ratkaisuille. Ne tarjoavat erilaisia IoT-laitteiden hallintaan ja datan käsittelyyn tarkoitettuja työkaluja valmiina käytettäväksi. Suurimmat pilvipalvelutoimittajat Amazon, Google ja Microsoft tarjoavat myös omia IoT-alustojaan, jotka perustuvat niiden omissa pilvipalveluissa toimiviin oh-

jelmiin ja palveluihin. Amazonin *AWS IoT*, Googlen *Google Cloud Platform* ja Microsoftin *Azure IoT* ovat suosituimpien IoT-alustojen joukossa. Muita IoT-alustoja on lisäksi muun muassa Siemensin *MindSphere*, Ciscon *Cisco IoT Cloud Connect* ja IBM:n *IBM Watson*. (Singh 2018)

Alustan avulla palveluntuottajan tai loppukäyttäjän ei tarvitse itse kehittää ja ylläpitää datan siirtämiseen, käsittelyyn, tallentamiseen ja analytiikkaan liittyviä ohjelmistoja, vaan voi käyttää alustapalveluntarjoajan valmiiksi kehitettyjä ja testattuja ratkaisuita. Alustojen käytön puolesta puhuu alhaisten kehityskulujen lisäksi helppokäyttöisyys, sillä alustat on suunniteltu niin, että käyttö on helppo ja nopea aloittaa. Alustojen etuna on myös kustannustehokas skaalautuvuus ja kustomoitavuus, sillä ne suunnitellaan varsin modulaarisiksi. Tällöin loppukäyttäjä voi itse valita tarvitsemansa palvelut ja tuoda samalla ulkopuolisia palveluita osaksi järjestelmää ja muodostaa järjevä kokonaisjärjestelmäarkkitehtuuri. Kuvassa 10 on esitetty esimerkkinä Amazonin *AWS IoT* -alustan perusrakenne. (Amazon Web Services 2018)



Kuva 10. Amazonin *AWS IoT* -alustan perusrakenne (Amazon Web Services 2018)

IoT-alusta muodostuu useasta erilaisesta palvelusta, jotka ovat yhteyksissä toisiinsa. Alustaan on mahdollista yhdistää monia erilaisia palveluita, kuten koneoppimismallien rakentamista tai hälytysviestien käsittelyä. *AWS IoT Core* toimii järjestelmän ytimenä ja se huolehtii viestien välityksestä eri järjestelmän osien välillä. IoT-alustan toiminta vastaa pääosin sähköverkkoyhtiöissä käytettäviä SCADA-järjestelmiä (Supervisory Control And Data Acquisition), joissa sähköverkon automaatiolaitteilta kerättyä tietoa voidaan kerätä ja jalostaa, tuottaa hälytyksiä sekä ohjata automaatiolaitteita. IoT-alustat eroavat perinteisistä SCADA-järjestelmistä arkkitehtuuriltaan ja skaalautuvuudeltaan, sillä SCADA-järjestelmät toimivat omilla palvelimilla niiden kriittisyyden ja tietoturva vaatimusten vuoksi. SCADA-järjestelmää olisi mahdollista hyödyntää komponenttien tila- ja

kuntotietojen keräämisessä, mutta sen vaatimukset esimerkiksi tietoliikenteen tietoturvalisuuden suhteen voi nostaa sensoreiden tietoliikennekustannukset moninkertaisiksi verrattuna tavallisiin IoT-tietoliikenneteknologioiden kustannuksiin.

Collin ja Saarelainen nostaa tietoturvan erikseen esille teknologiapinossa. Jokaiselle tasolle on erikseen varmistettava sopiva tietoturvaso. (Collin, Saarelainen 2016) Esimerkiksi jos sensorit pelkästään lähettävät ympäristön lämpötilalukemia eikä niillä ole mahdollisuutta tehdä prosessinohjauksia tai muita toimintoja, niin tietoturvasuhteet eivät ole niin korkeat verrattuna ohjausjärjestelmien tietoturvasuhteisiin. Sensoreilta kerättävän datan on oltava luotettavaa, sillä tulevaisuudessa sitä tullaan hyödyntämään liiketoimintapäätöksiä tehdessä. Tietoliikenneyhteyksien on siis oltava luotettavia ja turvallisia, jotta sensoreita ei voida häiritä tai niiden lähettämää dataa muokata kolmannen osapuolen toimesta. Esimerkiksi LoRaWAN-tietoliikenneprotokollassa viestit on salattu päästä päähän (engl. end-to-end encryption) käyttäen AES-algoritmia, joka on hyvin testattu ja standardoitu kryptografinen algoritmi (LoRa Alliance 2017). IoT-alustalla, joka voi sisältää merkittävän määrän liiketoiminnan kannalta kriittistä tietoa ja mahdollisia integraatioita muihin organisaation järjestelmiin, tietoturvasuhteet ovat taas korkeat muiden tietojärjestelmien tapaan.

Teknologiapinon kaksi viimeistä tasoa eivät ole sensorijärjestelmässä pakollisia sen toiminnan kannalta ja sovellusten ja digitaalisten palveluiden kehittäminen vaatii pinon alempien tasojen toiminnan virheettömyyttä ja paljon olemassa olevaa tietoa. Tämän takia ensimmäisessä vaiheessa sensorijärjestelmä kannattaa rakentaa vain pinon neljän ensimmäisen tason perusteella, sillä ne kaikki ovat pakollisia järjestelmän toimivuuden kannalta. Analytiikka kannattaa myös alussa pitää mahdollisimman yksinkertaisena, koska koneoppimismallit ja muut monimutkaiset analytiikkatyökalut vaativat huomattavan määrän dataa.

4.4 Käytössä olevia IoT-ratkaisuita

Teollisuudesta löytyy monia erilaisia älykkäisiin laitteisiin liittyviä ratkaisuja. Älykkäitä järjestelmiä on sulautettu teollisuuskoneisiin jo ennen IoT-termiä, jolloin puhuttiin enemmänkin kyberfyysisistä tai sulautetuista järjestelmistä (engl. Cyber-physical systems, CPS). Näillä järjestelmillä prosesseja on voitu tehostaa ja automatisoida huomattavasti, mutta järjestelmät toimivat täysin itsenäisesti. Nykyään keskustelu on siirtynyt Teollisuus 4.0:aan ja teolliseen internetiin, jotka ovat laajentaneet entisestään käyttökohteita ja mahdollisuuksia eri prosessien älykkyyden lisäämiseen. (Collin, Saarelainen 2016)

Esimerkkejä teollisen internetin sovelluksista eri toimialoilta löytyy paljon Suomesta ja maailmalta. Esimerkiksi lämpövoimalaitoksissa prosesseista kerätään paljon dataa, jota analysoimalla voidaan kohdentaa kunnossapitotoimenpiteitä, parantaa prosessin laatua ja lisätä käytön luotettavuutta (Martinsuo, Kärri 2017, s. 194-201). Energianhallintaan liit-

tyviä palveluita on käytössä esimerkiksi kiinteistö- ja kaupan alalla. Kiinteistön lämmityksen älykäs ohjaus voi säästää lämmityskuluissa ja samalla voidaan kerätä tietoa kiinteistön sisäilman laadusta tai tarjota kiinteistöä käyttäville kulutuksenseurantapalveluita (Talotohori 2019). Kaupan kylmälaitteiden toiminnan seurannalla voidaan säästää energia- ja ylläpitokustannuksissa ja lämpötilaseurannalla saadaan lisäksi parempaa tuoteturvallisuutta ja vähemmän hävikkiä (Optiwise 2019).

IoT-ratkaisut eivät ole suomalaisille sähköverkkoyhtiöille täysin tuntematon asia, sillä älykkäät etäluettavat sähkömittarit (AMR, automatic meter reading) täyttävät monia teollisen internetin sovelluksen tuntomerkkejä. AMR-mittareista puhutaan tällä hetkellä maailmalla yhtenä merkittävimmistä IoT-sovelluskohteista sähköverkkoalalla, kun Suomessa niitä on ollut käytössä jo noin 15 vuoden ajan (Bedi, Venayagamoorthy et al. 2018).

Energia-ala on tällä hetkellä selvässä teknologisessa murrospisteessä. Älykkään sähköverkon ratkaisut, uusiutuvan energian tuotanto ja uudet liiketoimintamahdollisuudet vaatii energia-alalta merkittävää uudistumiskykyä. IoT-ratkaisut tulevat varmasti lisääntymään, sillä ne ovat osa tulevaisuuden älykästä sähköverkkoa. Ensimmäisiä IoT-ratkaisuita on kuitenkin jo pilotointivaiheessa Suomessa.

Fingrid on kehittänyt IoT-sensoreihin pohjautuvia sähköasemien kunnonvalvontaratkaisuita parin vuoden ajan. Fingridin kunnonvalvonnan kehitys on osa laajempaa digitaalisen sähköaseman kehityshanketta. Fingrid on järjestänyt erilaisia kilpailuja kunnonvalvontaan liittyvien uusien ratkaisujen löytämiseksi. Kilpailuita on järjestetty kytkinlaitteiden sensoroinnista, tukieristimien kunnonvalvonnasta, primääripiirin langattomasta lämpötilan mittauksesta ja 400 kV kaasueristeisten kojeistojen valvonnasta ja kilpailuihin on osallistunut jopa 25 ideaa tai ratkaisua. (Fingrid 2018a, Fingrid 2018b)

Fingrid on esitellyt järjestelmänsä *Omaisuuuden hallinnan päivässä* 23.5.2018. Ensimmäisessä vaiheessa Kymillä sijaitsevaan sähköaseman kytkinlaitteisiin on asennettu yhteensä 360 sensoria, jotka lähettävät mittaustiedot langattomasti aseman reitittimen välityksellä pilvipalveluun. He myös korostavat, että järjestelmä ei ole millään tavalla riippuvainen sähköaseman olemassa olevista suojaus- ja ohjausjärjestelmistä, vaan on täysin itsenäinen. (Fingrid 2018b)

Fingridin Kymin sähköasemalla on tutkittu akustista monitorointia Fingridin ja Noiseless Acoustics Oy:n toimesta. Tutkimuksessa tutkittiin sähköaseman kytkinlaitteiden akustista monitorointia langattomien sensorien avulla. Tutkimuksessa kytkinlaitteisiin asennettiin ääni-, lämpötila-, ilmankosteus- ja virta-antureita. Kerätystä äänidatasta pystyttiin erottamaan kytkinlaitteiden toimintaan ja mekaniikkaan liittyviä ominaisuuksia. Tutkimuksen perusteella voidaan olettaa, että toiminnan häiriöitä tai muita poikkeuksia voidaan erottaa, kun tietoa kytkinlaitteiden toiminnasta saadaan kerättyä enemmän. Mekaaniset vikaantumiset voivat synnyttää poikkeuksellisia ääniä, mitkä pitäisi olla helppo erot-

taa normaalista kytkinlaitteen toiminnasta. (Laitinen, Lyly et al. 2018) Myös muut tutkimukset ovat todenneet äänianalyysin mahdollisuudet kytkinlaitteen kunnonvalvonnan työkaluna (Muun muassa Runde, Aurud et al. 1992, Roima 2018).

Fingridin Daniel Kuosa on avannut digitaalisen sähköaseman sensorijärjestelmän rakennetta ja kertonut eri haasteista Fingridin syyskuun 2018 neuvottelukunnan kokouksessa. Fingridin järjestelmän logiikka vastaa täysin kuvassa 4 esitetyn Raynorin ja Cotteleerin tiedon arvoketjun neljää ensimmäistä vaihetta (*luo, kommunikoi, aggregoi, analysoi*). (Kuosa 2018) Viimeistä vaihetta *toimi* ei ole lisätty alkuvaiheeseen järjestelmään mukaan, koska järjestelmän tuloksia ei vielä voida pitää luotettavina eikä oikeiden toimien määrittely tulosten pohjalta ole ennalta mahdollista. Tulevaisuudessa järjestelmä voisi tehdä huoltopyyntöjä laitteille automaattisesti tai lähettää häiriötilanteista ilmoituksia käytönvalvontaan.

Haasteina digitaaliseen sähköasemaan liittyen Kuosa nosti esille muun muassa uudenlaisen osaamisen ja toimintamallien tarpeen, muutosten hallinnan, järjestelmien yhteensopivuuden, toimittajaloukut (engl. vendor lock-in) ja aineettoman omaisuuden oikeuksien hallinnan (Kuosa 2018). Toimittajaloukussa järjestelmän toimittaja on ainoa mahdollinen toimija järjestelmän kehitys- ja muutostöissä esimerkiksi salatun järjestelmän lähdekoodin takia. Toimittaja ei välttämättä kykene toimimaan tilaajan vaatimusten mukaisesti, mikä tuo ongelmia ja nostaa kustannuksia huomattavasti, eikä toimittajaa voi helposti vaihtakaan uponneiden kustannusten takia. Aineettoman omaisuuden oikeudet liittyvät myös tietojärjestelmiin, sillä järjestelmän sisältämä tieto voidaan luokitella aineettomaksi omaisuudeksi. Kysymyksenä voi usein olla, omistaako myös järjestelmätoimittaja järjestelmän sisältämän tiedon tai onko sillä oikeudet käyttää sitä omiin tarkoituksiinsa. (Kivekäs 2012)

Näihin haasteisiin ratkaisuina voi olla ainakin tarkat vaatimusmäärittelyt ja sopimukset. Nämä toisaalta vaativat tilaajalta paljon tietotaitoa, jota on oltava organisaation sisällä tai hankittava se erikseen konsulttipalveluina. Monilla verkkoyhtiöillä on valmiiksi jo kokemusta laajoista ja monimutkaisista tietojärjestelmistä esimerkiksi SCADA- ja verkkotietojärjestelmien kautta, joten verkkoyhtiöissä talon sisäistä osaamista IT-järjestelmien hankintaan yleensä löytyy.

Fingridin käyttämän sensorijärjestelmän rakenne tukee sensoroinnin myöhempää laajentamista heidän sähköverkossaan. Sensorijärjestelmän tärkeimpänä osana toimivan IoT-alustan avulla järjestelmään voidaan liittää monia eri tyyppisiä sensoreita ja myös kolmansien osapuolien työkaluja. Fingrid on valinnut alustaksi Microsoftin Azure IoT-hub:in, joka kuuluu suosituimpien alustojen joukkoon (Singh 2018, Kuosa 2018).

Fingridin sähköasemat ovat verrattain suurempia kuin jakeluverkkoyhtiöiden asemat, jolloin sensoreilla on laajempi vaikutusalue, mutta heidän sensorijärjestelmänsä on silti varmastikin kohtalaisella vaivalla jalostettavissa käyttöön muiden sähköasemilla. Järjestelmä

sisältää kuitenkin suuria kehitysinvestointeja, joihin pienemällä verkkoyhtiöllä ei välttämättä ole varaa. Yhtenä vaihtoehtona voisikin olla verkkoyhtiöiden yhteinen kunnonvalvontajärjestelmä, jolloin kehityskulut jakautuisivat useammalle toimijalle. Yhteisellä järjestelmällä voitaisiin kerätä paljon enemmän dataa ja kehittää entistä parempia data-analytiikka-algoritmeja.

Muita sähköverkkoalaa koskevia pilotointivaiheessa olevia IoT-ratkaisuita löytyy muutamia. Onninen Oy, Digita Oy ja Rovakaira Oy ovat yhteistyössä kehittäneet ilmajohdoille tarkoitetun tykkylumisensorin, joka ilmaisee johdolle kerääntyvän lumen painon takia syntyvää johtimen painumaa mittaamalla kallistusta. Sensorin avulla lumi osataan poistaa johdolta ennen kuin se aiheuttaa vahinkoa sähköjohdolle. Kallistuskulmaan perustuva anturi antaa Rovakaira Oy:n toteuttamien testien perusteella tarpeeksi luotettavia tuloksia, jolloin ainoaksi kysymykseksi jää sensorien asentamisen kannattavuus. (Koivumaa 2019) Reka Kaapeli Oy on kehittänyt älykkään kaapelikelan, jota voidaan paikantaa reaaliaikaisesti tehostaen logistiikkaa ja vähentämään hävikkiä. Taustajärjestelmän avulla keloihin on mahdollista linkittää tarkempia kelatietoja tai ohjeita kaapelin käsittelyyn. (Reka Kaapeli 2019)

5. ELINKAARIKUSTANNUSLASKENTA

Elinkaarikustannuslaskennan (engl. life cycle costing, LCC) avulla organisaatio voi arvioida tuotteen kokonaiskustannuksia. Kokonaiskustannuksiin kuuluu investointikustannuksien lisäksi käytön aikaiset ja käytön jälkeiset kustannukset, kuten huollot ja energia. Käyttökustannukset voivat olla investointikustannuksia suuremmat esimerkiksi pitkän käyttöiän tai energiankulutuksen takia, jolloin elinkaaritarkastelu on ehdottoman tärkeää edullisimman vaihtoehdon valinnassa. (Motiva 2018)

Woodwardin (1997, s. 337) mukaan Royal Institute of Chartered Surveyors (1983) on määritellyt elinkaarikustannuslaskennan tavoitteiksi seuraavat asiat:

- investointivaihtoehtojen tehokkaampi arviointi
- kaikkien kustannusten huomioiminen pelkkien alkupääomakustannusten sijaan
- auttaa tehokasta valmiiden projektien tai rakennusten hallintaa
- ja helpottaa päätöksentekotilanteita kilpailevien vaihtoehtojen välillä.

Elinkaarikustannuslaskenta on tärkeä työkalu sähköverkkoyhtiöiden investoinneissa, sillä investointien pitoajat ovat useita kymmeniä vuosia. Esimerkiksi sähköverkon loistehon kompensointiin käytettävien reaktorien pitoaika on 40-50 vuotta ja käyttökustannuksiksi luettavat häviökustannukset reaktorilla ovat Atte-Ilari Kenttälän diplomityön tulosten mukaan lähes yhtä suuret tai tietyissä tapauksissa jopa kaksinkertaiset verrattuna reaktorin hankintahintaan. Kenttälän elinkaarikustannuslaskennan tuloksena (Kenttälä 2016, taulukko 16) reaktori, jonka hankintahinta sen kompensointitehon suhteen oli edullisin, ei ollutkaan kokonaiskustannuksiltaan edullisin korkeampien häviöistä aiheutuvien kustannusten takia. (Kenttälä 2016)

Elinkaarikustannuslaskennassa voi olla useampi eri näkökulma. Jan Emblemståg esittää kolme näkökulmaa: markkinointi-, tuottaja- ja asiakasnäkökulmat, jotka tuottavat jokainen erilaisia elinkaarikustannuslaskelmia. Hänen mukaansa asiakasnäkökulmaa käyttämällä tuotteen elinkaarikustannukset saadaan laskettua parhaiten, sillä asiakkaan kustannukset sisältävät tuottajan kustannukset myyntilisän kanssa hankintakustannuksissa. Asiakkaan näkökulmasta elinkaarikustannuslaskentaan kuuluu Emblemstågin mukaan 5 vaihetta tai prosessia. Vaiheet ovat hankinta, käyttö, tuki (engl. support), huolto ja hävittäminen (engl. disposal). (Emblemståg 2003)

Edellä mainittujen näkökulmien lisäksi elinkaarikustannuslaskennassa voidaan ottaa huomioon sosiaalinen näkökulma. Se ottaa huomioon yhteiskunnallisia kustannuksia, jotka eivät suoraan vaikuta yrityksen talouteen. Esimerkiksi tuotteen hävittämisestä ja ulkoisvaikutuksista (engl. externalities), kuten päästöistä, voi aiheutua yhteiskunnalle kustannuksia. (Emblemståg 2003)

Yritysten yhteiskuntavastuu on korostunut huomattavasti ja monet yritykset julkaisevat yhteiskuntavastuuraportteja ja kertovat avoimesti ympäristö- ja yhteiskuntavastuutavoit-teistaan. Sähköverkkoyhtiöiden yhteiskunnallinen vastuu on todella suuri, kun yhteis-kunta digitalisoituu ja on yhä enemmän riippuvainen jatkuvasta sähkönsaannista. Esimer-kiksi investoinnit säävarmaan sähköverkkoon lisäävät sähkön toimitusvarmuutta ja sa-malla työllistävät tuhansia henkilöitä Suomessa. Maakaapeliverkko voi olla elinkaarikus-tannuksiltaan ilmajohtoverkkoa edullisempi, vaikka sen hankintahinta onkin suurempi, sillä sähkön keskeytyksistä aiheutuvat kustannukset ovat ilmajohdolla huomattavasti kor-keammat sen elinkaaren aikana. Tällöin vastuullinen toiminta tarjoaa pitkällä aikavälillä säästöjä yhteiskunnan lisäksi yritykselle itselleen. (Elenia 2019c)

Elinkaarikustannuslaskenta on jatkuva-aikainen laskentatapa, jossa tuotteen elinkaaren kustannuksia seurataan tuotteen koko elinkaaren aikana. Woodwardin mukaan elinkaa-rikustannukset koostuvat seitsemästä eri osasta.

- alkupääomakustannukset (engl. initial capital costs)
- tuotteen elinkaari (engl. life of the asset)
- diskonttauskerroin
- käyttö- ja huoltokustannukset
- hävityskustannukset
- tiedon keruu ja palautesyklin muodostus (engl. information and feedback)
- ja epävarmuuden ja herkkyuden analysointi. (Woodward 1997)

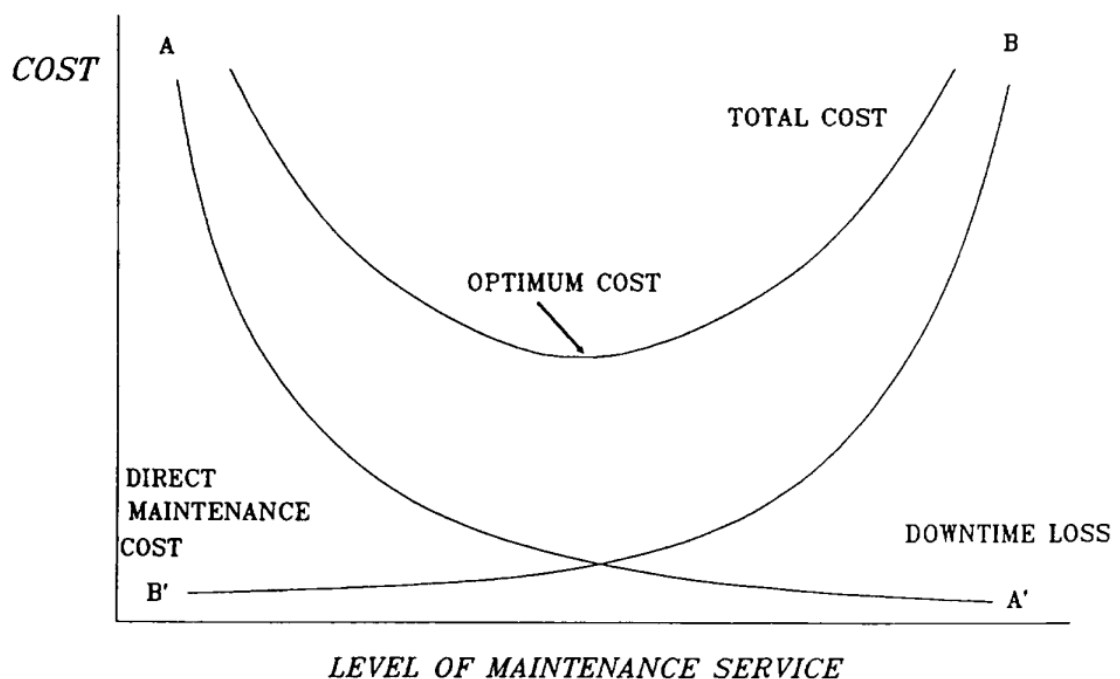
Jokaisessa vaiheessa määritellään, arvioidaan tai ennustetaan tuotteen kokonaiskustan-nuksia riippuen laskentahetken ajankohdasta. Investointipäätöstä tehdessä alkupääoma-kustannukset, eli hankinta-, koulutus- ja asennuskustannukset, voidaan määritellä hyvin tarkasti, mutta muissa laskennan osissa joudutaan tekemään arvioita tai ennusteita, jotka lisäävät epävarmuutta. (Woodward 1997)

Elinkaarikustannuslaskennassa kerätään talouteen, aikaan ja laatuun liittyvää tietoa. Usein kaikki kerätty tieto rinnastetaan rahaan vertailujen helpottamiseksi. Rinnastus ra-halliseen arvoon voi olla hankalaa ja arvioiden epävarmuus voi olla suuri. Esimerkiksi vikaantumistiheys ja -kesto, kunnossapitovaatimukset ja muut käyttöön liittyvät kulut ovat hankalia ennustaa ja niiden vaikutuksia on tietyissä tapauksissa hyvin vaikea arvi-oida. (Woodward 1997)

Elinkaarikustannuslaskenta vaatii arviointia ja erilaisia oletuksia ennalta, mitkä tekevät laskennan tuloksista epävarmoja. Epävarmuuden vaikutusta voidaan vähentää käyttä-mällä historiatietoa ja tilastollisia menetelmiä, mutta epävarmuutta ei voida koskaan pois-taa kokonaan. (Woodward 1997) Toki jälkikäteen tuotteen elinkaaren päättymisen jäl-keen sille on mahdollista laskea tarkka elinkaaren kustannus, mutta siitä ei ole hyötyä investointipäätöstä tehdessä.

Epävarmuuden ja herkkyuden analysoinnissa epävarmuuksien, kuten lähtötietojen tarkkuuden, vaikutuksia pyritään tunnistamaan. Esimerkiksi tiettyjen epävarmojen lähtötietojen variaatioiden vaikutukset voivat olla elinkaarikustannuslaskelman tulosten kannalta hyvinkin suuria, joten ne on syytä tunnistaa. (Woodward 1997)

Elinkaarikustannuslaskenta liittyy vahvasti kunnossapitostrategian valintaan. Kuvassa 11 on esitetty Woodwardin teoreettinen kuvaaja komponentin elinkaaren kustannuksista suhteessa kunnossapidon tasoon. Valitsemalla komponentille oikeanlaisen kunnossapito-ohjelman, komponentin kokonaiskustannukset sen elinkaaren aikana saadaan minimoitua. Tärkeiden komponenttien osalta vikaantumisen voi aiheuttaa huomattavia kustannuksia, kun taas toisilla komponenteilla vaikutus voi olla paljon pienempi, jolloin kunnossapidon tarve olisi pienempi. (Woodward 1997)



Kuva 11. Kunnossapidon tason ja kustannusten suhde toisiinsa (Woodward 1997)

Sensoroinnin kannattavuuslaskelmissa tulee kartoittaa ja laskea sensoreiden elinkaaren aikaiset kustannukset ja elinkaaren aikana saatavat säästöt. Kannattavuus määräytyy kustannusten ja säästöjen erotuksen perusteella. Kannattavuutta on mahdollista tarkastella myös sensoroitavien komponenttien osalta, jolloin sensoroinnin vaikutuksia komponentin elinkaarikustannuksiin voidaan arvioida paremmin. Sähköverkkoympäristössä elinkaaritarkastelussa voidaan lisäksi huomioida luvussa 2.2 esitetyn regulaatiomallin mukaisten kannustinten vaikutukset kannattavuuteen.

6. SÄHKÖVERKON SENSOROINTI

Tässä luvussa esitetään sähköverkon sensoroinnin vaatimukset, sensorien ominaisuudet. Sensorointijärjestelmä on teollisen internetin mukainen kokonaisuus, jolla sähköverkosta kerätään IoT-sensoreilla dataa komponenttien tilasta tai ympäristöstä ja data-analytiikan avulla siitä muodostetaan uutta tietoa pääasiassa sähköverkon kunnonhallintaprosessien hyödynnettäväksi.

Tarkastelun kohteena on tässä työssä Elenian sähköverkko ja on syytä huomata, että toimintaympäristö on erilainen verrattuna erityisesti kaupunkiverkkoyhtiöihin. Suurin osa Elenian sähköverkosta on haja-asutusalueella, mikä asettaa esimerkiksi tietoliikenteelle kovempia vaatimuksia kuuluvuuden suhteen. Lisäksi työssä keskitytään sensoreihin, eikä järjestelmän muihin teknologioihin paneuduta tarkemmin.

6.1 Sensorointijärjestelmän yleiset vaatimukset

Sensorointijärjestelmän pääasiallisena tehtävänä on tuottaa tarkempaa tietoa sähköverkon laitteiden tilasta, kuormituksesta ja kunnosta. Tavallisesti laitteiden kuntoa seurataan tarkastuksin, joita saatetaan suorittaa useiden vuosien välein. Tämä johtaa siihen, että hitaasti kehittyviä vikoja, kuten sähköjohdon päätteiden hajoaminen osittaispurkausten takia, ei aina huomata ennen vikaantumista. Tarkastukset ovat usein silmämää räisiä, jolloin laitteiden poikkeukselliset tilat, kuten korkeampi lämpötila, saattavat jäädä huomaamatta.

Jotta järjestelmän käyttöönotto olisi kannattavaa, on sen tuotettava arvokasta tietoa kustannustehokkaasti. Sensorointijärjestelmä on kokonaisuutena suuri investointi eikä se itsessään tuota tuloja tai säästöjä kuluissa, vaan järjestelmän tuottaman tiedon avulla kustannussäästöjä tai mahdollisia tuloja on saatava liiketoimintaprosesseissa. Järjestelmään liittyvät kustannukset voivat silti olla selvästi perinteisiä valvonta- tai automaatio ratkaisuita alhaisempia teknologiakehityksen myötä.

Sensorointijärjestelmä vaatii alkuinvestoinnin lisäksi jatkuvaa hallintaa ja kehitystä. Luvussa 4.3 esitetyn teknologiapinon (kuva 9) mukaisesti järjestelmässä pitää hallita ja kehittää useita eri teknologioita, jolloin kokonaisuuden hallintaan ja kehitykseen tarvitaan panostuksia muun muassa hyvään alustaan, tietoturvaan ja resursseihin. Käytettävissä olevat teknologiat ovat jo varsin kypsyneitä, mutta niissä tulee vuosien aikana tapahtumaan vielä kehitystä, mikä mahdollistaa tai jopa vaatii sensorointijärjestelmän kehittämistä jatkuvasti. (Collin, Saarelainen 2016)

Resurssien puolesta sensorointijärjestelmä tulee vaatimaan laajaa yhteistyötä sähköverkon asiantuntijoiden ja IT:n välillä. Asiantuntijoiden on määriteltävä järjestelmän vaati-

mukset, mutta heillä ei todennäköisesti riitä tietotaito hallita ja kehittää laajoja järjestelmiä. Heidän pitää hyödyntää järjestelmän tuottamaa tietoa omassa toiminnassaan mahdollisimman hyvin. Vastuuus järjestelmän hallinnalle, tietoturvalle ja kehitykselle pitää tarkasti määritellä liiketoiminnan ja IT:n välillä.

Kaikkea vaadittavaa kehitystä ei voida tehdä todennäköisesti organisaation omilla resursseilla, vaan esimerkiksi data-analytiikkaan liittyviä palveluita on hankittava ulkopuolisilta toimittajilta. Näiden ulkoisten toimittajien hankinta, kilpailuttaminen ja yhteistyön hallinta tuo sensorointijärjestelmään yhä enemmän kompleksisuutta.

Sensorointijärjestelmän arkkitehtuuri pitää suunnitella niin, että se tukee tämän hetkisiä tarpeita, mutta on helposti laajennettavissa uusia tarpeita vastaavaksi tulevaisuudessa. Jos ensimmäisessä vaiheessa järjestelmällä kerättäisiin tietoa kunnonhallinnan käyttöön, niin tulevaisuudessa sitä tulee voida laajentaa myös muiden sähköverkkoliiketoiminnan prosessien, kuten sähköverkon käyttötoiminnan tai rakennuttamisen, hyödynnettäväksi.

Järjestelmän arkkitehtuurin suunnittelussa pitää huomioida erityisesti teknologiapinon eri tasojen modulaarisuus: käytössä olevien teknologioiden kehittyessä uudemman tekniikan käyttöönotto pitää olla helposti toteutettavissa. Eri tyyppisiä sensoreita tullaan liittämään järjestelmään jatkuvasti ja käytettävät tietoliikennetekniikatkin saattavat muuttua usein. Datavarasto- ja analytiikkateknologioiden on oltava mahdollisimman laajasti hyödynnettäviä ratkaisuita. Erityistapauksiin voidaan hankkia omia toteutuksia, mutta niiden kannattavuus tulee tapauskohtaisesti arvioida.

Käyttöönottovaiheessa sensorointijärjestelmään ei kannata kehittää monipuolisia sovelluksia tai digitaalisia palveluja, sillä se lisäisi investointien ja vaatimusten määrää huomattavasti. Sovellus- ja digitaalisten palvelujen kehitys kannattaa aloittaa vasta myöhemmin, kun analytiikan avulla saadaan jo luotettavia tuloksia aikaiseksi. Alkuvaiheessa analytiikan tuloksia pitää validoida paljon, jolloin sovelluskehitys voi olla turhaa, jos analytiikka ei pystykään muodostamaan luotettavia tuloksia laajempaa käyttöä varten. Sovellukset ovat järjestelmän hyötyjen realisoinnin kannalta tärkeitä, mutta panostukset tulee ensin kohdistaa järjestelmän neljään ensimmäiseen tasoon.

Sensorointijärjestelmä vaatii pitkäaikaista omistautumista yhtiöltä, sillä sen tuoma lisäarvo voi realisoitua vasta useiden vuosien päästä, kun sähköverkosta on kerätty riittävästi dataa vikaantumisten ennakointiin tai huoltotoimenpiteiden optimointiin. Koneoppimismalgoritmit tarvitsevat paljon opetusdataa, jonka kerääminen pelkästään voi viedä useita vuosia aikaa. (Collin, Saarelainen 2016) Pitkäaikainen omistautuminen investointeihin ei ole verkkoyhtiöille ollenkaan vierasta useiden sähköverkon laitteiden takaisinmaksuajan ollessa usein kymmeniä vuosia.

Jotta investoinnin epäonnistumisen riskiä saadaan minimoitua, sensoroitavat kohteet ja asennettavat sensorit tulee miettiä tarkkaan etukäteen. Ne tulee valita niin, että kohteista kerätty data olisi mahdollisimman nopeasti hyödynnettävissä. Data-analytiikka ei saa siis

vaatia monimutkaisia koneoppimismenetelmiä, vaan pelkän poikkeuksellisen muutoksen tai muun yksinkertaisen ilmiön havainnointi pitäisi tarjota selkeitä kustannussäästömahdollisuuksia, sillä tämänkaltaista analytiikkaa hyödyntävien sovellusten kehitys on selvästi yksinkertaisempaa. Kehittyneempiä ratkaisuita voidaan hyödyntää myöhemmin, kun osaaminen ja ymmärrys datan luonteesta on parempi.

Ensin tulee määritellä ne sähköverkon komponentit, joiden jatkuva kunnonseuranta voi olla kannattavaa. Määrittelyä varten pitää tutkia eri komponenttityyppejä ja pohtia niiden vikaantumisilmiöitä ja vika- ja huoltokustannuksia. Kun vikaantumisilmiöt eri komponenteilla on selvillä, voidaan määritellä vaatimukset tarvittavista antureista sensorilaitteille, jotta ilmiöitä voidaan havainnoida. Antureiden laadukkuus on järjestelmän toimivuuden kannalta ehdottoman tärkeää. Sensorit ovat koko järjestelmän tärkein osa, sillä ilman laadukasta dataa järjestelmä ei voi tuottaa laadukkaita lopputuloksia. Antureiden pitää toimia usein hankalissa olosuhteissa useiden vuosien ajan eikä ulkoiset häiriöt saa vaikuttaa mittaustuloksiin merkittävästi.

Sensoreita ei tule mielellään kehittää vain omia käyttötarkoituksia varten, vaan on pyrittävä hyödyntämään valmiita markkinoilta saatavia laitteita. Tällöin sensorien kehityskustannukset eivät jää vain itselle maksettavaksi, mikä pudottaa sensoreiden yksikköhintaa huomattavasti. Valmistavaa teollisuutta varten kehitetyt sensoriratkaisut eivät usein ole kuitenkaan suoraan hyödynnettävissä sähköverkkoalalla esimerkiksi niissä käytettävien tietoliikenne- ja viestintäratkaisuiden takia. Tehdasympäristössä sensoreiden ei tarvitse kommunikoida pitkien etäisyyksien päähän eikä virransyöttöä tarvitse pitää alhaisena, kun ulkoinen virransyöttö laitteille on helpommin toteutettavissa. Näiden takia monet valmiit IoT-ratkaisut perustuvat sensoreihin, jotka kommunikoivat erillisen internetiin yhteydessä olevan päätelaitteen kanssa, joka välittää useiden kymmenien sensorien keräämän datan eteenpäin. Tämänkaltaiset tietoliikenne- ja viestintäratkaisut voivat oikeastaan toimia vain sähköasemaympäristössä, jossa etäisyydet komponenttien ja niihin asennettujen sensorien välillä eivät ole suuria ja ulkoinen virransyöttö on helpommin toteutettavissa sensoreille. Monissa muissa kohteissa ylimääräiset päätelaitteet nostavat kustannuksia turhaan, sillä yhteen kohteeseen asennetaan vain vähän sensoreita, eikä päätelaitteen kantama todennäköisesti riitä useammalle komponentille etäisyyksien takia. Tämän takia sensoreiden on oltava suoraan yhteydessä tietoliikenneverkkoon langattomia tiedonsiirtoteknologioita hyödyntäen. Erillisten päätelaitteiden käyttöä ei tule kuitenkaan täysin unohtaa, vaan niitä on syytä tarkastella tarkemmin tulevaisuudessa.

Sensoreiden tietoliikenteen on turvallisuusvaatimuksien ja niiden lisäämien kustannusten takia oltava erillään sähköverkon automaatiotietoliikenne- ja viestintäratkaisuista. Olemassa olevat ratkaisut ovat suoraan yhteydessä verkkoyhtiön SCADA-järjestelmään, johon kunnonhallintaan liittyviä tietoja ei haluta siirtää vaan niille on oltava oma ratkaisu. Käytettävällä tietoliikenteellä on kuuluvuudelle ja virransyöttöä varten erityisiä vaatimuksia, sillä kuuluvuuden kattavuus pitää olla hyvä myös haja-asutusalueilla eikä tiedonsiirto saa kuluttaa

paljoo energiaa, jotta sensorin akunkestoa voidaan pidentää. Lyhyen etäisyyden tietosiirtoteknologiat, kuten Bluetooth, eivät voi toimia sähköverkoissa pääasiallisena tiedonsiirtoteknologiana, vaan on käytettävä pidempää etäisyyttä tukevia LPWAN-teknologioita, kuten LoRaWAN tai NB-IoT. Näiden ominaisuuksina on pidempien tiedonsiirron etäisyyksien tuen lisäksi alhainen virrankulutus, mikä on akkukäyttöisten sensorien kannalta erittäin tärkeää. Tulevaisuudessa automaation ja sensoreiden tietoliikenne kannattaa toteuttaa yhtenäisellä tekniikalla, jotta tietoliikennekustannuksia voidaan pienentää.

LoRaWAN-protokolla on vapaalla taajuusalueella toimiva ja on vapaasti kaupallinen teknologia, joten tarvittavan tietoliikenneinfrastruktuurin voi halutessaan rakentaa itse. Suomessa Digita Oy tarjoaa maanlaajuista LoRa-verkkoa muiden käyttöön, jolloin oman verkon rakentaminen ei ole kuitenkaan pakollista. (Digita 2019b) NB-IoT toimii taas lisensoituilla 4G-taajuuksilla, jolloin oman verkon rakentaminen ei ole mahdollista ilman ylimääräisiä lisenssimaksuja. Suomen suurimmat mobiiliverkko-operaattorit, eli Telia, Elisa ja DNA, tarjoavat jokainen NB-IoT-yhteyksiä omista mobiiliverkoissaan. NB-IoT:n kuuluvuus on Telian kuuluvuuskartan mukaan läntisessä Suomessa hyvä haja-asutusalueilla, kun taas Digitan verkon kuuluvuudessa on isompien asumiskeskittymien välisiä aukkoja (Digita 2019b, Telia Oyj 2019b).

Tietoliikenneteknologioiden tekniset erot eivät ole tämän työn tarkastelun kohteena. Eroja on tutkittu monissa aiemmissa tutkimuksissa (Muun muassa Sinha, Wei et al. 2017, Järvinen 2017). Teknologioiden välillä on teknisiä eroavaisuuksia, mutta sensorijärjestelmässä teknologioita voidaan käyttää eri käyttötapauksissa ilman ongelmia. Eri teknologiat soveltuvat erilaisiin käyttötarkoituksiin ja valintoja tehdessä on syytä huomioida teknisten erojen lisäksi eri riskit, kuten toimittajaloukut, sillä valittua tietoliikenneteknologiaa tullaan todennäköisesti käyttämään useita vuosia. Valinnassa on syytä huomioida myös seuraavan sukupolven älykkäiden etäluettavien sähkömittarien hankinnassa tehtävät määrittelyt tietoliikenteen suhteen mahdollisten synergiahyötyjen takia.

6.2 Mahdollisia kohteita sensoroinnille

Eri sähköverkon komponenttien sensoroinnista saatavat hyödyt vaihtelevat kriittisyyden ja vikaantumisten vaikutusten mukaan. Kaikkia komponentin vikaantumisilmiöitä voi olla mahdotonta tai hyödytöntä havainnoida sensoreilla. Kun sensorien asentamisesta halutaan mahdollisimman suuri hyöty, kannattaa komponentteja tarkastella teknisestä ja taloudellisesta näkökulmasta ja valita niistä parhaiten sopivat.

Sensoroitavien komponenttien määrittely aloitettiin asiantuntijahaastatteluilla. Haastatteluita pidettiin Elenian kunnossapidon, verkon käyttötoiminnan ja verkkotietojärjestelmän asiantuntijoiden kanssa. Haastatteluita varten oli valmisteltu kysymyksiä liittyen eri sähköverkon komponentteihin, kuten niiden määriin, sijainteihin, huoltokustannuksiin, vikailmiöihin sekä vikamääriin, joita kohdistettiin haastateltaville heidän vastuualueidensa

mukaisesti. Haastatteluita ei äänitetty, vaan vastauksista tehtiin muistiinpanot myöhemmää tarkastelua varten. Haastatteluiden tavoitteena oli kerätä vastauksia annettuihin kysymyksiin ja näkemyksiä sensorointimahdollisuuksista eri komponenteilla.

Asiantuntijahaastatteluissa tunnistettiin useita oikein potentiaalisia kohteita ja saatiin tietoa niiden vikaantumistyypeistä ja -määristä, kunnossapitokustannuksista ja vaikutuksista keskeytyskustannuksiin eri komponenteille. Tunnistetut kohteet, niiden kiinnostavat ilmiöt ja ilmiöitä havainnoivat suureet on esitetty taulukossa 2. Monet ilmiöt ja niitä kuvaavat suureet ovat tällä hetkellä vain teoriatasolla mahdollisia havainnoida sensoreilla. Tämän työn puitteissa kaikkia ei voida validoida toimiviksi, jolloin jatkotutkimukset niiden toimivuudesta ovat tarpeen.

Taulukko 2. Tunnistetut kohteet, niiden kiinnostavat ilmiöt ja ilmiöitä havainnoivat suureet

Kohde	Kiinnostavat ilmiöt	Mitattavat suureet
Puistomuuntamo	Ympäristöolosuhteet, osittais- ja koronapurkaukset, muuntajan toiminta, ovien tila, ulkoiset vahingot, öljyvuodot	Lämpötila, kosteus, ääni, valoisuus, Hall-ilmiö, värähtely/liike, öljypitoisuus
Kiinteistömuuntamo	Samat kuin puistomuuntamoilla, erityisesti ympäristöolosuhteet	Lisäksi ilmanlaatu
Muuntajat	Ympäristöolosuhteet, muuntajan ja käämikytkimen tila, öljyaltaan tila	Lämpötila, kosteus, nesteen pinnankorkeus, värähtely, öljyn kunto
Reaktori	Ympäristöolosuhteet, kuormituksen vaikutukset, öljyaltaan tila	Lämpötila, kosteus, nesteen pinnankorkeus, värähtely
Katkaisija ja erotin	Ympäristöolosuhteet, mekaaninen toiminta, katkaisuväliaineen tila	Lämpötila, kosteus, ääni, liike, moottorin nopeus ja virta, SF6-indikointi, öljyn laatu
Sähköaseman akusto	Ympäristöolosuhteet, akuston toiminta	Lämpötila, kosteus, akkujen jännite ja impedanssi, ilmanlaatu
Jakokaappi ja haaroituskaappi	Ympäristöolosuhteet, kallistuma, routiminen, osittaispurkaukset, liitosten kunto	Lämpötila, kosteus, kallistus/kiihtyvyys
110 kV voimajohdon pyliväs	Kallistuma	Kallistus/kiihtyvyys

Sensoroinnin kannattavuus useissa tapauksissa perustuu monen eri ilmiön havainnointiin yhdellä ratkaisulla. Yhteen sensoriin voidaan liittää useita erilaisia mittausantureita, jolloin yhdellä sensorilla voidaan mitata montaa uutta suuretta, joita ei aiemmin sähköverkkoyhtiöissä olla seurattu. Monet anturit ovat hintaluokaltaan hyvin edullisia ja ne ovat

sensorin kokonaishinnasta usein pienempi osa kuin mikroprosessorit tai tietoliikennepiirit. Esimerkiksi lämpötila-anturin hinta voi olla vain muutamia senttejä, kun taas tietoliikennepiirien hinnat ovat useiden eurojen hintaisia. Kun anturin hinnan vaikutus kokonaisuuteen on hyvin pieni, yksittäiseen sensoriin kannattaa sisällyttää mahdollisimman monta anturia. Tällöin aiemmin turhilta kuulostaneiden ilmiöiden, kuten ympäristön lämpötilan tai muuntamokopin oven kiinniolon, reaaliaikainen seuranta tarjoaakin huomattavaa lisäarvoa verrattuna panoksen määrään. Toisaalta sensorin pitää olla valmiiksi kannattava investointi, jotta pienet lisäpanokset tarjoaisivat tarpeeksi lisäarvoa.

Useimmissa tapauksissa ympäristöolosuhteet ovat kiinnostavia, sillä komponenttien pitoajat ovat pitkiä ja ympäristöolosuhteilla on varmasti vaikutus komponentin elinkaareen. Vaikutusta on mahdotonta määritellä tällä hetkellä, sillä sähköverkon komponenttien ympäristöolosuhteita ei ole juurikaan mitattu aikaisemmin. Hypoteesina kosteassa ympäristössä sijaitsevat laitteet voivat vanheta nopeammin, sillä kosteus voi tiivistyä esimerkiksi sähkökaapelin päätteisiin mahdollistaen osittaispurkauksien tapahtumisen vanhentaen päätteitä ennenaikaisesti ja pitkittyessään aiheuttaa pika- tai aikajälleenkytkentöjä tai jopa keskeytyksiä asiakkaille.

Muut kiinnostavat ilmiöt ovat komponenttien kunnonseuranta varten, sillä ne kuvaavat niiden ominaista toimintaa. Tällöin normaalin toiminnan poikkeukset voidaan sensoreilla havainnoida ja kohdistaa huoltotoimenpiteitä tarpeellisiin kohteisiin. Pidemmällä aikavälillä pieniäkin poikkeamia ilmiöissä voidaan data-analytiikan avulla käyttää vikaantumisten ennustamiseen, mikä toisi huomattavia säästöjä verkkoyhtiölle.

Sähköasemilla on useita eri komponentteja, jotka ovat sensoroinnin kannalta kiinnostavia. Tälle pääasiallisena syynä on sähköasemien toiminnan kriittisyys koko jakeluverkon toiminnan kannalta, jolloin vikaantumisten vaikutukset ovat paljon laajemmat ja suuremmat. Komponentit ovat kalliita ja niiden saatavuus heikkoa, jolloin kaikkien varalaitteiden pitäminen varastossa ei ole mahdollista ja korvaavan laitteen toimitusaika voi olla vähintään kuukausia, mikä voi häiritä verkon käyttötoimintaa pitkään.

Seuraavissa alaluvuissa kerrotaan komponenttikohtaisesti niiden perustietoja ja avataan kiinnostavia ilmiöitä tarkemmin. Samalla kuvataan, miten eri ilmiöitä voidaan seurata eri suureilla ja mitä vaatimuksia sensoreille komponentit asettavat.

6.2.1 Muuntamot

Jakeluverkossa muuntamot ovat määränsä ja kriittisyytensä perusteella varteenotettavimpia kohteita sensoroinnille. Muuntamoissa 20 kV keskijännite muunnetaan 0,4 kV pienjännitteeseen loppuasiakkaita varten. Muuntamon vikaantuminen aiheuttaa lyhyen keskeytyksen koko keskijännitelähdölle ja sen syöttämille asiakkaille pidemmän keskeytyksen sähkön toimituksessa, jolloin ne ovat hyvin kriittinen osa jakeluverkkoa.

Muuntamot voidaan yksinkertaistetusti jakaa kolmeen ryhmään niiden sijainnin ja rakenteen mukaan. Pylväsmuuntamoita käytetään ilmajohtoverkoissa ja muuntamo sijaitsee nimensä mukaisesti pylväässä ilman erillistä suojaa sään vaikutuksilta. Puistomuuntamo on kokonaisuus, joka sisältää keski- ja pienjännitekojeiston, muuntajan, muuntamorakennuksen ja mahdollisen erottimen. Ne sijaitsevat maan tasalla muuntamorakennuksen sisällä ja niitä käytetään enimmäkseen maakaapeliverkossa. Kiinteistömuuntamot ovat puistomuuntamon tapaisia, mutta ne sijaitsevat sisällä kiinteistöissä ja niiden vikaantumisten vaikutukset ovat todella merkittäviä, jolloin ne on syytä luokitella omaksi ryhmäkseen tarkasteluissa.

Pylväsmuuntamoita ei pidetty potentiaalisina kohteina haastatteluissa, sillä niiden määrät pienenevät maakaapeloinnin lisääntymisen takia ja niiden vikaantumisten vaikutukset ovat selvästi keskimäärin pienempiä kuin puisto- tai kiinteistömuuntamoilla. Lisäksi niiden sensorointi on teknisesti huomattavasti vaikeampaa muun muassa kiinnitysten ja sijaintien takia. Pylväsmuuntamoiden muuntajien öljyvuojojen indikointi sensoroinnin avulla olisi potentiaalisimpia käyttötapauksia ympäristö- ja vastuullisuusnäkökulmasta katsottuna, koska vuodot päätyvät suoraan ympäristöön. Tekninen toteutus olisi tässäkin tapauksessa hankalaa ja melko kallista sensorin kiinnityksen ja rakenteen takia. Tämän takia ne jätetään tarkemmasta tarkastelusta pois tässä työssä.

Puisto- ja kiinteistömuuntamoita on Elenian verkossa noin 10 000 kappaletta. Puistomuuntamoiden lukumäärä kasvaa vuosittain maakaapeloinnin johdosta ja Elenian verkossa niitä tulee olemaan noin 19 000 kappaletta vuonna 2028 (Tienari 2018). Elenian puistomuuntamoista 46% sijaitsee taajama-alueella ja loput haja-asutusalueella. Lähes jokainen kiinteistömuuntamo sijaitsee taajamassa. Taajama-alueella puistomuuntamolla keskimääräinen keskiteho on noin 65 kW. Haja-asutusalueella muuntamon keskiteho on 12 kW. Keskitehot laskettiin muuntamon vuotuisen energiankulutuksen perusteella jakamalla muuntamon vuosienergia 8760 tunnilla (Tienari 2018). Taajama-alueella sijaitsevat puistomuuntamot ovat siis keskimäärin selvästi kriittisempiä verrattuna haja-asutusalueeseen, sillä keskeytyksien vaikutukset ovat suuremmat taajama-alueella.

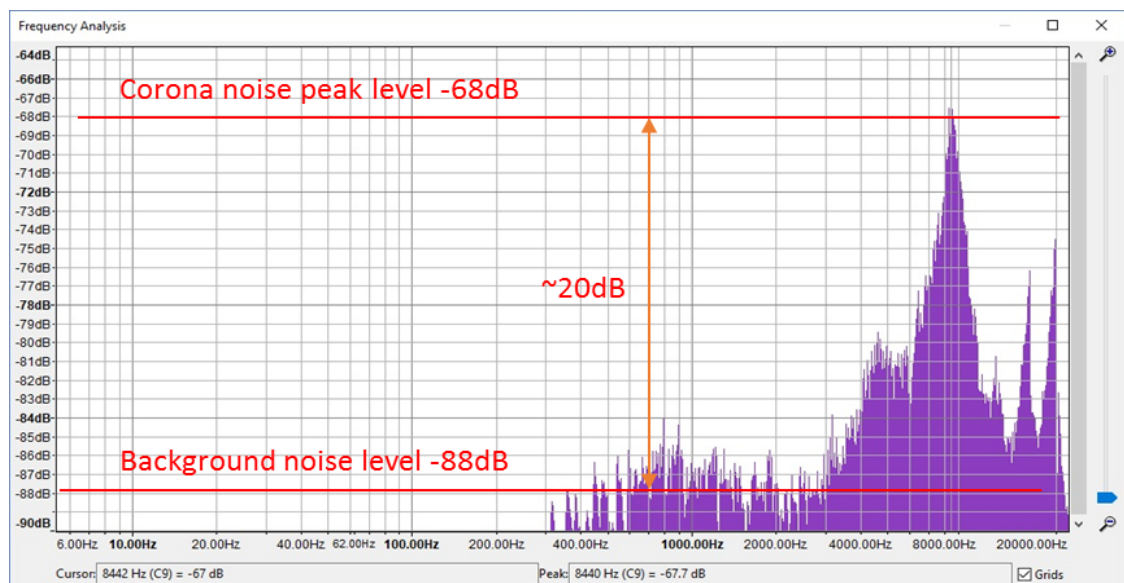
Puisto- ja kiinteistömuuntamoille tehdään Elenialla tarkastuksia 6 vuoden välein, poikkeuksena on tietyt erityiskohteet, kuten koulujen läheisyydessä sijaitsevat puistomuuntamot, joille tarkastus tehdään vuosittain ympäristö- ja turvallisuussyistä. Muuntamoiden sijainnilla ei ole muuten vaikutusta tarkastusväleihin tai kunnossapitotoimenpiteisiin. Tarkastuksissa muuntamon kunto arvioidaan ja sen perusteella suunnitellaan ja suoritetaan tarvittavat huoltotoimenpiteet. (Elenia 2018a)

Puistomuuntamon vikamekanismeja on kuvattu liitteestä A löytyvässä vikapuussa. Vikapuussa on huomioitu, voidaanko vikaantumiset havaita sensorien avulla. Puistomuuntamon vikapuun perusteella suurin osa muuntamon vikaantumismekanismien ilmiöistä on havainnoitavissa helposti seurattavilla suureilla, joiden seurantaan voidaan käyttää sensoreita. Suureen seurannan yksinkertaisuus vaikuttaa sensorin hintaan ja tätä vaikutusta

on kuvattu vikapuurakenteessa eri suureille merkitsemällä suuntaa antavia yksikköhintoja sensoreille, jotka kyseistä suuretta mittaisi. Esimerkiksi äänenvoimakkuuden seuranta on huomattavasti äänisignaalin seuranta yksinkertaisempaa, sillä jälkimmäinen vaatii mikrofoniin lisäksi monimutkaisempaa spektri- ja muuta analytiikkaa.

Ympäristöolosuhteiden seuranta muuntamoilla edesauttaa ympäristön vaikutusten arvioimista muuntamoiden elinkaareen. Ympäristön lämpötila voi vaikuttaa muuntajan käyntilämpötilan ohella muuntajan elinkaareen (Shiri, Gholami et al. 2011). Ympäristöolosuhteet voivat muuntajan lisäksi vaikuttaa suoraan tai välillisesti muihinkin muuntamon komponentteihin. Muuntamoissa on useita eri paikkoja, joissa kosteuden tiivistyminen vedeksi komponenttien pinnoille voi edesauttaa osittaispurkauksien syntymistä tai muita haittoja. Haastatteluissa tuli esille, että osittais- tai koronapurkauksia tapahtuu herkästi kaapelipäätteissä esimerkiksi huonosti tehtyjen liitosten tai ympäristöolosuhteiden takia. Myös Kenneth Väkeväinen kaapelipäätteissä tapahtuvia pintapurkauksia koskevassa diplomityössään totesi, että ympäristöolosuhteet ja erityisesti kosteus ja heikko ilmanpuhtaus edesauttavat keskijännitekaapelipäätteissä tapahtuvia osittaispurkauksia (Väkeväinen 2015)

Osittaispurkausten ja koronapurkausten havainnointiin voidaan hyödyntää esimerkiksi lämpötilaa, ääntä ja valoisuutta. Lämpötilasensori liittämiin asennettuna tai lämpökamera voi havaita osittaispurkausten aiheuttaman lämpötilan nousun. Osittaispurkauksista voi syntyä korvin kuultavaa ääntä, joka on todetusti mahdollista erottaa äänispektrianalyysillä. Kuvassa 10 on esitetty taajuusanalyysi koronapurkauksesta tehdyn äänitteen perusteella. Analyysin perusteella koronapurkauksen taajuushuippu on selvästi erotettavissa taustamelusta. Analyysissä ollaan suodatettu alle 400 Hz taajuudet 50 Hz vaihtosähköjärjestelmästä syntyvien harmonisten taajuuksien takia. (UnSeen Technologies 2018)



Kuva 12. Taajuusanalyysi puistomuuntamossa tapahtuvasta koronapurkauksesta (UnSeen Technologies 2018)

Näiden eri keinojen yhdistelyn avulla voidaan olettaa, että osittais- ja koronapurkauksia pystytään havaitsemaan luotettavasti. Nykyiset keinot osittaispurkausten havainnointiin ovat joko epätarkkoja tai kalliita. Tarkastuskäynnin yhteydessä tarkastusta suorittava asentaja voi havaita osittaispurkauksen jälkiä esimerkiksi päätteissä tai kuulla niistä aiheutuvaa sirinää, mitkä eivät ole kovin hyviä tapoja havainnoida niitä, sillä tarkastuskäyn- tejä suoritetaan suurimmalle osalle muuntamoista vain 6 vuoden välein. Osittaispurkaus- testauslaitteistojakin on nykyään markkinoilla, mitkä havainnoivat osittaispurkauksia kaapelipäätteiden lisäksi koko kaapelin osalta, mutta ne ovat vielä kohtalaisen kalliita laitteita pysyvää jatkuva-aikaista seuranta varten (Lappi 2019). Osittaispurkaukset voi- vat vaikuttaa nykyisillä menetelmillä teoriassa lähes tarkastusvälin mittaisia aikoja ai- heuttaen jopa vaurioita kaapelipäätteisiin ja mahdollisia sähkökatkoja asiakkaille, joten niiden havainnointi tarkastuksien välisenä aikana sensoreiden avulla voi tuottaa selviä kustannussäästöjä.

Puistomuuntamon kopin ovet ovat tavallisesti suljettu lukolla, jotta ulkopuoliset eivät pääse käsiksi muuntamon jännitteisiin osiin. Inhimillisiä virheitä voi kuitenkin tapahtua huoltotoimenpiteitä tai tarkastuksia suorittaessa ja ovi saattaa jäädä lukitsematta tai jopa avonaiseksi, jolloin riski ulkopuolisille tapahtuvaan tapaturmaan kasvaa huomattavasti. Ovien tilaa seuraamalla voidaan mahdolliset murtautumisetkin tai ilkivallan havaita. Puistomuuntamo voi kärsiä ulkoisia vahinkoja, mikä voi mahdollistaa pääsyn muuntamon sisälle tai rikkoa sisällä olevia komponentteja. Turvallisuusriskien vähentämiseksi muun- tamon ovien tilaa voidaan seurata Hall-ilmioön, liikkeeseen tai valoisuuteen perustuvilla antureilla. Ulkoisia vaurioita, kuten törmäyksiä, varten voidaan seurata liikettä, värähte- lyä tai ääntä. Liike- tai värähtelyanturi muuntamon seinässä voi muuntamokopin kiinteän rakenteen takia huomata törmäyksen missä kohtaa tahansa muuntamo ja törmäyksistä syntyy usein kova ääni. Ulkoiset vauriot eivät kuitenkaan ole yleisiä muuntamoiden koon ja sijaintien takia ja vaurioista useimmin ilmoitetaan verkkoyhtiölle heti tapahtuman jäl- keen, jolloin niiden ensisijainen seuranta sensoreilla ei ole kovin kannattavaa. Muun seu- rannan ohessa tapahtuva ulkoisten vaurioiden havainnointi tuottaisi kuitenkin lisäarvoa turvallisuuden parantamisen myötä, johon varsinkin äänisensorointi soveltuisi hyvin. Ul- koisten vaurioiden ja osittaispurkausten samanaikainen seuranta yhdellä äänisensorilla voi olla monimutkaista toteuttaa, mutta se olisi ideaalinen tapa toteuttaa muuntamon ää- nimonitorointia.

Puistomuuntamoiden määrän mittava kasvu tuo hyvät mahdollisuudet aloittaa niiden reaaliaikainen kunnonvalvonta muuntamoiden elinajan alkuvaiheessa. Muuntamon raken- nusvaiheessa sensorin asentaminen on helppoa ja sille olisi mahdollista tarjota myös ul- koinen virta esimerkiksi muuntamon kaukokäyttölaitteiston sähköjärjestelmän kautta. Ul- koinen virtalähde ei ole kovin kustannustehokasta toteuttaa muuntamoilla, joissa kauko- käyttölaitteistoa ei ole. Elenialla suurimpaan osaan puistomuuntamoita ei ole asennettu valmiiksi pistorasioita, joihin sensorin ulkoinen virtalähde voitaisiin liittää. Tämän takia puistomuuntamoihin asennettavat sensorit vaativat sisäisen virtalähteen pariston tai akun

muodossa jälkiasennuskohteissa, jotta asennuskustannukset voidaan pitää mahdollisimman pieninä.

Kiinteistömuuntamoilla ja tietyillä pölyisillä tai likaisilla alueilla, kuten sahojen ympäristössä, sijaitsevilla puistomuuntamoilla muuntamon sisälle kerääntyvä pöly ja lika voivat aiheuttaa riskejä ylikuumentumiseen tai muihin vikoihin. Pölyisyyden indikoinnilla ilmanlaadun seurannalla mahdollistaisi tarvittavien siivousten suorittamisen pienentäen vikaantumisten riskejä ja parantamalla paloturvallisuutta.

Asennuskustannusten minimointi on muuntamoiden sensoroinnin taloudellisen kannattavuuden kannalta todella tärkeää, joten sähkökatkoja tai sähköttöitä vaativia toimenpiteitä on pyrittävä välttämään. Sisäisen virtalähteen lisäksi sensorin asennuksen ja kiinnityksen pitää olla yksinkertaista ja nopeaa. Sensorin konfigurointi ja käyttöönotto pitää olla yksinkertainen prosessi ja kiinnitys pitäisi onnistua helposti esimerkiksi muuntamokopin seinään magneetilla. Laajamittainen sensorien asennus kannattaa suorittaa muun käynnin yhteydessä esimerkiksi muuntamon tarkastuksen yhteydessä, jolloin erillisiä matkakuluja ei synny.

Sensorin pitäisi toimia vähintään muuntamon tarkastusvälin verran, sillä muuntamon tarkastuskäynnin yhteydessä sensorin tai sen patterien vaihto olisi mahdollisimman kustannustehokasta. Täten sensorin eliniän on oltava minimissään 6 vuotta, mikä asettaa vaatimuksia virtalähteelle. Pariston lisäksi elinikää voisi lisätä energian keräämisratkaisut. Energian kerääminen on kuitenkin vielä teknisesti vaikeaa toteuttaa, mutta tulevaisuudessa se voi mahdollisesti olla jopa pääasiallinen virtalähde sensoreille (M. Hajikhani, L. Fabrice et al. 2018).

Sensoriteknologia kehittyy jatkuvasti, jolloin sensorin hinnat tulevat suurella todennäköisyydellä laskemaan anturoinnin samalla kehittyessä paremmaksi. Tämän takia sensorin vaihto 6 vuoden välein voi olla hyvinkin perusteltua, jotta uudet teknologiat saadaan käyttöön. Tällöin pitäisi huolehtia vanhojen sensorien kierrätyksestä tai uusiokäytöstä. Mahdollisena ratkaisuna voisi olla esimerkiksi sensorin modulaarisuus, jolloin sensoria ei tarvitsisi kokonaisuudessaan vaihtaa, vaan tiettyjen osien päivittäminen uudempaan riittäisi.

6.2.2 Muuntajat

Jakeluverkkoyhtiöillä on suurjännitteisen jakeluverkon ja keskijänniteverkon välisiä sähköasemia ja keski- ja pienjänniteverkon välisiä muuntamoita, joissa niiden muuntajat muuntavat jännitetason keskijännitteeksi. Sähköaseman päämuuntajilla kiinnostavat ilmiöt ja seurattavat suureet ovat puistomuuntamon muuntajan kanssa samankaltaisia. Sähköaseman muuntajalla vaikutukset kunnan heikentymisessä ja vikaantumisissa ovat vain kertaluokkaa suuremmat ja niiden lukumäärät paljon pienemmät, jolloin mittausmenetelmät sähköaseman muuntajilla voivat olla mahdollisesti hienostuneempia. Kuten luvussa

6.2.1 todetaan, niin muuntamoiden osalta muuntajien sensoroinnin tarkastelu kohdistuu puisto- ja kiinteistömuuntamoihin.

Päämuuntajien vikaantumisia on tutkittu muun muassa CIGRE:n julkaisemassa kyselytutkimuksessa, jossa kerättiin maailmanlaajuisesti tietoa suurjännitteisten muuntajien vi-oista. Tutkimuksen perusteella määritettiin muun muassa muuntajien vikataajuuksia, vi-kapaikkoja ja vikaantumisen syitä eri jännitetasoilla. Tutkimuksen mukaan vakavan muuntajan vikaantumisen vuosittainen taajuus on alle 1 % luokkaa. Muuntajan käämitys, käämikytkin ja läpilyöntieristimet (engl. bushings) korostuivat vikapaikkoina ja syiksi vikaantumisille nousi erityisesti suunnittelun ja tuotannon virheet, ikääntyminen ja ulkoi-set oikosulut. (CIGRE Brochure 642 2015)

Muuntajan pinnan tai sen sisäinen lämpötila on aiemmin mainittujen ympäristöolosuhteiden tapaan kiinnostava seurantakohde, sillä muuntajan käyntilämpötilalla on vaikutuksia muuntajan elinkaareen, jolloin käyntilämpötilan seurannalla voidaan arvioida muuntajan toiminta-ajan pituutta (Hashmi, Lehtonen et al. 2013). Pelkkä ympäristön lämpötilan seu-ranta ei kuitenkaan riittäisi vaan muuntajan käyntilämpötilaa pitäisi mitata erikseen. Käyntilämpötilan seurantaan on useita mahdollisia paikkoja, kuten öljyn, käämityksen sekä muuntajan kuumien pisteiden seuranta. Uusiin muuntajiin voitaisiin valmistajan puolesta asentaa jo valmiiksi lämpötila-anturit muuntajan sisäisen lämpötilan seurantaan varten, jolloin saataisiin vieläkin tarkempaa tietoa muuntajan kunnosta.

Lämpötilan lisäksi muuntajan värähtelyn muutokset voivat ilmaista muuntajan kunnossa tapahtuvaa heikentymistä. Värähtelydatan perusteella on voitu luotettavasti erotella hy-väkuntoisia muuntajia heikkokuntoisista. (Hong, Huang et al. 2016) Värähtelyn monito-rointi on ollut jo pitkään käytössä teollisuudessa esimerkiksi moottoreissa, sillä jatkuva-aikaisesti käynnissä olevilta laitteilta voidaan helposti muodostaa kyseiselle laitteelle ominainen värähtelyprofiili. Profiilin avulla värähtelyssä tapahtuvat poikkeukset voidaan helposti havaita ja käynnistää tarvittavat toimenpiteet.

Sähköasemien päämuuntajat huolletaan Elenialla kuuden vuoden välein. Päämuuntajan suojalaitteet koestetaan kolmen vuoden välein. Muuntajan öljyn kunnan seuranta antaa hyvän kuvan muuntajan kunnosta. Tämän takia sähköasemien muuntajille suoritetaan kuuden vuoden välein öljyanalyysi, jossa öljynäyte analysoidaan laboratoriossa. Labora-toriossa mitataan öljyn epäpuhtauksia ja öljyn kaasupitoisuuksia, joiden perusteella muuntajaöljyn kunto voidaan arvioida. Päämuuntajan öljyanalyysi toteutetaan tällä het-kellä kerran kuudessa vuodessa muuntajan huollon yhteydessä, jolloin nopeat muutokset öljyn laadussa voivat jäädä huomaamatta. Muun muassa Vaisala Oyj on kehittänyt muun-tajille tarkoitetun online-kaasuanalysointilaitteen (DGA, dissolved gas analyser), jolla muun-tajaöljyn kuntoa voidaan seurata jatkuva-aikaisesti (Vaisala 2019). Eronen diplomityös-sään selvitti analysointilaitteiden kannattavuutta ja tulosten perusteella online-analysointilaitteet soveltuvat pääasiassa suuritehoisille muuntajille, joiden hankintahinnat ovat miljoonia,

mutta tarpeeksi kustannustehokas ratkaisu soveltuisi varmasti jatkuva-aikaiseen seurantaan myös pienemmillä päämuuntajilla, joita käytetään jakeluverkoissa (Eronen 2016).

Päämuuntajat ovat asennettu öljyaltaaseen, jotta muuntajien sisältämä öljy ei pääsisi vuotoilanteissa ympäristöön. Keväisin ja syksyisin päämuuntajien öljyaltaisiin voi kerääntyä sateen tai lumen sulamisen takia vettä, joka taas voi pakkasilla jäätyä. Jäätyvä altaassa oleva vesi voi rikkoa muuntaja-allasta, jolloin öljyvahingot voivat päätyä ympäristöön. Altaan korjaus on kallis ja aikaa vievä toimenpide, sillä muuntaja pitäisi siirtää altaasta työn ajaksi pois. Vedenpinnan korkeutta seurataan Elenialla tällä hetkellä urakoitsijoiden toimesta sähköasemakäyntien yhteydessä. Vedenpinnan korkeutta seuraavan sensorin avulla tarkastuksien välisenä aikana kertynyttä vettä voidaan seurata reaaliaikaisesti, jolloin mahdollisiin tulvatilanteisiin osataan reagoida paremmin ja vähentää veden aiheuttamia riskejä. Samaan tapaan öljyvuotojen indikointi muuntajilla mahdollistaa öljyvahinkojen vaikutuksien pienentämisen, sillä reagointiajalla on hyvin suuri merkitys vaikutusten laajuuteen.

Päämuuntajan käämikytkimellä (engl. on-load tap-changer) ylläpidetään jännitekiskoston määritellyä jännitetasoa muuttamalla muuntajan muuntosuhdetta. Vanhoissa päämuuntajissa käämikytkin voi olla samassa öljytankissa muuntajan kanssa, jolloin kytkimen toiminta voi synnyttää öljyyn epäpuhtauksia. Uudemmissa muuntajissa käämikytkimen eristeöljy on eroteltu omaan tilaansa. Öljyn kunnon seurannan lisäksi kytkintä ohjaavan moottorin toiminnan, kytkimen lämpötilan ja värähtelyn seuranta olisi mahdollista toteuttaa sensoroinnilla ja hyödyntää niitä kytkimen kunnon arvioinnissa (CIGRE Brochure 343 2008, Seo 2018).

Lisää mahdollisia seurattavia ilmiöitä ja soveltuvia mittaustapoja muuntajilla on esitelty CIGRE:n julkaisemassa toisessa tutkimuksessa. Tutkimuksessa otetaan tarkemmin kantaa, miten eri ilmiöitä tulisi mitata ja minkälaisia vaatimuksia niiden mittaaminen asettaa muuntajavalmistajille. (CIGRE Brochure 343 2008)

6.2.3 Reaktorit

Loistehon siirto vähentää pätötehon siirtokykyä sähköverkossa, jolloin tarvittava loisteho kannattaa tuottaa mahdollisimman lähellä loistehon kulutuspisteitä. Maakaapelointi on lisäämässä loistehon tuotantoa jakeluverkossa, jolloin loistehon kulutukselle jakeluverkoyhtiön alueella on jatkuvasti kasvava tarve. (Fingrid 2016)

Atte-Ilari Kenttälän diplomityön mukaan Elenia tuottaa kaikissa liittymispisteissään loistehoa, joka siirtyy kantaverkkoon pienentäen kantaverkon siirtokapasiteettia. Elenialla on loistehon kompensointia varten aloitettu asentamaan reaktoreita kantaverkon liittymäpisteisiin sähköasemille. Yhden reaktorin suunniteltu käyttöaika on 40 vuotta toimien nimelisteihollaan jatkuvasti. (Kenttälä 2016)

Reaktoreista ei ole vielä paljon kokemuksia jakeluverkkoyhtiöissä, mikä osaltaan hankaloihtaa kunnossapitostrategian määrittämistä niille. Elenian reaktoreissa on tapahtunut yllättäviä vikaantumisia ensimmäisten käyttövuosien aikana, mikä kannustaisi niiden aktiivista kunnonvalvontaa. Sensoroinnilla reaktoreiden kuntoa voitaisiin seurata reaaliaikaisesti, jolloin kunnossapitotoimenpiteitä voidaan kohdistaa tarpeen mukaan ja luoda aito kuntoon perustuva kunnossapitostrategia niille.

Atte-Ilari Kenttälän mukaan öljyeristeisen reaktorin öljyn kuntoa ja sen mahdollisten jäähdytyslaitteiden toimintaa on syytä seurata, sillä reaktorit on mitoitettu niin, että ne toimivat jatkuvasti nimellistehollaan. Tällöin reaktorin ylikuumeneminen on riski riittämättömän jäähdytyksen takia. (Kenttälä 2016, s. 45)

Reaktorin rakenne vastaa jakelumuuntajan rakennetta pois lukien muuntajan toisiopuolen. Reaktorit kuitenkin on suunniteltu toimimaan nimellistehollaan koko pitoajan verran, toisin kuin jakelumuuntajat, joiden kuormitusteho vaihtelee jopa alle 50 % nimellistehosta. Tämä ero asettaa reaktorit selvästi herkemmäksi esimerkiksi ylikuumentumiselle verrattuna tavallisiin muuntajiin.

Reaktorin vikaantuminen johtaa kasvaviin loistehoihin verkossa ja kaapeloidussa verkossa johdon alkupään jännite voi nousta loistehon myötä jopa liian korkeaksi. Reaktorin korjausajat ovat melko pitkiä ja reaktorinvaihdot voivat viedä kuukausia. Korjausajan aikana loistehomaksukustannukset nousevat jakeluverkkoyhtiöllä. Tämän takia reaktoreiden on toimittava mahdollisimman virheettömästi koko niiden pitoajan, mikä korostaa kunnossapidon tärkeyttä niille.

Reaktorin ympäristöolosuhteiden seuranta tarjoaa muiden komponenttien tapaan lisätä muun seurannan lisänä. Ympäristön lämpötila vaikuttaa ulkotiloissa sijaitsevan reaktorin lämpötilaan, joten ympäristön lämpötilaa pitää myös seurata.

Reaktorin pinta- tai sisälämpötilan seurannalla voidaan seurata mahdollisia ylikuumentumisia. Reaktorivalmistaja antaa reaktoreille lämpötilaraja-arvot, joissa ne on suunniteltu toimimaan. Lämpötilaseurannalla voidaan todeta mahdolliset raja-arvojen ylitykset ja kohdistaa tarvittavia toimenpiteitä jäähdytykselle. Kerättyä dataa voidaan hyödyntää takuukorvausneuvotteluissa, jos laitteet rikkoontuvat ilman raja-arvojen ylityksiä.

Reaktorin värähtelyn tai mahdollisesti äänen seuranta voi muuntajien tapaan mahdollistaa poikkeustilanteiden indikoinnin, sillä mekaaniset vikaantumiset voivat joko aiheuttaa hetkellisen poikkeaman tai muuttaa värähtely- tai ääniprofilia kokonaan. Reaktorit ovat muuntajien tapaisia komponentteja, jolloin oletettavasti reaktoreiden kuntoa voidaan vastaavasti arvioida värähtelyprofiilin mukaan. Reaktorin värähtely ja reaktorin synnyttämä ääni ovat Zhangin ja Yaon mukaan riippuvaisia lämpötilasta, jolloin lämpötilaseuranta tulee toteuttaa värähtelyseurannan kanssa samanaikaisesti, jotta tarvittavat tiedot poikkeamien erottamiseen on saatavilla (Zhang, Yao 2012).

Öljyeristeisten reaktorien öljyn kunnon seuranta on muuntajien tapaan kiinnostavaa, mutta kustannustehokkaita ratkaisuita öljyn jatkuva-aikaiseen kunnonseurantaan ei vielä markkinoilta löydy. Öljyeristeiset reaktorit asennetaan öljyaltaaseen ympäristövahinkojen varalta muuntajien tapaan, jolloin öljyn ja veden indikointi altaassa sensorilla vähentäisi ympäristöriskejä.

Monet reaktorivalmistajat eivät ole antaneet huolto-ohjelmia laitteilleen, joten niiden oletettavasti pitäisi olla lähes huoltovapaita. Kokemusten perusteella reaktoreiden kuntoa on kuitenkin syytä seurata ja tarvittaessa toteuttaa huoltotoimenpiteitä, sillä niitä on vikaantunut jo muutaman vuoden sisällä käyttöönotosta ylikuumenemisen tai mekaanisten vaurioiden takia.

Reaktorit uutena jakeluverkon komponenttina soveltuisivat hyvin kuntoon perustuvan enakoivan kunnossapitostrategian pilottikohteeksi. Nykyiset kunnossapitostrategiat perustuvat pitkälti pitkän aikavälin historiatietoon ja kokemukseen, mitä reaktoreista ei ole vielä kerääntynyt. Sensoreilla toteutettavalla kunnonvalvonnalla voidaan kerätä dataa, johon mahdolliset kunnossapitotoimenpiteet perustuisivat, kun datan perusteella havaitaan tarpeita huollolle.

6.2.4 Katkaisijat ja erottimet

Katkaisijoita ja erottimia käytetään sähköverkon kytkentätilan muutoksiin. Katkaisijoita käytetään osana sähköverkon suojausta ja ne suunnitellaan toimimaan moninkertaisissa ylivirtoja sisältävissä oiko- tai maasulkuvikatilanteissa, jolloin niiden avulla vikaantunut osa verkosta voidaan kytkeä irti verkosta hyvin nopeasti. Katkaisijoita ohjataan suojaus-toiminnoissa tai muissa verkon kytkentätilan muutosta vaativissa tilanteissa ja niiden toimintavarmuus on merkittävässä osassa sujuvassa sähköverkon käytössä. (Lakervi, Partanen 2009) Erottimia käytetään pidempiaikaisempiin kytkentätilojen muutoksiin. Erottimilla ei ole tavallisesti kykyä muuttaa verkon kytkentätilaa kuormitettuna, mutta esimerkiksi Elenialla käytettävät keskijänniteverkon kuormanerottimek pystytään avaamaan ja sulkemaan verkon ollessa jännitteinen ja kuormitettu (Niemi 2018).

Katkaisijat ja erottimet voivat olla kauko- tai manuaalikäyttöisiä. Kaukokäytössä kytkinlaitetta voidaan ohjata verkon käyttökeskuksesta etänä. Kytkinlaitteen ohjaus voi tapahtua käsin tai moottorin avulla. Kaukokäyttölaitteet mahdollistavat nopean vikapaikan erottamisen verkosta ja mahdollisten varayhteyksien kytkemisen ja käsiohjatuilla kytkinlaitteilla vika-alue rajataan vikapaikan erottamisen jälkeen. (Lakervi, Partanen 2009)

Kytkinlaitteiden toimintavarmuus on tärkeää vikatilanteissa, sillä vikakustannukset kasvavat vika-alueen kasvaessa laajemmaksi, jos kytkinlaitteet eivät toimikaan. Vaikutukset riippuvat hyvin paljon vikapaikan sijainnista verkossa, mutta sähköasemilla sijaitsevien

johtolähtöjen katkaisijoiden toiminta sähköverkon turvallisuuden ja niiden vaikuttavuuden kannalta korostuu erityisesti, sillä muuten keskeytyksen vaikutusalue kasvaisi huomattavasti aiheuttaen laajempia sähkökatkoja.

Erottimien vikaantumista tehdyssä tutkimuksessa analysoitiin erottimien vikatyyppejä, vikataajuuksia ja määritettiin kuntoindikaattoreita, joilla niiden kuntoa voitaisiin seurata. Tutkimuksessa todetaan, että vakavat vikaantumiset kohdistuvat erityisesti erottimien ohjautuvuuteen ja sekundaarijärjestelmiin ja kaukokäyttöisissä erottimissa vikaantumisia havaitaan selvästi käsikäyttöisiä enemmän. Tutkimuksen mukaan neljännes vikaantumisista johtuu erottimen ikääntymisestä tai kulumisesta, mikä on selvästi suurin yksittäinen syy. 40 prosentille vikaantumisista syytä ei voitu määrittää, noin 10 prosenttia johtuu sääilmiöistä ja loput vikaantumisen syiden osuudet jakautuvat valmistus- tai työvirheiden ja laitteen käyttämättömyyden kesken. (Brodersson, Jürgensen et al. 2016)

Ikääntymisen vaikutus korostuu tutkimuksessa tarkasteltaessa erottimien vikataajuutta iän perusteella. 0-10 vuoden ja 51-60 vuoden ikäisten erottimien selvästi korkeampi vikataajuus. Erottimien mahdolliset valmistus- tai asennusvirheet korostuvat ensimmäisinä käyttövuosina, kun taas ikääntyminen nostaa vikataajuutta huomattavasti viimeisinä erottimen käyttövuosina. (Brodersson, Jürgensen et al. 2016)

Tutkimustuloksien analysoinnin tuloksena tutkijat määrittelivät erilaisia indikaattoreita, joilla erottimien kuntoa voidaan mahdollisesti seurata, jotka on esitetty taulukossa 3. Indikaattoreissa on huomioitu, onnistuuko mittaus erottimen ollessa käytössä ja tarvitaanko mittauksiin ylimääräisiä sensoreita ("Measurement Collection"). Lisäksi taulukossa on esitetty vaadittu erottimen tila ja toiminto, jotta kyseinen mittaus voidaan suorittaa ("State and Operation needed to measure"). (Brodersson, Jürgensen et al. 2016)

Taulukko 3. Erottimien kunnonvalvontaan soveltuvia indikaattoreita (Brodersson, Jürgensen et al. 2016)

Condition Indicator	Measurement Collection		State and Operation needed to measure		
	Online	Additional sensor	Maneuver required	Under Load	Energized
Current Carrying					
Crossover resistance	0	1	0	0	0
Temperature primary circuit	1	1	0	1	1
Maneuverability					
Temperature maneuver box	1	1	-	-	-
Motor current open	1	1	1	0	1
Motor current closing	1	1	1	0	1
Motor operating time (closing)	1	1	1	0	1
Motor operating time (opening)	1	1	1	0	1
Motor Voltage supply	1*	0*	0*	1*	
Last maneuver date	1*	0*	1	-	-
Maneuvers since last inspection	1*	0*	1	-	-
Total number of maneuvers	1*	0*	1	-	-
Maneuver torque	0	1	1	0	1
Contact pressure	0	1	1	0	0
Gas pressure (drive)	1	0	0	1	-
Others					
Stability in construction - Visual	0	-	-	-	-
Cracks in porcelain	0	1	0	**	
Corrosion - Visual	0	-	-	-	-
Isolator Condition - Visual	0	-	-	-	-
Secondary Function					
Control Signal Voltage	1*	0*	0*	0*	-
Position transducer signals	1	0	0	0	-

* Only remote controlled disconnectors

** Depending on the method

(Yes = 1 / No = 0)

Taulukossa esitetyistä indikaattoreista erityisen kiinnostavia ovat ne, joita pystytään mittaamaan käytön aikana ja mittaus vaatii erillisen sensorin. Näiden indikaattoreiden seuranta olisi mahdollista toteuttaa IoT-sensoreiden avulla. Samantyyppisiä indikaattoreita voidaan varmasti hyödyntää myös katkaisijoiden kunnonvalvonnassa, sillä kauko-ohjattavia katkaisijoita ohjataan erottimien tapaan moottoreilla.

Nykyisinkin erottimilta kerääntyy jonkin verran dataa sähköverkkoyhtiöille. Diplomityössään Henri Niemi esittää, miten kerättyä dataa voidaan hyödyntää erottimien kunnossapidossa. Esimerkiksi suurimmalta osalta Elenian kauko-ohjattavista erottimista saadaan tieto liike-energiasta, joka erottimen ohjauksiin on vaadittu. Kerääntyvän tiedon avulla on mahdollista tunnistaa erityisesti pylväserottimien kunnossapitotarpeita. (Niemi 2018)

Roima diplomityössään hyödynsi erottimilta ja katkaisijoilta kerättyä moottorin virta- ja äänisignaalia määrittäessään erilaisia tunnuslukuja, joiden avulla kytkinlaitteiden kuntoa voidaan arvioida. Roima toteaa tutkimuksessaan, että signaaleista pystytään muodostamaan useita erilaisia mahdollisia tunnuslukuja signaalinkäsittelyn eri menetelmien avulla, kuten ohjausaika tai virrankulutus, joissa tapahtuvat muutokset voivat enteillä laitteen kunnan heikentymistä. (Roima 2018)

Roima huomauttaa, että yhden laitteen mittaustuloksia voi olla vaikeaa vertailla suoraan muihin vastaaviin laitteisiin, sillä laitetypit eroavat mekaanisesti toisistaan ja ympäristöolosuhteet voivat vaihdella paljon ympäröivien laitteiden häiriöiden ja sään takia. Mitauksilla voidaan kuitenkin muodostaa laitekohtaisia profiileja, jonka avulla poikkeamia olisi mahdollista havainnoida. (Roima 2018)

6.2.5 Sähköasemien akustot

Sähköasemien akustot ovat osa sähköaseman apusähköjärjestelmää ja toimivat sähköaseman tasajännitelähteinä toisiolaitteille, kuten kaukokäyttö- ja suojauslaitteille, kun tassa sähköä ei sähköaseman omakäyttöjärjestelmän kautta saada varmistaen sähköaseman turvallisen toiminnan (Piironen 2015). Akustot ovat sähköasemilla usein lyijypohjaisia akkuja kustannustehokkuuden takia. Lyijyaku voi olla rakenteeltaan avoin tai suljettu. Avoimen akun etuna on helpompi kunnonvalvonta ja pitkä käyttöikä. Ne kuitenkin tarvitsevat erillisen akkuhuoneen, sillä ne voivat muodostaa räjähdysaltista vetykaasua. Suljettu akku on huoltovapaa eikä tarvitse paljoa tilaa, mutta kunnonvalvonta ja käyttöikä on avointa akkua heikommalla. (Sähkötieto 2016)

Elenialla akustojen kuntoa valvotaan sähköasemien tarkastuskäynneillä silmämääräisesti 4 kertaa vuodessa ja vuosittaisilla impedanssimittauksilla. Nykyiset menetelmät ovat riittäviä akustojen kunnan heikkenemisen havainnointiin, sillä yksittäisen akun kunnan heikentyminen ei yleensä vaikuta akuston toimintaan, mutta äkillisiä vikoja akustoissa ei voida nykyisillä menetelmillä havaita. Tosin äkilliset vikaantumiset ovat harvinaisia ja usein kohdistuvat akuston varaajaan. Jatkuva-aikainen akuston akkujen kunnonseuranta mahdollistaisi nopeamman reagoinnin kunnan heikentymiseen, mikä parantaisi akustojen luotettavuutta ja todennäköisesti pidentäisi elinkaarta.

Akustojen jatkuva-aikaiseen kunnonvalvontaan on jo olemassa ratkaisuita, joita kutsutaan akustomonitorointijärjestelmiksi (engl. battery monitoring system, BMS). Monia

markkinoilta saatavia järjestelmiä ei voida luokitella IoT-ratkaisuiksi, sillä tietojen keräämiseen kennoilta tarvitaan erikseen tietokone, eikä tiedonsiirto niissä onnistu suoraan järjestelmiin. Kim, Makwana et al. (2018) ovat kehittäneet pilvipohjaisen IoT-teknologioita hyödyntävän yleisen akuston jatkuva-aikaisen monitorointijärjestelmän, jossa akustojen mittauksista kerätty data siirretään pilvipalveluun ja analytiikan perusteella vikaantumisia voidaan havainnoida ja ennakoita. He nostavat esille tämän kaltaisen järjestelmän suurimpana etuna kustannustehokkaan skaalautuvuuden, mikä tukisi laajaa akustojen kunnonseurantaa. (Kim, Makwana et al. 2018) Tulevaisuudessa akustot tulevat todennäköisesti yleistymään myös jakeluverkossa tasaamaan kulutuspiikkejä ja pienentämään sähkökatkoista syntyvää haittaa, jolloin akustojen kunnonhallinnassa on syytä käyttää yhteistä järjestelmää. Tosin akustojen omistajana ei välttämättä ole jakeluverkkoyhtiö, jolloin näiden akustojen kunnonhallinta ei kuuluisi verkkoyhtiölle (Elenia 2018b)

6.2.6 Jako- ja haaroituskaapit

Jakokaappeja ja haaroituskaappeja käytetään pienjänniteverkossa jakamassa muuntamolähdön sähköä loppuasiakkaille. Niistä syöttö voi olla suoraan asiakkaalle tai ne voivat syöttää toista jakokaappia tai haaroituskaappia. Ne asennetaan helposti tavoitettaviin paikkoihin, jotta huoltotoimenpiteille ei ole esteitä. (Elenia 2018c) Jakokaapin ja haaroituskaapin ainoana erona on suojaustoiminnot, sillä vain jakokaapeista löytyy sulakkeet, jotka suojaavat pienjänniteverkkoa.

Jakokaappeja on Elenialla tällä hetkellä noin 46 000 ja niiden määrä on puistomuuntamoiden tapaan kasvussa maakaapeloinnin takia. Haaroituskaappeja on noin 5000 kappaletta. Kaappien tarkastusväli on kahdeksan vuotta ja tarkastusten perusteella vuosittain tehdään huoltotoimenpiteitä 1000-2000 jako- ja haaroituskaapeille. Huoltotoimenpiteet koostuvat kaappien oikomisesta, merkintätöistä ja ympäristön raivauksesta. Esimerkiksi oikomisista tehdään vuosittain useita satoja.

Jakokaappien ympäristön olosuhteiden seuranta lämpötilan ja kosteuden perusteella edesauttaa arvioimaan niiden vaikutuksia elinikään puistomuuntamoiden tapaan. Kosteus voi tiivistyessään vaikuttaa jakokaapin elinikään esimerkiksi eristeiden heikentyessä sen takia.

Jakokaapit asennetaan helposti saavutettaviin paikkoihin, mikä altistaa ne ulkopuolisiin vaurioihin. Vuosittain Elenialla jakokaappeja pitää oikoa satoja törmäysten ja routimisen takia. Tällä hetkellä tarve oikomiselle todetaan useimmiten jakokaapin tarkastuskäynnillä, ellei kallistuminen aiheuta sähkönjakelun häiriöitä tai siitä saada erillistä ilmoitusta asiakkaalta tai ulkopuoliselta. Jakokaapin kallistuminen voi aiheuttaa liitinvikoja ja sähköturvallisuusriskejä, kun kallistuksen takia esimerkiksi kaapin sisällä oleva jännitekisko koskettaa kaapin metallista kuorta tai muita osia tai kaapin alta voi paljastua kaapeleita

kosketeltaviksi kaapin ulkopuolelta. Esimerkiksi huonokuntoiset liittimet voivat aiheuttaa keskeytyksen sähköjakeluun. Nopeampi reagointi kallistumiin sensoroinnin avulla voisi vähentää pienjänniteverkon vikamääriä ja parantaisi turvallisuutta.

Kallistumista jakokaapeilla on havaittu tapahtuvan myös uusilla asennetuilla jakokaapeilla valitusta perusratkaisuista tai muista syistä johtuen. Jakokaappeja asennetaan maakaapeloinnin yhteydessä tuhansia vuodessa, jolloin kokonaisvaltainen vastaanotto-tarkastuksen jälkeinen pidemmän aikavälin laadunvarmennus jakokaappien asennuksista on vaikeaa tai kallista toteuttaa perinteisin menetelmin, sillä henkilön suorittamien maastokatselmusten tekeminen vie paljon aikaa tarvittavan matkustamisen takia. Uudisasennuksissa jakokaappiin asennetulla kallistusanturilla voidaan havaita selkeitä muutoksia kallistumassa koko jakokaapin elinkaaren ajan, jolloin laadun- tai kunnonvalvontaa varten ei välttämättä tarvitsisi tehdä erillisiä maastokatselmuksia niiden tilanteen kartoittamiseksi.

Jakokaappien tarkastusväli on Elenialla 8 vuotta ja muuntamoiden tapaan sensorien asennus ja vaihto kannattaa suorittaa tarkastuskäyntien yhteydessä. Tällöin jakokaappeihin asennettujen sensorien toiminta-aika pitäisi olla vähintään 8 vuotta. Sensoreiden asentaminen pitää olla samoin hyvin yksinkertaista ja jakokaappeihin ja haaroituskaappeihin asennettaessa sensorin koko pitää olla ahtaan tilan takia pieni. Jakokaappien kallistumaa ei tarvitse seurata jatkuvasti, vaan riittävä lähetysväli olisi muutaman kerran päivässä, mikä pidentäisi sensorin käyttöaikaa.

6.2.7 110 kV voimajohdon pylvät

Suurjännitteinen jakeluverkko on jakeluverkon toiminnan kannalta hyvin kriittinen, sillä ne syöttävät jakeluverkon sähköasemia, jotka edelleen jakavat sähköä keski- ja pienjänniteverkkoihin. Vikaantumiset suurjännitteisessä verkossa voivat aiheuttaa laajoja sähköjakelun keskeytyksiä keski- ja pienjänniteverkkoon kytkeytyneille asiakkaille, jos sähkönsyöttöä ei voidakaan korvata varasyöttöjen kautta.

Osa 110 kV voimajohtopylväistä on puupylväitä ja osa teräksestä valmistettuja pylviä. Pylväiden kallistumista ja kaatumista estetään muun muassa harusköysien ja muiden tukirakenteiden avulla. Kaatumisherimmät pylvät ovat voimajohdon kulmapylvät eli pylvät, joissa voimajohdon suunta muuttuu, sillä niihin kohdistuu eri suuntaiset vetävät voimat. Voimajohdot kulkevat kulmapylväiden välillä suoraa reittiä, jolloin yhden pylvään pelkkien harusten pettäminen ei välttämättä aiheuta pylvään kaatumista, kun muiden pylväiden vetovoimat voimajohdon kautta pitävät sitä pystyssä.

Voimajohtopylvään kaatuminen on hyvin harvinaista, sillä pylvät ja niiden tukirakenteet on suunniteltu hyvin varmoiksi ja niille tehdään säännöllisiä kuntotarkastuksia. Elenialla 110 kV voimajohtopylväiden kunto tarkastetaan 4 vuoden välein kävelytarkastuksien muodossa ja 4 vuoden välein niille tehdään lentotarkastukset. Suomessa kaatumisia on

kuitenkin tapahtunut, joissa sähkönjakelu keskeytyi useaksi tunniksi laajalle alueelle (Esimerkiksi Fingrid 2009). Haruskorroosio pylväillä on yleinen ongelma, eikä sitä ole välttämättä mahdollista havaita silmämääräisesti, sillä osa harusrakenteesta on upotettuna maahan. Tällöin heikentynyt harus saattaa jäädä huomaamatta pylväille suoritettavien kävelytarkastusten yhteydessä.

Normaalitilassa pylväs on täysin suorassa, mutta harusrakenteiden heikentyessä pylväs voi alkaa kallistumaan. Harusten heikentyessä tarpeeksi pylväs voi jopa kaatua. Pylväisiin asennettavalla 3D-kiihtyvyyssanturin sisältävällä sensorilla voitaisiin havaita pylvään kallistumista, joka indikoisi pylvään harusten heikentymisestä. Asennettavien sensorien määrän optimoimiseksi niitä tulisi asentaa ensisijaisesti kulmapylväisiin, sillä niillä kaatumisriski on suurin. Sensorit on syytä asentaa kävelytarkastuksen yhteydessä ja sensorin kiinnitys on oltava jälleen mahdollisimman yksinkertaista. Teräspylväisiin sensorin kiinnitys tulisi toteuttaa esimerkiksi ruuveilla, jotta sensori ei liikkuisi itsestään ympäristön vaikutuksesta eikä sitä olisi helppoa varastaa. Sensorilla on oltava sisäinen virtalähde, koska sitä ei ole mahdollista kytkeä sähköverkkoon. Sensorin käyttöajan on oltava vähintään pylväiden kävelytarkastusvälin verran, eli 4 vuotta. Lähestysväliksi riittäisi yksi viesti päivässä, jos sensori aktivoituu automaattisesti selkeän kallistuskulman muutoksen myötä, mikä parantaa akun kestoä. Sensori on toisaalta täysin sään armoilla, jolloin akun on kestävä kovia pakkasia ja kuumuutta, mikä voi heikentää akun kestoä.

6.3 Yhteenveto sensoroitavista komponenteista

Vertaillessa komponenttien vaatimuksia huomataan, että jokaiselle komponentille tulee määrittellä omat sensoriratkaisut. Useilla komponenteilla ympäristöolosuhteita halutaan mitata, mutta komponentin kunnonseurantaa varten tarvitaan kyseiseen tapaukseen sopivia antureita.

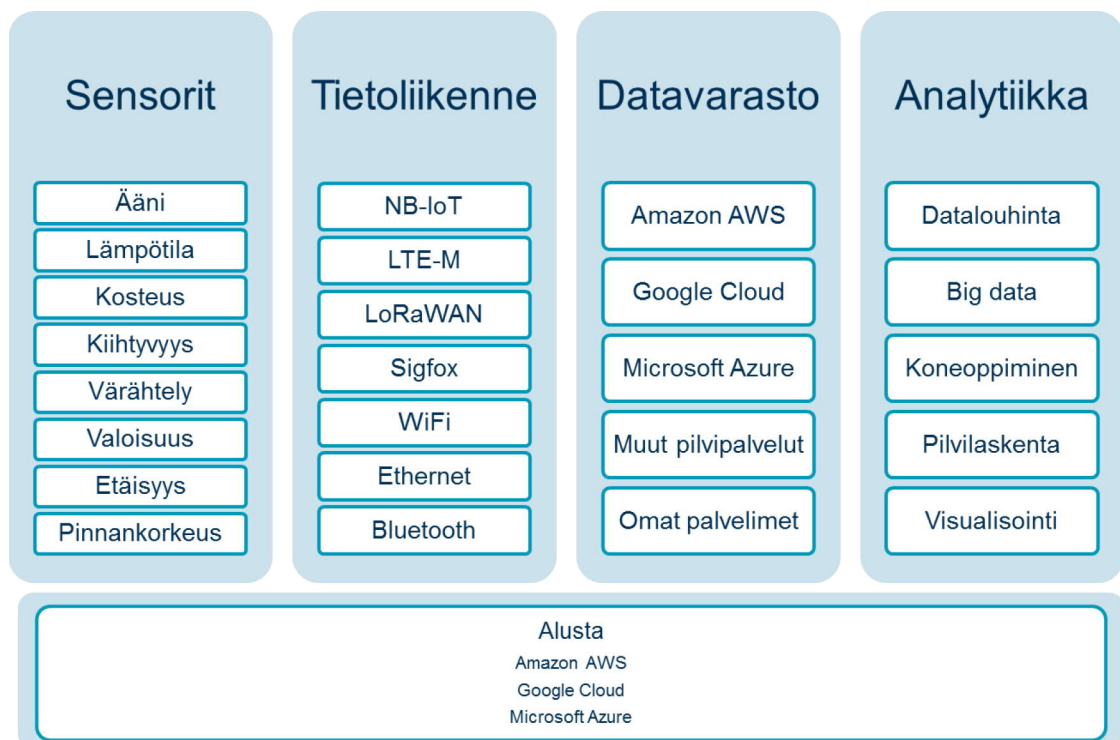
Komponenttien vikaantumisten vaikutukset ovat myös erilaisia. Esimerkiksi reaktoreiden vikaantumiset eivät johda sähkökatkoihin, kun taas puistomuuntamon vikaantuminen voi aiheuttaa hetkellisen vianrajaukseen kuluvan ajan pituisen sähkökatkon koko keskijännitejohtolähdöllä ja viankorjausajan kestäväen keskeytyksen vikaantumisalueen muuntamoiden syöttämille asiakkaille.

Kannattavuustarkastelut ja asennettavien sensoreiden määrittely tulee siis tehdä komponenttikohtaisesti. Työn laajuuden rajoittamiseksi tämän työn loppuosassa keskitytään puistomuuntamoiden sensorointiin, sillä niiden määrät ja merkitys verkon toiminnan kannalta tulevat maakaapeloinnin yhteydessä kasvamaan.

7. EHDOTUS PUISTOMUUNTAMOIDEN SENSO-ROINNISTA

Tässä luvussa määritettävät vaatimukset sensoreille määritetään vain puistomuuntamoiden tarpeiden mukaan. Samoja periaatteita voidaan kuitenkin soveltaa muiden komponenttien sensorointia pohdittaessa.

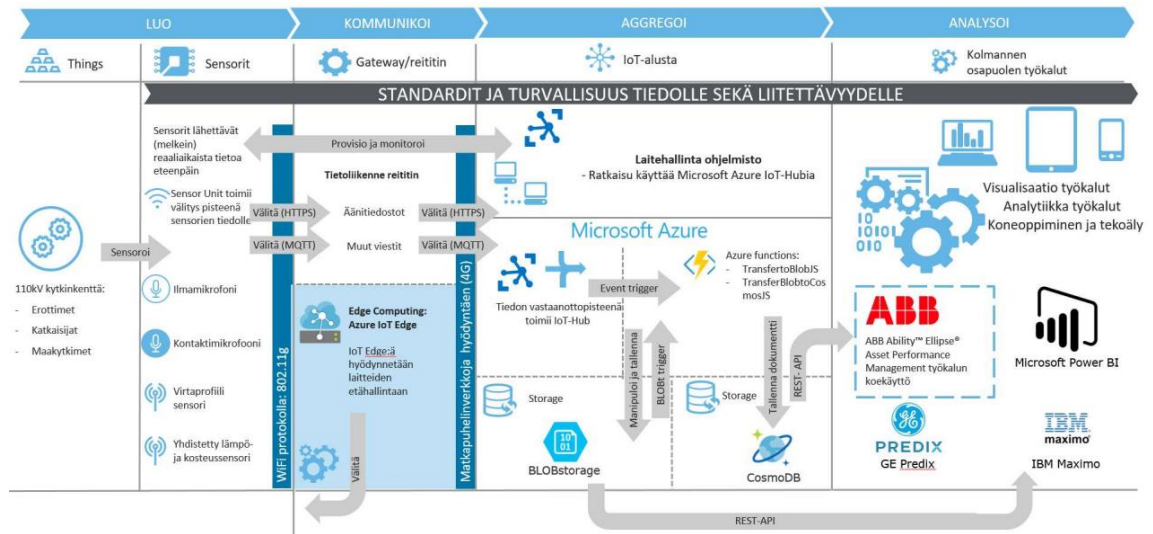
Sensorointijärjestelmän rakenteelle on hyvin monta mahdollista vaihtoehtoa. Järjestelmä voi sisältää hyvin monta eri teknologiaa, kuten kuvassa 11 on kuvattu. Ensivaiheen sensorointijärjestelmä tulee muodostua Collinin ja Saarelaisen (2016) esittämän teknologia-pinon neljästä ensimmäisestä tasosta. Viides ja kuudes taso kannattaa ottaa käyttöön vasta myöhemmin, sillä ne monimutkaistavat käyttöönottoa ja vaativat merkittäviä panostuksia ohjelmistokehitykseen, mikä nostaa kokonaisinvestoinnin suuruutta.



Kuva 13. Mahdollisia teknologioita sensorointijärjestelmässä (Muokattu Collin, Saarelainen 2016)

Luvussa 4.3 käsiteltiin Fingridin IoT-ratkaisua kytkinlaitteiden kunnonseurantaan. Daniel Kuosa esitteli Fingridin sensorointijärjestelmää Fingridin järjestämässä neuvottelukunnan kokouksessa, minkä järjestelmäkaavio esitetty kuvassa 12. Järjestelmäkaaviossa on lisäksi kuvattu Raynorin ja Cotteleerin esittämä tiedon arvoketjun neljä ensimmäistä vaihetta ja mitkä teknologiat liittyvät kuhunkin ketjun vaiheeseen. Kaaviossa on lisäksi tarkemmin avattu tiedon kulkureittiä ja käytettäviä ratkaisuita eri osissa. Huomio kaaviossa

kannattaa kiinnittää IoT-alustan käyttöön, jolla sensoreilta tuleva tieto vastaanotetaan ja siirretään datavarastoon jatkokäsittelyä varten. IoT-laitteiden hallinnassakin käytetään samaa alustaa, joten alustalla on suuri rooli järjestelmän toiminnan kannalta. (Kuosa 2018)



Kuva 14. Järjestelmäkaavio Fingridin sensorintijärjestelmästä (Kuosa 2018)

Fingridin järjestelmä on hyvin looginen ja melko yksinkertainen rakenteeltaan ja siinä on huomioitu tiedon arvoketju. Yksinkertainen rakenne takaa, että järjestelmä on helppo hallita, mikä on sensoroinnin määrän kasvaessa hyvin tärkeää. Fingridin järjestelmän rakenne on yksi hyvä esimerkki mahdollisista järjestelmäratkaisuista. Seuraavaksi esitettävä sensorintijärjestelmän rakenteen ehdotus vastaakin hyvin pitkälti Fingridin järjestelmän rakennetta.

Sensorijärjestelmä rakentuu IoT-alustan tarjoamalle perustalle. IoT-alustan toimittajalla ei ole suurta merkitystä, kunhan alustan toimittaja on luotettava toimija ja alustalla on vahva kolmansien osapuolien tuki. Alkuvaiheessa alusta vastaa laitehallinnasta, sensorien viestien käsittelystä ja datan varastoinnista. Analytiikassa voidaan käyttää pilvipalvelun valmiita palveluita tai käyttää valmiita analytiikkatyökaluja.

Sensorintijärjestelmän rakenteen muodostaminen kannattaa aloittaa alustan valinnalla, sillä se tulee vähintään osittain vaikuttamaan kaikkiin teknologiapinon tasoihin. IoT-alustoja on kehitetty paljon, mutta yhteensopivuuksien ja saatavilla olevien palvelujen ja tuen kannalta suurimpien toimijoiden alustoja kannattaa suosia. Suuret toimijat kehittävät palveluitaan jatkuvasti suurin investoinnein ja esimerkiksi Amazonin AWS -pilvipalvelun valikoimiin kuuluu pelkän IoT-alustan lisäksi hyvin monta muuta palvelua, kuten valmiit datavarasto- ja data-analytiikkapalvelut sekä IoT-laitehallinta. Samassa pilvipalvelussa toimivia muita palveluita kannattaa suosia, sillä ne ovat usein jo valmiiksi integroitu pilvipalvelun toimittajan toimesta toisiinsa. Tämä helpottaa järjestelmän käyttöönottoa huomattavasti, kun kaikkia sen osia ei tarvitse yhdistää erikseen.

Alustan tarjoaman tuen lisäksi pilvipalveluissa toimivat datavarastot ovat nykyään kustannuksiltaan yleisestikin paljon edullisempia verrattuna perinteisiin omiin palvelimiin, sillä omaa kehitystyötä ei tarvitse tehdä, käyttöönotto on huomattavasti nopeampaa ja skaalautuvuus paljon parempaa. Data-analytiikan tarve vaihtelee käyttötapausten mukaisesti, mutta alkuvaiheessa pelkkä sensoreilta kerätyn datan visualisointi on varmasti riittävää. Analytiikkaa ei tarvitse kuitenkaan välttämättä toteuttaa pilvipalvelussa, vaan siihen voidaan hyödyntää muita järjestelmiä, jos niitä on käytettävissä.

Käytettävien sensoreiden valinnassa tulee huomioida sensorien toiminnallisuudet ja hinta. Toiminnallisuudet pitää optimoida tarpeiden mukaisiksi, sillä jokainen käyttämätön toiminnallisuus sensoreissa tarkoittaa ylimääräisiä kustannuksia. Tämän takia on tärkeää määrittää tarkat vaatimukset sensoreiden ominaisuuksille, jotta sopivia sensoreita voidaan hankkia kustannustehokkaasti. Toiminnallisuuksia valittaessa on huomioitava, että alkuvaiheessa kerättävä tieto ei välttämättä ole heti arvokasta, vaan sitä on kerättävä pidemmän ajan. Esimerkiksi ympäristöolosuhteiden seurannalla ei voida saavuttaa merkittävää hyötyä nopeasti, mutta pidemmällä aikavälillä kerättyä tietoa olosuhteista voidaan hyödyntää kuntoarvioissa.

Edellisen luvun perusteella sensoreille on eri tyyppisiä vaatimuksia riippuen asennuskohteesta. Yhteisinä vaatimuksina lähes kaikissa tapauksissa on helppo asennettavuus, kohdalaisen pitkä käyttöaika ja toimivuus sään ääriolosuhteissa. Kuitenkin anturoinnin määrä, mittausten tarkkuus, tiedon määrä ja monet muut tekijät eri komponenttien tarpeissa tarkoittaa, että jokaiselle komponentille tulee määritellä omat sensoriratkaisut.

Sensorin kustannusten minimoimiseksi sen asennettavuuden on oltava mahdollisimman yksinkertaista ja nopeaa, sillä asennuskustannukset voivat olla hyvin merkittävä osa sensorin kulurakenteesta. Laitteen konfigurointi, asennus ja dokumentointi pitää olla hyvin virtaviivaista. Idealisessa tapauksessa sensori ei vaatisi erillistä konfigurointia asennuksen yhteydessä ja dokumentoinnissa riittää pelkän sensorin sarjanumeron kirjaaminen sopivaa menetelmää käyttäen. Nämä asiat vaativat, että sensorit ovat valmiiksi konfiguroituja toimittajan toimesta ja dokumentaation tiedot siirtyvät eri järjestelmiin automaattisesti.

Puistomuuntamon sisällä on erilaisia laitteistoja ja sen rakenne vaikeuttaa mittausten keräämistä ja lähettämistä yhdellä ainoalla sensorilla, koska muuntamon rakenne koostuu usein kolmesta eri lohkoista, kun muuntamon keskijännitelaitteisto, muuntaja ja pienjännitelaitteisto on eroteltu toisistaan. Lisäksi liitteessä A esitetyn puistomuuntamon vikaapuun mukaan mahdollisia vikatyyppejä on useita hyvin erilaisia. Tämän takia yhteen puistomuuntamoon on asennettava useampia sensoreita. Ensimmäisessä vaiheessa kannattaakin ensin valita kaikista potentiaalisimmat ilmiöt tai kohteet, joita tulisi mitata, jotta kustannukset pysyisivät maltillisina. Esimerkiksi tiettyjen ongelmallisiksi tunnistettujen laitetyyppien sensorointi tarjoaisi paljon tarkempaa tietoa niissä tapahtuvista ilmiöistä,

mikä puolestaan tukisi ongelmien syiden tunnistamista ja niiden ratkaisemista, jolloin sensoroinnista saataisiin todennettavaa lisäarvoa.

Puistomuuntamoiden erottimien tai muuntamorakennuksen sensorointi ei ole alkuvaiheessa kovin kannattavaa, sillä niiden vikaantumiset eivät usein aiheuta sähkönjakelun keskeytystä, vaan heikentävät turvallisuutta tai käyttövarmuutta ohjautuvuuden puuttuessa. Sensorien asennus kannattaa siis aloittaa muuntajista ja kaapelipäätteistä.

Elenialla on todettu tietyn tyyppisillä muuntamoilla tapahtuvan tavanomaista enemmän osittaispurkauksia viime vuosien ajan. Tarkemmissa tutkimuksissa ympäristöolosuhteilla on todettu olevan vaikutus purkausten syntyyn. Osittaispurkaukset voivat kuvan 10 mukaisesti pitää selvästi muusta ympäristöstä poikkeavaa korvinkin selvästi kuultavaa ääntä. Tunnistettuihin kohteisiin voitaisiin asentaa ääntä ja ympäristön olosuhteita mittaavia sensoreita ja osittaispurkausten tapauksessa äänianalyysi ei tarvitsisi olla monimutkaista, vaan pelkän tietyn taajuusalueen äänenvoimakkuuden seuranta riittäisi osittaispurkausten tunnistamiseen, kuten kuvassa 12 voidaan havaita. Lämpötilan ja kosteuden seurannalla saataisiin lisäksi paremmin selville, miten ympäristöolosuhteet vaikuttavat purkausten syntyyn. Mittaus- ja lähetystiheydeksi riittäisi muutama kerta päivässä, jolloin akkukesto sensorilla voidaan pitää pitkänä vähäisen virrankulutuksen vuoksi. Vaatimusten mukaista sensoria ei kuitenkaan löytynyt valmiiksi saatavana markkinoilta, mutta kilpailuprojektina vastaavan tapaisia sovelluksia on tehty (Neves 2017). Hypoteettisen sensorin sisältämä elektroniikka on yksinkertaista ja yleisyyden takia halpaa, joten yksittäisen sensorin tavoitehinnaksi voidaan arvioida 100-150 € kappaleelta. Jos sensori pitäisi kuitenkin kehittää tätä tarkoitusta varten erikseen, tavoitehinnan saavuttamiseksi käyttökohteita pitäisi olla huomattava määrä.

Kaapelipäätteiden lisäksi muuntajan kunnan seuranta tarjoaisi huomattavasti uutta tietoa niiden toiminnasta. Liitteessä A esitetyn muuntajan vikapuun perusteella muuntajan lämpötilan ja värähtelyn seuranta olisivat kiinnostavimmat ilmiöt, koska sensoreilla on alhaiset kustannukset ja ne kuvaisivat useita eri vikaantumismekanismeja muuntajissa. Muuntajan värähtelyn ja lämpötilan mittauksia pitää päivän aikana tehdä useammin, koska ilmiöt ovat enemmän riippuvaisia verkon kuormituksesta ja ympäristöolosuhteista. Tämä asettaa akunkestolle omat haasteensa, mutta myöhemmin mittaustaajuutta voidaan paremmin optimoida paremman ymmärryksen myötä. Värähtely- ja lämpötila-antureiden asentaminen muuntajaan tulee toteuttaa jännitetyönä, jotta asennuskustannukset eivät kasva kohtuuttomasti. Värähtely- ja lämpötilaseuranta ovat hyvin yleinen teollisen internetin sovellus, joten markkinoilta löytyy jo valmiita ratkaisuita, joiden hinnat vaihtelevat noin 100-300 euron välillä. Esimerkiksi 150 € hintaiselle sensorille luvataan jopa 10 vuoden akunkesto 12 minuutin mittaustaajuudella kahdella AA-paristolla, mikä soveltuisi hyvin tähän käyttötapaukseen (NCD 2019).

Sensoreiden asentaminen tulee tapahtua tarkastus- tai huoltokäynnin yhteydessä. Asennettavat sensorit toimitetaan etukäteen urakoitsijalle, joka suorittaa asennukset ja dokumentaation sovituille kohteille. Dokumentaatioksi pitäisi riittää sensorin ja asennuskohteen tunnistenumerot, jotka lisätään pilvipalvelun laitehallintaan suoraan tai mahdollisten integraatioiden kautta, jos dokumentaatioon käytetään olemassa olevia työkaluja.

Tietoliikenneteknologiana tulee käyttää LPWAN-teknologioita, kuten NB-IoT, Sigfox tai LoRaWAN, niiden kantaman ja alhaisen virrankulutuksen takia. Teknologioilla on pieniä eroavaisuuksia, mutta jokainen soveltuu teknisiltä ominaisuuksiltaan puistomuuntamo on asennettavien sensorien teknologiaksi. NB-IoT:lla on kuitenkin laajin kuuluvuus tällä hetkellä Suomessa haja-asutusalueilla, joten tässä vaiheessa se olisi paras valinta kommunikointiin, sillä se perustuu olemassa olevaan 4G-standardiin (Telia Oyj 2019b).

Sensorin tulee kommunikoida valitun IoT-alustan kanssa, joka välittää sensorilta kerätyn datan valitussa pilvipalvelussa toimivaan datavarastoon. Data-analytiikkaan voidaan käyttää pilvipalvelun omia tai muita analytiikkatyökaluja. Datan visualisointi ja muutosten havainnointi ovat ensisijaisia työkaluja, sillä ne ovat yksinkertaisia toteuttaa ja niiden perusteella voidaan sensoroinnin toimivuutta arvioida. Koneoppimista ja muita työkaluja voidaan hyödyntää vasta, kun dataa on kerätty enemmän ja ymmärrys kerätystä datasta on parempi.

8. SENSOROINNIN KANNATTAVUUS

Tässä luvussa esitetään puistomuuntamoiden sensoroinnin kannattavuuslaskelma. Laskelmaa varten kuvataan ensin, mistä sensoroinnin kustannukset koostuvat ja miten niihin voidaan vaikuttaa ja mitä lisäarvoa sillä voidaan saavuttaa ja mitä haasteita kannattavuuslaskelman muodostamisessa on. Kannattavuuslaskelma perustuu vikaantumisista syntyvän keskeytyksistä aiheutuvan haitan kustannuksissa saataviin säästöihin, sillä muuta sensoroinnilla saatavaa lisäarvoa on vaikeampi arvioida luotettavasti. Luvun lopussa esitellään tuloksia IoT-sensoripilotista, joka toteutettiin Elenialla.

8.1 Kustannukset

Sensorijärjestelmän kustannukset koostuvat sensoreista, tietoliikenteestä, datavarastosta, data-analytiikasta, laitehallinnasta ja kehityskuluista. Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi, mistä kustannukset koostuvat ja miten niihin voidaan vaikuttaa.

8.1.1 Sensorit

Sensorin hintaan vaikuttaa sen sisältämät anturit, tietoliikennekyvykkyudet, kotelointi, virtalähde ja suunnittelu- ja valmistuskulut. Sensorien kustannukset voivat vaihdella kymmenistä euroista tuhansiin euroihin riippuen sensorien toiminnallisuuksista. Sensorin yksikkökustannukset ovat riippuvaisia niiden tilausmääristä, jolloin sensoreita ei kannata hankkia vain yksittäiskappaleina. Sensoreiden määrä kannattaa sensorijärjestelmän toimivuuden kannalta olla suuri, jotta dataa saadaan kerättyä tarpeeksi hyötyjen saavuttamiseksi, joten soveltuvien käyttötapauksen riittävä määrä on varmistettava.

Yksinkertaisten antureiden, kuten lämpötila-anturin, yksikköhinta voi olla yhden euron luokkaa, kun taas kehittyneempien anturien, kuten kaasuanalysaattorin, hinnat voivat olla useita satoja euroja. Sensoriin liitettävien anturien määrittäminen tarpeiden mukaan on siis hyvin tärkeä vaihe kustannusten optimoinnissa.

IoT-sensoreilla on paljon erilaisia tietoliikennevaihtoehtoja, joita se voi tukea. Tuetut tietoliikenneprotokollat vaikuttavat sensorin hintaan, sillä eri protokollien tukeminen vaatii usein erillisiä piirejä ja se voi vaikuttaa myös antennisuunnitteluun häiriöiden minimoimiseksi, mikä monimutkaistaa sensorin kehitystä. Käytettävien tietoliikenneprotokollien valinta vaikuttaa siis suoraan sensorin hintaan.

Useat sensorit tulevat olemaan ulkotiloissa sään armoilla, jolloin sensorin koteloinnin on varmistettava, että lumi- tai vesisade tai pöly ei riko laitetta. Koteloinnin IP-luokituksen on oltava siis monessa tapauksessa vähintään IP64-luokkaa. Erityistilanteissa, kuten rä-

jähdysaltiliissa tiloissa, koteloinnilta voidaan vaatia vielä erityisiä suojauksia, mitkä lisäävät sensorin kustannuksia. Kotelointivaatimukset tulee määritellä tarkasti, jotta koteloinnin kustannukset voidaan minimoida. Puistomuuntamoiden tapauksessa sensorit voidaan asentaa sisätiloihin muuntamorakennukseen, joka suojaa sensoria suoralta vesisateelta. Sensorin koteloinnin on silti suojattava sensoria kosteudelta.

Sensori tarvitsee toimivan ja luotettavan virtalähteen mahdollisimman edullisesti. Tavallisesti virtalähde voidaan toteuttaa joko paristoilla, akuilla tai ulkoisella virransyötöllä. Tavallisesta poikkeavia ratkaisuita voi olla esimerkiksi aurinkopaneelit tai energian keruu. Sähköverkkokomponentteihin asennettaessa sähköä on usein saatavilla hyvinkin helposti, mutta ulkoisen virtalähteen toteutus jälkiasennuksena ei ole kustannustehokasta. Laitteen sisäinen paristo tai akku mahdollistaa helpon asennettavuuden, mutta rajoittaa laitteen käyttöikä. Käyttöikä voidaan toki pyrkiä pidentämään sensorin virrankulutusta optimoimalla, mutta todella pitkiä toiminta-aikoja paristoilla ei voida saavuttaa. Akkukäyttöisten laitteiden käyttöikä voidaan pidentää hyödyntämällä lisäenergianlähteitä, kuten aurinkopaneeleita tai muuta energiankeruuta. IoT-sensorit ovat pienivirtaisia laitteita, jolloin energiankeruun kehittyessä tulevaisuudessa se voisi toimia jopa ainoana tarvittavana energianlähteenä sensoreille.

Sensoreiden yksikköhinnat kasvavat huomattavasti, jos ne pitää kehittää ja valmistaa pelkästään omaan käyttöön. Tällöin valmistus-, tutkimus- ja kehityskulut jakautuvat laitteille suoraan niiden määrän suhteessa. Tuotekehitys vaatii ohjelmistokehityksen tapaan mittavia panostuksia, mikä nostaa koko sensorointijärjestelmän kiinteitä kuluja. Tämän takia valmiit ja kaupallisesti saatavat ratkaisut ovat huomattavasti kiinnostavampia, koska muiden yritysten käyttötarkoituksiin sopivien laitteiden valmistusmäärät ovat suurempia. Valmiissa ratkaisuissa ei kuitenkaan välttämättä löydy omiin tarpeisiin juuri sopivaa laitetta, jolloin pitää joustaa omissa vaatimuksissa.

Sopivien sensorivalmistajien kanssa tehtävän yhteistyön avulla voidaan saada omiin tarpeisiin paremmin sopivia laitteita. Yhteistyön avulla valmistaja saa parempaa tietoa sähköverkkoalan tarpeista ja voi kehittää alalle sopivampia laitteita. Vaikeammassa tapauksissa, kuten äänivalvonnassa, yhteiset tutkimus- ja kehityshankkeet sensorivalmistajien kanssa on varmasti tarpeen, jotta toimivat ratkaisut saadaan kehitettyä. Tämän takia laaja yhteistyö tai kumppanuus sensorivalmistajien kanssa on tarpeellista, kun sensoriratkaisuita pitää kehittää omia tarkoituksia varten.

Sensorien asennus tulee hoitaa mahdollisimman kustannustehokkaasti, joten se kannattaa toteuttaa esimerkiksi muuntamon tarkastuskäynnin yhteydessä. Tällöin sensorien asennus on vain lisätyö, eikä asennuskustannuksiin sisälly ollenkaan matkakuluja. Sensoreiden asennettavuuden ollessa helppo tarvittavan lisätyön määrän ei pitäisi olla suuri. Lisäksi dokumentointi, eli asennetun sensorin ja asennuskohteen välinen linkitys, pitää ottaa huomioon työkuiluissa. Asennuskustannus per sensori riippuu täysin asennukseen kuluva ajasta, tuntihinnasta ja asennettavien sensorien määrästä kohteessa. Yksinkertaisissa

asennuksissa asennuksen kustannukset muun työn ohessa pitäisi olla 10 € luokkaa, kun taas monimutkaisemmissa asennuksissa työ voi maksaa 50 €, jos asennus vaatii huomattavan määrän työaikaa tai on muuten hankala toteuttaa.

8.1.2 Tietoliikenne

IoT-sensoreiden tietoliikenne voidaan toteuttaa monilla eri keinoilla. Kuvassa 13 on esitetty osa mahdollisista tietoliikenneprotokollista, joita sensoreissa voidaan käyttää. Protokollat eroavat toisistaan muun muassa kantaman, tiedonsiirtonopeuden ja virrankulutuksen perusteella. Esimerkiksi WiFi mahdollistaa nopean tiedonsiirron, mutta sen kantama on heikko ja virrankulutus suuri verrattuna esimerkiksi pitkiä viestintäetäisyyksiä varten suunniteltuihin protokolleihin. Ne on suunniteltu niin, että sensorin virrankulutus tiedonsiirrossa olisi mahdollisimman pieni ja kantama mahdollisimman laaja, mikä vähentää tarvittavien tukiasemien määrää. Nämä ominaisuudet taas rajoittavat tiedonsiirtonopeutta, jolloin isoja datamääriä sensorilta ei voida lähettää nopeasti käyttäen kyseisiä protokollia. Tiedonsiirtonopeudet ovat silti hyvin riittäviä sensoreilta kerättävien pienten datamäärien siirtoon.

Tietoliikennevalinta vaikuttaa sekä sensorien hintaan että varsinaisiin tietoliikenteen kustannuksiin. Sensorin yleiseksi käyttöikävoitteeksi voidaan asettaa vähintään 5 vuotta ja tietoliikennelaskutus on usein kuukausittaista, jolloin tietoliikennekustannuksilla on sensorin elinkaaren kustannuksissa merkittävä vaikutus. Jokainen sensoriin asennettu tietoliikennepiiri maksaa eikä useiden tietoliikennepiirien asentaminen välttämättä ole mahdollista taajuusalueiden eroavaisuuksien ja niiden tarvitsemien antenniratkaisuiden takia, jolloin yhteen sensoriin on usein valittava vain yksi tietoliikenneprotokolla käyttöön. Eri sensoreilla voi kuitenkin olla käytössä eri tietoliikenneteknologioita tarpeiden mukaisesti, kunhan sensorointijärjestelmässä tämä mahdollisuus on huomioitu.

Sensori tarvitsee siis oman tietoliikenneliittymänsä, ellei verkkoyhtiö hyödynnä omaa tietoliikenneverkkoaan. Siirrettävän datan määrä on IoT-sensoreilla pientä, muutamista kilobiteistä muutama megabiteihin päivässä, jolloin liittymämaksut ovat odotettavasti selvästi pienempiä kuin tavallinen mobiili-internetliittymä. Ainoa avoin hintatieto suomalaisilta operaattoreilta on Telian NB-IoT aloituspaketin hinta, jonka perusteella yksittäisen liittymän kuukausittainen maksu olisi 1,5 euroa (Telia Oyj 2019a). Tietoliikenneliittymien hinnat ovat varmasti laajemmassa käytössä alhaisemmat, jolloin selvästi alle euron kuukausimaksu liittymää kohti on odotettavaa. Liittymien hinnat tulevat todennäköisesti myös laskemaan ajan myötä entisestään.

8.1.3 Datavarasto, analytiikka ja laitehallinta

Datavarastointi-, analytiikka- ja laitehallintaratkaisukokonaisuudeksi sopii ehdottomasti parhaiten IoT-alusta. Suosituimmat pilvipohjaiset alustat ovat hyvin pitkälle kehitettyjä ja laajasti tuettuja palveluita, jolloin omaa ohjelmistokehitystä ei tarvitse tehdä. Tämä

vähentää huomattavasti sensorointijärjestelmän kiinteitä kustannuksia, sillä alustapalveluiden laskutus perustuu pelkästään käytön määrään. Amazonin AWS IoT Core -alustan esimerkkikustannuslaskelmassa alustan kuukausittainen maksu on noin 190 dollaria 10000 laitteelle, jotka kommunikoivat alustan kanssa noin 5 minuutin välein ja suorittavat erilaisia toimintoja alustassa. (Amazon Web Services 2019b) Datavarastointi ja yksinkertainen data-analytiikka Amazonin palvelussa maksaa noin 35 dollaria kuussa 10 000 laitteelle, jos jokainen laite lähettäisi 1 kilotavun viestejä noin 5 min välein varastoitavaksi ja analysoitavaksi (Amazon Web Services 2019a). Laittehallinnan kustannukset 10 000 laitteelle ovat Amazonin esimerkkilaskelmissa 17 dollaria kuukaudessa. (Amazon Web Services 2019c)

Pilvipalveluiden hinnoittelu perustuu pelkästään palveluiden käytön määrään eli se riippuu pääasiassa sensorien ja datan määrästä ja niiden laadusta. Amazonin esimerkkilaskelmien perusteella yksinkertaisen 10000 laitteen järjestelmän kuukausittainen maksu olisi selvästi alle 1000 euroa, jolloin laitekohtaiseksi hinnaksi tulisi reilusti alle 10 senttiä kuukaudessa. Lämpötilatietojen kerääminen ei vaadi paljoa tallennustilaa, kun taas yhden äänitiedoston tallennus voi vastata tuhansia lämpötilatietoja järjestelmässä, jolloin kuukausihinta voi vaihdella käytettävien sensorien mukaan, mutta niiden osuus sensoroinnin hinnasta on kuitenkin muita kustannuskomponentteja selvästi pienempi.

Alustaa käytettäessä kustannukset eivät siis ole kymmenien tuhansien laitteidenkaan kanssa suuria. Pitää kuitenkin huomioida, että esimerkiksi äänisignaalin ja lämpötilatiedon välisen datamäärän ero voi vaikuttaa hyvin paljon kokonaiskustannuksiin. Yhteen kilotavuun voidaan sisällyttää useita lämpötilalukemia, mutta äänisignaali voi sisältää kymmeniä kilotavuja dataa per sekunti. Kustannusten optimointi on mahdollista erityisesti viestitystiheyttä ja datamääriä optimoimalla järkeviä viestintäprotokollia ja muita tekniikoita hyödyntäen, mihin tässä työssä ei perehdytä tarkemmin. Yksinkertaisissa tapauksissa järjestelmän vuotuiset kustannukset olisivat kuitenkin vain muutamia tuhansia euroja, jolloin optimoinnin vaikutukset eivät olisi kovin merkittäviä.

Kokonaan oman järjestelmän kehittämisessä puhuttaisiin helposti jopa sadoista tuhansista euroista, jolloin valmiit IoT-alustat ovat ilmiselvä valinta. IoT-alustojen modulaarisuus ja laaja tuki mahdollistaa helpon laajennettavuuden, kun alustan perustoiminnallisuudet eivät enää riitä. Tällöin voidaan ottaa käyttöön Amazonin muita palveluita tai kehittää omia analytiikkapalveluita ja suorittaa niitä pilvipalvelussa. Koneoppimiseen tai muihin monimutkaisempiin analytiikkakeinoihin perustuvia palveluita ei kuitenkaan ensivaiheessa kannata kehitellä, sillä niiden käyttö vaatii paljon dataa ja kehitystyötä.

Järjestelmään sitoutuu lisäksi yhtiön resursseja, kun järjestelmää otetaan käyttöön ja ylläpidetään. Sähköverkkoyhtiöillä on käytössä tällä hetkellä verkkotieto-, asiakastieto- ja muita järjestelmiä, jolloin monimutkaisten järjestelmien hallinta ei pitäisi olla uutta organisaatioille. Käyttöönottovaiheessa resurssitarve on suurempi ja ulkoisille konsulttipalve-

luille voi ilmentyä tarpeita, mutta kustannusten pitäisi silti pysyä maltillisina. Kustannusten tarkka arviointi tämän työn yhteydessä ei onnistu, mutta resurssitarve on kuitenkin määriteltävä käyttöönottoprojektin alkuvaiheessa, jolloin tarkat resurssikustannukset on mahdollista määritellä.

Tuomas Luukko (2018) määritteli diplomityössään erilaisia vaatimuksia seuraavan sukupolven AMR-mittarijärjestelmälle. AMR-mittareiden ja mittaustiedon hallinta tulee vaatimaan tulevaisuudessa lisääntyvän mittausmäärän ja muuttuvan toimintaympäristön takia Luukon mukaan mikropalveluarkkitehtuuriin perustuvan järjestelmän, jossa järjestelmä on paloitettu pienempiin hallittaviin osioihin, mikä mahdollistaa ketterän kehittämisen vaatimusten muuttuessa. (Luukko 2018) Pilvipalvelut mahdollistavat mikropalveluarkkitehtuuriin perustuvien järjestelmien rakentamisen ja kasvavat datamäärät tukevat pilvipalveluiden käyttöönottoa AMR-mittaustiedon hallintaan niiden skaalautuvuuden takia (Solita 2019). Uuden sukupolven AMR-järjestelmän ja IoT-sensorointijärjestelmän välillä on paljon yhtäläisyyksiä, jolloin molemmat järjestelmät kannattaisi toteuttaa samaan palveluun synergiaetujen takia. Näin AMR-järjestelmän kehitystyötä olisi hyödynnettävissä IoT-järjestelmän käyttöönotossa, jolloin IoT-järjestelmään liittyvät kehityskulut olisivat huomattavasti pienemmät.

Vaihtoehtoisesti IoT-sensorointijärjestelmän voi hankkia palveluna, jolloin omat kehityskulut ovat selvästi pienemmät. Monet laiteoimittajat tarjoavat laitteidensa lisäksi mittaustietojen ja laitteiden hallintaan tarkoitettuja pilvipalveluita, mutta ne sopivat parhaiten lyhytaikaisten pilottien toteutukseen, sillä laajennetussa käytössä oleva IoT-järjestelmä tulee olla integroituneena verkkoyhtiön muihin järjestelmiin ja integraatioiden toteuttaminen organisaation ulkopuolisen toimijan järjestelmiin on huomattavasti kalliimpaa. Lisäksi toimittajaloukkuriski kasvaa, mikä voi tehdä järjestelmän kehityksestä kallista.

Järjestelmän kehitykseen ja käyttöönottoon liittyvät kehityskulut ovat pilvipalveluita hyödyntäessä huomattavasti alhaisemmat verrattuna perinteisiin tietojärjestelmien kehitykseen. Kehitys ja käyttöönotto vaatii kuitenkin myös paljon resurssipanoksia, joiden kuluja voidaan hallita hyödyntämällä organisaation sisäistä osaamista. Sähköverkkoyhtiöillä on esimerkiksi vahvaa tietoliikenne- ja tiedonhallintaosaamista, jota tulee mahdollisuuksien mukaan hyödyntää.

8.2 Säästöt ja muu lisäarvo

Sensorointi ei tarjoa suoria tuloja, vaan mahdollisia kustannussäästöjä verkkoyhtiön operatiivisissa kustannuksissa, kun sen avulla kerättyä tietoa hyödynnetään päätöksentekotilanteissa. Sensoroinnin tarjoamia mahdollisia säästöjä syntyy vikojen ennakoinnin tai indikoinnin ja kunnossapitotoimenpiteiden optimoinnin kautta. Huoltokustannukset ja keskeytyksestä aiheutunut haitta ovat huomattavasti pienempiä, kun huolto tehdään suunnitellusti, eikä kiireisenä vikatyönä. Vikapaikan indikointi voi lisäksi nopeuttaa korjausta, kun vikapaikkaa ei tarvitse erikseen etsiä.

Ennakoiva kunnossapitostrategia mahdollistaa kunnossapidon kokonaiskustannusten pienentämisen, kun se on implementoitu oikein. Se kuitenkin vaatii huomattavasti enemmän tietoa komponenttien kunnosta verrattuna reagoivaan tai ehkäisevään kunnossapitostrategiaan, mikä tekee siitä vaikeasti käyttöön otettavan ja hallittavan. Ennakoivassa kunnossapitohallinnassa komponentin kuntoa pitää seurata aktiivisesti, mikä perinteisin menetelmin on mahdotonta toteuttaa kustannustehokkaasti. Ennakoivaan kunnossapitostrategiaan siirtyminen on mahdollista toteuttaa sensorointia apuna käyttäen, mutta optimoinnin kautta saatavat säästöt realisoituvat vasta pitkällä aikavälillä, koska strategian vaatiman tietopääoman hankinta vaatii dataa usealta vuodelta ja muuta tiedon keräämistä ja käsittelyä. Tämän takia kustannusten optimoinnilla saatavia säästöjä on vaikea arvioida.

Ennakoivaan kunnossapitoon liittyy vahvasti vikojen ennakointi. Hitaasti kehittyvien vikojen havainnointi ja korjaus ennen varsinaista vikaantumista tarjoaa mahdollisuuksia huomattavaan verkkoyhtiön operatiivisten kustannusten vähentämiseen, sillä silloin sähköjakeluun ei tule välttämättä ollenkaan keskeytystä ja huoltotoimenpiteet voidaan tehdä suunnitellusti. Sensoreilla ei voida ennakoita sään tai ulkopuolisen toiminnan aiheuttamia vikaantumisia, mutta näissäkin tilanteissa vikapaikan tarkempi indikointi voi erityisesti ilmajohtoverkossa olla arvokasta, kun korjaustoimenpiteet voidaan aloittaa nopeammin. Viankorjauksen kustannukset pienenevät, kun korjaus voidaan tehdä suunnitellusti eikä kiireellisenä vikatyönä. Säästöä tulee keskeytyksistä aiheutuvan haitan (myöh. KAH) kustannuksista ja mahdollisesti työn kustannuksista, jos vikaantuminen voidaan ennakoita tarpeeksi aikaisin.

Vikaindikoinnin tai ennustamisen lisäksi sensorit voivat tarjota lisäarvoa pitkän aikavälin kunnossapitotyöhön liittymällä, minkä varsinaista arvoa on vaikea arvioida. Kunnossapitotyöt suunnitellaan pääosalle komponenteista niille suoritettujen tarkastuksien perusteella. Jokainen tarkastuskäynti muuntamalla ei kuitenkaan johda jatkotoimenpiteisiin. Tarkastuskäynneillä tarkastetaan teknisen kunnan lisäksi muuntamon turvallisuus, joten käynnit eivät ole koskaan täysin turhia. Jatkuva-aikainen kunnossapito sensorilla mahdollistaisi paremman tarkastusten kohdentamisen, jolloin tarkastuskäynnit olisivat entistä hyödyllisempiä, kun hyväkuntoisten komponenttien tarkastusvälejä pidennettäisiin ja heikkokuntoisia komponentteja tarkastettaisiin useammin. Turvallisuuden varmentamiseen voitaisiin mahdollisesti hyödyntää uusia ratkaisuita, kuten joukkoistamista, jos tarkastusvälin pidentäminen tietyillä kohteilla turvallisuuden näkökulmasta ei olisi mahdollista. Joukkoistamisella tarkoitetaan toimintaa, jossa annetaan tehtävä suoritettavaksi tai ongelma ratkaistavaksi ennalta määrittelemättömälle joukolle (Sanastokeskus 2010).

Sensoroinnilla voidaan vähentää ympäristövahinkoriskejä seuraamalla öljy- tai SF₆-kaasuvuotoja. SF₆-kaasupäästöt vastaavat 22 800 kertaisesti hiilidioksidipäästöjä, joten vuotojen estäminen tai minimointi on ilmaston lämpenemisen kannalta ehdottoman tärkeää (Climate Change Connection 2016). Sensoroinnilla voidaan myös vähentää kunnossapitotöistä aiheutuvia ympäristöpäästöjä, jos komponenttien tarkastuskäyntejä voitaisiin vähentää sensoroinnin avulla.

Lisäksi jos urakoitsijoille voidaan tarjota parempaa tietoa sensoroinnin ja data-analytiikan avulla tulevista töistä, niin ne voivat tehostaa toimintaansa entistä paremmaksi, mikä välillisesti vaikuttaisi myös verkkoyhtiön kustannuksiin. Esimerkiksi öljyaltaan vedenpinnan korkeuden seurannalla urakoitsijalle voidaan antaa tarkka tieto veden pumppaamisen tarpeesta ilman varsinaista käyntiä altaalla. Vikatilanteissa sensoreiden avulla vikaantumisen syy voi olla paremmin tiedossa etukäteen ja urakoitsija osaisi tällöin varautua paremmin viankorjaukseen, mikä nopeuttaa viankorjausta ja tehostaa urakoitsijan toimintaa.

8.3 Haasteet kannattavuuden arvioinnissa

Sensoroinnin kannattavuuden arviointi luotettavasti on todella haasteellista. Sensoroinnista ei ole aiempaa kokemusta sähköverkkoalalla eikä sillä ole selvää tulolähdettä, vaan sensoroinnin kannattavuus perustuu sen avulla muodostetun tiedon arvokkuuteen. Sensoreilla on mahdollista toteuttaa hyvin monia eri tyyppisiä ja taseisia mittausjärjestelmiä, eikä kaikkia konfiguraatioita sensorijärjestelmästä ole mahdollista arvioida.

Sensorit tarjoavat mahdollisia kustannussäästöjä kunnossapitotoiminnassa ja vikaantumisissa. Kustannussäästöjen arvioimiseksi pitää tehdä monia oletuksia, jotka ovat melko epävarmoja, mikä voi vääristää kannattavuuslaskelman tuloksia. Esimerkiksi komponentin vikaantumisten määrää tulevina vuosina ei voida arvioida tarkasti, vaan ne arvioidaan hyödyntäen historiatietoja aiemmista vikaantumisista. Verkkoa kuitenkin uusitaan tällä hetkellä paljon ikääntyvän verkon ja toimitusvarmuusinvestointien takia, jolloin verkossa olevien komponenttien keski-ikä tulee laskemaan aiemmasta ja samalla verkon rakenne muuttuu, mikä voi vaikuttaa muun muassa vikatiheyksiin komponenteilla.

Eri komponenteilla on erilaiset vikaantumisten vaikutukset ja vaatimukset sensoreille. Jokaiselle komponenttityypille pitää siis laskea kannattavuuslaskelmat erikseen, jotta laskelmissa voidaan huomioida nämä poikkeavuudet. Lisäksi kaikkea sensoroinnilla saatavaa kustannussäästöä ja erityisesti muuta lisäarvoa on hankalaa arvioida rahallisesti. Vaikutuksien ja höytyjen suuruutta ei voida määrittää etukäteen, vaan ne voidaan varmentaa vasta käytön aikana. Potentiaali lisäarvolle on hyvin suuri, mutta IoT-järjestelmän toiminta sähköverkkoympäristössä ei ole tässä vaiheessa vielä varmaa.

8.4 Sensoroinnin kannattavuuslaskelma

Tässä työssä lasketaan kannattavuuslaskelma puistomuuntamoiden sensoroinnista. Samoja laskentaperiaatteita voidaan hyödyntää muiden sähköverkon komponenttien sensoroinnin kannattavuuden laskentaan.

Puistomuuntamoiden sensoroinnin kokonaisvaikuttavuutta arvioidaan keskimääräisen sähköaseman keskijännitelähdön avulla. Tämän mallin avulla yhdessä lähdön muunta-

mossa tapahtuvan vikaantumisen vaikutusta muihin lähdön muuntamoihin voidaan arvioida paremmin. Mallissa käytettävät arvot pohjautuvat Elenian sähköverkon tietoihin, mitkä voivat erota selvästi toisten verkkoyhtiöiden tiedoista. Mallissa hyödynnetään suunniteltua vuoden 2028 verkon rakennetta, sillä verkon rakenne muuttuu mittavan kaapeloinnin takia vuosittain paljon. Verkon rakenne vuoden 2028 jälkeen ei tule todennäköisesti enää muuttumaan niin merkittävästi kuin tällä hetkellä.

Keskijännitelähdöllä tapahtuva vikaantuminen vaikuttaa myös muihin lähdöllä oleviin asiakkaisiin, sillä ennen varsinaista vikaa lähdössä tapahtuu pika- ja aikajälleenkytkennät, joilla suurin osa vikatapauksista yleensä poistuu verkosta, ellei johtolähtö ole täysin kaapeloitu, jolloin jälleenkytkentöjä ei ole käytössä. Varsinaisen vian tapauksessa lähdön kaikki asiakkaat kokevat pika- ja aikajälleenkytkennän lisäksi vianrajaamiseen kuuluvan ajan mittaisen keskeytyksen. Kaikki vikaantuneen lähdön asiakkaat kokevat arviolta vähintään noin 15 minuutin pituisen keskeytyksen ja vikaantuneen verkon alueen asiakkaat kokevat lisäksi viankorjaukseen kuuluvan ajan. Keskeytysaika voi olla myös viankorjausaikaa lyhyempi varavoimakoneita käytettäessä.

Tämän takia keskijännitelähdöllä tapahtuvan keskeytyksen aiheuttama haitta (KAH) lasketaan kaavan 1 mukaisesti, mutta laskennassa otetaan huomioon kaikkiin vianrajausalueen ulkopuolelle jäävien asiakkaiden kokema lyhempi keskeytys. Laskennassa oletetaan, että vika saadaan rajattua yhdelle taajama-alueen ja kahdelle haja-asutusalueen muuntamolle lähdössä. Tämä menetelmä antaa pessimistisemmän arvion todellisesta keskeytyksestä aiheutuvasta haitasta, sillä aivan jokaisella muuntamolla ei ole välttämättä kaukoohjattavaa erotinta, jolla vikapaikka voidaan erottaa verkosta, vaan vika-alueelle voi jäädä useampi muuntamo. Tällöin useampi asiakas kokisi pidemmän keskeytyksen, mikä nostaisi KAH-kuluja entisestään. Taajama-alueella vikaantunut muuntamo pystytään usein erottamaan verkosta muihin muuntamoihin asennettujen erottimien avulla ja verkko on rakennettu rengasmaisesti.

KAH-kustannukset huomioiden johtolähdön muiden muuntamoiden kokeman lyhyen keskeytyksen yhden muuntamon vikaantuessa arvioidaan siis mukailien kaavaa 1 alla esitetyn kaavan avulla:

$$KAH_{kok} = m \cdot P_k \cdot (h_{E,odott} \cdot t_v + h_{W,odott}) + (P_j - m \cdot P_k) \cdot (h_{E,odott} \cdot t_r + h_{W,odott}) \quad (2)$$

jossa

m = vika-alueelle jäävien muuntamoiden määrä,

P_k = vika-alueen muuntamoiden keskiteho (kW),

P_j = johtolähdön keskiteho (kW),

ja t_r = vianrajaukseen kuluva aika (h).

Muuntamoiden keskiteho Elenian verkossa määritettiin muuntamon vuosienergiasta. Yksittäisen muuntamon vuosienergia jaettiin vuoden tunneilla (8760 h) ja muuntamoiden keskitehoista otettiin vielä keskiarvo (Tienari 2018). Muuntamoiden keskitehoksi taajama-alueella saatiin 64 kW, haja-asutusalueella 12 kW ja koko verkon osalta 35 kW. Samalla menetelmällä voidaan laskea Elenian verkon johtolähtöjen keskiteho, joka on noin 870 kW.

Keskimääräisellä keskijännitelähdöllä Elenialla on tällä hetkellä noin 30 muuntamoita, joista noin puolet on tällä hetkellä puistomuuntamoita. Puistomuuntamoiden määrä tulee kuitenkin kasvamaan merkittävästi ja vuoteen 2028 mennessä arviolta noin 75% kaikista verkon muuntamoista on puistomuuntamoita, sillä puistomuuntamoita käytetään yleisesti kaapeliverkossa ja Elenian tavoitteena on saavuttaa 75% kaapelointiaste vuoteen 2028 mennessä. (Elenia 2019a)

Laskentamallin yksinkertaistamiseksi pylväsmuuntamot jätetään keskimääräisessä keskijännitelähdössä huomioimatta, sillä niihin sensorointia ei teknisistä syistä ole helppoa toteuttaa. Yhdellä keskijännitelähdöllä Elenian verkossa on vuonna 2028 siis noin 23 puistomuuntamoita. Puistomuuntamoista noin 10 sijaitsee taajama-alueella ja loput haja-asutusalueella. Tällöin laskentamallin johtolähdön keskitehoksi tulee noin 800 kW.

Alla olevassa taulukossa on esitetty laskelmia yksittäisen vian aiheuttama KAH-kustannus käyttäen kaavaa 2, kun vikapaikka on taajamassa tai haja-asutusalueella. Samassa taulukossa on esitetty KAH-kustannus, jos keskeytys tapahtuisi suunnitellusti ja keskeytysajasta vähentyisi 1 tunnin matka-aika vikapaikalle. Laskennassa laskettiin keskeytyksen kustannukset taajama- ja haja-asutusalueille erikseen riippuen vikapaikan sijainnista ja ne summattiin lopputulosten saamiseksi. Kustannuksia laskettaessa oletettiin, että taajama-alueella vika-alueelle jäi 1 muuntamo ja haja-asutusalueella vika-alueelle jäi 2 muuntamoita.

Taulukko 4. *Yhdestä puistomuuntamon vika- ja suunnitellusta keskeytyksestä aiheutuvan haitan kustannukset keskimääräisessä keskijännitelähdössä*

Vikapaikka / keskeytysaika	Vikakeskeytys	Suunniteltu keskeytys
Taajama / 2h	5 242 €	2 535 €
Taajama / 3h	6 100 €	3 066 €
Haja-asutus / 2h	3 897 €	1 937 €
Haja-asutus / 3h	4 219 €	2 037 €

Yhden keskeytyksen kustannuksista voidaan laskea vuotuinen KAH-kustannus koko johtolähdölle hyödyntäen muuntamoiden vikataajuutta. Yhden muuntamon vikaantumisen todennäköisyys on asiantuntija-arvioiden ja tilastojen mukaan 1% luokkaa vuodessa, kun sää- tai ulkopuolisten aiheuttamia vikaantumisia ei huomioida. Vikataajuuden tarkempi määrittely on hankalaa, sillä kaapelipäätteissä tapahtuvat viat voidaan dokumentoida kaapelivikana vaikka niiden havaitseminen tapahtuisi muuntamalla. Keskimääräisellä keskijännitelähdöllä tapahtuu siis noin 0,23 puistomuuntamoiden aiheuttamaa vikaa vuodessa. Vikataajuus voi kuitenkin vaihdella paljon riippuen verkon rakenteesta ja kun huomioidaan kaapelivioiksi dokumentoidut kaapelipäätteissä tapahtuneet viat.

Sensoroinnin avulla saatava säästö KAH-kustannuksissa vuodessa voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$KAH_{säästö} = \sum_{i=1}^n f_{v,i} \cdot KAH_{kok} \cdot p_s \quad (3)$$

jossa

n = muuntamoiden lukumäärä johtolähdöllä,

$f_{v,i}$ = muuntamon i vikataajuus,

ja p_s = vikaantumisen ennakoinnin todennäköisyys sensoroinnilla.

Vikaantumisen ennakoinnin todennäköisyys kuvaa sitä, kuinka suuren osan kaikista muuntamoilla tapahtuvista vikaantumisista sensoroinnilla voidaan havaita ennen varsinaista varsinaista keskeytystä. Todennäköisyyttä on vaikea arvioida tarkasti, mutta oletettavasti kaikkia vikaantumisia ei ainakaan alkuvaiheessa voida ennakoida. Ennakoida vian ennen varsinaista vikaa voidaan säästää KAH-kustannukset kokonaan, jos ongelman korjaaminen ei vaadi erillistä keskeytystä. Säästö on noin puolet varsinaisen vian KAH-kustannuksista taulukossa 1 esitettyjen arvojen perusteella. Lisäksi keskeytysaikaan ei kuulu suunnitelluissa töissä matka-aikaa vikapaikalle.

Yhden paristo- tai akkukäyttöisen langattoman sensorin pitoajaksi puistomuuntamalla määritettiin 6 vuodeksi luvussa 7. Kuuden vuoden tarkastelujakson aikana johtolähdöllä tapahtuu yhteensä noin 1,38 vikaa 1 % vikataajuudella. KAH-kustannus kuuden vuoden kuluttua voidaan laskea kaavaa 6 hyödyntäen ja laskemalla vuotuisten säästöjen nettonykyarvo valitulla korkokannalla, joka on tässä työssä 3%. Jakamalla nettonykyarvoinen KAH-kustannus sensoroitujen kohteiden lukumäärällä saadaan yhden kohteen keskimääräinen säästö, jota voidaan samalla pitää sopivana tavoitehintana sensoroinnille.

Seuraavassa taulukossa on esitetty vuotuinen KAH-säästö, kuuden vuoden KAH-säästön nettonykyarvo ja yksittäisen kohteen sensoroinnin keskimääräinen säästö, jos vika voidaan korjata ilman keskeytystä. KAH-kustannukset säästyvät kokonaisuudessaan, jos

vikaantumisen aiheuttama keskeytys voidaan estää sensoroinnin avulla. Seuraavat tulokset on laskettu 2 tunnin vikakeskeytykselle eri vikaantumisen todennäköisyyksillä ja 1% vikatiheydellä hyödyntäen kaavaa 3. Laskennassa oletetaan, että vikaantumiset jakautuvat tasaisesti taajama- ja haja-asutusalueiden muuntamoiden suhteessa eli taajamissa tapahtuu 0,1 ja haja-asutusalueella 0,13 vikaa vuodessa. KAH-säästöt lasketaan molemmille alueille erikseen ja taulukossa esitetään niiden summa.

Taulukko 5. *KAH-säästö ja sensorin keskimääräinen säästö eri vikaantumisen ennakoinnin todennäköisyyksillä, kun vika korjataan ilman keskeytystä*

Vikaantumisen ennakoinnin todennäköisyys	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %
KAH-säästö (1 a)	103 €	206 €	309 €	412 €	515 €	618 €
KAH-säästö (6 a)	618 €	1 237 €	1 855 €	2 474 €	3 092 €	3 711 €
KAH-säästön nettonykyarvo (6 a)	558 €	1 117 €	1 675 €	2 233 €	2 792 €	3 350 €
Keskimääräinen sensoroinnin säästö	24 €	49 €	73 €	97 €	121 €	146 €

Seuraavassa taulukossa on esitetty tulokset KAH-kustannuksista ja sensoroinnin keskimääräisestä KAH-kustannuksesta, kun havaitun vian korjaus vaatii suunnitellun keskeytyksen. Tässä tapauksessa KAH-kustannuksilta ei voida kokonaan säästyä, vaan säästö muodostuu odottamattoman keskeytyksen ja suunnitellun keskeytyksen KAH-kustannuksien erotuksesta. Laskennassa käytettiin muuten samoja parametreja, mutta KAH-laskennassa käytetään suunnitellun keskeytyksen mukaisia hintoja ja korjausajaksi muutettiin 1 tunti edellisen laskelman 2 tunnin sijaan. Sensoroinnin säästö lasketaan vähentämällä edellisen taulukon sensorin säästöä keskimääräinen KAH-kustannus per kohde.

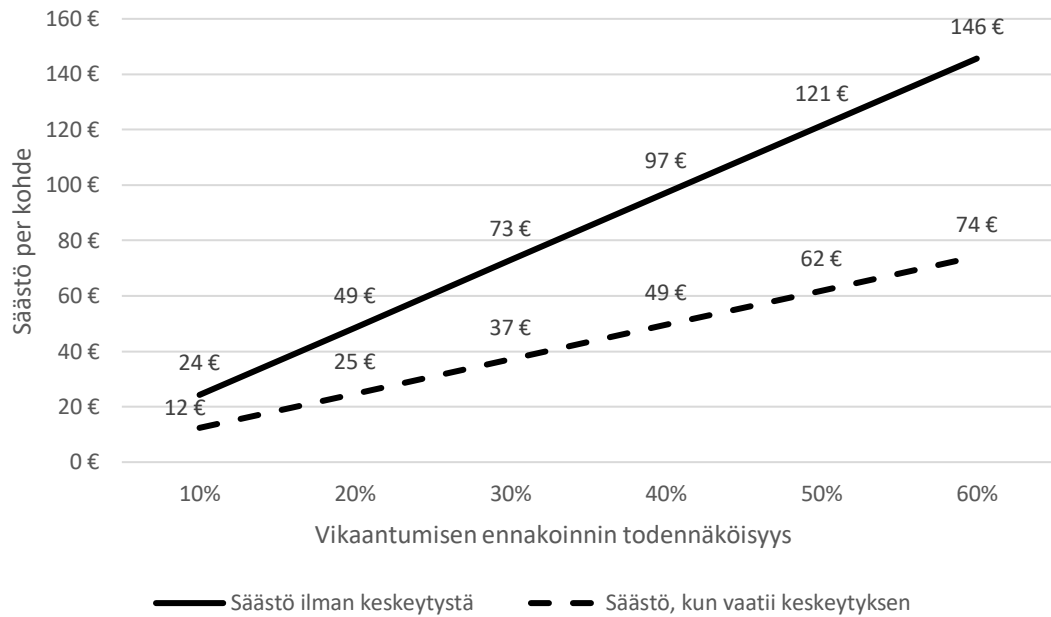
Taulukko 6. *KAH-kustannus ja keskimääräinen KAH-kustannus per sensori ja sensorin tuoma säästö eri vikaantumisen ennakkoinnin todennäköisyyksillä, kun viankorjaus vaatii keskeytyksen*

Vikaantumisen ennakkoinnin todennäköisyys	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %
KAH-kustannus (1 a)	51 €	101 €	152 €	202 €	253 €	303 €
KAH-kustannus (6 a)	303 €	606 €	910 €	1 213 €	1 516 €	1 819 €
KAH-kustannuksen nettoarvo (6 a)	274 €	547 €	821 €	1 095 €	1 369 €	1 642 €
Keskimääräinen KAH-kustannus per muuntamo	12 €	24 €	36 €	48 €	60 €	71 €
Keskimääräinen sensoroinnin säästö	12 €	25 €	37 €	49 €	62 €	74 €

Molemmissa tapauksissa voidaan lisäksi huomioida korjaustöiden säästöt, jos vikaa ei tarvitse korjata kiireellisenä vikatyönä vaan työ voidaan tehdä suunnitellusti. Tarkkoja säästöjä työn kustannuksista ei voida kuitenkaan arvioida, mutta lähtökohtaisesti kiireellinen työ on selvästi suunniteltua työtä kalliimpaa. Suunnitelluissa töissä toimitusaika on toisaalta usein paljon pidempi, jolloin korjaus voidaan joutua silti tilaamaan kiireellisenä työnä, jolloin työkuluissa ei välttämättä saada säästöjä. Elenialla suunnitellut työt pitää tilata urakoitsijakumppanilta vähintään kuukausi etukäteen, joten alkava vika pitäisi pystyä havaitsemaan jopa kuukausi ennen varsinaista vikaantumista, jotta säästöjä viankorjauksista syntyisi. Tässä vaiheessa on vaikea arvioida, kuinka pitkällä aikavälillä vikaantumisia voidaan sensoroinnilla ennakoida, mutta kuukauden aikaväli voi osoittautua haasteelliseksi saavuttaa. Asiakkaalle suunniteltu keskeytys tulee ilmoittaa 5 päivää etukäteen, jotta KAH-kuluissa saadaan säästöä. Eli viittä päivää voidaan pitää vähimmäistavoitteena vikojen ennakkoinnille.

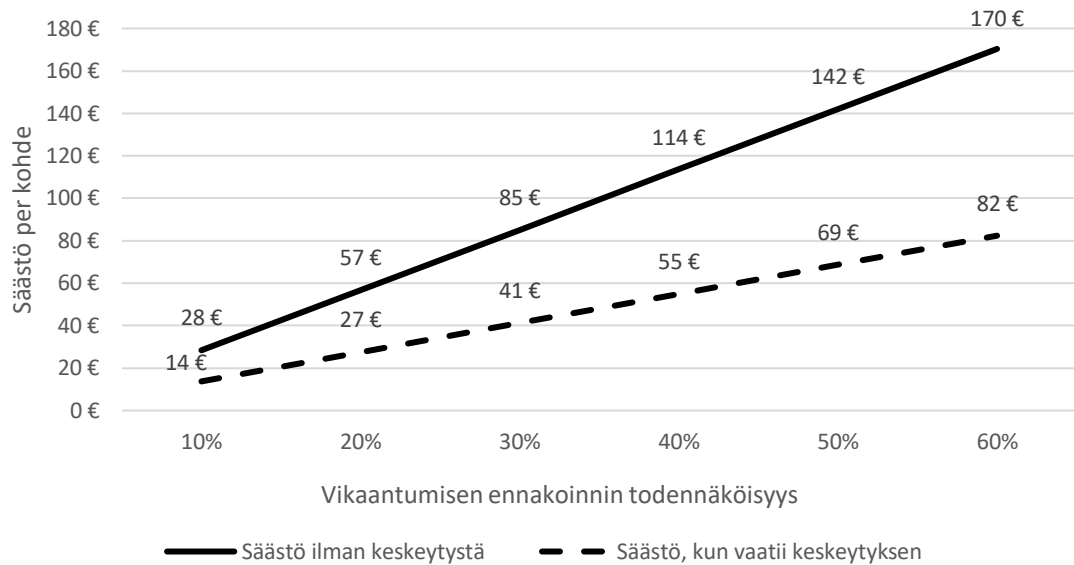
Alla olevassa kuvassa 12 on kuvattu taulukossa 4 ja 5 esitetyt keskimääräisen sensorin säästöt. Ilman keskeytystä tapahtuvan korjauksen säästö kuvaa sensorilla saatavaa maksimisäästöä ja keskeytyksen vaativan korjauksen säästö kuvaa minimisäästöä, jotka sensoroinnilla voidaan saavuttaa. Todellinen säästö on näiden kahden kuvaajan välissä, sillä

kaikkia vikoja ei voida korjata ilman keskeytystä muuntamalla, mutta osa huoltotöistä voidaan silti suorittaa ilman keskeytystä.



Kuva 15. Keskimääräinen sensorin säästö vikaantumisen ennakkoinnin todennäköisyyden suhteen

Kuvaajasta huomataan selvästi, että mitä suurempi osa vikaantumisia voidaan ennakoida sensoroinnin avulla, sitä suuremmat kustannussäästöt sensoroinnilla saavutetaan. Ennakkoinnin todennäköisyys on alussa oletettavasti pieni, mutta ajan mittaan sensoroinnin kehittyessä yhä useampi vikaantuminen on todennäköisesti mahdollista ennakoida. Edellisissä laskelmissa oletettiin, että jokaiseen johtolähdön muuntamoon asennettaisiin sensorit, mikä laskee merkittävästi yksittäisen sensoroinnin kohteen säästöä, koska haja-asutusalueella tapahtuvat viat eivät aiheuta niin suuria KAH-kustannuksia. Alla olevassa kuvassa 13 on kuvattu keskimääräinen sensoroinnin säästö, kun sensoreita asennettaisiin vain taajama-alueelle. Tällöin vain taajama-alueella tapahtuvat viat voidaan ennakoida sensoreilla, mutta sensoreita pitää samalla asentaa vähemmän.

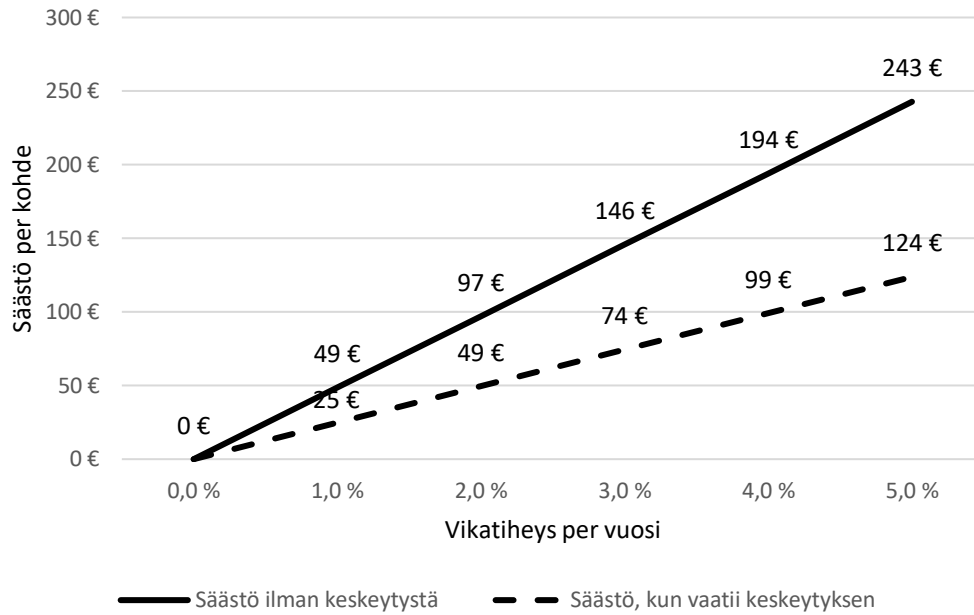


Kuva 16. Ainoastaan taajama-alueelle asennettujen sensorien keskimääräinen säästö vikaantumisen ennakoinnin todennäköisyyden suhteen

Yllä olevia kuvia 12 ja 13 vertaillen huomataan, kuinka säästö per muuntamo nousi, sillä taajama-alueen KAH-kustannukset ovat keskimäärin huomattavasti haja-asutusta suuremmat. Vikaantumiset eivät toisaalta aina jakaudu tasaisesti eri alueille, sillä vikaantumisiin vaikuttaa monta tekijää, kuten ympäristö, muuntamoiden ikä ja niiden valmistaja. Asennettavien sensorien määrä vaikuttaa suoraan tarvittavien investointien suuruuteen ja sensorijärjestelmän kiinteiden kustannusten jakautumiseen yksikkökustannuksiin per kohde. Tästä syystä sensoreita ei kannata asentaa jokaiseen sähköverkon muuntamoon, vaan on pyrittävä määrittelemään verkon kriittisimmät kohteet, joihin sensoreita tulisi asentaa.

Vian ennakoinnin todennäköisyyden lisäksi vikatiheydellä, viankorjausajalla, vika-alueen rajaukseen kuluva ajalla, vika-alueen koolla ja muuntamoiden ja lähdön keskitehoilla on vaikutus KAH-kustannuksiin. Seuraavissa kuvaajissa havainnollistetaan näiden muuttujien vaikutuksia tuloksiin. Laskelmissa vian ennakoinnin todennäköisyydeksi oletetaan 20 % ja muut muuttujat pidetään samoina kuin aiemmissa laskelmissa, ellei toisin mainita.

Muuntamoiden viankorjausaika voi vaihdella tilanteen mukaan hyvin paljon ja yllä olevissa laskelmissa käytetty 2 tuntia on lähempänä lyhyintä mahdollista viankorjausaikaa, sillä yli 6 tunnin keskeytykset voivat olla hyvinkin mahdollisia. Muuntamoiden ja koko johtolähdön keskiteholla on merkittävä vaikutus KAH-kustannuksiin.



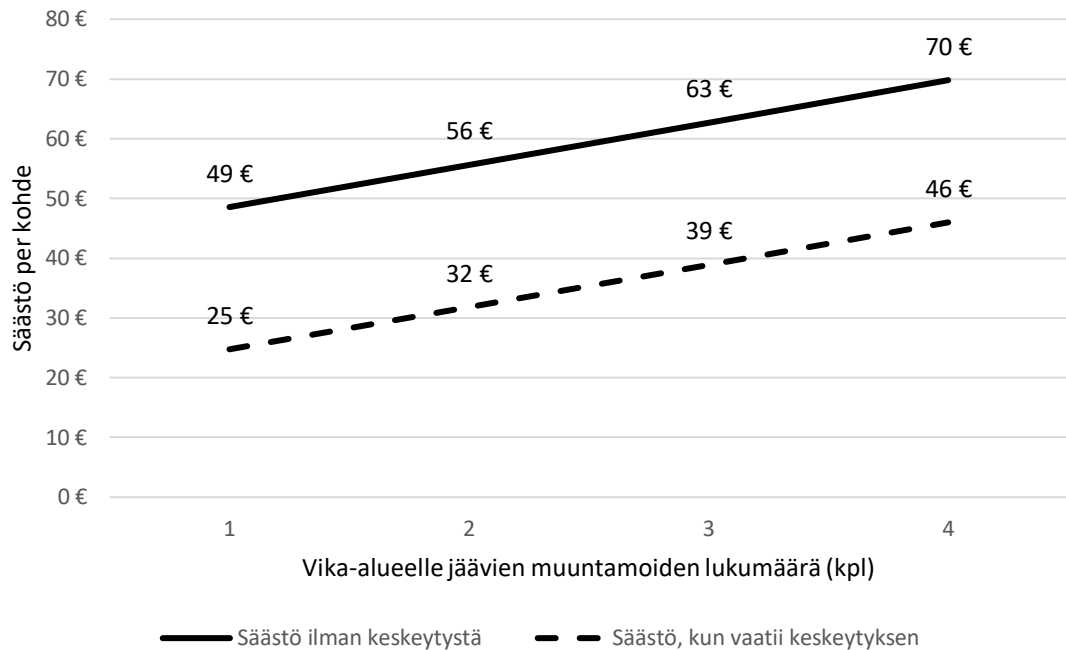
Kuva 17. Keskimääräinen sensorin säästö vuotuisen vikatiheyden suhteen

Kuvasta 16 huomataan selvästi, että vikatiheydellä on merkittävä vaikutus mahdollisiin säästöihin. Pieni vikatiheys tarkoittaa vähemmän vikaantumisia, joista vielä pienempi osuus voidaan sensoreilla ennakoida. Sensorin kuuden vuoden tavoitellun elinkaaren aikana vikoja ei voida välttämättä ennakoida tarpeeksi vikoja, että sensorin asentaminen olisi kannattavaa, jos komponentin vikatiheys on pieni.



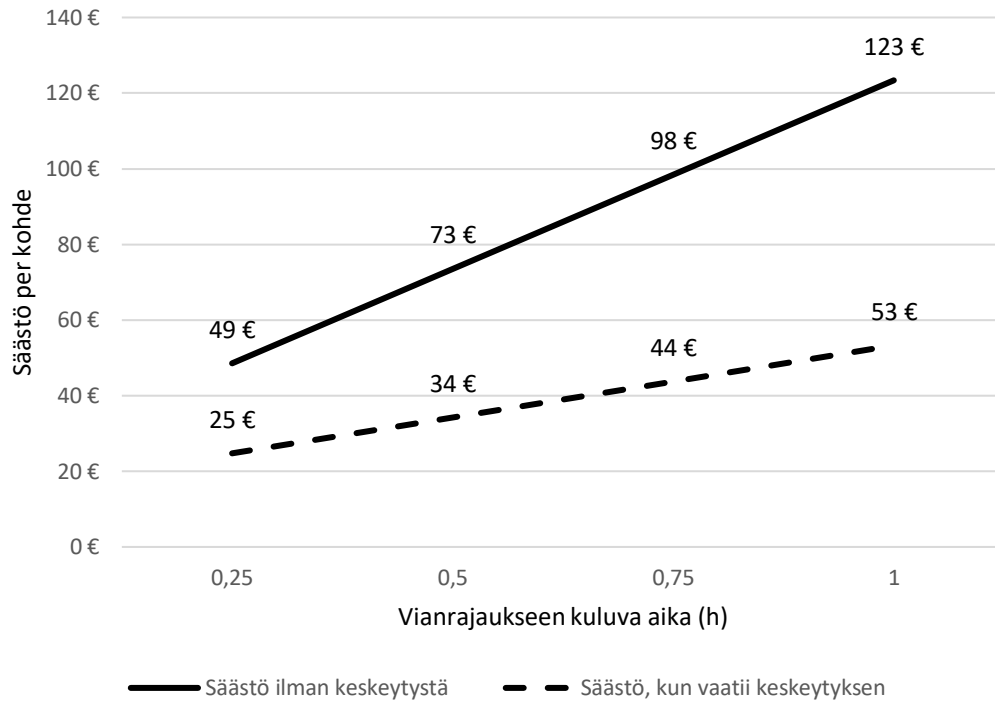
Kuva 18. Keskimääräinen säästö vikakeskeytyksen keston suhteen

Vikakeskeytyksen kestolla ei ole kovin suurta merkitystä, kun taajama-alueella vika-alueelle oletetaan jäävän vain yhden muuntamon syöttämät asiakkaat. Seuraavassa kuvassa on kuvattu vika-alueen suuruuden vaikutus taajama-alueella 2 tunnin pituisessa viassa.



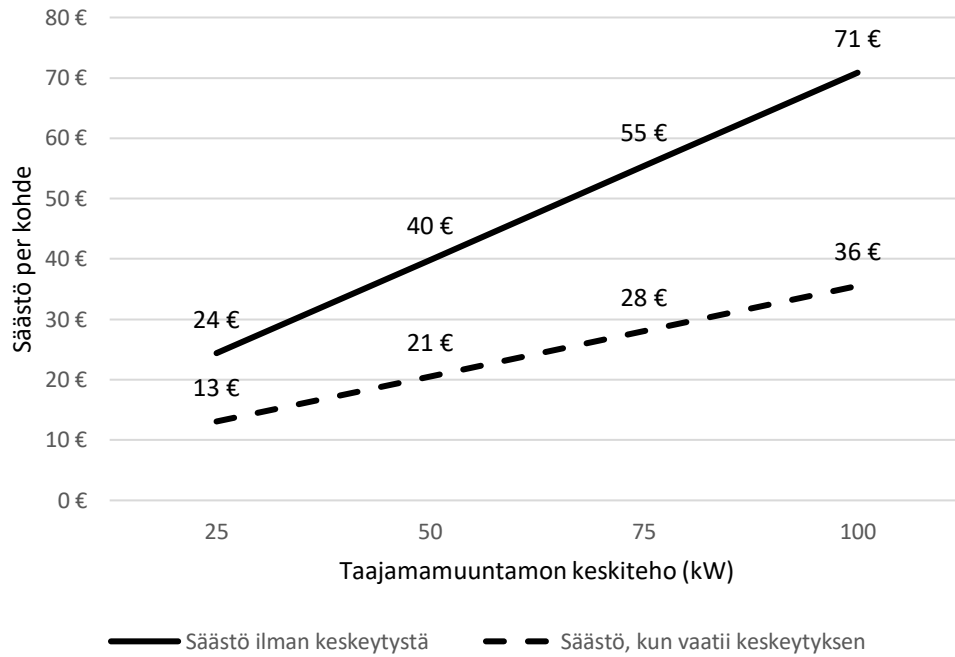
Kuva 19. Keskimääräinen säästö vika-alueelle jäävien taajama-alueen muuntamoiden määrän suhteen

Vika-alueen suuruus vaikuttaa mahdollisiin säästöihin sitä enemmän mitä pidempi keskeytys alueella koetaan. Taajama-alueellakaan vika-aluetta ei aina pystytä rajoittamaan yksittäiselle muuntamolle, kuten aiemmissa laskelmissa ollaan oletettu, jolloin vikojen ennakoinnilla voidaan saada parempia säästöjä. Myös vianrajausaika johtolähdöllä voi vaikuttaa KAH-kustannuksiin. Aiemmissa laskelmissa käytetty 15 minuutin vianrajausaika onnistuu vain, jos johtolähdöllä on tiheästi kaukokäyttöisiä erottimia. Kuvassa 20 on esitetty vianrajausajan vaikutus sensorin mahdollisiin säästöihin.

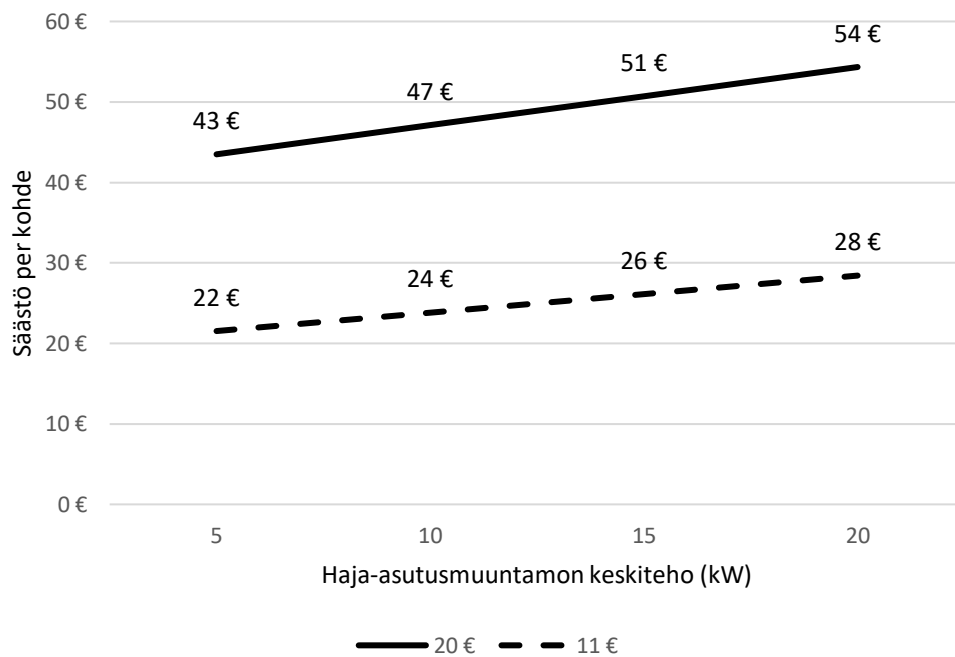


Kuva 20. Keskimääräinen säästö per kohde vianrajaukseen kuluvan ajan suhteen. Vianrajaukseen kuluvalle ajalle on huomattava vaikutus keskeytyksestä aiheutuvan haitan määrään, mikä näkyy sensoroinnin säästöissä. Kun vika-alueen koolla ja rajaukseen kuluvalle ajalle on huomattavia vaikutuksia KAH-kustannuksiin, puistomuuntamoissa sijaitsevien kuormanerotimien toiminnan varmentamisella on selviä kustannussäästöjä mahdollista saavuttaa. Erottimien kauko-ohjauksien toimimattomuus kasvattaa vika-alueita ja vaatii käsiohjauksia erottimilla asentajan toimesta, mikä pidentää koko johtolähdön kokeman keskeytyksen kestoja.

Lopuksi kuvissa 21 ja 22 on esitetty johtolähdön taajama- ja haja-asutusalueiden muuntamoiden keskitehojen vaikutus keskimääräiseen säästöön. Keskitehot vaihtelevat johtolähdöittäin, joten varsinaisissa laskelmissa tulee käyttää mahdollisimman tarkkoja tietoja muuntamoiden keskitehoista KAH-laskennassa.



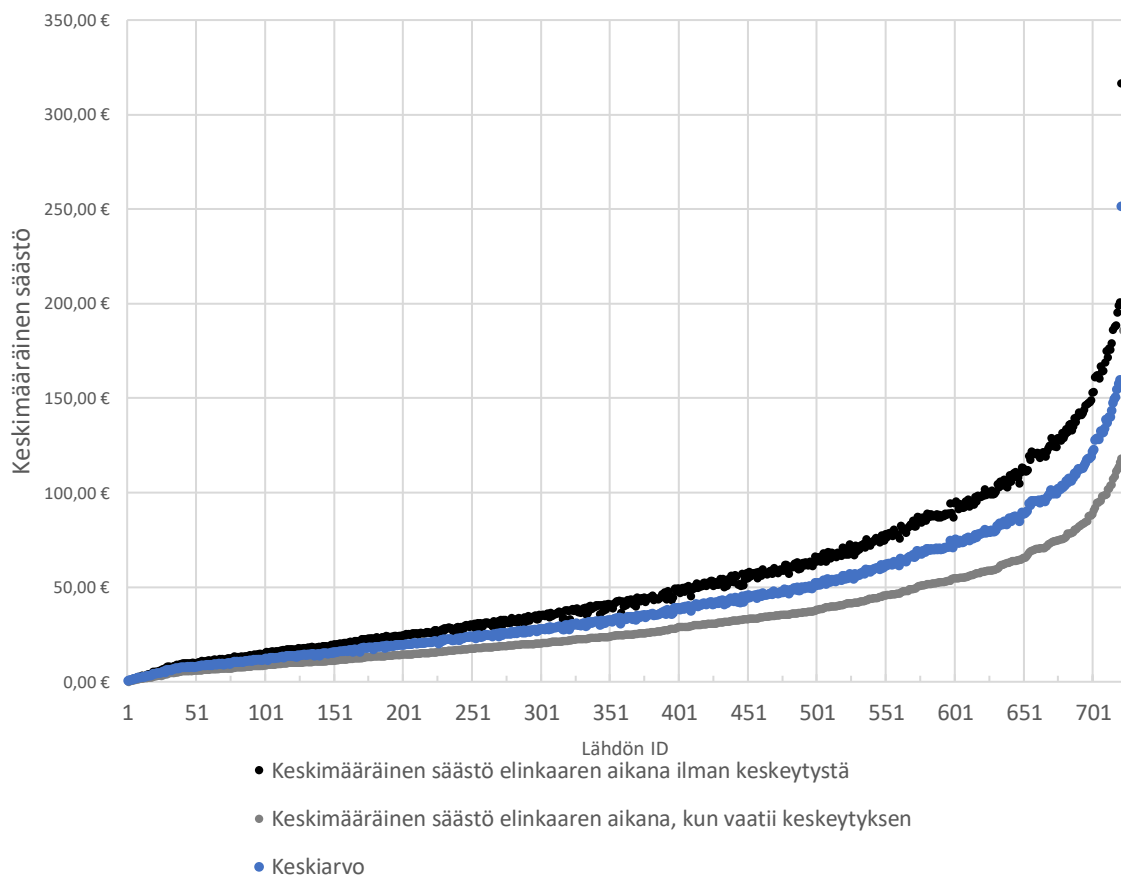
Kuva 21. Keskimääräinen säästö per kohde taajama-alueella sijaitsevan muuntamon keskitehon suhteen



Kuva 22. Keskimääräinen säästö per kohde haja-asutusalueella sijaitsevan muuntamon keskitehon suhteen

Kuvaajista voidaan havaita, että keskitehon kasvulla on kohtalaisen suuri vaikutus sensoroinnilla saatavaan säästöön. Tällöin sensorointia kannattaa mahdollisuuksien mukaan kohdistaa niille muuntamoille ja johtolähdöille, joissa keskitehot ovat keskimääräistä suuremmat.

Yllä esitettyjen laskelmien perusteella sensoroinnin tuottamat säästöt ovat keskimäärin noin 50 €. Laskenta perustuu kuitenkin keskimääräisyyksiin ja kuvan 16 perusteellakin todettiin, että sensoroinnin kannattavuus paranee, kun sensoroitavat kohteet valitaan tarkemmin. Samoja laskuperiaatteita hyödyntäen voidaan laskea sensoroinnista saatava säästö Elenian jokaiselle puistomuuntamolle. Tuloksista voidaan sen jälkeen laskea jokaisen johtolähdön, jossa on puistomuuntamoita, keskimääräinen säästö, kun johtolähdön kaikki puistomuuntamot sensoroitaisiin. Laskennassa käytetään vikataajuutena 1% vuodessa, vian ennakoinnin todennäköisyytenä 20% ja vikakeskeytyksen kestona 2 tuntia. Tarkemmissa tarkasteluissa parametrit tulisi mahdollisuuksien mukaan käyttää todellisia lukuarvoja vikataajuudessa ja keskeytysajoissa, mutta nämä oletukset vastaavat tarpeeksi hyvin todellisia arvoja. Laskennan tulokset on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Elenian puistomuuntamoita sisältävien johtolähtöjen keskimääräinen säästö

Kuvaajassa ei ole mukana kaikkia Elenian johtolähtöjä, sillä kaikissa johtolähdöissä ei ole yhtään puistomuuntamoita. Laskelmien perusteella todellisten johtolähtöjen keskimääräinen säästö on noin 43 € annetuilla parametreilla. 50 € rajan ylittää noin 220 eli 30 % johtolähdöistä ja 100 € rajan ylittää noin 50 eli 7 % lähdöistä. Yli sadan euron rajan ylittävissä johtolähdöissä on yhteensä vajaa 1000 puistomuuntamoita. Sensorointi kannattaisi siis aloittaa näistä muuntamoista, sillä laskennalliset hyödyt ovat selvästi keskimääräistä suuremmat.

KAH-kulujen lisäksi voidaan arvioida muita mahdollisia hyötyjä ja säästöjä kustannuksissa. Muuntamoiden tarkastusvälin pidentäminen kuudesta vuodesta esimerkiksi kahdeksaan vuoteen vähentäisi puistomuuntamoiden tarkastuskuluja 25 %. Yhden puistomuuntamon tarkastuksen maksaessa 100 € vuotuinen tarkastuskulu olisi noin 17 euroa kuuden vuoden tarkastusvälillä ja noin 13 euroa kahdeksan vuoden tarkastusvälillä. Muuntamoiden tarkastusvälin pidentäminen kuudesta vuodesta kahdeksaan tarkoittaisi myös sensoreiden käyttöiän pidentyvän kahdeksaan vuoteen, jolloin sensorin elinkaaren aikaiset keskimääräiset säästöt KAH-kuluissa kasvaisivat noin 30 %:lla noin 65 euroon muuntamo kohden.

Vikojen korjaaminen suunniteltuna työnä on selvästi suunnittelematonta työtä kustannustehokkaampaa. Verkostosuositus KA 2:10 mukaan esimerkiksi muuntajan vaihtotyön kustannukset ovat 1470 € (Energiateollisuus). Suunnittelemattomana tehtävän vaihtotyön voidaan olettaa olevan tätä selvästi kalliimpi, jolloin säästöt olisivat korjaustyön osalta satoja euroja yksittäisellä vialla. Vakava vikaantuminen voi johtaa jopa koko komponentin korvaamiseen. Monien sähköverkon komponenttien teknistaloudelliset pitoajat ovat useita kymmeniä vuosia, jolloin varsinkin elinkaaren alkupäässä tapahtuvat vakavat vikaantumiset pitäisi pystyä välttämään. Tavallisen puistomuuntamon hankintahinta on yli 20 000 €, jolloin säästöt voivat olla useita tuhansia, jos muuntamon ennaikainen uusiminen voidaan välttää (Energiavirasto 2019).

Komponentilla tapahtuneet vahingot ja korjaustyöt voivat vaikuttaa myös muuntamon elinkaaren pituuteen. Sensoroinnin avulla voidaan mahdollisesti pidentää komponenttien elinkaarta parempien kuntotietojen avulla, jolloin tarvittavia uusia investointeja voitaisiin viivästyttää ja hyödyntää investointeihin sitoutuvaa pääomaa muualla, jolloin vuotuiset säästöt olisivat useita satoja euroja riippuen laskentakorkokannasta. Puistomuuntamon korvaamisen viivästyttäminen vuodella toisi yli 600 euron säästön 3 % korkokannalla. Tosin tämän hyödyn saavuttaminen vaatii komponentin elinkaaren aikaista sensorointia, jolloin sensoreita olisi asennettu vähintään 6 kertaa, jolloin säästöt elinkaaren pidentämisestä olisivat noin 100 euroa yhden sensorin elinkaaren aikana.

Seuraavaksi määritellään sensoroinnin kustannuskomponentit, kun yllä mainitut 1000 puistomuuntamo sensoroitaisiin. Jotta se olisi kannattavaa, kokonaiskustannusten tulisi olla tarpeeksi lähellä 200 € per muuntamo, kun suorien KAH-säästöjen lisäksi sensoroinnin kannattavuudessa huomioidaan muu vaikeammin rahassa mitattava lisäarvo, kuten turvallisuuden tai käyttövarmuuden parannus.

Luvussa 7 esitettiin, että sopivimmat sensoroitavat komponentit puistomuuntamolla olisi kaapelipäätteet ja muuntaja. Näille pitää asentaa omat sensorit ja esitettyjen sensoreiden kustannukset olisivat yhteensä luvussa 7 esitettyjen arvioiden mukaan 250 € per muuntamo. Sensoreiden asennus on yksinkertaista, jolloin asennuskustannukset per muuntamo voidaan olettaa olevan noin 10 €, jos asennus tapahtuu muuntamon tarkastuskäynnin yhteydessä.

Tietoliikenteen kustannukset 1,50 euron kuukausihinnalla olisivat noin 100 euroa sensorin 6 vuoden elinkaaren aikana. Liittymien kuukausihinnan voi olettaa laskevan, kun IoT-sensoreita käytetään laajemmin, jolloin alle euron kuukausihinta on realistinen arvio yhdelle liittymälle. 0,70 euron kuukausihinnalla kustannukset olisivat tietoliikenteen osalta noin 50 € per sensori eli 100 € muuntamoa kohden, koska molemmat sensorit tarvitsisivat oman tietoliikenneliittymän tässä tapauksessa.

Sensoreilta kerättävä datamäärä ei ole kovin suurta, sillä värähtelydataa ei tarvitse tallentaa jatkuvasti eikä ääntä äänitetä jatkokäsiteltäväksi vaan mitattaisiin sen voimakkuutta. Datavarastoinnin, data-analytiikan ja laitehallinnan kustannukset Amazonin IoT-alustalla ovat siis hyvin lähellä esimerkkilaskelmia, jolloin ne olisivat yhteensä noin 5-10 euroa 6 vuoden aikana.

Täysin kiinteitä kustannuksia sensorointijärjestelmässä olisi ainoastaan järjestelmän kehitykseen, käyttöönottoon ja ylläpitoon vaaditut panokset. Pilvipalveluihin pohjautuva järjestelmä on hyvin skaalautuva, jolloin järjestelmä voidaan ottaa käyttöön vaiheittain, mikä pienentää alkupääoman tarvetta ja järjestelmää laajentaessa kehityskustannukset pysyvät pieninä. Yksinkertaisen järjestelmän kehityskulujen arvioidaan olevan 50 000 €, mihin sisältyisi muun muassa järjestelmien välisiin integraatioihin ja resursseihin liittyvät kulut. Kehityskustannukset voivat kuitenkin vaihdella vaaditun työn määrän perusteella hyvinkin paljon. Arvion mukaisten kehityskulujen kohdistaminen 1000 muuntamolle lisäisi yhden kohteen sensoroinnin kustannuksia 50 eurolla.

Yhden muuntamon sensorointi maksaisi siis noin 410 €. Kokonaisinvestoinnit olisivat siis noin 6 vuoden aikana yhteensä noin 410 000 € ja säästöä KAH-kuluissa tulisi noin 100 000–150 000 € tältä ajalta. Alkupääomainvestoinnit ovat yhteensä noin 150 000 €, mikä sisältää sensorit, niiden asennuksen ja kehityskulut. Ensimmäisten 6 vuoden jälkeen kohteisiin tulisi asentaa uudet sensorit, jolloin tarvittaisiin uudet investoinnit. Investointien hinta voi olla alempi hintakehityksen takia. Kehityskulut tulevat olemaan jatkossa selvästi pienemmät, sillä järjestelmän käyttöönottoon liittyvät kulut ovat iso osa ensimmäisen kulujakson kehityskuluja.

8.5 Kannattavuuslaskennan tulokset

1000 muuntamon sensorointitapauksessa yhden muuntamon sensoroinnin kokonaiskustannukset olisivat laskennan mukaan siis yhteensä noin 410 € ja sensoroinnilla saatavat säästöt keskeytyskuluissa olisivat noin keskimäärin 100-150 €. Kun huomioidaan muu saavutettava lisäarvo, kuten vakavien vikaantumisten aiheuttamat vahingot, tarkastusvälien pidentäminen ja elinkaaren pidentäminen, niin kannattavuus on nykyisillä kustannuksilla jo kohtalaisen lähellä. Kustannuksissa on kuitenkin laskuvaraa sensorien, tietoliikenteen ja kehityskustannuksien osalta. Kehityskulujen osuus yhdellä kohteella laskisi, jos sensorointia laajennettaisiin edelleen. Käyttöönottoon liittyvät kulut ovat merkittävä

osa kehityskuluja, joita ei järjestelmää laajennettaessa enää syntyisi. Sensoreiden yksikköhinnat tulevat todennäköisesti laskemaan reilusti tulevaisuudessa ja tilausmäärien kasvassa sensoreiden yksikköhinnat saadaan yhä pienemmiksi. Tietoliikenteen hinnan voidaan olettaa laskevan, kun IoT-laitteiden määrä Suomen tietoliikenneverkoissa kasvaa tulevaisuudessa.

Laskenta perustuu keskimääräisyyksiin, jossa kaikille muuntamoille oletetaan samat laskentaparametrit. Herkkyysanalyysin perusteella vikaantumisen ennakoinnin todennäköisyys, vikataajuus, muuntamoiden ja johtolähtöjen keskitehot ja vianrajaukseen kuuluva aika ovat kriittisimmät parametrit tuloksia laskettaessa. Kaikki laskentaparametrit tulee määrittää mahdollisimman tarkasti todellisissa laskentatapauksissa, sillä niiden vaikutus kannattavuuslaskennan tuloksiin on todella suuri.

Esimerkiksi yllä mainituista 1000 muuntamosta voidaan tunnistaa edelleen noin 100 tietyn kojeistotyyppin muuntamoa, jotka ovat Elenian asiantuntijoiden mukaan keskimäärin herkempiä vikaantumisille. Näiden muuntamoiden keskimääräinen säästö keskeytyskustannuksissa on yllä esitettyjen laskelmien perusteella noin 125 €. Näille vikahekille kohteille vuotuinen vikataajuus on kuitenkin 2 % luokkaa tilastojen perusteella ja suurempi osa näiden muuntamoiden vikaantumisista johtuu kaapelipäätteissä tapahtuvista osittaispurkauksista, jolloin sensoroinnilla on odotettavasti mahdollista ennakoida useampi vikaantuminen muuntamolla. Tämän takia vikaantumisen ennakoinnin todennäköisyyden voidaan olettaa olevan parempi. Sensoroinnilla saatava KAH-säästö on suoraan riippuvainen vikataajuuteen ja ennakoinnin todennäköisyyteen kaavan 3 mukaisesti, jolloin 2 % vikataajuudella ja 30 % vikaantumisen ennakoinnin todennäköisyydellä KAH-säästö olisi kolminkertainen edellisiin laskelmiin verrattuna. Näiden tarkemmin valittujen muuntamoiden sensoroinnin KAH-säästö olisi siis noin 375 € sensorien elinkaaren aikana. Tämä esimerkki korostaa sensoroitavien kohteiden valinnan ja laskentaparametrien tarkan määrittämisen tärkeyttä. Kehityskulut toisaalta kasvavat, jos vain nämä 100 muuntamoa sensoroitaisiin, jolloin soveltuvia kohteita tulisi kartoittaa enemmän.

Kannattavan käyttöönoton ajankohta ei ole täysin selvä, kun huomioidaan kustannuskehityksen suunta, tiedon arvo ja teknologian maturiteetti. Viivyttämällä käyttöönottoa myöhemmäksi sensoreiden ja tietoliikenteen kustannukset tulevat olemaan alhaisemmat ja teknologian soveltuvuus sähköverkkoalalle voi olla paremmin selvillä ja mahdollisia kokonaisratkaisuita saatavilla palveluntuottajilta. Silloin omia tutkimus- ja kehityshankkeita tarvittaisiin vähemmän, mikä pienentäisi käyttöönoton kustannuksia. Toisaalta järjestelmän toiminta vaatii paljon dataa ja aloittamalla datan kerääminen mahdollisimman pian järjestelmän hyödyt saadaan realisoitua aikaisemmin ja siitä saatavaa kilpailuetua voidaan hyödyntää pidempään.

Sähköverkkoala on digitalisaation myötä teknologisessa murrosasteessa, jolloin uudet teknologiat ja toimintamallit disruptoivat perinteistä toimialaa. Muutos kohti älyverkkoa on välttämätön ja IoT-teknologiat tulevat olemaan älyverkon rakentamisessa tärkeässä

osassa. IoT-sensorijärjestelmän käyttöönotto sähköverkon kunnonhallinnassa voi olla ensimmäisiä askelia kohti älykkäämpää sähköverkkoa, sillä käyttöönoton ja käytön aikana tapahtuvaa oppimista ja kerääntyvää tietopääomaa voi hyödyntää muissa älyverkon kehitysprojekteissa. Sähköverkon sensorointi voi olla tietyissä tilanteissa taloudellisesti kannattavaa ja kustannusten kehityksen myötä sensoroinnin kannattavuus paranee entisestään. Sensorijärjestelmän rakentaminen kannattaa siis näiden tulosten pohjalta aloittaa.

8.6 Käytännön testitulokset

IoT-sensorointia pilotoitiin asentamalla muutamia sensoreita puistomuuntamoihin. Sensoreina käytettiin Elsys:n ESM 5k LoRaWAN-sensoreita. Sensorit mittasivat lämpötilaa, ilmankosteutta, valoisuutta ja sensorin asentoa kiihtyvyyden perusteella. Lämpötilan ja ilmankosteuden mittauksilla haluttiin mitata muuntamoiden ympäristöolosuhteita. Ovien kiinnioloa seurattiin asentamalla sensorit muun muassa muuntamoiden oviin, jolloin valoisuuden avulla mahdollinen ovien aukeaminen voitaisiin havaita.

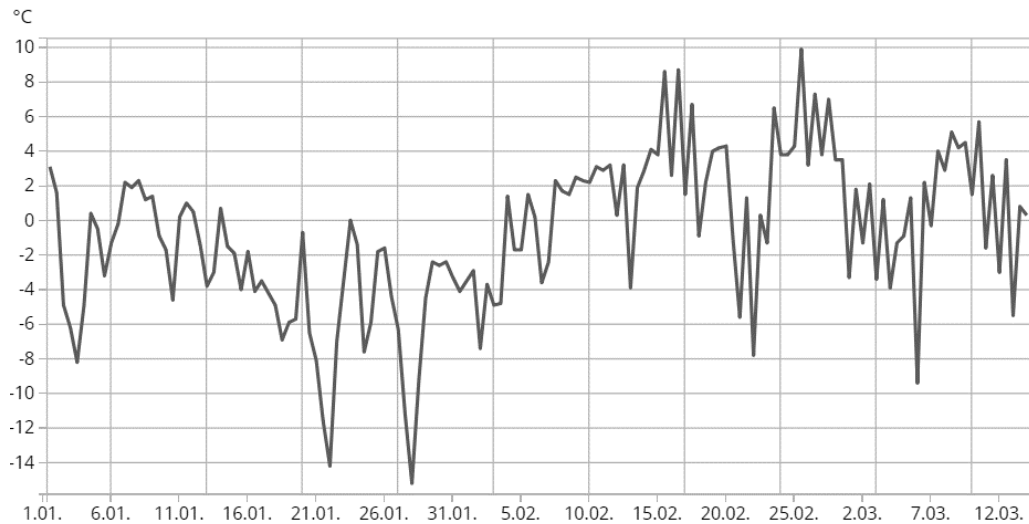
Kuvassa 12 näkyy asennettu sensori puistomuuntamon ovesta. Kuvasta voidaan huomata sensorin pieni koko ja langattomuus. Sensori kiinnitettiin oveen kaksipuoleisella teipillä ja se kommunikoi usean kilometrin etäisyydellä olevan tukiaseman kanssa käyttäen LoRaWAN-tiedonsiirto-protokollaa. Puistomuuntamon metallinen rakenne tekee siitä Faradayn häkin kaltaisen rakennelman, mikä pilotin alussa herätti kysymyksiä kuuluvuudesta. Sensorin kuuluvuus osoittautui kuitenkin hyväksi pilotin aikana. LoRaWAN-protokolla onkin suunniteltu läpäisemään rakenteita tarjoten hyvän sisäkuuluvuuden (Digita 2019b).



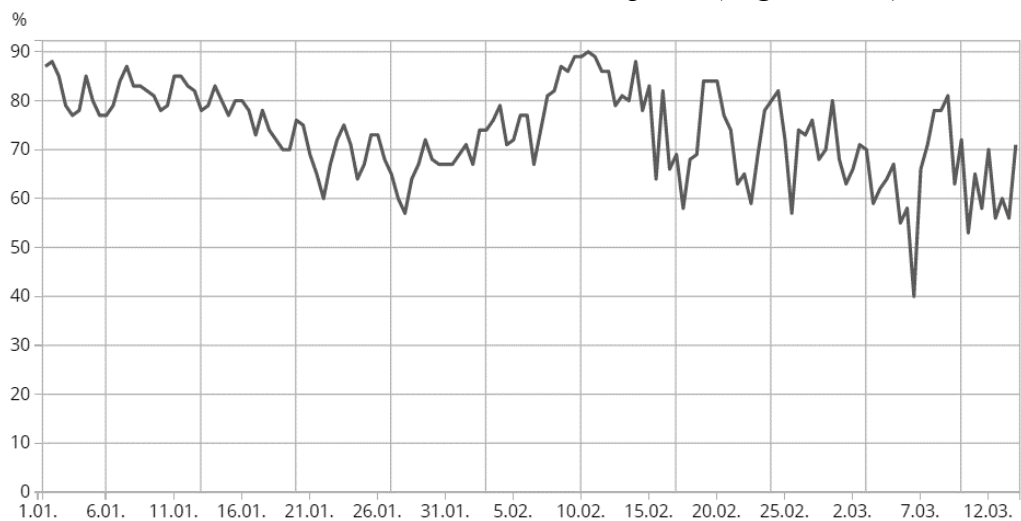
Kuva 24. Sensori kiinnitettynä puistomuuntamon oveen

Pilotissa sensorit lähettivät mittaustuloksensa palveluntarjoajana toimineen Digita Oy:n pilvipalveluun, jonne data eri mittauksista tallennettiin aikasarjatiedon kanssa. Pilvipalvelussa dataa voitiin tarkastella visualisointien avulla. Pilvipalvelu olisi tukenut hälytysrajojen asettamista, mitä ei kuitenkaan käytetty pilottivaiheessa.

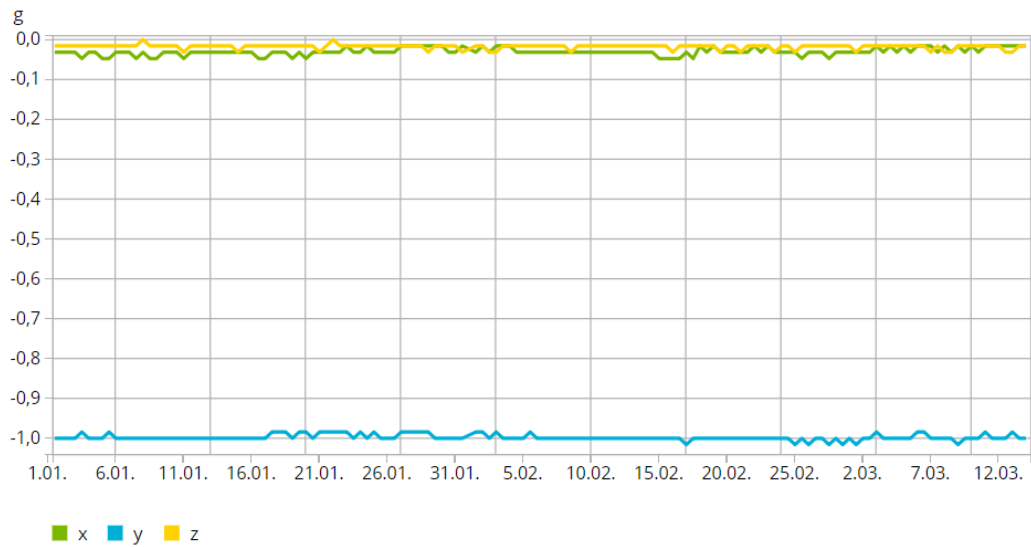
Alla on esitetty kahden ja puolen kuukauden pituisen mittausjakson aikana kerättyjä tuloksia kahdelta eri puistomuuntamolta, joihin asennettiin samanlaiset sensorit. Mittaukset näissä kohteissa suoritettiin kaksi kertaa päivässä 12 tunnin syklillä noin kello 1 ja kello 13. Visualisoinnit ovat tallennettu palveluntarjoajan pilvipalvelusta.



Kuva 25. Puistomuuntamo 1:n lämpötila (Digita 2019a)

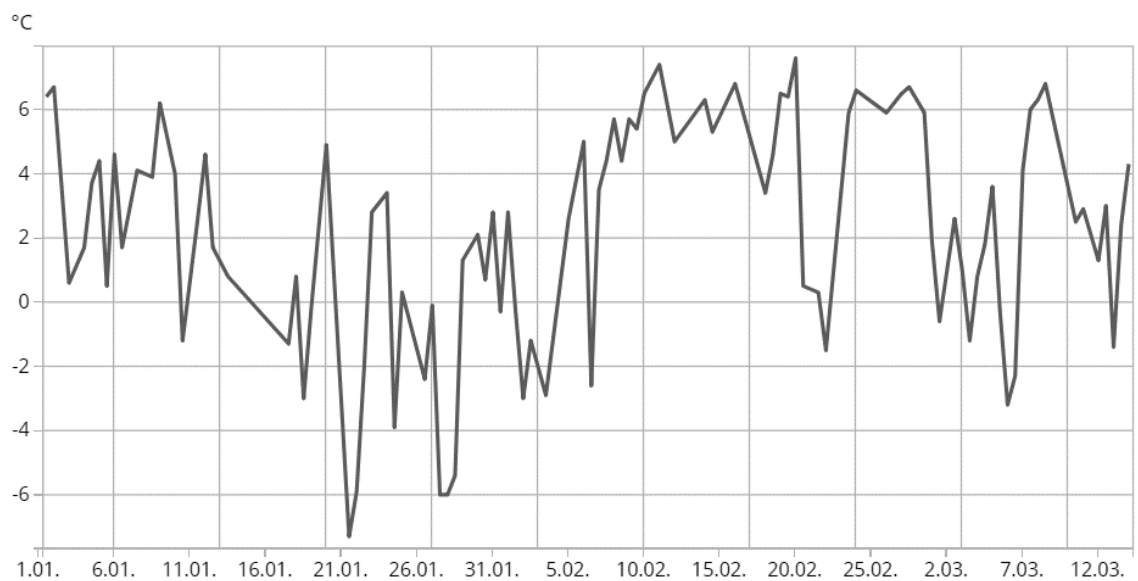


Kuva 26. Puistomuuntamo 1:n suhteellinen ilmankosteus (Digita 2019a)

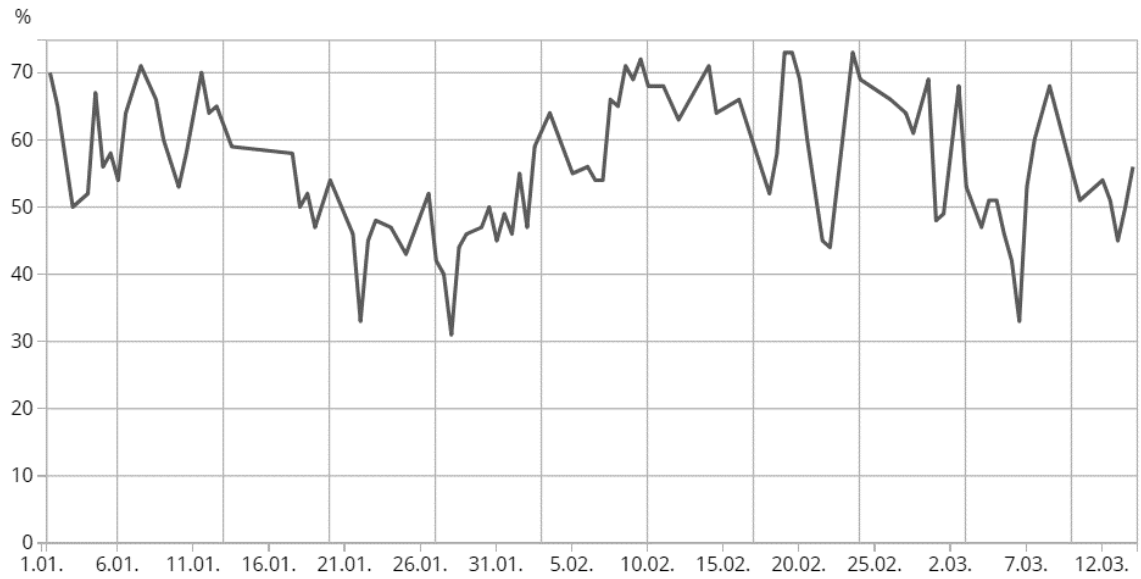


Kuva 27. Puistomuuntamo 1:n kiihtyvyyys (Digita 2019a)

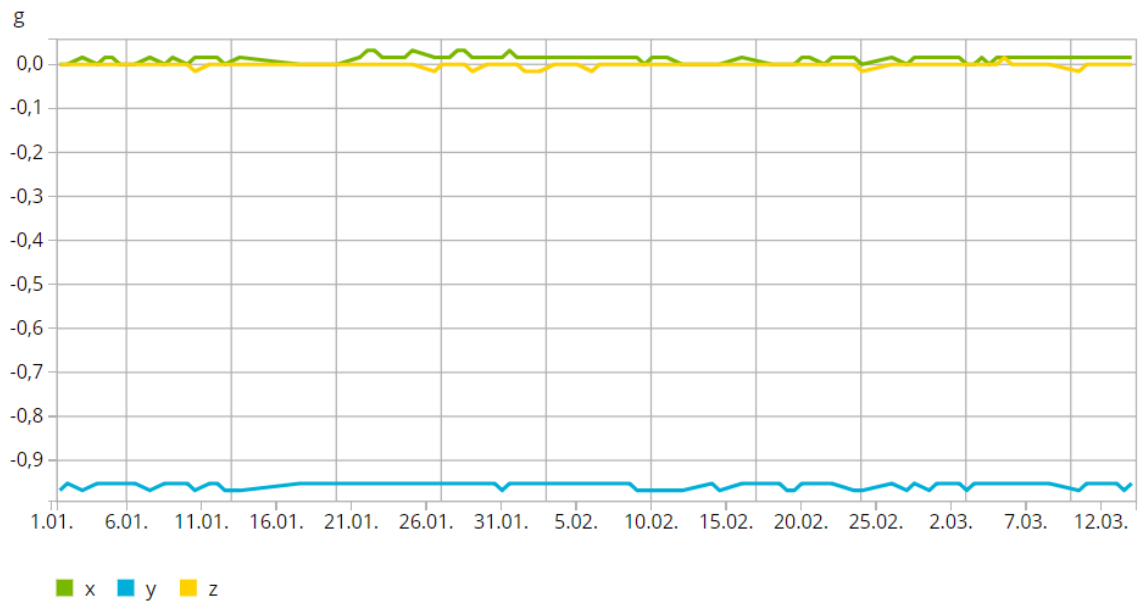
Odotuksien mukaisesti muuntamon ovi on pysynyt kiinni, sillä valoisuusanturin tulos on 0 luksia koko mittausjakson ajan. Puistomuuntamon sisällä on siis täysin pimeää myös auringonvalossa, eli valo ei pääse sisään muuntamon tuuletusaukoistakaan.



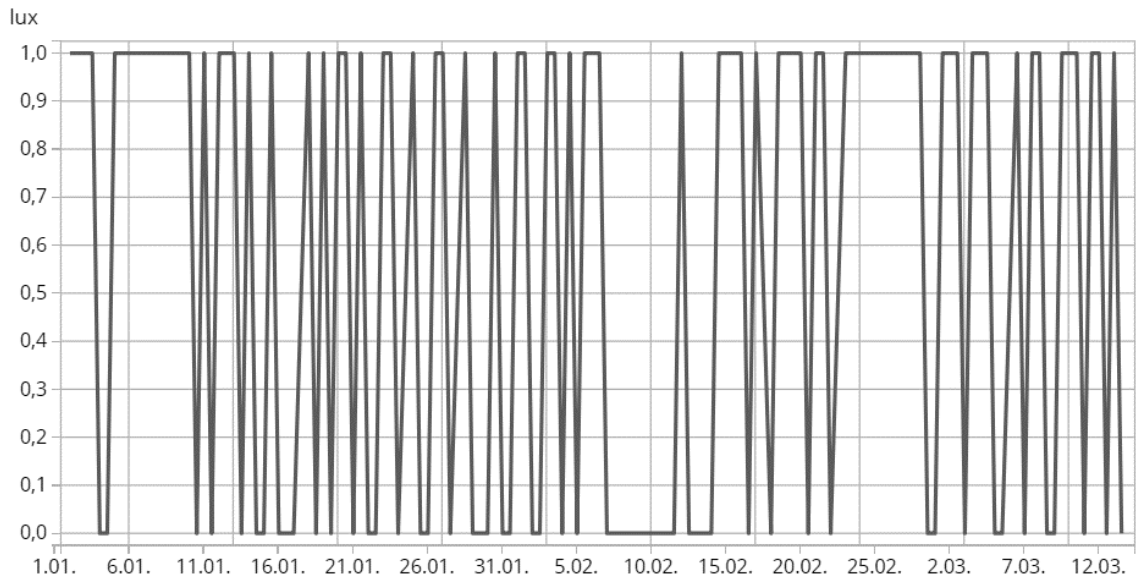
Kuva 28. Puistomuuntamo 2:n lämpötila (Digita 2019a)



Kuva 29. Puistomuuntamo 2:n suhteellinen ilmankosteus (Digita 2019a)



Kuva 30. Puistomuuntamo 2:n kiihtyvyys (Digita 2019a)



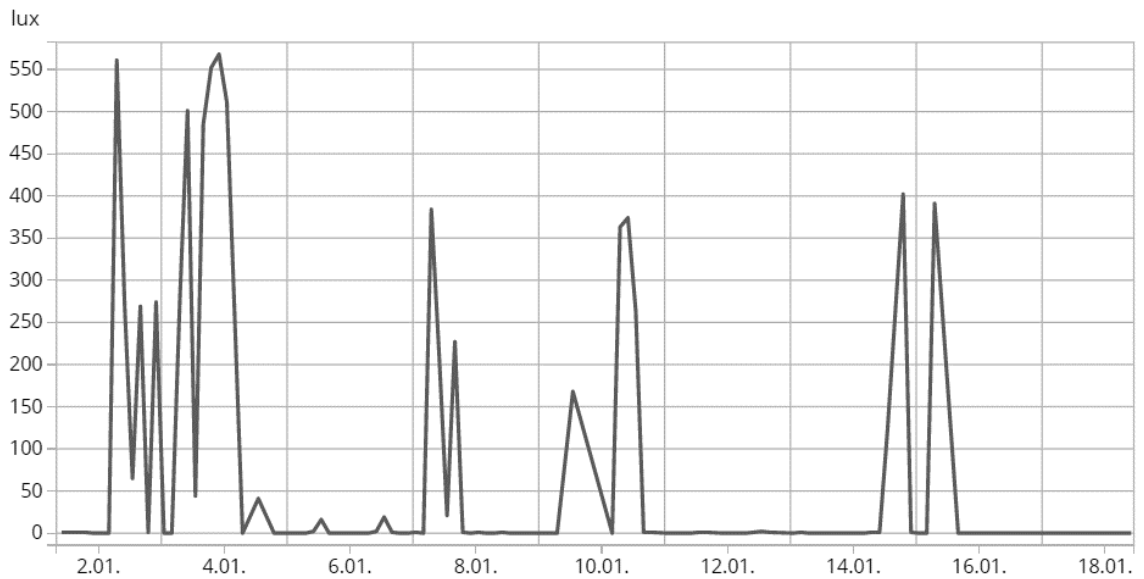
Kuva 31. Puistomuuntamo 2:n valoisuus (Digita 2019a)

Toisella puistomuuntamolla valoisuusmittauksessa on tapahtunut hyvin pientä muutosta, mutta muuntamon ovi on silti oletettavasti pysynyt kiinni, sillä valoisuusmäärä on yhä hyvin pieni. Sensorin kiihtyvyyden mittaustuloksissa on ensimmäisen kohteen tapaan pientä häiriötä, mutta merkittäviä muutoksia ei ole tapahtunut.

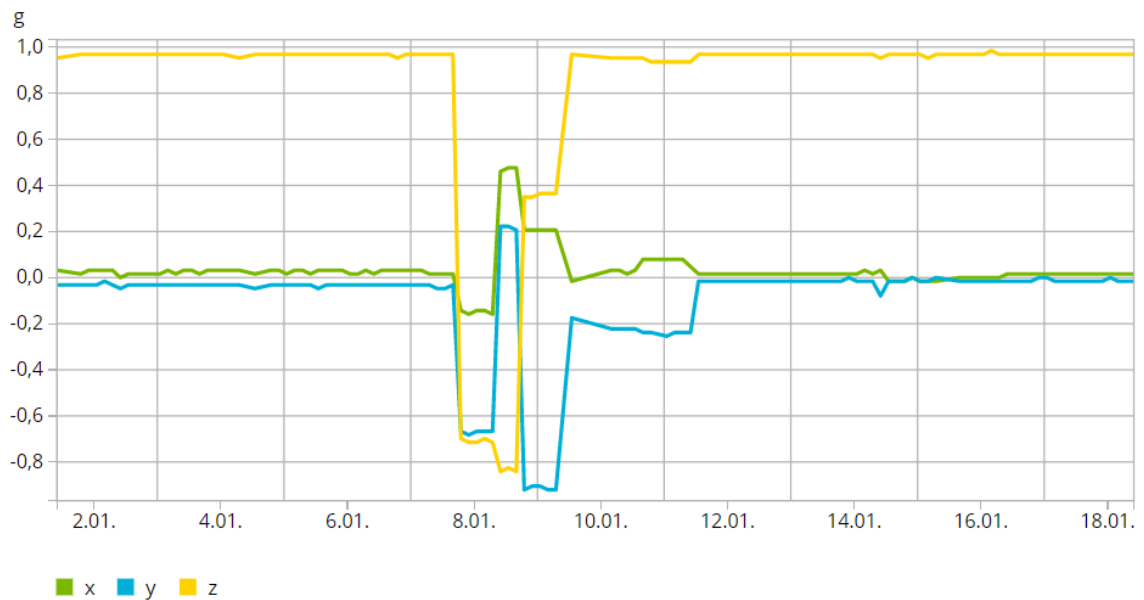
Puistomuuntamoiden lämpötiloissa ja ilmankosteudessa ilmenee selviä eroja, vaikka muuntamot sijaitsevat vain noin 300 metrin päässä toisistaan taajama-alueella. Ensimmäisessä puistomuuntamossa ilman suhteellinen kosteus on selvästi korkeampi koko mittausjakson ajan ja lämpötilavaihtelu suurempi kuin toisessa kohteessa. Kohteet eivät ole identtisiä, vaan ensimmäinen muuntamo on otettu käyttöön vuonna 2015 ja toinen vuonna 2000 sekä muuntamoiden muuntajien tehot poikkeavat toisistaan. Lisäksi muuntamokoppien valmistajat eivät ole samat, jolloin muuntamon rakenteet poikkeavat jonkin verran toisistaan. Nämä seikat voivat hyvinkin selittää erot muuntamon sisälämpötilassa ja ilmankosteudessa.

Olosuhde-erojen todellisten vaikutusten määrittämiseen tarvitaan huomattavasti pidempi tarkastelu-aika ja laajempi otanta, mutta oletusarvoisesti niillä on varmasti vaikutuksia komponenttien elinkaariin. Yllä esitettyjen tulosten perusteella maantieteellisestikin lähemmällä olevilla muuntamoilla olosuhteet voivat erota selvästi toisistaan, jolloin esimerkiksi pelkästään tietyn alueen säätilanteen hyödyntäminen kuntoluokituksissa tai muissa analytiikkasovellutuksissa ei anna tarpeeksi hyvää tietoa olosuhteista alueen verkkokomponenteilla. Tällöin paremman analyysin saamiseksi kaikkiin alueen kohteisiin olisi asennettava omat olosuhdeanturit, mikä mahdollistaisi paljon tarkempien kuntoluokituksien muodostamisen data-analytiikan avulla.

Jotta voitiin varmistua, että valoisuus- ja kiihtyvyydenturrit toimivat oikein pilotissa, niiden toimintaa testattiin erikseen toimisto-olosuhteissa. Testien perusteella valoisuusanturin mittaama arvo toimisto- tai luonnonvalossa on selvästi nolaa suurempi ja anturin asennon vaihtelu ilmenee selvästi kiihtyvyydenturin mittauksien perusteella. Alla on esitetty kuvaajat testituloksista, joissa valoisuus- ja asentomuutokset ovat selvästi havaittavissa.



Kuva 32. Valoisuusanturin testaustulokset



Kuva 33. Kiihtyvyyssanturin testaustulokset

Pilotissa käytetty sensori toimii siis hyvin yksinkertaiseen olosuhteiden ja muuntamo-oven tilan seurantaan. Kyseinen sensorimalli ei kuitenkaan sovellu parhaalla mahdollisella tavalla ovien seurantaan, sillä sensori ei aktivoitu liikkeestä tai valaistuksen muutoksesta automaattisesti, vaan se lähettää arvot asetetun lähetysvälin mukaisesti. Ovien seuranta varten sensorin pitäisi aktivoitua, kun ovi liikkuu tai valaistus muuttuu selvästi, jotta ovien aukeaminen voidaan luotettavasti havaita. Muuten ovi voi olla koko lähetysvälin ajan auki, eikä sensori sitä havaitsisi ennen seuraavaa lähetyskertaa.

9. JATKOKEHITYS

Tämän työn aikana on tullut esille monia eri asioita, joita ei työn puitteissa voitu vielä ratkaista. Selvityksen perusteella Internet of Things tai teollinen internet on tarjoamassa sähköverkkoyhtiöillekin paljon mahdollisuuksia kehittää ja tehostaa omia kunnossapito-toimiaan. Sähköverkon kunnossapidon merkitys tulee yhä enemmän korostumaan mittavien investointien elinkaarikustannusten hallinnassa ja verkkoliiketoiminnan kulurakenteessa, jolloin siirtymä kohti ennakoivampaa kunnossapitoa on hyvin luonnollinen. Siirtymä ei kuitenkaan ole mahdollista ilman merkittävää tietopääoman lisäystä, jossa IoT-sensorit ja niillä kerätty data tulee olemaan varmasti tärkeä osa kokonaisratkaisua.

Aikaisempi sähköverkkojen vikaantumisiin ja niiden ennakointiin liittyvä tutkimus on keskittynyt pääasiallisesti sähköisten suureiden perusteella tehtäviin havaintoihin. IoT-sensoreiden avulla mittausten määrää ja laatua voidaan lisätä aiempaa halvemmallalla, jolloin alan tutkimuksissakin olisi syytä pohtia myös ei-sähköisten suureiden hyödynnettävyyttä vikojen havainnoinnissa ja ennakoinnissa aiempaa enemmän. Ääni, värähtely ja lämpötila ovat todennäköisesti yksiä potentiaalisimmista ei-sähköisistä suureista ilmaisemaan erilaisia poikkeustilanteita ja jatkuvasti kehittyvät sensori-, tietoliikenne- ja data-analytiikkatekniikat mahdollistavat yhä monimutkaisempien ja vaativampien mittausten toteuttamisen kustannustehokkaasti tulevaisuudessa. Vikojen ennakoinnin lisäksi tutkimusta pidemmän aikavälin vaikutuksia sähköverkon komponenttien elinkaareen esimerkiksi ympäristöolosuhteiden osalta tulisi lisätä. Tutkimusten perusteella tulee kehittää sähköverkkoympäristöön soveltuvia IoT-sensoreita ja muuta teknologiaa, sillä sähköverkkoympäristö ja sen vaatimukset poikkeavat monista muista teollisuuden aloista. Kehitystyö vaatii yhteistyötä tutkimuslaitosten lisäksi verkkoyhtiöiden kanssa, jotta sensoreista ja muista järjestelmän osista saadaan muodostettua järkeviä kokonaisratkaisuita.

Mittausten laatu ja luotettavuus on koko sensorointijärjestelmän toiminnan kannalta ehdoton vaatimus. Mittausten laadun ja luotettavuuden varmentamisessa ja parantamisessa on hyvin vahva rooli sekä sensoreiden ja niiden sisältämien antureiden että sähköverkkokomponenttien valmistajilla. Esimerkiksi muuntajavalmistajien tulisi tarjota mahdollisuus mitata muuntajan sisälämpötilaa tai muita suureita tehdasasennettujen antureiden kautta, jolloin mittausten laatu ja luotettavuus paranisi muuntajan pintaan kiinnitettyyn anturiin verrattuna huomattavasti. Jos sensorit asennettaisiin jo komponentin valmistusvaiheessa tehtaalla, niin paremman mittauslaadun lisäksi verkkoyhtiön ei tarvitsisi tehdä erikseen sensoreiden asennuksia, jolloin sensorien asennuskustannukset kokonaisuudessaan pienenisivät.

IoT-sensorit voivat tarjota myös laitevalmistajille hyvin arvokasta tietoa tulevien laite-tyyppien suunnitteluun, ongelmatapausten selvittämiseen ja palveluiden kehittämiseen.

Laitteen toiminnan aikana kerättyä dataa voidaan hyödyntää muun muassa laitesuunnittelussa ja valmistusprosessien laadunvarmennuksessa ja edesauttaa uusien palveluiden kehittämistä. Lisäksi sensorin sisältämien paikkatietoanturien avulla laitevalmistaja voi tehostaa omaa logistiikkaansa ja tarjota samalla parempaa tietoa toimitusajoista asiakkaalleen. Sensoroinnista voi siis hyötyä verkkoyhtiön lisäksi myös laitevalmistajat, joten verkkoyhtiöiden ja laitevalmistajien kannattaa tehdä yhteistyötä sensoroinnin kehityksessä.

Sähköverkosta kerättävän datan määrä tulee uuden sukupolven AMR-mittarien ja sensoreiden myötä kasvamaan räjähdysmäisesti, jolloin datan hallintaan ja analytiikkaan tarvitaan uudenlaisia ratkaisuita. Sähköverkon käyttövarmuuden vaatimukset tulevat jatkuvasti kasvamaan, jolloin vikaantumisten ehkäisy tulee jatkossa olemaan yhä arvokkaampaa. Sähköverkon vikojen ennakoimista ja pidemmän aikavälin muutoksia tunnistavia laske- tai koneoppimisalgoritmeja tulee tutkia ja kehittää, sillä data-analytiikka on ainoa keino muodostaa kerätystä datasta hyödyllistä tietoa datamäärien takia.

Vikaantumisista tarvitaan paljon dataa, jotta niitä on data-analytiikalla mahdollista ennakoita myöhemmin. Yhdellä sähköverkkokomponentilla voi olla useita erilaisia vikaantumismalleja eikä kaikista vikaantumisista välttämättä saada kerättyä tarvittavaa määrää dataa nopeasti. Sensoroinnin yleistyessä sähköverkkoyhtiöissä laiteaurioista kerätyn datan jakaminen yhteiseen käyttöön mahdollistaisi parempien laiteauriomallien muodostamisen, jolloin vikoja olisi mahdollista ennakoita entistä paremmin. Laiteaurioista kerätty data ja sen perusteella muodostetut vikaantumismallit voivat tulevaisuudessa olla hyvin arvokkaita ja niiden ympärille voi rakentaa uudenlaisia palveluliiketoimintamahdollisuuksia. Sähköverkkoyhtiöiden verkkotieto- ja muissa järjestelmissä on lisäksi huomattava määrä tietoa. Järjestelmien sisältämän tiedon laatu on tulevaisuudessa todella tärkeää, kun tietoja eri lähdejärjestelmistä yhdistellään, joten dokumentaation ja datan laatuun tulee panostaa jatkossa entistä enemmän. Olemassa olevien järjestelmien sisältämä tieto on oltava myös helposti siirrettävissä, mikä vaatii toimivia integraatorajapintoja järjestelmissä.

Sensoroinnin avulla laitteiston tarkastuskäyntejä on mahdollista optimoida kohdistamalla tarkastuskäynnit paremmin kerätyn datan perusteella. Tällöin toimenpiteisiin johtamattomia tarkastuskäyntejä voidaan vähentää ja oleellisia tarkastuskäyntejä lisätä. Turvallisuuden varmentaminen tarkastuskohteilla on toki tärkeää, jolloin yksikään tarkastuskäynti ei ole täysin turha. Turvallisuuden varmentamiseen olisi kuitenkin mahdollista kehittää korvaavia kustannustehokkaampia ratkaisuita, kuten joukkoistaminen. Esimerkiksi joukkoistamalla kerätyistä komponenttien kuvista koneoppimisalgoritmeja hyödyntäen voidaan havaita komponenteista otetuista kuvista puutteita automaattisesti, jolloin pelkkien kuvien ottaminen komponenteista voisi riittää.

10. YHTEENVETO

Tässä työssä selvitettiin Internet of Things (IoT, suom. esineiden internet) -sensorien hyödynnettävyyttä sähköjakeluverkon kunnonhallinnassa. Tutkimus pohjautuu kirjallisuuskatsauksiin, asiantuntijahaastatteluihin ja markkinakartoitukseen. Työn tavoitteina oli kartoittaa sopivat sensoroitavat sähköjakeluverkon komponentit, määritellä vaatimuksia asennettaville sensoreille ja muodostaa sensoroinnin taloudellisen kannattavuuden arviointiin soveltuva laskentamalli. Samalla tutkimuksessa selvitettiin IoT-sensorijärjestelmän rakennetta ja tutustuttiin olemassa oleviin ratkaisuihin.

Digitalisoituvan yhteiskunnan vaatimukset sähköverkon toimintavarmuudelle kasvavat jatkuvasti, sillä yhteiskunta on aiempaa enemmän riippuvainen sähköstä. Yleistyvä hajautettu tuotanto ja sähköautoilu asettaa omat lisähaasteensa sähköverkon rakenteen suunnitteluun ja ylläpitoon. Tällä hetkellä sähköverkkoa uudistetaan paljon nykyisen sähköverkon tullessa mekaanisen käyttökänsä loppuun ja sähkömarkkina-asetettujen toimitusvarmuusvaatimusten takia. Sähköverkkokomponenttien pitoajat ovat useita kymmeniä vuosia, jolloin kunnonhallinnan rooli verkkoyhtiön omaisuudenhallintaprosesseissa tulee kasvamaan.

IoT-sensoroinnin lähtökohtana on toiminnan tehostaminen ja sen kautta saatavat kustannussäästöt. Sähköverkon komponenttien kunnonvalvonta on tällä hetkellä yleisimmin aikaperusteista, jossa tietyin väliajoin komponenteille suoritetaan kuntotarkastuksia ja niiden perusteella laitteille suoritetaan tarvittavat kunnossapitotoimenpiteet. Tarkastusväli on monilla komponenteilla useita vuosia, jolloin hitaasti kehittyvät viat voivat kehittyä vapaasti vuosien ajan varsinaiseksi viaksi asti aiheuttaen sähkökatkoja asiakkaille ja kuluja verkkoyhtiöille. IoT-sensoreilla sähkölaitteiston kuntoa voidaan kustannustehokkaasti ja jatkuva-aikaisesti valvoa, mikä mahdollistaisi muun muassa hitaasti kehittyvien vikojen havainnoinnin ennen varsinaista vikaa. Pitkällä aikavälillä kerätyn datan avulla voidaan muodostaa tarvittava tietopääoma kuntoon perustuvaan kunnossapitostrategiaan siirtymiseen, jolloin kunnossapitotoimenpiteitä voidaan paremmin optimoida ja saavuttaa lisää kustannussäästöjä.

IoT-sensorointijärjestelmä koostuu useista eri teknologioista. Collinin ja Saarelaisen (2016) esittelemän teknologiapinon neljä ensimmäistä tasoa, eli sensorit, tietoliikenne, datavarasto ja analytiikka, ovat järjestelmän toiminnan kannalta ehdottomia, jolloin järjestelmän käyttöönottovaihetta voidaan yksinkertaistaa jättämällä teknologiapinon viimeisten tasojen käyttöönotto myöhemmäksi. Sähköverkko poikkeaa perinteisistä teollisuuden aloista, joissa teollisen internetin sovelluksia on jo käytetty, mikä asettaa sensorointijärjestelmän rakenteelle ja teknologiavalinnoille poikkeavia vaatimuksia, jotka tulee huomioida. Tärkeimpinä vaatimuksina sensoreiden kustannusten minimoimiseksi on

käytettävä yleisesti kaupallisesti saatavia sensoreita, niiden jälkiasennuksen komponentteihin on oltava helppoa, sensoreiden on toimittava vuosia vaativissa ympäristöoloissa ja tietoliikenneyhteyden on toimittava myös haja-asutusalueella hyvällä kuuluvuudella ja kantamalla.

Asiantuntijahaastatteluiden avulla tunnistettiin useita komponentteja, joiden kuntoa olisi mahdollista seurata IoT-sensoreilla, ja ne on esitelty taulukossa 2. Taulukossa on lisäksi esitelty komponenttien kunnonvalvontaan soveltuvia ilmiöitä ja kuvaavia suureita, joiden perusteella sensoreiden ominaisuuksia voidaan määritellä. Asiantuntijahaastatteluiden aikana nousseiden ilmiöiden seurannan toteutettavuutta selvitettiin kirjallisuuden avulla. Laitteen ympäristöolosuhteiden, käyntilämpötilan, värähtelyn ja äänen seuranta nousivat soveltuvimmiksi seurannan kohteiksi, sillä sekä asiantuntijanäkemyksen ja aikaisempien tutkimuksien perusteella ne soveltuvat hyvin eri tyyppisten laitteiden kunnonvalvontaan ja niiden seuranta on teknisesti melko yksinkertaista ja kustannustehokasta. Vaatimukset ja toiminnallisuudet eri komponenttien välillä poikkeavat toisistaan ja työn loppuosan tarkempi tarkastelu rajattiin tämän takia puistomuuntamoihin.

Vaatimusmäärittelyjen perusteella luotiin ehdotus luvussa 7 puistomuuntamoiden sensorointiin soveltuvasta IoT-sensorijärjestelmästä, jossa otetaan kantaa käytettäviin teknologioihin ja järjestelmän rakenteeseen. Liitteessä A esitetyn puistomuuntamon vikapuun, asiantuntijahaastatteluiden, aiempien tutkimusten ja teknisten reunaehtojen perusteella todettiin, että puistomuuntamon muuntajan ja kaapelipäätteiden kunnonvalvonta olisivat parhaiten soveltuvat kohteet sensoroinnille alkuvaiheessa. Muuntajan tapauksessa halutaan seurata muuntajan lämpötilaa ja värähtelyä ja kaapelipäätteissä tapahtuvia alkavia osittaispurkauksia voitaisiin seurata tietyn taajuusalueen ääntä seuraamalla kuvassa 10 esitetyn osittaispurkauksista syntyvän äänen taajuusanalyysin mukaisesti.

Sensoroinnin kannattavuus riippuu järjestelmän kustannusten ja kustannussäästöjen ja muun lisäarvon välisestä erotuksesta. Kaikkia kustannussäästöjä ja lisäarvoja on vaikea arvioida luotettavasti, mutta vikaantumisten ennakoinnista saatavia säästöjä keskeytyksistä aiheutuvan haitan (KAH) kuluissa voidaan arvioida historiatietojen perusteella tarkemmin. Puistomuuntamoiden KAH-kulujen keskimääräisten säästöjen laskentaan esiteltiin malli, jossa huomioidaan vikaantumisten vaikutus koko johtolähdöllä, kun yhdellä muuntamolla tapahtuu vika. Laskennassa käytettävät parametrit perustuvat keskimääräisyyksiin ja oletuksiin, joten niihin sisältyy jonkin verran epävarmuutta. Laskentaparametreille tehtiin herkkyysanalyysijä, joilla tunnistettiin tulosten kannalta merkittävimmät parametrit, joista tärkeimpänä voidaan pitää vikaantumisen ennakoinnin todennäköisyyttä, joka kuvaa kuinka monta prosenttia kaikista puistomuuntamoiden vikaantumisista voitaisiin sensoroinnin avulla estää. Laskentatuloksena puistomuuntamoiden sensoroinnilla voidaan keskimäärin saada noin 50 € säästö KAH-kuluissa per muuntamo 20 % todennäköisyydellä sensorin elinkaaren (6 vuotta) ajalta. Säästöt nousisivat 150 euroon, jos sensoroinnin avulla voitaisiinkin estää 60 % vikaantumisista. Lisäksi samanlainen tarkastelu

tehtiin Elenian varsinaisten johtolähtöjen tietojen avulla, jolloin tunnistettiin noin 50 parasta johtolähtöä, joiden yhteensä noin 1000 puistomuuntamon sensoroinnilla säästöt olisivat keskimäärin yli 100 € muuntamo kohden. Tämä tulos korostaa tarkemman tarkastelun ja sensorointikohteiden valinnan tärkeyttä sensoroinnin alkuvaiheissa kannattavuuden saavuttamiseksi.

IoT-sensorijärjestelmän kustannukset koostuvat sensoreista, niiden asennuksesta, tietoliikenteestä, datavarastoinnista, analytiikasta, laitehallinnasta ja kehityskuluista. Kokonaiskuluista ainoastaan kehityskulut eivät ole suoraan riippuvaisia asennettavien sensorien määrästä, sillä kehityskulut koostuvat enimmäkseen kiinteistä kustannuksista. Laskemalla järjestelmän kokonaiskulut ja kohdistamalla ne tasaisesti sensoroitaville muuntamoille saadaan määritettyä kustannukset per muuntamo, joiden pitäisi olla mahdollisimman lähellä sensoroinnilla saatavia säästöjä muuntamo kohden. Elenian kriittisimpien 1000 puistomuuntamon sensoroinnin kokonaiskulut olisivat noin 410 € ja säästöt KAH-kuluissa noin 100-150 euroa per muuntamo. Huomioimalla KAH-kulujen lisäksi muut säästöt, kuten vakavien vikojen aiheuttamien vahinkojen kustannukset, sensoroinnin kannattavuus voidaan todeta olevan lähes saavutettavissa jo nykyisillä kustannuksilla. Sensoroitavia kohteita voidaan kuitenkin valita vieläkin tarkemmin ja asentamalla sensoreita selvästi vikaherkimmille muuntamoille kannattavuutta voidaan parantaa entisestään, kun kustannussäästöt kasvavat. Sensorointia ei siis kannata alkuvaiheissa tehdä kaikkialle sähköverkkoon, vaan kohteet tulee valita tarkemmin, jotta kannattavuus voidaan saavuttaa. Kustannukset tulevat myös jatkuvasti laskemaan, kun teollinen internet yleistyy entisestään, jolloin lähitulevaisuudessa sensorointi on todennäköisesti jo taloudellisesti hyvin kannattavaa. Data-analytiikka ja koneoppiminen vaativat huomattavan määrän dataa ennen kuin niiden potentiaali kunnonhallinnassa voidaan realisoida. Tämän takia datan kerääminen kannattaisi aloittaa mahdollisimman pian, jotta järjestelmän käytöstä muodostuvaa kilpailuetua voidaan hyödyntää mahdollisimman pian.

Työssä esiteltiin Elenialla suoritetun IoT-sensoripilotin tuloksia, jossa sensorointia testattiin ensimmäistä kertaa seuraamalla puistomuuntamon ympäristöolosuhteita ja ovien kiinnioloa. Esiteltyt pilottikohteet olivat maantieteelliseltä sijainniltaan hyvin lähekkäin, mutta ympäristöolosuhteissa havaittiin kuitenkin merkittäviä eroja. Erot voivat selittyä komponenttien valmistajien ja asennustapojen eroilla. Lämpötila- ja kosteusolosuhteet voivat pitkällä aikavälillä vaikuttaa komponenttien elinkaariin, joten tulevaisuudessa niitä voidaan hyödyntää määriteltäessä kuntoluokituksia niille. Analytiikassa ei voida kuitenkaan hyödyntää vain maantieteellisen alueen yleisiä säätietoja, sillä tällöin komponenttien väliset eroavaisuudet tietyllä alueella jäisivät huomioimatta, vaan niitä tulee seurata komponenttikohtaisesti.

Jatkokehitystarpeita ilmeni työn aikana paljon, sillä teollinen internet on vielä täysin uutta sähköverkkoalalla. IoT-sensoreilla voidaan mitata kustannustehokkaasti erilaisia suureita, kuten lämpötilaa, värähtelyä tai ääntä, joita ei aiemmin sähköverkoista ole mitattu. Näiden suureiden hyödynnettävyyttä vikojen ennakoinnissa tai muissa toiminnoissa ei

ole tutkittu vielä kovinkaan paljoa. Tutkimusta koneoppimisalgoritmien ja muiden data-analytiikkatyökalujen kehityksestä sähköverkkoalan tarpeisiin tulisi myös lisätä. Yhteistyötä verkkoyhtiöiden ja sensori- ja sähköverkkokomponenttivalmistajien välillä pitäisi lisätä, jotta komponenteista saatava tieto hyödyttäisi verkkoyhtiöiden lisäksi komponenttivalmistajaa sen tuotekehityksessä ja logistiikassa. Ensimmäisessä vaiheessa tulee selvittää, miten paljon sensoreilla todellisuudessa voidaan ennakoida vikoja, sillä vikaantumisten ennakkoinnin todennäköisyydellä on hyvin merkittävä vaikutus kannattavuuteen.

LÄHTEET

Sähköturvallisuuslaki 1135/2016. 2016. Oikeusministeriö.

Sähkömarkkinalaki 588/2013. 2013. Oikeusministeriö.

ACKOFF, R.L., 1989. From data to wisdom. *Journal of applied systems analysis*, **16**(1), pp. 3-9.

AMAZON WEB SERVICES, 2019a-last update, AWS IoT Analytics Pricing. Available: <https://aws.amazon.com/iot-analytics/pricing/> [Mar 11, 2019].

AMAZON WEB SERVICES, 2019b-last update, AWS IoT Core Pricing - Amazon Web Services. Available: <https://aws.amazon.com/iot-core/pricing/> [Mar 11, 2019].

AMAZON WEB SERVICES, 2019c-last update, AWS IoT Device Management Pricing - Amazon Web Services. Available: <https://aws.amazon.com/iot-device-management/pricing/> [Mar 11, 2019].

AMAZON WEB SERVICES, 2018-last update, Top Use Cases for Industrial IoT Applications. Available: <https://pages.awscloud.com/industrial-iot-top-use-cases-ebook.html> [Jan 4, 2019].

BEDI, G., VENAYAGAMOORTHY, G.K., SINGH, R., BROOKS, R.R. and WANG, K., 2018. Review of Internet of Things (IoT) in Electric Power and Energy Systems. *IEEE Internet of Things Journal*, **5**(2), pp. 847-870.

BRODERSSON, A.L., JÜRGENSEN, J.H. and HILBERT, P., 2016. *Towards Health Assessment: Failure Analysis and Recommendation of Condition Monitoring Techniques for Large Disconnecter Populations*. CIRED.

CIGRE BROCHURE 343, 2008. *Recommendations for Condition Monitoring and Condition Assessment Facilities for Transformers*. CIGRE.

CIGRE BROCHURE 642, 2015. *TRANSFORMER RELIABILITY SURVEY*. CIGRE.

CLIMATE CHANGE CONNECTION, 2016-last update, CO2 equivalents. Available: <https://climatechangeconnection.org/emissions/co2-equivalents/> [May 13, 2019].

COLLIN, J. and SAARELAINEN, A., 2016. *Teollinen internet*. Helsinki: Talentum.

DIGITA, 2019a. *Digita Oy:n IoT-pilvipalvelu*.

DIGITA, 2019b-last update, IoT LoRaWAN-verkon peittokartta. Available: https://www.digita.fi/yrityksille/iot/iot_lorawan-verkon_peittokartta [Apr 5, 2019].

ELENIA, 2019a-last update, Älykäs sähköverkko | Elenia. Available: <https://www.elenia.fi/sahko/innovaatiot> [Apr 29, 2019].

ELENIA, 2019b-last update, Elenia intranet2019].

ELENIA, 2019c-last update, Elenia ja yhteiskunta | Elenia Group. Available: /fi/vastuullisuus/elenia-ja-yhteiskunta [Jan 16, 2019].

ELENIA, 2018a. *Elenian kunnossapitostrategia*.

ELENIA, 2018b-last update, Fortum ja Elenia rakentavat sähkön varastointia sähköjärjestelmän tasapainon ylläpitoon ja sähkökatkojen vähentämiseen. Available: <https://www.elenia.fi/uutiset/fortum-ja-elenia-rakentavat-s%C3%A4hk%C3%B6n-varastointia-s%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelm%C3%A4n-tasapainon-yll%C3%A4pitoon-ja> [Jun 4, 2019].

ELENIA, 2018c-last update, Sähköverkon turvallisuus. Available: <http://www.elenia.fi/sahko/turvallisuus> [Oct 12, 2018].

ELOVAARA, J. and HAARLA, L., 2011. *Sähköverkot 2: verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet*. Helsinki: Otatieto.

EMBLEMSVÅG, J., 2003. *Life-Cycle Costing: Using Activity-Based Costing and Monte Carlo Methods to Manage Future Costs and Risks*. Wiley.

ENERGIATEOLLISUUS, *Verkostosuositus KA 2:10*. Adato Energia: Energiateollisuus Ry.

ENERGIATEOLLISUUS RY, 2018-last update, Sähkön keskeytystilasto 2017. Available: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/sahkon_keskeytystilasto_2017.html [Apr 23, 2019].

ENERGIIVIRASTO, 2019-last update, Sähkönjakeluverkon verkkokomponentit ja yksikköhinnat 2016 - 2023. Available: <https://www.energiavirasto.fi/web/guest/verkkokomponentit-ja-yksikkohinnat-2016-2023> [Feb 28, 2019].

ENERGIIVIRASTO, 2018a-last update, Sähköverkkotoiminnan tunnusluvut vuodelta 2017. Available: https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/S%C3%A4hk%C3%B6verkkotunnusluvut+2017_2.xlsx/05bf97ab-da4e-406a-9bbe-bdf3f333b430 [21.1., 2019].

ENERGIIVIRASTO, 2018b-last update, Sähköverkot. Available: <https://www.energiavirasto.fi/sahkoverkot> [26.10., 2018].

ENERGIIVIRASTO, 2018c. *Valvontamenetelmät neljännellä 1.1.2016 – 31.12.2019 ja viidennellä 1.1.2020 – 31.12.2023 valvontajaksolla*; Energiavirasto.

ENERGIIVIRASTO, 2017-last update, Sähköverkkotoiminnan tunnusluvut vuodelta 2016. Available: <https://www.energiavirasto.fi/sahkoverkkotoiminnan-tunnusluvut-2016> [Jan 24, 2019].

ERONEN, M., 2016. Customer Value and Profitability of Power Transformer Online DGA Monitoring.

FINGRID, 2018a-last update, Fingrid hakee uusia ideoita sähköverkon eristimien kunnonvalvontaan. Available: <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2018/fingrid-hakee-uusia-ideoita-sahkoverkon-eristimien-kunnonvalvontaan/> [Jan 11, 2019].

FINGRID, 2018b-last update, Fingrid rakentaa digitaalisen sähköasemapilotin Kotkan Pernoonkoskelle. Available: <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2018/fingrid-rakentaa-digitaalisen-sahkoasemapilotin-kotkan-pernoonkoskelle/> [3.1., 2019].

FINGRID, -11-23T06:30:56+00:00, 2016-last update, Loissähkön kompensointiin on järkeviä ratkaisuja. Available: <https://www.fingridlehti.fi/loissahkon-kompensointiin-jarkevia-ratkaisuja/> [Mar 1, 2019].

FINGRID, 2009-last update, Fingridin voimajohtopylväs Tammelassa kaatui ristiharuksen kiinnikkeen pettämisen vuoksi. Available: <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2009/fingridin-voimajohtopylvas-tammelassa-kaatui-ristiharuksen-kiinnikkeen-pettamisen-vuoksi/> [April 2, 2019].

FRANZÉN, A. and KARLSSON, S., 2007. *Failure Modes and Effects Analysis of Transformers*. Royal Institute of Technology, KTH.

GARTNER, 2018-last update, 5 Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018. Available: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/> [Jan 3, 2019].

GARTNER, 2015-last update, Gartner's 2015 Hype Cycle for Emerging Technologies Identifies the Computing Innovations That Organizations Should Monitor. Available: <https://www.gartner.com/newsroom/id/3114217> [Jan 4, 2019].

HASHMI, M., LEHTONEN, M. and HÄNNINEN, S., 2013. Effect of Climate Change on Transformers Loading Conditions in the Future Smart Grid Environment. *Open Journal of Applied Sciences*, **3**(2), pp. 24-29.

HERMANN, M., PENTEK, T. and OTTO, B., 2016. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios, 2016, IEEE, pp. 3928-3937.

HONG, K., HUANG, H., FU, Y. and ZHOU, J., 2016. A vibration measurement system for health monitoring of power transformers. *Measurement*, **93**, pp. 135-147.

JÄRVINEN, J., 2017. *IoT-verkkoteknologioiden vertailu*, Metropolia Ammattikorkeakoulu.

JÄRVIÖ, J., 2007. *Kunnossapito*. 4. uud. p. edn. Helsinki: KP-Media.

JURVANSUU, M. AILISTO, H. SIHVONEN, S. TUKEVA, P. AIKIO, J. BELLONI, K. VIRKKUNEN, R. KORTELAJAINEN, H. HEILALA, J. RAUMA, T. ROINE, M.

GILS, M. VENTÄ, O. JANTUNEN, E. KATAINEN, T. LEHTONEN, M. HEINONEN, R. MERILAHTI, J. KETOMÄKI, J. HAST, J. PELTOLA, J. MÄKELÄ, S. KÖNÖNEN, V. AHOLA, J. JUNTUNEN, E. KATASONOV, A. HILTUNEN, J. AIRAKSINEN, M. MÄKI, K. STRÖMMER, E. RÖNKÄ, K., 2013. *Productivity leap with IoT. Visions of the Internet of Things with a special focus on Global Asset Management and Smart Lighting*. Espoo: VTT.

KENTTÄLÄ, A., 2016. *Jakeluverkon loistehohallinnan suunnitelma*, Tampereen teknillinen yliopisto.

KIM, T., MAKWANA, D., ADHIKAREE, A., VAGDODA, J.S. and LEE, Y., 2018. Cloud-based battery condition monitoring and fault diagnosis platform for large-scale lithium-ion battery energy storage systems. *Energies*, **11**(1), pp. 125.

KIVEKÄS, O., 2012. *Toimittajaloukku ja kuinka se vältetään*.

KOIVUMAA, M., 2019-last update, Uuden teknologian avulla tavoitellaan varmuutta sähköjakeluun. Available: <https://www.asiakaspolar.fi/uutiset/uuden-teknologian-avulla-tavoitellaan-varmuutta-sahkonjakeluun.html> [Apr 27, 2019].

KORTELAINEEN, H., HANSKI, J., KUNTTU, S., KINNUNEN, S. and MARTTONEN-AROLA, S., 2017. *Fleet service creation in business ecosystems - from data to decisions. Fleet information network and decision-making; Fleet service creation in business ecosystems - from data to decisions. Fleet information network and decision-making*. VTT Technical Research Centre of Finland.

KUOSA, D., 2018-last update, Digitaalinen Sähköasema [Homepage of Fingrid], [Online]. Available: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/toimikunnat/neuvottelukunta/digitaalinen-sahkoasema-9-2018.pdf> [14.1., 2019].

LAITINEN, T., LYLÄ, T., STENSTRAND, M., TAMMI, J., ALBRECHT, R., NYBERG, J. and SAKSELA, K., 2018. *Wireless sensor units for acoustic monitoring of switching devices*. e-cigre.org: CIGRE.

LAKERVI, E. and PARTANEN, J., 2009. *Sähkönjakelutekniikka*. 2. uud. p. edn. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press.

LAPPI, T., 2019. *Kunnonvalvontamittausten kohdentaminen keskijännitekaapeleille*.

LORA ALLIANCE, 2017. *LoRaWAN™ SECURITY*. LoRa Alliance.

LUUKKO, T., 2018. Seuraavan sukupolven AMR-järjestelmän asiakas- ja markkinaintegraatioiden kehittäminen.

M. HAJIKHANI, L. FABRICE and B. L. AGBA, 2018. An Autonomous Wireless Sensor Network in a Substation Area Using Wireless Transfer of Energy. *IEEE Access*, **6**, pp. 62352-62360.

MARTINSUO, M. and KÄRRI, T., 2017. *Teollinen internet uudistaa palveluliiketoimintaa ja kunnossapitoa*. 1. painos. edn. Helsinki: Kunnossapitoyhdistys Promaint ry.

MOTIVA, 2018-last update, Elinkaarikustannuslaskenta – LCC (Life Cycle Costing). Available: [https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/elinkaarikustannuslaskenta_lcc_\(life_cycle_costing\)](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/elinkaarikustannuslaskenta_lcc_(life_cycle_costing)) [Jan 15, 2019].

NCD, 2019-last update, Industrial Long Range IoT Wireless Vibration Temperature Sensor. Available: <https://store.ncd.io/product/iot-long-range-wireless-vibration-and-temperature-sensor/> [Apr 26, 2019].

NEVES, F., 2017-last update, LittleBee: Acoustic Sensor For Measuring Bee Hissing Level. Available: <https://www.hackster.io/the-beeinformedteam/littlebee-acoustic-sensor-for-measuring-bee-hissing-level-960f6a> [May 15, 2019].

NIEMI, H., 2018. Erottimien ja erotinautomaation elinkaaren hallinta.

OPTIWISE, 2019-last update, Optiwise – IoT-sovellus energiahallintaan. Available: <http://optiwise.fi/wordpress/> [Apr 2, 2019].

PAHKALA, T., UIMONEN, H. and VÄRE, V., 2018-last update, Älyverkkotyöryhmän loppuraportti. Available: <https://tem.fi/julkaisu?pubid=URN:ISBN:978-952-327-346-7> [Jun 19, 2019].

PARTANEN, J., 2018. *Sähkönsiirtohinnot ja toimitusvarmuus*. Työ- ja elinkeinoministeriö.

PIIRONEN, M., 2015. *Sähköasemien kunnossapitoprosessin kehittäminen; Development of Substations maintenance*.

RAYNOR, M. and COTTELEER, M., 2015-last update, The more things change: Value creation, value capture, and the Internet of Things. Available: <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/deloitte-review/issue-17/value-creation-value-capture-internet-of-things.html> [Nov 5, 2018].

REKA KAAPALI, 2019-last update, Reka Kaapeli tuo älykkäät kaapelikelat markkinoille. Available: <https://www.reka.fi/uutiset/reka-kaapeli-tuo-alykkaat-kaapelikelat-markkinoille> [Apr 27, 2019].

ROIMA, A., 2018. Sähköaseman kytkinlaitteista kerätyn anturidatan hyödyntäminen ennustavassa kunnossapidossa.

ROWLEY, J., 2007. The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy. *Journal of Information Science*, **33**(2), pp. 163-180.

RUNDE, M., AURUD, T., LUNDGAARD, L.E., OTTESEN, G.E. and FAUGSTAD, K., 1992. Acoustic diagnosis of high voltage circuit-breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **7**(3), pp. 1306-1315.

SÄHKÖTIETO, 2016. *ST 52.30.02 Akustot ja varaajat, valinta ja mitoittaminen*. Sähköinfo Oy.

SALO, I., 2013. *Big data : tiedon vallankumous*. Jyväskylä: Docendo.

SANASTOKESKUS, T., 2010-last update, Sosiaalisen median sanasto (TSK 40) [Homepage of Sanastokeskus TSK], [Online]. Available: http://www.tsk.fi/tsk/fi/sosiaalisen_medan_sanasto_tsk_40-513.html [May 8, 2019].

SEO, J., 2018. A Practical Scheme for Vibration Signal Measurement-Based Power Transformer on-Load Tap Changer Condition Monitoring. , pp. 1-4.

SHIRI, A., GHOLAMI, A. and SHOULAIE, A., 2011. Investigation of the ambient temperature effects on transformer's insulation life. *Electrical Engineering*, **93**(3), pp. 193-197.

SINGH, S., 2018-last update, Top 20 IoT Platforms in 2018 (Updated). Available: <https://internetofthingswiki.com/top-20-iot-platforms/634/> [Jan 4, 2019].

SINHA, R.S., WEI, Y. and HWANG, S., 2017. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, **3**(1), pp. 14-21.

SOLITA, 2019-last update, API:en hallinta. Available: <https://www.solita.fi/apien-hallinta/> [Apr 23, 2019].

SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO, 2011. *SFS-EN 50160*.

TALOTOHTORI, 2019-last update, Talotohtori 2.0 palvelut. Available: <https://www.talotohtori.fi/palvelut> [April 2, 2019].

TELIA OYJ, 2019a-last update, NB-IOT Starter Kit. Available: <https://www.teliacompany.com/en/about-the-company/internet-of-things/nb-iot/NBIOOrder/?intcmp=b2b-nb-iot-tilaa> [Apr 11, 2019].

TELIA OYJ, 2019b-last update, Telian verkkokartta - kuuluvuus ja tiedonsiirtoyhteyden nopeus. Available: <https://www.telia.fi/asiakastuki/verkko/verkko/verkkokartta> [Apr 5, 2019].

TIENARI, I., 2018. *Pienjännitteisen maakaapeliverkon ennakoiva vianhavainnointi*, Tampere University of Technology.

TSAI, P., 2017-last update, Future tech: Storage capacity in the year 2030 ... and beyond. Available: <https://community.spiceworks.com/topic/1993877-future-tech-storage-capacity-in-the-year-2030-and-beyond> [Dec 18, 2018].

TUKES, 2018-last update, Sähköasennukset ja sähkötyöt. Available: <https://tukes.fi/tieto-tukesista/materiaalit/sahkoasennukset-ja-sahkotyot> [Jan 17, 2019].

TYÖ- JA ELINKEINOMINISTERIÖ, 2019-last update, Älyverkot. Available: <https://tem.fi/alyverkot> [Jan 23, 2019].

ULBERT, S., Sep 15, 2015-last update, The Difference Between Predictive Maintenance and Preventive Maintenance. Available: <https://www.coresystems.net/blog/the-difference-between-predictive-maintenance-and-preventive-maintenance> [Nov 7, 2018].

VAISALA, 2019-last update, Optimus™ OPT100 DGA-kaasuanalysaattori. Available: <https://www.vaisala.com/fi/products/anturit-ja-muut-mittauslaitteet/teollisuuden-mittalaitteet/opt100> [Feb 28, 2019].

VÄKEVÄINEN, K., 2015. *Surface Discharge Phenomena in Medium Voltage Terminations*, Aalto University.

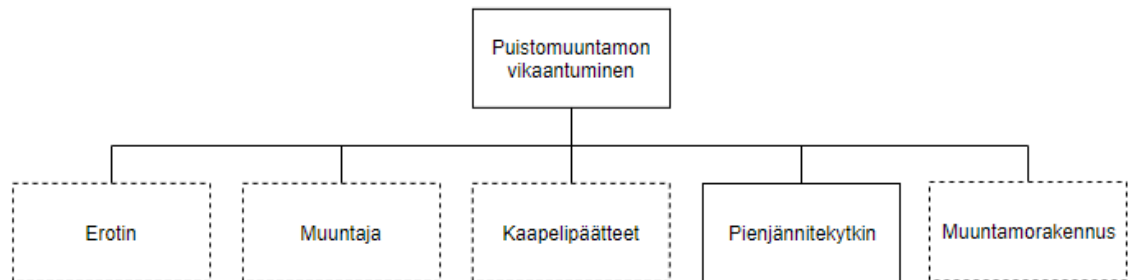
VERHO, P., PYLVÄNÄINEN, J., JÄRVINEN, J., ORAVASAARI, M., KUNTTU, S. and SARSAMA, J., 2005. Luotettavuuspohjainen verkostanalyysi (LuoVa) projektin loppuraportti.

WOODWARD, D.G., 1997. Life cycle costing—Theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, **15**(6), pp. 335-344.

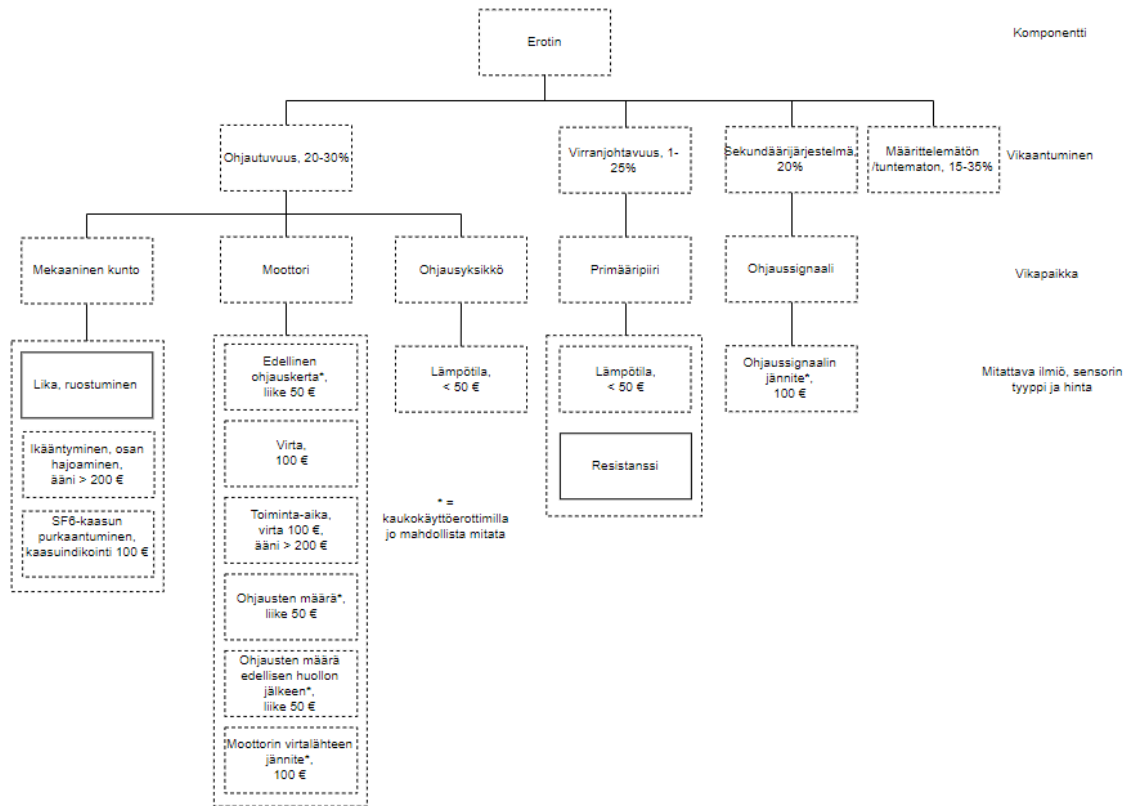
ZHANG, X. and YAO, X., 2012. Experiments and Simulations on the vibration of shunt reactor and the noise control. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, **43**(1), pp. 52-57.

LIITE A: PUISTOMUUNTAMON VIKAPUU JA SENSOROINTIMAH- DOLLISUUDET

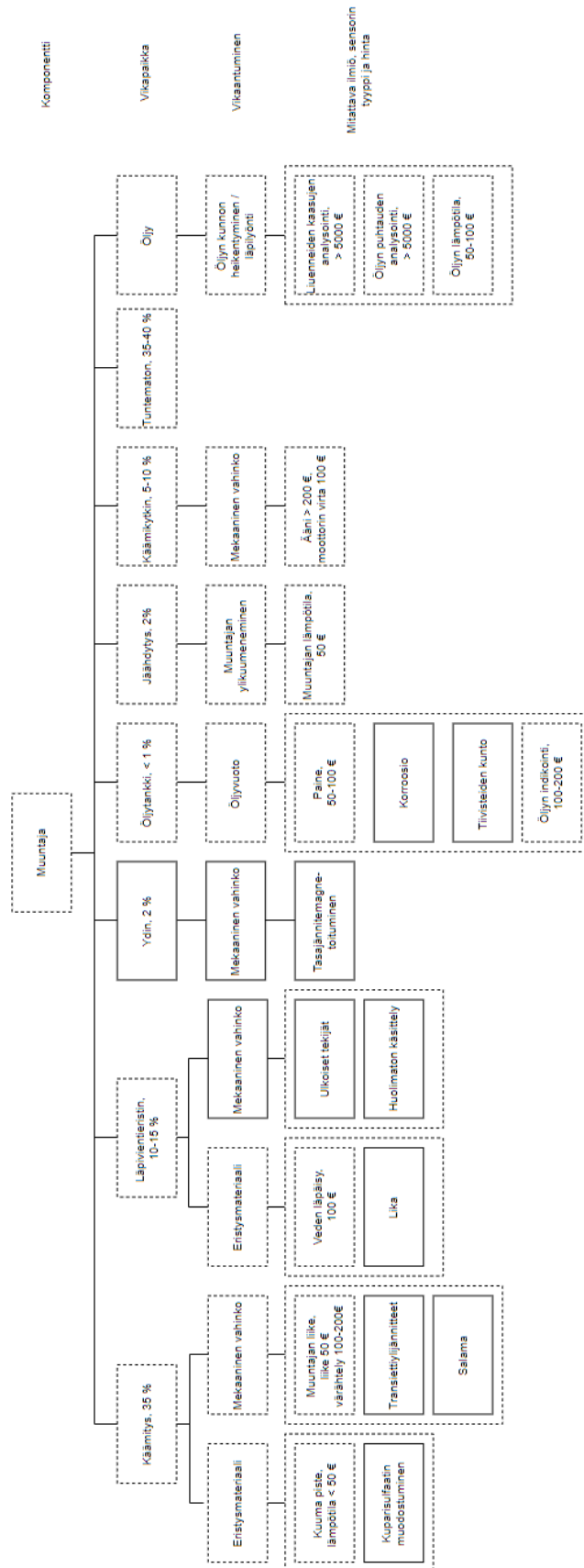
Vikapuu on muodostettu puistomuuntamon eri komponenteille asiantuntijahaastattelun ja tutkimusten perusteella. Kaikkia mahdollisia vikailmiöitä ei olla kuvattu, mutta vikapuu sisältää yleisimmät vikaantumismallit. Katkoviivoitus tarkoittaa, että kohde tai vikamekanismi olisi mahdollista sensoroida. Puistomuuntamon pienjännitekytkimen sensorointi ei ole asiantuntijahaastattelun perusteella kannattavaa. Mahdolliset prosentit kuvaavat kyseisen vikaantumistyyppin osuutta kaikista vioista tutkimuksiin perustuen. Sensoreiden hinnat ovat suuntaa antavia arvioita nykyisiin markkinahintoihin ja mittausten monimutkaisuuteen perustuen. Yksinkertaisten mittausten hinnat tulevat lähivuosina todennäköisesti laskemaan entisestään kilpailun myötä, kun taas monimutkaisempia mittauksia tekeviä sensoreita ei markkinoilla ole vielä laajasti saatavilla, jolloin hinnat eivät tule laskemaan yhtä merkittävästi.



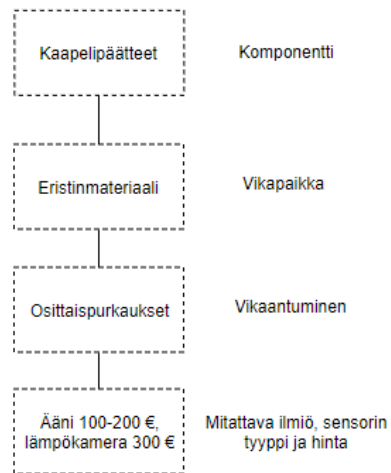
Puistomuuntamon erottimen vikapuu, perustuu asiantuntijahaastatteluun ja Brodersson et al. tutkimukseen. Prosentit sisältävät myös ilmajohtoerottimien vikoja (Brodersson, Jürgensen et al. 2016)



Muuntajan vikapuu, perustuu asiantuntijahaastatteluun sekä Franzénin ja Karssonin tutkimukseen. (Franzén, Karlsson 2007)



Kaapelipäätteiden vikapuu, perustuu asiantuntijahaastatteluihin



Muuntamorakennuksen vikapuu, perustuu asiantuntijahaastatteluun

