

Jussi Ristiniemi

**IOT-POHJAINEN MITTAUSRATKAISU
MUUNTAJAN SUOJA-ALTAAN
PINNANKORKEUDEN MITTAAMISEEN
JA ÖLJYN TUNNISTAMISEEN**

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Kari Lappalainen
Ohjaaja: Mika Vartiainen
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Jussi Ristiniemi: IoT-pohjainen mittausratkaisu muuntajan suoja-altaan pinnankorkeuden mittaamiseen ja öljyn tunnistamiseen
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Kandidaatintyö
Toukokuu 2022

Esineiden internet (engl. Internet of Things, IoT) on 2010-luvulla käynnistynyt teknologinen siirtymä, jonka keskeisenä teemana on internetiin yhdistetyt esineet ja asiat. Esineiden tuottaman datan avulla yritykset voivat saada liiketoiminnallista hyötyä, luoda uusia liiketoimintamalleja ja helpottaa kuluttajien arkea. Tässä työssä tutkitaan, voitaisiinko esineiden internetiä soveltaa muuntajan suoja-altaaseen kertyvän sadeveden pinnankorkeuden mittaamiseen ja mahdollisesti sen pinnalla olevan öljyn tunnistamiseen. Työn tavoitteena on tutkia, mitkä mittausteknologiat soveltuisivat mittauksiin, sekä tutkia niiden etuja, rajoitteita ja hintaluokkia.

Työn aihe liittyy vahvasti yritysmaailmaan ja kaupallisiin ratkaisuihin, minkä vuoksi työssä käytettiin lähteinä kirjojen ja tieteellisten artikkeleiden lisäksi myös verkkosivuja, yritysten omia julkaisuja ja tuotteiden datalehtiä. Lisäksi lähteenä käytettiin Fingridin sisäisiä esitysmateriaaleja ja ohjeita, suoja-altaan pinnankorkeuden mittaustietoja ja asiantuntijahaastatteluja.

Työ jakaantuu neljään osaan. Ensimmäisessä osassa käsitellään esineiden internetin määritelmiä, sekä esineiden internetin ratkaisuissa yleisesti käytettyjä teknologioita. Toisessa osassa esitellään kantaverkkoyhtiö Fingridin kunnossapitomalli, ja IoT-ratkaisujen vaikutus siihen. Kolmannessa osassa esitellään eri mittausteknologioita veden pinnankorkeuden mittaamiseen ja öljyn tunnistamiseen. Jokaisesta mittausteknologiasta esitellään myös kaupallinen anturi, ja arvioidaan sen soveltuvuutta työn sovelluskohteeseen. Neljännessä osassa arvioidaan käytössä olevan mittaustavan ja mahdollisen IoT-mittauksen aiheuttamia kustannuksia. Mittaustapojen välisten kustannuserojen ja mittaukseen vaadittavien komponenttien hintojen avulla arvioidaan mittauksen kannattavuutta.

Tutkimus osoittaa, että veden pinnankorkeuden mittaaminen ja öljyn tunnistaminen olisi toteutettavissa lukuisilla eri mittausteknologioihin perustuvilla antureilla. Öljyn tunnistavien anturien korkean hankintahinnan vuoksi IoT-mittaus ei kuitenkaan näyttäydy taloudellisesti kannattavana. Kannattavuuden arvioinnissa on toisaalta tehty tiettyjä ennako-oletuksia esimerkiksi tuottovaatimuksesta ja pitoajasta, mikä vaikuttaa siihen, kuinka kannattavaksi sijoitus arvioidaan.

Avainsanat: Internet of Things, IoT, esineiden internet, kunnossapito

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ESINEIDEN INTERNET	3
2.1 Esineiden internetin määritelmät	3
2.2 IoT-järjestelmän rakenne	6
2.2.1 Pinomallit	6
2.2.2 Anturit	7
2.2.3 Tietoliikenne	8
2.2.4 Tietovarasto	10
2.2.5 Analytiikka	11
2.2.6 Alusta	12
3. ESINEIDEN INTERNETIN SOVELLUKSET KANTAVERKON KUNNONVALVONNASSA	14
3.1 Kantaverkon kunnonvalvonta	14
3.2 Katkaisijoiden IoT-valvonta	15
4. MITTAUSTAVAT	17
4.1 Mittaustilanne	17
4.2 Veden pinnankorkeuden mittaus	18
4.2.1 Kapasitiivinen	18
4.2.2 Hydrostaattinen	22
4.2.3 Ultraääni	24
4.2.4 Vapaan tilan tutka	25
4.2.5 Ohjatun aallon tutka	26
4.3 Öljyn tunnistaminen veden pinnalta	27
4.3.1 Öljykerroksen paksuus	27
4.3.2 UV-fluorometria	28
4.3.3 Näkyvä valo	30
4.3.4 Infrapuna ja polarisaatio	30
5. MITTAUKSEN KANNATTAVUUS	32
5.1 Aikaperusteisen mittaustavan kustannukset	32
5.2 IoT-mittauksen kustannukset	34
5.2.1 Suoja-altaan tyhjennys	34
5.2.2 IoT-järjestelmä	38
5.3 Säästöt	38
5.4 Investointilaskelmat	39
5.5 Ehdotus mittausratkaisusta	41
6. YHTEENVETO	43
LÄHTEET	46
LIITE A: SUOJA-ALTAAN PINNANKORKEUDEN MITTAUSTULOKSET VUOSILTA 2007–2019	53

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A/D-muunnin	engl. analog-to-digital converter, analogia-digitaalimuunnin
BLE	engl. Bluetooth Low Energy, vähävirtainen Bluetooth-teknologia
CPS	engl. Cyber Physical Systems, kyberfyysiset järjestelmät
GPU	engl. Graphics Processing Unit, näytönohjain, grafiikkasuoritin
IloT	engl. Industrial Internet of Things, teollinen esineiden internet, teollinen internet
IoT	engl. Internet of Things, esineiden internet
LPWAN	engl. Low Power Wide Area Network, vähävirtainen suuralueverkko
NFC	engl. Near Field Communication, lyhyen kantaman langaton tunnistusteknologia
PLC	engl. Power Line Communications, tiedonsiirto sähköverkossa
PoE	engl. Power over Ethernet, virransyöttö Ethernetin kautta
RFI	engl. Radio Frequency Interference, radiotaajuinen interferenssi
RFID	engl. Radio Frequency Identification, radiotaajuinen tunnistus
SQL	engl. Structured Query Language, relaatiotietokantojen kyselykieli
SWIR	engl. Shortwave Infrared, lyhytaaltainen infrapunasäteily

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Kytkinlaitteet, IoT-valvonta [48].</i>	16
Kuva 2.	<i>Muuntajan suoja-allas [52].</i>	18
Kuva 3.	<i>HPT621 tasoanturi [59, s. 2].</i>	20
Kuva 4.	<i>Fischer NC56 tasoanturi [63, s. 1].</i>	21
Kuva 5.	<i>Trumen TLU ultraäänianturi [77, s. 1].</i>	25
Kuva 6.	<i>Trumen TLR32 ohjatun aallon tutka [79, s. 1].</i>	27
Kuva 7.	<i>Vuosittainen suoja-altaan kumulatiivinen pinnankorkeus.</i>	35
Kuva 8.	<i>3:n kuukauden sademäärät luokittain.</i>	36

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1. Esimerkki suoja-altaassa olevan öljyn määrästä ja öljykerroksen paksuudesta.</i>	28
<i>Taulukko 2. Sähköverkkoasennuksen tuntiveloituksen arviointi.</i>	32
<i>Taulukko 3. Tarkastukseen kuluvan ajan laskemiseen tarvittavat tiedot.</i>	33
<i>Taulukko 4. Tarkastustyön vuosittainen kustannus erilaisilla tuntiveloituksilla.</i>	33
<i>Taulukko 5. Suoja-altaan tyhjennysrajan laskeminen.</i>	35
<i>Taulukko 6. Veden käytettävissä olevat syvyydet eri liikkumavaroilla.</i>	36
<i>Taulukko 7. Altaan vuosittaiset tyhjennyskerrat eri tyhjennysrajoilla.</i>	37
<i>Taulukko 8. Suoja-altaan tyhjentämiskustannukset eri tyhjennysrajoilla.</i>	37
<i>Taulukko 9. IoT-järjestelmän komponenttien hinnat.</i>	38
<i>Taulukko 10. IoT-mittauksella saavutettavat säästöt.</i>	39
<i>Taulukko 11. IoT-mittauksen vuosittaiset kassavirrat ja nettonykyarvo.</i>	40
<i>Taulukko 12. Pinnankorkeuden IoT-mittauksen vuosittaiset kassavirrat ja nettonykyarvo.</i>	41
<i>Taulukko 13. Pinnankorkeuden mittausteknologioiden vertailua.</i>	44
<i>Taulukko 14. Öljyn tunnistamiseen soveltuvien mittausteknologioiden vertailua.</i>	44

1. JOHDANTO

Vuonna 2019 internetiin liittyi noin 127 uutta laitetta joka sekunti. Internetiin liitettyjen laitteiden arvioidaan tuottavan noin 73 tsettatavua dataa vuonna 2025. Tämä datamäärä on noin nelinkertainen verrattuna 2019 tuotettuun datamäärään. [1] Laitteiden sekä datan suuri määrä ovat 2010-luvulla alkaneen teknologisen siirtymän, esineiden internetin, tunnusmerkkejä. Esineiden internetin ytimessä ovat ennen kaikkea esineet, jotka voivat olla käytännössä mitä tahansa. Esineet tuottavat dataa, jonka perusteella kyetään parempaan päätöksentekoon. Kuluttajille esineiden internet voi tarkoittaa esimerkiksi älykelloa tai älykästä vesimittaria, joka tarkkailee unen laatua tai ilmoittaa vuotavasta hanasta. Yrityksille esineiden internet voi merkitä laitekannan huoltoa anturien tuottaman datan perusteella aikaperusteisen kunnossapidon sijaan. Esineiden internet on siis merkittävä teknologinen murros, mistä kertoo esimerkiksi siihen liittyvä Saksan valtiollinen tutkimushanke Industrie 4.0, joka viittaa neljänteen teolliseen vallankumoukseen [2, s. 125].

Tässä työssä tutkitaan erilaisia mittausteknologioita, joilla muuntajan suoja-altaan veden pinnankorkeuden mittaus ja öljyn tunnistus veden pinnalta voitaisiin toteuttaa. Työssä käsitellään vain sellaisia mittausteknologioita, joihin perustuvat anturit eivät sisällä liikkuvia osia. Tällä tavalla mittauksesta saadaan mahdollisimman luotettava, kun antureissa ei ole liikkuvia osia, jotka voisivat jumiutua ja antaa virheellisen mittaustuloksen. Tämän työn tavoitteena on tutkia edellä mainittuun mittaukseen soveltuvia mittaustapoja ja niihin perustuvien anturien etuja, rajoitteita ja hintaluokkia. Lisäksi tavoitteena on tarjota kattava selvitys, jonka pohjalta suoja-altaaseen parhaiten soveltuvat mittausteknologiat voidaan tulevaisuudessa valita.

Työ alkaa teoriaosuudella luvusta 2, jossa esineiden internetiä käsitellään yleisellä tasolla ja esitellään esineiden internetin ratkaisuihin käytetyt teknologiat. Näin lukija ymmärtää mitä hyötyjä esineiden internetin soveltamisella voidaan saavuttaa ja saa konkreettisen kuvan siitä, mistä eri osista esineiden internetin ratkaisut koostuvat. Kolmannessa luvussa esitellään kantaverkkoyhtiö Fingridin käyttämät esineiden internetin ratkaisut kantaverkon kunnonvalvonnassa. Neljännessä luvussa esitellään mittaustilanne ja erilaiset teknologiat vedenpinnankorkeuden mittaamiseen ja öljyn tunnistamiseen. Viidennessä luvussa tutkitaan mittauksen kannattavuutta, ja kuudennessa luvussa

ehdotetaan mittaukseen parhaiten soveltuvia antureita. Luvussa 7 tehdään yhteenveto työn aihealueista ja havainnoista.

2. ESINEIDEN INTERNET

2.1 Esineiden internetin määritelmät

Esineiden internetille (engl. Internet of Things, IoT) ei ole olemassa vain yhtä yleisesti käytössä olevaa määritelmää. Omia määritelmiään esineiden internetille ovat luoneet niin yritykset kuin tieteelliset yhteisöt julkaisuissaan. Koska esineiden internetille ei ole vain yhtä määritelmää, käytetään kirjallisuudessa käsitteitä esineiden internet, teollinen esineiden internet (engl. Industrial Internet of Things, IIoT) ja Industrie 4.0 samassa merkityksessä [2, s. 125]. Nämä käsitteet eivät kuitenkaan ole synonyymejä, vaan niiden määrittelyistä löytyy eroja. Tästä eteenpäin teollinen esineiden internet esiintyy tekstissä sen suomalaisessa kirjallisuudessa esiintyvällä lyhenteellä, eli teollisena internetinä [3, s. 30][4, s. 10–11].

Esineiden internetin voidaan sanoa olevan ylätason käsite, joka jakautuu esineiden internetiin ja teolliseen internetiin. Käsitteenä esineiden internet yhdistetään usein kuluttajille suunnattuihin tuotteisiin ja palveluihin. Teollisen internetin voidaan katsoa sisältävän yrityksille suunnattujen ratkaisujen lisäksi myös julkisen infrastruktuurin, kuten liikennejärjestelmät ja terveydenhuollon. [3, s. 31] Esimerkkejä esineiden internetin kuluttajille suunnatuista sovelluksista ovat muun muassa etäluettavat sähkömittarit, internetyhteydelliset televisiot sekä langattomasti internetyhteyden yli ohjattavat LED-lamput. [4, s. 13] Esimerkki teollisen internetin ratkaisusta on Valmetin asiakkailleen tarjoama etäpalvelu, jossa asiakkaan laitteiden tuottama data lähetetään internetin kautta Valmetille. Data analysoidaan, jolloin asiakkaalle voidaan tehdä ehdotuksia tuotannon suorituskyvyn parantamiseksi. [3, s. 114–115]

Kirjassaan Collin ja Saarelainen määrittelevät esineiden internetin erilaisina esineinä tai asioina, jotka on kytketty standardoiduilla viestintäprotokollilla internetiin. Esineet ovat yksilöityjä, ja ne välittävät dataa itsestään palvelimille, joissa dataa voidaan tallettaa ja analysoida. [3, s. 30–31] Collinin ja Saarelaisen määritelmä sisältää monia samoja asioita kirjallisuudessa esiintyvien määritelmien kanssa. Collinin ja Saarelaisen maininta esineiden yksilöinnistä mainitaan myös Gubbin et. al. esineiden internetiä käsittelevässä julkaisussa [5, s. 1649]. Käytännössä esineet yksilöidään yksilöllisillä IP-osoitteilla [3, s. 31]. Collinin ja Saarelaisen esiin nostama ajatus esineiden lähettämisen datan keräämisestä mainitaan myös Oriwohin et. al. määritelmässä [6, s. 122]. Kolmas yhtymäkohta Collinin ja Saarelaisen ja kirjallisuudessa esiintyvien määritelmien välillä on standardoitu

verkkoyhteys, joka mainitaan Krotovin määritelmässä. Standardit mahdollistavat esineiden välisen vuorovaikutuksen fyysisellä tasolla. [7, s. 833]

Teollinen internet (engl. Industrial Internet) on yhdysvaltalaisen General Electricin (GE) vuonna 2012 tunnetuksi tekemä käsite, joka on sittemmin otettu yleisesti käyttöön niin yritysmaailmassa kuin muun muassa Suomen valtion teettämässä raporteissa [3, s. 25]. Suurten Yhdysvaltalaisen teollisuusyritysten vuonna 2014 perustaman Industrial Internet Consortiumin mukaan teollinen internet kuvaa tilannetta, jossa esineiden internet, koneet, tietokoneet ja ihmiset yhdessä mahdollistavat älykkäät teolliset operaatiot käyttäen edistynyttä data-analytiikkaa aikaansaadakseen muutoksiin johtavia liiketoiminnallisia tuloksia [8, s. 12]. Data-analytiikka ja tiedonkäsittely mahdollistavat huomattavat hyödyt päätöksenteon optimoinnissa [9, s. 9]. Määritelmä eroaa esineiden internetin määritelmästä siinä, että se tuo esiin liiketoiminnallisen näkökulman. Teollinen internet voidaan nähdä työkaluna, joka tuottaa tietoa liiketoiminnalle. Tämän tiedon avulla voidaan tehdä parempia päätöksiä ja saavuttaa taloudellista etua tai luoda uusia liiketoimintamahdollisuuksia. [3, s. 21]

Industrie 4.0 on vuonna 2012 käynnistynyt Saksan hallituksen ajama kansallinen hanke [3, s. 37]. Nimi viittaa neljänteen teolliseen vallankumoukseen. Tällä laskentatavalla kolme aikaisempaa teollista vallankumousta olivat höyrykone, hihnakuuljetin ja ohjelmoitavat logiikat. Industrie 4.0 kuvaa valmistavassa teollisuudessa kyberfyysisien järjestelmien (engl. Cyber-Physical Systems, CPS) toteuttamista koko arvoketjun varrelle [2, s. 125]. Kyberfyysiset järjestelmät ovat mikrotietokoneiden verkkoja, antureita ja toimilaitteita, jotka on sulautettu materiaaleihin, laitteisiin ja koneisiin ja jotka ovat yhteydessä toisiinsa internetin välityksellä [10, s. 7]. Arvoketjulla tarkoitetaan niitä prosesseja, jotka lisäävät tuotteen tai palvelun arvoa [11, s. 5]. Reaaliaikainen data-analyysi tukee päätöksentekoa ja mahdollistaa arvonmuodostukseen osallistuvien laitteiden joustavan hallinnan [2, s. 127]. Industrie 4.0:n määritelmä nostaa teollisen internetin määritelmän tapaan esiin internetiin kytketyt laitteet ja koneet, data-analytiikan, päätöksenteon ja liiketoiminnan. Industrie 4.0:n voidaan nähdä olevan teollisen internetin soveltamista valmistavassa teollisuudessa [3, s. 30].

Esineiden internetin arvioidaan tuovan merkittäviä hyötyjä kuluttajille. Kuluttajien arkielämä helpottuu, kun erilaiset älykkäät järjestelmät avustavat eri toiminnoissa. [3, s. 18–19] Esimerkiksi ajettaessa sähköautolla kylmässä ilmastossa, osaa sähköauto aloittaa akun esilämmityksen ennen latauspaikalle saapumista. Tällä tavalla sähköauton akku latautuu nopeammin. [12] Esineiden internet luo myös uusia palveluja, jotka säästävät aikaa ja parantavat ihmisten elämänlaatua [13, luku 1]. Esimerkkinä tästä on saksalainen ShareNow-autonvuokrauspalvelu, jossa autot on yhdistetty internetiin ja niiden

vuokraaminen tapahtuu mobiilisovelluksella. Vuokrauksen veloitus on ajoikaan perustuva. Autoa ei tarvitse palauttaa ennalta määrättyyn paikkaan, vaan riittää, että se on tietyn maantieteellisen alueen sisällä. [14, s. 56]

Yritykset hyötyvät teollisen internetin tuottamasta tiedosta, joka mahdollistaa paremman päätöksenteon [15, luku 1]. Paremman päätöksenteon avulla prosesseja voidaan esimerkiksi nopeuttaa ja vähentää hukkaa, jolloin tuottavuus paranee. Tuottavuuden kasvassa saavutetaan taloudellisia hyötyjä. [13, luku 1][3, s. 130] Yritys voi saavuttaa säästöjä myös esimerkiksi varustamalla tuotantolaitteistonsa antureilla, jotka mittaavat laitteen kulumista. Tällä tavalla huoltoja voidaan tehdä ennakoiden ja näin ollen välttää korerikkoja, jotka ovat tuotantolaitokselle erittäin kalliita. [3, s. 130–133]

Pidemmillä aikavälillä kustannussäästöjä suurempi taloudellinen hyöty voidaan kuitenkin saavuttaa uusilla data-analytiikkaan perustuvilla palveluliiketoimintamalleilla [3, s. 132]. Esimerkiksi suomalainen nosturivalmistaja Konecranes on hyödyntänyt teollista internetiä kunnossapitoliiketoiminnoissaan. Konecranes on asentanut antureita asiakkaidensa nostureihin mittaamaan turvallisuudelle kriittisiä kohteita. Tällä tavalla huolto voidaan suorittaa juuri oikeaan aikaan, sen sijaan, että huolto suoritettaisiin määräajoin. Anturoinnilla saadaan tieto myös mahdollisista väärinkäytöistä, joista suurin osa yllättävistä vikatilanteista aiheutuu. [16] Teollisen internetin avulla yritykset voivat kasvattaa palveluliiketoimintansa osuutta liikevaihdosta. Tällä tavalla yritykset saavat vakaita kasvavirtoja, koska laitteille on aina huoltotarpeita suhdanteista riippumatta. [3, s. 131]

Esineiden internet on saanut paljon huomiota osakseen 2010-luvulla. Esineiden internetiin liittyen on käynnistetty erilaisia kansallisia tutkimushankkeita, yritysten sisäisiä ohjelmia sekä pidetty erilaisia esineiden internetiä koskevia tapahtumia. [3, s. 22] Verkkolaittevalmistaja Cisco ennusti vuonna 2011, että internetiin kytkettyjä laitteita olisi 50 miljardia vuonna 2020 [17, s. 3][13, luku 1]. Vuonna 2015 tutkimusyhtiö Gartner ennusti puolestaan, että vuonna 2020 internetiin olisi kytketty 20 miljardia esinettä [3, s. 21]. Ennusteisiin eivät sisälly monikäyttöiset laitteet, kuten älypuhelimet tai tietokoneet [18, s. 2]. Ennusteet kuitenkin osoittautuivat myöhemmin liian suuriksi, sillä vuonna 2020 internetiin kytkettyjä esineitä oli vain noin 9 miljardia [19]. GE:n arvion mukaan esineiden internetin kautta syntyvän uuden liiketoiminnan arvo olisi vuoteen 2030 mennessä 15 biljoonaa dollaria. Cison arvio on GE:n arviota suurempi, jopa 19 biljoonaa dollaria vuoteen 2023 mennessä. [4, s. 16]

Käsitteenä esineiden internet on mainittu kirjallisuudessa jo vuonna 1999 [20, s. 1]. Teknologia ei silloin kuitenkaan ollut vielä tarpeeksi kehittynyttä esineiden internetin edellytysten täyttymiseksi ja ratkaisut olisivat olleet kalliita tai hyvin vaikeita toteuttaa [3, s. 29].

2010-luvulle tultaessa esineiden internetin mahdollistavat teknologiat olivat kehittyneet tarpeeksi, jolloin esineiden internetin ratkaisuihin kiinnostuttiin niin valtiollisella kuin yritystasollakin [3, s. 44][17][4].

Esineiden internetin laajamittaiseen omaksumiseen ovat edesauttaneet anturien hinnan aleneminen ja koon pienentyminen, verkkoteknologioiden kehittyminen, tallennustilan hinnan aleneminen sekä data-analytiikan kehittyminen [3, s. 43–44]. Esimerkiksi IoT-anturin hinta vuonna 2004 oli keskimäärin 1,30 dollaria, kun vuonna 2019 hinta oli 0,38 dollaria [21, s. 16]. IoT-anturien hinnan alenemiseen on vaikuttanut muun muassa Mooren laki, jonka mukaan transistorien lukumäärä mikropiireissä kaksinkertaistuu kahden vuoden välein. Transistorien lukumäärän noustessa ja valmistustekniikoiden kehittyessä on anturien suorituskyky parantunut, virrankulutus vähentynyt ja fyysinen koko pienentynyt. [3, s. 43–44] Kuten anturien, myös tallennustilan hinta on laskenut ja fyysinen koko pienentynyt viime vuosikymmeninä. Esimerkiksi vuonna 1980 IBM:n gigatavun kovalevy painoi noin 250 kg, oli jääkaapin kokoinen ja maksoi 40 000 dollaria. Vastaavasti gigatavun kovalevy vuonna 2000 oli pienempi kuin litteä tulitikkurasia, painoi noin 30 g ja maksoi alle 500 dollaria. [22] Vuonna 2017 gigatavun kovalevyn maksoi keskimäärin enää vain 2,8 senttiä [23].

2.2 IoT-järjestelmän rakenne

2.2.1 Pinomallit

Esineiden internet voidaan nähdä yläkäsitteenä, joka jakautuu useisiin konsepteihin, protokoliin ja teknologioihin [13, luku 1]. Kirjassaan Collin ja Saarelainen kuvaavatkin teollisen internetin ratkaisuja pinomallilla, jonka eri tasoilla käsitellään teknologioita ja protokollia. Heidän esittämänsä pinomalli muodostuu alhaalta ylöspäin sensoreista eli antureista, tietoliikenteestä, tietovarastosta, analytiikasta, sovelluksesta ja digitaalisesta palvelusta. Mallissa kuvataan myös alusta ja tietoturva, jotka kuuluvat mallin jokaiseen kerrokseen. Alusta yhdistää pinon eri tasot ja varmistaa tasojen välisen yhteensopivuuden. Tietoturvasta puolestaan on huolehdittava pinon jokaisella tasolla ja siihen tulee kiinnittää huomiota jo suunnitteluvaiheessa. [3, s. 143–144]

Koska teollinen internet on esineiden internetin alakäsite, sisältää myös esineiden internetin ratkaisuja kuvaavat pinomallit samoja asioita Collinin ja Saarelaisen esittämän mallin kanssa. Esimerkiksi IoT World Forum on määritellyt esineiden internetille pinomallin, jossa alhaalta ylöspäin ovat fyysiset laitteet ja ohjaimet, tietoliikenne, hajautettu laskenta (engl. edge computing), tietovarasto, datan abstraktio ja yhteistyö ja prosessit. Sekä Collinin ja Saarelaisen että IoT World Forumin pinomalleissa data virtaa alimmalta

kerrokselta ylöspäin. Mallit kuvaavat selkeästi mitkä mallin eri kerrokset ovat erikseen toteutettavissa tai hankittavissa palveluntoimittajilta. [3, s. 142][13, luku 2] Pinomallien avulla voidaan myös tarkastella mitä teknologioita eri tasoilla on ja millaisia niiden väliset suhteet ovat. [13, luku 2]

2.2.2 Anturit

Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin Collinin ja Saarelaisen pinomallin eri tasoja. Collinin ja Saarelaisen pinomallissa alimmalla tasolla ovat sensorit eli anturit. Käytännössä taso kattaa kuitenkin kaikki tuotteet, koneet ja laitteet, joiden tilasta anturit tuottavat dataa pinon ylemmille tasoille. [3, s. 152]

Anturit mittaavat sähköisiä ja ei-sähköisiä suureita ja muuntavat niistä saatavan informaation sähköiseen muotoon. Anturit tuottavat yleensä analogisen signaalin, joka muunnetaan anturiin kuuluvalla ohjausyksiköllä tai erillisellä A/D-muuntimella (engl. analog-to-digital converter) digitaalseksi. [3, s. 155] Hanes et. al. määrittelevät, että anturi mittaa fyysistä suuretta ja muuttaa mittaustuloksen digitaaliseen muotoon. [13, luku 3] Anturin ei kuitenkaan ole välttämättä tuotettava mittaustulosta digitaalisessa muodossa. Anturiksi lasketaan myös esimerkiksi termistori, jonka sähkönjohtavuus muuttuu lämpötilan muuttuessa. Sopivalla virtapiirillä voidaan mitata termistorin yli vaikuttavaa jännitettä tai sen läpi kulkevaa virtaa. [24, s. 183–184] Ohmin lain avulla voidaan virrasta ja jännitteestä laskea termistorin resistanssi [25, s. 38], jota voidaan verrata termistorin ominaiskäyrään, josta voidaan lukea lämpötila [26, s. 2]. Antureiksi voidaankin lukea sekä yksittäiset komponentit, joiden sähköiset tai optiset ulostulot riippuvat mittaussuureiden muutoksista että järjestelmät, jotka tuottavat jonkin digitaalisen esityksen mitattavasta suureesta. [24, s. 183]

Anturit ovat usein osana pieniä laitteita, joissa on mikroprosessori, muisti, virtalähde ja verkkoyhteys. Kerättyä dataa voidaan tallentaa ja esikäsitellä paikallisesti laitetasolla [3, s. 155]. Esikäsitelyllä tarkoitetaan esimerkiksi mittaustulosten vertailemista annettuihin rajoihin sekä edellisiin mittaustuloksiin [3, s. 155–156]. Esikäsitelyllä verkkojen ja tallennusjärjestelmien kuormitus kevenee [3, s. 215], kun laitteen normaalia toimintaa kuvaava data voidaan puristaa yhteenvedoiksi. Tällä tavalla korostetaan dataa, joka kuvaa normaalista poikkeavaa tilaa. [3, s. 155–156] Datan paikallisella käsittelyllä voidaankin siis vähentää tarpeetonta tietoliikennettä [3, s. 155], jolloin myös laitteiden virrankulutus pienenee [3, s. 161]. Verkkoyhteys mahdollistaa tiedonsiirron myös laitteen suuntaan, jolloin anturien ohjelmistoja voidaan päivittää internetyhteyden yli etänä [3, s. 156].

Antureilla voidaan mitata lukuisia fysikaalisia suureita, kuten nopeutta, kiihtyvyyttä, lämpötilaa, nesteen painetta, värähtelyä ja äänenvoimakkuutta [3, s. 156–157]. Älypuhelimissa on esimerkiksi läheisyysanturi, joka tunnistaa, kun puhelin nostetaan korvalle. Muita älypuhelimessa olevia antureita ovat esimerkiksi kiihtyvyyssanturi, näytön kirkkautta säätelevä valoisuusanturi, sormenjälkitunnistin ja mikrofoni. [3, s. 153][13, luku 3] Antureita on paljon myös esimerkiksi autoissa. Auton anturit mittaavat esimerkiksi moottoriin menevää ilmamassaa, moottorin pyörimisnopeutta, jäähdytysnesteen lämpötilaa ja kaasupolkimen asentoa. [27, s. 20]

Anturien virransyöttö voidaan toteuttaa monella eri tavalla sovelluksesta riippuen. Yleisesti anturit saavat virtansa paristoista. Paristot voivat kestää useita vuosia, sillä anturien virrankulutus on pieni, vain muutamia mikroampeereja. Etäisissä ja vaikeasti saavutettavissa olosuhteissa voidaan käyttää myös antureita, jotka keräävät tarvitsemansa energian ympäristöstä. [3, s. 161] Anturit voivat kerätä energiansa esimerkiksi lämpötilaerosta, auringon säteilystä [3, s. 161], tuulesta [13, luku 3] tai värinästä pietsosähköistä ilmiötä hyödyntäen [28]. Antureilla voi olla myös suora kiinteä virransyöttö [13, luku 3] tai virransyöttö tietoliikenneyhteyden kautta PoE-tekniikalla (engl. Power-over-Ethernet). Kehitteillä on myös teknologia, jolla anturi voisi saada virtansa langattomasti Power over Wi-fi -tekniikalla. Tekniikka perustuu WLAN-tukiaseman datavirran rinnalla lähettämiin energiapaketteihin, jonka energian anturi hyödyntää erillisen lisälaitteen avulla. [3, s. 162]

2.2.3 Tietoliikenne

Esineiden internetin laitteet ja anturit voidaan liittää verkkoon monilla eri tietoliikenteen menetelmillä. Käytetty menetelmä riippuu sovelluskohteesta, sillä eri ympäristöissä tarvitaan erilaisia teknologioita [3, s. 164]. Eri sovellukset voivat asettaa erilaisia rajoituksia esimerkiksi signaalin kantamalle, signaalin taajuusalueelle sekä tietoliikennemenetelmän virrankulutukselle [13, luku 4].

Eri verkkoteknologiat voidaan jaotella lyhyen, keskipitkän ja pitkän kantaman verkkoihin [13, luku 4] niiden maantieteellisen ulottuvuuden eli signaalin kantaman perusteella [3, s. 165]. Jokainen luokka sisältää sekä langallisia että langattomia teknologioita. [3, s. 165] Langattomat teknologiat ovat esineiden internetissä yleisempiä, koska ne mahdollistavat laitteen helpon asentamisen sekä laitteen liikuttamisen ilman yhteyden menettämistä [13, luku 4].

Lyhyen kantaman verkot ulottuvat enintään kymmenien metrien päähän [13, luku 4] ja niiden datan siirtonopeus jää yleensä alle yhteen megabittiin sekunnissa [3, s. 173].

Lyhyen kantaman verkkoteknologioita ovat muun muassa RFID (engl. Radio Frequency Identification), NFC (engl. Near Field Communication), Bluetooth [3, s. 165] ja Visible Light Communications [13, luku 4].

Esineiden internetin sovelluksissa käytetään esimerkiksi Bluetooth Low Energy (engl. BLE) -teknologiaa. BLE-piirit ovat kooltaan ja virrankulutukseltaan pieniä. Laitteen paristo voi kestää jopa kaksi vuotta, koska virrankulutus on vain muutamia mikroampeereja. BLE-piirit ovat myös edullisia ja suoraan yhteensopivia mobiililaitteiden tekniikan ja käyttöjärjestelmien kanssa. BLE-teknologian heikkous on kuitenkin lyhyt kantama, joka on muutamia kymmeniä metrejä. [3, s. 172–173]

Keskipitkän kantaman verkot ulottuvat langattomasti yleensä enintään sadan metrin päähän ja langallisesti useita satoja metrejä. Verkkojen datansiirtonopeus on lyhyen kantaman verkkoja suurempi, jopa kymmeniä gigabittejä sekunnissa. [3, s. 166] Keskipitkän kantaman langattomia verkkoteknologioita ovat muun muassa Wi-Fi sekä IEEE 802.15.4-radiostandardiin perustuvat teknologiat kuten ZigBee ja 6LoWPAN. Langallisiin verkkoteknologioihin voidaan lukea puolestaan Ethernet [3, s. 165] ja Narrowband Power Line Communications (engl. PLC) [13, luku 4]. PLC:stä on olemassa myös pitkän kantaman versio Broadband PLC [13, luku 4]. PLC:ssä tiedonsiirto tapahtuu sähköverkossa. [3, s. 170]

Eryteisesti esineiden internetin sovelluksia varten on kehitetty keskipitkän kantaman verkkoteknologia 802.11ah, joka tunnetaan myös nimellä Wi-Fi HaLow. Verkkoteknologia mahdollistaa jopa kilometrin kantaman virrankulutuksen jäädessä kuitenkin pieneksi. Muita teknologialla saavutettavia etuja ovat muun muassa rakenteiden läpäisykyky sekä verkkoon liitettävien laitteiden suuri lukumäärä. [3, s. 172]

Pitkän kantaman verkot ulottuvat kilometristä muutamiin kymmeneen kilometriin [3, s. 178]. Verkkojen tiedonsiirron huippunopeus voi olla kymmeniä gigabittejä sekunnissa [3, s. 166]. Langattomia pitkän kantaman verkkoja ovat muun muassa matkapuhelinverkot eli 2G, 3G, 4G/LTE ja 5G verkot, jotkin Wi-Fi:n ulkotiloihin suunnitellut sovellukset ja LPWAN-teknologiaan (engl. Low Power Wide Area Network) perustuvat verkot [13, luku 4], kuten LoRa, Sigfox ja Weightless [3, s. 178]. Langallisiksi pitkän kantaman verkoiksi luetaan esimerkiksi Ethernet-valokuitu ja Broadband PLC [13, luku 4].

LoRa-teknologia on suunniteltu huomioiden erityisesti esineiden internetin tarpeet, joita ovat muun muassa akkukesto, luotettavuus, tietoturva ja kantama. Sen etuna on pieni virrankulutus, jonka ansiosta teknologiaa käyttävän laitteen paristo voi kestää jopa 10 vuotta. Teknologia mahdollistaa myös pitkän, noin 15 km kantaman. LoRa:n tiedonsiirtonopeus on kuitenkin enintään 10 kilobittiä sekunnissa, mikä rajaa sovelluskohteita.

LoRa-teknologia toimii lisensoimattomilla taajuusalueilla, jolloin päätelaitteiden lukumäärän kasvaessa on teoriassa riski, että taajuusalueet ruuhkautuvat. Teknologia lähettää dataa kuitenkin vain harvoin ja pieninä purskeina, mikä lieventää ruuhkautumisen riskiä. [3, s. 178–179]

2.2.4 Tietovarasto

Anturien tuottama data on tallennettava, jotta datasta voidaan jälkepäin jalostaa liiketoimintaa hyödyttävää tietoa data-analytiikan avulla [3, s. 195]. Nykyisin anturidata tallennetaan yleensä pilveen [3, s. 202]. Tässä pilvellä tarkoitetaan pilvipalveluna ostettua tallennustilaa. Pilvi voi tarkoittaa myös yleisesti pilvipalvelua, jossa palveluntoimittaja tarjoaa asiakkaalleen tietoteknisiä resursseja käytettäväksi internetin kautta [29, s. 115–116].

Pilvipalveluilla on monia etuja verrattuna itse hallittuihin palvelimiin tai fyysisiin konesaleihin. Yrityksille aiheutuvat kustannukset laskevat, kun yritysten ei tarvitse hankkia tai ylläpitää omia palvelimia. Pilvipalvelut ovat myös skaalautuvia, eli palvelu mukautuu käyttäjän laskentatehon tarpeisiin palvelusopimuksen rajoissa. Pilvipalvelut ovat myös käytettävissä mistä tahansa internetyhteydellisestä laitteesta, maantieteellisestä sijainnista riippumatta. [29, s. 116] Pilvipalveluissa veloitus perustuu tietoteknisten resurssien todelliseen käyttöön [29, s. 116] eli pilvipalvelusta aiheutunut kustannus on muuttuva [30, s. 95]. Tällä tavalla pilvipalvelun käyttämättä jättäminen ei maksa yritykselle mitään. Jos yritys omistaisi palvelimen itse, aiheutuisi palvelimesta myös sen käytöstä riippumattomia, eli kiinteitä kustannuksia. Niitä ovat esimerkiksi konesalin tiloista aiheutuvat kustannukset. [30, s. 95]

Pilvipalveluita käytetään internetyhteyden yli, jolloin datan tallentamisessa ja käsittelyssä voi tulla viivettä [3, s. 202]. Näin ollen pilvi ei sovi datan tallentamiseen, jos data on saatava analysoitua erittäin nopeasti [3, s. 202][13, luku. 7]. Esimerkiksi Formula 1 -autot tuottavat yli 1000 datapistettä sekunnissa. Internetyhteyden latenssi voisi tulla ongelmaksi esimerkiksi, jos F1-talli käyttäisi Iso-Britanniassa olevaa palvelinta kilpailueessaan Australiassa. Tällöin internetyhteyden latenssi voisi olla useita satoja millisekunteja. Tämän takia data välitetään varikolle radan varrelle asetettujen langattomien tukiasemien avulla, jolloin dataa pystytään analysoimaan lähes reaaliaikaisesti. [13, luku. 7]

Tallennustilan fyysisen sijainnin ohella tietovaraston tyyppi riippuu sovelluskohteesta. Tietovaraston tyyppillä tarkoitetaan sitä, minkälaista tietokantaa tietovarasto käyttää. [3, s. 196] Tietokannat voidaan jakaa SQL- (engl. Structured Query Language) ja NoSQL-tietokantoihin. SQL-tietokannat ovat relaatiotietokantoja, joissa datan rakenne on tarkasti

ennalta määritetty. [13, luku. 7] Vastaavasti NoSQL-tietokannoissa ei ole tarkkaa, ennalta määritettyä rakennetta, mikä tekee niistä joustavia ja erittäin skaalautuvia. [3, s. 197]

Esineiden internetin sovelluksissa laitteita on usein paljon ja ne lähettävät jatkuvasti heterogeenistä dataa, jolloin SQL-tietokannat voivat kasvaa nopeasti suuriksi [13, luku. 7]. Heterogeenistä dataa, kuten tekstiä, ääntä tai videoita [31, s. 110656] on vaikea viedä SQL-tietokantaan, jolloin datan määrän kasvaessa tietokanta hidastuu [31, s. 110656], mikä voi estää tietokannan käytön [3, s. 197]. Tietokannan toimintakyvyn palauttaminen vaatii usein lisää palvelinlaitteistoja ja tietokannan rakenteen muuttamista, mikä voi olla kallista [3, s. 197][13, luku. 7]. NoSQL-tietokanta sen sijaan on suunniteltu toimimaan ei-rakenteellisen datan kanssa [31, s. 110656]. Tämän takia NoSQL-tietokanta on skaalautuva [31, s. 110657], eli tietokannan kokoa pystytään tarvittaessa kasvattamaan [32, s. 3]. NoSQL-tietokanta soveltuukin paremmin esineiden internetin laitteiden tuottaman suuren datamäärän hallintaan, sillä suurilla kuormituksilla tietokannan suorituskyky ei heikkene yhtä paljon kuin SQL-tietokannan tapauksessa [31, s. 110666].

2.2.5 Analytiikka

Analytiikan avulla anturien tuottamasta datasta jalostetaan informaatiota, jota voidaan hyödyntää päätöksenteossa [3, s. 206]. Sovelluskohteesta riippuen dataa voidaan analysoida joko reaaliaikaisesti tai jälkeinpäin datavarastosta. Reaaliaikaista data-analyysiä voi vaatia esimerkiksi työstökone, jossa poranterän kulumista seurataan poraamiseen vaadittavalla teholla. Tylysyneestä poranterästä on saatava tieto nopeasti, jotta terä voidaan vaihtaa. [3, s. 202] Datat analysointi jälkeinpäin datavarastosta soveltuu käyttötarkoituksiin, joissa dataa on tarkoitus analysoida suurempia määriä. Dataa voidaan analysoida esimerkiksi laitteessa esiintyneen vian jälkeen. Tällä tavalla voidaan löytää datasta tunnusmerkkejä, jotka voisivat tulevaisuudessa ennustaa samankaltaisen vian syntymisen. [3, s. 208]

Anturien tuottaman datan analysoinnissa voidaan käyttää koneoppimista, jolloin datasta voidaan löytää uusia yhteyksiä eri asioiden välillä ja näin ollen saavuttaa liiketoiminnallisia hyötyjä [13, luku. 7]. Koneoppimisessa tietokoneet oppivat sisään syötetystä datasta algoritmien avulla jotakin [3, s. 210]. Koneoppiminen voidaan jakaa ohjattuun ja ohjaamattomaan oppimiseen. Ohjatussa oppimisessa konetta opetetaan aineistolla, johon on valmiiksi oikea vastaus. [13, luku. 7] Tässä tapauksessa oikealla vastauksella tarkoitetaan sitä, minkälaiseksi kone aineiston luokittelee. Koneelle voidaan syöttää esimerkiksi vikatilanteiden anturidataa sekä normaalin toiminnan dataa, jolloin koneen algoritmi oppii tunnistamaan vikatilanteet ja normaalin tilan [3, s. 211]. Ohjaamattomassa oppimisessa

lähtöaineiston luokittelulle ei tiedetä valmiiksi oikeaa vastausta. Ohjaamattomassa oppimisessa kone muodostaa lähtöaineistosta dataluokkia ja pyrkii erottamaan poikkeuksia [13, luku. 7]. Menetelmä soveltuu tilanteisiin, joissa tietoa esimerkiksi vikaantuvan laitteen tuottamasta datasta ei ole. Tällöin vikaantuva laite voidaan tunnistaa muista laitteista poikkeavan datan avulla. [2, s. 211]

Esineiden internetin tuottamaa dataa voidaan analysoida pilvipalveluissa sekä paikallisesti lähellä datan tuottajaa. Datan paikallista analysointia kutsutaan hajautetuksi laskennaksi (engl. edge computing). [3, s. 214–215] Hajautetulla laskennalla tarkoitetaan sitä, että tarvittavat tietotekniset operaatiot suoritetaan pilvipalvelimen sijasta jossakin datan tuottajan ja pilvipalvelimen välissä [33, s. 638]. Hajautettu laskenta soveltuu pilvipalveluita paremmin sovelluksiin, jotka vaativat lyhyen vasteajan tai sisältävät yksityistä dataa, jota ei haluta viedä pilvipalveluihin. Hajautettua laskentaa voidaan tehdä esimerkiksi anturien yhteydessä olevilla pienillä prosessoreilla [3, s. 215] tai vaativaan reaaliaikaiseen analytiikkaan soveltuvilla näytönohjaimilla (engl. GPU, Graphics Processing Unit) [15, luku 3].

2.2.6 Alusta

Esineiden internetin alustan (engl. IoT platform) voidaan nähdä yhdistävän teknologiapiinin eri tasot. Alusta voi tarjota esimerkiksi anturien datan yhteen kokoamisen, laitehallinnan, tietovaraston sekä analytiikan. Alusta tarjoaa teknologiapiinin alimman tason toiminnot, kuten anturien liitettävyyden, tietoliikenteen ja tietovaraston. [3, s. 228–229] Tällä tavalla yritykset voivat keskittyä arvoa lisääviin toimiin [34, luku 1], kuten esimerkiksi enakoivan kunnossapidon kehittämiseen anturien tuottamaa dataa analysoimalla.

Alustoja on olemassa niin kaupallisia kuin avoimeen lähdekoodiin perustuvia, jotka ovat kaikkien saatavilla. Eroja alustoissa on muun muassa alustan ja laitteiden välisen tietoliikenteen tyypissä. Kaikki alustat eivät tue kaikkia tietoliikenneprotokollia, jolloin laitteen liittämiseksi alustaan voidaan tarvita gateway-reititinlaitteen käyttöä. [3, s. 234–235] Gateway-reititinlaite on yhteydessä moneen dataa tuottavaan laitteeseen sekä internetiin. Se huolehtii erilaisten laitteiden protokollien yhtenäistämisestä, mikä mahdollistaa laitteiden yhdistämisen alustaan. [3, s. 191] Alustoissa on eroja myös siinä, onko analytiikka toteutettu puhtaasti pilvipalvelulla, vai analysoidaanko dataa myös hajautetusti [3, s. 235].

Kaupallisten alustojen etuja ovat muun muassa tuki yleisimmille tietoliikenne- ja viestintäprotokollille sekä datan kerääminen ja analysointi pilvipalvelussa [3, s. 236]. Alustojen hinnoittelu on usein selkeää [3, s. 236] ja voi perustua esimerkiksi laitteiden lähettämien

viestien määrään ja kokoon [35]. Kaupalliset alustat voivat kuitenkin sitoa käyttämään tietyn laitetoimittajan laitteita [3, s. 236]. Tämä voi rajoittaa alustan kykyä ottaa käyttöön uusia protokollia ja näin ollen rajoittaa erilaisten uusien esineiden internetin laitteiden tukea [36, s. 6].

3. ESINEIDEN INTERNETIN SOVELLUKSET KANTAVERKON KUNNONVALVONNASSA

3.1 Kantaverkon kunnonvalvonta

Suomen sähköjärjestelmä muodostuu voimalaitoksista, sähköverkoista ja kuluttajista. Sähköverkot jaotellaan edelleen kantaverkkoon, suurjännitteiseen jakeluverkkoon ja jakeluverkkoon. Kantaverkon tehtävänä on siirtää sähköenergiaa tuotantolaitoksilta suurkuluttajille kuten tehtaille ja jakeluverkoille, jotka edelleen siirtävät sen kuluttajille. [37] Kantaverkon nimellisjännite on vähintään 110 kV, jakeluverkon nimellisjännite vastaavasti enintään 110 kV ja suurjännitteisen jakeluverkon nimellisjännite on tasan 110 kV. [38]

Suomen sähköjärjestelmässä käytettyjä jännitetasoja ovat muun muassa 400, 220, 110, 20 ja 0,4 kV. Korkealla jännitetasolla on taloudellisempaa siirtää suuria tehoja pitkiä matkoja, minkä takia kantaverkon jännitteet ovat jakeluverkon jännitteitä suurempia. Esimerkiksi 110 kV johdoilla siirrettävä teho rajoittuu kymmeneen megawattiin johdon pituuden ollessa noin 100 km. [39, s. 10–11] Vastaavasti 450 kV jännitetasolla voidaan siirtää 650 MW 170 km [40].

Suomessa kantaverkonhaltija on Fingrid Oyj, joka on järjestelmävastaava kantaverkonhaltija [37]. Järjestelmävastaavan lakisääteisiin tehtäviin kuuluu sähköjärjestelmän teknisestä toimivuudesta ja käyttövarmuudesta huolehtiminen, tasevastuuseen kuuluvien tehtävien hoitaminen sekä valtakunnallisen taseselvityksen toteuttaminen. Fingridin lakisääteisiä vastuita ovat myös käytön suunnittelu, kantaverkon valvonta, verkon rakentaminen, ylläpito ja kehittäminen sekä sähkömarkkinoiden toiminnan edistäminen. [38]

Kantaverkko voidaan jakaa voimajohtoihin ja sähköasemiin. Sähköenergia siirretään voimajohtoja pitkin ja voimajohdot haarautuvat sähköasemilla [41]. Fingridillä on voimajohtoja noin 14 400 km [42] ja 116 sähköasemaa [37]. Sähköasemalla sähköä siirtoa voidaan jakaa tai keskittää sekä sähköä jännitetasoa voidaan muuttaa [43]. Sähköasemalla on muun muassa muuntajia, erottimia, virta- ja jännitemuuntajia sekä katkaisijoita [44, s. 85].

Kantaverkon kunnossapito on aikaisemmin perustunut aikaperusteiseen kunnossapitostrategiaan, jossa huollot ja tarkastukset tehdään tietyin väliajoin. Nykyään kantaverkon kunnossapito on kuitenkin siirtymässä kuntoperusteiseksi, sillä Fingrid on ottanut käyttöön esineiden internetin ratkaisuja, joiden avulla laitteiden toimintaa ja kuntoa voidaan seurata jatkuvasti. Tällä tavalla verkon luotettavuus paranee, kun laitteiden

vikaantumiset voidaan huomata ajoissa ennen kuin vika etenee niin, että se aiheuttaa keskeytyksen. [45]

Katkaisijoiden kunnontarkastus on ennen vaatinut käyttökeskeytyksen. Jatkuva-aikainen laitteiden valvonta mahdollistaa nykyään sen, että katkaisijoiden toimintaa pystytään mittaamaan tavallisissa kytkentätilanteissa, joissa katkaisijaa käytetään. Tällä tavalla verkon käytettävyys paranee, kun käyttökeskeytykset vähenevät. Kantaverkon komponenttien jatkuva-aikaisella valvonnalla myös kunnossapidon kustannustehokkuus paranee, kun kunnossapitotöitä pystytään kohdistamaan niille komponenteille, jotka tarvitsevat huoltoa tai tarkastuksia. Tällä tavalla resursseja ei kulu enää aikaperusteisiin tarkastuksiin. [45]

Fingrid käyttää sähköasemien kunnonvalvonnassa esineiden internetin ratkaisuja, joilla valvotaan muun muassa kytkinlaitteita, sähköasemarakennusta, mittamuuntajia, kiskoja ja eristimiä. Sähköasemarakennuksessa valvotaan esimerkiksi lämpötilaa ja kosteutta. Tällä tavalla voidaan havaita esimerkiksi vesivuoto asemarakennuksessa. [45] Virtamuuntajia valvotaan RFI-mittauksella (engl. Radio Frequency Interference), jossa pyritään havaitsemaan osittaispurkauksen synnyttämä sähkömagneettinen säteily. Osittaispurkausten avulla voidaan tunnistaa eristevika, joka voi edetessään aiheuttaa esimerkiksi virtamuuntajan räjähdyskseen. [46]

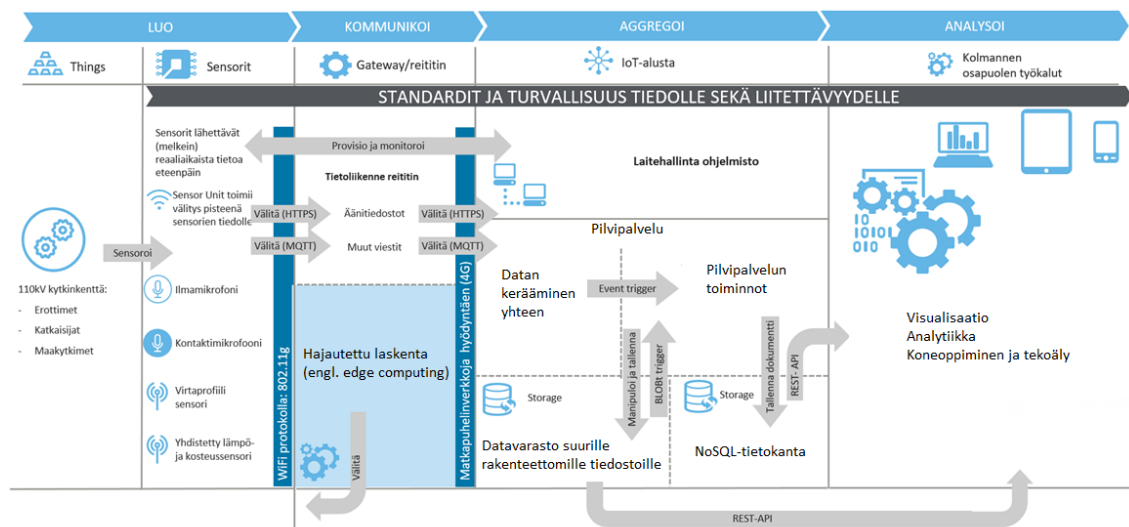
3.2 Katkaisijoiden IoT-valvonta

Katkaisijoiden avulla verkon eri osat voidaan erottaa toisistaan. Katkaisija pystyy katkaisemaan virrallisen virtapiirin, esimerkiksi häiriötilanteessa. Katkaisijan pitoaika on tyypillisesti 40 vuotta ja niitä on aikaisemmin huollettu noin kymmenen vuoden välein tehtävissä mittaushuolloissa. Katkaisijoissa ilmenee kuitenkin toisinaan vikoja, jotka estävät niiden toiminnan. Tämän takia Fingrid on toteuttanut katkaisijoihin esineiden internetin ratkaisun, jonka avulla katkaisijoiden kuntoa voidaan seurata joka kerta, kun katkaisijaa käytetään. [47]

Katkaisijoiden valvonnalla pyritään havaitsemaan alkavat viat jo elinkaaren alussa, eikä vasta ensimmäisessä mittaushuollossa kymmenen vuoden käytön jälkeen. Tämä mahdollistaa sen, että katkaisijoiden aikaperusteisista huolloista voidaan tulevaisuudessa mahdollisesti luopua. Kunnossapitoa voidaan tulevaisuudessa kohdistaa juuri niille katkaisijoille, jotka sitä tarvitsevat. Anturoinnilla saadaan hyötyjä myös katkaisijan elinkaaren loppupäässä. Esimerkiksi hyvässä kunnossa olevaa katkaisijaa voidaan käyttää vielä 40 vuoden jälkeenkin tai huonossa kunnossa oleva 35-vuotias katkaisija voidaan uusia suunniteltua aikaisemmin. [47]

Katkaisijoihin asennetut anturit mittaavat muun muassa katkaisijan toiminta-aikaa, viritysmoottorin toiminta-aikaa ja virtaa, laukaisukelojen virtaa, ääntä katkaisijan ohjaimen sisällä, viritysmoottorin värinää ja katkaisijan iskunvaimentimen vaimentumista. [47] Esimerkiksi katkaisijan äänen spektrille lasketaan tunnusluvut, joita verrataan muihin mitauskertoihin [45]. Näin voidaan havaita poikkeamia, jotka voivat aiheutua esimerkiksi viritysmoottorin kuluneista laakereista [47].

Fingridin kehittämästä katkaisijoiden kunnonvalvonnan ratkaisusta voidaan tunnistaa Collinin ja Saarelaisen esittämän pinomallin neljän ensimmäistä tasoa eli anturit, tietoliikenne, tietovarasto sekä analytiikka [3, s. 143]. Anturit tuottavat dataa katkaisijoista ja tietoliikenteen avulla data etenee pinossa ylöspäin. Anturien tuottama data välitetään WiFi-tekniologiaa hyödyntäen tietoliikennereitittimelle, joka on yhdistetty internetiin [48]. Reitittimeen on yhteydessä myös koekäytössä oleva laite, jolla anturien tuottamaa dataa voidaan analysoida jo asematasolla, jolloin sekä latenssia että tiedonsiirron määrää saadaan pienennettyä [45]. Reititin välittää anturin tuottaman datan internetin kautta esineiden internetin alustalle, joka tarjoaa tietovaraston erityyppisille tiedostoille sekä laitehallinnan. Tietovaraston tietoja käyttävät edelleen erilaiset kolmannen osapuolen palvelut, joiden avulla dataa voidaan analysoida ja analyysien tuloksia visualisoida. Kuvassa 1 on esitetty katkaisijan kunnonvalvonnan IoT-järjestelmän rakenne.



Kuva 1. Kytkeinlaitteet, IoT-valvonta [48].

Loppukäyttäjä voi tarkastella anturien tuottamaa dataa visuaalisessa muodossa. Katkaisijan ohjauksista on nähtävissä esimerkiksi kuvaajia laukaisukelan virrasta.

4. MITTAUSTAVAT

4.1 Mittaustilanne

Sähköasemalla on muuntajia, joiden tarkoituksena on muuntaa siirrettävän sähkön jännitetasoa [43]. Kantaverkon muuntajien sisällä olevat jännitteelliset osat eristetään toisistaan öljyllä. Öljyä voi muuntajassa olla muuntajasta riippuen jopa 111 tonnia [49]. Muuntajan vikaantuessa muuntajasta voi vuotaa öljyä, mikä voi aiheuttaa ympäristövahinkoja. Tämän takia suurjänniteasennuksia koskeva standardi edellyttääkin, että ulkotuloissa olevan muuntajan alla on oltava suoja-allas, jos muuntajassa on öljyä yli 1000 litraa [50, s. 73].

Muuntajan suoja-altaan suunnittelussa on muuntajan öljytilavuuden lisäksi huomioitava sulamis- ja sadeveden määrä sekä palotorjuntajärjestelmät. Suoja-altaaseen kerääntyvä vesi pienentää suoja-altaan käytettävissä olevaa tilavuutta tai pakkasella kerääntynyt vesi voi jäätyä. [50, s. 73] Tämä voi muuntajan vuotaessa johtaa siihen, ettei koko muuntajan öljytilavuus mahdu suoja-altaaseen. Tämän takia suoja-altaan veden pinnankorkeutta sähköasemilla seurataankin aikaperusteisesti neljännesvuosittain. Tarkastuksissa tarkastetaan myös, onko altaassa olevassa vedessä öljyä. Tällä tavalla voidaan muuntajan silmämääräisten tarkastuksen lisäksi varmistua siitä, ettei muuntaja vuoda öljyä. [51]

Työn tarkoituksena on kartoittaa, voitaisiinko pinnankorkeuden mittaus ja öljyn tunnistus vedestä toteuttaa IoT-mittauksena. Jatkuva-aikaisella etävalvonnalla suoja-altaan käytökelpoista tilavuutta pystyttäisiin jatkuvasti valvomaan, jolloin asemalla ei tarvitsisi käydä säännöllisin väliajoin. Tällä varmistuttaisiin myös siitä, että esimerkiksi rankkasateen jälkeen suoja-allas voitaisiin tyhjentää, sen sijaan, että se tyhjennettäisiin vasta seuraavassa tarkastuksessa. IoT-valvonnalla voitaisiin huomata myös muuntajan alkavat öljyvuodot.

Tässä työssä tarkastellut mittausteknologiat valittiin sillä perusteella, etteivät niihin perustuvat anturit sisältäneet liikkuvia osia. Liikkuvat osat voivat jumiutua, tai muuten vikaantua. Esimerkiksi suoja-altaan jäätyminen voisi aiheuttaa mekaanista rasitusta erilaisille vivuille. Valitsemalla antureita, joiden mittaustapahtuma ei vaadi mekaanista liikettä, voidaan anturien tarvitsemaa kunnossapitoa vähentää. Tällä tavalla sähköasemalla käynnit vähenevät, ja anturien huoltovälistä saadaan pidempi kuin 3 kuukautta, joka on tämänhetkinen suoja-altaan pinnankorkeuden mittausten väli.

Anturin asennuspaikka tulisi luultavasti olemaan suoja-altaan tarkastusluukku. Luukku on muodoltaan neliö, jonka sivun pituus on noin 1 m. Luukusta alaspäin on noin 40 cm:n kaulus, jonka jälkeen alkaa suoja-allas. Kauluksen mitat määrittävät anturin fyysisen koon rajoitteet. Näkymä muuntajan suoja-altaaseen on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Muuntajan suoja-allas [52].

4.2 Veden pinnankorkeuden mittaus

4.2.1 Kapasitiivinen

Kapasitiivinen tasoanturi toimii kuin kondensaattori, joka muodostuu kahdesta levystä, joiden välissä on eriste. Anturin toiminta perustuu siihen, että anturin kapasitanssi muuttuu nestepinnan korkeuden muuttuessa. Tästä esimerkkinä on anturi, jossa kondensaattorin levyinä toimivat metallinen tanko ja säiliö. Säiliössä on nestettä, joka ei johda sähköä. Nestepinnan noustessa, korvautuu anturin tangon ja metalliastian välinen ilma nesteellä. Koska kyseisen nesteen suhteellinen permittiivisyys on suurempi kuin ilmalla, anturin kapasitanssi kasvaa. [53, s. 46] Kapasitanssin muutoksista voidaan tulkita nestepinnan taso. Koska kapasitiivinen mittausta on riippuvainen nesteen suhteellisesta permittiivisyydestä, sillä voidaan mitata vain yhdenlaista nestettä. Neste ei siis saa olla yhdistelmä kahdesta nesteestä, joilla on eri suhteelliset permittiivisyydet.

Kapasitiivisen tasoanturin etuja ovat alhainen hinta ja virrankulutus, lineaarisuus, muokautuvuus erilaisiin sovelluskohteisiin sekä kyky toimia äärimmäisissä olosuhteissa [54,

s. 176]. Kapasitiivisella anturilla voidaan mitata sekä sähköä johtavia että johtamattomia nesteitä [53, s. 46]. Tämän takia se voisi soveltua muuntajan suoja-altaaseen, sillä pieni määrä öljyä veden pinnalla ei vaikuttaisi anturin toimintaan.

Kapasitiivisen anturin tarkkuutta heikentää muun muassa lämpötilan muutokset, kosteus sekä pöly. Antureissa voidaan kuitenkin käyttää korjausmenetelmiä, jotka vähentävät näiden vaikutuksia mittaustulokseen. [55, s. 224] Kapasitiivisen tasoanturin tarkkuutta heikentää myös lian kertyminen veden kanssa kontaktissa olevaan pintaan [56][57]. Tämän takia anturi tulee valita niin, että mittaukseen osallistuvien pintojen puhtaus on helpposti todennettavissa.

Kapasitiivisia tasoantureita on paljon erilaisia, mutta tähän työhön valikoitui tarkemmin tutkittavaksi vain kahdentyyppisiä antureita. Valintaan vaikutti anturien soveltuvuus ulkotiiloihin sekä kylmiin, alle 0 °C lämpötiloihin. Ensimmäinen anturityyppi rakentuu kahdesta sisäkkäisestä metalliputkesta, jotka ovat eristetty toisistaan, jolloin ne käyttäytyvät sähköisesti kondensaattorin levyinä. [58, s. 1417] Putket ovat suljettuja päistään, ja vesi pääsee kulkemaan putkien väliin ulomman putken ylä- ja alaosaan tehdyistä pienistä rei'istä. Kuvassa 3 on esitetty rakennetta vastaava Holykellin valmistama HPT 621 tasoanturi. Reiät ovat kuitenkin pieniä, jolloin esimerkiksi vedessä olevat roskat voivat päästä tukkimaan ne. Tällöin vesi ei pääse nousemaan putkien väliin, mikä voi estää anturin toiminnan. Suoja-altaan vedestä ja sen puhtaudesta ei ole kuitenkaan tutkimustietoa, joten kuvan 3 mukainen anturikin voisi mahdollisesti toimia suoja-altaan pinnankorkeuden mittaamisessa.



Kuva 3. HPT621 tasoanturi [59, s. 2].

Suoja-altaassa lämpötilan vaihtelut voivat yhdessä veden kanssa aiheuttaa korkean suhteellisen ilmankosteuden, mistä voi seurata metalliosien korroosiota [60, s. 205]. Tämän takia tasoanturin metalliosien tulisi olla valmistettu ruostumattomasta materiaalista, esimerkiksi ruostumattomasta teräksestä, kuten kuvan 3 anturi [59]. HPT621 tasoanturin ulkoisen metallisen putken sisällä on metallinen sisäosa, joka on päällystetty polytetrafluorieteenillä [59], eli Teflonilla [61]. Sisempi osa ei ole ulkopuolelta nähtävissä, jolloin anturin toisen kontaktipinnan puhtautta ei voida todentaa. Tämän takia parempi ratkaisu voisi olla anturi, jossa molemmat mittaukseen osallistuvat pinnat olisivat näkyvillä.

Toinen anturityyppi muodostuu kahdesta erillään olevasta metallisauvasta [62, s. 642]. Tämän mallisessa anturissa vesi ei kulje anturin sisään pienistä rei'istä, kuten kahden sisäkkäisen putken muodostamassa rakenteessa. Molemmat mittaukseen osallistuvat kontaktipinnat ovat myös näkyvissä, mikä helpottaa kunnossapitoa, sillä pintojen puhtaudesta voidaan helposti varmistua silmämääräisillä tarkastuksilla. Kahteen erilliseen metallisauvaan perustuva anturi on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Fischer NC56 tasoanturi [63, s. 1].

Pääosa teollisuuteen tarkoitettujen anturien hinnoista ei ole julkisesti saatavilla. Tämän takia työssä verrataan eri mittausteknologioihin perustuvien anturien hintaluokkia Trumenin tuotteilla, joiden hinta-arvio on saatavilla verkkokaupassa [64]. Hintojen avulla saadaan suurpiirteinen käsitys eri teknologioihin perustuvien anturien hinnoista. Verkkokaupassa Trumenin valmistaman kapasitiivisen tasoanturin hinta-arvio on noin 230 euroa [64]. Anturin käyttölämpötila-alueeksi ilmoitetaan $-20...70\text{ °C}$ [65, s. 8], joka on riittävä suoja-altaan olosuhteisiin. Anturin pituus voidaan räätälöidä välillä 0,5–3 m [65, s. 8], eli anturi soveltuisi noin 1 m:n syvyiseen suoja-altaaseen. Trumenin anturin rakenne on vastaava kuin kuvassa 2 esitetyllä Holykellin anturilla.

Trumenin anturin tarkkuutta ei ollut saatavilla, mutta kuvissa 3 ja 4 esitettyjen Holykellin ja Fischerin anturien tarkkuudet olivat molemmilla 1 % mitattavasta pituudesta. Tämä

tarkoittaa, että 1 m:n syvyisessä suoja-altaassa anturit kykenisivät mittaamaan veden pinnankorkeutta 1 cm:n tarkkuudella.

Holykellin ja Fischerin anturit täyttivät sähkömagneettisen yhteensopivuuden standardin EN 61326-1:2013 [63, s. 6][59, s. 3][66, s. 20]. Holykellin anturi täytti lisäksi teollisuusympäristön sähkömagneettisen yhteensopivuuden standardin EN 61000-6-2:2005 [59, s. 3][66, s. 18]. Kumpikaan antureista ei kuitenkaan täyttänyt sähköasemaympäristön sähkömagneettisen yhteensopivuuden standardia EN 61000-6-5:2015 [66, s. 18]. Tämän standardin täytyminen ei luultavasti ole kuitenkaan pakollista. Markkinoilla on nimittäin sähköasemaympäristöön, esimerkiksi katkaisijoiden SF6-kaasun valvontaan tarkoitettuja antureita, jotka eivät kuitenkaan täytä sähköasemaympäristön sähkömagneettisen yhteensopivuuden standardeja [67, s. 2].

4.2.2 Hydrostaattinen

Hydrostaattisen tasoanturin toiminta perustuu nesteen hydrostaattisen paineen muutokseen nestepatsaan korkeuden muuttuessa. Anturi asetetaan altaan pohjalle, ja anturin kontaktipinnan mittaama voima riippuu kontaktipinnan pinta-alasta, nestepatsaan korkeudesta, nesteen tiheydestä sekä nestepatsaan yläpuolella olevan ilman paineesta. Voima taivuttaa anturin pietsoresistiivistä kalvoa, minkä seurauksena pinnan resistanssi muuttuu. [68, s. 204] Resistanssin muutoksista anturi tulkitsee hydrostaattisen paineen, ja edelleen veden pinnankorkeuden. Pietsoresistiiviseen kalvoon vaikuttava voima riippuu myös kontaktipinnan toisella puolella vaikuttavasta paineesta. Tämän takia anturi on toteutettu niin, että anturin sisäosat ovat ilmakehän paineessa. [68, s. 205] Käytännössä tämä on toteutettu ilmanavalla, joka kulkee anturin kaapelin sisällä [69, s. 1].

Hydrostaattisen tasoanturin etuja ovat sen kustannustehokkuus [68, s. 204], luotettavuus [68, s. 205] sekä sovelluskohtainen mukautuvuus [70, s. 2]. Anturi on erittäin toimintavarma, koska lika, vaahto, pöly tai höyryt eivät vaikuta mittaukseen. Myöskään mitattavan nesteen sähkönjohtavuudella, suhteellisella permittiivisyydellä tai viskositeetilla ei ole vaikutusta mittaukseen. [71, s. 2] Hydrostaattisia tasoantureita on käytössä maailmalla vaativissa olosuhteissa miljoonia, niin öljyn etsinnässä kuin ilmailussa. Tämän takia niitä pidetään erittäin luotettavina ja toimintavarmoina myös tavallisissa pinnankorkeuden mittauksissa. [68, s. 205] Vuonna 2011 hydrostaattisten tasoanturien markkinaosuus oli 40 % kaikista myydyistä pinnankorkeuden mittaamiseen tarkoitetuista antureista [71, s. 1].

Koska nesteen tiheys vaikuttaa anturin tuottamaan mittaustulokseen, aiheuttavat muutokset nesteen lämpötilassa mittausvirhettä. Esimerkiksi nesteen lämpötilan nousu voi

aiheuttaa nesteen tiheyden pienentymisen. Tämän takia tasoantureita on saatavilla integroiduilla lämpötila-antureilla, jotta lämpötilan aiheuttama virhe tasomittaukseen voidaan minimoida. [71, s. 2]

Nesteeseen upotettavissa hydrostaattisissa tasoantureissa kalvo on yleensä anturin sisällä, ja vesi kulkee anturin pään sisään pienistä rei'istä [71, s. 2][69]. Vedessä olevat epäpuhtaudet voivat tukkia reiät, jolloin anturi voi tuottaa virheellistä mittaustietoa. Tämän takia antureita on saatavilla myös sellaisina, joissa paineenmittauksen kalvo on näkyvissä (engl. flush diaphragm). [71, s. 2] Tällä tavalla anturin toimintavarmuus paranee, koska veden ei tarvitse kulkea pienistä rei'istä kalvon luo. Myös kunnossapito helpottuu, koska kalvon puhtauden todentaminen sekä puhdistus on helppoa.

Muuntajan suoja-altaan pinnankorkeuden mittaamiseen voisi soveltua Wikan valmistama LH-20 hydrostaattinen tasoanturi. Anturi on valmistettu ruostumattomasta teräksestä, mikä estäisi metallin korroosion. Sitä on saatavilla myös versiona, jossa paineenmittauksen kalvo on näkyvissä. Anturi on vedenpitävä, ja se kykenee toimimaan $-40...60\text{ °C}$ lämpötiloissa. Toimintalämpötila-alue on riittävän laaja Suomen ilmastoon. Anturi täyttää sähkömagneettisen yhteensopivuuden standardin EN 61326-1:2013. [72, s. 5–6]

LH-20 anturi muodostuu mittausyksiköstä sekä kaapelista, joka tuodaan mittausyksiköltä veden pinnan yläpuolelle. Mittausyksikkö painaa noin 370 g, ja kaapelin paino on noin 100 g metriä kohden. Mittausyksikkö on sylinterin mallinen, halkaisijaltaan noin 2,2 cm ja pituudeltaan noin 22 cm. [72, s. 5–6] Anturin pienen koon sekä keveyden vuoksi anturin asennus ja altaasta poisto kunnossapitoa varten on helppoa. Anturille ei ollut valmistajan ilmoittamaa hintaa, mutta saman tuoteperheen LH-10:n hinnaksi ilmoitettiin noin 840 euroa [73]. LH-10:n toimintalämpötila-alue oli kapeampi kuin LH-20:n, $-10...50\text{ °C}$. Sitä ei ole myöskään saatavilla näkyvissä olevalla mittauskalvolla. [74, s. 10] Sen perusteella, että LH-20 toimii laajemmalla lämpötila-alueella ja vaativammissa olosuhteissa kuin LH-10, voidaan päätellä, että LH-20 on vähintään LH-10:n hintainen.

Jotta saadaan käsitys hydrostaattisen paineen mittaukseen perustuvan teknologian hinnasta yleisemmin, esitellään työssä jo aikaisemmin esille tulleen valmistajan, Trumenin, hydrostaattinen tasoanturi. Anturi on valmistettu ruostumattomasta teräksestä, ja se kykenee toimimaan $0...80\text{ °C}$ lämpötiloissa. Se säilyy kuitenkin vaurioitumatta jopa $-40...100\text{ °C}$ lämpötiloissa. [69] Verkkokaupassa anturin hinnaksi ilmoitetaan noin 180 euroa [64]. Tästä voidaan päätellä, että anturin hinta voi vaihdella paljonkin, riippuen muun muassa anturin valmistajasta ja ominaisuuksista.

Hydrostaattiseen paineeseen perustuva tasomittaus on tarkka. Edellä mainitun Trumenin anturin sekä LH-10:n ilmoitetut tarkkuudet olivat molemmilla 0,25 % valitusta mitattavasta syvyydestä [69, s. 1][74, s. 3]. LH-20:n tarkkuus oli vastaavasti 0,2 % [72, s. 4]. 1 m:n syvyydessä suoja-altaassa veden pinnankorkeus pystyttäisiin siis mittaamaan 2,5 mm:n tai 2 mm:n tarkkuudella.

4.2.3 Ultraääni

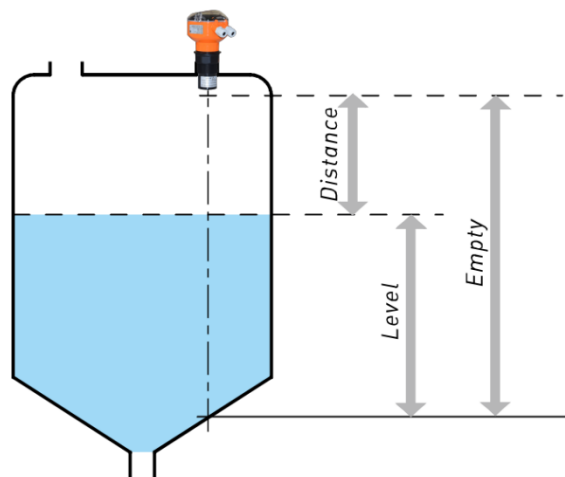
Ultraääni-tasoanturin toiminta perustuu ääniaallon heijastumiseen veden pinnasta. Anturi lähettää korkeataajuisen äänipulssin, joka kulkee ilmassa ja heijastuu veden pinnasta takaisin anturiin. Pulssi heijastuu veden pinnasta, koska vedellä on suurempi tiheys kuin ilmalla. Anturin ja vedenpinnan välinen etäisyys saadaan laskemalla äänipulssin matkaan kulunut aika. [53, s. 46]

Ultraäänianturin etuja ovat muun muassa pieni koko, alhainen hinta, kontaktiton mittaus-tapa, toimintavarmuus karuissa olosuhteissa sekä käytön yksinkertaisuus. Anturin tuot-tamaan mittaustulokseen vaikuttaa ilman lämpötila, sillä eri lämpötiloissa ääniaallot kul-kevat eri nopeudella. Ilmankosteudella on myös vaikutus ääniaaltojen nopeuteen il-massa. [75, s. 3359] Tämän takia ultraääniantureissa on usein lämpötilakompensaatio, jonka avulla mittaustuloksista saadaan luotettavia [53, s. 46][75, s. 3359].

Ultraäänianturi ei sovellu kohteisiin, joissa on hyvin pölyistä. Pöly saa ääniaallon leviä-mään ilmassa niin, että palatessaan se on liian heikko, jotta saataisiin luotettava lukema. Myös veden pinnassa oleva vaahto voi heikentää mittauksen luotettavuutta, koska ääni-aalto voi heijastua takaisin vaahtokerroksen pinnasta. [53, s. 46–47] Anturin tarkkuutta heikentää myös akustinen kohina [75, s. 3359]. Anturin tarkkuuteen ei kuitenkaan vai-kuta mikä tahansa kohina, vaan sen taajuuden on oltava ultraäänien taajuusalueella, eli noin 25–65 kHz [76, s. 60].

Ultraäänianturi voisi soveltua monista syistä muuntajan suoja-altaan veden pinnankor-keuden mittaamiseen. Ultraäänianturi on kontaktiton anturi [75, s. 3359], eli anturi ei ole kosketuksissa veden kanssa. Tällöin vedessä olevat roskat tai muu lika eivät pääse li-kaamaan anturin mittaukseen osallistuvia pintoja. Kontaktittomuuden takia veden jääty-minenkään ei pääse aiheuttamaan anturille vaurioita. Anturilla voidaan havaita myös kiinteitä aineita, kuten jäätä [53, s. 46]. Tällä tavalla saataisiin tietää, kuinka korkealla jää talvisin altaassa on. Antureita on saatavilla malleina, jotka ovat kooltaan pieniä ja raken-teeltaan yksiosaisia [77], mikä helpottaa asennusta ja kunnossapitoa.

Pinnankorkeuden mittaamiseen voisi soveltua Trumenin valmistama ultraäänianturi. Kyseinen anturi valittiin sen vuoksi, että saman valmistajan eri mittausteknologioihin perustuvien anturien hintoja voidaan vertailla. Anturi kykenee mittaamaan 5 metrin etäisyyksiä, mikä riittää hyvin noin 1 m:n syvyiseen suoja-altaaseen. Anturi kykenee toimimaan $-20\text{...}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa, mikä ei täysin riitä Suomen sääolosuhteisiin. Anturin halvimman vaihtoehdon tarkkuus on 5 cm, mutta saatavilla on myös 1,25 cm tarkkuudella oleva anturi. Anturi olisi riittävän tarkka suoja-altaan pinnankorkeuden mittaamiseen. Anturi ei täytä Euroopan unionin sähkömagneettisen yhteensopivuuden standardeja. [77, s. 1] Anturin hinta on verkkokaupassa noin 500 euroa [64]. Kuvassa 5 on esitetty ultraäänianturi ja sen sijoittuminen mittaustilanteessa.



Kuva 5. Trumen TLU ultraäänianturi [77, s. 1].

4.2.4 Vapaan tilan tutka

Vapaan tilan tutkan toiminta perustuu aaltojen heijastumiseen veden pinnasta, kuten ultraäänianturillakin. Tutka lähettää mikroaaltopulssin, joka heijastuu veden pinnasta takaisin anturiin. Heijastuminen perustuu siihen, että vedellä on suurempi suhteellinen permittiivisyys kuin ilmalla. Pulssin matkaan kuluneen ajan avulla tutka määrittää veden pinnan tason. [53, s. 47]

Tutkan etuja ovat sen tarkkuus ja se, että ilman lämpötilan ja kosteuden muutoksilla on vähäinen vaikutus mittaustarkkuuteen [60, s. 208]. Tutka on ultraäänianturin tavoin kontaktiton [53, s. 47], jolloin veden jäätyminen tai vedessä olevat roskat eivät aiheuta anturille ongelmia. Tutkan toimintaa voi rajoittaa nesteen pinnassa oleva vaahtokerros. Sähköä johtava vaahtokerros voi aiheuttaa mikroaaltojen heijastumisen vaahtokerroksen pinnasta. Toisaalta paksu kerros vaahtoa, jolla on suuri suhteellinen permittiivisyys, voi aiheuttaa mikroaaltojen vaimenemisen, jolloin mikroaallot eivät heijastu takaisin tutkaan. [53, s. 47]

Tutkassa on antenni, jonka avulla mikroaaltopulssi suunnataan suoraan alaspäin kohti veden pintaa. Antenniin voi lämpötilojen vaihdellessa kondensoitua vettä. Koska vedellä on korkea suhteellinen permittiivisyys, jokainen mikroaaltopulssi ei välttämättä läpäise vesikerrosta. Tällöin anturi voi antaa virheellisen mittaustuloksen. [53, s. 47] Kondensoitunut vesi voi myös altistaa antennia korroosiolle [60, s. 205], minkä takia antennin tulisi olla valmistettu esimerkiksi ruostumattomasta teräksestä.

Pinnankorkeuden mittausta voitaisiin toteuttaa esimerkiksi Trumenin valmistamalla tutkaan perustuvalla tasoanturilla. Anturin käyttölämpötilaksi ilmoitetaan $-40\dots 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja sen antenni on valmistettu ruostumattomasta teräksestä, minkä takia se soveltuisi hyvin Suomen ulkoilmaolosuhteisiin. Anturilla voidaan mitata jopa 30 m:n etäisyyksiä 3 mm:n tarkkuudella. Anturilla ei ole eurooppalaisen sähkömagneettisen yhteensopivuuden standardin hyväksyntää. [78, s. 9] Anturin hinnaksi ilmoitetaan verkkokaupassa noin 1550 euroa [64]. Tästä voidaan päätellä, että tutkateknologiaan perustuvat tasoanturit ovat huomattavasti kalliimpia, kuin esimerkiksi ultraääni tai kapasitiiviset anturit. Anturin enimmäiskantama on kuitenkin moninkertainen verrattuna kantamaan, joka riittäisi suoja-altaan pinnankorkeuden mittaamiseen. Tämän takia anturin hintaa tulee käsitellä vain suuntaa antavana arviona tutkaan perustuvien anturien hintatasosta.

4.2.5 Ohjatun aallon tutka

Ohjatun aallon tutkan (engl. guided wave radar) toimintaperiaate on sama kuin vapaan tilan tutkalla. Erona on kuitenkin se, että ohjatun aallon tutkassa mikroaaltopulssi ohjataan tankoon tai kaapeliin, joka on upotettu mitattavaan aineeseen. Mikroaallon energia on keskittynyt tankoon, minkä takia se läpäiseekin esimerkiksi vaahtokerroksen vapaan tilan tutkaa paremmin. Veden kondensoituminen antenniin ei ole ohjatun aallon tutkalle ongelma, sillä signaalia ei lähetetä antennista. Tämän takia sen ei tarvitse läpäistä kondensoituneen veden muodostamaa kerrosta. [53, s. 47–48]

Vapaan tilan tutkan tavoin, ilman lämpötilan tai kosteuden muutokset vaikuttavat hyvin vähän ohjatun aallon tutkan tarkkuuteen. Pöly, sumu tai höyry eivät vaikuta sen tarkkuuteen lainkaan. [70, s. 4] Ohjatun aallon tutka vaatii kuitenkin enemmän kunnossapitoa kuin esimerkiksi ultraäänianturi tai vapaan tilan tutka. Tämä johtuu siitä, että ohjatun aallon tutka on kontaktillinen, kuten kapasitiivinen anturi. Tämän takia sillä on samoja toimintarajoitteita kapasitiivisen anturin kanssa. Tutkan tankoon tai kaapeliin voi kertyä likaa, mikä voi heikentää tutkan tarkkuutta. [70, s. 4]

Tutkan tanko voi olla joko kiinteä, tai se voi olla koaksiaalinen, jossa tangon ympärillä on rei'itetty putki. Putken tarkoituksena on tasoittaa mittaustulosta nesteen pinnan

aaltoillessa. [79] Putken reiät voivat kuitenkin tukkeutua vedessä olevista epäpuhtauksista. Toimintavarmuuden kannalta kiinteä sauva voisi soveltua paremmin suoja-altaan pinnankorkeuden mittaamiseen. Kuten edellä mainituissa kontaktillisissa antureissa, tulisi sekä ohjatun aallon tutkan tangon että antennin olla korroosiolta suojattuja, jotta tutka pysyisi toimintakuntoisena.

Pinnankorkeuden mittaamiseen voisi soveltua Trumenin TLR32 ohjatun aallon tutka. Tutkalla pystyy mittaamaan enintään 6 m:n matkan 3 mm:n tarkkuudella, ja käyttölämpötilaksi ilmoitetaan $-40\text{...}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ [79, s. 4]. Tutkan tangon materiaaliksi voi valita ruostumattoman teräksen [79, s. 19]. Tutka ei täytä Euroopan unionin sähkömagneettisen yhteensopivuuden standardin vaatimuksia [79]. Verkkokaupassa tutkan hinnaksi ilmoitetaan noin 800 euroa [64]. Ohjatun aallon tutka on siis vapaan tilan tutkaa halvempi, mutta kuitenkin kalliimpi kuin ultraääni tai kapasitiivinen tasoanturi. Trumenin TLR 32 ohjatun aallon tutka on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Trumen TLR32 ohjatun aallon tutka [79, s. 1].

4.3 Öljyn tunnistaminen veden pinnalta

4.3.1 Öljykerroksen paksuus

Otetaan esimerkkinä muuntaja, jossa on öljyä 111 000 kg, ja öljyn tiheys on 890 kg/m^3 , jolloin muuntajan öljytilavuus on $124,7\text{ m}^3$. Suoja-altaan pituus on 22,75 m, leveys 13,18 m ja korkeus 0,9 m, jolloin suoja-altaan tilavuus on $269,9\text{ m}^3$. Taulukossa 1 on esitetty öljyvuotomäärät ja niitä vastaavat öljykerroksen paksuudet suoja-altaassa.

Taulukko 1. *Esimerkki suoja-altaassa olevan öljyn määrästä ja öljykerroksen paksuudesta.*

Öljymäärä (l)	Öljykerroksen paksuus (μm)	Öljymäärän suhde muuntajan öljytilavuuteen (10^{-6})
0,15	0,5	1,2
0,30	1	2,4
3,00	10	24
9,00	30	72
14,99	50	120
29,98	100	240

Taulukosta 1 havaitaan, että vaikka muuntajasta vuotaisi noin 30 litraa öljyä, se vastaisi vain 0,02 % muuntajan öljytilavuudesta. Näin pientä vuotoa ei pystytä havaitsemaan muuntajan omalla öljyntason tunnistuksella, sillä öljyn taso voi vaihdella paljonkin muuntajan kuormitustilanteen mukaan öljyn lämpölaajenemisen seurauksena. Koska kymmenien litrojen öljyvuotoja ei kyetä havaitsemaan muuntajan omalla järjestelmällä, voidaan hyötyä saada myös epätarkemmilla, kymmenien mikrometrien öljykerroksen tunnistavilla, mittauksilla.

4.3.2 UV-fluorometria

Veden pinnalla oleva öljy voidaan havaita ultraviolettifluoresenssin avulla. Kun ultraviolettisäteily osuu öljyyn, öljyn atomeissa olevat elektronit virittyvät korkeammalle energiatilalle. Tämä energiatila ei ole kuitenkaan stabiili, minkä takia elektronit palaavatkin matalammalle, stabiilille energiatilalle emittoiden samalla fotoneja, eli sähkömagneettista säteilyä. Öljystä tulevan sähkömagneettisen säteilyn spektristä voidaan tunnistaa korkean intensiteetin aallonpituudet, ja näin ollen tunnistaa vedessä oleva öljy. [80, s. 1250] Menetelmä on kuitenkin silmämääräistä tarkastusta epätarkempi [80, s. 1251], sillä silmämääräisillä tarkastuksilla voidaan havaita todella ohuet, noin 0,1 μm :n öljykerrokset veden pinnassa, sillä ne näyttävät hopean värisiltä. Jos kerros on paksumpi, noin 0,6 μm , voi veden pinnassa nähdä sateenkaaren värit. [81, s. 7]

Se sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus, jolla öljyn elektronit saadaan viritettyä korkeammalle energiatilalle ja jolla öljy emittoi sähkömagneettista säteilyä, riippuu öljylaadusta [82, s. 7]. Esimerkiksi muuntajien eristeenä käytetyn mineraaliöljyn viritystaajuus on 365 nm ja emittoituneen säteilyn korkeimman intensiteetin aallonpituus on 405 nm. Emittoituneen säteilyn intensiteetti on kuitenkin merkittävää aallonpituuksilla 405–600 nm. Koska emittoitunut säteily on näkyvän valon aallonpituuksilla, voidaan fluoresenssi havaita esimerkiksi kameralla. [80, s. 1250]

Ultravioletti fluoresenssiin perustuvia antureita on saatavilla veteen upotettavina malleina [83, s. 8]. Jotta upotettava anturi olisi varmasti joka tilanteessa vedenpinnan alapuolella, tulisi se asettaa altaan pohjaan. Suoja-altaan vedessä ei kuitenkaan ole virtauksia, jolloin pinnalla oleva öljy ei luultavasti pääse muodostamaan emulsiota veden kanssa. Tämän takia öljyä ei luultavasti olisi havaittavissa altaan pohjassa olevassa vedessä. Edellä mainituista syistä tässä työssä käsitellään vain kontaktittomia, veden yläpuolella olevia antureita.

Ultravioletti fluoresenssiin perustuvat anturit asennetaan vedenpinnan yläpuolelle niin, että niistä tuleva ultraviolettisäteily suunnataan kohtisuoraan alaspäin veden pintaan nähden. Mittaustapa on kontaktiton, minkä ansiosta se on mekaanisesti toimintavarmempi kuin kontaktilliset mittaustavat. Koska anturi ei ole veden kanssa kosketuksissa, ei anturissa oleva linssi likaannu vedessä olevista epäpuhtauksista. Veden jäätyminen ei myöskään vaikuta anturin toimintaan kontaktittomuuden ansiosta. [84, s. 1] Antureita on saatavilla yksiosaisina ja koteloituna [85, s. 2], mikä parantaa toimintavarmuutta verrattuna antureihin, jotka muodostuvat esimerkiksi säteilyn lähettimestä ja vastaanottimesta [86, s. 1]. Lähettimen ja vastaanottimen välinen kaapeli voi esimerkiksi vaurioitua. Anturin etäisyydelle veden pinnasta on usein myös rajoitteita [87, s. 2]. Veden pinnan korkeuden laskiessa etäisyys anturiin kasvaa, mikä tulee huomioida anturin valinnassa. Anturin tulee kyetä tunnistamaan öljy veden pinnassa, vaikka suoja-altaassa olisi hyvin vähän vettä.

Mahdollisen suoja-altaan vedessä olevan öljyn tunnistamiseen voisi käyttää esimerkiksi InterOcean Systemsin valmistamaa UV-fluoresenssiin perustuvaa anturia. Anturi kykenee tunnistamaan öljyn $-10 \dots 60$ °C lämpötiloissa ja kestää säilytyksen $-40 \dots 75$ °C lämpötiloissa vaurioitumatta. [87, s. 2] Nämä lämpötila-alueet riittäisivät hyvin Suomen sääolosuhteisiin. Anturin toimimattomuus alle -10 °C lämpötiloissa ei haittaa, sillä suoja-altaan mahdollinen vesi on silloin jäässä. Jäätyneestä vedestä ei nykyisellä silmämääräisellä tarkastustavallakaan pystytä huomaamaan pieniä öljymääriä. Anturi kykenee tunnistamaan noin $1 \mu\text{m}$:n öljykerroksen. Tällä tarkkuudella ei voida välttämättä havaita pieniä öljyvuotoja, jotka voitaisiin silmämääräisillä tarkastuksilla helposti havaita. Anturin toimintaetäisyys on 1 m [87, s. 2], joka riittää hyvin noin 1 m :n syvyiseen suoja-altaaseen. Anturin leveys on 16 cm , syvyys 16 cm ja korkeus 28 cm [87, s. 2], mikä tekee siitä kompaktin. Anturin pieni koko sekä yksiosainen rakenne helpottavat sen asennusta. Yhden lähteen mukaan anturin hinta on noin $10\,000$ dollaria [88], mutta valmistajan ilmoittama hinta ei ole saatavilla.

4.3.3 Näkyvä valo

Öljy voidaan tunnistaa veden pinnalta optisella anturilla, eli näkyvän valon aallonpituuksia hyödyntämällä. Tämä perustuu siihen, että öljy heijastaa valoa vettä paremmin. [82, s. 2] Anturi voi koostua esimerkiksi laserista, laserin valon intensiteetin tunnistimesta sekä fotodiodista. Anturissa oleva mikroprosessori vertaa lähetetyn valon intensiteettiä heijastuneen valon intensiteettiin. Koska vesi heijastaa valoa öljyä huonommin, mikroprosessori pystyy päättelemään takaisin fotodiodiin heijastuneesta valosta, onko vedessä öljyä. [86, s. 2]

Optinen anturi on muiden kontaktittomien anturien tavoin vedenpinnan yläpuolella. Tällöin veden jäätyminen tai vedessä olevat epäpuhtaudet eivät pääse vaurioittamaan anturia tai haittaamaan sen toimintaa. Kontaktittomuuden takia kunnossapidon tarve vähenee, kun anturin linssiä ei tarvitse käydä tihein väliajoin puhdistamassa. Antureita on saatavilla yksiosaisina [89], mikä helpottaa asennusta sekä parantaa anturin luotettavuutta.

Veden pinnassa oleva öljy voitaisiin tunnistaa esimerkiksi Lumexin valmistamalla optisella anturilla. Anturi on 12 cm korkea, 18 cm leveä ja 12 cm syvä. Anturin pieni koko sekä yksiosainen rakenne helpottavat sen asennusta. Anturi tunnistaa öljyn $-10 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa. Anturin datalehdellä ei kuitenkaan ole mainintaa varastointilämpötiloista. Tämän takia anturin kyky säilyä vaurioitumatta $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ kylmemmissä lämpötiloissa tulee varmistaa valmistajalta. Anturi kykenee tunnistamaan veden pinnalta vähintään $0,5 \text{ }\mu\text{m}$:n öljykerroksen. Tämä tarkkuus vastaa lähes silmämääräisen tarkastuksen tarkkuutta, jolla voidaan havaita jopa $0,1 \text{ }\mu\text{m}$:n öljykerrokset. Toimiakseen anturin on oltava $0,5\text{--}20 \text{ m}$:n etäisyydellä veden pinnasta. Minimietäisyyden täytyminen tulee varmistaa tapauskohtaisesti. Anturin hintaa ei ollut saatavilla. [89, s. 2]

4.3.4 Infrapuna ja polarisaatio

Veden pinnalla oleva, yli $10 \text{ }\mu\text{m}$:n, öljykerros absorboi energiaa näkyvän valon aallonpituuksilla ja säteilee osan energiasta takaisin infrapunasäteilynä aallonpituuksilla $8\text{--}14 \text{ }\mu\text{m}$. Lämpökameralla otetuissa kuvissa paksu öljykerros näyttää ympäristöään kuumemmalta. Keskipaksussa $20\text{--}50 \text{ }\mu\text{m}$:n, öljykerroksessa infrapuna-aalloilla tapahtuu tuhoavaa interferenssiä, jolloin öljystä lähtevän infrapunasäteilyn intensiteetti pienenee, ja näin ollen öljy näyttää ympäristöään viileämmältä. Näistä eri lämpötiloissa olevista alueista voidaan tunnistaa vedessä oleva öljy. Infrapunasäteilyn avulla voidaan havaita vähintään $10\text{--}70 \text{ }\mu\text{m}$:n öljykerrokset. [82, s. 4] Ihmissilmä havaitsee tämän paksuiset öljykerrokset tumman värisinä [81, s. 7].

Infrapunaan perustuvalla tekniikalla esimerkiksi orgaaninen aines voi näyttäytyä öljyn tavoin [82, s. 5], mikä asettaa rajoitteen tunnistamisen luotettavuudelle. Luotettavuutta heikentää myös se, ettei auringon säteily pääse muuntajan suoja-altaaseen. Tämä heikentää öljyn ja veden lämpötilakontrastia, jolloin öljyn tunnistaminen veden pinnalta on vaikeaa. Tämän takia lämpökameroissa voidaan hyödyntää teknologiaa, jolla voidaan tunnistaa sähkömagneettisen säteilyn polarisaatio [90, s. 1]. Tämä perustuu siihen, että sähkömagneettinen säteily polarisoituu heijastuessaan veden pinnassa olevasta öljystä [82, s. 2].

Infrapunasäteilyyn ja polarisaatioon perustuvia kamerat ovat kontaktittomia, jolloin kunnossapidon tarve on vähäistä. Kameroita on saatavilla yksiosaisina ja kompakteina, mikä helpottaa asennusta ja kunnossapitoa. Esimerkiksi Polariksen valmistaman Pyxis SWIR (engl. shortwave infrared) kameran pituus on 11 cm, leveys sekä syvyys 5 cm ja paino 400 g. Kameran minimietäisyys kuvattavan kohteen pinnasta on 0,3 m, eli se voitaisiin asentaa muuntajan suoja-altaan tarkastusluukun alle. Kamera toimii $-20\dots55\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa. [91] Talvella lämpötila voi laskea alle $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, minkä takia kameran varastointilämpötila tulee varmistaa valmistajalta. Kameralla pystytään tunnistamaan $10\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$:n öljykerrokset [90, s. 14]. Kameralle ei ole hintaa saatavilla, mutta suuremman pinta-alan kuvaamiseen tarkoitettuja versioita on myytävänä 3 kappaletta käytettyinä hintaan 7689 euroa. Näin ollen yhden kameran hinta on noin 2600 euroa [92]. Tästä voidaan päätellä, että SWIR-kameroiden hinta uutena on joitakin tuhansia euroja.

5. MITTAUKSEN KANNATTAVUUS

5.1 Aikaperusteisen mittaustavan kustannukset

Nykyinen suoja-altaan aikaperusteisesti suoritettava pinnankorkeuden mittaus sisältyy laajempaan sähköasematarkastukseen, joka sisältää useita kymmeniä tarkastustehtäviä. Sähköasematarkastukselle on määritetty kiinteä hinta eikä työtehtäväkohtaista eritelyä ole saatavilla. Tämän takia suoja-altaan pinnankorkeuden mittaamisesta ja tyhjentämisestä aiheutuvien kustannusten osuutta sähköasematarkastuksen kiinteästä hinnasta on vaikea määrittää. Määrittäminen voitaisiin tehdä, jos tiedettäisiin kaikkiin eri tarkastustehtäviin kuluva aika, jolloin kustannukset voitaisiin eritellä työtehtävään kuluvan ajan perusteella. Tässä työssä aikaperusteisen mittaustavan aiheuttamia kustannuksia arvioidaan suoja-altaan tarkastuksen keskimääräisen keston ja sähköverkkoasennuksen tuntiveloituksen perusteella.

Suoja-altaan pinnankorkeuden mittaamisen ja tyhjentämisen tulisi suorittamaan luultavasti palveluntoimittaja, jonka työntekijä on sähköverkkoasentaja. Sähköverkkoasentajan kuukausipalkka on keskimäärin 3857 euroa [93]. Tästä voidaan kuukauden 22 työpäivän [94] ja 7,5 tunnin työpäivän keston avulla laskea asentajan tuntipalkka. Työnantajalle työntekijästä aiheutuneita kustannuksia voidaan arvioida kertomalla työntekijän palkka 1,5:llä [95]. Kertolaskun tulos ei kuitenkaan ole hinta, joka asiakkaalle tarjottavasta palvelusta veloitetaan, koska yrityksellä voi olla lisäksi muita muuttuvia ja kiinteitä kustannuksia, kuten tilojen vuokrat tai asentajan matkakustannukset. Hintaan sisältyy yleensä myös yrityksen voittotavoite. Taulukosta 2 voidaan lukea sähköverkkoasentajan tuntipalkaksi 23,38 euroa.

Taulukko 2. Sähköverkkoasennuksen tuntiveloituksen arviointi.

Sähköverkkoasentajan kuukausipalkka (€)	3857
Työpäiviä kuukaudessa (pv)	22
Työpäivän kesto (h)	7,5
Sähköverkkoasentaja tuntipalkka (€)	$3857 / 22 / 7,5 = 23,38$
Työnantajalle työntekijästä aiheutuvat kustannukset tunnissa (€)	$1,5 \cdot 23,38 = 35,07$
Sähköverkkopalvelun tuntiveloitus (€)	60–100

Esimerkiksi auton korjauksesta voidaan veloittaa 68 euroa tunnilta [96] ja sähköasennustöistä 40–60 euroa tunnilta [97]. Koska sähköverkkoasentajan keskipalkka on sähkö-

ja auton asentajan keskipalkkoja korkeampi [93][98], voidaan olettaa, että myös sähköverkkoasennuksen tuntiveloitus on sähköasennusta ja autonkorjausta korkeampi. Sähköverkkoasennuksen tuntiveloituksen arvioidaan olevan 60–100 euroa.

Fingridin sähköaseman tarkastusohjeessa määritellään, että suoja-altaan pinnankorkeuden tarkastamisen jälkeen allas on tyhjennettävä niin, että pinta laskee 5 cm/h. Tarkastajien on myös tarkkailtava öljynerotusjärjestelmän poistoputkea, jotta öljynerottimen toiminnasta voidaan varmistua, ja näin ollen välttää öljyn pääsy ympäristöön. [99] Vedenpinnan laskuvauhdin ja altaan keskimääräisen vesimäärän avulla voidaan arvioida altaan tyhjentämisen keskimääräistä kestoa. Vuosien 2007–2019 suoja-altaan pinnankorkeuden mittausten keskiarvo on 15,7 cm [100]. Tämän perusteella voidaan laskea aika, joka kyseisen vesimäärän tyhjentämiseen kuluu. Ajassa on huomioitava myös pinnankorkeuden mittaamiseen ja esimerkiksi suoja-altaan luokse kulkemiseen, keväällä lumien poistamiseen tarkastusluukun päältä sekä mittauslaitteiston valmisteluun kuluva aika, jonka arvioidaan olevan noin 30 minuuttia.

Taulukko 3. Tarkastukseen kuluvan ajan laskemiseen tarvittavat tiedot.

Vedenpinnan laskuvauhti (cm/h)	5
Keskimääräinen pinnankorkeus (cm)	15,7
Mittaukseen ja muihin valmisteluihin kuluva aika (h)	0,5

Taulukon 3 tiedoilla altaan tyhjennyksen kestoksi saadaan noin 3 tuntia 8 minuuttia, jolloin koko tarkastustyön kestoksi saadaan noin 3 tuntia 40 minuuttia. palveluntoimittajan voidaan olettaa veloittavan alkavalta puolelta tunnilta, jolloin veloitus perustuu 4 tuntiin. Näin ollen voidaan laskea tarkastustyön hinta erilaisilla palveluntoimittajan tuntiveloituksilla. Suoja-altaan tarkastustyön hinnat on esitetty taulukossa 4. Kokonaishinta on laskettu sen perusteella, että asematarkastus tehdään 4 kertaa vuodessa.

Taulukko 4. Tarkastustyön vuosittainen kustannus erilaisilla tuntiveloituksilla.

Tuntiveloitus (€)	Työn vuosittainen kustannus (€)
60	960
70	1120
80	1280
90	1440
100	1600

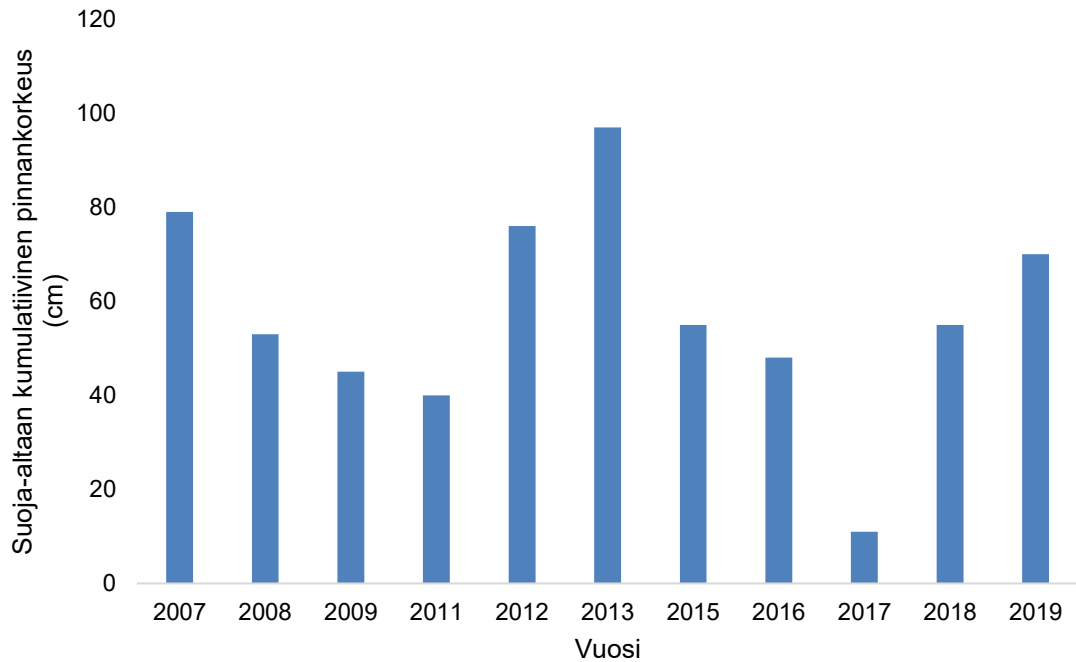
Taulukosta 4 nähdään, että suoja-altaan tyhjennystyön vuosikustannukset vaihtelevat suuresti riippuen tuntiveloituksesta.

5.2 IoT-mittauksen kustannukset

5.2.1 Suoja-altaan tyhjennys

IoT-mittaus ei poista tarvetta suoja-altaan tyhjentämislle, mutta sillä voitaisiin saada altaan tyhjennysväliä pidemmäksi. Näin ollen IoT-mittauksen kustannukset muodostuvat anturijärjestelmästä ja sen asennuksesta sekä altaan tyhjentämisestä. Anturijärjestelmään kuuluu anturien lisäksi esimerkiksi WLAN-tukiasemat tai mobiilitukiasemat, virransyöttö, mobiiliverkkoliittymä sekä pilvipalvelut. Anturijärjestelmän kunnossapito voidaan suorittaa altaan tyhjennyksen yhteydessä, jolloin anturien kunnossapidosta ei aiheudu ylimääräisiä kustannuksia.

Jotta altaan tyhjennyksestä aiheutuvia kustannuksia voidaan arvioida, on tiedettävä vuosittaisten tarkastusten määrä. Määrään vaikuttaa altaan pinnankorkeuden raja, jonka ylityessä allas tulisi tyhjentää. Tämän takia altaan vuosittaista kumulatiivista pinnankorkeutta arvioidaan suoja-altaan pinnankorkeuden mittausaineistolla vuosilta 2007–2019 [100]. Aineistosta on jätetty pois vuodet, joilta on vain yksi mittaustulos.



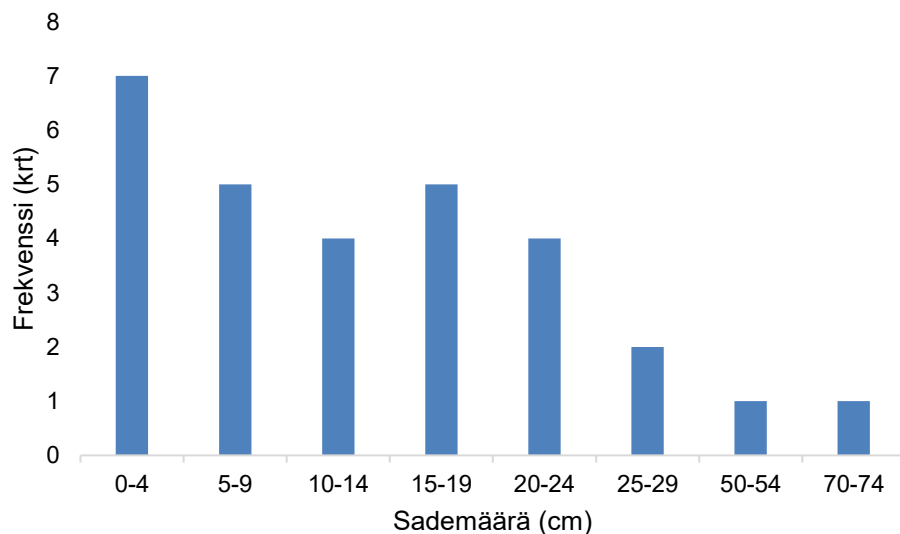
Kuva 7. Vuosittainen suoja-altaan kumulatiivinen pinnankorkeus.

Yksinään vuosittaiset kumulatiiviset suoja-altaan pinnankorkeudet eivät vielä riitä vuosittaisten tarkastuskertojen määrän laskemiseen, vaan lisäksi tarvitaan tieto rajasta, jonka ylittyessä allas tyhjenetään. Rajan laskemiseksi on tiedettävä muuntajan öljytilavuus, jotta voidaan arvioida, kuinka paljon vettä altaassa saa enintään olla. Käytetään esimerkkinä kappaleessa 4.3.1 esiteltyä muuntajaa ja suoja-allasta. Altaan mittojen, sekä muuntajan öljytilavuuden avulla voidaan laskea, kuinka korkealle öljy mahdollisessa vuototilanteessa nousisi. Taulukosta 5 nähdään, että suoja-altaan teoreettiseksi tyhjennysrajaksi saadaan 48 cm.

Taulukko 5. Suoja-altaan tyhjennysrajan laskeminen.

Suoja-altaan leveys (m)	13,18
Suoja-altaan pituus (m)	22,75
Suoja-altaan korkeus (m)	0,90
Muuntajan öljytilavuus (m ³)	124,7
Öljyn pinnankorkeus vuototilanteessa (m)	$\frac{124,7}{13,18 \cdot 22,75} \approx 0,42$
Veden käytettävissä oleva syvyys (m)	$0,9 - 0,42 = 0,48$

Suoja-altaan tyhjennysrajassa tulisi kuitenkin olla liikkumavaraa, koska allasta ei voida tyhjentää välittömästi rajan ylittyessä. Tyhjennys tilataan palveluntoimittajalta, ja työn tilaamisen ja tyhjennyksen välissä voi olla jopa 2 kuukautta [101]. Tämän takia liikkumavara tulee määrittää niin, ettei allas ehdi täytyä teoreettiseen tyhjennysrajaan saakka. Määrittämisessä voidaan hyödyntää työssä aikaisemminkin käytettyä altaan pinnankorkeuden mittausaineistoa [100], jonka avulla voidaan arvioida 3 kk:n aikana altaaseen kerääntyvää vesimäärää. Kuvassa 8 käytetyssä aineistossa huomioitiin mittaustulokset, joiden välissä oli 3 kuukautta tai vähemmän.



Kuva 8. 3:n kuukauden sademäärät luokittain.

Kuvassa 8 mittausaineisto on jaettu luokkiin sademäärien perusteella, ja aineiston mitausten keskiarvo on 14,1 cm. Huomioiden keskiarvo, sekä kuvan 8 havaintojen painotuminen välille 0–29 cm, valitaan tarkasteltaviksi liikkumavaroiksi 20 ja 30 cm. Taulukosta 6 nähdään, että liikkumavaroilla huomioidut tyhjennysrajat ovat 18 ja 28 cm.

Taulukko 6. Veden käytettävissä olevat syvyydet eri liikkumavaroilla.

Liikkumavara (cm)	Veden käytettävissä oleva syvyys (cm)
0 (teoreettinen)	48
20	28
30	18

Seuraavaksi lasketaan taulukon 6 arvoilla, kuinka monta tyhjennyskertaa vuodessa tulee kullakin tyhjennysrajalla. Taulukosta 7 nähdään, että 18 cm:n rajalla allas tyhjennettäisiin noin 2,7 kertaa vuodessa, ja puolestaan 28 cm:n rajalla 1,4 kertaa vuodessa.

Taulukko 7. Altaan vuosittaiset tyhjennyskerrat eri tyhjennysrajoilla.

Vuosi	Sademäärä	Tyhjennyskertoja 18 cm rajalla	Tyhjennyskertoja 28 cm rajalla
2007	79	4	2
2008	53	2	1
2009	45	2	1
2011	40	2	1
2012	76	4	2
2013	97	5	3
2015	55	3	1
2016	48	2	1
2017	11	0	0
2018	55	3	1
2019	70	3	2
Keskiarvo		2,727	1,364

Taulukossa 7 olevilla altaan tyhjennyskertojen keskiarvoilla, sekä taulukon 2 sähköverkotyön eri tuntiveloituksilla voidaan arvioida altaan tyhjentämistyöstä aiheutuvia kustannuksia. Vaikka IoT-mittaus tulisi korvaamaan veden pinnankorkeuden mittaamisen, kului asentajilla kuitenkin aikaa altaan luokse kulkemiseen, luukun puhdistamiseen lumesta, luukun avaamiseen, sekä mittauslaitteiston kontaktipintojen puhtauden varmistukseen. Tämän vuoksi altaan tyhjennyksen kestona käytetään kappaleessa 5.1 määritettyä 4:ää tuntia. Taulukosta 8 nähdään, että IoT-mittauksella vuosikustannukset altaan tyhjennyksen osalta olisivat merkittävästi aikaperusteista mittaustapaa pienemmät, koska allasta ei tarvitsisi tarkastaa 4:ää kertaa vuodessa.

Taulukko 8. Suoja-altaan tyhjentämiskustannukset eri tyhjennysrajoilla.

Tuntiveloitus (€)	Kokonaiskustannus (€), 18 cm raja	Kokonaiskustannus (€), 28 cm raja
60	654,55	327,27
70	763,64	381,82
80	872,73	436,36
90	981,82	490,91
100	1090,91	545,45

Taulukosta 8 nähdään, että altaan tyhjennysrajalla on suuri vaikutus kustannuksiin, sillä se määrittää tyhjennysten vuosittaisen lukumäärän ja näin ollen tyhjentämisestä aiheutuvat kustannukset.

5.2.2 IoT-järjestelmä

IoT-mittauksen vaatimaan järjestelmään sisältyy anturit, anturien virransyöttö, tietoliikenneyhteydet ja pilvipalvelu. Jotta IoT-mittauksen kustannuksia pystytään arvioimaan, määritetään esimerkkijärjestelmä, jolla pinnankorkeuden mittaus ja öljyn tunnistus voitaisiin toteuttaa. Taulukkoon 9 on kerätty IoT-järjestelmän laitteet ja asennustyöt hintoihin. Pyxisin SWIR-kameralle ei ole hintaa saatavilla, joten hinnaksi oletetaan 3000 euroa kappaleen 4.3.4 tietoihin perustuen. HPT 621 tasoanturin hinnan laskemisessa on käytetty valuuttakurssia USD/EUR=0,95, 40 euron toimituskuluja ja 24 %:n arvonlisävero. Sähkötyön hinta-arvio perustuu kappaleessa 5.1 mainittuun sähkötyön 40–60 euron tuntiveloitukseen ja 1 tunnin kestoon. Asennustyön hinta-arviossa on käytetty 2 tunnin kestoa ja sähköverkkoasentajan 70 euron tuntiveloitusta.

Tasoanturi kommunikoi Prodinon kanssa RS485-sarjaliikenneväylän avulla ja öljyn tunnistin Ethernet-lähiverkon avulla. Proдино on yhteydessä internetiin matkapuhelinverkkojen kautta. Anturien sekä Prodinon virransyöttö toteutetaan 12 V virtalähteellä, jota syöttää 230 V:n vaihtojännite.

Taulukko 9. IoT-järjestelmän komponenttien hinnat.

Nimi	Hinta (€)
Azure IoT Hub kuukausitilaus [35]	9,50
Moi Mobiili laitenetti -internetliittymän kuukausitilaus [102]	4,00
PRODINO MKR GSM Ethernet [103]	171,52
HAKKURI MODULI 35W 12VDC 3A [104]	19,72
Holykell HPT621 tasoanturi [105]	267,53
Pyxis SWIR öljyn tunnistava kamera	3000,00
Virransyötön asennus	50,00
Asennustyö ja käyttöönotto	140,00
Kotelo PRODINO:lle ja virtalähteelle [106]	10,00
Summa (pl. kuukausiveloitukset)	3658,77

Taulukosta 9 voidaan nähdä, että suurin osa järjestelmän kustannuksista aiheutuu öljyn tunnistavasta kamerasta. Järjestelmän kokonaishinnaksi saadaan noin 3700 euroa.

5.3 Säästöt

IoT-mittauksella voitaisiin saavuttaa säästöjä verrattuna aikaperusteiseen mittaustapaan, koska sähköasemalla ei tarvitsisi käydä 4:ää kertaa vuodessa. Säästöjä arvioidaan kappaleissa 5.1 ja 5.2 määritettyjen vuosittaisten kustannusten erotuksena. Todellisuudessa säästöt saadaan selville vasta, kun tiedetään, paljonko sähköasematarkastuksen kiinteä hinta laskee, kun siitä poistetaan suoja-altaan tyhjennystehtävä. Tehtävä

luultavasti eriytetään tuntiveloitettavaksi lisätyöksi [101], jolloin todellisten säästöjen määrittämiseksi on tiedettävä myös tuntiveloituksen suuruus. IoT-mittauksella saatavia säästöjä arvioidaan vähentämällä aikaperusteisen mittaustavan vuosikustannuksista IoT-mittauksen vuosikustannukset. Taulukossa 10 on laskettu mittausten kustannusten erotukset eri tuntiveloituksilla ja altaan eri tyhjennysrajoilla.

Taulukko 10. IoT-mittauksella saavutettavat säästöt.

Tuntiveloitus (€)	Erotus (€), 18 cm raja	Erotus (€), 28 cm raja
60	305,45	632,73
70	356,36	738,18
80	407,27	843,64
90	458,18	949,09
100	509,09	1054,55

Taulukosta 10 nähdään, että säästöt kasvavat palveluntoimittajan tuntiveloituksen ja tyhjennysrajan kasvaessa.

5.4 Investointilaskelmat

IoT-mittauksen kannattavuutta on vaikea arvioida, koska kaikkia kuluja, kuten anturien, tietoliikennejärjestelmien, asennustyön, pilvipalvelun ja analytiikan hintoja ei tarkasti tiedetä. Koska nykyisen mittaustavan tarkkaa hintaa ei tiedetä, on myös säästöjä vaikea arvioida. Tässä työssä tehdään kuitenkin arvio siitä, kuinka kannattava kappaleessa 5.2.2 esitelty esimerkkijärjestelmä olisi. Investointi IoT-mittaukseen ei suoranaisesti tuota tuloja, mutta mittauksella saavutettavia säästöjä käsitellään laskuissa tulojen tavoin.

Kannattavuutta arvioidaan nettonykyarvomenetelmällä, jossa nettokassavirrat diskontataan investointihetkeen laskentakorkokannalla. Kassavirtojen summasta vähennetään hankintameno ja lisätään jäännösarvo diskontattuna investointihetkeen. Investointi on kannattava, jos nettonykyarvo on positiivinen. Vastaavasti investointi on kannattamaton, jos nettonykyarvo on negatiivinen. [30, luku. 6]

Palveluntoimittajan tuntihinnaksi valitaan 70 euroa ja laskentakorkokannaksi 15 %. Mittauslaitteisto sisältää elektroniikkaa, jonka käyttöikäksi arvioidaan käyttölämpötilasta riippuen 2–15 vuotta [107], minkä perusteella IoT-mittauslaitteiston käyttöikäksi eli investoinnin pitoajaksi valitaan 5 vuotta. IoT-järjestelmällä ei arvioida olevan jälleenmyyntiarvoa pitoajan päättyessä, eli sen jäännösarvo on 0. IoT-mittauksella saavutettavat säästöt on poimittu taulukosta 10 käyttäen 28 cm:n tyhjennysrajaa. Taulukossa 11 vuosittaiset nettokassavirrat on diskontattu nykyhetkeen ja summattu. Summasta on vähennetty hankintameno, jolloin on saatu nettonykyarvo.

Taulukko 11. IoT-mittauksen vuosittaiset kassavirrat ja nettonykyarvo.

Vuosi	0	1	2	3	4	5
Hankintameno (€)	-3658,77					
Säästöt (€)		738,18	738,18	738,18	738,18	738,18
Kuukausiveloitukset (€)		-162,00	-162,00	-162,00	-162,00	-162,00
Jäännösarvo (€)						0
Nettokassavirta (€)	-3658,77	576,18	576,18	576,18	576,18	576,18
Nettonykyarvo (€)	-1727,33					

Taulukosta 11 nähdään, että valituilla arvoilla investointi ei ole kannattava. Investoinnilla voidaan saavuttaa kuitenkin hyötyjä, joiden rahallista arvoa on vaikea arvioida. Mittauksella voidaan esimerkiksi huomata muuntajan alkavat öljyvuodot, jolloin niihin voidaan reagoida ajoissa suunnittelemalla siirtokeskeytys ja tilaamalla palveluntoimittajalta huolto. Koska huolto voidaan tilata pidemmän ajan päähän, se on kiireellistä huoltoa halvempi. Mittauksella voidaan havaita myös esimerkiksi vuotava muuntajan palonsammutusjärjestelmä. Toimiva palonsammutusjärjestelmä voi palotilanteessa estää palon leviämisen, ja näin ollen rajoittaa palosta aiheutuvia vahinkoja sekä kustannuksia.

Tarkastellaan vielä erikseen pinnankorkeuden mittaamisen kannattavuutta. Käytetään lähtötietoina taulukossa 9 esitettyä IoT-järjestelmän hankintamenoa vähennettynä öljyn tunnistavan kameran 3000 euron hinnalla. Taulukosta 12 nettonykyarvoksi saadaan noin 1300 euroa.

Taulukko 12. Pinnankorkeuden IoT-mittauksen vuosittaiset kassavirrat ja nettonykyarvo.

Vuosi	0	1	2	3	4	5
Hankintameno (€)	-658,77					
Säästöt (€)		738,18	738,18	738,18	738,18	738,18
Kuukausiveloitukset (€)		-162,00	-162,00	-162,00	-162,00	-162,00
Jäännösarvo (€)						0
Nettokassavirta (€)	-658,77	576,18	576,18	576,18	576,18	576,18
Nettonykyarvo (€)	1272,67					

Nettonykyarvo on positiivinen, eli investointi näyttäytyy kannattavana. Koska se on reilusti positiivinen, jää liikkumavaraa myös mahdollisille virhearvioinneille. 5 vuoden pitäjällä ja 15 %:n laskentakorkokannalla investointi IoT-mittaukseen näyttäytyy siis kannattavana.

5.5 Ehdotus mittausratkaisusta

Suoja-altaan pinnankorkeuden mittaaminen voidaan toteuttaa monilla eri antureilla. Eroja antureissa on niin hinnassa kuin toimintarajoitteissakin. Tässä työssä anturityyppejä ehdotetaan kuitenkin hinnan perusteella, sillä jokaisen kappaleessa 4 esitetyn anturin toimintavarmuuden arvioidaan olevan riittävän hyvä. Antureille arvioidaan riittävän 1–3 tarkastuskertaa vuodessa, eli niiden toiminta tarkastettaisiin jokaisen suoja-altaan tyhjennyksen yhteydessä.

Pinnankorkeuden mittaamiseen ehdotetaan Trumenin TLH hydrostaattista anturia sen halvan, noin 180 euron, hankintahinnan ja toimintavarmuuden vuoksi. Käsitystä anturityypin toimintavarmuudesta tukee se, että niitä on maailmalla käytössä miljoonia, ja ne on todettu toimiviksi myös vaativissa olosuhteissa [68, s. 205]. Trumenin anturi toimii ulkotiloissa, ja se on valmistettu ruostumattomasta teräksestä, mikä estää metallin korroosion. Anturi on yksiosainen ja pienikokoinen, mikä tekee sen asentamisesta helppoa. Mittauskalvo on myös näkyvillä, mikä parantaa anturin toimintavarmuutta ja helpottaa kunnossapitoa.

Öljyn tunnistukseen ehdotetaan Polariksen Pyxis SWIR-kameraa sen halvan hinnan vuoksi. Esimerkiksi UV-fluorometriaan perustuva anturi maksaisi 10 000 USD, jolloin

IoT-mittauksesta olisi vaikea saada kannattava pitkälläkään aikavälillä. Ehdotetulla kameralla ei pystytä havaitsemaan öljyä yhtä tarkasti kuin silmämääräisillä tarkastuksilla, mutta tarkkuus on kuitenkin riittävä, koska sillä voidaan havaita 10–100 µm:n öljykerrokset. Nämä paksuudet vastaavat noin 3–30 litraa öljyä suoja-altaassa. Tällaisia vuotoja ei pystytä muuntajan omilla järjestelmillä havaitsemaan. Muuntajan alkavat öljyvuodot voitaisiin havaita SWIR-kameralla nopeammin kuin nykyisillä neljännesvuosittaisilla tarkastuksilla.

6. YHTEENVETO

Esineiden internetissä esineet ja asiat on yhdistetty internetiin. Niiden tuottamaa dataa analysoimalla yritykset voivat tehdä parempia päätöksiä ja näin ollen saavuttaa taloudellista hyötyä. Suurempi rahallinen hyöty on kuitenkin saavutettavissa uusista dataan pohjautuvista liiketoimintamalleista. Esineiden internetin kaupallisia ratkaisuja on paljon saatavilla, mikä madaltaa kynnystä niiden käyttöönotolle. Yksi tällainen on IoT-alusta, joka tarjoaa monta esineiden internetiin kuuluvaa teknologiaa yhtenä pakettina. Esineiden internetissä käytetyt teknologiat, ja erityisesti niiden yhteensopivuus tulevat olemaan merkittävässä roolissa tulevaisuudessa, varsinkin kun eri IoT-alustan tarjoajat antavat laitetukensa vain tietyille laitteille. Laitteiden ja datan määrän kasvaessa myös esineiden internetin tietoturvan merkitys IoT-ratkaisujen suunnitteluvaiheessa korostuu.

Työssä tutkittiin muuntajan suoja-altaan veden pinnankorkeuden mittaamiseen ja öljyn tunnistamiseen soveltuvia teknologioita ja niihin perustuvia antureita. Tarkoitukseen soveltuvia antureita löydettiin useita ja eroja niissä oli muun muassa mittauksen tarkkuutta heikentävissä tekijöissä, kunnossapidon tarpeessa ja hinnassa. Havaittiin, että kontaktittomat mittaustavat olivat kontaktillisia kalliimpia. Hintaan vaikutti myös anturin ominaisuudet ja valmistaja. Voitiin päätellä, että samaan mittausteknologiaan perustuvia antureita on saatavilla laadukkaampina ja paremmilla ominaisuuksilla, jolloin myös hinta on korkeampi. Eri mittausteknologioihin perustuvien anturien keskeiset erot on esitetty taulukoissa 13 ja 14.

Taulukko 13. Pinnankorkeuden mittausteknologioiden vertailua.

Mittaus- teknologia	Vaikuttaa mittaustulokseen					Tark- kuus (mm)	Hinta- arvio (€)
	Kontak- tillinen / Kontak- titon	Kiinteän aineksen kertyminen	Läm- pötila	Nesteen sähköiset ominaisuudet			
Kapasitii- vinen	Kon- taktilli- nen	Kyllä	Kyllä	Kyllä		10	230
Hydro- staatti- nen	Kon- taktilli- nen	Ei	Kyllä	Ei		2	180
Ohjatun aallon tutka	Kon- taktilli- nen	Kyllä	Ei	Kyllä		3	800
Ultraääni	Kon- taktiton	Ei	Kyllä	Ei		13	500
Vapaan tilan tutka	Kon- taktiton	Ei	Ei	Kyllä		3	1550

Työssä havaittiin, että hydrostaattinen mittaustapa oli ominaisuuksiensa ja hintansa puolesta paras vaihtoehto. Hydrostaattisen anturin mittaustulokseen vaikutti vain lämpötila, mikä voidaan minimoida anturin sisäänrakennetulla lämpötilakompensaatiolla. Anturi oli myös kaikista esitellyistä teknologioista tarkin ja hinnaltaan halvin. Öljyn tunnistavista teknologioista paras vaihtoehto oli infrapuna- ja polarisaatiokamera. Kamera pystyy tunnistamaan öljyn riittävän tarkasti ja se on vaihtoehdoista halvin.

Taulukko 14. Öljyn tunnistamiseen soveltuvien mittausteknologioiden vertailua.

Mittausteknologia	Havaittavan öljykerroksen paksuus (µm)	Hinta-arvio (€)
Silmämääräinen	0,1	–
Näkyvä valo	0,5	Ei saatavilla
UV-fluorometria	1	9400
Infrapuna ja polari- saatio	10	2600

Investointilaskelmissa arvioitiin IoT-mittauksen kannattavuutta. Havaittiin, että valituilla lähtöarvoilla mittausratkaisu, joka kykenee vedenpinnan korkeuden mittaamiseen ja öljyn tunnistamiseen, näyttäytyy kannattamattomana. Toisaalta, jos IoT-järjestelmästä jätettiin öljyn tunnistava kamera pois, näyttäytyi investointi kannattavana, eli laskelmien pohjalta veden pinnankorkeuden IoT-mittaus kannattaisi toteuttaa. On syytä kuitenkin

huomioida, että laskelman tulos perustuu IoT-mittauksella saavutettaviin säästöihin ja IoT-järjestelmän kokonaishintaan, jotka ovat vain arvioita. Virheet lähtöarvoissa vaikuttavat siihen, kuinka kannattavana investointi näyttäytyy.

LÄHTEET

- [1] Internet of Things statistics for 2022 - Taking Things Apart, Dataprot, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.5.2022): <https://dataprot.net/statistics/iot-statistics/>
- [2] C. Burmeister, D. Lüttgens, F. T. Piller, Business Model Innovation for Industrie 4.0: Why the “Industrial Internet” Mandates a New Perspective on Innovation, *Die Unternehmung*, Vol. 70, Iss. 2, 2016, pp. 124–152.
- [3] J. Collin, A. Saarelainen, *Teollinen internet*, Talentum, Helsinki, 2016.
- [4] J. Juhanko, H. Ailisto, P. Alahuhta, J. Collin, M. Halen, T. Heikkilä, H. Kortelainen, M. Mäntylä, T. Seppälä, M. Sallinen, M. Simons, A. Tuominen, *Suomalainen teollinen internet – haasteesta mahdollisuudeksi*, ETLA Raportit 42, 2015. Saatavissa: <http://pub.etla.fi/ETLA-Raportit-Reports-42.pdf>
- [5] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami, Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, *Future generation computer systems*, Vol. 29, Iss. 7, 2013, pp. 1645–1660.
- [6] E. Oriwoh, P. Sant, G. Epiphaniou, Guidelines for Internet of Things Deployment Approaches – The Thing Commandments, *Procedia computer science*, Vol. 21, 2013, pp. 122–131.
- [7] V. Krotov, The Internet of Things and new business opportunities, *Business horizons*, Vol. 60, Iss. 6, 2017, pp. 831–841.
- [8] C. Baudoin, E. Bournival, R. Guerrero, *The Industrial Internet of Things Vocabulary: An Industrial Internet Consortium Framework Publication, Version V2.3*, 2020. Saatavissa: <https://www.iiconsortium.org/pdf/Vocabulary-Report-2.3.pdf>
- [9] S.-W. Lin, S. Mellor, B. Miller, J. Durand, M. Crawford, R. Lembree, *Industrial Internet Reference Architecture, V1.7*, 2015. Saatavissa: <https://www.iiconsortium.org/IIRA-1-7-ajs.pdf>
- [10] *Zukunftsbild „Industrie 4.0“*, Plattform Industrie 4.0, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.3.2022): <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/zukunftsbild-industrie-4-0.pdf>
- [11] J. Nagy, J. Oláh, E. Erdei, D. Máté, J. Popp, The Role and Impact of Industry 4.0 and the Internet of Things on the Business Strategy of the Value Chain—The Case of Hungary, *Sustainability*, Vol. 10, Iss. 10, 2018.
- [12] *Winter Driving Tips*, Tesla Inc., verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.3.2022): <https://www.tesla.com/support/winter-driving-tips>
- [13] D. Hanes, G. Salgueiro, R. Barton, *IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things*, Cisco Press, 2017.
- [14] T. J. Gerpott, S. May, Integration of Internet of Things components into a firm’s offering portfolio – a business development framework, *Info*, Vol. 18, Iss. 2, 2016, pp. 53–63.

- [15] J. Davies, C. Fortuna, *The Internet of Things: From Data to Insight*, Wiley, Hoboken New Jersey, USA, 2020.
- [16] J. Tervola, Konecranes skaalasi nostimensa, ja nyt ”myyntimies pystyy määrittämään täydellisen tuotteen paikan päällä”, *Kauppalehti*, 2022, päivitetty 23.3.2022. Saatavissa (viitattu 24.3.2022): <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/konecranes-skaalasi-nostimensa-ja-nyt-myyntimies-pystyy-maarittamaan-taydellisen-tuotteen-paikan-paalla/ad1d6247-3a16-4289-954e-ac30a9d3848f>
- [17] D. Evans, *How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*, Cisco Internet Business Solutions Group, 2011. Saatavissa (viitattu 22.3.2022): https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
- [18] M. Hung, *Gartner Insights on How to Lead in a Connected World*, Gartner, 2017. Saatavissa (viitattu 22.3.2022): https://www.gartner.com/imagesrv/books/iot/iotEbook_digital.pdf
- [19] *IoT connected devices worldwide 2019-2030*, Statista, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.3.2022): <https://www.statista.com/statistics/1183457/iotconnected-devices-worldwide/>
- [20] That “Internet of Things” Thing, *RFID Journal*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.3.2022): <https://www.rfidjournal.com/that-internet-ofthings-thing>
- [21] *2019 Manufacturing Trends Report*, Microsoft, 2019. Saatavissa (viitattu 26.3.2022): <http://info.microsoft.com/rs/157-GQE-382/images/EN-AU-CNTNT-eBook-D365Ops-2019%20Manufacturing%20Trends%20Report.pdf>
- [22] IBM unveils mini drive, *CNN Money*, 2000, päivitetty 20.6.2000. Saatavissa (viitattu 27.3.2022): https://money.cnn.com/2000/06/20/technology/ibm_drive/
- [23] *The Cost of Hard Drives Over Time*, Backblaze, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.3.2022): <https://www.backblaze.com/blog/hard-drivecost-per-gigabyte/>
- [24] A. D’Amico, C. Di Natale, A contribution on some basic definitions of sensors properties, *IEEE sensors journal*, Vol. 1, Iss. 3, 2001, pp. 183–190.
- [25] C. A. Gross, T. A. Roppel, *Fundamentals of electrical engineering*, CRC Press, Boca Raton Florida, USA, 2012.
- [26] 0 280 130 026: NTC temperature sensors: -40°C to 150°C, Robert Bosch GmbH. Saatavissa (viitattu 1.4.2022): <https://www.finjector.com/documents/51907d67c691b/0280130026.pdf>
- [27] *Self-Study Programme 207*, Audi AG, Jun1998. Saatavissa (viitattu 5.4.2022): http://www.volkspage.net/technik/ssp/ssp/SSP_207.pdf
- [28] *Piezoelectric Energy Harvesters*, PIEZO, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 5.4.2022): <https://piezo.com/collections/piezoelectric-energy-harvesters>
- [29] T. Branco, F. de Sá-Soares, A. L. Rivero, Key Issues for the Successful Adoption of Cloud Computing, *Procedia computer science*, Vol. 121, 2017, pp. 115–122.

- [30] P. Suomala, O. Manninen, J. Lyly-Yrjänäinen, Laskentatoimi johtamisen tukena, Edita, Helsinki, 2011.
- [31] M. M. Eyada, W. Saber, M. M. El Genidy, F. Amer, Performance Evaluation of IoT Data Management Using MongoDB Versus MySQL Databases in Different Cloud Environments, IEEE access, Vol. 8, 2020, pp. 110656–110668.
- [32] D. Agrawal, A. El Abbadi, S. Das, A. J. Elmore, Database Scalability, Elasticity, and Autonomy in the Cloud, Berlin, Germany, 2011, pp. 2–15
- [33] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, L. Xu, Edge Computing: Vision and Challenges, IEEE internet of things journal, Vol. 3, Iss. 5, 2016, pp. 637–646.
- [34] M. Perry, Evaluating and Choosing an IoT Platform, O'Reilly Media, 2016.
- [35] Azure IoT Hub pricing, Microsoft, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.4.2022): <https://azure.microsoft.com/en-us/pricing/details/iot-hub/>
- [36] J. Mineraud, O. Mazhelis, X. Su, S. Tarkoma, A gap analysis of Internet-of-Things platforms, Computer communications, Vol. 89–90, 2016, pp. 5–16.
- [37] Suomen sähköjärjestelmä, Fingrid, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.3.2022): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>
- [38] Sähkömarkkinalaki L 9.8.2013/588, 2013. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588#O2L5>
- [39] E. Lakervi, J. Partanen, Sähkönjakelutekniikka, Gaudeamus Helsinki University Press, Helsinki, 2009.
- [40] EstLink 2 merikaapelin lasku on alkanut, Fingrid, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.3.2022): <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2012/estlink-2-merikaapelin-lasku-on-alkanut/>
- [41] Sähköasemat, Fingrid, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.4.2022): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kunnossapito/sahkoasemat/>
- [42] Fingridin sähkönsiirtoverkko, Fingrid, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.3.2022): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/fingridin-sahkonsiirtoverkko/>
- [43] Sähköverkot, Energiateollisuus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.4.2022): <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/sahkoverkot>
- [44] Valvontamenetelmät neljännellä 1.1.2016 – 31.12.2019 ja viidennellä 1.1.2020 – 31.12.2023 valvontajaksolla, Energiavirasto, 2015. Saatavissa (viitattu 10.2.2022): <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12766832/Valvontamenetelm%C3%A4t-s%C3%A4hk%C3%B6nkantaverkko-2016-2023.pdf/0501bf91-af82-3067-a9a9-83a60a210b0b/Valvontamenetelm%C3%A4t-s%C3%A4hk%C3%B6nkantaverkko-2016-2023.pdf?t=1582720096000>
- [45] IoT:n vaikutus kunnonhallintaan, Fingrid, 2019. (ei saatavissa)
- [46] Digitaalinen kunnonvalvonta auttaa estämään virtamuuntajien räjähdyksiä, Fingrid, 2022. (ei saatavissa)

- [47] Digitaalinen kunnonvalvonta mullistaa katkaisijoiden kunnonvalvonnan, Fingrid, 2022. (ei saatavissa)
- [48] Anturipohjaisten järjestelmien kehityshanke, Fingrid, 2019. (ei saatavissa)
- [49] 400 kV muuntajan tyyppikilpi, Fingrid. (ei saatavissa)
- [50] Suurjännitesähköasennukset, Suomen standardisoimisliitto, SFS 6001, Helsinki, Suomi, 2018.
- [51] M. Vartiainen, diplomi-insinööri, asiantuntija, Fingrid Oyj, Helsinki. Haastattelu 12.4.2022
- [52] J. Ristiniemi, Harjoittelija, Fingrid Oyj, Helsinki. Valokuvaus 7.2.2022
- [53] G. Henry, Choose the proper level measurement technique, Chemical engineering progress, Vol. 107, Iss. 4, 2011, pp. 45–49.
- [54] K. Chetpattananondh, T. Tapoanoi, P. Phukpattaranont, N. Jindapetch, A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor, Sensors and actuators. A. Physical., Vol. 209, 2014, pp. 175–182.
- [55] B. Kumar, G. Rajita, N. Mandal, A Review on Capacitive-Type Sensor for Measurement of Height of Liquid Level, Measurement and control, Vol. 47, Iss. 7, 2014, pp. 219–224.
- [56] Capacitive Liquid Level Sensor Probes, Sensorsone, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.4.2022):
<https://www.sensorsone.com/capacitive-liquid-level-sensor-probes/>
- [57] Types and pros, cons and application of common level sensors, Forumautomation, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.4.2022): <https://forumautomation.com/t/types-and-pros-cons-and-application-of-common-level-sensors/5486>
- [58] K. Loizou, E. Koutroulis, D. Zalikas, G. Lontas, A low-cost capacitive sensor for water level monitoring in large-scale storage tanks, IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Vol. 3, 2015, pp. 1416–1421.
- [59] HPT621 Datasheet, Holykell. Saatavissa (viitattu 27.4.2022):
<https://holykell.com/upload/file/1571283510.pdf>
- [60] K. Loizou, E. Koutroulis, Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system, Measurement, Vol. 89, 2016, pp. 204–214.
- [61] Mitä teflon on ja miten se toimii?, Tieteen kuvalehti, 2020, päivitetty 27.5.2020. Saatavissa: <https://tiekku.fi/teknologia/materiaalit/tarttumaton-pinnoite-ei-reagoi>
- [62] S. C. Bera, H. Mandal, S. Saha, A. Dutta, Study of a Modified Capacitance-Type Level Transducer for Any Type of Liquid, IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol. 63, Iss. 3, 2014, pp. 641–649.
- [63] NC56 Capacitive Filling Level Probe Data Sheet, Fischer, Sep 2020. Saatavissa: https://www.fischermesstechnik.de/sites/default/files/DB_EN_NC56_11_21.pdf

- [64] Level Transmitter, Parshvi Technology, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.4.2022): <https://www.parshvitechnology.net/level-transmitter.html#two-wire-capacitance-continuous-level-transmitter>
- [65] Capacitance Type Level Transmitters for Liquids, Instruction Manual, Trumen. Saatavissa: <https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://trumen.in/wp-content/uploads/2019/01/Instruction-Manual-TLCF.pdf>
- [66] EU EMC Summary list of harmonised standards, European Commission, 2022. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/37903/attachments/1/translations/en/renditions/native>
- [67] DPT145 Multiparameter Transmitter Datasheet, Vaisala, 2021. Saatavissa: <https://docs.vaisala.com/v/u/B211160EN-G/en-US>
- [68] J. A. Hunt, Level sensing of liquids and solids - a review of the technologies, Sensor review, Vol. 27, Iss. 3, 2007, pp. 200–206.
- [69] Hydrostatic Level Transmitter Datasheet, Trumen. Saatavissa (viitattu 9.5.2022): <http://trumen.in/wp-content/uploads/2019/01/TLH-Data-sheet-Trumen-R2.pdf>
- [70] The Big 6 level measurement technologies, ABB, 2020. Saatavissa: https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=WP%2fLevel_Big6&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch
- [71] Fundamentals of hydrostatic level measurement, Wika, 2014. Saatavissa (viitattu 8.5.2022): https://www.wika.us/upload/TA_1114_IDM_en_co_63032.pdf
- [72] Submersible Pressure Sensor LH-20 Datasheet, Wika, 2018. Saatavissa: https://www.wika.com/media/Data-sheets/Level/Submersible-pressure-sensors/ds_pe8156_en_co.pdf
- [73] WIKA LH-10 Pressure Sensor for Liquid, RS Components Ltd., verkkosivu. Saatavissa (viitattu 9.5.2022): [https://fi.rsdelivers.com/product/wika/46879433/wika-lh-10-pressure-sensor-for-liquid-426psi-max/1241477?cm_mmc=FI-PLA-DS3A-_-google-_-CSS_FI_EN_Automation_%26_Control_Gear_Whoop-_- \(FI:Whoop!\)+Pneumatic+Pressure+Sensors-_-&matchtype=&pla-391670666287&s_kwid=AL!7457!3!583980689213!!!g!391670666287!&gclid=CjwKCAjw9-KTBhBcEiwAr19ig9OCOVaL48mqzzJfDj0LROITO4cqDigL2b7LUgyRuxi9QS42CTOOcxoC_OsQAvD_BWE&gclid=aw.ds](https://fi.rsdelivers.com/product/wika/46879433/wika-lh-10-pressure-sensor-for-liquid-426psi-max/1241477?cm_mmc=FI-PLA-DS3A-_-google-_-CSS_FI_EN_Automation_%26_Control_Gear_Whoop-_- (FI:Whoop!)+Pneumatic+Pressure+Sensors-_-&matchtype=&pla-391670666287&s_kwid=AL!7457!3!583980689213!!!g!391670666287!&gclid=CjwKCAjw9-KTBhBcEiwAr19ig9OCOVaL48mqzzJfDj0LROITO4cqDigL2b7LUgyRuxi9QS42CTOOcxoC_OsQAvD_BWE&gclid=aw.ds)
- [74] Submersible Pressure Transmitter LH-10 Datasheet, Wika, 2012. Saatavissa: https://www.wika.com/media/Data-sheets/Level/Submersible-pressure-sensors/ds_pe8109_en_co.pdf
- [75] A. K. Sahoo, S. K. Udghata, A Novel ANN-Based Adaptive Ultrasonic Measurement System for Accurate Water Level Monitoring, IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol. 69, Iss. 6, 2020, pp. 3359–3369.
- [76] S. Milligan, H. Vandelinde, M. Cavanagh, Understanding ultrasonic level measurement, Momentum Press, New York New York, USA, 2013.
- [77] Ultrasonic Level Transmitter, Technical Specification Document, Trumen. Saatavissa (viitattu 3.5.2022): <https://pdf.indiamart.com/impdf/14374902830/SELLER-5197052/ultrasonic-level-transmitter.pdf>

- [78] Radar Level Transmitter, Datasheet, Trumen. Saatavissa (viitattu 3.5.2022): <https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://trumen.in/wp-content/uploads/2019/01/TLR-Data-Sheet-Trumen.pdf>
- [79] Guided Wave Radar Level Transmitter, Datasheet, Trumen. Saatavissa (viitattu 4.5.2022): <https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://trumen.in/wp-content/uploads/2019/01/TLRG-Data-Sheet-Trumen.pdf>
- [80] Li Lu, S. Ichimura, T. Moriyama, A. Yamagishi, T. Rokunohe, A system to detect small amounts of oil leakage with oil visualization for transformers using fluorescence recognition, IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, Vol. 24, Iss. 2, 2017, pp. 1249–1255.
- [81] M. Fingas, Visual Appearance of Oil on the Sea, Journal of marine science and engineering, Vol. 9, Iss. 1, 2021.
- [82] M. Fingas, C. E. Brown, A Review of Oil Spill Remote Sensing, Sensors (Basel, Switzerland), Vol. 18, Iss. 1, 2017.
- [83] OIW80 Oil in Water Sensor Datasheet, Electro-chemical Devices. Saatavissa (viitattu 6.5.2022): <https://ecdi.com/wp-content/uploads/2021/11/OIW80-Sensor-Rev-B.pdf>
- [84] C. R. Chase, S. Van Bibber, T. P. Muniz, Development of a non contact oil spill detection system, Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE, Vol. 2, 2005, pp. 1352–1357.
- [85] Remote Optical Watcher Brochure, Laser Diagnostic Instruments. Saatavissa (viitattu 5.5.2022): <https://ldi.ee/wp-content/uploads/2021/01/LDI-ROW-Brochure-ALUTech-Sheet.pdf>
- [86] ODL-1600 Specification Sheet, DKK TOA Corporation. Saatavissa (viitattu 5.5.2022): <http://www.pollution-ppm.co.uk/pdf/2020/ODL-1600-Oil%20on%20Water.pdf>
- [87] SlickSleuth SS100 Datasheet, InterOcean Systems LLC. Saatavissa (viitattu 6.5.2022): https://www.interoceansystems.com/wp-content/uploads/2020/02/SlickSleuth-SS100_SS100-EXd_Datasheet.pdf
- [88] Slick under HS Code 9031 Import Data of Indonesia, Export Genius, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 6.5.2022): <https://www.indonesianimporter.com/indonesia-import-data/slick/hs-code-9031.html>
- [89] CRAB Oil Slicks Optical Detector, Lumex Instruments. Saatavissa (viitattu 6.5.2022): https://www.lumexinstruments.com/files/21LEN15.50.01-1_Crab.pdf
- [90] D. B. Chenault, J. P. Vaden, D. A. Mitchell, E. D. Demicco, Infrared Polarimetric Sensing of Oil on Water, Marine Technology Society journal, Vol. 52, Iss. 6, 2018, pp. 13–22.
- [91] Pyxis SWIR, Polaris Sensor Technologies, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.5.2022): <https://www.polarissensor.com/pyxis/#pyxis-swir>
- [92] (3) Polaris Pyxis LWIR 640 Sensors / Cameras #1123568-01 in Missouri USA, Machinio, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.5.2022):

<https://www.machinio.com/listings/65237428-3-polaris-pyxis-lwir-640-sensors-cameras-1123568-01-in-missouri-usa>

- [93] Sähköverkkoasentaja palkka - Palkkavertailu, Palkkavertailu, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.5.2022): <https://palkkavertailu.com/palkka/s%C3%A4hk%C3%B6verkkoasentaja>
- [94] Asunnon ja työpaikan väliset matkat, Verohallinto, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.5.2022): https://www.vero.fi/henkiloasiakkaat/verokortti-ja-veroilmoitus/tulot-ja-vahennykset/matkakulut/asunnon_ja_tyopaikan_valiset_matka/
- [95] Ensimmäisen työntekijän palkkaaminen - näin paljon se maksaa!, Accountor, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.5.2022): <https://www.accountor.com/fi/finland/blogi/ensimmaisen-tyontekijan-palkkaaminen>
- [96] Hinnasto, Autohuolto W, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.5.2022): <https://autohuoltow.fi/hinnasto/>
- [97] Mitä maksaa sähköasennustyö? Tutustu sähköasennusurakoiden hintoihin, Urakkamaailma, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.5.2022): <https://www.urakkamaailma.fi/remonttien-hinnat/sahkoasennus>
- [98] Autonasentaja palkka, Palkkavertailu, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.5.2022): <https://palkkavertailu.com/palkka/autonasentaja>
- [99] Sähköaseman tarkastusohje, Fingrid. (ei saatavissa)
- [100] Muuntajan suoja-altaan pinnankorkeuden mittaussaineisto 2007–2019, Fingrid Oyj. Saatavissa: kts. Liite A
- [101] M. Vartiainen, diplomi-insinööri, asiantuntija, Fingrid Oyj, Helsinki. Haastattelu 16.5.2022
- [102] Laitenetti, Moi Mobiili, verkkosivu. Saatavissa viitattu 19.5.2022): https://www.moi.fi/laitenetti?gclid=Cj0KCQjwspKUBhCvARIsAB2iYusy1eSp99e69ekw8z2EN8ZalxZRwl56HOyt_zLA0HYt6mSyQ-PFvDwaAtKEALw_wcB
- [103] PRODINo MKR GSM Ethernet, KMP Electronics, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.5.2022): <https://kmpelectronics.eu/shop/prodino-mkr-gsm-ethernet/>
- [104] HAKKURI MODULI 35W 12VDC 3A, PARTCO, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.5.2022): <https://www.partco.fi/fi/teholaehteet/hakkurit/hakkurimodulit/21796-lrs-35-12.html>
- [105] Holykell High Accuracy Capacitive Water Level Sensor, Alibaba, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.5.2022): https://www.alibaba.com/product-detail/Holykell-High-Accuracy-Capacitive-Water-Level_62154648412.html?spm=a2700.details.0.0.27591263AyFuYn
- [106] Famatel asennuskotelo 160x135x83 mm IP55, Triopak, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.5.2022): <https://www.triopak.fi/fi/tuote/FAMATEL-3013>
- [107] Arduino Circuit Lifespan?, Arduino Forum, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 31.5.2022): <https://forum.arduino.cc/t/arduino-circuit-lifespan/360703>

LIITE A: SUOJA-ALTAAN PINNANKORKEUDEN MITTAUSTULOKSET VUOSILTA 2007–2019

Mittausajankohta (kk/vvvv)	Mittaustulos (cm)
4/2007	28
6/2007	9
9/2007	19
11/2007	23
4/2008	0
6/2008	0
9/2008	28
12/2008	25
5/2009	15
7/2009	5
9/2009	15
12/2009	10
7/2010	0
7/2011	10
10/2011	10
12/2011	20
5/2012	30
10/2012	46
5/2013	35
8/2013	10
10/2013	52
5/2014	0
6/2015	20
8/2015	0
10/2015	15
12/2015	20
2/2016	8
4/2016	15
6/2016	0
9/2016	10
12/2016	15

Mittausajankohta (kk/vvvv)	Mittaustulos (cm)
2/2017	1
5/2017	0
6/2017	0
9/2017	5
11/2017	5
8/2018	35
11/2018	20
2/2019	0
5/2019	70