

Opinnäytetyö (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

2021

Matti Hietikko

PALAVIEN KAASUJEN MITTALAITE ESP32- ALUSTALLA

Matti Hietikko

PALAVIEN KAASUJEN MITTALAITE ESP32-ALUSTALLA

Älylaitteet mahdollistava tekniikka on kehittynyt huimaa vauhtia viime vuosina. Yhä useammalla ihmisellä on jo kotonaan tai mukanaan useampi verkkoon yhdistetty älylaite. Näiden kuluttajille tarkoitettujen elämää helpottavien älylaitteiden lisäksi myös teollisuudessa ollaan siirtymässä verkkoon. Päätöksenteon tukena voidaan käyttää tuoretta anturitietoa ympäri maailman ja näin tehostaa liiketoimintaa.

Älylaitteita ja niiden ympärille kehitettyjä menetelmiä on paljon. Suunnittelijan on tehtävä laajamittaista tutkimusta selvittääkseen kuhunkin käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuvan menetelmän. Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin tällaista prosessia laitekehittäjän näkökulmasta, kun pyrittiin ominaisuuksia vertailemalla valitsemaan monista hyvistä vaihtoehdoista järkevin.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa vähävirtainen LoRaWAN-verkossa toimiva mittalaite osaksi suurempaa palvelukokonaisuutta. Mittauslaite tehtiin LoRaWAN-verkossa toimivaksi, koska yhteystavan virrankulutus on pieni ja se on helppo ottaa käyttöön. Laitteen mitattavana on palavien kaasujen kumulatiivinen LEL-arvo. Laite päätettiin toteuttaa käyttämällä ESP32-pohjaista kehitysalustaa. Tähän päädyttiin pienen virrankulutuksen, hyvien tietoliikenneyhteyksien sekä edullisen hinnan vuoksi.

Laite liitetään osaksi jo toiminnassa olevaa toimeksiantajan pilvipalvelua, joka välittää tiedon loppukäyttäjälle. Pilvipalvelu mahdollistaa loppukäyttäjälle anturin tilan seuraamisen, hälytysten asettamisen sekä myös laitteen asetusten määrittämisen.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään laitteen kehitykseen, mutta palvelun toiminta käydään kokonaisuutena läpi. Loppukäyttäjälle tarjotaan siis pelkän laitteen sijaan kokonaista palvelua ja sen ylläpitoa. Tässä työssä suunnitellun laitteen prototyyppi on toiminnassa ja se täyttää sille asetetut vaatimukset.

ASIASANAT:

LoRaWAN, esineiden internet, ESP32, kaasun mittaus

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Information and Communications Technology

2021 | 45 pages

Matti Hietikko

FLAMMABLE GAS SENSOR ON ESP32

The technology enabling smart devices has developed significantly in recent years. More and more people are having several devices connected to the internet, whether at home or on-the-go. These devices have not only made consumers lives easier, but also are an instrumental part of modern industries. Data gathered by sensors is widely used to support decision making in businesses all over the world.

It is the responsibility of the developer to carry out the required research to find the most suitable methods for the task in hand. In this project we are going to follow this process from the developer's point of view.

The purpose of this thesis was to design and implement a low-power sensor node communicating in LoRaWAN network as a part of a larger ensemble. In addition to the LoRaWAN, there are also other communication protocols that are reviewed and compared in this thesis. Sensor node in this thesis measures the concentration of flammable gases in the air. The device was implemented on a ESP32-based development board because of its low power consumption, good communication components, and low cost.

The end result was a device that is connected to an operational cloud service, which forwards data from the sensor node to the end-user. The cloud service provides the end-user with all of the requirements needed to read data, set alerts and configure device preferences.

KEYWORDS:

LoRaWAN, IoT, internet of things, ESP32, sensor node

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	7
2 TEKNOLOGIAT	8
2.1 Esineiden internet	8
2.2 Sensor node eli anturisolmu	10
2.3 Tiedonsiirtoteknologiat	11
2.3.1 Bluetooth	12
2.3.2 WLAN	12
2.3.3 NB-IoT	13
2.3.4 LoRa ja LoRaWAN	14
2.4 Pilvipalvelu	16
2.5 Palavien kaasujen mittari	18
3 VAATIMUKSET	19
3.1 Virrankulutus	21
3.2 Kaasujen mittaus	22
3.3 Tiedon lähetys	22
3.4 Tiedon raportointi	22
4 TOTEUTUS	23
4.1 Alustan valinta	24
4.2 Akun valinta	28
4.3 Tiedonsiirtoteknologian valinta	30
4.4 Ohjelmistoarkkitehtuuri	31
4.5 Tiedon raportointi	36
5 MITTAUKSET JA TESTAAMINEN	37
5.1 Virrankulutus	37
5.2 Kaasujen mittaus	39
5.3 Tiedon lähetys	39
6 YHTEENVETO	40

KUVAT

Kuva 1. IoT-laitteiden lukumäärä ihmistä kohden.	8
Kuva 2. IoT-topologia.	10
Kuva 3. Eri tiedonsiirtomahdollisuuksia.	11
Kuva 4. LoRaWAN-päätelaitteen OSI-malli.	14
Kuva 5. Työssä käytetyn yhteyden topologia.	17
Kuva 6. Arvio akunkestosta.	21
Kuva 7. Laitteiston lohkokaavio.	23
Kuva 8. Ohjelman toimintaperiaate.	32
Kuva 9. Ohjelmistoarkkitehtuuri.	35
Kuva 10. Anturin mittaustapa, jossa mitataan jatkuvasti.	36
Kuva 11. Anturin mittaustapa, jossa anturi kytketään mittausten välillä pois päältä.	36
Kuva 12. Laitteen toiminta-aika akkukäyttöisenä.	38

TAULUKOT

Taulukko 1. Wi-Fi:n eri sukupolvien kehitys.	13
Taulukko 2. MoSCoW-menetelmän mukaiset vaatimukset taulukoituna.	20
Taulukko 3. Alustojen vertailu.	25
Taulukko 4. Mikrokontrollerien lasketut virrankulutus- ja akunkestoarvot 4000 mAh:n akulla vuorokausissa.	27
Taulukko 5. LoRaWAN ja NB-IoT lähetys- ja vastaanottovirtojen vertailu.	30
Taulukko 6. Virrankulutus 30 tavun mittaisen LoRaWAN-viestin lähetyksessä kerran tunnissa.	31
Taulukko 7. Käytetyt avaimet LoRaWAN-protokollassa.	33
Taulukko 8. ESP32:n eri tilat taulukoituna.	34
Taulukko 9. Mitatut virta-arvot.	37
Taulukko 10. Ilmoituksen viive.	39

KÄYTETYT LYHENTEET

API	Application Programming Interface, eli ohjelmointirajapinta auttaa järjestelmän eri osioiden keskustelua keskenään.
ATEX	ATmosphères EXplosibles. Direktiivi, joka käsittelee laitteistoja räjähdysvaarallisissa tiloissa.
CPU	Central Processing Unit.
IaaS	Infrastructure as a Service. Pilvipalvelutyyppi, jossa palveluntuottaja tarjoaa asiakkaalle infrastruktuurin.
IDE	Integrated Development Environment. Kehitysympäristö, joka sisältää useita ohjelmistokehitykseen tarvittavia työkaluja samassa paketissa.
LEL	Lower Explosive Limit. Kaasun pienin konsentraatio, joka syttyy. Ilmoitetaan prosentteina.
MAC	Media Access Control. Laitteen yksilöivä osoite.
PaaS	Platform as a Service. Pilvipalvelutyyppi, jossa asiakkaalle tarjotaan sovellusalusta.
REST	REpresentational State Transfer. HTTP-protokollaa käyttävä sovellusarkkitehtuuri.
SaaS	Software as a Service. Pilvipalvelutyyppi, jossa asiakas saa palveluntarjoajalta ohjelmiston.
SPI	Serial Peripheral Interface. Komponenttien yhdistämiseen käytetty sarjaliikenneväylä.
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter. Sarjaliikenteeseen käytetty fyysinen piiri.

1 JOHDANTO

Älylaitteet sekä ne mahdollistava tekniikka kehittyvät vauhtia. Ihmisillä alkaakin olla useita verkkoon yhdistettyjä älylaitteita, osa jopa jatkuvasti mukanaan. Kuluttajille tarkoitetut tuotteet ovat usein keskiössä puhuttaessa älylaitteista, mutta älylaitteet ovat yleistyneet myös teollisuudessa. Tietoa on nykypäivänä saatavilla valtavia määriä paikasta riippumatta, ja tätä onkin hyödyllistä käyttää myös liiketoiminnan tukena.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on toteuttaa ilman kaasupitoisuuden mittausta. Mittausta on suoritettava turvallisuussyistä jatkuvasti ja asetettujen raja-arvojen ylittyessä on tiedon oltava loppukäyttäjällä nopeasti saatavilla. Tarvittaessa laitteen on toimittava täysin langattomasti, joka tarkoittaa akkukäyttöisyyttä. Tämä asettaa vaatimuksia laitteen jokaiselle komponentille. Tässä työssä käytettävän kaasuanturin lisäksi laitteeseen voi kytkeä myös muita anturityyppejä, eli siitä luodaan anturisolmu (engl. sensor node).

Laitteen toteutuksessa tiedonsiirrossa päätettiin hyödyntää LoRaWAN-protokollaa ja alustaksi valikoitui ESP32-pohjainen kehitysalusta. Kehitysalustaan kytketyn anturin avulla saadaan tieto kaasupitoisuudesta Digita Oy:n ylläpitämän LoRaWAN-verkon kautta AM-Care pilvipalveluun. AM-Care on ActMea Oy:n luoma pilvipalvelu, joka toimii palvelun asiakasrajapintana. Pilvipalvelun avulla loppuasiakkaalla on mahdollisuus helposti seurata omia antureitaan sekä asettaa niille hälytysrajoja.

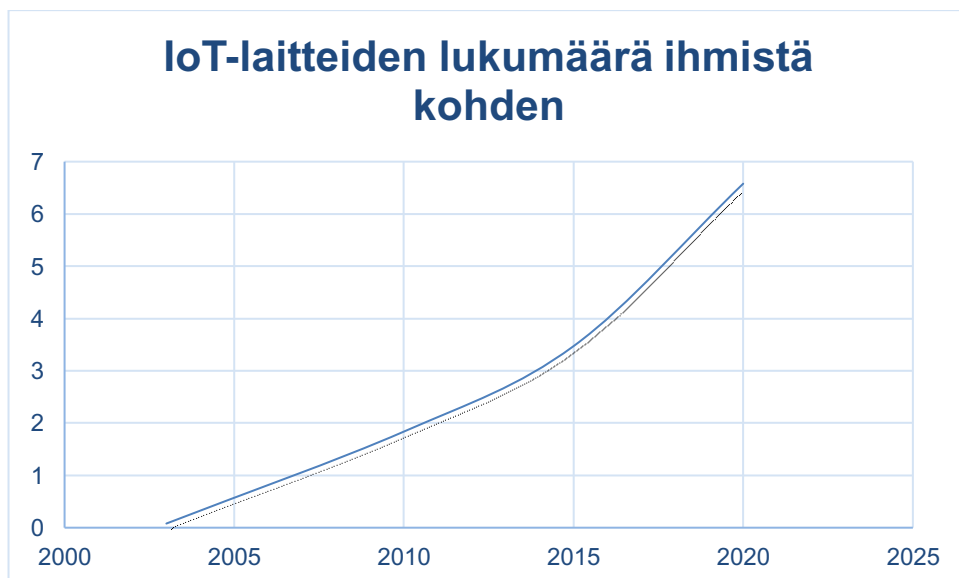
Toisessa luvussa käydään lyhyesti läpi työn kannalta olennaisia teknologioita ja avataan hieman käytettäviä käsitteitä. Kolmannessa luvussa esitetään ja pohditaan laitteelle asetettuja vaatimuksia ja priorisoidaan ne perustellusti. Toteutusvaiheessa, luvussa neljä, aiemmin esiteltyjen tuotteiden ja teknologioiden valintoja käydään läpi ja perustellaan soveltuvuutta vaatimuksiin nähden. Tässä luvussa esitellään myös valintojen tueksi laskettuja arvioita lopullisesta laitteesta. Valintoja testataan käytännössä ja mittauksin osoitetaan laitteen toimivuus sekä vaatimusten täyttyminen. Yhteenvedossa käsitellään mittauksia suhteessa vaatimuksiin. Laitetta suunniteltaessa on alusta pitäen pidetty mielessä sen jatkojalostus eri käyttötarkoituksiin. Se näkyy kaikissa valinnoissa komponenttitasolta ohjelmistoon. Loppuluvussa käydään läpi ehdotuksia laitteen tulevaisuuden sekä jatkokehityksen osalta.

2 TEKNOLOGIAT

Tässä luvussa esitellään tähän työhön liittyviä käsitteitä, tekniikoita ja menetelmiä. Kaasuanturi on käsitelty tässä vain pintapuolisesti, koska tarkoituksena on luoda alusta, jolla voi käyttää useampia antureita. Näin ollen sen tarkempi esittely ei ole välttämätöntä.

2.1 Esineiden internet

Esineiden internetillä (engl. Internet of Things, IoT) tarkoitetaan käytännössä fyysisten esineiden liittämistä internetiin. Yhteyden avulla laitteet voivat jakaa tietoa keskenään ja myös vastaanottaa tietoa. Nykyisin yhä useammat arkiaskareita helpottavat apuvälineet ja -laitteet ovat saaneet älyominaisuuksia ja yhteyden verkkoon. Tämä mahdollistaa laitteiden reaaliaikaisten tilatietojen lukemisen lisäksi myös ohjaamisen etänä. Nykyteknologia mahdollistaa lähes rajattomat käyttömahdollisuudet. Tämä on selkeästi nähtävissä markkinoiden kasvuna. Verkossa olevien IoT-laitteiden määrä on ollut jo pitkään korkeampi kuin maailman väkiluku, kuten kuvassa 1 on esitetty [1]. Lukema on kirjoitushetkellä yli kuusinkertainen. [2]

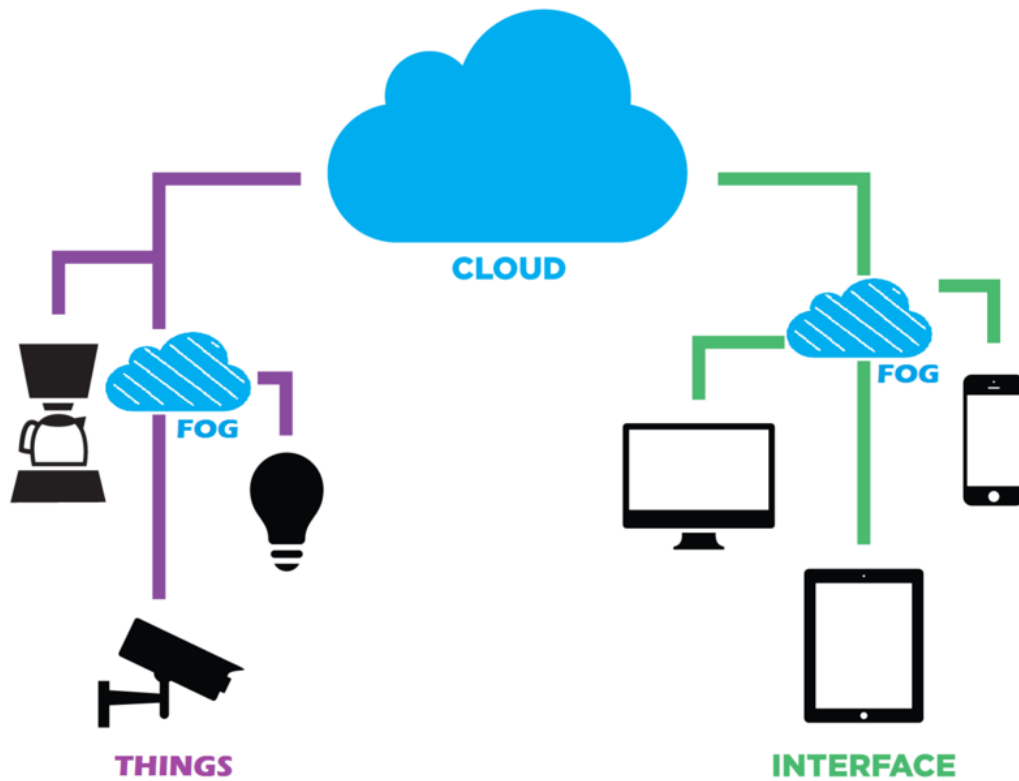


Kuva 1. IoT-laitteiden lukumäärä ihmistä kohden.

IoT ulottuukin jo käytännössä kaikkialle:

- Älykotiin on saatavilla IoT-tuotteita aina etäohjattavasta lämmityksestä kulunvalvontaan.
- Sähkönsiirrossa IoT:tä hyödynnetään mm. etäluettavissa sähkön- ja vedenkulutusmittareissa.
- Maataloudessa pystytään IoT-laitteilla tarkkailemaan ilman ja maaperän kosteutta sekä valvomaan karjaa.
- Terveystieteissä pystytään tarkkailemaan potilaiden terveydentilaa tehokkaammin.
- Teollisuudessa IoT-laitteet ovat myös lisääntyneet. Tietoa voidaan kerätä erilaisista prosesseista laajemmin ja kaikki tiedot ovat saatavilla sijainnista riippumatta. Teollisuuden IoT:tä käytetäänkin usein lyhennettä IIoT (Industrial internet of things).
- Logistiikkaa IoT on auttanut varastohallinnan lisäksi myös rahdin reaaliaikaisen seuraamisen muodossa.

IoT-laitteiden on mahdollista kerätä valtavia määriä tietoa päätöksenteon tueksi, mikä onkin koko IoT:n perusajatus. Tällaisten tietomäärien lähetys ja säilytys kuluttaa energiaa huomattavasti ja on joissakin tapauksissa liian hidasta. Kaiken tiedon tallennuksen ja lähetyksen sijaan voidaan tietoa käsitellä tai siihen reagoida jo ennen pilvipalvelua eli lähempänä anturia. Tällaista pilvipalvelun ulkopuolella tapahtuvaa tiedonkäsittelyä kutsutaan sumulaskennaksi (engl. fog computing). Tällaista laskentaa hyödyntävä topologia on esitetty kuvassa 2 [3]. Sumulaskentaa käytetään erityisesti aikakriittisissä kohteissa, jolloin reagointi pilvipalvelulla on liian hidasta. Tästä syystä monet IoT-ratkaisuja tarjoavien yritysten tuotteet ovatkin kokonaisvaltaisia palveluita, eikä pelkästään laitteita. Palvelut sisältävät monesti kaiken anturin lukemisesta tiedon lähettämiseen käyttäjän päätelaitteelle. [4]



Kuva 2. IoT-topologia.

Esineiden internetiä hyödynnetään myös teollisuudessa [5]. Erilaiset etäluettavat anturit aistivat ympäristöään ja lähettävät tietoa eteenpäin tai toimivat tiedon mukaan itsenäisesti. Suurikin prosessi saadaan näin automatisoitua ja voimavaroja säästyy.

2.2 Sensor node eli anturisolmu

Anturisolmuilla tarkoitetaan verkossa toimivaa laitetta, joka kerää tietoa ympäristöstään yhdellä tai useammalla anturilla ja lähettää tämän useimmiten langattomasti eteenpäin. Tässä työssä käytetään termejä anturisolmu ja sensor node synonyymeinä. Anturisolmu koostuu mikro-ohjaimesta, lähettimestä, vastaanottimesta, virtalähteestä, muistista sekä yhdestä tai useammasta anturista.

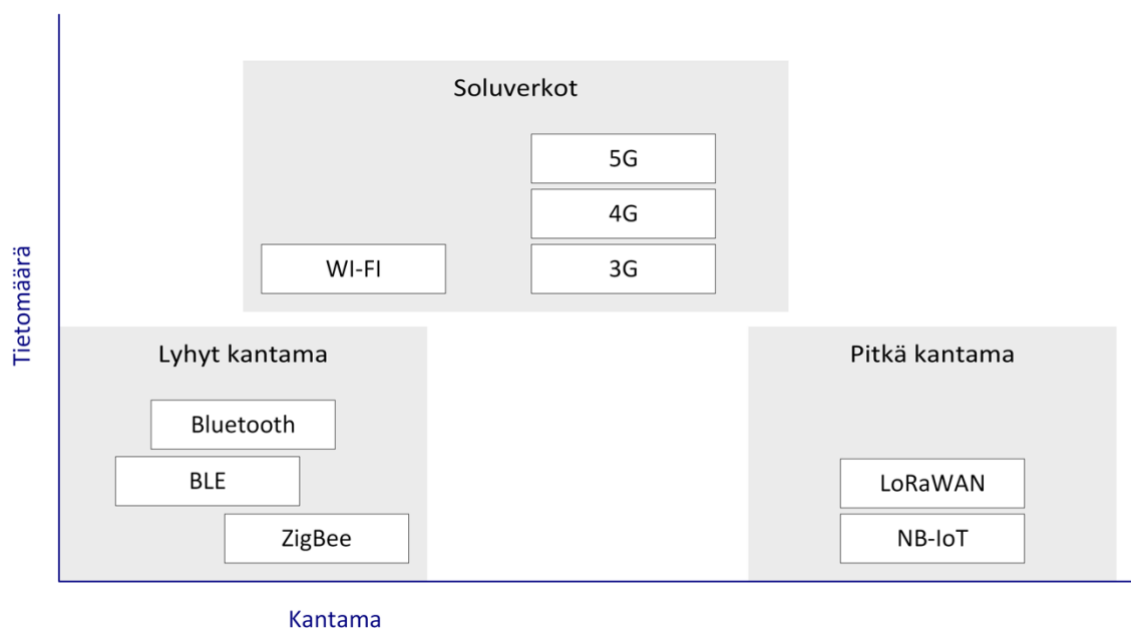
Anturisolmuja on mahdollista suunnitella moneen eri tarkoitukseen. Yksi tärkeimpiä suunnitteluun vaikuttavia laitteen ominaisuuksia on sen mittaustiheys. Tämä vaikuttaa

myös merkittävästi laitteen virrankulutukseen. Jotkin anturisolmut on mahdollista saada toimimaan paristokäyttöisinä vuosia, kunhan mittausväli on käyttötarkoitukseen riittävä. Mittaustiheyden lisäksi on pohdittava tiedon lähetystiheys, ja lähetyksen kantama. Mittaustiheyden taas määrää pitkälti käytettävä tiedonsiirtoteknologia, joten sen valinta on tärkeä.

Anturisolmusta saa joustavalla ohjelmistoarkkitehtuurilla kehitettyä hyvin laajennettavan kokonaisuuden, johon antureita voi lisätä pienin muutoksin. Myös useamman kuin yhden radioteknologian käyttö samalla laitteella on mahdollista. Tämä on hyvä ottaa kehittämissä huomioon, vaikka ensisijaisesti tarkoitus olisikin tehdä laite vain yhteen käyttötarkoitukseen.

2.3 Tiedonsiirtoteknologiat

Tiedonsiirtoteknologian valinnalla on suuri merkitys laitteen toimintaan. Käytettäviä mahdollisuuksia on monia ja jokaisella on oma käyttötarkoituksensa. Kuvassa 3 on esitetty yleisimpien teknologioiden sijoitus kantaman ja tietomäärän suhteen. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi yleisimpiä tiedonsiirtoteknologioita pintapuolisesti. LoRaWAN käydään syvällisemmin läpi, koska se on tässä työssä käytetty radioprotokolla.



Kuva 3. Eri tiedonsiirtomahdollisuuksia.

Lyhyen kantaman yhteystyypeistä tunnetuimpia ovat Bluetooth, NFC ja älykodeissa yleistynyt ZigBee. Pitkän kantaman vastineista yleisimpiä ovat LoRaWAN ja NB-IoT. Näiden lisäksi on soluverkot. [6]

2.3.1 Bluetooth

Bluetooth [7] on vuonna 1998 perustetun Bluetooth SIG:n (Special Interest Group) kehittämä lyhyen kantaman langaton tiedonsiirtotekniikka. Sen tarkoituksena on korvata kaapelien käyttö tietokoneen ja oheislaitteiden välillä. Bluetooth on point-to-point-topologiaa käyttävä protokolla, jossa kaksi laitetta kommunikoi keskenään. Bluetooth mahdollistaa myös usean laitteen muodostaman verkon. Tällöin yksi laitteista on isäntä ja loput renkejä. Bluetooth toimii taajuusalueella 2,40 GHz - 2,4835 GHz ja se käyttää GFSK-taajuussiirtokoodausta (Gaussian Frequency Shift Keying). Bluetooth käyttää yhteydessä taajuushyppelyä, (Frequency Hopping Spread Spectrum) eli yhteyden taajuutta muutetaan 1600 kertaa sekunnissa. [8]

Bluetooth lähettimet ovat jaettu lähetystehonsa mukaan neljään luokkaan:

- Luokka 1: 100 mW (+20 dBm)
- Luokka 1,5: 10 mW (+10 dBm)
- Luokka 2: 2,5 mW (+4 dBm)
- Luokka 3: 1 mW (0 dBm)

Lähetysteho määrittää yhteyden kantaman. Ensimmäisen luokan lähettimellä kantama saattaa olla jopa 100 m, kun taas kolmannen luokan laitteen kantama on vain alle 10 m. Bluetooth Low Energy (BLE) on IoT-laitteissa yleisesti käytetty vähävirtainen versio Bluetooth:sta. Virrankulutuksen vähentyessä uhrauksia on tehty kantamassa ja tiedonsiirtonopeudessa. Kantama ja tiedonsiirtonopeus ovat kuitenkin riittävät moniin älylaitteisiin, kuten älykelloihin ja kotiautomaatiolaitteisiin.

2.3.2 WLAN

WLANin (Wireless local area network) eli langattoman lähiverkon kantama sisätiloissa on noin 40 metriä ja ulkotiloissa kaksinkertainen. Usein puhutaan myös Wi-Fi:stä, joka on kaupan nimi Wi-Fi Alliancen [9] tavaramerkki IEEE802.11-standardin mukaiselle

tekniikalle. Yleisin Wi-Fi:n käyttämä taajuus on 2,4 GHz, mutta myös 5 GHz ja 6 GHz on käytettävissä. Wi-Fi:n käyttämät taajuudet on kirjattu taulukkoon 1 [10]. Wi-Fi ja Bluetooth ovat monilta osin hyvin samankaltaisia teknologioita. Ensisijainen käyttökohde on kuitenkin molemmilla erilainen. Bluetooth kehitettiin korvaamaan oheislaitteiden kaapelit, Wi-Fi taas korvaamaan tietokoneiden toisiinsa yhdistämiseen tarvittavat kaapelit. Wi-Fi hyödyntää access point-topologiaa, eli Bluetooth:sta poiketen se yhdistää kahden laitteen sijaan useita laitteita toisiinsa muodostaen lähiverkon. Tekniikkaa hyödyntämällä on myös kehitetty Wi-Fi Direct, joka toimii Bluetooth:n kaltaisesti. WLAN:n virrankulutus on Bluetooth:iin nähden monikertainen. Tästä syystä WLAN on usein huono valinta IoT-laitteisiin. [11] [12]

Taulukko 1. Wi-Fi:n eri sukupolvien kehitys.

Sukupolvi	Nopeus	Käyttöönottovuosi	Taajuus
<i>Wi-Fi 6E</i>	600-9608 Mbit/s	2019	6 GHz
<i>Wi-Fi 6</i>	600-9608 Mbit/s	2019	2,4/5 GHz
<i>Wi-Fi 5</i>	433-6933 Mbit/s	2014	5 GHz
<i>Wi-Fi 4</i>	72-600 Mbit/s	2008	2,4/5 GHz
<i>802.11g</i>	6-54 Mbit/s	2003	2,4 GHz
<i>802.11a</i>	6-54 Mbit/s	1999	5 GHz
<i>802.11b</i>	1-11 Mbit/s	1999	2,4 GHz
<i>802.11</i>	1-2 Mbit/s	1997	2,4 GHz

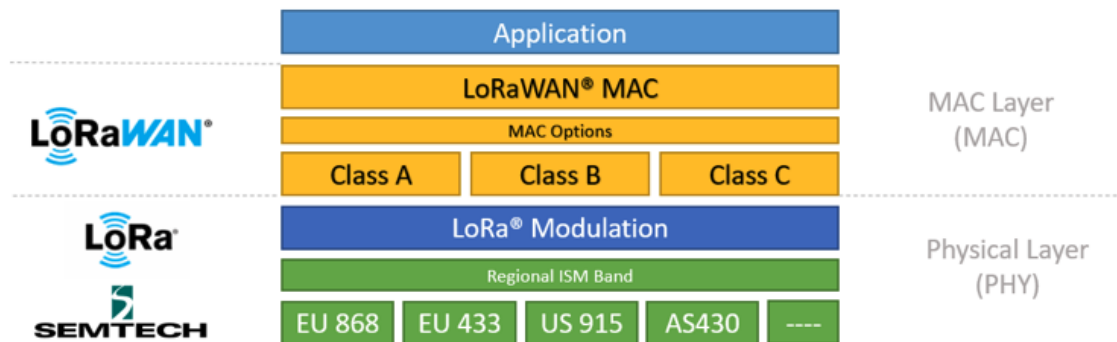
2.3.3 NB-IoT

NB-IoT (Narrowband Internet of Things) on vähävirtainen pitkän kantaman verkko-tekniikatyypin. NB-IoT:n on kehittänyt 3GPP [13]. Ensisijaisesti teknologia on kehitetty sisätiloihin sijoitettaville laitteille edulliseksi ja vähävirtaiseksi yhteydeksi. NB-IoT käyttää matkapuhelinverkkojen taajuusalueita, mikä tarkoittaa sitä, että kaistan käyttöön vaaditaan maksullinen lisenssi. Tästä syystä NB-IoT onkin hyvä valinta, mikäli lähetettävää tietoa on paljon tai usein, koska lisensoidulla taajuusalueella toimittaessa ei ole käyttörajoituksia. NB-IoT käyttää signaalin modulointiin lähetyksen osalta SC-FDMA-tekniik-

kaa (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) ja vastaanottoon OFDM-tekniikkaa (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). [14]

2.3.4 LoRa ja LoRaWAN

LoRa (Long Range) on Semtech Corporationin [15] kehittämä vähävirtainen pitkän kantaman verkkoteknologia pienten tietomäärien lähetykseen. LoRa toimii Euroopassa taajuusvälillä 863 MHz - 870 MHz. Alhainen taajuus mahdollistaa erinomaisen rakenteiden läpäisykyvyn. LoRa siis tarkoittaa signaalin modulointitekniikkaa ja muodostaa näin yhteyden fyysisen kerroksen, kuten kuva 4 osoittaa [16]. LoRa-modulointi perustuu viserryshajaspesetri-tekniikkaan (Chirp spread- spectrum), joka mahdollistaa hyvän häiriönsietokyvyn. [17]



Kuva 4. LoRaWAN-päätelaitteen OSI-malli.

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) on protokolla, joka määrittelee verkon rakenteen sekä toimintatavat laitteiden ja ohjelmistojen väliselle kommunikaatiolle. Virran säästämiseksi ja verkon yksinkertaistamiseksi LoRaWAN-verkossa päätelaitteet keskustelevalt keskenään ainoastaan yhdyskäytävien välityksellä. Päätelaitteen lähettämän viestin vastaanottaa jokainen kantaman sisällä sijaitseva yhdyskäytävä. Tällaista topologiaa käyttämällä saadaan myös summittainen laitteen sijainti määritettyä, kun verrataan eri yhdyskäytävillä saapuneiden viestien vastaanottoaikoja. LoRaWAN-viestit on syytä pitää mahdollisimman pieninä, sillä jokaisella laitteella on lähetyksajan käyttörajoitus. Mikäli tietoa on lähetettävä paljon ja usein, on valittava LoRaWAN:n sijaan jokin muu tapa viestintään. Tämän työn toteuttamiseen nämä rajat kuitenkin riittävät varsin hyvin. Tie-

don lähettämistä ja sen rajoituksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.3. Lähetettävän paketin koko on pyrittävä pitämään alle 51 tavussa. [18]

LoRaWAN-laitteet voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan:

- Luokka A tarkoittaa vähävirtaista kaksisuuntaista viestintää käyttävää laitetta. Vähävirtaisuuden saavuttamiseksi laitteeseen ei saa jatkuvasti yhteyttä. Tiedon siirto tapahtuu laitteen ehdoilla. Laitteessa on lyhyt muutaman sekunnin mittainen vastaanottoikkuna lähetysten jälkeen. Tällöin saadaan tarvittaessa tietoa lähetettyä laitteelle. Tässä opinnäytetyössä suunniteltava laite toimii A-luokassa.
- Luokka B tarkoittaa kaksisuuntaista viestintää laajemmilla vastaanottoajoilla. Laitteen vastaanotin kytketään päälle ennalta määriteltynä aikoina. Näinä aikoina voidaan lähettää tietoa laitteelle. Energiantarve on suurempi kuin A-luokan laitteella, mutta kuitenkin riittävän pieni akkukäyttöisyydelle.
- Luokka C tarkoittaa kaksisuuntaista viestintää, jossa laite kykenee vastaanottamaan tietoa aina, kunhan tietoa ei sillä hetkellä lähetetä laitteelta verkkoon. Energiantarve on tämänkaltaisella laitteella suuri, joten jatkuva virransyöttö on tarpeen.

Virransyöttöä pienentää LoRaWAN-yhteydessä myös sen käyttämä ADR (Adaptive Data Rate). ADR:n avulla laite vastaanottaa tukiasemalta tietoa yhteyden laadusta ja ohjeita lähetykseen. Mikäli yhteys tukiasemaan on hyvä, pystyy laite ohjeiden mukaisesti muuttamaan mm. lähetyksen hajautuskerrointa (Spreading factor). Hajautuskerroin tarkoittaa tiedon hajautusta kantaaltoon ja on suoraan verrannollinen viestin lähetysaikaan. Päinvastoin, jos signaali on huono tai viestit eivät ole menneet ollenkaan perille, voidaan lähetystä tehostaa suurentamalla hajautuskerrointa. Vaikka käytännöstä on paljon hyötyä, on sillä myös ongelmansa. Esimerkiksi siirryttäessä hyvältä kuuluvuusalueelta huonommalle, ensimmäiset viestit eivät välttämättä mene perille. Laittekehittäjän on huomioitava tämä varsinkin, jos kyse on tärkeästä tiedosta. [17]

Ennen kuin laitteen lähettämät viestit menevät perille, laitteen pitää olla aktivoituna käytetyssä LoRaWAN-verkossa. Tämä on mahdollista tehdä kahdella tavalla: [19]

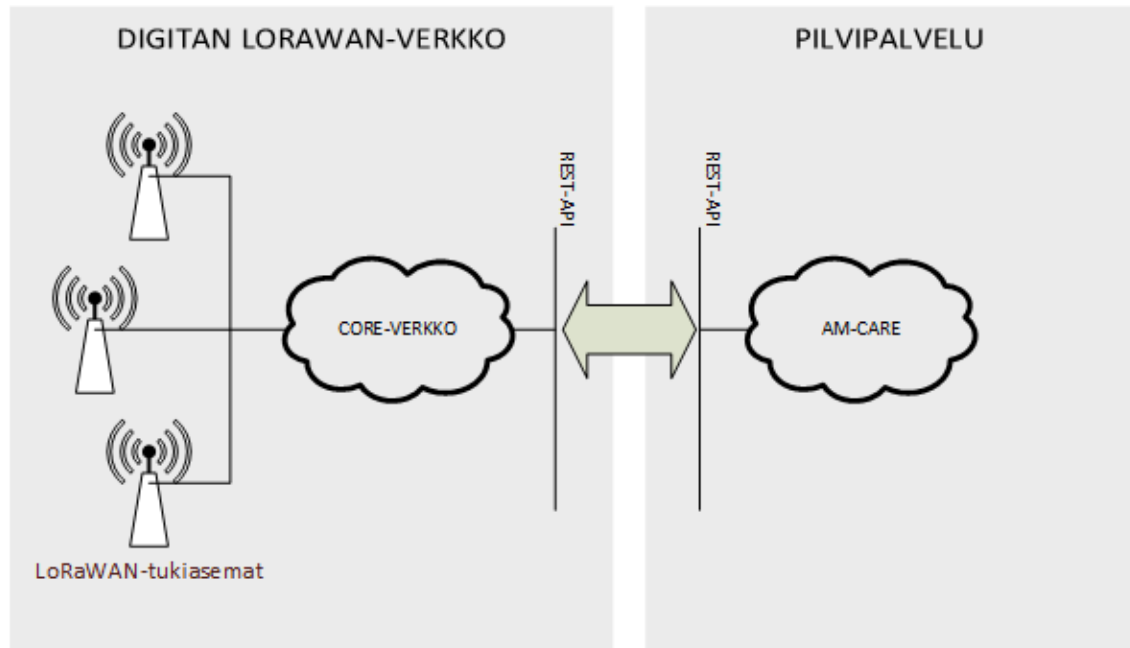
- Over-The-Air-Activation (OTAA) on yleisesti suositeltu tapa. Tällöin yhteydessä käytettyjen avainten vaihto suoritetaan sovitun prosessin mukaisesti langattomasti käyttäen LoRaWAN-verkkoa.

- Activation By Personalization (ABP) tarkoittaa sitä, että avaimet on lisättävä käsin sekä laitteelle että käytettävään verkkoon.

2.4 Pilvipalvelu

Pilvipalvelulla tarkoitetaan verkon välityksellä käytettävää kokonaisuutta, jossa tiedot ja ohjelmat sijaitsevat palvelimella, eikä käyttäjän omassa laitteessa. Pilvipalvelu on esineiden internetissä tärkeässä roolissa. Monien IoT-laitteiden tietoja ei voida lukea suoraan laitteelta, vaan kaikki tieto on luettavissa pilvipalvelun kautta. Monesti laitteet lähettävät mittaustiedon eteenpäin ilman laajempaa käsittelyä pienentääkseen omaa energiankulutustaan. Tällaisessa toimintatavassa tiedon suurempi käsittely siirretään pilvipalvelulle, jossa laskentatehoa on riittävästi eikä energiankulutuksesta tarvitse välittää. Kaikki tieto on näin saatavilla yhdestä paikasta, josta tietoon voidaan myös reagoida. [20]

Tässä työssä käytettäviä valmiita palveluita ovat Digita Oy:n käyttämä LoRaWAN-verkon käyttäjärajapinta Thingpark [21] sekä ActMea Oy:n AM-Care-pilvipalvelu. Tiedonkulku näiden palveluiden välillä tapahtuu kahden REST-rajapinnan [22] välillä. Jokainen tässä työssä luotavan laitteen jokainen viesti siis kulkee ensin Digitan ylläpitämään Thingpark-palveluun, josta viesti välitetään edelleen REST-rajapintojen kautta AM-Care-palveluun. AM-Care-palvelu hoitaa hälytykset ja ilmoitukset loppukäyttäjälle. Tässä työssä käytetty yhteys on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Työssä käytetyn yhteyden topologia.

Palveluiden siirtäminen omilta palvelimilta pilveen tarkoittaa yrittäjän näkökulmasta helppompaa ja nopeampaa palvelun käyttöönottoa. Yritys voi siis oman palvelinlaitteiston ylläpidon sijaan ostaa palveluntarjoajalta tarpeen mukaan skaalautuvaa palvelua. Skaalautuvuudesta hyvä esimerkki on lipunmyynnin verkkokauppa, joka ruuhkautuu lipunmyynnin auetessa. Yrityksen omalla palvelinlaitteistolla maksimikapasiteetti tulee nopeasti vastaan ja sivusto kaatuu. Pilvipalvelua käyttäessä voidaan kuorman noustessa ottaa nopeasti käyttöön useampia palvelimia. [23]

Palveluntarjoajat jakavat yleensä pilvipalvelut kolmeen eri palvelumalliin:

- IaaS (Infrastructure as a Service) – palveluntarjoaja antaa asiakkaalle kokonaisen infrastruktuurin käyttöön ja hallintaan. Palveluntarjoajan vastuulle jäävät alustat ja asiakkaan vastuulle kaikki muu. Asiakkaalta vaaditaan tässä tavassa eniten osaamista.
- PaaS (Platform as a Service) – palveluntarjoajalta asiakkaan hallintaan siirtyy helpommin käyttöönotettavia sovellusalustoja ja muu ylläpito jää palveluntarjoajan vastuulle. PaaS-mallilla asiakas saa ketterän alustan nopeaan sovelluskehitykseen.

- SaaS (Software as a Service) – asiakkaalle tarjotaan yksittäinen ohjelmisto palveluna esimerkiksi sähköpostipalvelu. Tässä mallissa palveluntarjoaja vastaa myös ohjelmistopuolesta.

2.5 Palavien kaasujen mittari

Työssä käytetty anturi kykenee tarkasti lukemaan yli kahtatoista eri kaasua ja kaasuseosta. Anturin säätämiseksi riittää yksi kalibrointimittaus metaanilla. Anturi toimii 3,3 V:n tai vaihtoehtoisesti 5 V:n jännitteellä. Anturi sisältää lämmittimen sekä lämmönmittauskomponentin. Palavaa kaasua sisältävä seos muuttaa ilman termodynaamisia ominaisuuksia. Näitä arvoja seuraamalla anturi pystyy laskemaan kumulatiivisen palavien kaasujen konsentraation ilmassa. Kommunikointi tapahtuu sarjaliitännän avulla käyttäen UART-piiriä. Laitteelle lähetetään kysely, johon laite vastaa tai komento, jonka mukaisesti laite toimii.

3 VAATIMUKSET

Tarkoituksena on luoda langattomasti viestivä vähävirtainen anturisolmu palavien kaasujen LEL-arvon (Lower Explosive Limit) mittaukseen, jolla ilman kaasupitoisuuksia on mitattava. Turvallisuussyistä pitoisuutta tulee mitata jatkuvasti. LEL-arvon muuttuessa laitteen on lähetettävä tieto loppukäyttäjälle nopeasti, ja tiedonkulku perille saakka on varmistettava. Laitteen virrankulutus pyritään pitämään pienenä, jotta se toimisi myös akkukäyttöisenä mahdollisimman pitkään. Loppukäyttäjälle tiedon on oltava helposti saatavilla ja selkeästi esitettyä niin taulukoituna kuin graafisena kuvaajana. Myös hälytystieto on saatava käyttäjälle nopeasti. Vaatimusten laatimiseen on käytetty ns. MoSCoW-menetelmää [24], jossa eri ominaisuusvaatimukset on jaettu neljään priorisointiluokkaan:

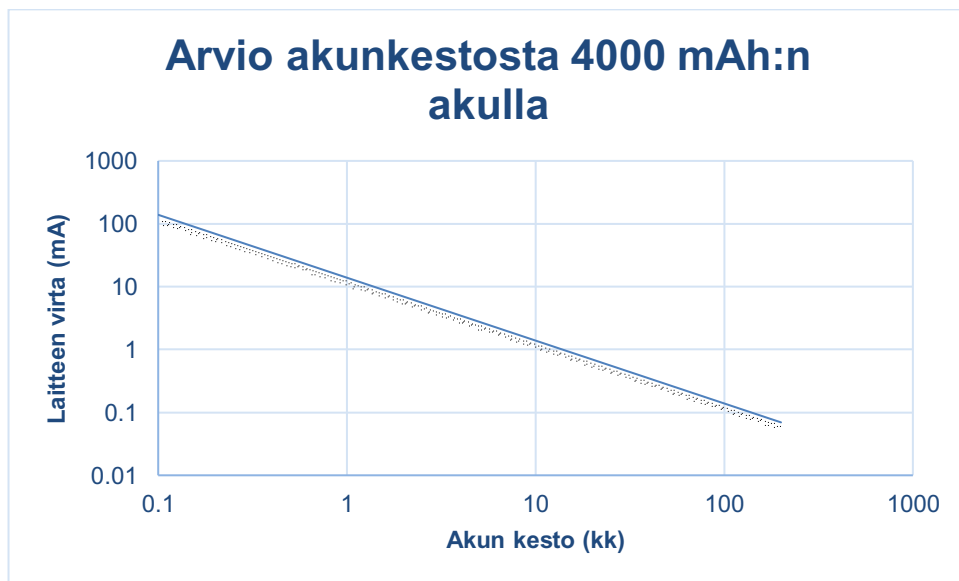
- M (engl. must) – Täytyy olla.
- S (engl. should be) – Pitäisi olla.
- C (engl. could be) – Voisi olla.
- W (engl. won't have) – Ei.

Taulukko 2. MoSCoW-menetelmän mukaiset vaatimukset taulukoituna.

Vaatus	Kuvaus	Prioriteetti
Radorajapinta	Laitteesta pitää saada hälytystieto nopeasti ja luotettavasti.	Must
Virrankulutus	Laitteen virrankulutus on minimoitava, jotta akun käyttöisyys onnistuu.	Should be
Laitteessa tulee olla laadattava akku	Laitteen pitää ladata akkua ja vaihtaa akkuvirralla jatkuvan virran katketessa.	Should be
Laitteen asetusten määrittäminen langattomasti	Laitteen asetuksia pitää päästä muokkaamaan etäyhteyden yli.	Could be
Tieto pitää olla loppuasiakkaalla taulukoituna	Raportissa pitää näkyä mittauksen aika ja päivämäärä sekä mittausarvot.	Must
Tieto pitää olla loppuasiakkaalla kuvaajana	Raportin tulee sisältää myös kuvaaja.	Could be
Laitteen pitää olla soveltuva ATEX-tilaan	Laitteen koteloinnin pitää olla ATEX-kelpoinen.	Must be
Tieto pitää olla luettavissa reaaliajassa		Won't have

3.1 Virrankulutus

Laitteen virrankulutus tulee pyrkiä pitämään mahdollisimman pienenä. On toivottavaa, että laite toimisi myös akkukäyttöisenä jatkuvan virransyötön lisäksi. Tämä jo pelkästään varavirtana jatkuvan virran katketessa on hyödyllinen. Kuvassa 6 on kuvattu virrankulutuksen suhdetta akunkeston.



Kuva 6. Arvio akunkestosta.

Kuvaajasta selviää, että kuukauden akunkeston vaadittava keskimääräinen virta on alle 14 mA. Laitteessa käytettävän anturin virrankulutus on valmistajan mukaan 3,3 V:n jännitteellä 8,9 mA. Tämä tarkoittaa, että tiedon lukemiseen ja lähettämiseen on toimittava alle 5,1 mA:n keskimääräisellä virralla. Virrankulutusta pohditaan tarkemmin kappaleessa 4.1.

3.2 Kaasujen mittaus

Laitteen pitää pystyä mittaamaan kahdentoista eri kaasun pitoisuuksia ilmassa. Laitteen tulee lähettää hälytys eteenpäin aina minkä tahansa ennalta määritetyn raja-arvon ylittyessä.

3.3 Tiedon lähetys

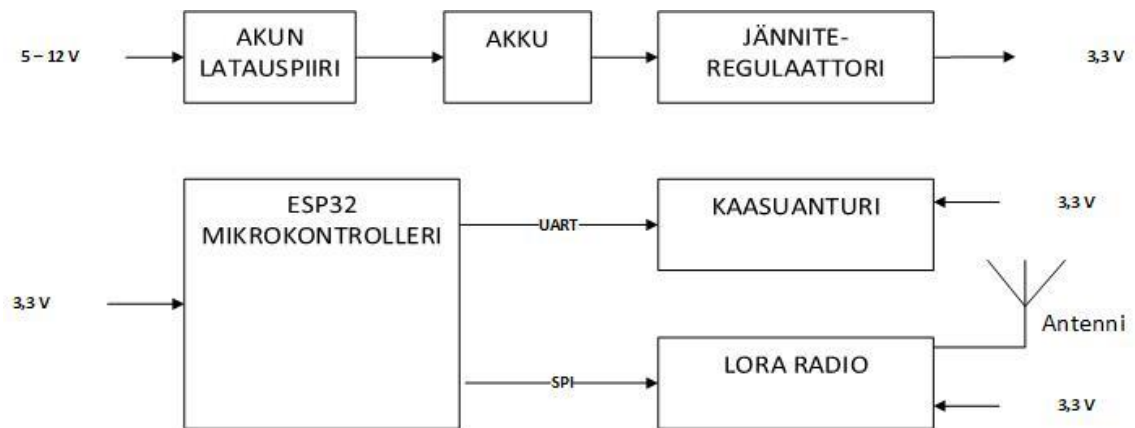
Tieto poikkeavasta tilasta pitää saada nopeasti loppukäyttäjälle. Tiedonsiirtoteknologian tulee olla helposti käyttöönotettava ja luotettava ja sen tulee omata hyvä kuuluvuusalue.

3.4 Tiedon raportointi

Loppukäyttäjälle osoitetussa raportissa tulee näkyä LEL-arvon lisäksi mittauksen kellonaika ja päivämäärä. Tuloksiin voidaan lisätä kellonaika ja päivämäärä vasta pilvipalvelussa, joten laitetasolla ei tarvita reaaliaikakelloa. Pilvipalvelussa voidaan esittää graafinen kuvaaja taulukoitujen tietojen lisäksi.

4 TOTEUTUS

Toteutusvaiheessa ensimmäiseksi piti valita käytettävä mikrokontrollerialusta. Mikrokontrollerialustan valintaan vaikuttaa monta tekijää. Laitteessa pitää olla riittävän tehokas prosessori, jotta tiedon prosessointi voidaan suorittaa tarvittaessa jo päätelaitteella. Lisäksi laitteessa pitää olla riittävästi tiedonsiirtoväyliä, jotta tarvittavat komponentit saadaan liitetyksi. Kaasuanturi liitetään käyttämällä UART-sarjaliikenneprotokollaa (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter). LoRa-radiokomponentti yhdistyy SPI-väylään (Serial Peripheral Interface). Laitteisto on kuvattu lohkokaaviona kuvassa 7.



Kuva 7. Laitteiston lohkokaavio.

Käytettävän alustan lisäksi merkittävä valinta on tehtävä käytettävissä olevien tiedonsiirtoteknologioiden välillä. Nykyisin erilaisia verkkoja on saatavilla lukuisia määriä. Yksi tapa on siirtää tieto ensin lyhyen kantaman tekniikalla yhteyspisteelle, ja sieltä edelleen pilvipalveluun. Tämä on järkevä tapa, jos anturisolmuja on paljon ja ne ovat aina samassa paikassa. Toinen vaihtoehto on käyttää pitkän kantaman tiedonsiirtoteknologiaa, joita edustavat vertailussa NB-IoT ja LoRaWAN. Yhteyksistä molemmat mahdollistavat kattavan koko Suomen laajuisen toiminta-alueen. Laajan verkon vuoksi laitetta pystyykin käyttämään myös liikkeessä. Pienen lähetystaajuutensa vuoksi kumpikin läpäisee erinomaisesti rakenteita ja toimii hyvin myös sisätiloissa.

Tässä luvussa esitellään aluksi erilaisia alustavaihtoehtoja ja perustellaan lopuksi alustan valinta. Tietoliikenneyhteyden valintaperusteet käydään myös läpi, ja lopuksi pääpiirteittäin ohjelmistoarkkitehtuuri.

4.1 Alustan valinta

Mikrokontrollerialustan valintaan vaikuttaa monta tekijää. Laitteessa pitää olla riittävän tehokas prosessori, jotta tiedon prosessointi voidaan suorittaa riittävän pitkälle jo pääte-laitteella. Lisäksi laitteessa pitää olla riittävästi tiedonsiirtoväyliä, jotta tarvittavat komponentit saadaan liitetyksi. Virrankulutus on myös otettava huomioon. Alustan suorittimen on oltava nopea ja se on saatava virransäästötilaan aina kun laskennalle ei ole käyttöä. Alustoja ja varsinkin niiden energiankulutuksia vertailtaessa tulee ottaa huomioon se, että laitteista on mahdotonta laskea tarkkaa virrankulutusta, koska alustat voivat olla hyvin eri tavoin toteutettuja. Varsinkin erilaiset virransäästötilat ja niiden aikana ylläpidetyt toiminnot poikkeavat merkittävästi toisistaan. Alustoja on vertailtu taulukossa 3.

Taulukko 3. Alustojen vertailu.

	Arduino Uno	ESP32	STM32F103C8T6	Raspberry Pi 4B
<i>Proessori</i>	ATmega328p	Xtensa LX6	Arm Cortex-M3	1,5GHz quad-core Cortex-A72 64-bit
<i>Käyttöjännite</i>	5 V	3,3 V	1,7 V - 3,6 V	5 V
<i>Virrankulutus</i>	45 mA – 80 mA	20 mA-240 mA	~70 mA	600 mA
<i>Virrankulutus unitilassa</i>	35 mA	5 μ A (Deep sleep)	3 mA (Sleep mode)	ei sisällä eri tiloja
<i>SPI</i>	1	4	5	5
<i>I2C</i>	1	2	3	6
<i>I2S</i>	0	2	5	1
<i>UART</i>	1	2	3	6
<i>CAN</i>	0	1	1	0
<i>Kellotaajuus</i>	16 MHz	80 MHz / 160 MHz	72 MHz	1,5 GHz
<i>Flash-muisti</i>	32 KB	16 MB	64 KB	SD-kortti
<i>RAM</i>	2 KB	512 KB	20 KB	2 GB - 8 GB
<i>GPIO Pinnit</i>	14	36	37	28
<i>Wi-Fi</i>	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä
<i>Bluetooth</i>	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä
<i>Ethernet</i>	Ei	Ei	Ei	Kyllä

Arduino Uno

Arduino Uno on mikrokontrollerialusta, joka pohjautuu ATmega328P-mikrokontrolleriin. Aloitus Uno:lla on tehty käyttäjälle helpoksi avoimeen lähdekoodiin perustuvalla ArduinoIDE-kehitysympäristöllä, joka on saatavilla Windows-, Linux- ja Mac-ympäristöille.

Arduino Uno sopii hyvin aloittelevalle harrastajalle tai nopeaan prototyypin kehitykseen, mutta jatkokehitykseen on parempia vaihtoehtoja. Alusta on vertailussa olevista tuotteista suorituskyvyltään heikoin, eikä virrankulutuskaan ole pienin. [25]

ESP32

ESP32 on Espressif Systems:n valmistama mikrokontrolleri, jonka erikoisuutena voidaan pitää sen hyviä tiedonsiirto-ominaisuuksia. ESP32 on myös hinnaltaan vertailun edullisin. Piirissä on sisäänrakennettuna Bluetooth sekä Wi-Fi.

Yhteensopivia kehitysympäristöjä on monia ja myös ArduinoIDE on yhteensopiva. Tämä tarkoittaa sitä, että myös kaikki arduinolle rakennetut kirjastot sopivat. Jos kuitenkin halutaan optimoida ESP32:n toimintaa, on ESP-IDF (IoT Development framework) parempi vaihtoehto. Sen tuomat mahdollisuudet antavat kehittäjälle lisää vapauksia, mutta myös vaatii enemmän asiaan perehtymistä. ESP32-pohjainen alusta on vertailun vähävirtaisin ja laskentatehoa sekä muistia on myös riittävästi. [26]

STM32

STM32 on STMicroelectronics:n valmistama 32-bittisten ARM Cortex-mikroprosessoripohjaisten mikrokontrollereiden perhe. STM32CubeMX on valmistajan tarjoama graafinen työkalu STM32-pohjaisten kehitysalustojen ohjelmointiin.

Vertailussa käytetty STM32F103C8T6-mikrokontrollerialusta sisältää ARM Cortex-M3-prosessorin. Suorituskyky ja muistin määrä alustassa on riittävä ja virrankulutus melko pieni. [27]

Raspberry Pi

Raspberry Pi eroaa muista alustavaihtoehdoista selkeästi. Raspberry Pi on etenkin harrastelijoiden parissa tunnettu pieni yhden piirilevyn tietokone. Jos toteutettaisiin koko-

naisuus useista eri anturisolmuista sekä niitä yhdistävästä tukiasemasta, olisi Raspberry Pi sen tukiasemana hyödyllinen valinta. Sillä on mahdollista suorittaa raskaitakin algoritmeja ja esimerkiksi tekoälyn lisääminen järjestelmään olisi mahdollista.

Tähän projektiin riittää vähempitehoinenkin laite, joten Raspberry Pi ei sovellu virrankulutuksensa vuoksi tähän käyttötarkoitukseen. [28]

Alustojen vertailu

Alustan valinnan pääpaino oli virrankulutuksessa. Taulukossa on listattuna lasketut virrankulutuskeskiarvot sekä siihen pohjautuva arvio akunkestosta 4000 mAh:n akulla. On kuitenkin huomioitava, että virran keskiarvo putoaa, kun laite asetetaan virransäästötilaan mittausten välillä.

Kun tiedetään arviot virrankulutuksista sekä toimintatilassa että lepotilassa ja suoritukseen kuluva aika, voidaan keskimääräinen virrankulutus laskea seuraavalla kaavalla:

$$I_{AVG} = \frac{t_1 * I_1 + t_2 * I_2}{t_1 + t_2} \quad (1)$$

Kun eri prosesseilta saadut keskimääräiset virrankulutukset on laskettu, saadaan kokonaisvirrankulutus kaavalla:

$$I_{TOT} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (2)$$

Akun toiminta-aika voidaan laskea seuraavalla kaavalla, kun tiedetään virta sekä käytettävän akun kapasiteetti:

$$h = \frac{C_{TOT}}{I_{TOT}} \quad (3)$$

Esitettyjen kaavojen avulla on laskettu eri tilojen ja eri laitteiden keskimääräiset virrankulutukset. Taulukko 4 esittää laskujen lopputulokset.

Taulukko 4. Mikrokontrollerien lasketut virrankulutus- ja akunkestoarviot 4000 mAh:n akulla vuorokausissa.

Alusta	Akunkesto (vrk)	Keskimääräinen virrankulutus (mA)
STM32F103C8T6	13,62	12,24

ESP32	18,28	9,12
Arduino Uno	3,78	44,07
Raspberry Pi	0,27	608,73

Toinen tärkeä vertailukohde on alustan tiedonsiirtovalmiudet. ESP32- sekä STM32-pohjainen alusta ovat melko lähellä toisiaan virrankulutuksen osalta, mutta ESP32:n sisältämät Bluetooth- sekä Wi-Fi-valmiudet ovat tärkeä lisä laitteen jatkojalostuksen näkökulmasta. Näistä syistä työn toteuttamiseen valittiin ESP32-pohjainen mikrokontrolleri.

4.2 Akun valinta

Akkua valitessa on otettava monia asioita huomioon. Erilaiset akut vaativat omanlaisensa latauspiirin. Akun valintaan vaikuttaa purkaus- ja latausjännitteen lisäksi akun turvallisuus.

Tässä työssä kehitettävä laite pitää suunnitella käytettäväksi räjähdysvaaralliseen tilaan, joka asettaa akun valinnalle esteitä. ATEX-laitedirektiivin [29] vaatimukset tarkoittavat käytännössä sitä, ettei laite vikatilanteessakaan sytytä samassa tilassa esiintyviä räjähdysalttiita ilmaseoksia. ATEX-laitedirektiivi jakaa laitteet eri luokkiin suojaustason mukaan. Korkein suojaustaso on M1.

Intrinsically safe (IS) tarkoittaa luonnostaan vaarattomia komponentteja, tässä tapauksessa akkuja. Tällaiset akut eivät edes sisäisen vian sattuessa syty palamaan tai räjähdä. Akku voidaan varmistaa myös turvapiirillä, joka estää vikatilanteissa liiallisen virransyötön kennolle. Muitakin akkuja voi ATEX-tilassa käyttää, mutta se edellyttää, että laitteen kotelo kestää räjähdysten eikä kipinöitä pääse kotelon ulkopuolelle.

Seuraavana käsiteltävät akkutyypit ovat kaikki luonnostaan vaarattomia, eivätkä ne sisällä syttymisvaaraa.

LiFePO₄

LiFePO₄ eli litium-rautafosfaattiakku. Lataus- sekä purkausjännite akussa on matalampi kuin laitteen vaatima 3,3 voltin jännite, joten se vaatii järjestelmää syöttääkseen konvertterin.

Li-CoO₂

Litium-ioni- ja litium-polymeeriakkuihin kuuluva litium-kobolttioksidiakku on varteen- otettava vaihtoehto. Huomioon on otettava, että akun vanhetessa loppujännite pienenee. Laitte saattaa tällöin jättää osan akun kapasiteetista käyttämättä. Uuden akun jännite las- kee tyhjentyessään vähän, joka asettaa haasteita akun varauksen seurantaan.

Ni-MH

Nikkelimetallihydridiakussa ei ole toistensa kanssa reagoivia materiaaleja, vaan ainoas- taan vetyä. Akku luovuttaa käytössä vetyä, joten kotelossa tulee olla venttiili, joka pääs- tää vedyn kotelosta ulos.

Li-SOCl₂

Litium-tionyylikloridi-kertakäyttöparisto on käytetyin paristotyyppi vähävirtaisissa lait- teissa. Jännite pysyy hyvin pitkään yli tarvittavan 3,3 voltin. Tämän tyyppisissä akuissa ongelmaksi muodostuu tiedonsiirrossa käytettävän radiokomponentin virrankulutuspiikit. Pariston varauksen laskiessa sen sisäinen resistanssi kasvaa, joka asettaa kuormittami- selle rajoituksia. [30]

Alkaliparisto

Myös tavallinen alkaliparisto on hyvin käyttökelpoinen, mikäli uudelleenladattavuuden puute ei ole ongelma. Se kestää hyvin usean vuodenkin varastointia, ja tyhjentyessään luovuttaa virtaa vielä pienelläkin jännitteellä. Tämä tarkoittaa, että pariston varausta voi seurata hyvällä tarkkuudella.

Akkutyypin valinta

Useita vuosia pienellä kulutuksella toimivalla laitteella on usein virtalähteenään kerta- käyttöinen paristo, joka vaihdetaan tyhjentyessään uuteen. Tässä tapauksessa kuitenkin on parempi käyttää ladattavaa akkua. Laitte siirtyy kiinteän virran katketessa akkuvirran käyttöön. Ladattavaa akkua valittaessa on myös otettava huomioon sitä lataava piiri, sillä erityyppisiä akkuja ladataan eri tavoin.

4.3 Tiedonsiirtoteknologian valinta

Kehitettävästä laitteesta on tarkoitus tehdä mahdollisimman helppokäyttöinen. Varsinkin käyttöönoton kannalta pitkän kantaman yhteydet ovat järkevä valinta. Näissä on laaja koko Suomen kattava kuuluvuusalue, eikä laite poistu verkon alueelta. Näin ollen laitetta ei tarvitse erikseen käyttöönottaa eri sijainneissa, vaan laite on mahdollista pitää myös liikkeessä. Tästä syystä valinta kohdistui pitkän kantaman yhteyksiin. Pitkän kantaman yhteyksiä otettiin tässä työssä vertailuun kaksi, NB-IoT sekä LoRaWAN. Vertailun tulokset on esitetty taulukossa 5 [31]. Keskimääräisiä lähetys- ja vastaanottovirtoja vertailemalla voidaan havaita, että LoRaWAN on huomattavasti vähävirtaisempi.

Taulukko 5. LoRaWAN ja NB-IoT lähetys- ja vastaanottovirtojen vertailu.

	Lähetysvirta (mA)	Vastaanottovirta (mA)
LoRaWAN	24–44	12
NB-IoT	74–220	46

Molemmilla yhteyksillä on Suomen alueella lähes täysi peitto, joten kuuluvuus on jätetty vertailun ulkopuolelle. LoRaWAN valitaan tässä työssä käytettäväksi tiedonsiirtoteknologiaksi. Se täyttää kaikki vaatimukset ja sopii virrankulutukseltaan paremmin tähän työhön. Taulukossa 6 on listattu eri hajautuskertoimien vaikutuksia lähetysajan pituuteen ja virrankulutukseen [32]. Taulukoiduissa tuloksissa pohjana käytetty 30 tavun paketti on arvio lopullisen lähetyksen koosta. Taulukossa ei ole huomioitu vastaanotossa kuluvaa virtaa. [33] [34]

Taulukko 6. Virrankulutus 30 tavun mittaisen LoRaWAN-viestin lähetyksessä kerran tunnissa.

Hajautus- kerroin	Signaali- kohina- suhde (dB)	Lähetysaika 30 tavun paketille (ms)	Virrankulutus lähetyksen aikana(mA)	Keskimääräinen virrankulutus (μA)
7	-7,5	168	44	0,002
8	-10	309	44	0,004
9	-12,5	615	44	0,008
10	-15	1113	44	0,014
11	-17,5	2223	44	0,027
12	-20	4449	44	0,054

Kuten voidaan havaita, kerran tunnissa lähetettävä LoRaWAN-paketti ei vaikuta laitteen kokonaiskulutukseen merkittävästi.

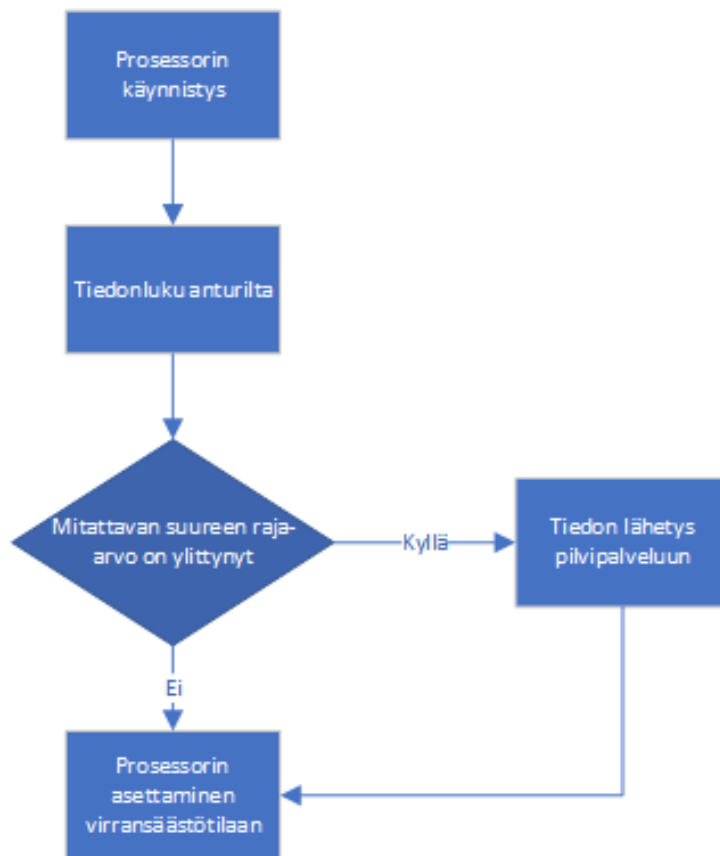
4.4 Ohjelmistoarkkitehtuuri

Ohjelmiston rakenne perustuu tapahtumapohjaiseen (Event-driven programming) [34] ohjelmistoarkkitehtuuriin. Tässä laitteelle on määritelty eri tiloja ja kullekin tilalle omat tehtävänsä. Tilojen väliseen siirtymään vaikuttaa laitteen nykytila ja erilaiset ehtolauseet. Esimerkiksi lähetyksestä huolehtivan tilan yli voidaan hypätä, mikäli lähetettävää ei sillä hetkellä ole. Seuraavan kerran lähettämisen tarve arvioidaan virransäästötilasta heräämisen jälkeen. Tilakone mahdollistaa selkeän ja helposti luettavan ohjelmakoodin. Ohjelman laajentaminen ja vikatilanteiden käsittely on helpompaa. Ohjelman toimintaperiaate on esitetty kuvassa 8.

Ohjelmiston luomisessa otettiin huomioon myös koodin jalostus muihin samankaltaisiin laitteisiin. Useampien antureiden lisäys laitteeseen on onnistuttava kirjoittamatta koodia kokonaan uudelleen. Myös tiedonsiirtokanavan muutoksen tarve on järkevää ottaa huomioon jo tässä vaiheessa.

Perusohjelman runko on yksinkertainen. Ohjelma käy ensin läpi kaikki määritellyt anturit. Jos yhden tai useamman anturin hälytysraja-arvo on ylittynyt, lähetetään viesti tämän jälkeen LoRaWAN-verkossa eteenpäin. Anturitiedon lukemisen ja mahdollisen lähetyksen jälkeen laite pitää saada mahdollisimman pienivirtaiseen tilaan. Tämä tarkoittaa käy-

tännössä prosessorin sammuttamista seuraavaan tapahtumaan asti. Tapauskohtaisesti myös anturi voidaan asettaa pois päältä.



Kuva 8. Ohjelman toimintaperiaate.

LoRaWAN ja OTAA-prosessi

LoRaWAN-protokollan käyttöön on saatavilla monia valmiita ohjelmakirjastoja. Nämä pohjautuvat lähes poikkeuksetta kahteen suureen ohjelmakirjastoon, IBM:n kehittämään LMIC-kirjastoon (LoRa MAC in C) tai Semtech:n LoRaMac-node-kirjastoon. Näistä molemmista on tehty lukuisia käännöksiä eri alustoille. Kirjastot hoitavat kaikki LoRaWAN-protokollaan liittyvät asetukset sekä kommunikoinnin mikro-ohjaimen ja lähettimen välillä. Kumpikaan kirjasto ei kuitenkaan huolehdi yhteyteen tarvittavien tietojen, kuten avaimien, säilytyksestä. Avaimia LoRaWAN-protokollassa on useita. Päätelaitteen yksilöllisiä avaimia ovat DevEUI, AppEUI sekä AppKey. Nämä on tarkoitus pitää laitteessa muuttumattomina, koska niiden avulla käytetty verkko tunnistaa laitteen. Kun uusi laite

otetaan käyttöön verkossa, se on ensin määriteltävä, eli nämä kolme avainta on lisättävä käsin verkkoon.

Laitteen liittyessä verkkoon luodaan AppKey:n avulla kaksi avainta, salassa pidettävä AppSKey sekä julkinen NwkSKey. Näillä avaimilla määritellään yhteysistunto. Istunnon päättyessä liitytään verkkoon uudelleen ja luodaan uudet avaimet. Yksittäinen LoRaWAN-istunto voi jatkua vuosia tai jopa läpi laitteen koko elinkaaren. AppSKey:tä käytetään viestien salaukseen. NwkSKey:tä käytetään päätelaitteen ja verkon välisten salattujen viestien eheyden tarkastukseen. Eheyden tarkastuksen vuoksi LoRaWAN-verkossa ei ole mahdollista vastaanottaa vajaata tai vääristynyttä viestiä, vaan viesti joko saapuu perille täydellisenä tai ei ollenkaan. Kaikki LoRaWAN-yhteydessä käytettävät avaimet on listattu taulukossa 7.

Taulukko 7. Käytetyt avaimet LoRaWAN-protokollassa.

	Koko tavuina	Yksityinen
DevEUI	8	ei
AppEUI	8	ei
AppKey	16	kyllä
NwkSKey	16	ei
AppSKey	16	kyllä
DevAddr	4	ei

Näillä avaimilla pystytään langattomasti lähettämään viestejä yksityisyyden kärsimättä. Viestien lukeminen vaatii salauksen purkamiseksi AppSKey:n. Vääristettyjen viestien lähetyksen estää NwkSKey, joka varmistaa viestin muuttumattomuuden. Nämä avaimet eivät kuitenkaan estä viestien uudelleenlähetystä. Tämä on vakavasti otettava turvallisuusriski. Riski on kuitenkin estetty käyttämällä päätelaitteella ja verkossa lähetyks- ja vastaanottolaskureita. Jokainen viesti kasvattaa laskurin lukemaa. Kahden tavun mittainen laskurin lukema sisällytetään viestiin. Verkko jättää huomioimatta kaikki viestit, joissa laskurin arvo on pienempi kuin verkon vastaava arvo. [36]

Ohjelmakoodissa on otettava huomioon ESP32:n tilan säilyminen eri virransäästötiloissa. Virran katketessa CPU:lta, tyhjenee RAM-muisti ja sen mukana mm. LoRaWAN-verkosta saadut avaimet. Kaikki virransäästön yli säilytettävät tiedot pitää siis tallettaa eri tavalla. Taulukosta 8 [37] voimme todeta, että deep-sleep-tilaa voidaan käyttää. Se säilyttää virran RTC-muistilla (Real Time Clock), jonne avaimet ovat tallennettavissa. RTC-muisti ei kuitenkaan ole pitkäaikainen muisti. Pitkäaikaiseen säilytykseen on flash-muisti. Ohjelmassa avaimet tallentuvat aina säännöllisin välein myös flash-muistiin, joten uutta OTAA-prosessia tarvitaan vain vikatilanteissa.

Taulukko 8. ESP32:n eri tilat taulukoituna.

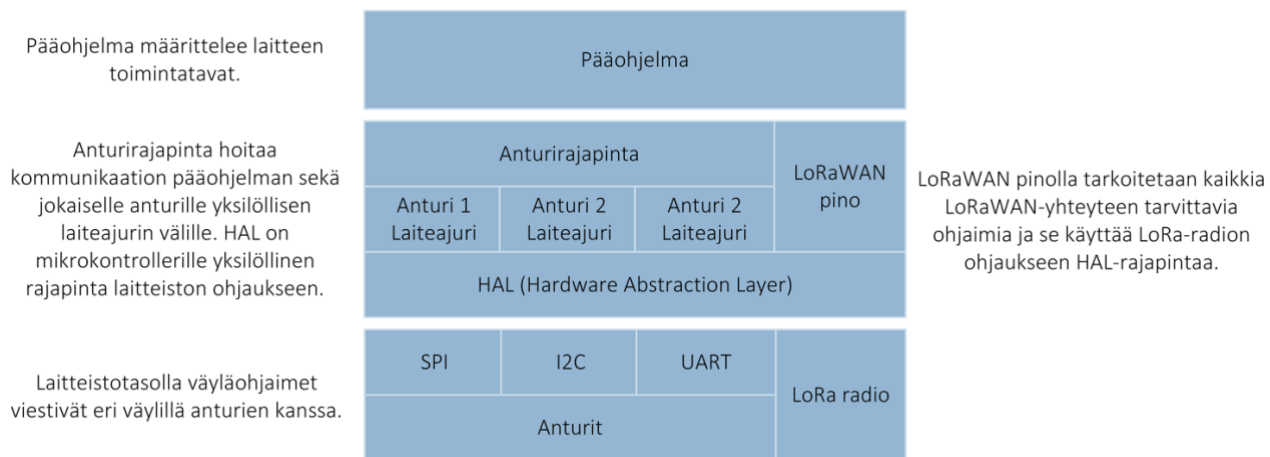
	CPU	Wi-Fi Bluetooth	ja RTC muisti	ja RTC-	ULP-proses- sori
Active	Päällä	Päällä	Päällä		Päällä
Modem-sleep	Päällä	Pois	Päällä		Päällä
Light-sleep	Tauko	Pois	Päällä		Päällä
Deep-sleep	Pois	Pois	Päällä		Valittavissa
Hibernation	Pois	Pois	Pois		Pois

Anturirajapinta

Palavia kaasuja mitatessa tulee ottaa huomioon turvallisuus, eikä tieto kaasuvuodosta saa tulla viiveellä. Työssä käytetty kaasun mittalaite suorittaa mittausta jatkuvasti saaden mittauksen päätökseen valmistajan mukaan noin kahden sekunnin välein. Työssä käytettävän kaasuanturin lukeminen tapahtuu lähettämällä anturille aina komento, johon anturi vastaa. Kaikki anturit eivät kuitenkaan toimi samoin, joten se on huomioitava ohjelmakoodissa. Tämä ongelma on ratkaistu luomalla anturirajapinta, joka käyttää jokaiselle anturille yksilöllistä laiteajuria. Pääohjelma kykenee anturirajapintaa käyttäen lukemaan jokaiselta anturilta yksilölliset tiedot eikä siihen vaikuta anturin tyyppi tai mitattava suure. Näin ohjelma kykenee dynaamisesti lukemaan useita antureita, eikä pääohjelman rakenne muutu. Jokaisen anturin lukuväli, raja-arvot ja toimintatapa on helposti muutettavissa.

Samankaltainen rajapinta on hyvin rakennettavissa myös yhden tai useamman lähettimen ohjaukseen. Tässä työssä ohjelma on kehitetty ainoastaan LoRaWAN-yhteyden käyttöön.

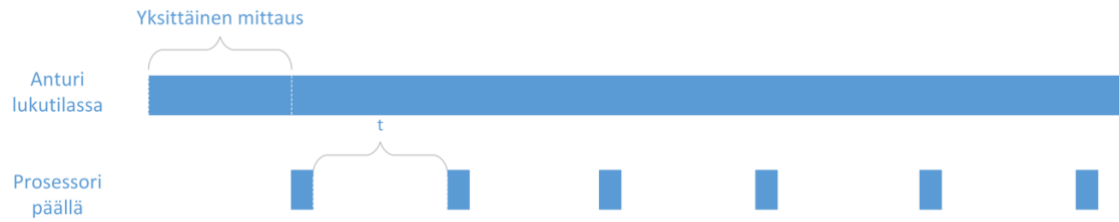
Anturikohtainen ajuri on usein saatavilla valmiina valmistajalta. Nämä ajurit eivät kuitenkaan ole keskenään samankaltaisia, joten kehittäjän tehtäväksi jää luoda kommunikaatio ajurin ja muun ohjelman välille. Ohjelmiston arkkitehtuuri on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Ohjelmistoarkkitehtuuri.

Jokaisen anturin kohdalla on valittavissa erilaisia toimintatapoja. Ohjelmakoodissa antureille on asetettavissa kaksi erilaista toimintatapaa. Ensimmäisessä tavassa käytetty anturi on päällä jatkuvasti ja siltä käydään ennalta määritetyn ajanjakson jälkeen lukemassa tuore tieto. Toisessa tavassa anturi kytketään välillä pois päältä tai virransäästötilaan ja anturi käynnistetään aina mittauksen alkaessa. Tällä tavalla voidaan vähemmän kriittisissä kohteissa pienentää merkittävästi energiankulutusta ja toimia akkukäyttöisenä pidempään.

Ensimmäinen tapa on esitetty kuvassa 10. Siinä anturi mittaa jatkuvasti, ja tieto lähetetään tilan muuttuessa eteenpäin. Muussa tapauksessa tieto lähetetään ennalta määritellyin aikavälein. Oletuksena tieto lähetetään kerran tunnissa, mikäli muutosta ei ole tapahtunut.



Kuva 10. Anturin mittaustapa, jossa mitataan jatkuvasti.

Toinen tapa on kytkeä anturi mittausten välillä pois päältä, kuten kuvassa 11 on esitetty. Turvallisuuskriittisissä kohteissa tämä tapa on luonnollisesti poissuljettu, mutta tässä työssä suunniteltavan laitteen on myös toimittava vähävirtaisesti tilanteen niin salliessa.



Kuva 11. Anturin mittaustapa, jossa anturi kytketään mittausten välillä pois päältä.

4.5 Tiedon raportointi

Pilvipalveluun lähetetään tieto aina mittausarvojen muuttuessa, joten tiedon tallennus ja arkistointi tapahtuu kokonaan pilvipalvelussa. Siellä myös tiedon esitys graafisesti on helposti muokattavissa tarpeiden mukaan. Ilmoitukset ovat räätälöitävissä loppuasiakkaalle tarpeen mukaan.

5 MITTAUKSET JA TESTAAMINEN

Testauksen pääpaino oli virrankulutuksen mittaaminen. Virran mittaaminen suoritettiin oskilloskoopin avulla. Sijoitettiin ns. shunttivastus sarjaan kytkettynä kuorman kanssa ja mitattiin oskilloskoopilla shunttivastuksen yli syntyvää jännitehäviötä. Laitteen toimintaperiaatteen mukaisesti mitattiin eri vaiheiden ajat sekä niiden keskimääräiset virrankulutukset. Tiedonluku anturilta, sekä tiedon lähetys olivat ajallisesti nopeita ja näin ollen myös vähävirtaisia. Kaasuanturin virrankulutus on huomattavasti suurempi ja määrää suurilta osin kokonaisvirrankulutuksen.

5.1 Virrankulutus

Virrankulutuksen mittauksessa käytettiin oskilloskoopilla mitattua virran keskiarvoa sekä ESP32:lla ohjelmallisesti mitattua aikaa. Mitatut virrat ovat esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Mitatut virta-arvot.

	ESP32 päällä	ESP32 deep sleep	Kaasuanturi
Virta (mA)	56,74 mA	14,52 mA	8,75 mA

Virrankulutus varsinkin unitilassa on huomattavasti korkeampi kuin mikrokontrollerin valmistajan lupaama 5 μ A. Tämä johtuu siitä, että virta-arvo koskee ainoastaan mikrokontrolleria eikä sisällä mikrokontrollerialustan sisältämiä muita komponentteja. Mikrokontrolleri vaatii toimiakseen 3,3 V:n jännitteen, mutta syöttöjännite varsinkin akulla vaihtelee. Kehitysvaiheessa käytettävä 5 V:n jännite saadaan USB-kaapelilla. Jännitteen muuttamiseen ja stabilointiin tarvittava jänniteregulaattori on usein virrankulutusta eniten nostava yksittäinen komponentti. USB-kaapelin käyttö vaatii alustalta myös USB-sarjakuuntimen. Tämä muunnin kääntää USB-muotoisen tiedon ja välittää sen mikrokontrollerin UART-piirille. Tämä tiedonsiirto on usein tarpeellinen ainoastaan mikrokontrolleria ohjelmoidessa.

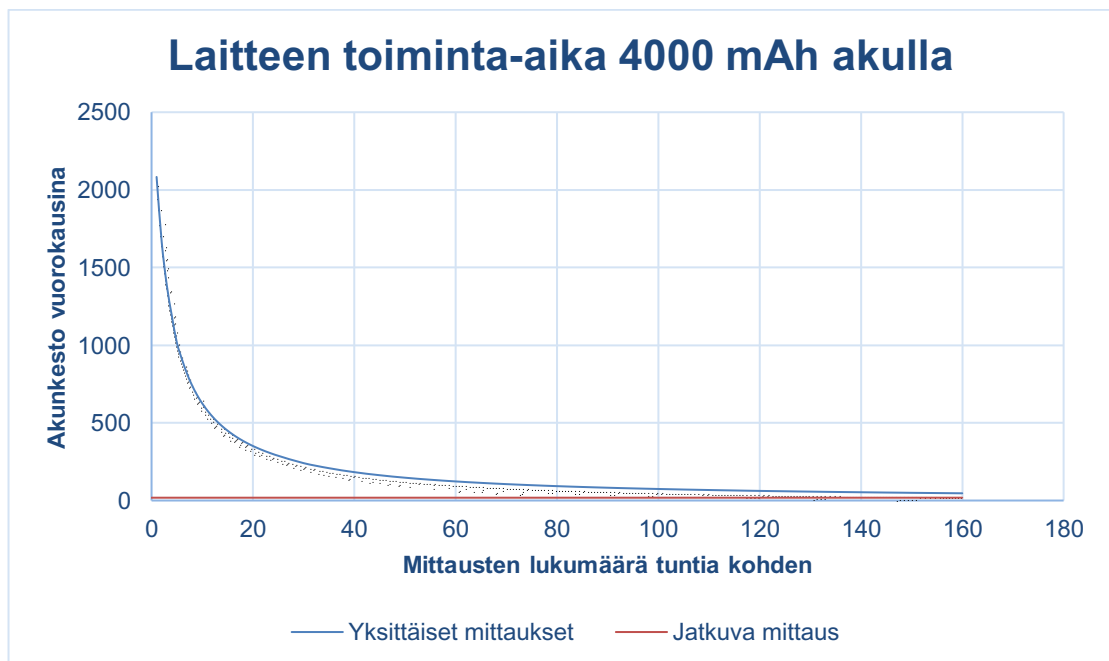
Sarjakuuntimen poistaminen ja jänniteregulaattorin korvaaminen energia-
tehokkaammalla komponentilla pienentää laitteen virrankulutusta huomattavasti. Myös

virrankulutukseltaan pienempiä kehitysalustoja on tarjolla, mutta kehitysvaiheessa tämä alusta on kuitenkin riittävä.

Ohjelmistosta on tässä työssä luotu hyvä pohja vähävirtaiselle toiminnalle, mutta komponenttitasolla on tehtävä muutoksia. Kehitysalustan avulla tehdyn prototyypin toiminnan varmistamisen jälkeen voidaan karsia ylimääräiset komponentit ja rakentaa vaatimusten pohjalta laite tarvittavin komponentein.

Vaikka varsinaisen anturisolmun energiantarve pystytään pitämään pienenä, tässä työssä mitattava ilman kaasupitoisuus luo ongelmia akkukäyttöisyydelle. Turvallisuussyistä mittausta on useissa kohteissa suoritettava jatkuvasti, joten se asettaa esteen pitkäaikaiselle akkukäyttöisyydelle. Mikäli mittaussväliä on mahdollista kasvattaa, päästään jo hyviin lukemiin akkukäyttöisyydessä.

Kuvasta 12 näkyy kuinka mittaussväli vaikuttaa akun keston. Yhden kerran tunnissa mitattuna se tarkoittaa vuosia yhdellä paristolla.



Kuva 12. Laitteen toiminta-aika akkukäyttöisenä.

Laite toimii kuitenkin akkukäyttöisenä jatkuvallakin mittaustavalla riittävän pitkään otettavaksi käyttöön esimerkiksi kuljetusten aikaiseen valvontaan.

5.2 Kaasujen mittaus

Kaasujen mittaus toteutuu vaatimusten mukaisesti. Kaasujen mittauksen ennalta määritettyjen raja-arvojen ylitys käynnistää tiedonlähetyksen välittömästi. Testaus suoritettiin anturin valmistajan ohjeiden mukaisesti mukana tulleella maskilla. Maski asetettiin kaasuanturin päälle ja sen läpi ohjattiin kaasuseosta. Käytetty kaasuseos aiheuttaa koncentraation muutoksen maskin sisällä ja laite lähettää tiedon verkkoon. Ohjelmisto testattiin kaasun lisäksi myös simuloimalla anturia ohjelmallisesti. Anturin viesti luotiin anturin sijaan ohjelmallisesti ja ohjelma kävi toiminnot läpi kuten oikeillakin mittauksilla.

5.3 Tiedon lähetys

Käytetty LoRaWAN-verkko on toimiva ratkaisu. Viesti lähetetään nopeasti ja siihen on mahdollista pyytää palvelimelta lukukuittaus, jolla varmistetaan viestin pääsy perille asti. Mittaukset on suoritettu syöttämällä anturille kaasuseosta anturin valmistajan toimittaman maskin avulla. Mittauksen tulokset on kirjattu taulukkoon 10. Tiedon lähetykseen on käytetty hajautuskerrointa 7.

Taulukko 10. Ilmoituksen viive.

Kaasuhanan aukaisu (ms)	Anturi ha- vaitsee muutoksen (ms)	Viesti vastaanotettu Digitan ver- kossa (ms)	Viesti vastaan- otettu AM-Care pilvipalvelussa (ms)	Lähetyksen kokonaisaika (ms)
0	7479	9846	10184	2705
0	8428	11631	11981	3553
0	7840	10773	11154	3314

Tiedon lähetykseen kuluva aika on riittävän pieni. Hyvästä kuuluvuusalueesta johtuen tiedon lähetykseen käytettiin mittauksissa hajautuskerrointa 7. Heikommalla kuuluvuusalueella lähetysaika hieman kasvaa, kun käytössä on suurempi hajautuskerroin.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli langatonta tiedonsiirtotekniikkaa käyttävän kaasun mittalaitteen suunnittelu. Tavoitteena oli myös pitää virrankulutus mahdollisimman pienenä, jotta laite toimisi tarvittaessa myös akkuvirralla. Hälytystilanteissa tiedonsiirto oli varmistettava.

Laitteen testauksessa suoritettiin virranmittausta, sekä viestin toimitusaikaa ja -varmuutta. Laitteen energiankulutusta mitattaessa huomattiin, kuinka paljon valmiit kehitysalustat kuluttavat virtaa. Virrankulutusta on siis mahdollista pienentää huomattavasti siirtymällä valmiista kehitysalustasta itse suunniteltuun alustaan. Tällöin on mahdollista karsia komponentteja, joista ei ole hyötyä kehitettävässä laitteessa.

Testauksen tulokset osoittivat, että tapa, jolla tässä työssä on toteutettu kaasun mittaus ja tiedon lähetys, on toimiva. Viestit kulkeutuivat luotettavasti ja nopeasti perille. Vaikka mittaustiedon käsittely ja lähetys ovatkin vähävirtaisia prosesseja, kaasuanturin virrankulutus asettaa rajoituksia akkukäyttöisyydelle. Tässä opinnäytetyössä tehty anturisolmun ohjelmisto on helposti muokattavissa käyttämään muitakin antureita, yhtä tai useampaa. Muita suureita mitattaessa laite kykenee toimimaan vuosia, anturityypistä riippuen, akkukäyttöisenä.

Vaativuudet toteutuivat vähävirtaisuutta lukuun ottamatta hyvin. Laite on luotettava ja pystyy varmistumaan tiedonkulun perillemenosta. Luotettavuutta lisää laitteen liittäminen pilvipalveluun. Vikatilanteissa saadaan pilvipalvelusta lähetettyä hälytystiedote. Tiedon esitys toteutuu pilvipalvelusta käsin sekä listattuna että erilaisina kuvaajina.

Vaikka suunniteltu laite on toiminnassa, kehitystyötä on vielä jäljellä. Laitetta pitää vielä testata erilaisissa ympäristöissä toimintavarmuuden toteamiseksi niin mittausten kuin lähetysten osalta. Järkevällä elektroniikkasuunnittelulla päästään pois tämänhetkisestä prototyypivaiheesta ja saadaan entistä pienempään koteloon sopiva laite. Myös komponentteja saadaan tällä tavoin karsittua ja samalla virrankulutusta pienennettyä entisestään.

Virransyöttöön liittyvää tutkimusta olisi pitänyt tehdä enemmän. Aihe on hyvin laaja, eikä tämän työn puitteissa ollut mahdollisuutta laajempaan käsittelyyn. Akkutyyppien valintaan vaikuttavat monet asiat, ja niiden vertailemiseksi pitää olla runsaasti tietoa. Akun latauspiiri sekä myös laitteen jännitteen tasosta ja lähteestä huolehtiva piiri vaatii

perusteellista selvitystä. Sopivan akkutyyppin valinnalla ja sitä lataavan piirin suunnittelulla saadaan kehitettyä hyvin kompakti ja käytännöllinen anturisolmu käytettäväksi erilaisiin olosuhteisiin.

Laitteen suunnittelu on ollut mielekäs ja hyvin opettavainen prosessi. Valintoja tehdessä on tutkittava huolellisesti kaikki vaihtoehdot monesta eri näkökulmasta. Pelkästään huonoja vaihtoehtoja ei ole. Kaikille vaihtoehdoille löytyy käyttötarkoitus. Tämä edellyttää jatkuvaa opiskelua. Hyvällä raportoinnilla virheistäkin voidaan oppia ja välttyä tulevaisuudessa niiden toistumiselta.

LÄHTEET

- [1] Oracle, "What is IoT?," 2021. [Online]. Available: <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot/>.
- [2] L. Horwitz, "IoT Trends 2021: A Focus on Fundamentals, Not Nice-to-Haves," 2021. [Online]. Available: <https://www.iotworldtoday.com/2021/01/07/iot-trends-2021-a-focus-on-fundamentals-not-nice-to-haves/>.
- [3] IOT Labs, "Topology diagram," [Online]. Available: <https://techgenix.com/fog-computing-and-cloud-computing/>.
- [4] M. Hyppönen, "Pilven reunalla," 2018. [Online]. Available: <https://www.blogi.fujitsu.fi/2018/02/pilven-reunalla/>.
- [5] J. Burton, "IoT Trends for Industry 4.0 in 2021," 2021. [Online]. Available: <https://iiot-world.com/industrial-iot/connected-industry/iot-trends-for-industry-4-0-in-2021/>.
- [6] Behr Technologies Inc, "6 Leading Types of IoT Wireless Tech and Their Best Use Cases," 2020. [Online]. Available: <https://behrtech.com/blog/6-leading-types-of-iot-wireless-tech-and-their-best-use-cases/>.
- [7] Bluetooth SIG, Inc, "Learn about bluetooth," 2021. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth-technology/>.
- [8] Electronics Notes, "Bluetooth radio interface, modulation & channels," [Online]. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/bluetooth/radio-interface-modulation-channels.php>.
- [9] Wi-Fi Alliance, "Who We Are," 2021. [Online]. Available: <https://www.wi-fi.org/who-we-are>.
- [10] Wikipedia, "Wi-Fi," [Online]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_11-2016.html.

- [11] E. Vogler, "Bluetooth vs. Wi-Fi Power Consumption," [Online]. Available: <https://itstillworks.com/bluetooth-vs-wifi-power-consumption-17630.html>.
- [12] V. Beal, "WiFi Definition & Meaning," 2021. [Online]. Available: <https://www.webopedia.com/definitions/wifi/>.
- [13] 3GPP, "About 3GPP," 2021. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>.
- [14] GSMA, "NB-IoT Deployment guide to basic feature set requirements," GSMA, 2019.
- [15] Semtech Corporation, "Company," 2021. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/company>.
- [16] Semtech Corporation, "What are LoRa® and LoRaWAN®?," 2021. [Online]. Available: <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>.
- [17] Semtech Corporation, "What Is Lora?," 2021. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
- [18] LoRa Alliance, "What is LoRaWAN Specification," 2021. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>.
- [19] Techplayon, "LoRa - Device Activation Call Flow (Join Procedure) using OTAA and ABP," 2018. [Online]. Available: <http://www.techplayon.com/lora-device-activation-call-flow-join-procedure-using-otaa-and-abp/>.
- [20] Microsoft, "What is cloud computing?," 2021. [Online]. Available: <https://azure.microsoft.com/en-us/overview/what-is-cloud-computing/#cloud-deployment-types>.
- [21] Actility, "ThingPark Enterprise platform for dedicated enterprise IoT LoRaWAN networks," 2021. [Online]. Available: <https://www.actility.com/enterprise-iot-connectivity-solutions/>.
- [22] M. Masse, REST API Design Rulebook, O'Reilly Media, Inc, 2011.

- [23] Telia, "Mitä bisnespäättäjän pitäisi tietää pilvipalveluista juuri nyt?," 2018. [Online]. Available: <https://studio.tivi.fi/telia/mita-bisnespaattajan-pitaisi-tietaa-pilvipalveluista-juuri-nyt>.
- [24] R. Morency, "The power of the MoSCoW method," 2019. [Online]. Available: <https://www.browserlondon.com/blog/2019/11/04/power-of-moscow-method/>.
- [25] Arduino, "Arduino.cc," [Online]. Available: <https://www.arduino.cc>.
- [26] R. Teja, "Getting Started with ESP32 | Introduction to ESP32," 2021. [Online]. Available: <https://www.electronicshub.org/getting-started-with-esp32/>.
- [27] STMicroelectronics, "Mainstream Performance line, Arm Cortex-M3 MCU with 64 Kbytes of Flash memory, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN," 2021. [Online]. Available: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>.
- [28] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi 4 Tech Specs," 2021. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>.
- [29] Tukes, "Räjähdyksvaarallisten tilojen laitteet - ATEX," 2021. [Online]. Available: <https://tukes.fi/teollisuus/rajahdysvaaralliset-tilat/rajahdysvaarallisten-tilojen-laitteet-atex#14c53008>.
- [30] Texas Instruments, "Coin cells and peak current draw," 2010. [Online]. Available: https://e2echina.ti.com/cfs-file/__key/communityserver-discussions-components-files/104/7510.swra349-Coin-cells-and-peak-current-draw.pdf.
- [31] A. Pelaez, "LoRaWAN vs NB-IoT: A Comparison Between IoT Trend-Setters," 2020. [Online]. Available: <https://ubidots.com/blog/lorawan-vs-nb-iot/>.
- [32] Techplayon, "LoRa Link-budget and Sensitivity Calculations - Example Explained!," 2017. [Online]. Available: <http://www.techplayon.com/lora-link-budget-sensitivity-calculations-example-explained/>.
- [33] Uusi teknologia, "NB-IoT-tekniikkaa startup-kehittäjille," 2018. [Online]. Available: <https://www.uusiteknologia.fi/2018/04/04/nb-iot-tekniikkaa-startup-kehittajille/>.

- [34] Digita Oy, "IoT:n kartta," 2021. [Online]. Available: <https://www.uusiteknologia.fi/2018/04/04/nb-iot-tekniikkaa-startup-kehittajille/>.
- [35] M. Richards, "Event-Driven Architecture," 2018. [Online]. Available: <https://www.oreilly.com/library/view/software-architecture-patterns/9781491971437/ch02.html>.
- [36] The Things Network, "Security," 2021. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/security/index.html>.
- [37] Espressif Systems, "Sleep Modes," 2021. [Online]. Available: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/sleep_modes.html#overview.