

**Heikki Kolehmainen**

# **Sensorimittausta LoRaWAN radioteknologialla**

Tietotekniikan  
Pro gradu -tutkielma  
6. toukokuuta 2022

**Jyväskylän yliopisto**

**Informaatioteknologian tiedekunta**

**Kokkolan yliopistokeskus Chydenius**

**Tekijä:** Heikki Kolehmainen

**Yhteystiedot:** heikki.o.kolehmainen@student.jyu.fi

**Puhelinnumero:** 050-3437679

**Ohjaaja:** Ismo Hakala

**Työn nimi:** Sensorimittausta LoRaWAN radioteknologialla

**in English:** Sensor measurement with LoRaWAN radio technology

**Työ:** Tietotekniikan Pro gradu -tutkielma

**Sivumäärä:** 60+8

**Tiivistelmä:** Tässä pro gradu tutkielmassa oli useita tavoitteita, joista päällimmäisenä oli perehtyä syvällisemmin LoRaWAN teknologiaan ja nähdä, kuinka se soveltuisi sensorimittauksen etälukemiseen. Tutkielman tarkoituksena oli myös pohdita, kuinka teknologiaa voitaisiin hyödyntää jatkossa vastaaviin mittauksiin. Toisena tavoitteena oli kartoittaa ja tutustua mitä valmiita kaupallisia LoRaWAN verkkoalustoja löytyy ja onko olemassa vastaavia avoimeen lähdekoodiin pohjautuvia järjestelmiä. Kolmantena tavoitteena oli toteuttaa sensorimittausta varten yksityinen LoRaWAN verkko käyttäen avoimen lähdekoodin verkkoalustaa ja saada kokemusta sensoriverkon rakentamista sekä ylläpidosta. Mittaus kohteeksi valittiin LED-ulkonäyttö, kohteesta oli tarve lukea kumulatiivista sähköenergian kulutus-tietoa etänä ja esittää tämä web pohjaisessa järjestelmässä. Tutkimuksen aikana havaittiin, että LoRaWAN on varsin kustannustehokas yksinkertaisen verkkoarkkitehtuurinsa ansiosta ja soveltuu hyvin energiamittausta tai vastaavia sensorimittauksia varten, joihin langallinen mittaus järjestelmä on kallis vaihtoehto tai vaikea toteuttaa langallisesti. Tutkimuksissa selvisi myös, että LoRaWAN soveltuu myös pitkän matkan päässä oleviin sensorimittalaiteiden datan keräämiseen ja sillä on mahdollista korvata tietyissä tilanteissa perinteiset langattomat sensoriverkot ja luoda maantiel-lisesti laaja verkko.

**Avainsanat:** LoRaWAN, IoT-pohjaiset verkkoalustat, sensorimittaus

**Abstract:** This master's thesis had several goals, the main goal was to get to know LoRaWAN technology in more depth and see how it would be suitable for remote reading of sensor measurement. The purpose of the dissertation was also to consider how the technology could be utilized for similar measurements in the future. The purpose of this master's thesis was also to consider how the technology could be used for similar measurements in the future. Second goal was to survey and find out what commercial LoRaWAN IoT platforms can be found and whether there are similar open source based systems. The third goal was to implement a private Lo-

RaWAN network using an open source IoT platform and get more experience in the construction and maintenance of a wireless sensor network. The LED outdoor display was chosen as the target to be measured because the cumulative electrical energy consumption data of the display had to be read remotely and presented in a web-based system. During the study, it was found that LoRaWAN is quite cost-effective due to its simple network architecture and is well suited for energy measurement or similar sensor measurements for which a wired measurement system is an expensive alternative or difficult to implement wired. Studies have also shown that LoRaWAN is also suitable for long-distance sensor data collection and has the potential to replace traditional wireless sensor networks and create a geographically wide network in certain situations.

**Keywords:** LoRaWAN, IoT platforms, sensor measurement

Copyright © 2022 Heikki Kolehmainen

All rights reserved.

## Sanasto

ABP	Activation By Personalization
AES	Advanced Encryption Standard
API	Application Programming Interface
APPEUI	Application session Key
AS	Application Server
CayenneLPP	Cayenne Low Power Payload
CHIRP	Compressed High Intensity Radar Pulse
CR	Coding Rate
CSS	Chirp Spread Spectrum modulation
DataCake	Low-code IoT platform
DEVEUI	Device IEEE EUI64 ID number
Docker	Docker container
DR	Data Rate
ED	End Device
EMEA	Europe, the Middle East and Africa
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FUOTA	Firmware Update Over The Air
FSK	Frequency Shift Keying
GPS	Global Positioning System
GRPC	Google Remote Procedure Call
GW	Gateway
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
IoT	Internet Of Things
IIoT	Industrial Internet Of Things
IP Code	Ingress Protection Code
ISM	Industrial, Scientific and Medical radio bands
I/O	Input Output interface
JS	Join server

JSON	Javascript Object Notation
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LoRa	Long Range
LTE	Long Term Evolution
LPWAN	Low Power Wide Area Network
MAC	Media Access Control
MIC	Message Integrate Code
MIT	Massachusetts Institute of Technology License
Modbus	Data communication protocol
M2M	Machine to Machine
NB-IoT	Narrow Band Internet Of Things
NS	Network server
OCP	On Customer Premises
OSI	Open Systems Interconnection model
OTAA	Over the Air Activation
PoE	Power over Ethernet
REST	Representational state transfer
SaaS	Software as a Service
SF	Spreading Factor
SIGFOX	IoT LPWAN technology
SLA	Service Level Agreement
SNR	Signal Noise Ratio
TCP /IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TOA	Time Of Air
Weightless	IoT LPWAN technology
WM-BUS	Wireless Meter Bus
WSN	Wireless Sensor Network

# Sisällys

<b>Sanasto</b>	<b>i</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 LPWAN-verkkoteknologiat</b>	<b>3</b>
2.1 Low Power Wide Area Network . . . . .	3
2.2 LoRaWAN . . . . .	4
2.2.1 Lora Alliance ja spesifikaatio . . . . .	8
2.2.2 Arkkitehtuuri . . . . .	9
2.2.3 Modulaatio . . . . .	12
2.2.4 Kehysformaatit . . . . .	17
2.2.5 Fyysiset ja MAC-viestiformaatit . . . . .	18
2.2.6 Laiteluokat . . . . .	20
2.2.7 Tietoturva ja aktivointimenetelmät . . . . .	22
2.3 LPWAN-verkkoteknologioiden vertailua . . . . .	26
<b>3 LoRaWAN-verkkoalustat</b>	<b>28</b>
3.1 Kaupalliset alustat . . . . .	28
3.1.1 Actility ThingPark Solution . . . . .	29
3.1.2 The Things Network . . . . .	32
3.1.3 The Things Industries . . . . .	33
3.1.4 Kerlink . . . . .	36
3.1.5 LORIoT . . . . .	37
3.2 Avoimeen lähdekoodiin perustuvat verkkoalustat . . . . .	39
3.2.1 ChirpStack Network Server stack . . . . .	39
3.3 Verkkoalustojen vertailu . . . . .	41
<b>4 LoRaWAN verkon toteutus</b>	<b>43</b>
4.1 Verkon arkkitehtuuri ja LoRaWAN-toteutus . . . . .	45
4.2 Päätelaitte ja energiamittaus . . . . .	48
4.3 Käyttöliittymä ja applikaatiopalvelin . . . . .	53

4.4	Toteutuksen arviointi . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>58</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>61</b>
	<b>Liitteet</b>	
<b>A</b>	<b>ChirpStack-verkkoalustan konfigurointi</b>	<b>70</b>
<b>B</b>	<b>LoRaWAN MAC-komennot</b>	

# 1 Johdanto

Esineiden internetin myötä perinteisen internetin olemus on merkittävästi mullistunut ja se on mahdollistanut pienten älykkäiden akkukäyttöisten sensorilaitteiden tuomisen IP-pohjaisiin verkkoihin. Esineiden internetin myötä markkinoille on tullut myös vähävirtaisia pitkän radiokantaman langattomia LPWAN-teknologioita. Näiden LPWAN-teknologioiden markkinoiden on arvioitu kasvavan, koska teknologiat luovat uusia mahdollisuuksia yritysten liiketoimintoihin ja teknologioita voidaan hyödyntää erilaisiin käyttökohteisiin. Teknologiat tarjoavat myös vaihtoehtoisia ratkaisuja nykyisille tai poistuville vanhentuville teknologia ratkaisuille. Teknologiaa voidaan käyttää mm. langattomien mittauslaitteiden etäluentaan sekä sensorilaitteiden monitorointiin tai niiden ohjaukseen. Teknologian käyttökohteita ei ole kuitenkaan rajattu ja teknologian ympärille on valmistettu päätelaitteita, jotka sopivat eri käyttötarkoituksiin.

Teknologiat mahdollistavat myös varsin yksinkertaisen ja kustannustehokkaan toteutustavan toteuttaa langattomia palveluita tietoturvallisesti suoraan käyttäjille internetissä oleviin sovelluksiin. Tässä tutkielmassa perehdytään tarkemmin yhteen LPWAN-teknologiaan. Kyseinen teknologia on LoRaWAN ja se on yksi suosituimmista, mutta suhteellisen tuore teknologia. Teknologia mahdollistaa vähävirtaisilta langattomilta sensorilaitteilta mittausdatan keräämisen, jopa useiden kilometrien päästä tai maantieteellisesti laajalta alueelta suoraan IoT-pohjaisiin järjestelmiin.

LoRaWAN tarjoaa myös vaihtoehdon perinteisille lyhyen radiokantaman langattomille sensoriverkoille ja tietyissä tapauksissa sillä voidaan, jopa korvata perinteiset lyhyen kantaman langattomat sensoriverkkoratkaisut. LoRaWAN on teknologiana myös varsin mielenkiintoinen, koska se eroaa hieman muista LPWAN pohjaisista teknologioista etenkin päätelaitteiden virrankulutuksen suhteen. LoRaWAN on myös avoin protokolla ja teknologia hyödyntää lisenssivapaita ISM-taajuuksia. Tätä myöten LoRaWAN avaa teknologian käyttö mahdollisuuksia laajemmalle käyttäjäkunnalle. Hyödyntämällä lisenssivapaita taajuuksia se on myös varsin kustannustehokas teknologia verrattuna lisensoituihin LPWAN-teknologioihin.



Teknologiaa voidaan hyödyntää myös asennusteknisistä syistä haastaviin mitauskohteisiin tai vanhoihin kiinteistöihin, missä langallinen sensorimittaus ei ole vaihtoehto esimerkiksi ongelmallisten kaapelivetojen vuoksi. Myös erilaisten etäluettavien sensorimittausten tarve on kasvanut viime vuosina entisestään uusien lakimuutosten johdosta. Monelta osin etäluettavat mittaukset ovatkin jo tätä päivää etenkin kiinteistöissä, missä mittalaitteita on useita ja tarve on saada mittaustiedot keskitetysti tiettyyn paikkaan analysointia varten tai sähköisesti suoraan esimerkiksi laskutukseen. Perinteisesti etenkin kiinteistöjen mittaukset ovat usein olleet langallisia.

Tässä tutkielmassa pyrittiin empiirisesti todistamaan, kuinka LoRaWAN teknologia soveltuisi sensorimittauksen etäluentaan ja voiko teknologiaa hyödyntää myös liiketoiminnan tukena. Sensorimittauksia varten luotiin yksityinen LoRaWAN verkko ja etäluettavaksi kohteeksi valittiin ulkonäytön sähkönkulutus, koska oli tarve saada kyseinen kohde etäluennan piiriin. Tutkielman tavoitteena oli myös perehtyä syvällisemmin LoRaWAN teknologiaan sekä kartoittaa millaisiin kohteisiin teknologia mahdollisesti sopisi parhaiten tai voitaisiinko sitä jatkossa hyödyntää esimerkiksi empiirisen osuuden kaltaisiin kohteisiin.

Tutkielma muodostuu kahdesta pääosasta, sillä se jakautuu teoria- ja empiiriseen osuuteen. Tutkielman toisessa luvussa käydään teoriapainotteisesti läpi LPWAN ja LoRaWAN teknologioita. Kolmannessa luvussa kartoitetaan millaisia avoimia ja kaupallisia verkkoalustoja LoRaWAN:ille löytyy. Tutkielmassa käsiteltyjä verkkoalustojen ominaisuuksia pyritään myös vertailemaan keskenään, kuinka erilaiset verkkoalustat soveltuvat eri asiakkaiden sekä käyttäjäkuntien käyttötarkoituksiin ja vaatimuksiin. Tutkielmassa pyritään havainnoimaan myös kaupallisten ja avoimeen lähdekoodiin perustuvan verkkoalustan eroja ja mitä mahdollisia haasteita sekä kustannuksia avoimen lähdekoodin verkko ylläpitäminen voi tuoda verrattuna valmiisiin kaupallisiin verkkoalustoihin.

Teoriaosuuden jälkeen jatketaan sitten empiirisellä osuudella ja luvussa neljä kerrotaan kuinka LoRaWAN verkko toteutettiin sekä pohditaan, miten verkon toteutus onnistui sekä mitä havaintoja toteutuksen aikana huomattiin ja nousi esille. Tutkielman viimeisessä luvussa pohditaan vielä saatuja tuloksia ja tehdään lopullista yhteenvetoa tutkielman aikana havaituista asioista.

## 2 LPWAN-verkkoteknologiat

### 2.1 Low Power Wide Area Network

Low Power Wide Area Network (LPWAN) on pitkän kantaman radioverkkoteknologia, sen avulla voidaan yhdistää vähävirtaisia IoT- ja sensorilaitteita maantieteellisesti varsin laajalta alueelta. Lähtökohtaisesti LPWAN verkkoteknologiat on kehitetty täydentämään tai korvaamaan perinteisten langallisten antureiden ja Wireless Sensor Network (WSN) sensoriverkkojen puutteita [31, s.1]. Perinteisten sensoritekniologioiden on katsottu olevan usein monimutkaisia sekä niiden käyttökustannukset ovat olleet kalliita kustannustehokkuuteen nähden.

Petäjäjärvi et al [69, s.1], Lavric et al [50, s.1] ja Wu et al [84, s.1] mainitsevat, että perinteisten WSN verkkojen radiokantama on lyhyt ja sen vuoksi verkkojen peittoalueet ovat olleet varsin rajallisia verrattuna LPWAN pohjaisiin teknologioihin. LPWAN verkkojen päätelaitteet ovat varsin energiapihejä, tämän vuoksi niiden virrankulutukset ovat huomattavasti matalampia kuin WSN-päätelaitteiden, siksi LPWAN päätelaitteiden kestoikä on myös huomattavasti pitempi. Haxheqiri et al [39, s.1] mainitsevat, että teknologian tuoman pitkän radiokantaman ansiosta päätelaitteisiin saadaan yhteys myös kauempankin ja päätelaitteiden alhaisen virrankulutuksen vuoksi päätelaitteet voivat operoida jopa useita vuosia. Teknologian avulla tukiaseman etäisyys ja yhteys päätelaitteeseen voi olla sadoista metreistä kilometreihin. Verkko on myös laajennettavissa suuressa mittakaavassa maantieteellisesti.

LPWAN teknologioiden eduksi katsotaan myös, että ne voivat toimia lisenssivapailta ISM tai kaupallisilla lisensoituilla taajuuksilla[85, s.1-2]. Teknologia mahdollistaa sen, että laitteita voidaan suunnitella ja toteuttaa varsin laajasti erilaisiin käyttötarkoituksiin. Lisenssivapailta taajuuksilla toimivia LPWAN teknologioita on mm. LoRaWAN, SigFox, Weightless. NB-IoT toimii vastaavasti matkapuhelinverkoissa lisensoituilla taajuuksilla.

LPWAN teknologioilla on erilaiset ominaisuudet ja siksi ne sopivat erilaisiin käyttötarkoituksiin ja kaupallisiin liiketoimintamalleihin. Butun et al [16, s.1] arvioivat, että etenkin LPWAN-teknologioiden markkinoiden osuus kasvaisi ja niiden ennustettu markkina arvo vuonna 2021 olisi noin 24,5 miljardia dollaria.

## 2.2 LoRaWAN

Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) on teknologia, joka kuuluu LPWAN verkkoteknologioiden tuoteperheeseen. Se on suunniteltu erityisesti pitkän kantaman sensoridatan tai paikannustiedon keräämistä varten. LoRaWAN on avoin protokolla ja sen päätelaitteet on suunniteltu langattomiksi ja mahdollisimman vähävirtaiseksi. Teknologiassa hyödynnetään lisenssivapaita ISM-taajuuksia. Taulukossa 2.1 nämä ISM-taajuudet on esitetty tarkemmin.

LoRaWAN kehitettiin vuonna 2009, kehityksestä vastasi yritys nimeltään Cyclio. Teknologia tunnettiin aluksi nimellä LoRaMac, johtuen siinä käytettävästä MAC-protokollasta. Slats [74] mainitsee teknologian historia osuudessa, että yritys nimeltään Semtech osti Cyclion vuonna 2012. Muutama vuosi kyseisen yritysoston jälkeen perustettiin yhdistys LoRa Alliance, joka vastaa nykyisin teknologian markkinoinimisesta, protokollan kehittämisestä ja ylläpidosta. LoRa Alliancen perustamisen myötä LoraMac muutettiin muotoon LoRaWAN.

LoRaWAN verkko koostuu useista fyysisistä komponenteista, kuten tukiasemista, verkko- ja sovelluspalvelimista sekä päätelaitteista. LoRaWAN verkon päätelaitteet ovat yleensä akku tai paristokäyttöisiä ja ne voivat sijaita useiden kilometrien päästä tukiasemasta. Vähävirtaisuuden ansiosta laitteet voivat operoida jopa 10 vuotta. Päätelaitteiden akkujen ja paristojen keston vaikuttavat monet asiat mm. päätelaitteen datan lähetysväli, MAC-protokolla sekä ympäristön olosuhteet. Jotta akun pitkä kesto saavuttaisiin, niin normaali tilanteessa päätelaitteet lähettävät dataa tukiasemille määrätyn aikataulun mukaisesti, sen vuoksi teknologian kautta ei saada aivan reaaliajassa olevaa dataa. Poikkeuksena voi olla tilanne, missä päätelaitteet lähettää hälytys tai virhetiedon. Tämä tieto on silloin, joka tapauksessa ilmoitettava reaaliajassa loppukäyttäjälle.

Teknologiaa voidaan hyödyntää moneen tarkoitukseen eikä sen käyttökohteita ole rajoitettu. Butun et al. (2018) [16] mainitsevat käyttökohteiksi mm. seuraavia kohteita: Älykkäät kaasu- ja vesimittarijärjestelmät, kaupunki ja katuvalaistusten älykkäät ohjaukset, automatisoinnit teollisuudessa sekä paikantamiseen liittyvät palvelut.

Aluekoodi ja taajuusalue (MHz)	Alue
EU863-870	Eurooppa ja Afrikka
EU433	Eurooppa
US902-928	Pohjois- ja Etelä Amerikka
CN470-510	Kiina
IN865-867	Intia
RU864-870	Venäjä
KR920-923	Etelä-Korea
AS920-923	Japani, Kaakkois-asia ja Oseania
AU915-928	Australia

Taulukko 2.1: LoRaWAN ISM-taajuudet alueittain [57]

Koska LoRaWAN hyödyntää lisenssivapaita taajuuksia, sitä myötä myös sen käyttökustannukset saadaan alhaisemmaksi verrattuna, jos käytettäisiin esimerkiksi kaupallisia lisensoituja taajuuksia. Ertuk et al [31, s.1] mainitsevat, että juuri sen ansiosta teknologiasta on tullut vahva kandidaatti eri käyttökohteisiin, etenkin teollisuuden ja tieteen aloille. Lisenssivapaiden taajuuksien määrittelystä vastaa pääsääntöisesti Europpalainen ETSI ja Amerikkalainen FCC. Poikkeuksena ovat Japani ja Etelä-Korea joissa maiden omat organisaatiot vastaavat ISM-taajuuksista. Valtioiden viranomaiset noudattavat ko. organisaatioiden määrittelyä, koska lisenssivapaat taajuudet ovat avoimia kaikille ja radioliikennettä siellä usein enemmän.

Saelens et al [73, s.4] mukaan ETSI on määrittellyt LoRaWAN-laitteille Euroopan alueella 0,1%, 1% ja 10% lähetyssäännöt, koska ISM taajuuksilla on paljon ruuhkaa ja säännöillä pyritään takamaan taajuuksien käyttäjille tasapuolinen kohtelu. Sääntö on laskennallinen ja perustuu siihen, mitä kanavaa käytetään ja kuinka kauan datasanoma on ilmassa ennen, kuin se vastaanotetaan. Tästä ajasta lasketaan tuo lähetyssääntö. Esimerkiksi yhden prosentin lähetyssäännöllä laskukaava laskettaisiin seuraavasti, jos datasanoman lähetykseen ja vastaanottoon kuluisi 415ms :

$$(100\% - 1\%) * 415ms = 41085ms = \frac{41085}{1000} s = 41,08s$$

Sääntö tarkoittaa sitä, että päätelaitteen on odotettava 41,08 sekunnin ajan edellisestä lähetyksajasta, ennen kuin se voi lähettää datansanomaa uudelleen samalla kanavalla. Teknologian suunnittelussa on pyritty ottamaan huomioon, että se olisi mahdollisimman vikasietoinen radiohäiriöiden suhteen ja signaali etenisi rakenteellisten esteiden läpi varsin tehokkaasti.

Kaupalliset LoRaWAN verkkoalustat ja verkko-operaattorit voivat käyttää kuitenkin eri lähetyssääntöjä kuin ETSI. Tämä säännöt ovat vielä rajoitetumpia kuin ETSI:n laatimat lähetyssäännöt. Verkko-operaattorit pyrkivät tarjoamaan lähetyssäännöllä reilun pelin säännöt omille asiakkaalleen. Esimerkiksi Adelantado et al [9, s.5] mainitsevat The Things Network verkko-operaattorin, joka on rajoittanut uplink-lähetyksajan 30 sekuntiin päivässä päätelaitetta kohden.

Päätelaitteiden sekä tukiasemien lähetysteho rajoitettu edellä mainittujen lähetyssääntöjen lisäksi. Päätelaitteen lähetysteho saa olla enintään 25mW (13.98 dBm) lähettäessä Uplink datansanomaa. Tukiasemalta lähtevän Downlink sanoman lähetysteho saa olla korkeintaan 0.5W. EIRP eli päätelaitteen tehokas isotrooppinen säteilyteho saa olla kuitenkin olla +16dBm. Tämän vuoksi Pensisieri et al [68, s.4] mainitsevat, että ETSI on määritellyt LoRaWAN päätelaitteiden antennin vahvistukseksi maksimissaan +2.15dBm, jotta maksimi EIRP teho ei ylittyisi.

Päätelaitteen sekä tukiaseman välinen tiedonsiirto toimii varsin alhaisilla nopeuksilla ja Noura et al [64, s.1] mainitsevat tiedonsiirron nopeudeksi 0,3-50kbps. Verkossa lähettävät ja vastaanotetut LoRAWAN-datanomamat ovat varsin pieniä. Olennaisesti datansomien tiedonsiirtonopeuteen vaikuttavat: Kanavan kaistaleveys, Spreading Factor, ADR ja lähetysteho. Lisäksi tiedonsiirtonopeuteen voi vaikuttaa myös lähetyksen hetkellä hallitsevat keli ja ympäristöolosuhteet. Yksinkertaisimmillaan LoRaWAN verkko voi koostua vain päätelaitteesta, internetiin kytkävästä tukiaseman sekä sovelluspalvelusta, mihin päätelaitteelta tuleva data tallennetaan. Verkko voidaan kuitenkin toteuttaa maantieteellisesti laaja-alaisesti ja verkko voidaan rajata yksityiseksi tai julkiseksi. Verkon ylläpitäjä voi olla myös yksityishenkilö tai organisaatio.

LoRaWAN mahdollistaa myös GPS-vapaan paikannuksen. Bouras et al [13, s.188] esittävät, että paikannus perustuisi kolmiomittaukseen ja siihen aikaeroon, kun päätelaitteen datasanoma saapuu tukiasemille. Ertyk et al [31, s.16-17] mainitsevat vielä, että paikannus algoritmin apuna käytetään myös vastaanotetun signaalin RSSI-arvoa. Choi et al [24, s.3] mainitsevat paikannuksen tarkkuudeksi 20 metristä 200 metriin. Paikannus vaatii kuitenkin useamman kuin yhden tukiaseman, jotta paikannus voidaan selvittää mahdollisimman tarkasti. Paikannus vaatii karttapalvelun, joka osaa tulkita maantieteellisesti päätelaitteen sijainnin. Tukiasemien asetuksiin voidaan määrittellä staattinen sijainti sijaintitieto.

Tukiasema lähettää metatietona sijaintinsa verkkopalvelimelle ja sieltä verkkolustan karttapalveluun. Karttapalvelun algoritmi laskee päätelaitteen sijantiedon vastaanotetun datasanoman aikaleiman, RSSI-arvon ja tukiasemien sijaintitietojen perusteella. Paikannus ei ole yhtä tarkka kuin satelliittiteknologiaan perustava GPS, mutta Pastório et al [67, s.1] esittävät, että GPS vapaa paikannus voisi toimia kuitenkin vaihtoehtoisena paikannusjärjestelmänä erilaisiin sovelluspalveluihin, näin GPS-signaalin yllättävä katoaminen ei häiritsisi paikannussovelluksen toimintaa.

GPS signaalin katoaminen voi käydä toteen esimerkiksi silloin, kun paikannuksessa oleva kulkuneuvo siirtyy parkkihalliin tai tunneliin GPS-vapaa paikannus tarjoaa tällaisiin tilanteisiin kuitenkin ratkaisun, jos paikannustieto ei tarvitse olla kovin tarkka. Manzoni et al [63, s.1] esittävät testien perusteella, että parkkihallin sisällä ja sisäkäyttöön tarkoitetuilla tukiasemilla voitaisiin paikantaa LoRaWAN päätelaitteella varustettu kulkuneuvo 20-30 metrin tarkkuudella. Fargas et al [32, s.6] mainitsevat myös, että GPS-GSM yhdistelmälaitteet kuluttaisivat yleensä lähetyksen aikana virtaa noin 400-600mA. Käytännössä virrankulutus on moninkertainen verrattuna LoRaWAN päätelaitteen lähetyksen aikana, joka kuluttaa usein huomattavasti vähemmän.

### 2.2.1 Lora Alliance ja spesifikaatio

Lora Alliance on vuonna 2015 perustettu voittoa tavoittelematon yhdistys, jonka pääasiallisena tavoitteena on määritellä LoRaWAN-protokollan toiminnallisuudet sekä markkinoida ja julkaista tietoa teknologiasta. Lora Alliancen [10] mukaan yhdistyksessä on jäsenenä yli 500 organisaatiota ja yhdistyksen sivuilla mainitaan, että jäseniksi kuuluvat teknologia- ja tietoliikennealan suurimmat yritykset. Yhdistys vastaa myös protokollaan liittyvistä määritelmistä ja sitä varten Lora Alliance on luonut oman spesifikaation protokollalle.

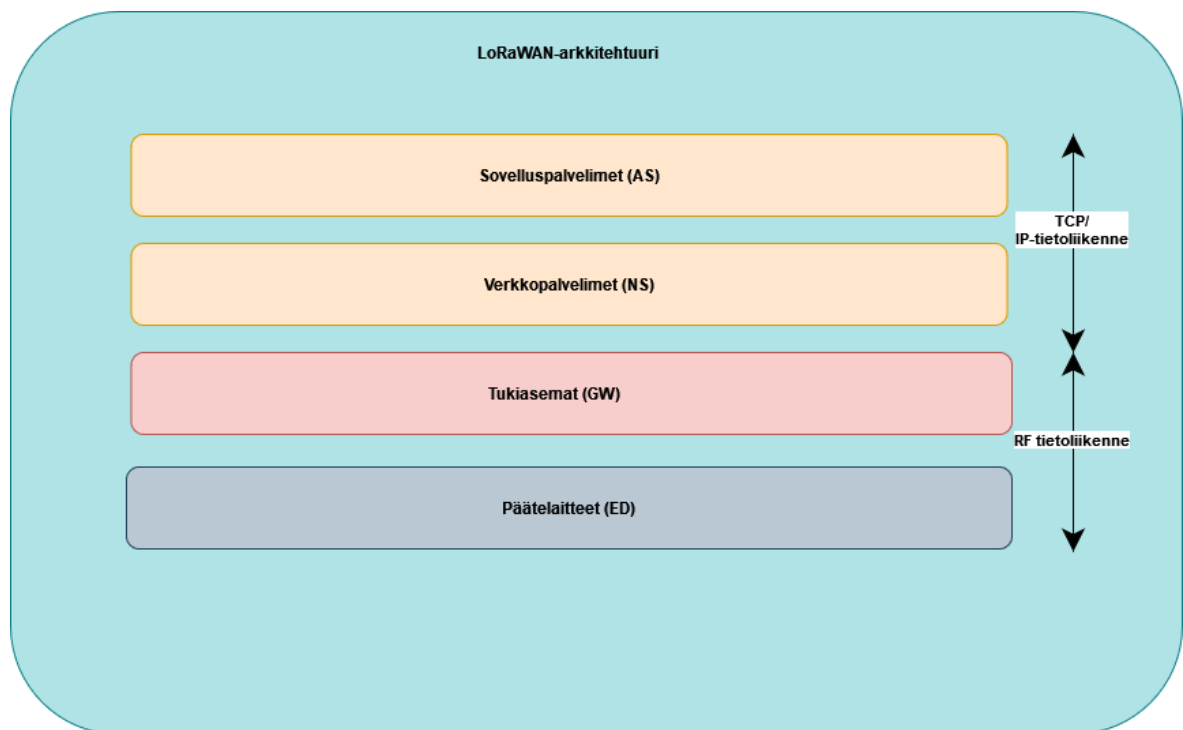
Han et al [38, s.2] esittävät, että ensimmäinen vuonna 2015 julkaistu LoRaWAN 1.0 spesifikaatio oli ollut monessa suhteessa vielä puutteellinen ja sen tietoturvamääritykset sisälsivät ongelmakohtia. Butan et al [15, s.2] puolestaan mainitsevat, että viimeisin ja nykyinen 1.1 spesifikaation versio julkaistiin vuonna 2017. Tähän spesifikaatioon perustuu nykyisten LoRaWAN laitteiden toiminta. Han et al [38, s.2] mainitsevat vielä lopuksi, että viimeisimmässä spesifikaatiossa on korjattu näitä tietoturvapuutteita, joita esiintyi vielä edellisessä 1.0 spesifikaatiossa.

Lora Alliancen spesifikaatiossa määritellään, miten LoRaWAN protokolla toimii sekä mitä ominaisuuksia laitteilla täytyy olla. Spesifikaatiossa määritetään myös laitteiden sekä verkon toimintaan liittyvät rajoitukset. Käytännössä spesifikaatio toimii standardina, kun laitevalmistajat suunnittelevat laitteita. Laitevalmistajien täytyy aina sertifioida laitteet spesifikaatiosta vastaavan organisaation tahon kanssa, eli tässä tapauksessa LoRa Alliancen.

Spesifikaatio on julkinen ja löytyy LoRa Alliancen sivuilta, eli se ei ole pelkästään tarkoitettu laitevalmistajien tai Alliancen käyttöön. Siinä määritellään mm. kuinka päätelaitteet aktivoidaan verkkoon, mitä tietoturvamenetelmiä käytetään ja mihin laiteluokkaan päätelaite kuuluu: (A, B tai C)-luokkaan. Spesifikaatiossa on etenkin esitetty MAC-protokollan yksityiskohtainen toiminta. Protokollasta on kuvattu lähtevien ja vastaanotettujen datasanomien rakenne sekä MAC-viestien ominaisuudet ja komennot.

## 2.2.2 Arkkitehtuuri

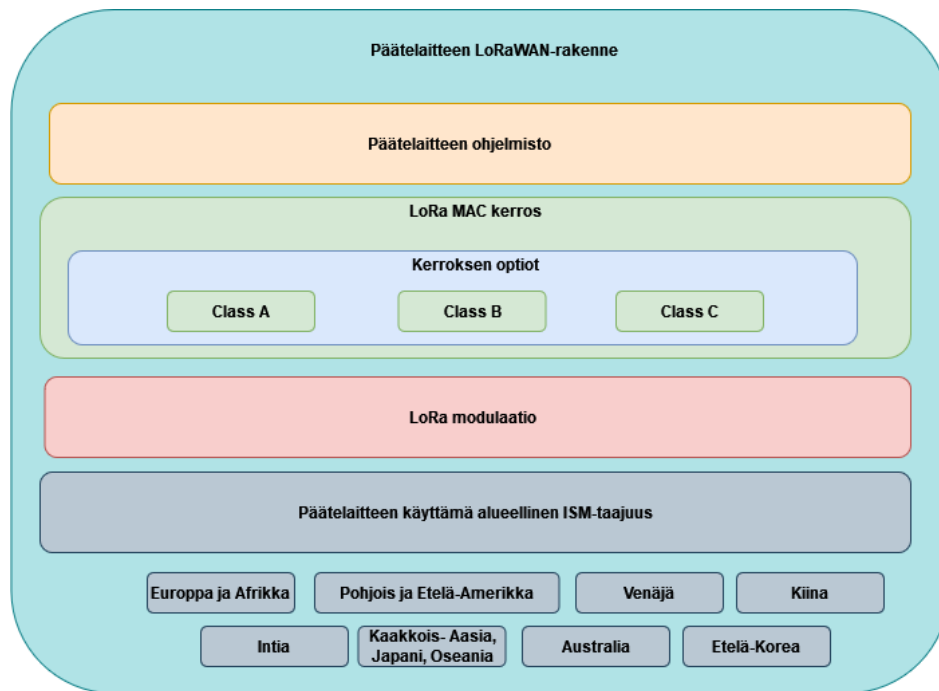
LoRaWAN 1.1 spesifikaatiossa esitetään, että verkko rakentuu Star of Stars verkotopologian mukaisesti[58, s.8]. Topologia mahdollistaa yksinkertaisen ja kustannustehokkaan verkon rakenteen, verkkoa on myös suhteellisen helppo laajentaa tarvittaessa. Verkko voidaan suunnitella ja rakentaa yksityiseksi tai julkiseksi riippuen verkon käyttötarkoituksesta. Verkko voidaan määrittellä myös maantieteellisesti paikalliseksi, valtakunnalliseksi tai maailmanlaajuiseksi. Kuvassa 2.1 on havainnollistettu verkkoarkkitehtuurin rakennetta. Verkon arkkitehtuuri voidaan jakaa karkeasti neljään osioon.



Kuva 2.1: Yksinkertainen arkkitehtuuri näkymä mukailen lähde[82, s.3]

Päätelaitteen arkkitehtuuri voidaan jakaa vastaavasti neljään osaan, LoRa-modulaatioon, MAC-kerrokseen sekä päätelaitteen ohjelmistoon ja päätelaitteessa oleviin antureihin. Rakenne on varsin yksinkertainen ja käytännössä päätelaite sisältää mikrokontrollerin mihin on tallennettu laiteohjelmisto, LoRa-radiopiiriin joka huolehtii radioliikenteestä ja MAC-kerroksesta sekä varsinaiset mittaus- tai paikannusanturit. LoRaWAN spesifikaation mukainen päätelaitteen arkkitehtuuri esitetty tarkemmin kuvassa 2.2.





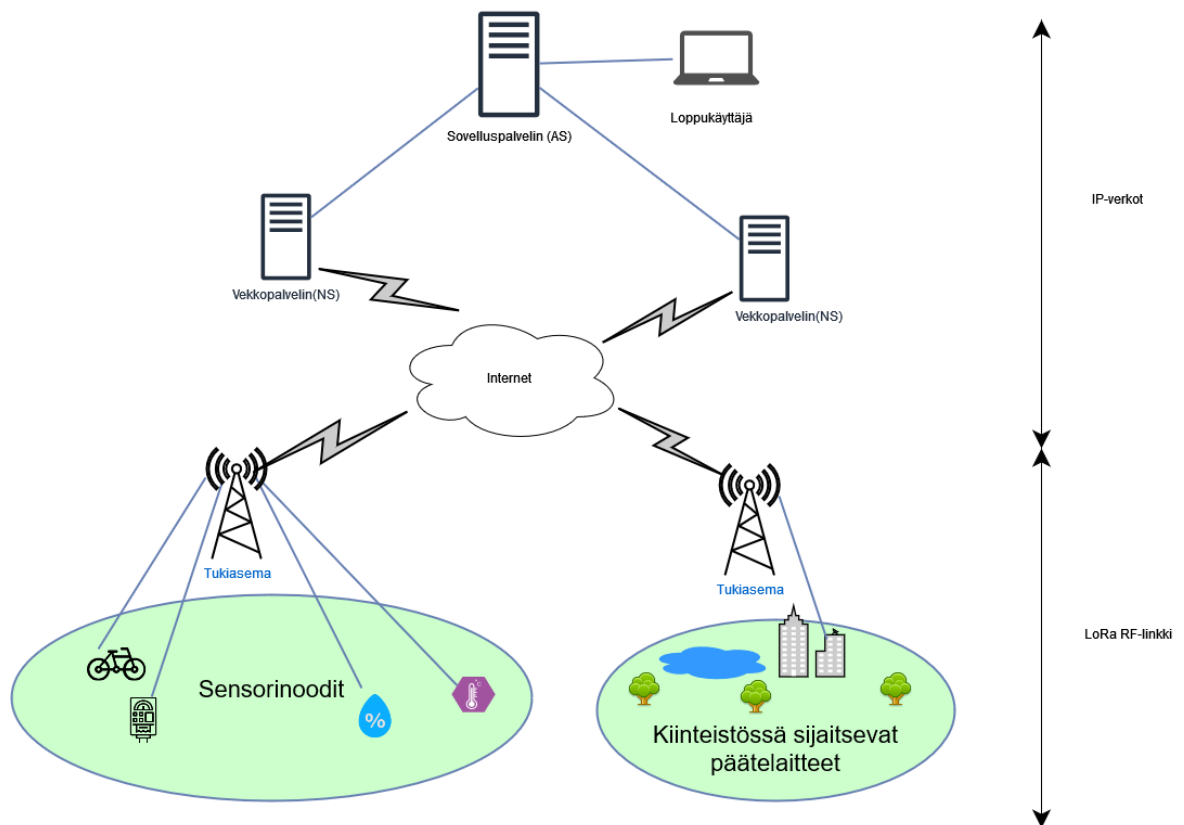
Kuva 2.2: Spesifikaation 1.1 [58, s.10] mukainen LoRaWAN päätelaitteen rakenne

Päätelaitteet (End Devices, ED) ovat vähävirtaisia sensorilaitteita tai ohjauslaitteita, jotka keräävät mittausdataa tai suorittavat määritellyjä ohjaustoimintoja. Päätelaite sisältää radiomoduulin, se kommunikoi määritellyn ajan välein radioteitse tukiasemille ja tarvittaessa vastaanottaa dataa tukiasemilta.

Tukiasemat (Gateways, GW) kommunikoiivat päätelaitteiden sekä verkkopalvelinten kanssa. Ne keskustelevat radioteitse päätelaitteen kanssa ja muuttavat päätelaitteelta vastaanotetun datan IP-pohjaiseksi, jonka ne välittävät eteenpäin verkkopalvelimelle. Tukiasema ja verkkopalvelin kommunikoiivat keskenään reaaliajassa. Verkkopalvelimet (Network Server, NS) huolehtivat verkon toiminnasta. Verkkopalvelimet varmistavat tukiasemien, päätelaitteiden sekä sovelluspalvelinten välisen kommunikoinnin. Verkkopalvelimet vastaavat myös verkkojen salausavaimista.

Liittymispalvelin (Join Server, JS) voi olla erillinen palvelin tai se on integroitu suoraan verkkopalvelimen sisään. Sen tarkoituksena on varmistaa tukiasemien ja päätelaitteiden liittyminen verkkoon sekä vastata laitteiden todennuksesta. Vastaa käytännössä verkon aktivointiavaimista.

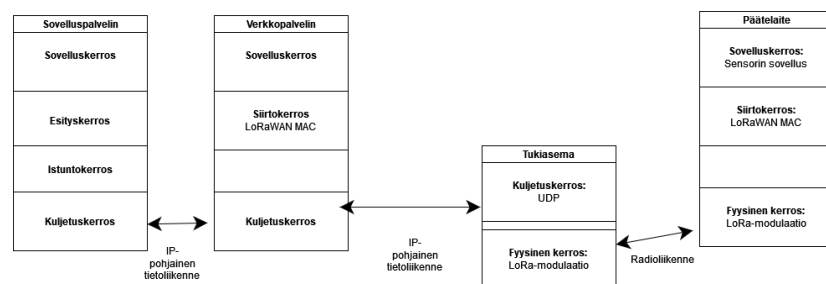
Sovelluspalvelimet (Application Server, AS) yleensä vastaanottavat datan verkkopalvelimelta ja esittävät sen visuaalisesti loppukäyttäjälle. Sovellus palvelimet ovat tyypillisesti internetissä toimivia kolmannen osapuolen palvelimia. Data saapuu sovelluspalvelimille yleensä JSON tai XML-formaatissa. Sovelluspalvelimelta voidaan myös lähettää komentokäskyjä päätelaitteelle tai verkkopalvelimelle suoritettavaksi.



Kuva 2.3: Esimerkki verkon rakenteesta, mukailen lähdettä [26, s.4]

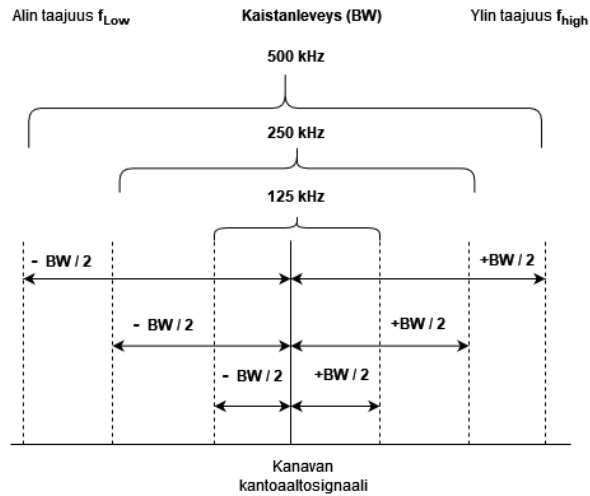
### 2.2.3 Modulaatio

LoRaWAN:in toimintaperiaate on varsin yksinkertainen, aluksi päätelaitteet aktivoidaan valittuun verkkoon, aktivointimenetelmät on tarkemmin kuvattu luvussa Tietoturva ja aktivointi 2.2.7. Päätelaitteet määritetyn periodein välein joko lähettää tukiasemalle tai vastaanottaa dataa tukiasemalta. Päätelaitteelta vastaanotettu data välitetään verkkopalvelimelle, joka ohjaa päätelaitteen datasanoman määrittelyyn applikaatiopalvelimeen. Päätelaitteen ja tukiaseman välinen tietoliikenne tapahtuu radioteitse. Kuvassa 2.3 on esitetty, kuinka tietoliikenne muuttuu TCP/IP-pohjaiseksi, kun tukiasema kommunikoi verkkopalvelimen tai applikaatiopalvelimen kanssa. Kuvassa 2.4 on puolestaan havainnollistettu, kuinka päätelaitteen ja tukiaseman välinen tietoliikenne tapahtuu OSI-mallin mukaisesti fyysisessä kerroksessa.



Kuva 2.4: Kaavio LoRaWAN OSI-mallista mukaillen lähde [31, s.5]

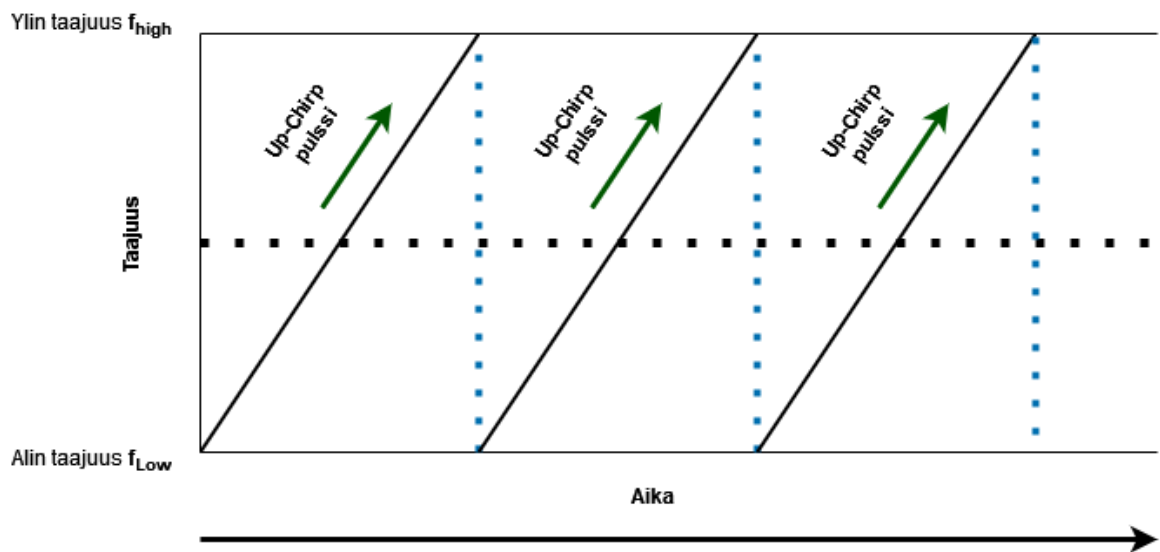
Radioliikenteeseen käytetään 125, 250 ja 500kHz kaistanleveyttä ja ensisijaisena modulointimenetelmänä käytetään LoRa-modulointia. Kuvassa 2.5 on kuvattu ne kaistanleveydet, joita LoRaWAN käyttää radioliikenteeseen. Määritetyillä kanavilla voidaan kuitenkin käyttää myös FSK-modulointia. Päätelaitteen toiminnan kannalta tärkein komponentti on kuitenkin LoRaMAC-protokolla ja se sijaitsee päätelaitteen siirtokerroksessa. Ertuk et al [31, s.4] mainitsevat, että sen tehtävänä olisi mm. huolehtia laitteen energiatehokkuudesta, suorittaa laitteen kanavanhallinta, mukauttaa tiedonsiirtoa sopivaksi. Zyrianoff et al mainitsevat, että LoRaWAN käyttäisi ALOHA perusteista MAC-protokollaa [87, s.5]. He esittävät, että MAC-protokolla huolehtisi myös päätelaitteen tietoturvaominaisuuksista.



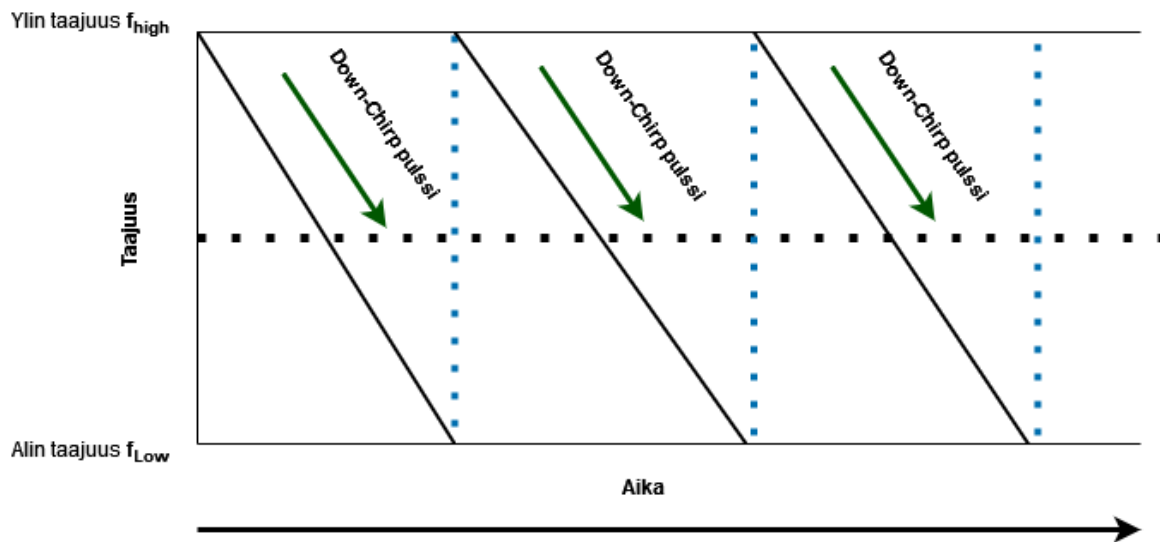
Kuva 2.5: LoRaWAN kanavanleveys [51, s.4]

LoRa-modulaatio on suljettu ja patentoitu Semtechin toimesta [52, s.1]. Davcev et al [28, s.2] esittävät, että se perustuu lineaariseen hajaspektri (Chirp Spread Spectrum Modulation) modulaatioon. LoRa modulaation ansiosta kanavanhallinnan tiedonsiirto on saatu huomattavasti energia taloudellisemmaksi verrattuna perinteiseen hajaspektri modulaatioon. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kanavalle pääsemiseen vaaditaan vähemmän energiaa, joka vaikuttaa suoraan päätelaitteen kestoikään. Modulaatio pystyy myös sietämään paremmin signaaliin tulevia häiriöitä, kuin perinteiden hajaspektri modulaatio. LoRa moduloinnin ajatuksena on koodata informaatio lineaarisesti siten että, taajuus muuttuu lineaarisesti tietyllä ajanjaksolla. Tätä muutosta kutsutaan Chirp-toneksi, nimi tulee sanoista Compressed High Intensity Radar Pulse. Mikäli taajuus kasvaa ajanjaksolla kanavan minimitaajuudesta maksimiin sitä kutsutaan Up-chirpiksi. Jos taajuus vastaavasti laskee kanavan maksimitaajuudesta minimiin, sitä kutsutaan Down-chirpiksi. Up- ja Down-chirppejä käytetään datasanoman alustamiseen ja synkronoimiseen.

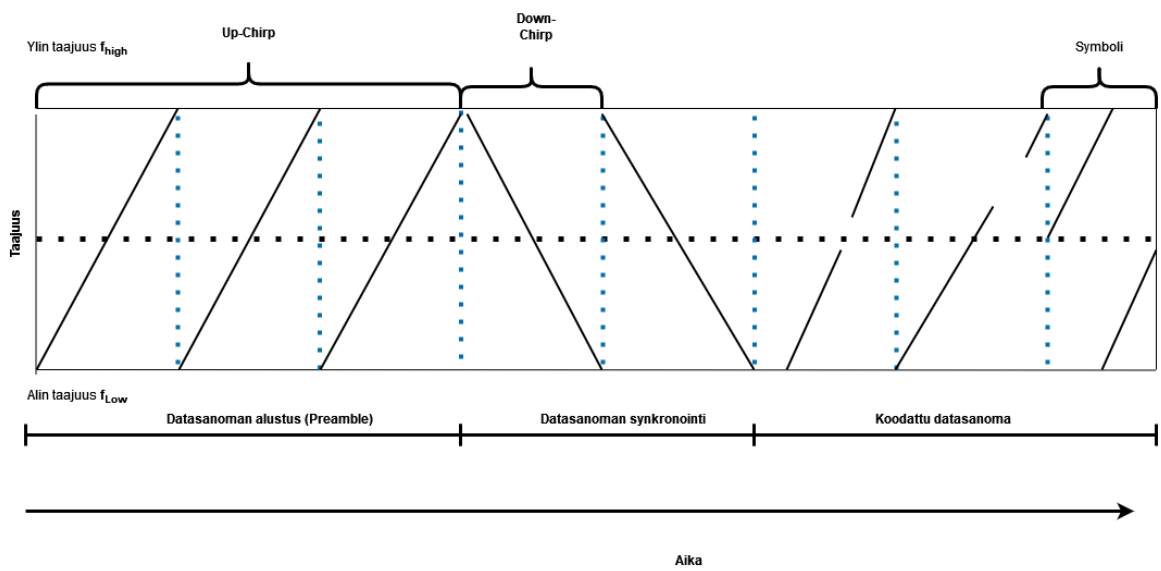
Moduloitu datasanoma sisältää yleensä 8 Up-chirp pulssia tämä indikoi vastaanottavalle laitteelle tiedon, että datasanoma on tulossa ja sitä seuraa kaksi Down-chirppiä, joka synkronoi datasanoman. Up-chirp ja Down-chirp esitetty seuraavan sivun kuvissa 2.6 ja 2.7. Haxhibeqiri et al [39, s.3] mainitsevat, että sen jälkeen radiosanomaan tulee hetken hiljaisuus, jotta vastaanottolaite ehtii synkronoitua vastaanottamaan datan. Synkronoinnin jälkeen tulee varsinainen datasanoman sisältö, joka on koodattua tietoa. Moduloitu datasanoma esitetty kuvassa 2.8.



Kuva 2.6: Up-chirp pulssin kuvaus mukailen lähdettä [34, s.4]



Kuva 2.7: Down-chirp pulssin kuvaus mukailen lähdettä [34, s.4]



Kuva 2.8: Esimerkki LoRa moduloitusta LoRaWAN datasanomasta [53, s.658]

Modulaatiossa käytettävä binaarinen logaritmi Spreading Factor vaikuttaa siihen, kuinka tiheään kanavalle voidaan yhteen symboliin tallentaa bittejä. Modulaatiossa käytetään Spreading Factorille lukuarvoja, jotka ovat 7-12 välillä. Nämä Spreading Factor arvot on esitetty taulukossa 2.2. Kim et al [47, s.2] esittävät, että mitä alhaisempi SF-luku sitä suurempi tiedonsiirtonopeus (Data Rate) mutta haittapuolena se, että datasanoma on lyhyemmän aikaa ilmassa ja siksi radiosignaalin kantomatka lyhyempi. Vastaavasti mitä suurempi Spreading Factor, niin signaalin kantomatka pitempi mutta tiedonsiirtonopeus matalampi. Isompi SF-luku kasvattaa myös päätelaitteen energiankulutusta, joka puolestaan vaikuttaa päätelaitteen akunkestoon ja voi lyhentää näin päätelaitteen elinikää.

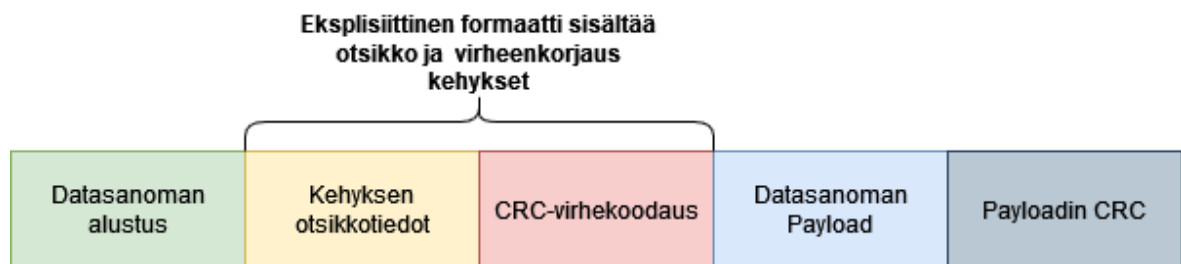
Spreading Factor	Chip / Symboli
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2096
12	4096

Taulukko 2.2: SF:n ja symbolien välinen suhde, Lähde Ertyk et al [31, s.6]

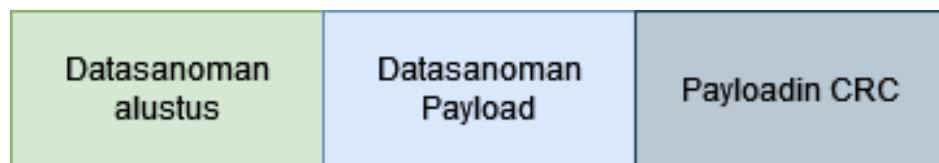
LoRAWAN:issa käytetään FEC-algoritmita virheenkorjaukseen. Kufakunesu et al [48, s.6] esittävät, että FEC-menetelmällä pyritään parantamaan radiolähetyksen vikasietoisuutta. Virheet pyritään korjaamaan jo vastaanotto tilanteessa ilman, että datasanoman lähettäjän tarvitsee lähettää datasanoma uudelleen. Virheenkorjaukseen voidaan käyttää seuraavia Coding Rate arvoja:  $4/5$ ,  $4/6$ ,  $4/7$  ja  $4/8$ . Kyseiset arvot ovat laskennallisia ja ne määrittelevät, kuinka monta virheenkorjaus bittiä datasanomaan tallennetaan. Mitä enemmän virheenkorjausbittejä datasanoma sisältää sitä helpompi vastaanottavan laitteen on tulkita sanoma. Kanavan kaistanleveys, Coding Rate ja Spreading Factor määrittelevät käytännössä tiedonsiirron nopeuden (Data Rate). Haxheqiri et al [39, s.5] mainitsevat, että LoRaWAN-laitteissa käytetään integroitua Adaptive Data Rate algoritmita, joka pyrkii dynaamisesti optimoimaan olosuhteisiin parhaan tiedostosiirtonopeuden.

## 2.2.4 Kehysformaatit

Paolini et al [66, s.2] esittävät, että LoRa datasanoman kehyksen formaatti voi olla implisiittinen tai eksplisiittinen. Eksplisiittinen formaatti sisältää paketin otsikkotiedot sekä otsikon virheenkorjaus osuuden. Eksplisiittisessä formaatissa, joka on esitetty kuvassa 2.9 käytetään Coding Rate 4/8 virheenkorjausta, kun taas implisiittisessä formaatissa ne puuttuvat kokonaan ja Thomas et al [79, s.68-69] mainitsevat, että implisiittisen formaatin etuna on lyhyt TOA (Time On Air), mutta siinä kehyksen otsikkotiedot täytyy olla kiinteästi ennalta määriteltynä vastaanotettavaan sekä lähetettävään laitteeseen, jotta paketin tulkkkaus onnistuisi. Kehyksen formaatti määrittyy käytettävästä lähetyks ja vastaanototavasta. Implisiittinen formaatti esitetty kuvassa 2.10.



Kuva 2.9: Eksplisiittinen LoRa kehys mukailien kuvaa Ertyk et al [31, s.6]

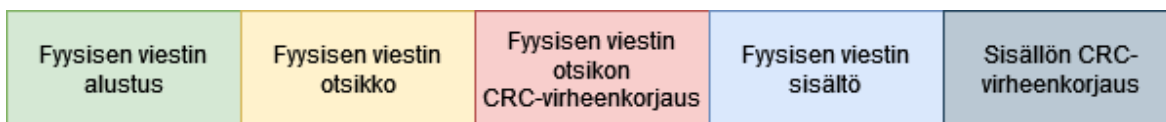


Kuva 2.10: Implisiittinen LoRa kehys mukailien kuvaa Ertyk et al [31, s.6]



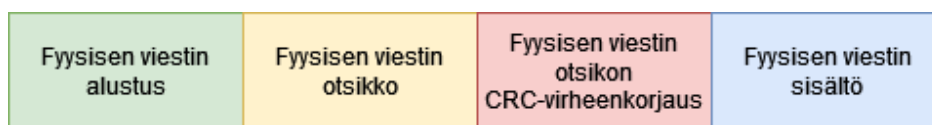
## 2.2.5 Fyysiset ja MAC-viestiformaatit

Fyysiset viestit voidaan jakaa kahteen kategoriaan Uplink-viesteihin sekä Downlink-viesteihin. Uplink-viestit lähtevät päätelaitteelta kaikille tukiasemille jotka ovat kan-toalueella. Uplink viesteissä käytetään eksplisiittistä LoRa-kehysformaattia. Ekspli-siittisten kehysformaattien rakenne esitetty kuvissa 2.9 ja 2.11.



Kuva 2.11: Fyysinen Uplink-datasanoma mukailleen kuvaa Casals et al [17, s.6]

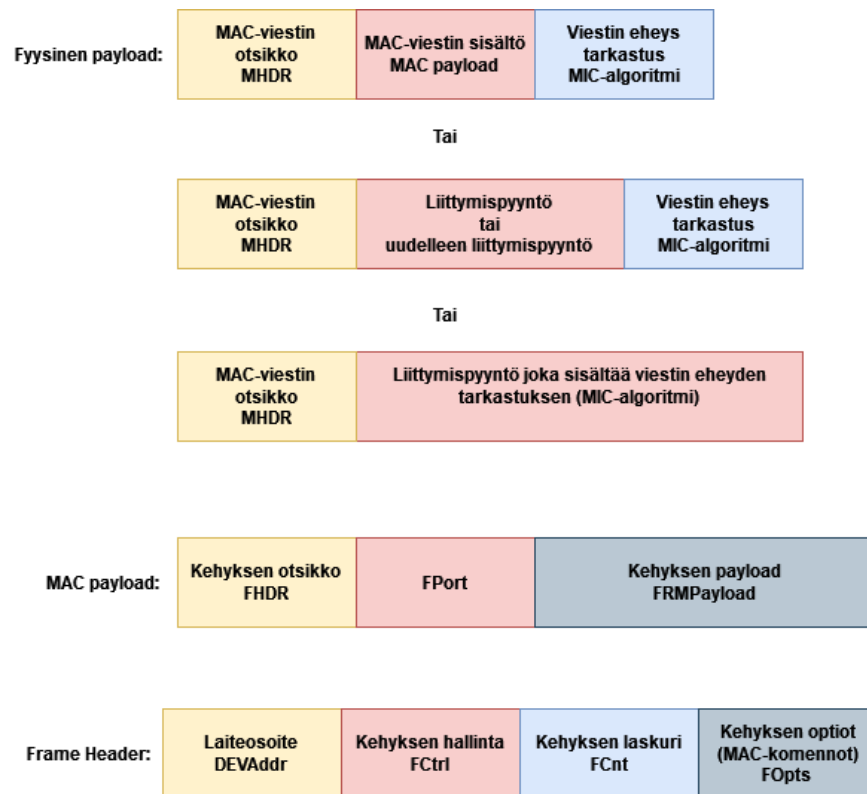
Downlink-viestit lähtevät puolestaan verkkopalvelimelta päätelaitteelle, jolle vies-ti on kohdistettu. Uplink ja Downlink viestien kautta lähetetään normaalit datasanomat sekä MAC-viestit. Downlink-viestin kehysrakenne esitetty kuvassa 2.12.



Kuva 2.12: Fyysinen Downlink-datasanoma mukailleen kuvaa Ertyk et al [31, s.12]

Mtype	Toiminnon kuvaus
000	Liittymiskutsu
001	Liittymisen hyväksyminen
010	Vahvistamaton Uplink viesti
011	Vahvistamaton Downlink viesti
100	Vahvistettu Uplink viesti
101	Vahvistettu Downlink viesti
110	Uudelleen liittymiskutsu
111	Ei standardin mukaiset viestit

Taulukko 2.3: MAC-viestityypit LoRaWAN spesifikaation 1.1 [58, s.17] mukaisesti



Kuva 2.13: LoRaWAN spesifikaation mukaiset MAC-kehysrakenteet [58, s.16]

Kuvassa 2.13 on esitetty LoRaWAN spesifikaatiossa määritellyt MAC viestiformaatit. Viestiformaatteja on käytännössä kolme: Fyysinen payload, MAC payload ja Frame header. Viesteillä voidaan kontrolloida päätelaitteen sekä verkon toimintaa. LoRa Alliancen spesifikaatiossa (2017) mainitaan, että fyysinen payload sisältää aina MAC-otsikkotiedon, payloadin sekä neljän oktetin viestin eheyden tarkastuksen (Message Integrity Check-algoritmin) [58, s.16], joka saadaan matemaattisesti laske-  
malla kehyksen kaikki kentät, siten että se vastaa laskettua ja tarkastettua arvoa.

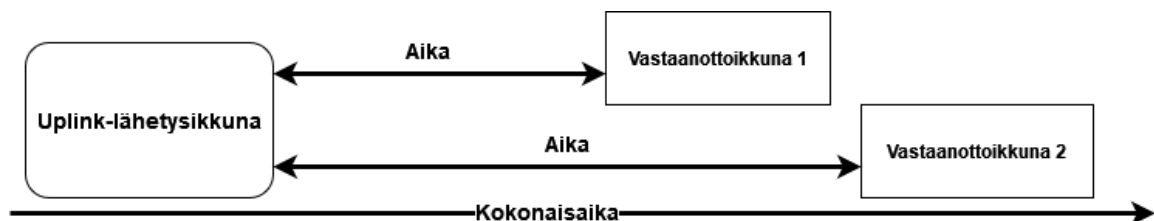
MAC payload datasanomat puolestaan sisältävät FHDR-otsikkotiedon, kehykselle määritetyn portin (Fport) sekä FRMPayloadin. Fport on valinnainen ja se voi olla lukuarvo väliltä 1-223, mutta mikäli Fportin arvo on 0, se kertoo vastaanottavalle laitteelle, että FRMPayload sisältää ainoastaan MAC-komentoja. Frame Header-viestien pääasiallisena tehtävänä on huolehtia sekä ylläpitää laskuria (FCnt). FCnt laskuri huolehtii kuinka monta datasanomaa laite on lähettänyt ja ilmoittaa siitä tiedon verkkopalvelimelle. Datasanomien mukana voidaan lähettää myös MAC-komentoja (FOpts).

MAC-viestit voivat olla vahvistettuja tai vahvistamattomia se tarkoittaa sitä, että sanoman vastaanottavan laitteen täytyy lähettää kiittausviesti lähettäjälle, jos kyseessä on ollut vahvistettu viesti lähettäjältä. Taulukossa 2.3 on esitetty MAC-viestityypit. Taulukossa B.1 on puolestaan kuvattu MAC-komennot, jotka ovat määriteltä LoRaWAN-spesifikaatiossa.

## 2.2.6 Laiteluokat

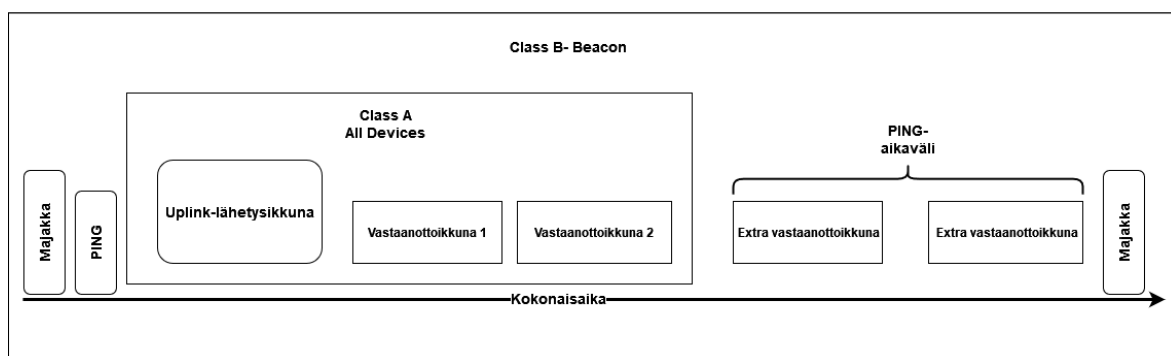
Päätelaitteet voivat kuulua joko Class A, B tai C-luokkaan, mutta päätelaitteen pitää sisältää vähintään Class A-luokan perusominaisuudet. Lora Alliancen määrittelemät laiteluokat tarjoavat laitevalmistajille mahdollisuuden suunnitella ja toteuttaa laitteita eri käyttökohteisiin ja tarkoituksiin. A-luokan laitteet ovat kaikista vähävirtaisimpia ja B-luokan laitteet kuluttavat hieman enemmän mutta se tarjoaa laajemmat toiminnot kuin A-luokan laitteet. A ja B-luokan laitteet ovat akku tai paristokäyttöisiä mutta C-luokan laitteet kuluttavat huomattavasti enemmän ja ne vaativat jatkuvan virtalähteen.

Class A tarkoittaa All Devices ja se sisältää Up-link lähetysikkunan lisäksi kaksi vastaanottoikkunaa mihin tukiasema voi lähettää vastauksen. Vastaanottoikkunat avautuvat noin +/-20 ms sisällä Uplink-lähetysten päätyttyä. Käytännössä tukiasema lähettää vastauksen, joko ensimmäiseen tai toiseen vastaanottoikkunaan, se ei voi kuitenkaan lähettää sanomaa molempiin. Kuvassa 2.14 on esitetty Class A luokan laitteiden vastaanottoikkunoiden toiminta. Cheong et al(2017) mainitsevat, että Class A on energiatehokkain luokka [18, s.2]. Ertyk et al(2019) puolestaan esittävät, että Class A luokan laitteet soveltuvat erityisesti akku tai paristokäyttöisiin päätelaitteisiin [31, s.11].



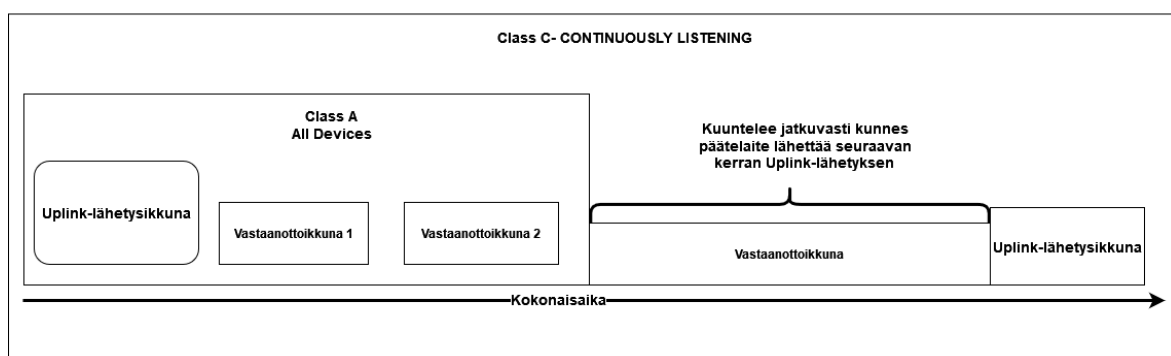
Kuva 2.14: Class A:n vastaanottoikkunat mukailen lähdeä [12, s.7]

Class B:tä kutsutaan Beaconiksi ja se laajentaa Class A:n ominaisuuksia Beacon sekä PING-toiminnoilla. Tukiasema lähettää päätelaitteelle synkronoidun vastaanottoikkunan eli Beacon tiedon ja PING arvon. Niiden avulla tukiasema tietää, milloin päätelaite olisi seuraavan kerran vastaanottavassa tilassa. Lisäksi Class B avaa ajastetusti extra vastaanottoikkunat. Extra vastaanottoikkunoiden toiminta on esitetty kuvassa 2.15. Ron et al(2019) esittävät, että Class B tarjoaa tukiasemalle kontrolloidun Downlink-lähetys mahdollisuuden [72, s.7837].



Kuva 2.15: Class B:n vastaanottoikkunat mukailen lähdeä [12, s.7]

Class C, jota kutsutaan Continously listening sisältää Class A:n ominaisuudet. Class C sisältää vastaanottoikkunan, joka on aina avoinna siihen asti kunnes päätelaite lähettää seuraavan kerran tukiasemalle päin. Lähetysten jälkeen vastaanottoikkuna avautuu taas uudestaan. Lähetystä kuunteleva vastaanottoikkuna on esitetty kuvassa 2.16.

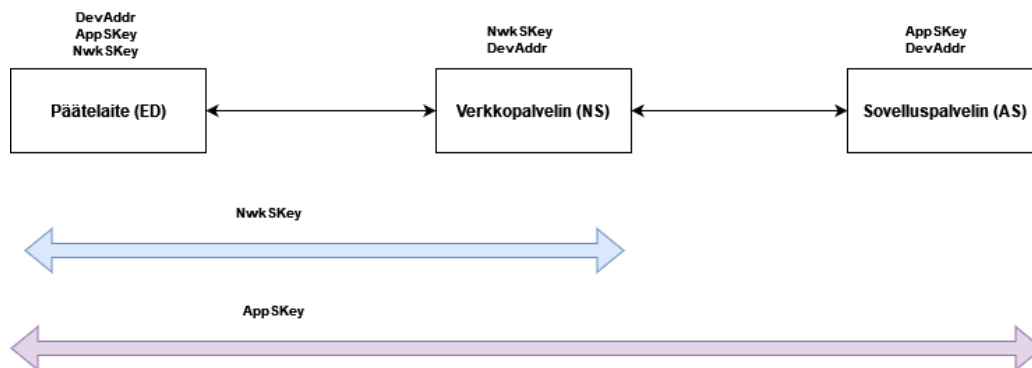


Kuva 2.16: Class C:n vastaanottoikkunat mukailen lähdeä [12, s.7]

## 2.2.7 Tietoturva ja aktivointimenetelmät

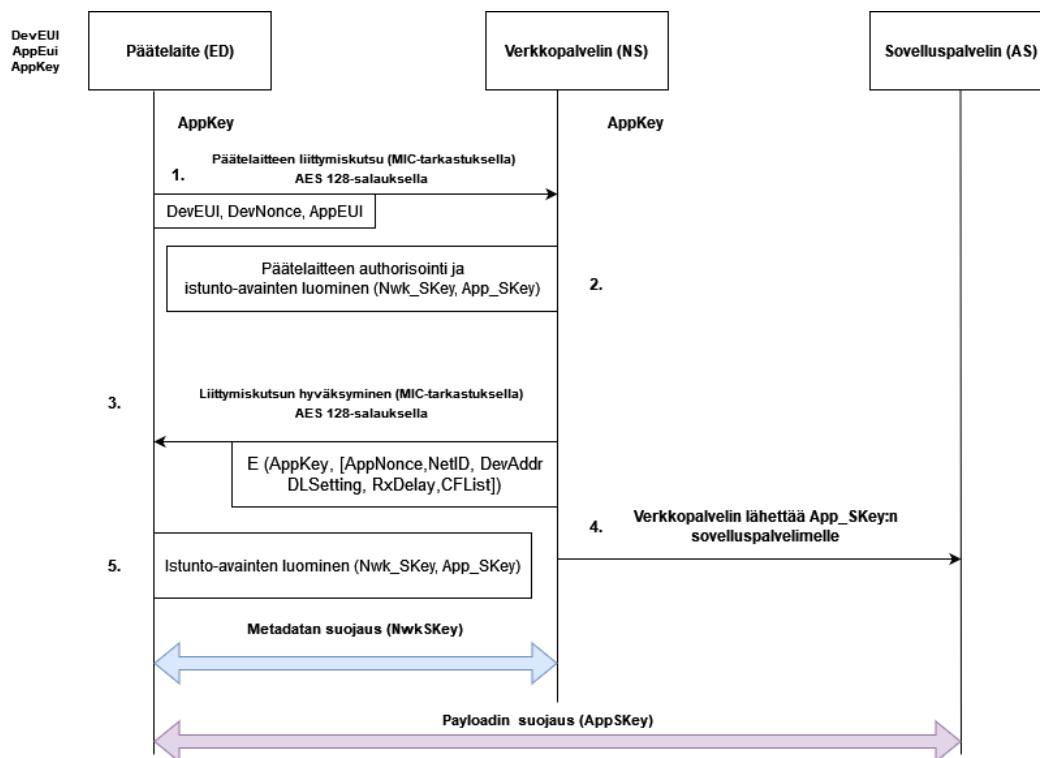
LoRaWAN spesifikaatiossa on määritelty tietoturvamekanismit ja niistä keskeisempiä ovat datasanomien salaus, datan eheyden todentaminen, avainten hallinta ja laitteiden aktivointiin liittyvät mekanismit. Päätelaitte sisältää valmistajan määrittelemät yksilölliset root-avaimet AppKey & NwkKey ja näistä avaimista johdetaan istuntopohjaisia (Session Keys) avaimia joiden tarkoituksena on turvata datan eheys ja luottamuksellisuus päästä päähän yhteydelle. AES 128-salausmenetelmää käytetään datasanomien sekä avaimien salaukseen.

Päätelaitteiden aktivointi voidaan suorittaa kolmella tavalla, joko perinteisesti ABP (Activation By Personalization) tai OTAA (Over the Air Activation) menetelmällä. Kolmantena vaihtoehtona Kim et al(2017) esittävät kokeellisen kaksoisavain aktivoinnin (Dual Key-Based Activation) menetelmä perustuu OTAA-aktivointiin, mutta siinä päätelaitteen NwkKey jaettaisiin verkkopalvelimelle ja päätelaitteen Appkey puolestaan sovelluspalvelimelle [46].



Kuva 2.17: ABP-aktivoinnin toimintaperiaate [14, s.12]

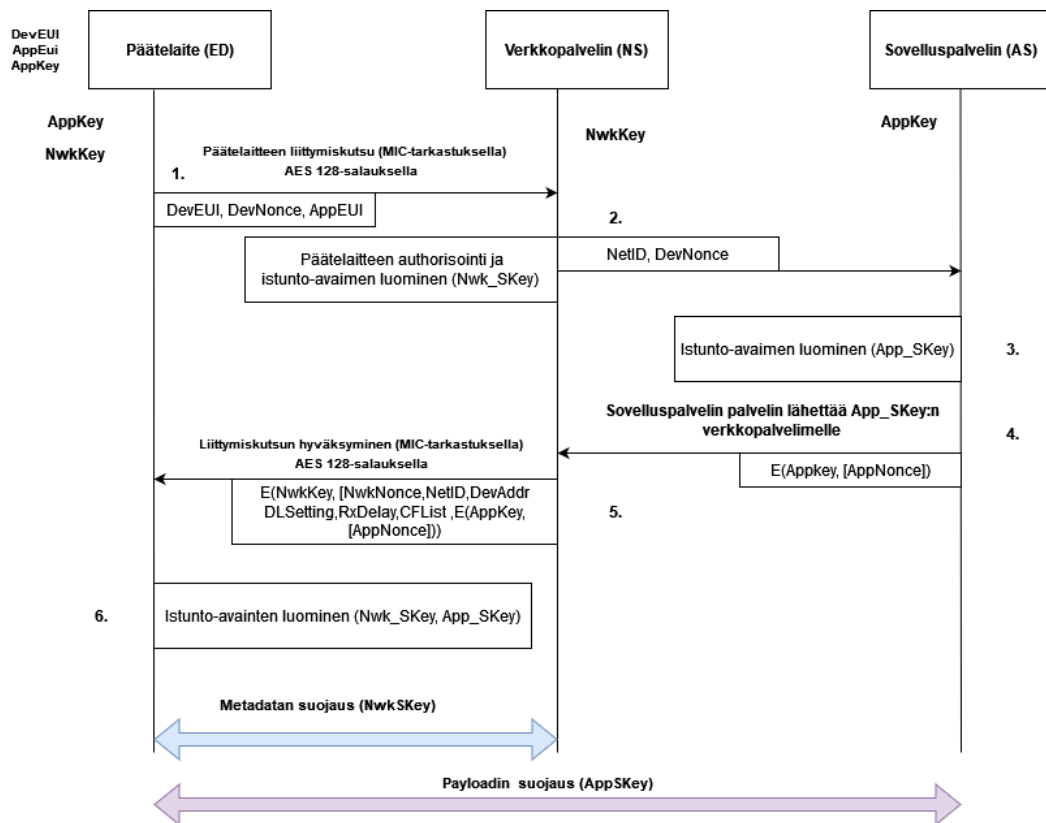
ABP-aktivointi on lähtökohtaisesti heikoin LoRaWAN aktivointimenetelmistä, koska siinä käytetään staattisia istuntoavaimia ja avaimet ovat käytännössä "kovakoodattu" päätelaitteelle. Aktivoinnin heikkoutena on, että istuntoavaimia ei voida vaihtaa helposti vaan samoja istuntoavaimia käytetään verkko sekä applikaatiopalvelimella. Menetelmässä päätelaitteen ei myöskään tarvitse lähettää liittymiskutsua vaan verkkopalvelimelle riittää, että verkkopalvelimelle ilmoitetaan päätelaitteen 32-bittinen DevAddr-osoite sekä verkon istuntoavain (NwkSKey) ja sovelluspalvelimelle asetetaan laitteen sovelluksen istuntoavain (AppSKey) ja laitteen DevAddr-osoite. Kuvassa 2.17 on esitetty ABP-aktivoinnin toimintaperiaate.



Kuva 2.18: OTAA-aktivoinnin toimintaperiaate [46, s.4]

OTAA-menetelmässä päätelaite puolestaan lähettää toistuvasti Message Integration Code (MIC) tarkastuksella olevia liittymiskutsuja verkkopalvelimelle, jotta päätelaite voidaan hyväksyä verkkopalvelimella. Ennen päätelaitteen liittämistä verkkoon verkkopalvelimen on kuitenkin tiedettävä ennakkoon päätelaitteen yksilölliset 64-bittiset DevEUI, AppEUI-osoitteet sekä AppKey-root avain, jotta päätelaitteen liittämisen verkkoon onnistuisi. Ylhäällä olevassa kuvassa 2.18 on esitetty aktivoinnin toimintaperiaate. Päätelaitteen lähettämä liittymiskutsu sisältää DevEUI ja AppEUI-osoitteet sekä satunnaisen DevNonce lukuarvon. Verkkopalvelin tarkastaa aivan ensimmäiseksi onko vastaavaa DevNonce arvoa tullut palvelimelle ja mikäli ei ole tullut seuraavaksi palvelin tarkastaa DevEUI, AppEUI-osoitteet ja lopuksi liittymiskutsulle tehdään vielä MIC-tarkastus. Jos päätelaite hyväksytään verkkopalvelimella, niin sen jälkeen luodaan dynaamiset istuntoavaimet verkkopalvelimelle (NwkSKey & AppSKey) ja lähetetään päätelaitteelle kuittaus liittymisestä. Samassa viestissä lähetetään päätelaitteelle myös AppKey ja AppNonce, joka on satunnainen lukuarvo. Samassa sanomassa on myös mukana NetID, laitteelle 32 määritelty bit-

tinen DevAddr-osoite ja verkkoasetuksiin liittyviä parametreja, kuten Downlinkin asetukset, vastaanoton viive, sekä verkon kanavalista. Aivan lopuksi verkkopalvelin lähettää AppSKey:n sovelluspalvelimelle ja päätelaite vielä luo istuntoavaimet, joka vastaa verkon istuntoavaimia.



Kuva 2.19: Kokeellisen kaksoisavain-aktivoinnin toimintaperiaate [46, s.6]

Kuvassa 2.19 on kuvattu kaksoisavain-aktivoinnin toiminta. Aktivointi menetelmän toiminta perustuu OTAA-aktivointiin ja sen ajatuksena on lisätä perinteisen OTAA-aktivoinnin tietoturvaa. Tarkoituksena on poistaa tietoturvariski, että root avain AppKey vaarantuisi. Menetelmän avulla päätelaitteelle luodaan dynaaminen AppKey avain. Kyseisessä menetelmässä verkkopalvelin ei luo AppSkey-istuntoavaimia vaan se tehdään sovelluspalvelimella. Aktivointi menetelmän ensimmäinen vaihe noudattaa OTAA-aktivoinnin proseduuria, eli päätelaite lähettää liittymiskutsun verkkopalvelimelle. Liittymiskutsu sisältää DevEUI, AppEUI-osoitteet sekä satunnaisen DevNonce lukuarvon. Tässä vaiheessa laitteen AppKey on tallennettu ennalta verkkopalvelimen sijasta sovelluspalvelimelle.

Verkkopalvelin todentaa päätelaitteen ja luo NwkSkey-istuntoavaimen, jonka jälkeen verkkopalvelin lähettää sovelluspalvelimelle sanoman. Tämä sanoma sisältää NetID:n ja DevNoncen. Sen jälkeen sovelluspalvelin luo Appskey istuntoavaimen ja lähettää verkkopalvelimelle AppNonce-lukuarvon, joka sisältää myös AppKeyn. Seuraavaksi lähetään kuittaus päätelaitteelle.

Kuittausanoma sisältää verkkopalvelimen NwkKeyn ja verkkopalvelimen NwkNonce lukuarvon, joka on satunnainen lukuarvo, NetID, laitteelle 32 bittinen Devaddr osoite ja verkkoasetuksiin liittyviä parametrejä, kuten Downlinkin asetukset, vastaanoton viive, sekä verkon kanavalista. Lisäksi lähetetään vielä sovelluspalvelimelta saadut uusi AppKey ja AppNonce-arvot sekä aivan viimeisenä luodaan uudet istuntoavaimet (Netskey ja Apskey).

Vaikka LoRaWAN on suunniteltu varsin tietoturvalliseksi ja tietoturva otettu huomioon MAC-protokollan suunnitteluvaiheessa sekä LoRaWAN spesifikaatiossa. You et Al [86, s.2] esittävät, että LoRaWAN sisältäisi vielä muutamia tietoturva haavoittuvuuksia. Fyysisesti haavoittuvin osa on usein varsinaiset LoRaWAN päätelaitteet, sillä ne eivät sisällä fyysistä suojausta ja päätelaitteen fyysinen sijainti voi olla jo itsessään yksi haavoittuvuus, jos hyökkääjällä on mahdollista päästä päätelaitteeseen kiinni.

Fyysisten haavoittuvuuksien lisäksi Kutke et al [49, s.11-15] mainitsevat päätelaitteelle kohdistetut viestien toistohyökkäykset, tietoliikenteen salakuuntelun, radiohäirinnän sekä huijaushyökkäykset. Viestien toistohyökkäyksillä pyritään viivyttämään tai katkaisemaan päätelaitteen viestiliikennettä. Salakuuntelulla pyritään kuuntelemaan päätelaitteen ja verkon välistä tietoliikennettä radioteitse. Radioliikennettä voidaan myös yrittää häiritä siten, että tukiasema tai päätelaite eivät ole radioteitse tavoitettavissa. Huijaushyökkäyksillä pyritään välittämään päätelaitteelle valheellisia datasanomia, joilla verkon dataliikennettä ja toimintaa pyritään häiritsemään. Kutke et al [49, s.17] mainitsevat myös, että osa haavoittuvuuksista koskee vanhemman spesifikaation LoRaWAN laitteita ja ne ovat korjattu uusimmassa LoRaWAN 1.1 spesifikaatiossa. You et Al [86, s.2] puolestaan mainitsevat yhdeksi heikkoudeksi sen, että istuntoavaimet päätelaitteelle sekä sovelluspalvelimelle luodaan aina verkkopalvelimen kautta, tämän vuoksi suora tietoturvallista laiteelta toiselle tapahtuvaa yhtettä ei voida täysin taata.



## 2.3 LPWAN-verkkoteknologioiden vertailua

Rama et al [71, s.400] sekä Khalifeh et al [45, s.546] mainitsevat vaihtoehtoina tai kilpailevaksi teknologiaksi LoRaWAN:ille myös SigFox, RPMA, NB-FI, Weightless, NB-IoT ja LTE-M, EC-GSN-IoT-tekniikat. Ensimmäiseksi neljä edellä mainittua LPWAN teknologiaa toimii lisenssivapailla ISM-taajuuksilla ja kolme viimeiseksi mainittua toimivat puolestaan lisensoituilla taajuuksilla mobiiliverkoissa. Valtaosa edellä mainituista tekniikoista perustuu tähtiverkko topologiaan. Yksinkertaisen verkkotopologian vuoksi niiden verkot ovat laajennettavissa varsin helposti. Teleoperaattorit pystyvät hyödyntämään olemassa olevaa matkapuhelinverkkoa lisensoitujen LPWAN-tekniikoiden tarjoamiseen.

LPWAN tekniikoita on olemassa enemmänkin, mutta nämä edellä mainitut tekniikat ovat parhaiten verrattavissa LoRaWAN:iin. Taulukossa 2.4 on esitetty erilaisia lisenssivapaita sekä lisensoituja LPWAN-tekniikoita. LPWAN tekniikoiden on mahdollista toimia globaalisti. Lähinnä ja tekniikoiden eroavaisuudet tulevat esille: modulointitavassa, kaistanleveydessä, päätelaitteiden virransäilytyksessä, verkon laajennettavuudessa, radiosignaalin kantamassa sekä datapakettien koossa. Taulukossa 2.5 on kuvattu eroavaisuudet eri LPWAN-tekniikoiden välillä.

Lisenssivapaat tekniikat	Lisensoidut tekniikat
LoRaWAN	NB-IOT
Sigfox	LTE-M
Weightless	EC-GSN-IoT
NB FI	Thingstream
RPMA	

Taulukko 2.4: Erilaisia LPWAN-tekniikoita mukailen lähdettä [54, s.313]

Gaddam et al [33, s.6] esittävät, että muiden LPWAN-tekniikoiden paristo ja akkukäyttöisten päätelaitteiden virransäilytykset ovat yleisesti ottaen olleet korkeampia kuin LoRaWAN:nin päätelaitteiden, mutta siitä huolimatta myös näiden tekniikoiden päätelaitteet ovat varsin virtapihejä. Päätelaitteiden elinkaari on useita vuosista jopa 10 vuoteen.

Veljgaard et al [83, s.1] esittävät, että lisenssivapailta taajuuksilla olisi myös enemmän signaalihäiriöitä kuin lisensoituilla taajuuksilla, koska lisenssivapaita taajuuksia voi käytännössä käyttää jokainen. LPWAN-teknologiat ovat kuitenkin kehitetty eri tarkoituksiin ja niille löytyy omat asiakassegmentit ja liiketoimintamallit.

Ominaisuus	LoRaWAN	SigFox	NB-IoT	LTE-M
Taajuus	ISM taajuudet 433-470, 868-928 MHz	ISM taajuudet 862-928 MHz	Lisenssoidut LTE taajuudet	Lisenssoidut LTE taajuudet
Kanavan kaistanleveys	125, 250, 500 kHz	100 Hz	180 kHz	1.4 MHz
Modulaatio	CSS	GFSK,DBPSK	GFSK,BPSK	SC-FDMA, OFDMA
Akun kesto (vuotta)	8-10	7-8	7-8	1-2
Energian hyötysuhde	Erinomainen	Erinomainen	Erinomainen	Keskinkertainen
Linkkibudjetti	154dB	159dB	151 dB	146dB
Tiendonsiirtonopeus	0.3-50 kbps	100-600 kbps	~220 kbps	~1Mbps
Toiminta-alue	5-20 km	10- 40 km	1-10 km	~ 5 km
Häiriön sietokyky	Erinomainen	Erinomainen	Keskitaso	Matala
Spektri	Lisenssivapaa ISM	Lisenssivapaa ISM	Lisensoitu mobiiliverkko	Lisensoitu mobiiliverkko
Standardi	LoRa Alliance	ETSI	3GPP 13+	3GPP 13+
Tuki yksityiselle verkolle	Kyllä	Ei	Ei	Ei
Skaalautuvuus	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Tietoturva / Autentikointi	AES-128	Yksilöityyn laiteavaimeen perustuva salausmekanismi	AES-256	AES-256

Taulukko 2.5: LPWAN-teknologioiden eroavaisuuksia, mukailen lähteitä [29, s.5] [45, s.564]

LPWAN teknologioiden monipuolisuus tarjoaa asiakkaille kuitenkin valinnan vapautta sekä palveluntarjoajille luoda erilaisia liiketoimintamalleja eri asiakkaille tai käyttötarkoituksiin. LPWAN teknologioille on kehitetty IoT-verkkoalustoja, joiden kautta verkkoon liitettyjä laitteita hallinnoidaan. Lisensoituilla taajuuksilla toimivien LPWAN teknologioiden verkkoalustaa hallinnoi yleensä teleoperaattorit, koska käytetään mobiiliverkkoa.

On kuitenkin olemassa kaupallisia verkkoalustoja, jotka tukevat useampaa kuin yhtä LPWAN-teknologiaa. Nämä verkkoalustat mahdollistavat eri LPWAN verkkojen yhdistämisen. Sitä kautta LPWAN teknologiat ovat toisiaan täydentäviä. Verkoja voidaan yhdistää myös rajapintojen avulla. Verkkoalustojen rajapintojen kautta LPWAN-verkkojen päätelaitteet ovat mahdollista yhdistää myös kolmannen osapuolen IoT-alustoihin.

## 3 LoRaWAN-verkkoalustat

Fyysisten laitteiden, kuten päätelaitteiden ja tukiasemien lisäksi LoRaWAN vaatii käytännössä ohjelmistopohjaisen verkkoalustan hallinnointia ja verkon ylläpitämistä varten. Verkkoalustan tärkeys ja valinta korostuvat etenkin tilanteissa, kun rakennetaan LoRaWAN-tekniikan ympärille kaupallisia palveluita. Verkkoalustan tehtävänä on myös huolehtia verkon ja päätelaitteiden tietoturvasta sekä datan integroimisesta kolmannen osapuolen sovelluksiin tai IoT-järjestelmiin. Verkkoalustat tarjoavat myös geolokaatiopalvelut mahdollista sensoripaikannusta varten. Verkkoalustojen käyttö voidaan määrittellä yksityisesti tai julkisesti riippuen käyttö tarkoituksesta. Kaupallisesti myytäviä LoRaWAN-verkko ja IoT-alustoita on suhteessa huomattavasti enemmän tarjolla kuin avoimeen lähdekoodiin perustuvia ilmaisia alustoja, myös kaupalliset verkkoalustat ovat usein avoimia alustoja monipuolisempia toiminnoiltaan.

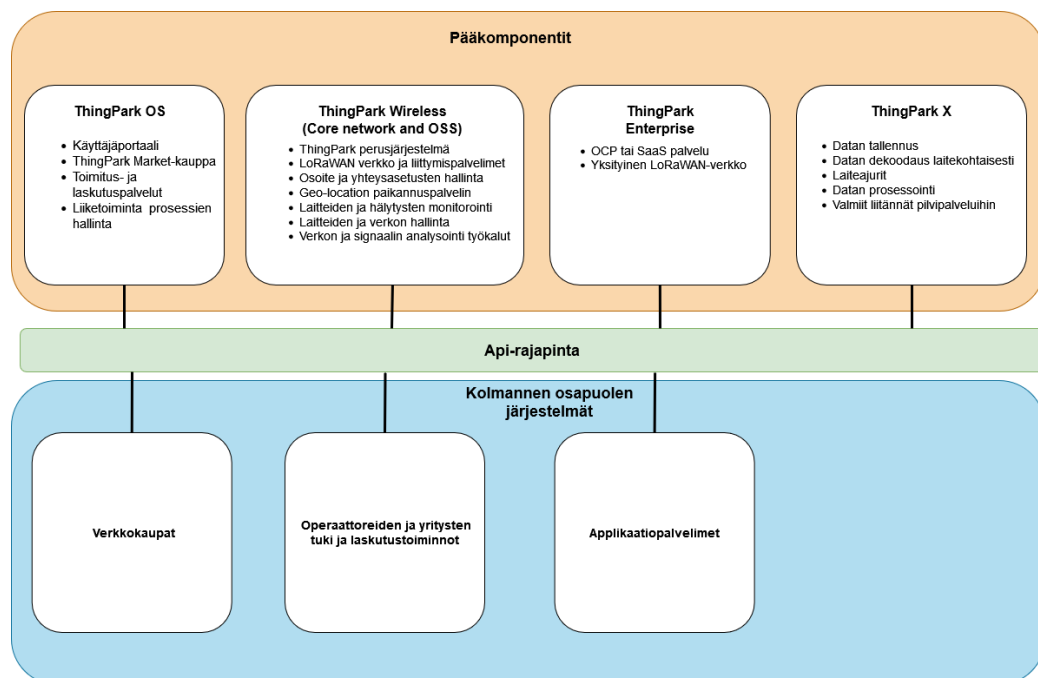
### 3.1 Kaupalliset alustat

Internetistä löytyy useita valmiita kaupallisia IoT (Internet of Things) ja IIoT (Industrial Internet Of Things)-verkkoalustoja tai kokonaisratkaisuja, joista jälkimmäinen on tarkoitettu teollisuuden ja yritysmaailmaan vaatimuksiin. Kaupalliset verkkoalustat ovat käytännössä palvelupaketteja, joiden avulla palvelun käyttäjä voi nopeasti ja helposti ottaa käyttöön valmiin sensoriverkon, mihin palvelun käyttäjän on mahdollista lisätä omia päätelaitteitaan.

Palvelun käyttäjä voi tilata palveluntarjoajalta, myös yksityisen verkkoympäristön. Palvelun ostajan ei tarvitse kuitenkaan omata teknillistä erityisosaamista, sillä palvelun ylläpitämisestä ja tuesta huolehtii usein palveluntarjoaja. Palveluiden kohderyhmiä ovat yleensä organisaatiot ja yritykset mutta myös yksityishenkilöt. Verkkoalustat jaetaan karkeasti kahteen liiketoimintamalliin: IoT ja IIoT, joista jälkimmäinen on suunnattu pääsääntöisesti teollisuus ja yritysmaailmaan vaatimuksia varten. Ensimmäiseksi mainittu on puolestaan enemmän tarkoitettu kuluttaja-asiakkaita varten.

### 3.1.1 Actility ThingPark Solution

Actilityn ThingPark Solution on kokonaisvaltainen LoRaWAN-ratkaisu. Se koostuu yhdestä tai useammasta modulaarisesta komponentista. Actilityn mukaan ThingPark Solution koostuisi neljästä pääkomponentista: ThingPark OS, ThingPark Wireless Core NW & OSS, ThingPark Enterprise ja ThingPark X-komponentista [4, s.8]. Pääkomponenttien lisäksi palvelua voidaan laajentaa saman tuoteperheen muilla modulaarisilla komponenteilla: ThingPark FUOTA, ThingPark Activation, ThingPark Exchange, ThingPark Market tai ThingPark Community komponentti. Kuvassa 3.1 on esitetty ThingPark Solutionin arkkitehtuuri.



Kuva 3.1: ThingPark-alustan arkkitehtuuri [2, s.14]

Komponentit ovat yhteydessä toisiinsa API-rajapinnan avulla. Palvelun käyttäjä voi ostaa tietyt komponentit käyttöönsä tai yhdistellä komponentteja modulaarisesti. ThingPark Solution tukee myös LoRaWAN teknologian lisäksi LTE-M ja NB-IoT-teknologioita. Palvelun käyttäjiä ovat pääsääntöisesti organisaatiot, yritykset, palveluntarjoajat sekä verkko-operaattorit. Actility ei ole julkisesti avannut kotisivuillaan muita kuin ThingPark Enterprisesin hinnoittelua. Enterprise-tuote perustuu tukiasemien sekä verkkoon liitettävien laitteiden määrään. Taulukossa 3.1 on kuvattu Enterprisesin hinnoittelumalli.

ThingPark OS komponentti sisältää palvelun asiakasportaalin jota kautta käyttäjät kirjautuvat järjestelmään. Sisältää myös ThingPark Market-kaupan, sen kautta laitetoimittajat, jälleenmyyjät sekä asiakkaat voivat tehdä kauppaa, hankkia ja myydä sertifioituja LoRaWAN-laitteita. Komponentti sisältää myös myyjien, laitetoimittajien ja laskutuspalveluiden hallinnan. ThingPark Wireless Core NW & OSS sisältää LoRaWAN-verkkopalvelimen perustoiminnallisuudet, yhteysasetusten hallinnan, laite- ja verkonhallinnan, hälytys ja monitorointipalvelut sekä verkon ja signaalin analysointityökalun. Kuvassa 3.2 on esitetty ThingPark Wireless logger komponentti

ThingPark Enterprise palvelu on suunnattu erityisesti pienille ja keskisuurille yritysasiakkaille. Palvelu mahdollistaa myös yksityisverkon luomisen. Komponentti on mahdollista toteuttaa SaaS tai OCP-palveluna. OCP-palvelussa asiakas voi itse asentaa järjestelmän dedikoituun palvelimeen ja hallinnoida sitä. Enterprise on itsenäinen komponentti eikä sen tarvitse olla yhteydessä muihin komponentteihin, sisältää LoRaWAN-palvelut. Enterprisen hinnoittelu perustuu tukiasemien määrään. Actilityn mukaan hinnoittelupaketteja on kuusi ja nämä paketit on esitetty taulukossa 3.1 [56, s.3].

<b>Paketin ominaisuudet</b>	<b>XS</b>	<b>S</b>	<b>M</b>	<b>L</b>	<b>XL</b>	<b>XXL</b>
Tukiasemien maksimimäärä	5	10	50	100	200	1000
Päätelaitteiden maksimimäärä	1000	2000	10000	20000	50000	300000

Taulukko 3.1: Thinkpark Enterprise hinnoittelupaketit [56, s.3]

ThingPark X mahdollistaa IoT-tietovirtojen kontrolloidun ohjauksen ja tallennuksen aikaperusteisesti komponentin tietokantaan. ThingPark X sisältää myös valmiit yhdistimet ja protokollat, joilla tietovirta voidaan ohjata suoraan kaupallisiin pilvipalveluihin. Komponentilla on mahdollista luoda laitekohtaisia ajureita, jolla puretaan päätelaitteen datasanoma pilvipalveluihin tai ihmiselle luettavaan JSON-formattiin[5].

ThingPark FUOTA palvelu hallinnoi LoRaWAN päätelaitteiden ohjelmistopäivityksiä. Palvelun kautta päätelaitteiden ohjelmistopäivitykset voidaan ajaa massajona tai kohdistaa yksittäisiin laitteisiin. ThingPark FUOTA on suunnattu erityisesti verkko-operaattoreille sekä päätelaitevalmistajille mutta se soveltuu myös palvelun loppukäyttäjille[8].

ThingPark Activation on aktivointipalvelu, joka mahdollistaa laitevalmistajille, palveluntarjoajille ja loppukäyttäjille yksinkertaisen sekä tietoturvallisen menetelmän aktivoida laite tai muuttaa aktivointiin liittyviä salausavaimia. Aktivointipalvelu on rajapinta palvelu, jonka kautta päätelaitteet aktivoidaan ja salausavaimet syötetään verkkopalvelimelle. Laitevalmistaja voi jakaa rajapinnan kautta päätelaitteiden salausavaimet verkkoon tai käyttäjille. Palvelussa laiteavaimista luodaan poletteja. Palveluun rekisteröitynyt käyttäjä voi lunastaa poletin ja tunnistautua laitteen omistajaksi esimerkiksi saadulla henkilökohtaisella QR-koodilla [1][7].

ThingPark Exchange on maailmanlaajuinen Roaming-palvelu, joka mahdollistaa globaalin LoRaWAN-verkon. Verkko-operaattorit voivat liittyä palveluun tai hankkia ThingPark Exchange-palvelun lisäosana. Palvelun kautta verkko-operaattorit voivat muodostaa yhteyden toisen verkko-operaattorin julkiseen tai privaattiverkkoon. Palveluun voidaan yhdistää myös kolmannen osapuolen verkkoja. Näitä verkkoja ovat mm. LoRaWAN-verkot, jotka eivät ole Thingpark-järjestelmällä toteutettu tai kolmannen osapuolen maanpäälliset ja satelliittiverkot [6].

ThingPark Market sisältyi aikaisemmin ThingPark OS-komponenttiin, mutta Actility on tehnyt siitä nykyisin myös itsenäisen komponentin. ThingPark Market on tarkoitettu B2B asiakasmyyntiä varten ja se tarjoaa asiakkaille tavan hankkia valmiita IoT-ratkaisuita, laitteita ja palveluita. ThingPark Market tarjoaa myös laitevalmistajille ja jälleenmyyjille myydä tuotteita verkkokaupassa[3].

Verkko-operaattorille Actility tarjoaa erityisesti ThingPark Wireless tuotepakettia. Kyseinen tuotepaketti, koostuu seuraavista peruskomponenteista: ThingPark OS, ThingPark Wireless Core NW & OSS ja ThingPark X-komponenteista. Actilityn sivuilla mainitaan, että ThingPark Wireless verkkoalustaa käyttää yli neljäkymmentä kansainvälistä suuren mittakaavan verkko-operaattoria[55]. Verkko-operaattori voi laajentaa tuotepakettia liittämällä muita moduuleita ThingPark Wireless tuotepakettiin. Suomessa toimiva valtakunnallinen langattomien viestintäverkkojen operaattori Digita käyttää ThingPark Wireless-vekkoalustaa. Yrityksellä on Suomessa valtakunnallinen verkkoinfrastruktuuri, joka toimii LoRaWAN verkkona ja se kattaa pääosin Suomen alueen. Digita on hinnoitellut palvelun päätelaitteiden määrän mukaan. Digita on myös rakentanut palvelun ympärille kaupallisia sovelluksia vesi- ja sähkölaitoksille.

The screenshot shows the 'WIRELESS-LOGGER' interface with a table of captured packets. The table has the following columns: UTC Timestamp, Local Timestamp, DevAddr, DevEUI, FPort, FCnt, HFCnt, AFCnt, RSSI, SNR, ESP, SF/BK, SubBand, Channel, LRC Id, LRR Id, LRR Lat, LRR Long, LRR GWID, Device Lat, Device Long, and LoS. The data rows show various packet types (data, mac) with their respective timestamps and values.

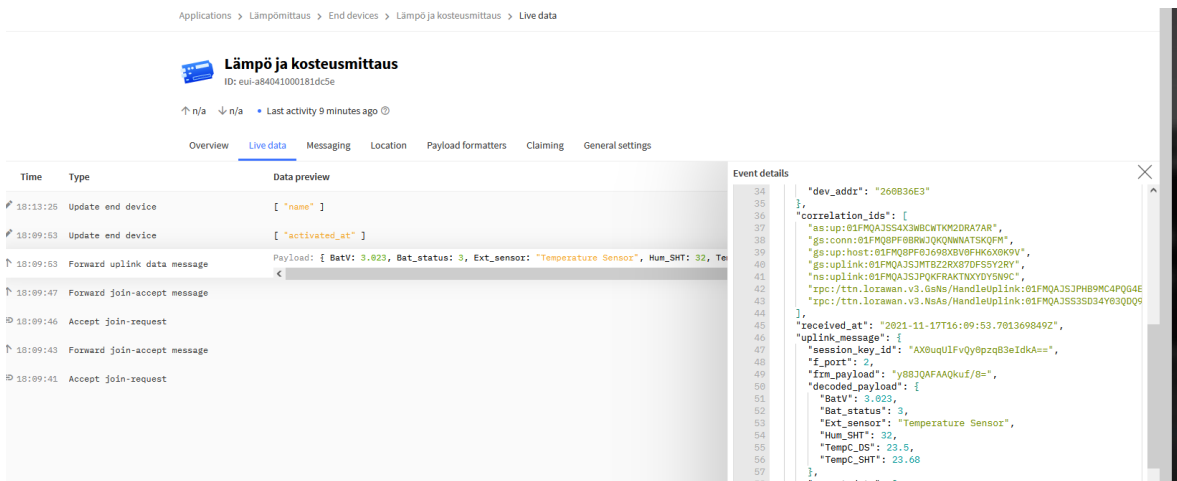
Kuva 3.2: Thingpark Wireless logger-komponentti

### 3.1.2 The Things Network

The Things Stack Community Edition on The Things Networkin kehittämä globaali LoRaWAN-palvelu. Palvelun kohderyhmänä ovat yhteisöt ja yksityishenkilöt. Community Editionin käyttäminen on ilmaista mutta siinä on rajoitteita verrattuna kaupalliseen The Things Stack-palveluun. Esimerkiksi Community Editionissa on rajoitettu päätelaitteiden Uplink-viestien lähetysaika 30 sekuntiin päivässä per päätelaite ja yhden päivän aikana päätelaitteelle voidaan lähettää korkeintaan 10 Downlink-viestiä. Palvelun käyttäjän pitää sitoutua liittämään tukiasema sekä päätelaite The Things Stack Communityn julkiseen LoRaWAN-verkkoon.

Käyttäjä voi määrittellä palvelussa päätelaitteen datasanoman tulkkauksen ja formaatin itse tai käyttää palvelun tarjoajan valmiita laiteajureita. Käyttäjä voi määrittellä päätelaitteen tulkkauksen neljällä tavalla: raakadatan edelleen lähetys (ei sisällä tulkkausta), dekadaus JavaScript-ohjelmointikielellä JSON-formaattiin tai käyttämällä Cayenne tai GRPC-viestiformaattia. Lisäksi voidaan käyttää palvelun valmista laiteajurilistaa, mihin on määritelty useimpien laitevalmistajien päätelaitteiden dekodeukset valmiiksi. Päätelaitteen data voidaan integroida palvelussa tai ohjata kaupallisiin pilvipalveluihin. Vaihtoehtoina on myös siirtää data käyttäjän määrittelemään rajapintaan/applikaatiosovellukseen. Integrointi onnistuu seuraaviin pilvipalveluihin: Amazon, Azure, Lora Cloud.

Päätelaitteelta saapunut data voidaan tallentaa myös palvelun omaan tietokantaan. The Things Stackin API-rajapinnan avulla data voidaan hakea myöhemmin tietokannasta. Community Edition sisältää myös MQTT-välittäjä/tilaajapalvelun, jonka kautta data voidaan välittää suoraan palvelun tilaajalle [11, s.4]. Kuvassa 3.3 on esitetty Dragino LHT65 [30] päätelaitteen datasanoma, joka on vastaanotettu ja tulkittu valmiiksi Community Edition-portaalissa ihmiselle luettavaan muotoon.



Kuva 3.3: Vastaanotetun datan näkymä The Things Stack CE-portaalissa

### 3.1.3 The Things Industries

The Things Industries on kaupallinen versio The Things Stack-palvelusta. Palvelu on kohdistettu erityisesti erikokoisille teollisuus ja yritys organisaatioille mutta myös verkko-operaattoreille. Kyseessä on Actilityn ThingPark solutionsin tapaan kokonaisvaltainen LoRaWAN palvelu. Kaupallinen versio sisältää laajemmat ominaisuudet ja palvelut kuin Community edition, eikä kaupallisessa versiossa ole samanlaisia rajoitteita kuin esimerkiksi Community editionissa. The Things Industries palvelu tukee myös 2.4GHz radiotaajuudella toimivia LoRaWAN päätelaitteita ja palvelun käyttäjällä on mahdollisuus luoda privaatti verkko.

Things Stackin Packet Brokerilla päätelaitteilta kerättyä dataa voidaan välittää kolmannen osapuolen palveluihin tai sieltä vastavuoroisesti voidaan hakea dataa Things Stack-palveluun. The Things Industries sisältää myös API-rajapinnan ja inte-



graatio mahdollisuudet useisiin kaupallisiin sekä avoimiin pilvipalveluihin ja applikaatio-sovelluksiin. The Things Industries on kehittänyt Microchip-yrityksen kanssa yhteistyössä mikropiirin, joka mahdollistaa tietoturvallisen tavan aktivoida laite verkkoon. Mikropiirin ideana on, että käyttäjän ei tarvitse käsitellä itse aktivointivaihtimia, mikä on jo itsestään yksi tietoturvariski. Päätelaitteen mukaan liitetään mikropiiri ja siihen ohjelmoidaan root-avaimet tietoturvalisesti. The Things Industries ja Microchip huolehtivat avainten aktivoimisesta verkkoon. Käytännössä käyttäjän vastuulle jää vain tilata päätelaitteen aktivointi palvelusta.

Kaupallisen version palveluvaihtoehdot ovat perushinnoiteltu: kuukausi tai aika tai volyymlisenssi perusteisesti. Kokonaishinnoitteluun vaikuttavat lisäksi päätelaitteiden määrä sekä valittu tukipalvelun taso. Tukipalvelun tasoja on kaksi: Standard ja Priority näiden ominaisuudet on esitelty taulukossa 3.2. Palvelu on mahdollista hankkia myös ilman palvelutasoa.

Standart	Priority
Tukipyynnöt sähköpostitse tai portaalin kautta	Tukipyynnöt sähköpostitse, portaalin tai puhelimitse kautta
8 tunnin vasteaika tukipyyntöön	4 tunnin vasteaika tukipyyntöön
Tukipyyntöjen määrä rajattu 2 kpl /kk	Rajaton määrä tukipyyntöjä
2 käyttäjällä mahdollisuus avata tukipyyntöjä	Vianselvitys live istunnoissa
	Tukipyynnön voi avata 6 käyttäjää

Taulukko 3.2: Thingsnetwork-verkkoalustan tukipalvelutasot [78]

Things Stack palvelusta on saatavilla neljä vaihtoehtoa: Cloud, AWS Launcher, Enterprise ja Dedicated Cloud. Taulukossa 3.3 on esitelty tarkemmin palvelujen eroavaisuudet. Lisäksi on olemassa The Things Stack Discovery-palvelu, joka tarkoitettu lähinnä palveluun tutustumista varten. Things Stack Discovery paketti on ilmainen kokeiluajan. Palveluun voi lisätä yhden tukiaseman ja maksimissaan kymmenen päätelaitetta.

Things Stack Cloud on The Things Industriesin täysin ylläpitämä verkkoalusta, joka sisältää palvelun perusominaisuudet. Sen hinta kostuu kuukausimaksusta sekä laitteiden määrästä ja valitusta tukitasosta. AWS Launcher, joka on puolestaan Amazonin ylläpitämä verkkoalusta sisältää myös palvelun perusominaisuudet. Palvelu kostuu Amazonin palvelimen tuntihinnoittelusta sekä valitusta tukitasosta. Käytännössä sama kuin Cloud-palvelu.

Things Stack Enterprise on Dedicated Cloudin ohella monipuolisin tuotepaketti. Käyttäjä voi ylläpitää ja hallinnoida verkkoalustaa itse. Peruspalveluiden lisäksi Enterprise asiakas voi vuokrata palvelua omille asiakkaalleen ja White labeloida palvelun omanlaiseksi sekä käyttää kustomoitua verkkotunnusta. Palvelun hinta muodostuu päätelaitteiden määrästä sekä valittavasta käyttöönottotavasta ja tukipalvelusta. Palvelun normaali kuukausihinta sisältää Standart tukipalvelun. Lisähinnasta käyttäjä voi hankkia Priority tukipalvelun.

Things Stack Dedicated Cloud on vastaava tuotepaketti kuin Enterprise mutta se sisältää Things Industriesin ylläpitämän dedikoitun palvelimen. Palvelu sisältää myös priority-tukipalvelun ja samat ominaisuudet, kuin Enterprise mutta kyseessä on SaaS-pohjainen palvelu. Things Industries ei ole julkisesti hinnoitellut palvelua.

Ominaisuudet	Cloud	AWS Launcher	Enterprise	Dedicated Cloud
Tuki päätelaitteen perusominaisuuksille	x	x	x	x
Päätelaitteiden hallinta mahdollisuus	x	x	x	x
Verkonhallinta palvelu	x	x	x	x
Tukiaseman hallinta	x	x	x	x
Yhteensopivuus:	x	x	x	x
<b>Eroavaisuudet palveluissa</b>				
Palvelun monivuokraus mahdollisuus			x	x
API-rajapinta laskutusta varten		x	x	x
Datan säilytys	30 pv	valittavissa	valittavissa	valittavissa
Palvelun brändäys & oman verkkotunnuksen käyttö			x	x
Oma liittymispalvelin			x	x
Käyttöalue	Globaali	AWS	valittavissa	AWS
Käyttöönottotapa / palvelumalli	SaaS	AMI	Docker,Kubernetes,AWS ECS	SaaS
Infrastruktuuri	Jaettu	oma	oma	oma
Palvelun saatavuus (Palvelutasosopimus)	99%	ei käytössä	ei käytössä	95%
24/7 valvonta & hälytystenseuranta	x			x
Palvelumallin hinnoittelu	kuukausi ja vuosihinta	tunti	kuukausi ja vuosihinta	neuvoteltavissa

Taulukko 3.3: Things Industries palvelupakettien vertailutaulukko [40]

### 3.1.4 Kerlink

Kerlinkin käyttämä IoT-verkkoalusta koostuu neljästä Wanesy pääkomponentista, joita palvelun käyttäjä voi hyödyntää. LoRaWAN:in lisäksi Kerlinkin IoT-alusta tukee mm. WMBus, LTE sekä LPWAN-teknologioita. Kerlink valmistaa IoT verkkoalustan lisäksi IoT ja LoRaWAN laitteita. Kerlinkin sivuilla ei ollut hinnoittelutapaa mainittu, mutta mahdollisesti se hinnoittelu perustuisi palveluun liitettyjen tukiasemien määrään ThingsPark Enterprisen tapaan. Kerlinkin pääasiakasryhmiksi ovat muodostuneet pääsääntöisesti eri organisaatiot kuten yhteisöt ja kunnat. Palvelu on erityisesti suunnattu maanviljelyä sekä älykaupunkien IoT-ratkaisuita ajatellen.

Wanesy Management Center koostuu LoRaWAN verkkopalvelusta sekä tukiaseman hallintaohjelmistosta. Käytännössä muut komponentit rakentuvat tämän palvelun ympärille. Palvelusta on olemassa kolme palvelumallia: keskitetty SaaS palvelu (Standart taso), Dedikoitu SaaS (Premium taso) ja OnPremises palvelu missä järjestelmä toimii asiakkaan tiloissa. Palvelu on mahdollista integroida suoraan kolmannen osapuolen applikaatiosovelluksiin REST API ja Swagger rajanpintojen avulla [43].

Wanesy Device Management huolehtii päätelaitteiden valvonnasta, ohjelmisto sekä tietoturvapäivityksistä. Palvelun avulla laite voidaan myös ryhmitellä ja nimeä järjestelmään. Ohjelmistopäivitykset voidaan ajaa erissä, osittain tai kokonaan. Hallinnoi myös verkon optimaalista ja adaptiivista suorituskykyä sekä tarkkailee päätelaitteiden tilaa. Wanesy Device Management palvelun vastuulla on huolehtia päätelaitteiden Root-avaimista [41].

Wanesy SPN (Small Private Network) on "yhden laatikon"ratkaisu organisaatiolle, jotka haluavat pienen yksityisen verkon käyttöön. Wanesy SPN (Small Private Network) palvelussa käytetään vain palveluun tarkoitettuja tukiasemia. Päätelaitteen data ohjataan tukiaseman kautta suoraan käyttäjän valitsemaan tallennustilaan, pilvipalveluun tai applikaatioon. Verkon arkkitehtuuri voi olla mono tai multipohjainen. Monopohjaisessa arkkitehtuurissa on vain yksi tukiasema, joka on yhteydessä päätelaitteisiin sekä valittuun tallennus tai applikaatiosovellukseen, mihin data päätelaitteen data kerätään. Multipohjaisessa arkkitehtuurissa puolestaan on useampi tukiasema, joista yksi on päätukiasema ja muut ovat verkon alitukiasemia. Nämä alitukiasemat ovat yhteydessä päätelaitteisiin. Päätukiasema on yhteydessä

ainoastaan sen alla oleviin tukiasemiin ja välittää datan sitten käyttäjän valitsemaan tallennustilaan. Tukiasemat käyttävät kommunikointiin myös mm. seuraavia rajapintoja tai tallennustiloja: Web services, HTTPS, REST API, paikallinen tai etänä toimiva FTP-palvelin, SFTP, tekstiviestit, massamuistit kuten USB-muistit. Wanesy SPN (Small Private Network) tukiasemat tukevat ainoastaan Euroopan, Amerikan sekä Australian ISM taajuuksia [44].

Wanesy Geolocation mahdollistaa päätelaitteiden ja tukiasemien sijaintitietojen selvityksen Kerlinkin palveluun. Palvelu sisältää karttapalvelun ja sen toimintaperiaate pohjautuu LoRaWAN:in GPS-vapaaseen paikannukseen, eli päätelaitteen laskennalliseen sijaintiin, kun päätelaite ja tukiasema kommunikoivat keskenään ja datanomasta saatu aikaleima määrittää sijaintitiedot. Palvelu myös tallentaa sijaintitiedot ei SQL tyyppiseksi avain/arvo pohjaiseksi tietotyypiksi, jotka voidaan siirtää kolmannen osapuolen järjestelmiin[42].

### 3.1.5 LORIOT

LORIOT on kaupallinen LoRaWAN-verkkoalusta, jonka on kehittänyt samanniminen sveitsiläinen IoT-yhtiö. Palvelu on pääsääntöisesti suunnattu pienten ja keski suurten yritysten käyttöön. Alustasta on olemassa myös The Things Network Community Editionin kaltainen yhteisöille sekä yksityishenkilöille tarkoitettu ilmainen palvelu mutta se on rajoitetumpi kuin muut LORIOT:in kaupalliset palvelut. LORIOT:in sivuilla mainitaan kolme palveluvaihtoehtoa [59].

Free Community Server LORIOT-verkkoalusta on ilmainen yhteisöllinen palvelu, joka mahdollistaa yhden tukiaseman sekä korkeintaan 30 päätelaitteen liittämisen verkkoon. Free Community Server sisältää LoRaWAN verkon kannalta olennaiset peruspalvelut. Palvelu tukee vain rajallisesti valmiita integrointi tai pilvipalveluita. Tässä palveluvaihtoehdossa voi vain osittain hyödyntää LORIOT:in omaa Rest-rajapintaa. LoRaWAN verkko on tässä palvelussa julkinen. Verkkoalustan palvelu toimii EMEA (Europe, the Middle East and Africa), Aasia sekä Amerikan alueilla ja niistä on valittavina 13:sta alueellista verkkopalvelinta. Palvelu ei sisällä Fuota sekä sijainti ja paikannuspalveluita. LoraIoT:in sivuilla mainitaan, että palvelu soveltuu erityisesti ei toimintakriittisille päätelaitteille [61, s.3].

Professional Public Server on kaupallinen LORIoT-verkkoalustapalvelu, joka mahdollistaa käyttäjän liittämisen verkkoalustaan rajattoman määrän tukiasemia mutta minimissään 250 tai korkeintaan 2500 päätelaitetta. Datasanomien määrää palveluissa ei ole rajattu.

Palvelu on jaettu seuraaviin tuotepaketteihin: Start, Build, Grow ja Scale. Tuotepaketit ovat eri hintaisia ja tuotepaketit määräytyvät käytettävien päätelaitteiden lukumäärän mukaan. Palvelu on integroitavissa yleisempiin pilvipalveluihin ja rajapintoihin. Lisäksi palvelussa voidaan hyödyntää kokonaisuudessaan LORIoT:in omaa Rest-rajapintaa. Palvelussa voi valita LoRaWAN verkon joko julkiseksi tai privaattiksi. Palvelun verkkopalvelimet toimivat maailmanlaajuisesti ja palvelussa on SLA-palvelutuki. Palvelun käyttäjä hallitsee käyttäjätunnuksia ja voi tarvittaessa antaa muille organisaatioille tunnuksia. Palvelu tukee monivuokrausta ja sisältää myös laskutuspalvelun [62, s.12].

Private Network Server on LORIoT:in palvelupaketeista ominaisuuksiltaan kattavin ja vikasietoisin, sisältää Professional Public Serverin ominaisuuksien lisäksi myös tuen hybridiverkoille. Palvelun tilaajan on mahdollista vuokrata palvelua eteenpäin loppuasiakkaalle yrityksen omilla logoilla. LORIoT:in sivuilla mainitaan, että hybridiverkko on pääsääntöisesti privaattiverkko mutta siihen voidaan yhdistää kolmannen osapuolen verkkoja [60, s.13].

Palvelua ei ole sivuilla suoraan hinnoiteltu, vaan hinta muodostuu asiakkaan vaatimusten sekä LORIoT:in tekemän räätälöinnin mukaan. Palvelu on mahdollista asentaa asiakkaan omiin palvelintiloihin, jolloin asiakkaalla on palveluun sekä palvelimeen täysi hallinta itsellään, mutta palvelu voi sijaita myös LORIoT:in palvelinsaleissa, silloin LORIoT huolehtii palvelun ja verkon ylläpitämisestä.

## 3.2 Avoimeen lähdekoodiin perustuvat verkkoalustat

Vaihtoehtona kaupallisille verkkoalustoille on myös avoimeen lähdekoodiin perustuvia IoT ja LoRaWAN alustoja. Awesome Open Source sivusto mainitsee, että GitHubissa olisi arviolta 349 erilaista LoRaWAN tai IoT-aiheista projektia[75]. Useat näistä avoimen lähdekoodin projekteista ovat vielä kehitteillä tai toimivat huomattavasti suppeammin kuin kaupalliset verkkoalustat. ChirpStack verkkoalusta jäi kuitenkin ainoaksi vaihtoehdoksi tähän vertailuun, koska se tarjoaa lähes samat ominaisuudet kuin kaupalliset verkkoalustat.

Tarkoituksena oli löytää myös toinen LoRaWAN:ille suunnattu avoimeen lähdekoodiin perustuva verkkoalusta, jota olisi voinut vertailla tässä tutkielmassa, mutta yhtä valmista kuin kuin ChirpStack ei löytynyt tässä tutkielman aikana. Avoimen lähdekoodin IoT-alustoja kuitenkin löytyy runsaasti, mihin voidaan rajapintojen avulla luoda dataa LoRaWAN verkkoalustoista. Avoimen lähdekoodin perustuvat verkkoalustat, kuten ChirpStack vaativat usein enemmän tietoteknillisiä taitoja ja käyttäjän on itse ylläpidettävä LoRaWAN-verkkoa sekä hankittava tarvittavat palvelinresurssit.

### 3.2.1 ChirpStack Network Server stack

ChirpStack on yksi kehittyneempiä avoimeen lähdekoodiin perustuvia ja vapaita LoRaWAN-verkkoalustoja. ChirpStack on lisensoitu MIT-lisenssillä ja sitä voidaan käyttää myös kaupallisessa tarkoituksessa. ChirpStack on kaupallisen The Things Networkin kaltainen stack ratkaisu. Ohjelmisto koostuu kolmesta modulaarisesta pääkomponentista ja näitä ovat Gateway Bridge, Network Server ja Application Server. ChirpStackin kehitys alkoi vuonna 2016 ja se tunnettiin aluksi nimellä LoRaWAN Server. Vuonna 2019 kuitenkin sen kehittäjät joutuivat vaihtamaan projektin nimen, koska LoRa:n kehittäjä Semtech oli rekisteröinyt ja patentoinut LoRa tuotenimen[22].

Pääkomponentit ovat asennettavissa Linux/Unix ja Windows pohjaisiin palvelinympäristöihin geneerisesti tai Docker-alustan kautta. Pääkomponenttien lisäksi on Raspberry Pi:lle suunnattu Gateway OS käyttöjärjestelmä, joka sisältää kaikki edellä mainitut pääkomponentit. Käyttöjärjestelmän ajatuksena on, että Raspberry Pi toimii kokonaisvaltaisena LoRaWAN-ratkaisuna, käyttäjän vain tarvitsee

hankkia Raspberry Pi:lle LoRaWAN-hattu, joka on yhteensopiva ChirpStackin kanssa. ChirpStack verkkopalvelimen toimintaperiaate on yksinkertainen ja perustuu siihen, että Gateway Bridge komponentti on kaksisuuntaisessa yhteydessä tukiasemiin ja se välittää MQTT-protokollan kautta tiedon eteenpäin Network Serverille, joka puolestaan välittää tiedon GPRC-protokollan kautta ChirpStackin applikaatio-serverille mistä tiedot voidaan integroida suoraan kolmannen osapuolen järjestelmiin. ChirpStackin LoRaWAN-verkko voidaan määritellä joko julkiseksi tai privaatiksi, riippuen käyttötarkoituksesta. ChirpStackin sivuilla mainitaan, että Network serverille ei vielä ole täysin toteutettu LoRaWAN Backend-standardin mukaisia määrittelyksiä, jotka koskevat UL ja DL-datasanomien metatietojen käsittelyä [23].

ChirpStack Gateway Bridge toimii siltana tukiasemien ja verkkopalvelimen välillä. Komponentin pääasiallinen tehtävä on muuttaa tukiaseman datasanoma JSON tai ProtoBuf-formaattiin, jotta ChirpStackin Network server pystyy tulkitsemaan päätelaitteelta saapuvan datasanoman. Vastaavasti muuttaa verkkopalvelimelta lähtevän datasanoman tukiasemalle sopivaksi. Käytännössä komponentti vastaa tukiasemien sekä verkkopalvelimen välisestä tietoliikenteestä [20].

ChirpStack Network Server vastaa verkon ja päätelaitteiden hallinnasta sekä tukiasemien liittämistä verkkoon. Mahdollistaa tukiasemien ja laitteiden profiilien hallinnan. Käyttäjän on myös mahdollista luoda räätälöityjä laiteajureita verkkopalvelimelle. Verkkopalvelimeen on integroitu liittymispalvelin sekä sijaintipalvelut. Verkkopalvelin sisältää datalogger toiminnon, millä pystyy seuraamaan tukiaseman sekä Gateway Bridgen välistä tietoliikennettä, päätelaitteiden tilaa ja datasanomia [21].

ChirpStack Application Server huolehtii verkkopalvelimelta tulevan datan integraatiosta tietokantoihin tai kolmannen osapuolen järjestelmiin. Kyseessä visuaalinen käyttöliittymä, joka sisältää myös pääkomponenttien Gateway Bridgen sekä Network Serverin hallinnan. Application Server-komponentilla voidaan luoda organisaatioille käyttöön omia LoRaWAN verkkoja sekä päätelaitteita ja organisaatioille käyttäjätunnuksia. Komponentti mahdollistaa sen, että verkkopalvelimen hallinnoija voi myös vuokrata verkkoa palveluna muille verkon käyttäjille. Application Server tukee oletuksena Influx-tietokantaa mutta saapuvan datan voi integroida suoraan myös PostgreSQL-tietokantaan. Tietokannan lisäksi saapuva data voidaan

myös integroida seuraaviin järjestelmiin tai palveluihin: HTTP, AMQP / RabbitMQ, AWS SNS, Azure Service Bus, GCP Pub/ Sub, Kafka, LoRa Cloud, MQTT, myDevices, Pilot Things ja ThingsBoard. Application Server sisältää myös integraatioiden lisäksi Restful API-rajapinnan, jonka kautta voidaan tehdä varsin kattavia kyselyitä ChirpStackin rajapintaan [19].

### 3.3 Verkkoalustojen vertailu

Kolmannessa luvussa käsiteltyjen kaupallisten verkkoalustojen sekä avoimeen lähdekoodiin perustuvan ChirpStackin verkkoalustan rakenne ja toimintaperiaatteet ovat hyvin samankaltaisia, mutta kaupalliset verkkoalustat ovat selkeästi kohdistettu yritysmaailmaan ja sitä myöten yritysten liiketoimintaa tukevaksi palveluksi. Vertailussa olleet kaupalliset verkkoalustapaketit olivat myös kohdistettu eri asiakassegmenteille ja hieman erilaisiin käyttötarkoituksiin. Sen vuoksi verkkoalustojen palvelutaso ja tuotepaketteja ei voitu verrata suoraan keskenään. Vertailussa olleissa verkkoalustoissa, oli mahdollisuus välittää tai integroida kerättävä tieto joko tietokantaan tai kolmannen osapuolen järjestelmiin MQTT-protokollan avulla tai hyödyntämällä verkkoalustan HTTP ja API-rajapintoja.

Kaupallisten alustojen hinnoittelumallit perustuivat: aika (tunti, kuukausi ja vuosi) ja käyttöpohjaiseen hinnoitteluun tai verkossa käytettävien laitteiden (päätelaitteiden tai yhdiskäytävien) lukumäärään. Kaupallisten alustojen kaikista laajimmista palvelupaketeista ei ollut saatavilla suoraa hinnoittelumallia, vaan hinnoittelu määräytyi tilattavaan palvelupakettiin valittavien ominaisuuksien ja asiakkaan vaatimusten mukaan tehdyn räätälöinnin perusteella. Räätälöinnit ovat neuvoteltavissa verkkoalustan toimittajan kanssa.

Kaksi kaupallista toimijaa LORAIOT ja The Things Network tarjoavat myös kaupalliseen liiketoimintaan suunnattujen verkkoalustojen lisäksi ilmaisen julkisen verkkoalusta palvelun. Ilmaisten verkkoalustojen avulla käyttäjät voivat kokeilla palvelua ennen kaupallisen palvelupaketin hankkimista, ne toimivat myös matalan kynnyksen tuotteina niille, jotka haluavat tutustua LoRaWAN-teknoologiaan. Ilmaisen verkkoalustojen käyttäjät ovat usein yksityishenkilöitä, yhteisöjä tai alan harrastajia.



Ilmaisia verkkoalustoja ei voida käyttää yrityskäyttöön, koska ne ovat suunnattu yhteisöille ja yksityishenkilöille. Ilmaiset verkkoalustat sisältävät rajoituksia mm. datan vastaanottoon ja lähetykseen. Ilmaiset verkkopalvelut ovat lähinnä tarkoitettu pienimuotoista käyttöä varten. Kaupallisten verkkoalustojen tyypillisiä asiakkaita ja käyttäjiä ovat usein yksityishenkilöt, yhteisöt ja organisaatiot sekä pienet ja keski-suuret yritykset. ThingsPark ja Things Industries verkkoalustoilla oli selkeästi laajimmat palvelupaketit ja ne oli selkeästi suunnattu kansallisten verkkooperaattoreiden sekä suurten teollisuusyritysten käyttöön.

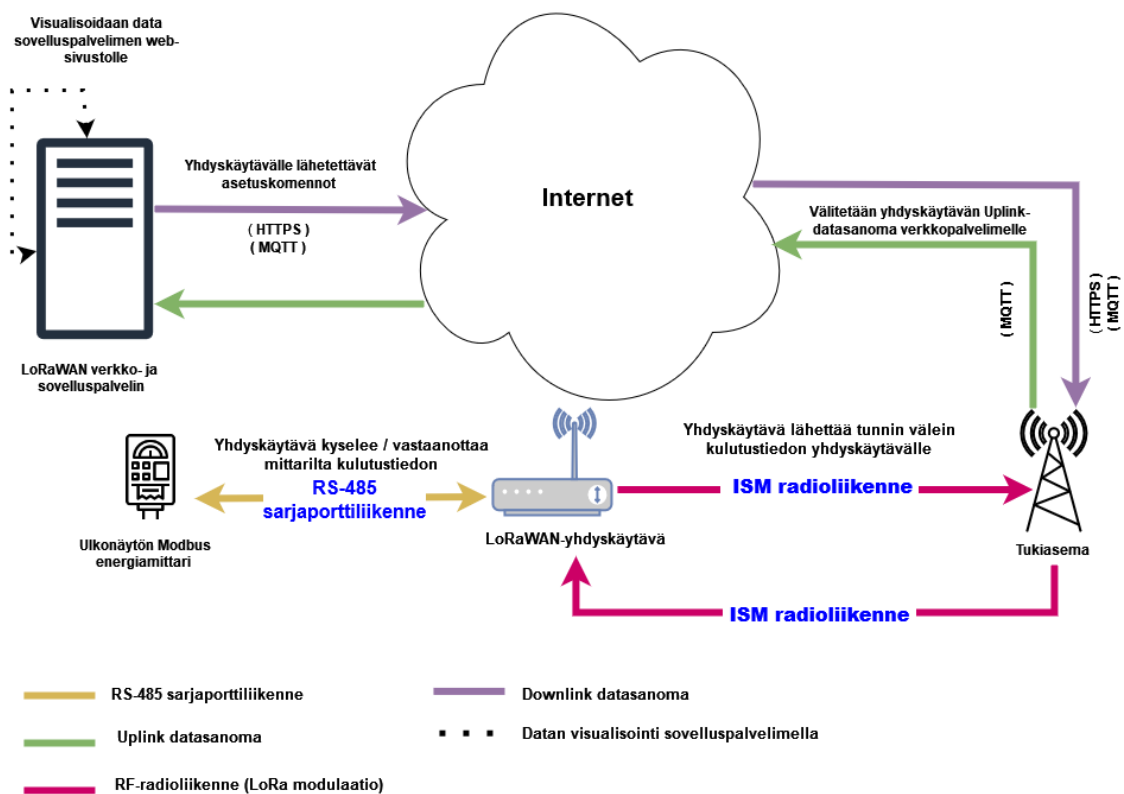
Kaupallisten verkkoalustojen etuina on, että palveluiden käyttö on tehty mahdollisimman helpoksi ja käyttäjän ei tarvitse huolehtia järjestelmän ylläpidosta. Kaikki kaupalliset ja maksulliset palvelupaketit sisälsivät myös teknisen palvelutuen. Vastaavasti avoimissa verkkoalustoissa käyttäjä joutuu itse ylläpitämään järjestelmää ja korjaamaan mahdolliset ongelmatilanteet. Tämä puolestaan voi nostaa käyttökustannuksia pidemmällä ajanjaksolla, myös tietoturvasta huolehtiminen on käyttäjän itsensä vastuulla. Avoimista verkkoalustoista vertailuun valikoitui vain ChirpStack, koska se tarjoaa vastaavat ominaisuudet kuin kaupalliset palvelut, ChirpStack palvelu tarjoaa lisäksi kaupallisten verkkoalustojen tapaan palvelun monivuokrauksen, joilla LoRaWAN-verkon omistaja voi myydä palvelua muille organisaatiolle tai saada järjestelmän käyttökustannuksia näin jaettua useamman organisaation kesken.

ChirpStackissa ja kaupalliseen käyttöön tarkoitetuissa palvelupaketeissa pystyi määrittelemään LoRaWAN-verkon tyyppin yksityiseksi tai julkiseksi. Ainakin LO-RAOIT ja ThingsPark-verkkoalustoissa voitiin lisäksi käyttää hybridiverkkoa, joka yhdistää julkiset ja privaattiverkot keskenään. Kaikissa verkkoalustoissa käytettiin API-rajapintaa, mutta vain kaupallisiin alustoihin pystyi tuomaan dataa myös kolmannen osapuolen verkoista, rajapinnoista tai järjestelmistä.

Verkkoalustojen käyttöliittymissä on eroja. Vaikka ominaisuudet ja toimintaperiaatteet ovat samankaltaisia. Vertailussa olleiden verkkoalustojen käyttöliittymät oli suunniteltu helppokäyttöiseksi ja yksinkertaisiksi, jotta käyttäjillä on pienempi kynnyks käyttää palvelua eikä käyttäjän tarvitse välttämättä omata teknisiä taitoja. Eri verkkoalustavaihtoehdot tarjoavat eri käyttäjäkunnille valinnan vapauden ja heidän liiketoimintaan tai käyttöön soveltuvan ratkaisun.

## 4 LoRaWAN verkon toteutus

Ensisijaisesti verkko rakennettiin sen vuoksi, että oli tarve seurata ja etälukea LED-ulkonäytön kumulatiivista sähkönkulutusta laskutusta varten. Verkko toteutettiin myös siksi, että oli tarkoitus löytää verkon rakentavalle yritykselle langaton teknologiaratkaisu, joka tukisi jatkossa myös yrityksen liiketoimintaa uudella tavalla. Ajatuksena oli myös, että kyseistä verkkoa voitaisiin hyödyntää myös jatkossa yrityksen käyttöön. Ulkonäytön sijainti ja rakenne tukivat erityisesti langattoman verkon tarvetta, koska langallinen mittausta olisi ollut haasteellisempi toteuttaa. Myös langattoman verkon mahdollisuudet kiinnostivat, koska silloin sähkön kulutuksen mittaukselle ei tarvita käytännössä tehdä monimutkaisia ja näkyviä kaapelointeja.



Kuva 4.1: Toteutuksen verkon toimintaperiaate

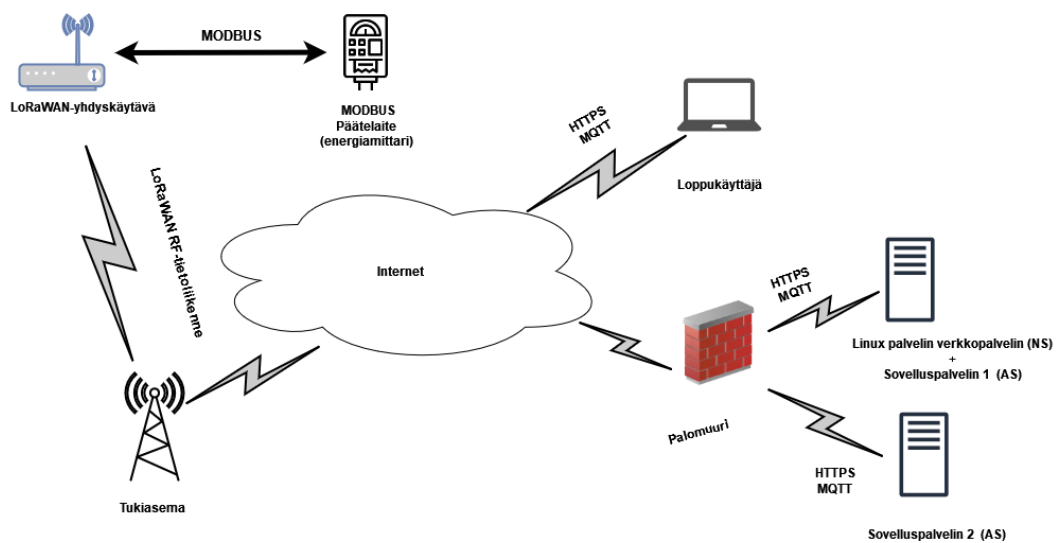
LoRaWAN valikoitui sopivaksi teknologiaksi yksinkertaisen verkkoarkkitehtuurinsa, ulkotiloihin soveltuvana sekä pitkän radiokantaman ansiosta. Toteutuksen yhtenä vaatimuksena oli luoda kustannustehokas langaton yksityinen IoT-verkko, joka olisi aluksi pienimuotoinen ja myöhemmin helposti laajennettavissa. Vaatimus oli hyvin toteuttavissa erityisesti LoRaWAN-teknologialla. Teknologian eduiksi voidaan katsoa se, että sitä voidaan käyttää myös eri käyttökohteisiin ja siihen löytyy valmiita päätelaitteita ratkaisuita. Lisäksi teknologia tarjoaa varsin kustannustehokkaan toteutuksen ja valmiin ratkaisun välittää tietoa IoT-sovellusalueisiin tietoturvallisesti.

Verkko luotiin käytännössä vaiheittain. Ensimmäisessä vaiheessa kartoitettiin verkkoa varten tarvittavat laitteet ja järjestelmät. Toisessa vaiheessa rakennettiin fyysinen verkko ja konfigurointiin verkkopalvelin sekä tukiaseman ympäristö. Kolmannessa vaiheessa asennettiin ulkonäytön mittausta varten päätelaitteet ja yhdyskäytävä. Viimeisessä vaiheessa lisättiin päätelaitteiden ympäristön laitteet verkkoon. Fyysisen verkon toteuttamista nopeutti huomattavasti se, että verkon laitteiden asennuspaikat oli selvitetty jo ennakkoon ennen varsinaista asennusta. Saatiin myös kiinteistön omistajalta lupa sijoittaa tukiasema mittauskohdetta lähellä olevaan rakennukseen. Tukiasema saatiin näin sijoitettua korkeaan paikkaan ja avoimelle paikalle aivan mittauskohteen läheisyyteen, se tarjoaa optimaaliseen sijainnin verkon toiminnalle. Myös verkon yhdyskäytävä saatiin sijoitettua ulkotiloihin, mutta suojaan sääolosuhteilta.

Kuvassa 4.1 on esitetty verkon ja mittauksen toimintaperiaate. Toimintaideana on, että näyttöön liitetty energiamittari, joka mittaa näytön kumulatiivista sähkönkulutusta. Mittarin viereen asennettu LoRaWAN-yhdyskäytävälaite, joka kyselee Modbus-protokollan kautta tunnin aikavälein kulutuslukeman mittarilta. Yhdyskäytävä lähettää sitten saadun kulutustiedon LoRaWAN datasanomana eteenpäin yksityiseen LoRaWAN-verkkoon ja sieltä yksityisiin sovelluspalvelimiin, missä data lopulta visualisoidaan ihmiselle luettavaan ja ymmärrettävään muotoon. Yhdyskäytävä kommunikoi kaksisuuntaisesti energiamittarin sekä LoRaWAN-verkkoon. Verkkoalustaksi valittiin avoimeen lähdekoodiin perustuva ChirpStack, joka mahdollistaa verkonhallinnan, valmiit integraatiot rajapinnat sekä verkon toimisen yksityisenä verkkona.

## 4.1 Verkon arkkitehtuuri ja LoRaWAN-toteutus

Sähkönmittausta varten luotiin yksityinen LoRaWAN verkko. Verkkoa varten hankittiin valmiit verkkolaitteet sekä siihen soveltuvat järjestelmät. Yksityisellä verkolla haettiin myös ajatusta, että verkkoalustan hallinta ja verkko olisivat mahdollisimman paljon verkon ylläpitäjän omassa hallinnassa. Kohteeseen toteutetun verkon arkkitehtuuri muodostui karkeasti ottaen kolmesta osasta: verkkoympäristöstä ja sovelluspalvelimista sekä päätelaiteympäristöstä. Toteutetun verkon arkkitehtuuri on esitetty kuvassa 4.2.

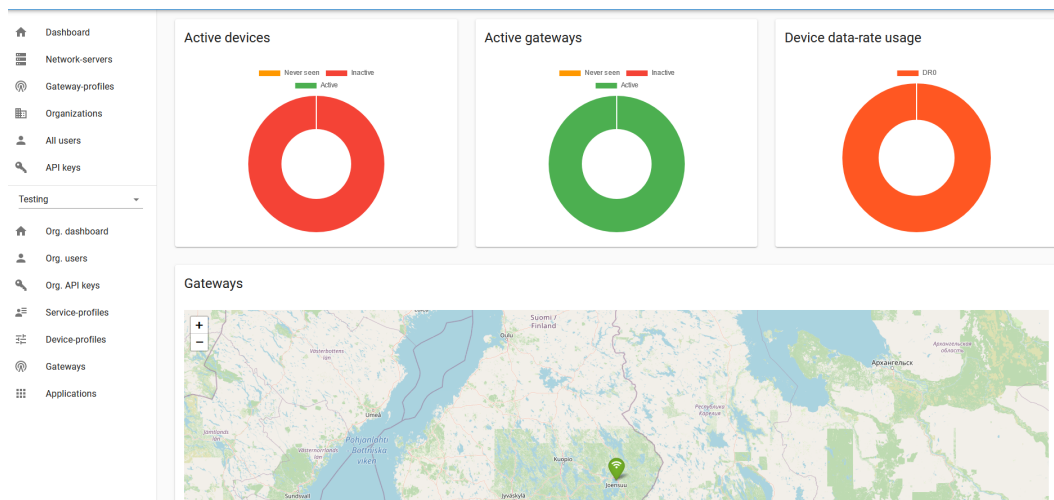


Kuva 4.2: Toteutetun kohteen verkkoarkkitehtuuri

Päätelaiteympäristö muodostuu kahdesta laitteesta: yhdyskäytävästä ja energiämittarista. Päätelaitteeksi valikoitui 3-vaiheinen mittaustiededirektiivin (MID) mukainen Carlo Gavazzin EM300 Modbus-energiamittari. Mittarin tarkoituksena on huolehtia varsinaisesta ulkonäytön sähkönmittauksesta. Yhdyskäytävän eli sinkilaitteen tehtävänä on puolestaan kerätä energiämittarin data ja lähettää se verkon tukiasemalle LoRaWAN datasanoma formaatissa. Yhdyskäytäväksi valittiin Carlo Gavazzin UPWA-yhdyskäytävä. UPWA-yhdyskäytävä oli suoraan yhteensopiva EM300 energiämittarin kanssa.

Markkinoilla olisi ollut myös valmiita kaupallisia LoRaWAN-energiamittareita toteukseen, joissa olisi ollut suoraan integroitu LoRa-radio. Ne olivat kuitenkin kalliimpia kuin perinteiset Modbus-väyläiset sähkömittarit. Sähkömittareissa on usein mahdollisuus mitata eri suureita esimerkiksi: jännitettä, virtaa tai tehoa. On kuitenkin otettava huomioon LoRaWAN datasanoman pieni koko ja sen vuoksi kaikkea mittaustietoa ei välttämättä kuitenkaan voida kerätä mittarilta kerralla. Markkinoilla on myös olemassa erikseen Modbus/LoRaWAN gateway-laitteita, jotka muuttavat perinteisen Modbus-laitteen datasanoman LoRaWAN datasanomaksi ja lähettävät sen LoRaWAN verkkoon, juuri sellainen laite oli yhdyskäytäväksi hankittu UPWA-laite.

Verkkoympäristö huolehtii tietoturvallisesta kaksisuuntaisesta data liikenteestä päätelaiteympäristön sekä sovellusympäristön välillä. Verkkoympäristö huolehtii myös laitteiden aktivoimisesta verkkoon. Verkkoympäristö koostuu yhdestä RAK:in 7249-tukiasemasta [70] sekä avoimeen lähdekoodiin perustuvasta ChirpStackin verkkoalustasta, joka toimii debian pohjaisessa Linux virtuaalipalvelimessa. Virtuaalipalvelin asennettiin konesalin ylläpitäjän toimesta. LoRaWAN verkon toimintoja varten palvelimella otettiin käyttöön Docker-ympäristö. Docker ympäristöön asennettiin ChirpStack verkkoalusta, joka toimi käytännössä LoRaWAN verkkopalvelimena. Kuvassa 4.3 on esitetty ChirpStackin aloitussivu heti verkkoalustan kirjautumisen jälkeen.



Kuva 4.3: ChirpStack-verkkoalustan aloitusnäky

Verkkoympäristöön on jatkossa mahdollista lisätä tukiasemia myös myöhemmin. Tukiasema on ominaisuuksiltaan 8-kanavainen ja ulkokäyttöön (IP67-luokitus) soveltuva. Tukiaseman yhtenä valinta kriteerinä oli IP67-suojaus, koska tukiasema sijoitettiin mittauskohdetta lähellä olevan rakennuksen katolle ulkotiloihin. Etäisyys tukiaseman ja päätelaitteen välillä on noin 130 metriä ja matkalla ei ole näköesteitä. Tukiasema sisältää myös LAN, Wifi ja 4G-yhteydet.

Tukiaseman oman virtalähteen lisäksi virtalähteenä voidaan käyttää myös Power over Ethernet (PoE)-tekniikkaa. Tekniikka mahdollistaa tukiasemalle virransyötön Ethernet-kaapelin kautta, jolloin tukiasema saa virran LAN-portin kautta. Tukiaseman haastavan asennuspaikan vuoksi POE-tekniikkaa hyödynnettiin tukiaseman virranlähteenä. Tukiaseman asetuksiin konfiguroitiin yhteysosoitteeksi ChirpStackin verkkoalustan domain-osoite. Kommunikointi palvelimen ja tukiaseman välillä tapahtuu MQTT-protokollan kautta. Tukiaseman on yhteydessä verkkopalvelimeen 4G-yhteyden avulla.

Sovellusalustoja tai sovelluspalvelimia on kaksi, joiden tehtävä on vastaanottaa ja tallentaa verkkoalustalta tullut mittausdata ja esittää data visuaalisessa muodossa. Ensimmäinen sovelluspalvelin on tarkoitettu lähinnä reaaliaikaisen mittaustiedon seurantaan varten ja se sijaitsee samassa virtuaalipalvelimessa kuin ChirpStack-verkkoalusta. Ensimmäiseen sovelluspalvelimeen asennettiin Node-RED kehitysympäristö sovellusalustaksi. Se on käytännössä visuaalinen vuonopohjainen kehitysympäristö, joka tukee myös Javascript ja HTML-teknologioita. Kehitysympäristön tarkoituksena on visualisoida vastaanotettua dataa ihmiselle luettavaan muotoon, kun ChirpStack välittää datan integraatiopalveluiden kuten HTTPS ja MQTT-protokollien kautta Node-RED ohjelmiston käsiteltäväksi. Toinen sovellusalusta sijaitsee eri paikassa ja se on kolmannen osapuolen valmistama sovellusalusta, joka sisältää vielä laajemmat ominaisuudet kuin ensimmäinen sovelluspalvelin, kuten mittaushistorian tarkemman selaamisen. Käytännössä jokainen osa-alue on oma komponenttinsa ja ne pystyvät toimimaan myös autonomisesti, vaikka osa-alueet ovat linkittyneet toisiinsa ja kommunikoivat toistensa kanssa kaksisuuntaisesti. Verkon rakenne on suunniteltu siten, että jokainen osa-alue voidaan tarvittaessa vaihtaa tai laajentaa lisäämällä osa-alueille lisää komponentteja.

## 4.2 Pääteleite ja energiamittaus

Näytön energiamittauksesta huolehtii Carlo Gavazzin EM 340 [36, s.1] energiamittari ja UPWA-yhdyskäytävä yhdessä. [37, s.1]. Molemmat laitteet ovat asennettu rinnakkain mitattavan kohteen eli ulkonäytön läheisyyteen. Yhdyskäytävän tarkoituksena on välittää ja muuttaa ja välittää energiamittarin mittaustiedot LoRaWAN verkkoon sopivaksi. Energiamittarin ja yhdyskäytävän välinen tiedonsiirto tapahtuu RS-485 sarjaporttiliikenteen avulla sekä käyttämällä binääristä Modbus RTU protokollaa. Käytännössä UPWA-yhdyskäytävä lähettää tietyn aikavälein kWh kulutustieto kyselyn energiamittarin rekisteriin mihin kulutustieto on tallennettu. Mittari vastaa lähes välittömästi kyselyyn ja palauttaa rekisteristä viimeisimmän kumulatiivisen kulutuslukeman UPWA-yhdyskäytävälle. Yhdyskäytävä puolestaan muuttaa lukeman LoRaWAN datasanomaksi ja välittää sen eteenpäin LoRaWAN-verkon käsiteltäväksi.

Modbus on Modiconin vuonna 1979 kehittämä tiedonsiirtoprotokolla. Protokolla on suunniteltu alkujaan ohjelmoitavien logiikoiden tilatietojen lukemiseen ja ohjaukseen. Swales et al. mainitsevatkin protokollan olevan yleisesti käytössä teollisuuden automaatiolaitteissa [76, s.1]. Modbus tunnetaan teollisuusautomaatiossa ns. De facto standardina, joka on lisenssivapaa standardi ja protokolla. Thomas (2008) kuitenkin mainitsee, että protokollaa voidaan käyttää muuallakin kuin pelkästään teollisuusautomaatiossa [81, s.1]. Modbus standardeja on kolme: Modbus ASCII, missä käsiteltävä datatyyppi on tekstimuotoista. Siinä data on suoraan ihmiselle luettavassa muodossa. Toisena on Modbus RTU, missä puolestaan data on binäärimuotoista ja kolmantena on Modbus TCP, joka käytännössä on sama kuin RTU mutta siinä tiedonsiirto tapahtuu sarjaporttiliikenteen sijasta TCP/IP-protokollan kautta.

Modbus on tyypillinen point to point tyyppinen kysely ja vastausprotokolla. Modbus väylän topologia on tyypillisesti toteutettu daisychain-topologialla, missä väylän laitteet ovat ketjutettu toisiinsa ja ketjun päässä on päätevastus. Väylän kommunikointiin käytetään RS-485 sarjaporttiliikenneyhteyttä. Muitakin verkon topologioita voidaan käyttää, mutta yleisesti ottaen daisychain topologia on vakain ja optimaalisin. Samassa Modbus-väylässä voi olla korkeintaan 32 laitetta ilman laajennuspalikkaa, jolla väylää voidaan tarvittaessa laajentaa. Modbus-väylän maksimi pituus voi olla korkeintaan 1200 metriä.

Väylälaite voidaan yksilöidä osoitetunnuksella. Laitteen osoite voi olla lukuarvo välillä 1-255. Modbus väylä koostuu yhdestä primäärilaitteesta ja muut väylän laitteet ovat sekundaarilaitteita eli asiakaslaitteita, jotka toimivat primäärilaitteen alaisuudessa. Primäärilaitte hallinnoi samassa väylässä olevia muita sekundaarilaitteita. Primäärilaitteen kautta voidaan lähettää tai välittää kyselyitä tietyille väylässä olevalle sekundaarilaitteelle ja laitteella tiettyyn rekisteriin. Tyypillinen Modbus RTU sekundaarilaitte sisältää bittirekistereitä, mihin laite tallentaa kerättyä tietoa binäärimuodossa. Jokainen laitevalmistaja on määritellyt laitteelle oman rekisteritaulukon, minkä perusteella mittarilta voidaan lukea oikea rekisteri tai tilatieto.

Rekisterit on jaoteltu erilaisiin ryhmiin toimintojen perusteella ja osa rekistereistä voi olla suoraan kirjoitusuojattuja, tällöin laitteen ulkopuolelta ei voida tallentaa tilatietoa tai arvoa laitteen ko. rekisteriin. Rekisterit sisältävät lukuarvoja tai tilatietoja. Näitä tietoja sekundaarilaitte on mitannut tai tallentanut. Rekisterit ovat kooltaan usein 8, 16, 32 tai 64 bittisiä. Rekisterin koosta riippuen datatyyppinä voidaan käyttää mm. boolean, kokonaislukuja tai liukulukuarvoja.

Kun primäärilaitte lähettää datasanomana kyselyn, se sisältää tiedon mihin laitteeseen kysely lähetetään eli ID-tunnuksen sekä mihin rekistereihin kysely kohdistetaan sekä mahdollisen virheentarkastuksen bittivirheiden minimoimiseksi. Sekundaarilaitte vastaanottaa primäärilaitteen kyselyn ja vastaa lähes saman tien primäärilaitteelle kyselyn sisältämät arvot ja virheentarkastus bitin.

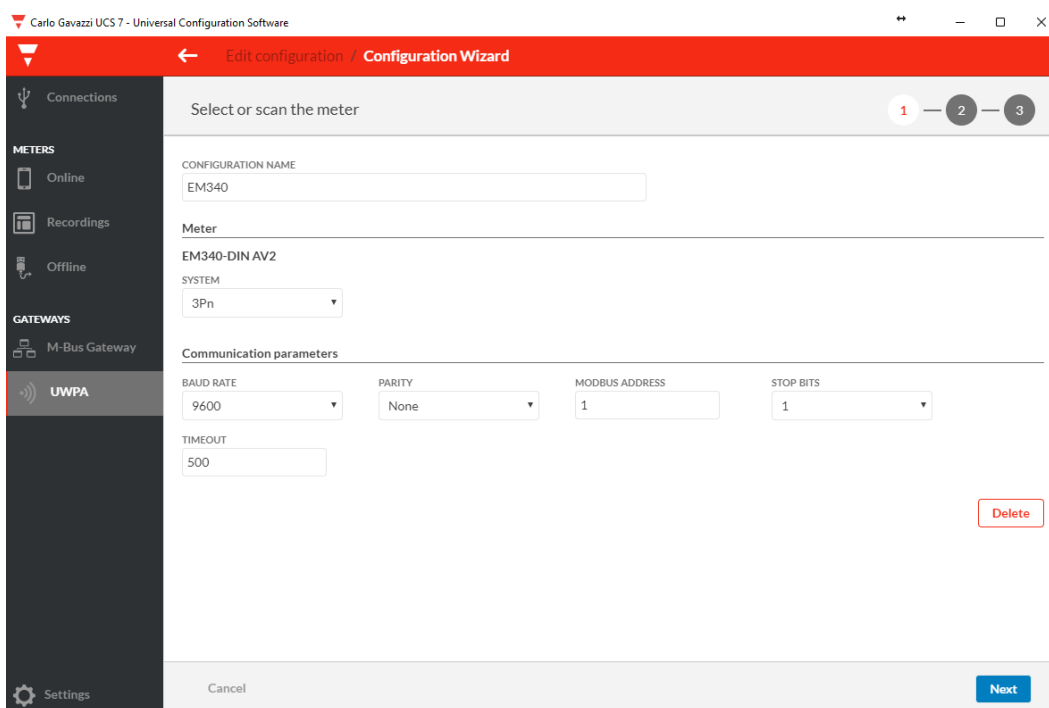
Primäärilaitte tarkastaa saadun datasanoman ja tallentaa tai ohjaa vastauksen eteenpäin sarjaportti tai TCP/IP-liikenteenä kolmannen osapuolen ohjelmistoon tai laitteisiin[80, s.1]. Vastaanottaessa sekundaarilaitteen rekisteriarvoja primäärilaitte käyttää yleensä Little Endian tai Big Endian tavujärjestystä, jotta rekisterin sisältöä saadaan tulkittua oikein.

Tässä mittauskohteessa UPWA-yhdyskäytävä toimi käytännössä Modbus primäärilaitteena sekä LoRaWAN yhdyskäytävänä eli sink-laitteena. Energiamittari puolestaan toimii Modbus väylässä sekundaarilaitteena. Yhdyskäytävä kyselee mittarilta vain kWh-rekisterin tiedon [35, s.9] määrätyn ajan välein. Energiamittarille määriteltiin Modbus sarjaporttiyhteyden parametreiksi seuraavat arvot: Modbus osoitteeksi asetettiin 1, koska kyseessä oli väylän ainoa sekundaarilaitte eli asiakaslaitte.



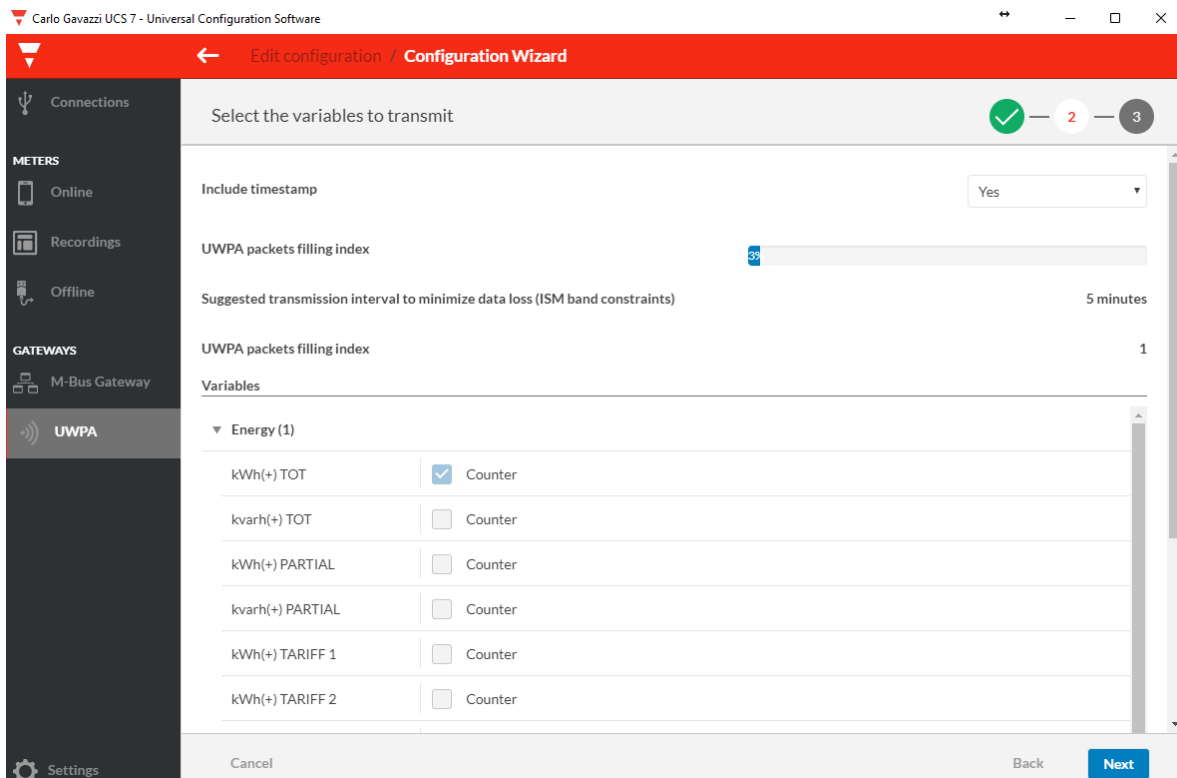
Tiedonsiirto nopeudeksi eli baudrate arvoksi määriteltiin 9600, joka on tyypillinen nopeus modbus-väylässä. Tiedonsiirron pariteettitiksi eli tarkastusbitiksi asetettiin none sekä stopbitiksi 1, se kertoo datasanoman vastaanottajalle, milloin datasanoma päättyy.

Yhdyskäytävän konfigurointi suoritettiin tietokoneelle asennetun Carlo Cavazin Universal Configuration Software-ohjelmiston kautta [77]. Ohjelmisto oli ladattavissa laitevalmistajan internet sivuilta. UCS-ohjelmisto on yleiskäyttöinen konfiguraatio ohjelmisto, millä voidaan konfiguroida myös muitakin saman valmistajan tuotteita kuin pelkästään UPWA-yhdyskäytävälaitteita. Yhdyskäytävä yhdistettiin USB-kaapelilla tietokoneeseen konfigurointiasetuksia varten. Konfiguraatio suoritettiin ohjelman Configuration Wizardin avulla, joka oli kolmivaiheinen. Konfiguraation ensimmäisessä vaiheessa määriteltiin mittarin mallityyppi ja RS-485 sarjaportin parametreiksi asetettiin samat arvot, kuin energiamittariin sekä mittarin Modbus-osoite, mihin yhdyskäytävä on yhteydessä. Kuvassa 4.4 on esitetty UCS-ohjelmiston ensimmäinen konfiguraatiovaihe, missä asetettiin RS-485 sarjaporttiliikenteen yhteysparametrit yhdyskäytävälle.



Kuva 4.4: Yhdyskäytävän ja mittarin välisen tietoliikenteen konfigurointi

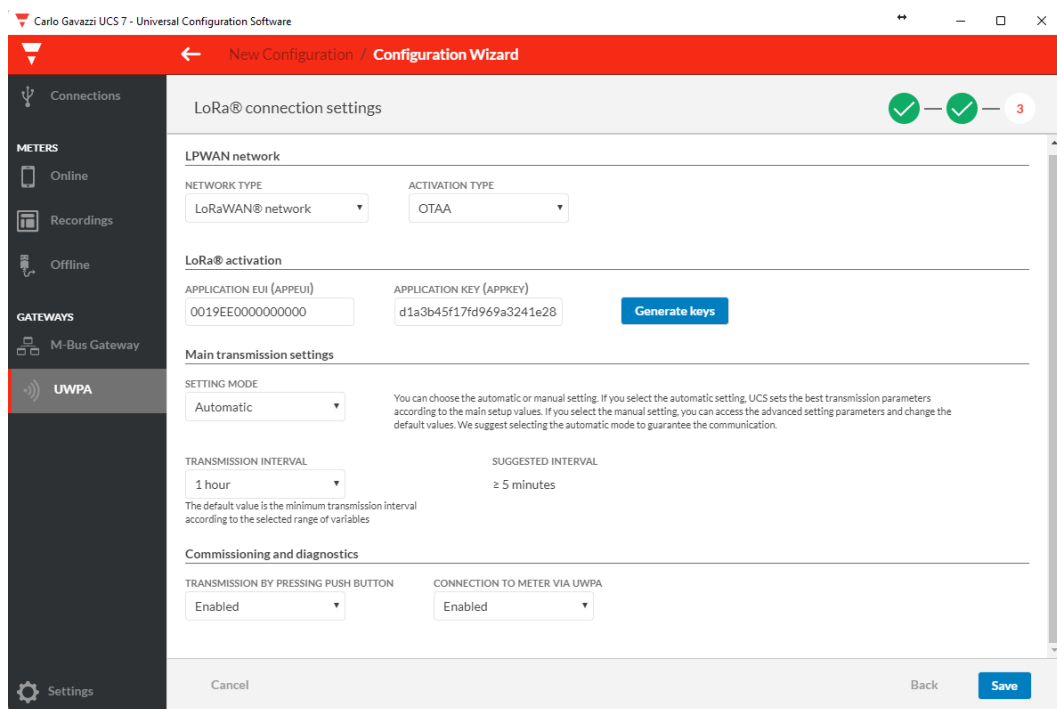
Konfiguraation seuraavassa vaiheessa määriteltiin mitä tietoa energiamittarilta yhdyskäytävän tulisi käsitellä ja lähettää LoRaWAN verkkoon. Käsiteltäväksi tiedoksi valittiin pelkästään kWh(+) TOTAL-tieto mittarilta, koska se mittaa sähkönkulutuksen kumulatiivista kulutuslukemaa. Lisäksi valittiin mukaan aikaleima, milloin mittaus on tapahtunut ja lähetetty verkkoon. UPWA-yhdyskäytävän keräämään ja lähettämään datapakettiin olisi ollut mahdollista liittää enemmänkin tietoa energiamittarin mittauslukemista, koska pelkästään aikaleiman sekä kWh kulutustieto vei ohjelman mukaan vain 3% tilaa varsinaisesta lähetettävästä datapaketesta. Muita lähetettäviä ja mitattavia suureita tai arvoja olisi ollut mm. Ampeerit (virta), Watit (teho) ja Voltit (jännite). Kuvassa 4.5 esitetty UCS-ohjelmiston toinen konfigurointivaihe, missä määriteltiin yhdyskäytävältä lähtevän datasanoman rakenne.



Kuva 4.5: Kerättävän mittausdatan ja lähetettävän datasanoman määrittely

Viimeisessä konfigurointivaiheessa määriteltiin yhdyskäytävän LoRAWAN asetukset ja kuinka yhdyskäytävä liittyy verkkoon. Yhdyskäytävä on mahdollista liittää kolmannen osapuolen LoRaWAN-verkkoihin tai Carlo Gavazzin UPWM tukiasemaan, joka välittää mittausdatan kolmannen osapuolen applikaatiopalveluihin. Verkon tyypiksi asetettiin LoRaWAN network, koska yhdyskäytävä haluttiin

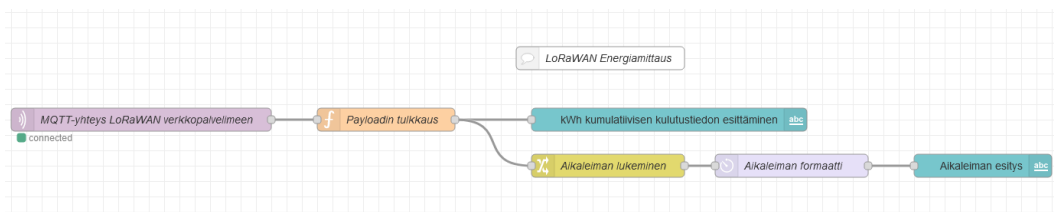
lisätä omaan yksityiseen LoRaWAN verkkoon. Aktivointitavaksi valittiin OTAA-aktivointi. Ohjelmisto generoi laitteelle OTAA-aktivointiavaimet. Aktivointiavaimet kopioitiin talteen, jotta laite saatiin myöhemmin liitettyä sekä aktivoitua ChirpStackin verkkoalustaan ja LoRAWAN-verkkoon. Lähetysväli asettiin aluksi 15 minuuttiin mutta se on myöhemmin tarkoitus muuttaa tunnin välein, koska sen tiheää seurantaväliä ei tarvita. Yhdyskäytävän lähetyasetukset asetettiin automaattiasetukselle. Automaattiasetus tarkoittaa, että päätelaite optimoi aina automaattisesti parhaan lähetyasetuksen käyttöön. Vaihtoehtoina olisi ollut myös manuaaliasetukset, joissa olisi voinut määrittellä yksityiskohtaisemmin lähetyasetuksia. Automaattiasetusten lisäksi diagnosointia varten otettiin käyttöön laitteen PUSH-painonapin toiminto, joka mahdollistaa manuaalisen datanlähetyksen yhdyskäytävältä painamalla laitteen PUSH-painiketta. Tämä voi tarvittaessa auttaa lähetysohjelmien diagnosoinnissa. Lopuksi asetukset vielä tallennettiin yhdyskäytävälle ohjelman kautta. Kuvassa 4.6 on esitetty konfiguraation viimeinen vaihe, missä määriteltiin yhdyskäytävän lähetyasetukset LoRaWAN-verkkoon.



Kuva 4.6: Yhdyskäytävän lähetyasetysten määrittely

### 4.3 Käyttöliittymä ja applikaatiopalvelin

Reaaliaikaisen dataseurannan visualisointi suoritettiin ensimmäisen sovelluspalvelimen Node-RED kehitysympäristössä. Visualisoinnin tarkoitus on muuttaa mittausdata ihmiselle luettavaan ja käsiteltävään muotoon. Kyseinen kehitysympäristö on suunniteltu matalan tason ohjelmointia varten. Sitä voidaan käyttää etenkin tapahtumapohjaisten ohjelmistojen luomiseen. Kehitysympäristö sisältää valmiit komponentit ohjelmointia sekä visuaalisen ilmeen luomista varten, joten sovelluksen rakentajalla ei välttämättä tarvitse olla syvää osaamista ohjelmoinnin osalta. Kehitysympäristöä voidaan käyttää myös kaupalliseen tarkoitukseen ja esimerkiksi kaupallinen Datacake IoT-verkkoalusta [27] on rakennettu Node-RED kehitysympäristön pohjalle. Kun verkkopalvelimen ChirpStack-verkkoalusta lähettää mittausdataa MQTT-protokollan kautta. Datanoma vastaanotetaan ja käsitellään Node-RED ympäristössä Javascript ohjelmointikielen ja HTML:n avulla visuaaliseen muotoon.

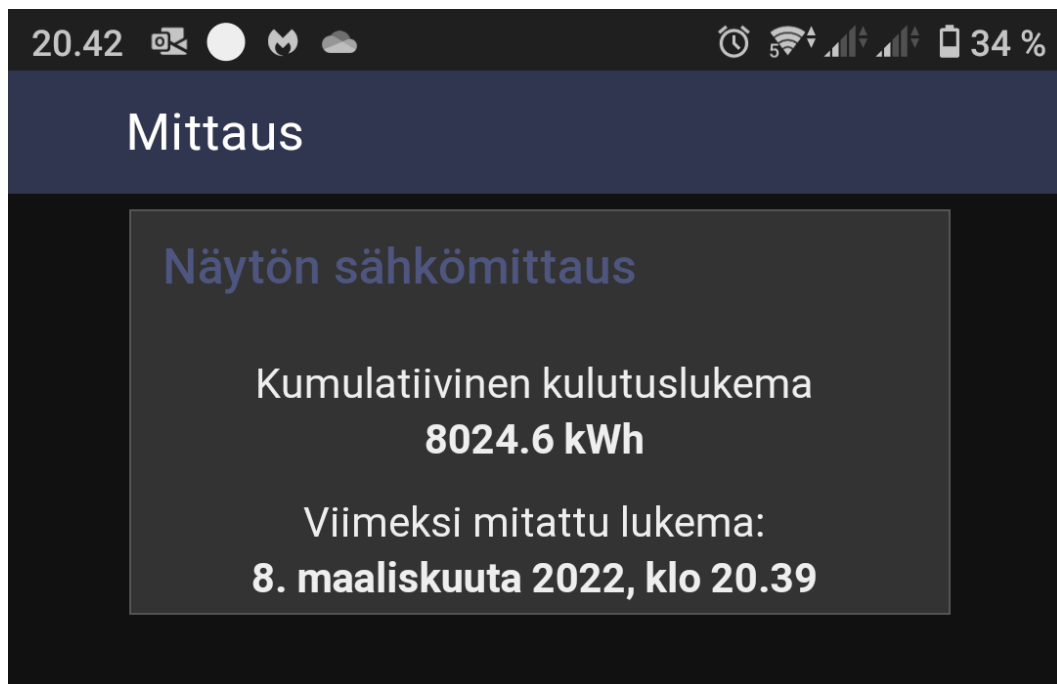


Kuva 4.7: Node-RED:in Back End tila ja vuonohjaus

Kehitysympäristössä on kaksi tilaa: ohjelmointi sekä UI-tila. Kuvassa 4.7 on esitetty ohjelmointitila, joka on sovelluksen Back End-tila ja sinne ohjelmoidaan datan käsittely ja datasanoman tulkkaus sekä tehdään ohjelmointipalikkoiden vuonohjaus. UI-tila toimii sovelluksen käyttöliittymänä eli Front End-tilana, missä data näkyy lopulta käyttäjälle visuaalisessa muodossa. Ohjelmoidun sovelluksen Front End-tila on esitetty kuvassa 4.8.

Sovelluksen toimintaperiaate on varsin yksinkertainen, sovelluksen ohjelmointitilassa käytännössä vuon ensimmäinen MQTT-ohjelmakomponentti vastaanottaa aina valitun anturin lähettämän mittausdatan verkkopalvelimelta. MQTT ohjaa vastaanotetun tiedon eteenpäin JavaScript funktio-komponentille, missä tehdään varsinainen datasanoman ohjelmallinen purkaminen ja tulkkaus. Funktio komponent-

ti lähettää tulkatun mittausdatan käyttöliittymän UI-tilan komponenteille, komponentit näyttävät kumulatiivisen kulutuslukeman sitten käyttöliittymässä käyttäjälle. Funktio komponentti lähettää myös samanaikaisesti käskyn Change-komponentille, että datasanoman aikaleima täytyy vielä formalisoida käyttöliittymää varten. Change komponentti vastaanottaa käskyn ja välittää sen eteenpäin Dateformat komponentille, joka muuttaa aikaleiman esitysformaattiin (pp.kk.vv,klo:HH:MM). Dateformat komponentti välittää muutetun aikaleiman sitten käyttöliittymälle.



Kuva 4.8: Node-RED-kehitysympäristössä ohjelmoitu sovellus

Node-RED:in kautta toteutettu sovellus oli varsin yksinkertainen. Tarkoituksena oli luoda suhteellisen reaaliaikainen visuaalinen kumulatiivisen lukeman seuranta. Verkkopalvelimelta tuleva mittausdata tallennetaan toiseen kolmannen osapuolen rakentamaan web-sovellukseen HTTPS-integraation kautta ja tämä applikaatiosovellus sijaitsee täysin eri palvelimella. Siellä mittausdata esitetään graafisesti palkkikaavion ja tuntikohtaisesti, joka antaa mittausta seuraavalle tarkemman käsityksen kulutuksen huipuista esimerkiksi tietyinä aikoina tai silloin, kun näyttö on pois päältä. Lähinnä Node-RED:in tarkoitus oli, että nopealla vilkaisulla nähdään mittarin kulutustilanne.

## 4.4 Toteutuksen arviointi

Verkon toteutus onnistui suunnitellusti ja pienillä kustannuksilla, mikä oli yksi toteutuksen tavoitteista. Verkon toteutus toi myös säästöä asennustöiden osalta, koska kohteeseen ei tarvinnut tehdä kaapelointeja langallista mittausta varten. Verkko oli suhteellisen helppo toteuttaa, kun oli varsin selkeät ohjeet verkon rakentamiseen ja käytännössä valmiit LoRaWAN verkkolaitteet, jotka lähinnä piti konfiguroida ja asentaa paikalleen. Verkkoalustan asennus ja käyttöönotto sujui ChirpStackin laatumien ohjeiden mukaisesti Linux-virtuaalipalvelimelle. Verkkoalustan asennusta osaltaan helpottivat myös ChirpStackin valmiit Docker asennuspaketit. Yhdyskäytävänä toiminut UPWA-laite, RAK 7249-tukiasema ja ChirpStack verkkoalusta osoittautuivat varsin toimivaksi ympäristöksi ainakin näin pienen mittakaavan verkon toteutusta varten.

Kokonaisuutena verkon toteutuksessa ei esiintynyt myöskään erityisiä ongelmia. Eniten ajallisesti aikaa meni virtuaalipalvelimen pystyttämiseen sekä datasanoman tulkkauksen ohjelmointiin sovelluspalvelimelle. Yllättävän paljon meni aikaa myös LoRaWAN laitteisiin tutustumiseen ja niiden konfigurointiin. Tämä johtui siitä, että laitteet eivät ennestään olleet tuttuja, joten tutustumiseen täytyi käyttää aikaa. Toisaalta laitteisiin tutustuminen perinpohjaisesti kannatti. Sillä tutustuminen laitteiston ominaisuuksiin edesauttoi siinä, ettei verkon toteutuksessa tullut ongelmia, jotka olisivat johtuneet mm. virheellisestä asennuksesta, konfiguraatiosta tai käytöstä.

Tukiaseman ja yhdyskäytävän RSSI signaalitaso on pysynyt tasaisesti noin -80 ja -94 dB:n välillä ja SNR arvo noin 8 ja 11dB:n tietämillä. LoRaWAN datasanoman koko on ollut 34 bittiä, joka jää reilusti alle SF12:n maksimi datasanoman pituudesta, eli käytännössä yhdyskäytävä kykenee lähettämään datasanoman myös SF12 tilassa. Yhdyskäytävä lähettää tällä hetkellä datasanoman 15 minuutin välein verkon suuntaan, mutta lähetysväli on tarkoitus muuttaa jatkossa tuntiin. Koska kyseessä on yksityinen LoRaWAN-verkko, niin datan lähetys syklinä noudatetaan ETSI:n sääntöjä. Yhdyskäytävän lähetystila on pysynyt SF12:ssa, joka ei ole hyvä lähetystila, koska tukiaseman ja yhdyskäytävän välinen matka on arviolta vain noin 130 metriä ja radiosignaalin RSSI-arvo on ollut kokoajan reilusti alle -100dB. Tukiaseman ja yhdyskäytävän välissä ei ole myöskään rakennuksia tai merkittäviä näköesteitä mitkä aiheuttaisivat huonon lähetystilan.

SF12 lähetystilaa käytetään lähinnä silloin, kun lähetysolosuhteet ovat huonot tai tukiasema on kauempana. Yhdyskäytävään aseteltiin UCS-ohjelmalla automaattiset lähetysasetukset, eli laitteen pitäisi kuitenkin osata automaattisesti optimoida paras lähetysasetus käyttämällä ADR-algoritmia. Korkealle SF12 arvolle löytyi kuitenkin selitys ja se näyttäisi johtuvan Chirpstackin ADR-asetuksista, koska ilman ADR-asetusta datasanoman lähetys SF7 tilassa onnistuu varsin hyvin. Verkkopalvelin käytännössä määrittelee ADR-algoritmilla optimaalisen lähetystilan ja asetukset yhdyskäytävälle. Ongelma on korjattavissa muuttamalla ChirpStackin oletus ADR-asetuksia optimaalisemmaksi. Toinen mahdollinen syy SF12 lähetystilalle voisi olla myös se, että lähetettävän datasanoman koko on 31 bittiä ja siksi datalähetys on optimoitu SF12:lle. Tässä yhdessä mittauksessa tuo ei ole iso ongelma, mutta jatkoa ajatellen on yksi selkeästi korjattava asia.

LoRaWAN verkon toimintasädetä mitattiin myös verkon testaukseen tarkoitetulla LoRa AN-106 testilaitteella[25]. Testilaitte ilmoittaa mm. signaalin voimakkuuden, vaimennuksen sekä kuinka monta pakettia tukiaseman ja testilaitteen välillä pystyi liikennöimään testauksen aikana. Optimaalisissa olosuhteissa ulkokuuluvuuden radiokantama saatiin riittämään, jopa noin 10 km päähän tukiasemasta vaikka testilaitteen ja tukiaseman välissä oli rakennuksia. Kuvissa 4.9 ja 4.10 näkyvät Downlink sekä Uplink testausvaiheet mittauksen aikana.



Kuva 4.9: Signaalitesteri testaamassa Downlink-sanoman onnistumista



Kuva 4.10: Signaalitesteri testaamassa Uplink-sanoman onnistumista

Käytännössä verkon todellinen ja vakaasti toimiva kantama alue on kuitenkin huomattavasti lyhempi (arviolta 3-5 km), etenkin kun kyseessä on taajama-alue mihin tukiasema ja sink-laite sijoitettiin. Tukiaseman sijainti ja nykyisen verkon kantama-alue antavat kuitenkin mahdollisuuden lisätä myös muita ulkotiloihin suunniteltuja päätelaitteita lähialueelle.

Sisäkuuluvuutta ei tässä tapauksessa testattu, koska ympäristö rakennettiin ulkotiloja ajatellen, mutta jos jatkossa nykyiseen verkkoon haluttaisiin lisätä sisätiloissa olevia päätelaitteita, niin se vaatisi vielä laajemman verkon ja rakennuksiin pitäisi sijoittaa oikeastaan sisäkäyttöön soveltuvia tukiasemia. Sisäkuuluvuus on usein haasteellinen toteuttaa, koska rakennusten rakenteet heikentävät radiosignaalia, siksi tukiasemat pitäisi olla sisätiloissa, jotta katvealueita ei tulisi. Tämä vaatisi myös tarkemman kartoituksen miten verkkoa pitäisi laajentaa, jotta peittoalue olisi mahdollisimman optimaalinen myös lähialueen rakennusten sisätiloissa. Verkon toteutuksen myötä LoRaWAN verkon rakenne tuli tutuksi ja se antoi kokemusta verkon rakentamisesta. Samalla saatiin tietoa, kuinka nykyistä verkkoa voitaisiin tulevaisuudessa laajentaa.



## 5 Yhteenveto

Tutkielma antoi mahdollisuuden tutustua LoRaWAN teknologiaan ja sen tuomiin mahdollisuuksiin. Varsinainen LoRaWAN-verkon toteuttaminen syvensi myös käsitystä teknologiasta ja antoi runsaasti kokemusta langattomista sensoriverkoista. Rakentamalla oma LoRaWAN verkko saatiin kartoitettua, kuinka LoRaWAN verkkoa voitaisiin hyödyntää jatkossa laajemmalti sähkömittauksen osalta. Tutkielman aikana laadittiin myös yksinkertainen ohjeistus ChirpStack-verkkoalustan konfigurointia varten. Ohje on tarkoitettu jättäjä käyttöön yleisohjeeksi jatkoa varten ja löytyy tutkielman liitteistä.

Teknologiana LoRaWAN oli mielenkiintoinen, koska se käyttää ISM-vapaita taajuuksia hyväkseen ja kyseessä on avoin protokolla, jota voidaan hyödyntää erilaisissa IoT ympäristöissä varsin kustannustehokkaasti. Teknologia tarjoaa myös yrityksille mahdollisuuden luoda teknologian ympärille uutta liiketoimintaa, koska teknologiaa voidaan käyttää eri käyttötarkoituksiin. Tämä mahdollistaa uusia palveluita ja sitä myötä palveluille laajempaa asiakaskuntaa. Teknologialla on myös mahdollista luoda maantieteellisesti laaja mutta yksinkertainen sekä kustannustehokas IoT-verkko. LoRaWAN:in suurin etu muihin LPWAN teknologioihin on ehdottomasti päätelaitteiden energiatehokkuus, joka tarjoaa päätelaitteelle vuosien toiminta-ajan. Toisena etuna on pitkä radiokantama, joka mahdollistaa päätelaitteen tiedonsiirron pitkien etäisyyksien päästä.

Teknologian ympärille on luotu valmiita kaupallisia sekä avoimia verkkoalustoja. Verkkoalustat mahdollistavat verkkoalustan käyttökohteen käyttötarkoituksesta riippuen joko julkisena tai yksityisenä verkkona. Verkkoalustojen avulla LoRaWAN päätelaitteiden data voidaan kerätä ja välittää esimerkiksi kolmannen osapuolen järjestelmiin. Jälkikäteen ajateltuna toteutetun verkon verkkoalustana olisi voinut toimia myös kaupallinen alusta eikä avoimen lähdekoodiin perustuva verkkoalusta kuten ChirpStack. Kaupallisen alustan etuina olisi ollut valmis verkkoalustaympäristö, päätelaitteille valmiit ajurit sekä palvelutuki erilaisissa ongelmatilanteissa.

Avoimen lähdekoodin verkkoalustan osalta vastaavaa palvelutukea verkkoalustan ylläpitoon sekä mahdollisiin ongelmatilanteiden ratkaisemiseen ei ole saatavilla. Tosin avoimen lähdekoodin alustan käyttäjäyhteisöltä voi saada apua ongelmien ratkaisuun. Avoimen lähdekoodin verkkoalustan ylläpitäjän täytyy lisäksi hankkia soveltuva palvelinympäristö verkkoalustaa varten. Tämä voi puolestaan nostaa verkon ylläpitokustannuksia verrattuna valmiiseen verkkoalustaan. Ominaisuuksiltaan ChirpStack on lähinnä verrattavissa The Things Network ja LORAIOT-alustoihin ja soveltuu parhaiten osaksi pienten tai keskisuurten LoRaWAN verkkojen verkkoalustaksi. Toteutuksen osalta voidaan todeta, että avoimen lähdekoodiin perustuva ChirpStack verkkoalusta sekä yksityinen LoRaWAN verkko soveltuvat varsin hyvin sensori mittaukseen. Nowak et al [65, s.12] esittävät myös, että LoRaWAN soveltuu energiamittareiden etälukemiseen varsin hyvin. Jatkoa ajatellen ja toteutuskohteesta poiketen energiamittarit sijaitsevat yleensä sisätiloissa.

Rakennuksen katolla sijaitseva tukiasema ei välttämättä olisi silloin paras ratkaisu, johtuen rakennuksen seinistä ja rakenteista jotka aiheuttavat tietyt haasteen sisäkuuluvuuteen. Käytännössä se vaatisi sisätiloihin soveltuvat tukiasemat, jotka olisivat lähempänä päätelaitteita. Valmiita LoRaWAN energiamittareita on markkinoilla, mutta ne ovat yleensä huomattavasti kalliimpia kuin perinteiset energiamittarit, joten niiden käyttäminen ei olisi välttämättä kovin kustannustehokasta. Kustannuksien laskemiseksi olisi mahdollista käyttää Modbus-gateway laitteita sink-laitteena kuten luvun 4 toteutuksessa oli tehty, eli Sink kommunikoi perinteisten energiamittareiden kanssa ja välittää datan eteenpäin LoRaWAN-verkkoon keskitetysti. Tällöin päätelaitteita tarvitsee hankkia huomattavasti vähemmän, joka osaltaan laskisi mittaushaasteen rakennus ja hankintakustannuksia.

Yksinkertaistamalla vielä toteutetun verkon rakennetta ylläpitokuluja olisi ollut mahdollista pienentää entisestään. Markkinoilla on myös tukiasemia, mihin on integroitu valmiiksi LoRaWAN-verkkoalusta. Tukiasemiin integroidut verkkoalustat pystyvät välittämään datan suoraan tiettyihin kolmannen osapuolen applikaatiopalveluihin tai rajapintoihin. Sisäänrakennetuissa verkkoalustoissa voi olla kuitenkin tiettyjä rajoitteita tai ne eivät ominaisuuksiltaan vastaa ChirpStackia tai muita kaupallisia verkkoalustoja. Yleisesti ottaen yhteenvetona voidaan todeta, että parhaiten LoRaWAN pohjainen langaton sensorimittaus soveltuu silloin, kun tarvitaan rakentaa yksinkertainen ja kustannustehokas langaton sensoriverkko, jonka

edellytyksenä on pitkä radiokantama tai silloin jos mittauskohteille on vaikea rakentaa erillisiä johdotuksia tai etäisyys sensorilaitteisiin on useita kilometrejä tai ne ovat maantieteellisesti hajallaan toisistaan. Silloin LoRaWAN voisi olla käytännöllinen ja kustannustehokas vaihtoehto etenkin, jos pystytään hyödyntämään jo olemassa olevaa LoRaWAN-verkkoa. Kustannustehokkuuden ja IoT-ympäristöön liitettävyyden ansiosta LoRaWAN teknologian ympärille on mahdollista myös luoda varsin monipuolisesti erilaisia kaupallisia palveluita.

## Lähteet

- [1] ACTILITY. Actility announces availability of its ThingPark Activation service on top of its multi-country peering hub ThingPark Exchange to enable global device manufacturers, note = URL <https://www.actility.com/actility-announces-availability-of-its-thingpark-activation-service-on-top-of-its-multi-country-peering-hub-thingpark-exchange-to-enable-global-device-manufacturers/>, viitattu 25.11.2021.
- [2] ACTILITY. Actility ThingPark Enterprise LRC-AS Tunnel Interface Developer Guide (LoRaWAN) , note = URL [https://docs.thingpark.com/thingpark-enterprise/6.1/Content/Resources/DocLibrary/TPE-6.1/TP\\_Enterprise\\_6.1-rev.7\\_LRC-AS%20Tunnel%20Interface%20Developer%20Guide\\_LoRaWAN.pdf](https://docs.thingpark.com/thingpark-enterprise/6.1/Content/Resources/DocLibrary/TPE-6.1/TP_Enterprise_6.1-rev.7_LRC-AS%20Tunnel%20Interface%20Developer%20Guide_LoRaWAN.pdf), viitattu 13.11.2021.
- [3] ACTILITY. Actility ThingPark Enterprise LRC-AS Tunnel Interface Developer Guide (LoRaWAN) , note = URL <https://www.actility.com/lorawan-devices-sensors-and-applications/>, viitattu 23.12.2021.
- [4] ACTILITY. Actility ThingPark Network Survey User Guide, note = URL <https://docs.thingpark.com/thingpark-wireless/6.1/Content/Resources/DocLibrary/TP-Network%20Survey%20User%20Guide-rev4.pdf>, viitattu 25.11.2021.
- [5] ACTILITY. Actility ThingPark X, note = URL <https://www.actility.com/iot-data-management-services/>, viitattu 25.11.2021.
- [6] ACTILITY. LoRaWAN Roaming Goes Global Thanks to Actilitys ThingPark Exchange, note = URL <https://www.actility.com/lorawan-roaming-goes-global-thanks-to-actilitys-thingpark-exchange/>, viitattu 25.11.2021.
- [7] ACTILITY. ThingPark Activation for device management, note = URL <https://www.actility.com/iot-device-activation/>, viitattu 25.11.2021.

- [8] ACTILITY. ThingPark FUOTA device update, note = URL <https://www.actility.com/iot-device-firmware-update-over-the-air/>, viitattu 25.11.2021.
- [9] ADELANTADO, F., VILAJOSANA, X., TUSET-PEIRO, P., MARTINEZ, B., MELIÀ-SEGÚI, J., JA WATTEYNE, T. Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine* 55 (06 2017).
- [10] ALLIANCE, L. About LoRa Alliance. URL <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance/>, viitattu 23.10.2021.
- [11] BATTLE, S., JA GASTER, B. Lorawan bristol. Julkaisusarjassa *Proceedings of the 21st international database engineering & applications symposium* (2017), 287–290.
- [12] BOUGUERA, T., DIOURIS, J.-F., CHAILLOUT, J.-J., JAOUADI, R., JA ANDRIEUX, G. Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN. *Sensors* 18, 7 (2018).
- [13] BOURAS, C., GKAMAS, A., KOKKINOS, V., JA PAPACHRISTOS, N. Real-Time Geolocation Approach through LoRa on Internet of Things. Julkaisusarjassa *2021 International Conference on Information Networking (ICOIN)* (2021), 186–191.
- [14] BRAVO, J., FERNANDEZ-LOZANO, J., SERÓN, J., GOMEZ-RUIZ, J., JA GARCIA, A. Development and Implementation of a Hybrid Wireless Sensor Network of Low Power and Long Range for Urban Environments. *Sensors* 21 (01 2021), 567.
- [15] BUTUN, I., PEREIRA, N., JA GIDLUND, M. Analysis of LoRaWAN v1. 1 security. Julkaisusarjassa *Proceedings of the 4th ACM MobiHoc Workshop on Experiences with the Design and Implementation of Smart Objects* (2018), 1–6.
- [16] BUTUN, I., PEREIRA, N., JA GIDLUND, M. Security risk analysis of LoRaWAN and future directions. *Future Internet* 11, 1 (2019), 3.
- [17] CASALS, L., MIR, B., VIDAL, R., JA GOMEZ, C. Modeling the Energy Performance of LoRaWAN. *Sensors* 17, 10 (2017).
- [18] CHEONG, P. S., BERGS, J., HAWINKEL, C., JA FAMAHEY, J. Comparison of LoRaWAN classes and their power consumption. Julkaisusarjassa *2017 IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT)* (2017), 1–6.

- [19] CHIRPSTACK. Introduction ChirpStack Application Server. URL <https://www.chirpstack.io/application-server/>, viitattu 19.12.2021.
- [20] CHIRPSTACK. Introduction ChirpStack Gateway Bridge. URL <https://www.chirpstack.io/gateway-bridge/>, viitattu 19.12.2021.
- [21] CHIRPSTACK. Introduction ChirpStack Network Server. URL <https://www.chirpstack.io/network-server/>, viitattu 19.12.2021.
- [22] CHIRPSTACK. Rename to ChirpStack announcement. URL <https://forum.chirpstack.io/t/rename-to-chirpstack-announcement/6473>, viitattu 22.12.2021.
- [23] CHIRPSTACK. Service profile. URL <https://www.chirpstack.io/network-server/features/service-profile/>, viitattu 19.12.2021.
- [24] CHOI, W., CHANG, Y.-S., JUNG, Y., JA SONG, J. Low-Power LoRa signal-based outdoor positioning using fingerprint Algorithm. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7, 11 (2018), 440.
- [25] CO, S. W. T. AN-106 LoRa tester. URL <https://www.iot-shops.com/wp-content/uploads/2020/04/AN-106-LoRa-tester-specification-sheet-V1.4.pdf>, viitattu 9.3.2022.
- [26] CODELUPPI, G., CILFONE, A., DAVOLI, L., JA FERRARI, G. LoRaFarM: A LoRaWAN-based smart farming modular IoT architecture. *Sensors* 20, 7 (2020), 2028.
- [27] DATACAKE. Turn any LoRaWAN Device into an End-To-End Solution. URL <https://datacake.co/lorawan/>, viitattu 2.2.2022.
- [28] DAVCEV, D., MITRESKI, K., TRAJKOVIC, S., NIKOLOVSKI, V., JA KOTELI, N. IoT agriculture system based on LoRaWAN. *Julkaisusarjassa 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)* (2018), 1–4.
- [29] DE CARVALHO SILVA, J., RODRIGUES, J. J. P. C., ALBERTI, A. M., SOLIC, P., JA AQUINO, A. L. L. LoRaWAN A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities. *Julkaisusarjassa 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)* (2017), 1–6.

- [30] DRAGINO. LoRaWAN Temperature & Humidity Sensor , note = URL [https://www.dragino.com/downloads/downloads/LHT65/Datasheet\\_LHT65\\_LoRaWAN\\_Temperature\\_Humidity\\_Sensor.pdf](https://www.dragino.com/downloads/downloads/LHT65/Datasheet_LHT65_LoRaWAN_Temperature_Humidity_Sensor.pdf), viitattu 5.5.2022.
- [31] ERTÜRK, M. A., AYDIN, M. A., BÜYÜKAKKAŞLAR, M. T., JA EVIRGEN, H. A survey on LoRaWAN architecture, protocol and technologies. *Future Internet* 11, 10 (2019), 216.
- [32] FARGAS, B. C., JA PETERSEN, M. N. GPS-free geolocation using LoRa in low-power WANs. *Julkaisusarjassa 2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS)* (2017), 1–6.
- [33] GADDAM, S. C., JA RAI, M. K. A comparative study on various LPWAN and cellular communication technologies for IoT based smart applications. *Julkaisusarjassa 2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations In Engineering And Technological Research (ICETIETR)* (2018), IEEE, 1–8.
- [34] GARLISI, D., MARTINO, A., ZOUWAYHED, J., POURRAHIM, R., JA CUOMO, F. Exploratory approach for network behavior clustering in LoRaWAN. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* (2021), 1–15.
- [35] GAVAZZI, C. EM300 Series and ET300 Series COMMUNICATION PROTOCOL. URL <https://www.sahkonumerot.fi/6706043/id/543580/doc/installationinstruction/>, viitattu 2.2.2022.
- [36] GAVAZZI, C. Energian hallinta: Energiamittari Malli EM340. URL <https://www.sahkonumerot.fi/6706043/id/543580/doc/technicalinfodoc/>, viitattu 2.2.2022.
- [37] GAVAZZI, C. White Paper Long-range wireless metering: our solutions for public and private networks. URL <http://www.productselection.net/Pdf/UK/UWP-A-M-Whitepaper.pdf>, viitattu 2.2.2022.
- [38] HAN, J., JA WANG, J. An enhanced key management scheme for LoRaWAN. *Cryptography* 2, 4 (2018), 34.
- [39] HAXHIBEQIRI, J., DE POORTER, E., MOERMAN, I., JA HOEBEKE, J. A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application. *Sensors* 18, 11 (2018), 3995.

- [40] INDUSTRIES, T. T. Deployment options. URL <https://www.thethingsindustries.com/deployment/>, viitattu 2.2.2022.
- [41] KERLINK. Wanesy™ Device Management. URL [https://www.kerlink.com/wp-content/uploads/2020/05/Commercial\\_Leaflet\\_Wanesy\\_Device\\_Management.pdf](https://www.kerlink.com/wp-content/uploads/2020/05/Commercial_Leaflet_Wanesy_Device_Management.pdf), viitattu 10.12.2021.
- [42] KERLINK. Wanesy™ Geolocation. URL [https://www.kerlink.com/wp-content/uploads/2020/05/Commercial\\_Leaflet\\_Wanesy\\_Geolocation.pdf](https://www.kerlink.com/wp-content/uploads/2020/05/Commercial_Leaflet_Wanesy_Geolocation.pdf), viitattu 10.12.2021.
- [43] KERLINK. Wanesy™ Management Center. URL [https://www.kerlink.com/wp-content/uploads/2019/04/Leaflet\\_Wanesy\\_Management\\_center\\_April19.pdf](https://www.kerlink.com/wp-content/uploads/2019/04/Leaflet_Wanesy_Management_center_April19.pdf), viitattu 10.12.2021.
- [44] KERLINK. Wanesy™ SPN (Small Private Network). URL [https://www.kerlink.com/wp-content/uploads/2020/04/Commercial\\_leaflet\\_Wanesy\\_SPN\\_V2.5-1.pdf](https://www.kerlink.com/wp-content/uploads/2020/04/Commercial_leaflet_Wanesy_SPN_V2.5-1.pdf), viitattu 10.12.2021.
- [45] KHALIFEH, A., ALDAHDOUH, K. A., DARABKH, K. A., JA AL-SIT, W. A Survey of 5G Emerging Wireless Technologies Featuring LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT and LTE-M. *Julkaisusarjassa 2019 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET)* (2019), 561–566.
- [46] KIM, J., JA SONG, J. A dual key-based activation scheme for secure LoRaWAN. *Wireless Communications and Mobile Computing 2017* (2017).
- [47] KIM, S., LEE, H., JA JEON, S. An adaptive spreading factor selection scheme for a single channel LoRa modem. *Sensors 20*, 4 (2020), 1008.
- [48] KUFAKUNESU, R., HANCKE, G. P., JA ABU-MAHFOUZ, A. M. A survey on adaptive data rate optimization in lorawan: Recent solutions and major challenges. *Sensors 20*, 18 (2020), 5044.
- [49] KUNTKE, F., ROMANENKO, V., LINSNER, S., STEINBRINK, E., JA REUTER, C. LoRaWAN security issues and mitigation options by the example of agricultural IoT scenarios. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* (2022), e4452.



- [50] LAVRIC, A., JA PETRARIU, A. I. LoRaWAN communication protocol: The new era of IoT. *Julkaisusarjassa 2018 International Conference on Development and Application Systems (DAS) (2018)*, 74–77.
- [51] LAVRIC, A., JA POPA, V. Performance evaluation of LoRaWAN communication scalability in large-scale wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing 2018 (2018)*.
- [52] LIANDO, J. C., GAMAGE, A., TENGOURTIUS, A. W., JA LI, M. Known and unknown facts of LoRa: Experiences from a large-scale measurement study. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN) 15, 2 (2019)*, 1–35.
- [53] LIU, J., GAO, J., JHA, S., JA HU, W. Seirios: leveraging multiple channels for LoRaWAN indoor and outdoor localization. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 27th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (2021)*, 656–669.
- [54] LIYA, M., JA ARJUN, D. A Survey of LPWAN Technology in Agricultural Field. *Julkaisusarjassa 2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC) (2020)*, 313–317.
- [55] LORA ALLIANCE. ThingPark Enterprise. URL [https://www.actility.com/wp-content/uploads/2021/02/TPE-Data-sheet\\_12.pdf](https://www.actility.com/wp-content/uploads/2021/02/TPE-Data-sheet_12.pdf), viitattu 15.11.2021.
- [56] LORA ALLIANCE. ThingPark Wireless: IoT network platform for operators. URL <https://www.actility.com/public-iot-connectivity-solutions/>, viitattu 15.11.2021.
- [57] LORA ALLIANCE, INC. LoRaWAN 1.0.3 Regional Parameters. URL [https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan\\_regional\\_parameters\\_v1.0.3rev0.pdf](https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan_regional_parameters_v1.0.3rev0.pdf), viitattu 3.4.2022.
- [58] LORA ALLIANCE TECHNICAL COMMITTEE. LoRaWAN 1.1 Specification. URL [https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm\\_specification\\_v1.1.pdf](https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm_specification_v1.1.pdf), viitattu 31.07.2021.
- [59] LORAIOT. Lorient Network Server. URL <https://www.loriot.io/index.html#loriot-network-server>, viitattu 18.12.2021.

- [60] LORAIOT. LORIoT Network Server - Private Server. URL <https://www.loriot.io/download/LORIoT%20Private%20Network%20Server.pdf>, viitattu 18.12.2021.
- [61] LORAIOT. LORIoT Network Server - Product Features. URL <https://www.loriot.io/download/LORIoT%20Network%20Server%20-%20Product%20Features.pdf>, viitattu 18.12.2021.
- [62] LORAIOT. LORIoT Network Server - Professional Public Server. URL [https://www.loriot.io/assets/downloads/Professional%20Public%20Server%20\\_%20features.pdf](https://www.loriot.io/assets/downloads/Professional%20Public%20Server%20_%20features.pdf), viitattu 18.12.2021.
- [63] MANZONI, P., CALAFATE, C. T., CANO, J.-C., JA HERNÁNDEZ-ORALLO, E. Indoor vehicles geolocalization using LoRaWAN. *Future Internet* 11, 6 (2019), 124.
- [64] NOURA, H., HATOUM, T., SALMAN, O., YAACOUB, J.-P., JA CHEHAB, A. LoRaWAN Security Survey: Issues, Threats and Possible Mitigation Techniques. *Internet of Things* (2020), 100303.
- [65] NOWAK, M., DERBIS, P., KUROWSKI, K., RÓŻYCKI, R., JA WALIGÓRA, G. LPWAN Networks for Energy Meters Reading and Monitoring Power Supply Network in Intelligent Buildings. *Energies* 14, 23 (2021), 7924.
- [66] PAOLINI, C., ADIGAL, H., JA SARKAR, M. Upper Bound on LoRa Smart Metering Uplink Rate. *Julkaisusarjassa 2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)* (2020), 1–4.
- [67] PASTÓRIO, A. F., JA DE CAMARGO, E. T. Geolocation Techniques in LoRaWAN Networks as a Fault Tolerance Approach in GPS-Based Tracking Devices. *Julkaisusarjassa 2021 Third South American Colloquium on Visible Light Communications (SACVLC)* (2021), IEEE, 01–06.
- [68] PENSIERI, S., VITI, F., MOSER, G., SERPICO, S. B., MAGGIOLO, L., PASTORINO, M., SOLARNA, D., CAMBIASO, A., CARRARO, C., DEGANO, C., ET AL. Evaluating LoRaWAN Connectivity in a Marine Scenario. *Journal of Marine Science and Engineering* 9, 11 (2021), 1218.

- [69] PETAJAJARVI, J., MIKHAYLOV, K., ROIVAINEN, A., HANNINEN, T., JA PETTISSALO, M. On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. *Julkaisusarjassa 2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)* (2015), 55–59.
- [70] RAKWIRELESS. RAK7249 WisGate Edge Max Datasheet. URL <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7249/Datasheet/#specifications>, viitattu 7.3.2022.
- [71] RAMA, Y., JA ÖZPMAR, M. A. A Comparison of Long-Range Licensed and Unlicensed LPWAN Technologies According to Their Geolocation Services and Commercial Opportunities. *Julkaisusarjassa 2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)* (2018), 398–403.
- [72] RON, D., LEE, C.-J., LEE, K., CHOI, H.-H., JA LEE, J.-R. Performance Analysis and Optimization of Downlink Transmission in LoRaWAN Class B Mode. *IEEE Internet of Things Journal* 7, 8 (2020), 7836–7847.
- [73] SAELENS, M., HOEBEKE, J., SHAHID, A., JA POORTER, E. D. Impact of EU duty cycle and transmission power limitations for sub-GHz LPWAN SRDs: An overview and future challenges. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2019, 1 (2019), 1–32.
- [74] SEMTECH. A Brief History of LoRa®: Three Inventors Share Their Personal Story at The Things Conference. URL <https://blog.semtech.com/a-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference>, viitattu 31.07.2021.
- [75] SOURCE, A. O. The Top 349 Lorawan Open Source Projects on Github. URL <https://awesomeopensource.com/projects/lorawan>, viitattu 19.12.2021.
- [76] SWALES, A., ET AL. Open modbus/tcp specification. *Schneider Electric* 29 (1999), 3–19.
- [77] TABAA, M., CHOURI, B., SAADAOU, S., JA ALAMI, K. Industrial communication based on modbus and node-RED. *Procedia computer science* 130 (2018), 583–588.
- [78] THE THINGS INDUSTRIES. Select products to purchase. URL <https://accounts.thethingsindustries.com/fee-calculator>, viitattu 24.04.2022.

- [79] THOMAS, A., JA ELDHOSE, N. Lorawan Scalability Analysis–Co Spreading Factor Interference. *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC) Vol 12* (2020).
- [80] THOMAS, G. Introduction to Modbus Serial and Modbus TCP. *The Extension 9*, 5 (2008), 1–4.
- [81] THOMAS, G. Introduction to the modbus protocol. *The Extension 9*, 4 (2008), 1–4.
- [82] VANGELISTA, L., JA CENTENARO, M. Worldwide connectivity for the internet of things through LoRaWAN. *Future Internet 11*, 3 (2019), 57.
- [83] VEJLGAARD, B., LAURIDSEN, M., NGUYEN, H., KOVÁCS, I. Z., MOGENSEN, P., JA SORENSEN, M. Interference impact on coverage and capacity for low power wide area IoT networks. *Julkaisusarjassa 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (2017), IEEE, 1–6.
- [84] WU, Y., HE, Y., JA SHI, L. Energy-Saving Measurement in LoRaWAN-Based Wireless Sensor Networks by Using Compressed Sensing. *IEEE Access 8* (2020), 49477–49486.
- [85] XU, Z., JA NI, J. A Study on Key LPWAN Technologies. *Journal of Physics: Conference Series 1871* (04 2021), 012011.
- [86] YOU, I., KWON, S., CHOUDHARY, G., SHARMA, V., JA SEO, J. T. An enhanced LoRaWAN security protocol for privacy preservation in IoT with a case study on a smart factory-enabled parking system. *Sensors 18*, 6 (2018), 1888.
- [87] ZYRIANOFF, I., HEIDEKER, A., SILVA, D., KLEINSCHMIDT, J., SOININEN, J.-P., SALMON CINOTTI, T., JA KAMIENSKI, C. Architecting and Deploying IoT Smart Applications: A PerformanceOriented Approach. *Sensors 20*, 1 (2020).

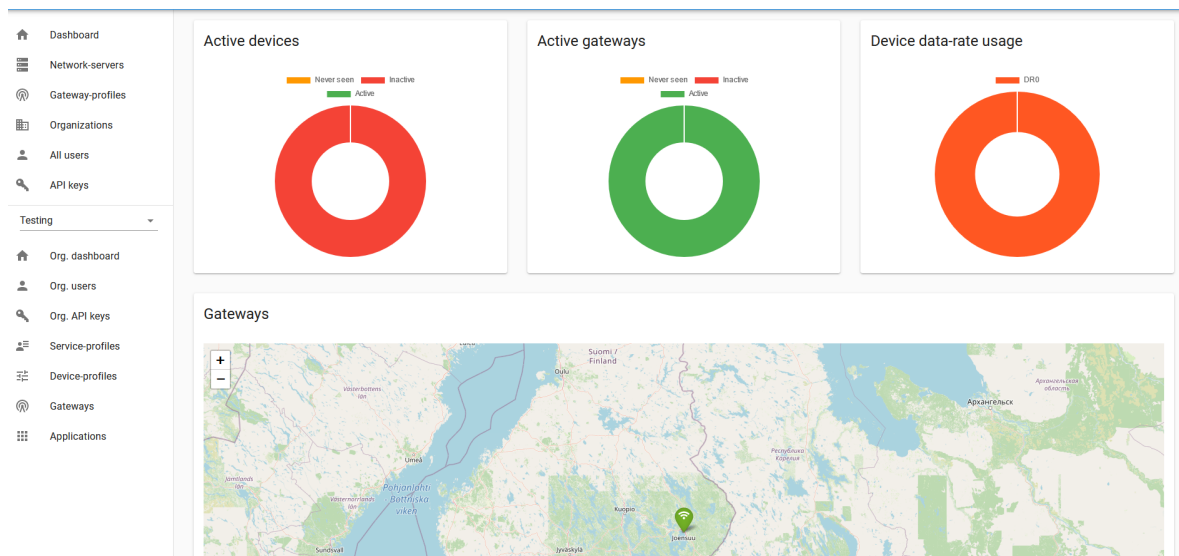
## A ChirpStack-verkkoalustan konfigurointi

ChirpStackin asennuksen jälkeen täytyy määritellä palomuurisäännöt virtuaalipalvelimelle, koska ChirpStack verkkoalusta vaatii tietyt portit auki tietoliikennekommunikaatiota varten. Palomuurisääntöjä joutuu konfiguroimaan myös konesalin rautapalomuuuriin, mutta siitä huolehtii yleensä konesalin ylläpitäjä. Porttien numerot voidaan myös tarvittaessa vaihtaa ChirpStackin konfiguraation tiedostoista. Porttien vaihtamisella saadaan hieman lisättyä palvelimelle tietoturvallisuutta, ettei käytetä yleisesti tunnettuja portteja. Taulukossa A.1 on esitetty ChirpStackin oletusportit ja avattavat palomuuriportit, jos oletusportteja käytetään.

Porteissa toimivat palvelut	Portin numero
Yhteysportti tukiasemien tietoliikennettä varten	1700
MQTT-protokolla tiedonvälitystä varten	1883
ChirpStackin hallintasivu	8080
ChirpStackin API-rajapinta	8001

Taulukko A.1: Virtuaalipalvelimen UFW-palomuurisäännöt

ChirpStack-verkkoalusta täytyy konfiguroida heti palomuurisääntöjen ka asennuksen jälkeen, jotta verkkoalusta pystyy hallinnoimaan verkon laitteita. Konfigurointi tapahtuu kirjautumalla ChirpStackin web-pohjaiseen hallintasuustoon. Sivusto sijaitsee asennuksen jälkeen oletuksena osoitteessa *https://palvelimen-ip-osoite tai domainin osoite: ja ChirpStackin hallintaportti*. Asennuksessa oletus hallintaportiksi oli määritelty 8080. Kirjautumisen jälkeen avautui aloitusnäky, mistä löytyivät LoRaWAN-verkkopalvelimen toimintoasetusten määrittelyt. Tärkeimmät konfiguroitavat asetukset olivat hallinta-asetukset ja profiiliasetukset.



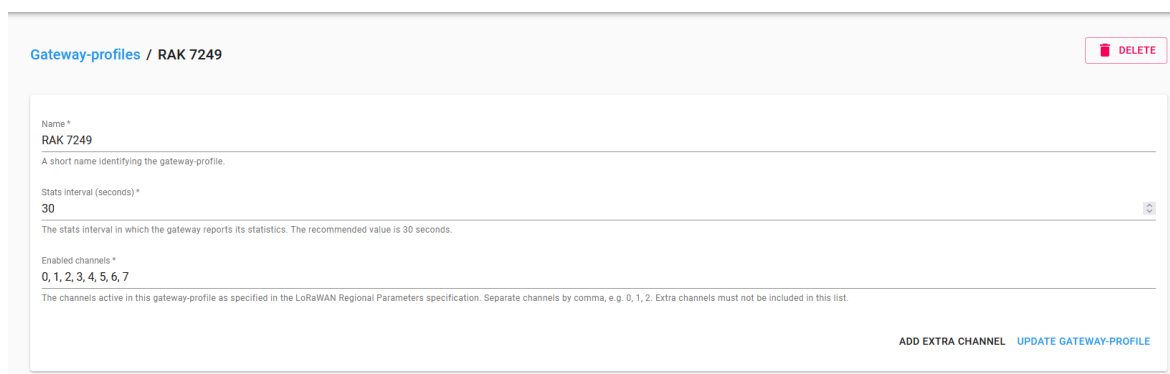
Kuva A.1: ChirpStackin valikot ja aloitusnäkyä kirjautumisen jälkeen

Dashboard-näkymästä näkyy, kuinka monta päätelaitetta tai tukiasemaa on aktiivisena sekä tilastotietoa verkon laitteista. Tilastojen alla olevasta kartasta verkon ylläpitäjä voi tarkastaa, missä tukiasemat maantieteellisesti sijaitsevat. Tukiasemalle määritellään koordinaattitiedot, jotta ChirpStackin sisäinen geolokaatio pystyy tulkitsemaan tukiaseman sijainnin ja näyttämään sen kartalla. Hallintasivulla näkyvä kartta toimii OpenStreetMAP karttapalvelun kautta. Kysessä on ilmainen ja avoin karttapalvelu. Hallintasivuston vasemmassa reunassa sijaitsevat asetusvalikot. Aloitusvalikoista organisaation pääkäyttäjällä voi määritellä verkkopalvelimen tukiasemien ja päätelaitteiden liittymiseen sekä rajapinta ja integraatioasetuksia. Kuvassa A.1 esitetty Dashboard-näkymä.

Määriteltäessä ChirpStackia ensi kertaa sille asetellaan Network Servers asetusvalikossa: LoRaWAN verkkopalvelimen nimi, IP-osoite tai domain osoite ja portti. Network servers asetusvalikon kautta voidaan määritellä tai linkittää myös ulkopuolisia LoRaWAN verkkopalvelimia, eli palvelimia voi olla enemmän kuin yksi.. Network Servers-asetusvalikossa voidaan määritellä myös verkkopalvelimelle TLS/CA-sertifikaatit tietoturvaa varten. Valikon Gateway discovery-välilehdeltä voitiin määritellä myös kuinka usein verkkopalvelin lähettää PING-kyselyn yhteyskäytävälle, näin varmistetaan tukiaseman löytyminen verkossa. Verkosta kadonnut tukiasema näkyy hallintasivulla ei aktiivisena laitteena.

Ulkopuolisten verkkopalvelimien lukumäärää ei ole rajoitettu, mutta lisätty ulkopuolinen verkkopalvelin olisi oltava myös ChirpStack-verkkopalvelin, jotta kommunikointi onnistuisi samanlaisen verkkoalustan kanssa.

Seuraavaksi tukiasemalle luodaan yhteysprofiiliasetukset. Profiiliasetuksilla voidaan määritellä tukiasemalle sopivat LoRa modulaatio parametrit. Määriteltäviä asetuksia ovat: profiilin nimi, kuinka usein tukiasema välittää tilastotietoa verkkopalvelimelle ja kuinka monta LoRaWAN kanavaa tukiasemassa käytetään. Jokaiselle tukiasemalle laitevalmistajalle on mahdollista luoda erikseen oma tukiasemaprofiili. Yhteysprofiilin asetuksilla on todella suuri merkitys siinä kuinka verkko osaa hyödyntää ISM-taajuuksien kanavia. Tukiaseman profiiliasetusten määrittäminen esitetty kuvassa A.2.



Gateway-profiles / RAK 7249 DELETE

Name\*  
RAK 7249  
A short name identifying the gateway-profile.

Stats interval (seconds)\*  
30  
The stats interval in which the gateway reports its statistics. The recommended value is 30 seconds.

Enabled channels\*  
0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7  
The channels active in this gateway-profile as specified in the LoRaWAN Regional Parameters specification. Separate channels by comma, e.g. 0, 1, 2. Extra channels must not be included in this list.

[ADD EXTRA CHANNEL](#) [UPDATE GATEWAY-PROFILE](#)

Kuva A.2: Tukiasemaprofiilin määrittäminen

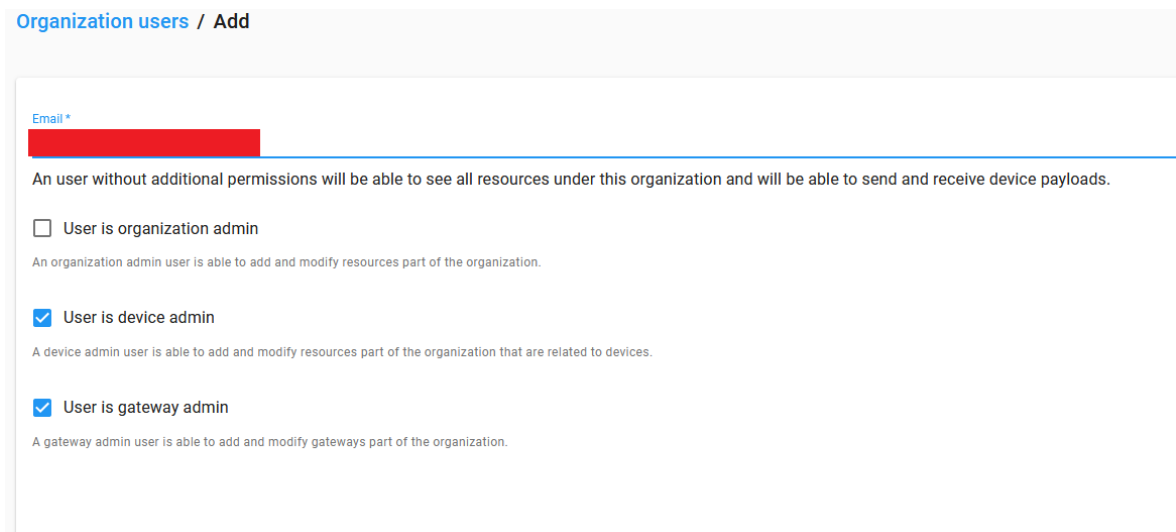
Verkkopalvelimen ja tukiasemien profiiliasetusten jälkeen määritellään organisaatiot, jotka käyttävät verkkopalvelinta. Organisaatioiden ryhmittelyllä hallitaan verkon käyttöoikeuksia. Se mahdollistaa myös LoRaWAN verkon omistajalle palvelun vuokrauksen eri organisaatioille. Tietyille organisaatioille voidaan antaa oikeuksia lisätä tukiasemia tai, kuinka monta tukiasemaa ja päätelaitetta organisaatio voi lisätä verkkoon.

All users-asetusvalikon kautta määritellään, onko käyttäjätili järjestelmän pääkäyttäjä vai peruskäyttäjätili. Käyttäjätunnus pitää olla email-osoite ja tilille täytyi antaa salasana. Salasanan pystyy laatimaan itse eikä siihen vaadita erikseen kompleksista salasanaa.

Organisaation sisällä voidaan määritellä myös käyttäjätilejä ja antaa vielä tunnuksille erillisiä käyttöoikeuksia organisaation sisällä. Käyttäjätilit pitää aluksi kuitenkin luoda All users-asetusvalikon kautta. Tämän pystyy usein tekemään vain verkon omistaja. Asetettavat oikeudet vaikuttavat organisaation alla olevien verkkonlaitteiden ja määritysten hallintaan. Organisaation käyttäjälle käyttäjäoikeustasoja on käytännössä kolme. Kuvassa A.3 esitetty organisaation käyttäjän lisäys.

- Organisaation pääkäyttäjä  
On kaikki oikeudet luodun organisaation sisällä, mutta organisaation ulkopuolella pääkäyttäjällä ei ole oikeuksia tehdä muutoksia kuin siinä tapauksessa, jos käyttäjä on jo määritelty järjestelmän pääkäyttäjäksi.
- Organisaation päätelaitteiden ylläpitäjä  
On vain oikeus lisätä tai muokata organisaation käytössä olevia päätelaitteita.
- Organisaation tukiasemien ylläpitäjä  
On vain oikeus lisätä tai muokata organisaation käytössä olevia tukiasemia.

Käyttäjäoikeus tasoja voidaan kuitenkin yhdistellä ja käyttäjä voi olla yhtä aikaa päätelaitteiden sekä tukiasemien ylläpitäjä. Luodulle käyttäjälle annettiin tässä tapauksessa suoraan organisaation pääkäyttäjän oikeudet.



Organization users / Add

Email \*

An user without additional permissions will be able to see all resources under this organization and will be able to send and receive device payloads.

User is organization admin  
An organization admin user is able to add and modify resources part of the organization.

User is device admin  
A device admin user is able to add and modify resources part of the organization that are related to devices.

User is gateway admin  
A gateway admin user is able to add and modify gateways part of the organization.

Kuva A.3: Organisaation käyttäjätunnusten luominen



Service profile-asetusten kautta verkkopalvelimelle luodaan oma palveluprofiili. Profiilissa määritellään käytettävät palvelut. Profiilissa voidaan ottaa käyttöön verkon geolokaatiopalvelut sekä asettaa verkkopalvelin lähettämään tukiaseman meta-tiedot eteenpäin applikaatiopalvelimelle. Palveluprofiilin asetusten kautta voidaan määrittellä myös verkon minimi ja maksimi datanopeudet. Luotaessa uutta palveluprofiilia on mahdollista asettaa kaikki tämän palveluprofiilin alla olevat tukiasemat privaateiksi. Kyseinen toiminnallisuus mahdollistaa privaatin verkon luomisen ja silloin palveluprofiilin alla olevat tukiasemat ja päätelaitteet muuttuvat täysin privaateiksi ja ovat vain tämän palveluprofiilin käytettävissä.

Device-profiles / Carlo\_UWP

GENERAL	JOIN (OTAA / ABP)	CLASS-B	CLASS-C	CODEC
Device-profile name *				
Carlo_UWP				
A name to identify the device-profile.				
LoRaWAN MAC version *				
1.0.3				
The LoRaWAN MAC version supported by the device.				
LoRaWAN Regional Parameters revision *				
A				
Revision of the Regional Parameters specification supported by the device.				
Max EIRP *				
0				
Maximum EIRP supported by the device.				
Uplink interval (seconds) *				
10				
The expected interval in seconds in which the device sends uplink messages. This is used to determine if a device is active or inactive.				

Kuva A.4: ChirpStackin laiteprofiilin määrittäminen

Jokaiselle päätelaitemallille luodaan yksilöity laiteprofiili, tämä tapahtuu Device profiili-asetusten kautta. Laitajuri jota voidaan käyttää myöhemmässä vaiheessa, kun tarkoitus on lisätä saman valmistajan tuote tai tuoteperheen päätelaitteita verkkoon. Device profiilissa määritellään laitteelle mihin laiteluokkaan se kuuluu ja mitä LoRaWAN spesifikaatiota sen pitäisi käyttää. Laiteprofiilissa määritellään myös mi-

tä aktivointitapaa kyseinen laitemalli käyttää. Laite profiiliasetuksiin voidaan määrittellä myös, kuinka laitteen lähettämä datasanoma tulkitaan suoraan applikaatiopalvelimelle tai kolmannen osapuolen järjestelmiin. Datasanoma voidaan myös tulkita verkkopalvelimella jo valmiiksi ihmiselle luettavaan muotoon. Tämä tapahtuu Codecs-välilehdellä. Tulkkaukseen voidaan käyttää Javascript ohjelmointikieltä tai Caynneen LPP-formaattia tai jättää datasanoma kokonaan tulkkkaamatta ja välittää se eteenpäin "raakadata-formaatissa". Laiteprofiilin asettaminen esitetty kuvassa A.4

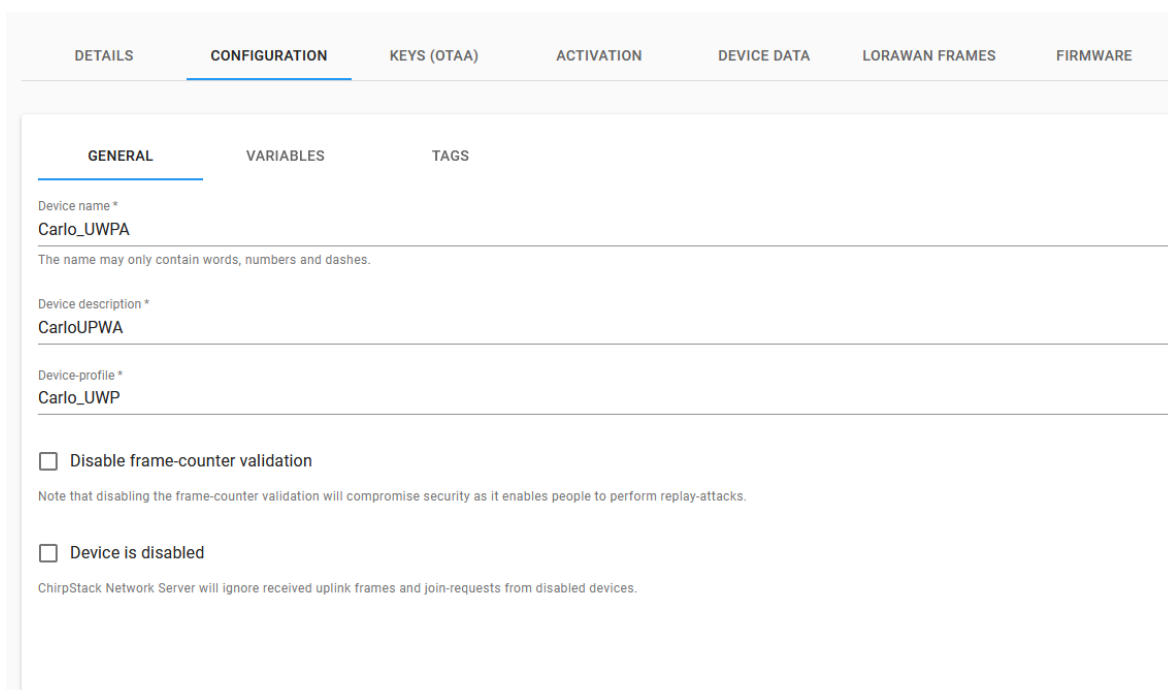
Vasta kaikkien profiiliasetusten määrittelyn jälkeen pystyy verkkoalustaan lisäämään päälaitteita ja tukiasema-laitteita. Ensiksi lisätään tukiasema, tämä tapahtuu Gateway-asetusvalikon kautta. Tukiasemien määrittelyyn tarvitaan ainoastaan tieto tukiaseman ID-numerosta. Tukiasemalle valitaan aiemmin luotu verkkopalvelinprofiili, jonka alle tukiasema on tarkoitettu yhdistää. Tukiasemalle pitää valita oikea tukiasemaprofiili sekä valita palveluprofiili, jonka alaisuuteen tukiasema liitetään.

Tukiasemien lisäyksen jälkeen luodaan applikaatio eli sovelluskohde. ChirpStackissa applikaatioilla ryhmitellään mihin kohteeseen tai tarkoitukseen sensorilaitteet tulevat. Uusi applikaatio luodaan Application asetusvalikon kautta. Uudelle applikaatiolle määritellään nimi sekä mihin palveluprofiilin alle kyseinen applikaatio sijoittui. Applications asetuksissa määritellään myös integraatioasetukset. Integraatio tarkoittaa, että mihin kerätty data integroidaan. Applikaation data voidaan esimerkiksi suoraan integroida kolmannen osapuolen pilvipalveluihin, rajapintaan tai paikalliseen tietokantaan. ChirpStack tarjoaa valmiita useita vaihtoehtoja integroimiseen. Integraatiot esitetty taulukossa A.2:

<b>Integraatiot</b>	
MQTT	HTTP/HTTPS rajapinta
Lora Cloud	Amazon AWS
Azure Service-Bus	Thingsboard.io
InfluxDB	GCP Pub/Sub

Taulukko A.2: ChirpStackin valmiit integraatiopalvelut ja rajapinnat

Varsinaiset päätelaitteet lisätään aivan viimeisenä ChirpStackin asetuksiin. Päätelaitteiden lisääminen tapahtuu sen applikaatioprofiilin sisällä, jonka alaisuuteen päätelaitteet halutaan liittää. Konfiguraatio välilehdellä, joka on esitetty kuvassa A.5 määritellään päätelaitteelle nimi ja sopiva laiteprofiili. Aktivointitavaksi voidaan valita OTAA tai ABP.



The screenshot shows the 'CONFIGURATION' tab of the ChirpStack interface. It is divided into three sub-sections: 'GENERAL', 'VARIABLES', and 'TAGS'. The 'GENERAL' section is active and contains the following fields and options:

- Device name \***: Input field containing 'Carlo\_UWPA'. A note below states: 'The name may only contain words, numbers and dashes.'
- Device description \***: Input field containing 'CarloUPWA'.
- Device-profile \***: Input field containing 'Carlo\_UWP'.
- Disable frame-counter validation**. A note below states: 'Note that disabling the frame-counter validation will compromise security as it enables people to perform replay-attacks.'
- Device is disabled**. A note below states: 'ChirpStack Network Server will ignore received uplink frames and join-requests from disabled devices.'

Kuva A.5: Päätelaitteiden lisääminen ja konfigurointi

DEVICE ja LORAWAN FRAMES-välilehdillä voidaan myöhemmin seurata ja tutkia päätelaitteen MAC ja Payload-dataliikennettä. Laitteen yhdistämisen ja verkkoon liittämisen jälkeen ChirpStackista voidaan seurata laitteen signaalin vaimennus, RSSI signaalitasoja tai mahdollisia virheitä. Seuraaminen tapahtuu laitteen Details välilehdellä. DETAILS-välilehden kautta voidaan lähettää myös laitteelle Downlink datasanomia numeraalisesti heksadesimaali tai JSON-formaatissa sekä valita laitteen fPort mihin datasanoma kohdistetaan laitteella. Myös tarvittaessa ohjelmistopäivitykset päätelaitteelle onnistuvat verkon kautta ajastetusti. Ohjelmistopäivitykset tapahtuvat FIRMWARE- välilehden kautta.

## B LoRaWAN MAC-komennot

CID	Komento	Lähtettäjä	Komennon kuvaus
0x01	ResetInd	ED	Indikoi ABP-laitteen verkon nollauksen
0x01	ResetConf	GW	ResetInd-komennon kuittaus
0x02	LinkCheckReq	ED	Yhteyden validointi
0x02	LinkCheckAns	GW	LinkCheckReq-komennon kuittaus
0x03	LinkADRReq	GW	Yhteysasetusten muutospyyntö
0x03	LinkADRAns	ED	Kuittaus yhteysasetusten muutospyyntöön
0x04	DutyCycleReq	GW	Päätelaitteen työsyklin asetus
0x04	DutyCycleAns	ED	DutyCycleReq-komennon kuittaus
0x05	RXParamSetupReq	GW	Päätelaitteen vastaanottoikkunan asetus
0x05	RXParamSetupAns	ED	RXParamSetupReq-komennon kuittaus
0x06	DevStatusReq	GW	Tilapyyntö pyyntö päätelaitteelta
0x06	DevStatusAns	ED	Tilapyynnön vastaus
0x07	NewChannelReq	GW	Uusi kanava tai muokkaus pyyntö
0x07	NewChannelAns	ED	NewChannelReq-komennon kuittaus
0x08	RXTimingSetupReq	GW	Tukiaseman vastaanottoikkunan asetus
0x08	RXTimingSetupAns	ED	RXTimingSetupReq-komennon kuittaus
0x09	TxParamSetupReq	ED	MAX EIRP ja Dwell time määrittäminen
0x09	TxParamSetupAns	GW	RXTimingSetupReq-komennon kuittaus
0x0A	DIChannelReq	GW	Downlink-kanavan muutospyyntö
0x0A	DIChannelAns	ED	DIChannelReq-komennon kuittaus
0x0B	RekeyInd	ED	OTA tietoturvapäivitys
0x0B	RekeyConf	GW	RekeyInd-komennon kuittaus
0x0C	ADRParamSetupReq	GW	Asettaa ADR-kuittauksen viiveasetukset
0x0C	ADRParamSetupAns	ED	ADRParamSetupAns-komennon kuittaus
0x0D	DeviceTimeReq	ED	Pyytää aikasetukset tukiasemalta
0x0D	DeviceTimeAns	GW	tukiasema palauttaa aikaasetukset
0x0E	ForceRejoinReq	GW	Pakottaa päätelaitteen liittymään pikaisesti
0x0F	RejoinParamSetupReq	GW	Asettaa uudelleen liittymisasetukset
0x0F	RejoinParamSetupAns	ED	RejoinParamSetupReq-komennon kuittaus
0x80 - 0xFF	Proprietary	GW / ED	Varattu mahd. tuleville komennoille

Taulukko B.1: MAC-komennot