

Manu Oksanen

PIRKANMAAN IOT-VERKON ESISELVITYS

Sähkö- ja Automaatiotekniikan koulutusohjelma
2019

PIRKANMAAN IOT-VERKON ESISELVITYS

Oksanen, Manu
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja Automaatiotekniikan koulutusohjelma
Marraskuu 2019
Sivumäärä: 94
Liitteitä: 0

Asiasanat: LPWAN, M2M, Päätelaitte, IoT-radioverkko

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä esiselvitys kaupallisista ja erityisesti IoT-verkoille kehitetyistä lyhyen ja pitkän kantaman langattomista tiedonsiirtoteknologioista. Työn alkuosassa esitellään eri LPWAN-tekniikoiden erityispiirteitä ja niiden tyypillisiä teknisiä ja toiminnallisia ominaisuuksia. Työn loppuosassa esitetään vastaavasti kiinteistö- ja taloautomaatiossa laajasti sovellettuja lyhyen kantaman teknologioita. Eri teknologioiden esittelyssä kiinnitetään huomiota mm. niiden verkon rakenteeseen, energiatehokkuuteen, skaalautuvuuteen, tiedonsiirron nopeuteen, kantamaan ja tietoturvallisuuteen.

Tässä opinnäytetyössä esitettävien langattomien IoT-radioteknologioiden teknologiakartoituksen ja vertailun tavoitteena on muodostaa yleiskäsitys tällä hetkellä markkinoilla saatavilla olevista langattomista IoT-radioteknologioista ja niiden erilaisista soveltamisalueista.

LPWAN-tekniikoista LoRaWAN, Sigfox ja NB-IoT-tekniikat käsitellään yksityiskohtaisemmin opinnäytetyön tehtäväasettelun edellyttämällä tavalla niiden pitkän kantaman eli alueellisen hyödyntämismahdollisuuden vuoksi. Lisäksi työssä arvioidaan langattomien IoT-ratkaisuiden erityispiirteitä alustatalouden, kyberturvallisuuden ja energiayhtiöiden tulevaisuuden liiketoimintojen näkökulmasta. Työn loppuosassa esitellään Enermix Oy:n digitaalinen IoT-alustaratkaisu ja tarkastellaan esimerkkien avulla kahden langattoman IoT-tekniikkaa hyödyntäneen projektin tuloksia.

PRELIMINARY RESEARCH OF PIRKANMAA IOT NETWORK

Oksanen, Manu

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical and Automation Technology

November 2019

Number of pages: 94

Appendices: 0

Keywords: LPWAN, M2M, End-node, IoT network

The purpose of this thesis was to make preliminary research about the most relevant commercial short-, mid-, and long-range wireless data transmission technologies which were developed for IoT-networks. The third and fourth chapter summarizes few different LPWAN-technologies and their technical details, and the fifth chapter is summary of different wireless short- and mid-range building and home automation technologies.

The technology summaries focus on the architecture of the networks, energy efficiency, scalability, data transmission speeds, range, and security. From LPWAN technologies LoRaWAN, Sigfox and NB-IoT are summarized with greater detail as requested because of their long-range capabilities.

Technology summary and comparison are meant to help reader understand the main differences between the currently available wireless IoT-radio technologies and their plausible use cases. In addition, the thesis evaluates the specifics of wireless IoT solutions from the perspective of platform economy, cyber security and future business approaches of energy-sector companies. The final part of the thesis presents Enermix Oy's digital IoT platform and examines the results of two of their customer projects which used wireless IoT technologies mentioned in this thesis.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	ENERGIAYHTIÖN NÄKÖKULMA.....	7
2.1	Energiayhtiöiden liiketoimintojen murros	8
2.2	Kohti sektori-integraatiota.....	9
2.3	Langattomien tietoverkkojen merkitys energiasektorilla kasvaa	10
2.4	Pirkanmaan IoT-verkko	10
3	LPWAN-TEKNOLOGIAT	11
3.1	LoraWAN™	15
3.1.1	LoRa-verkon arkkitehtuuri ja protokolla.....	15
3.1.2	LoRa-verkon suorituskyky.....	17
3.1.3	LoRa-viestin rakenne	18
3.1.4	LoRa-verkon tietoturvallisuus.....	19
3.2	LoRa® fyysinen kerros	21
3.2.1	LoRa:n toimintaperiaate	21
3.2.2	LoRa-päätelaitteet	22
3.2.3	LoRa-tekniikan käyttötarkoitukset.....	24
3.3	Sigfox-tekniikka.....	26
3.3.1	Sigfox-verkon arkkitehtuuri ja protokolla	26
3.3.2	Sigfox-verkon suorituskyky	28
3.3.3	Sigfox Monarch.....	32
3.3.4	Sigfox-verkon tietoturvallisuus	33
3.3.5	Sigfox-päätelaitteet ja käyttötarkoitukset.....	34
4	MOBIILI IOT.....	36
4.1	LTE:n kehittyminen LPWA-tekniikoiden hyödynnettäväksi.....	37
4.2	NB-IoT.....	39
4.2.1	NB-IoT-verkon arkkitehtuuri ja protokolla.....	39
4.2.2	NB-IoT-verkon suorituskyky	41
4.2.3	NB-IoT-verkon tietoturvallisuus.....	42
4.2.4	NB-IoT-päätelaitteet.....	43
4.3	APN.....	44
5	KIINTEISTÖ- JA TALOAUTOMAATION IOT-VERKOT	45
5.1	Bluetooth.....	46
5.2	Wi-Fi HaLow.....	48
5.3	Zigbee	49
5.4	KNX.....	51
5.5	Wirepas Mesh	52

5.6	DASH7	54
5.7	Google Thread	55
5.8	EnOcean	56
5.9	Z-Wave.....	58
6	LANGATTOMIEN IOT-RADIOTEKNOLOGIOIDEN VERTAILUA.....	60
6.1	Teknologioiden vertailu ja ominaisuuksien yhteenveto	60
7	LANGATTOMIEN IOT-TEKNOLOGIAMARKKINOIDEN TULEVAISUUDEN KEHITYSNÄKYMÄÄ	69
7.1	Alustatalous yhdistää datapohjaisia digitaalisia ekosysteemejä	70
7.2	IoT-järjestelmien kokonaisvaltainen tietoturvallisuus korostuu	72
8	ENERMIX OY:N IOT-ALUSTA.....	74
8.1	Ilmastomuutoksen hillintä lisää IoT-ratkaisujen soveltamista	75
8.2	Digitaalinen talo- ja kiinteistöautomaation integraatioalusta	76
8.3	NABC lähestymistapa IoT-ratkaisun arvioinnissa.....	76
8.4	Leppäkosken Sähkö Oy toimitalo Ikaalisissa	77
	8.4.1 Asiakkaan tarpeet	78
	8.4.2 Projektin toteutus	78
	8.4.3 Projektin tulokset	81
8.5	Y-Säätiö KIRA-digi hanke.....	82
	8.5.1 Asiakkaan tarpeet	82
	8.5.2 Hankkeen tavoitteet.....	83
	8.5.3 Hankkeen toteutus.....	84
	8.5.4 Hankkeen tulokset	85
9	YHTEENVETO	87
10	POHDINTAA.....	88
	LÄHTEET	89
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

Digitalisaation ja ilmastomuutoksen vauhdittama teknologiakehitys etenee laajana kokonaisvaltaisena muutosprosessina ja vaikuttaa aiempaa nopeammin eri toimialojen ja niiden yritysten liiketoimintaan. Perinteisillä infrastruktuuritoimialoilla, kuten energiasektorilla uuden teknologian hyödyntämisen suurimmat haasteet liittyvät vakiintuneiden pääomavaltaisten liiketoimintaprosessien toimintatapojen hitaisiin muutoksiin. Energia-alan yritysten kyky hyödyntää esimerkiksi digitalisaation tarjoamia mahdollisuuksia nykyisten ja uusien palveluiden kehittämisessä on yhä tärkeämpi kilpailu- ja menestystekijä. Uuden hajautetun energiateknologian ja digitalisaation nopea kehitys on johtamassa energiasektorilla jopa kokonaisten toimialojen ja niiden perinteisten yksisuuntaisten arvoketjujen murrokseen.

Esineiden internet (Internet of Things, IoT) on digitalisaation näkyvä ja nopeasti kasvava ilmenemismuoto. Se on laajentanut internet-tietoverkon soveltamisen ihmisten välisestä kommunikaatiosta koneiden, laitteiden ja sensoreiden väliseen kommunikaatioon ja älykkääseen vuorovaikutukseen, jonka yhteydessä syntyvää monimuotoista dataa voidaan hyödyntää uutta toiminnallista tai taloudellista lisäarvoa tuottavalla tavalla. Esineiden internet ympäröi meitä monin eri tavoin ja sen tuottaman datan määrä kasvaa ja kumuloituu kiihtyvällä nopeudella. Vuonna 2025 verkkoon kytkettyjen älykkäiden laitteiden määrän arvioidaan ylittävän 75 miljardin laitteen rajan [87].

Digitalisaation ja muun uuden teknologian soveltamisen edetessä ja yleistyessä yhä useampi älykäs laite ja sensori tai tietojärjestelmä on teknisesti valmis toimimaan esineiden internetissä. Erilaisten älykkäiden IoT-laitteiden yleistyminen moninkertaistaa datan, tiedonsiirron ja tiedonsiirrossa käytettävien yhteyksien ja teknologioiden määrän. Erilaisia tiedonsiirtoprotokollia ja -teknologioita hyödyntävien älykkäiden IoT-laitteiden ja automaatiojärjestelmien tuottaman datan hyödyntäminen edellyttää myös monipuolisia tietojärjestelmiä, digitaalisia alustoja, joissa monimuotoista dataa jalostetaan ja yhdistellään. Kun esineiden internettiin liittyvä älykäs laite tai sensori on

toiminnassa, tarvitaan myös toimiva yhteys tietoliikenneverkkoon. Yhä useammin erilaiset älykkäät laitteet ja anturit kommunikoivat langattomasti.

Tässä opinnäytetyössä esitellään esineiden internetin ja kiinteistöautomaation sovelluksissa käytettäviä yleisimpiä pitkän- ja lyhyenkantaman langattomia tiedonsiirtoteknologioita ja niiden sovelluksia. Lisäksi työssä esitellään yleisellä tasolla Enermix Oy:n kehittämää IoT-integraatio- ja palvelualustaa, jolla voidaan käsitellä ja yhdistää eri tietolähteistä kerättävää dataa. Työn loppuosassa esitellään toimialakohtaisia IoT-ratkaisuja esimerkkinä energiatoimiala.

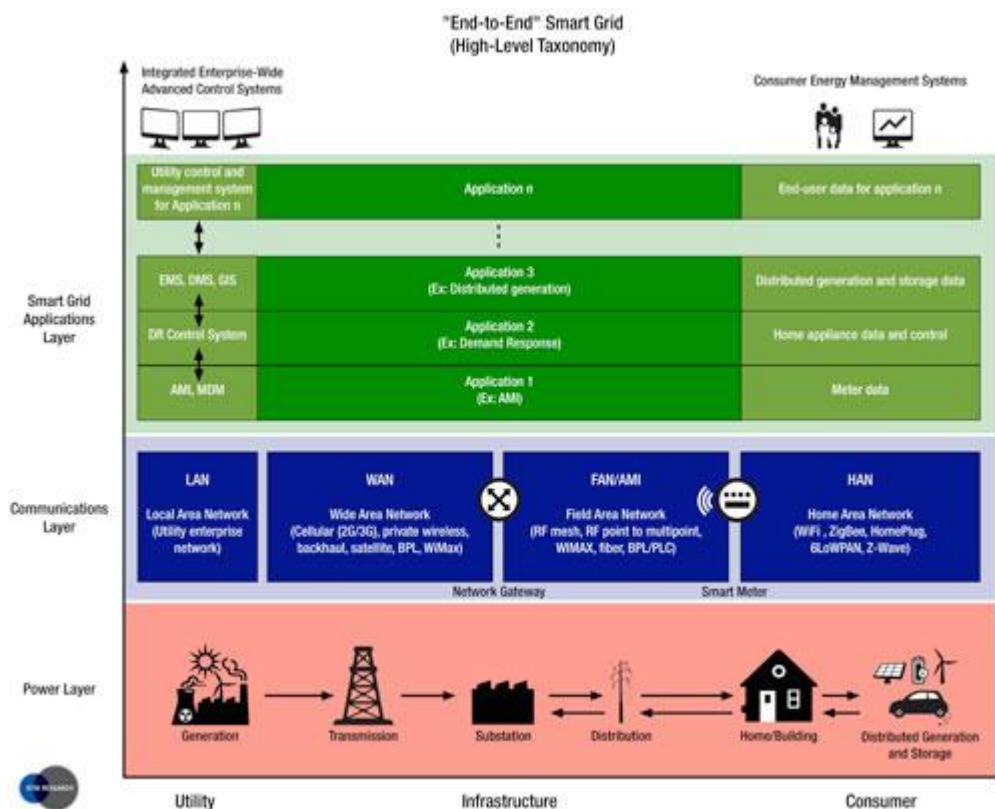
Tämä opinnäytetyö on toteutettu Enermix Oy:n, Leppäkosken Sähkö Oy:n ja Tampereen Sähkölaitoksen toimeksiannosta.

2 ENERGIAYHTIÖN NÄKÖKULMA

Kansallisen ja EU-tasoisien regulaation lisäksi digitalisaation ja hajautetun energianteknologian kehitys heijastuu aiempaa nopeammin perinteisiin infrastruktuuritoimialoihin, kuten energia-alaan. Uusi teknologia muuttaa ja murentaa perinteisiä liiketoimintamalleja ja monopoleja. Yksisuuntaisista energian tuotanto- ja jakelujärjestelmistä kuten sähkö-, kaasu- ja kaukolämpöverkoista on tulossa joustavia kaksisuuntaisia ja keskinäisriippuvaisia energiaverkkoalustoja. Aiempaa älykkäämmät ja joustavammat energiaverkot mahdollistavat pienten hajautettujen tuotanto- ja kulutusyksiköiden aktiivisemmän roolin osana perinteistä keskitettyä tuotanto- ja jakelujärjestelmää. Passiivisista kuluttajista on tulossa aktiivisia energiaverkostojen toimijoita, hybridiasiakkaita, jotka tuottavat osan energiastaan itse tai käyttävät energiaa merkittävästi aiempaa tehokkaammin tai myyvät energian loppukulutuksensa joutokyykyä tai tuotantonsa ylijäämää energiaverkostojen muille osapuolille. Pitkällä aikavälillä lukuisten pienten aktiivisten osapuolten toimet heijastuvat energiayhtiöiden keskitettyihin energian tuotanto- ja jakelujärjestelmiin ja siten myös yhtiöiden perusliiketoimintaan.

2.1 Energiayhtiöiden liiketoimintojen murros

Kuvassa 2.1 esitetään periaatekuva sähkön tuotanto- ja jakelujärjestelmän muodostamasta energia-alustasta ja sen eri osa-alueista ja osapuolista. Asiakasrajapinnassa perinteiseen yksisuuntaiseen tuotanto- ja jakelujärjestelmään liittyy pienimuotoista kaksisuuntaista sähköenergian tuotanto-, kulutusjousto- ja varastointiteknologiaa. Vastaavalla tavalla energiamurros ja teknologiamuutos heijastuu kaukolämpö- ja kaasuverkkoihin, joissa muutoksen ajureita ovat mm. energian säästö ja vaihtoehtoiset lämmöntuotantotavat kuten lämpöpumput ja muu lämmön mikrotuotanto.



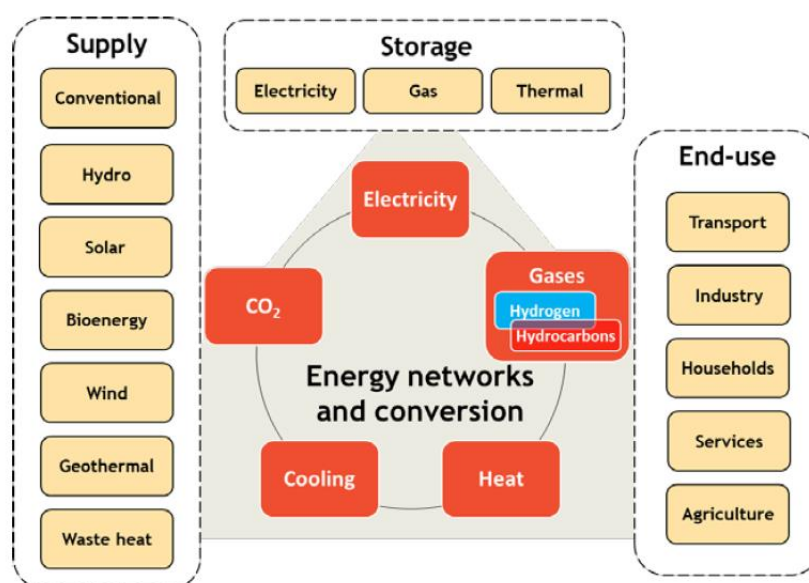
Kuva 2.1. Energiantuotanto- ja jakeluinfrastruktuuri ja niiden kerrokset. [74]

Kuvan 2.1 alin kerros eli fyysinen taso (power layer) esittää nykyisen sähkön tuotanto- ja jakelujärjestelmän asiakasrajapinnan muutosta ja sen asiakkuuden ja energiajärjestelmän kaksisuuntaisuutta. Vastaavasti kaksisuuntaisuuden ja energiajärjestelmän hajaantuneisuuden kasvaessa erilaisen sähköisen kommunikaation ja automaation tarve energiajärjestelmän eri kerrosten ja osapuolten välillä kasvaa - energiajärjestelmän eri kerrosten mittaus- ja

tiedonsiirtojärjestelmiltä edellytetään tulevaisuudessa kommunikaatorajapintojen avoimuutta ja kykyä monipuoliseen langattomaan ja ohjattuun viestinvaihtoon.

2.2 Kohti sektori-integraatiota

Energian tuotannosta, jakelusta ja loppukäytöstä syntyvää monipuolista mitaus- ja ohjausdataa siirretään kasvavassa määrin energiasektorin eri osapuolten digitalisoituihin sovellus- ja palvelukerrokseen. IoT-anturiteknologian ja älykkäiden taloteknisten kiinteistöautomaatiojärjestelmien yleistyminen kasvattaa myös hyödynnettävissä olevan olosuhdedatan (esim. lämpötila, CO₂, Rh%, VOC) määrää ja samalla lisää tarvetta eri ohjaus- ja valvontajärjestelmien väliselle sähköiselle kommunikaatiolle. Toimivan, monipuolisen ja kustannustehokkaan tiedonsiirron tarve on kasvava niin anturi-, laite-, järjestelmä- kuin sovellustasolla. Yksittäisten energiasektorin liiketoimintaspesifisen digitalisaation tai IoT:n rinnalla edetään samanaikaisesti kohti hybridiratkaisuja, joissa energiasektorin liiketoiminta-alueiden rajat ylittyvät ja erilaisia arvoketjuja integroivat palveluratkaisut yleistyvät (Sector Coupling). Kuvassa 2.2 esitetään periaatekuva energiasektorin eri osa-alueiden kasvavasta keskinäisvaikutuksesta ja integraatioympäristöstä.



Kuva 2.2. Energiasektorin osa-alueiden integraatioympäristö. [75]

Toimiva sektori-integraatio edellyttää monimuotoisen digitaalisen datan siirtoon, tallentamiseen ja käsittelyyn soveltuvia tietojärjestelmiä, digitaalisia alustoja, joissa monimuotoista dataa jalostetaan ja yhdistellään eri sektoreiden tarpeisiin.

2.3 Langattomien tietoverkkojen merkitys energiasektorilla kasvaa

Digitalisaatioon liittyvä monimuotoisen sähköisen datan hyödyntämisen merkitys energiasektorilla kasvaa. Energiayhtiöille datan hyödyntäminen mahdollistaa aiempaa monipuolisempien ja kustannustehokkaampien palveluiden tarjonnan. Parantunut, kaksisuuntainen sähköinen kommunikaatio on uusien digitaalisten palveluiden ja aktiivisen kaksisuuntaisen asiakkuuden perusedellytys. Tässä yhteydessä esille nousevat erilaiset lyhyen- ja pitkänkantaman langattomat tiedonsiirtoteknologiat, jotka mahdollistavat useimpien olemassa olevien ja uusien palveluiden kustannustehokkaan digitalisoinnin ja niissä syntyvän monipuolisen datan hyödyntämisen. Myös jo aikaisemmin digitalisoidut ja automatisoidut prosessit kehittyvät monipuolistuvan langattoman tiedonsiirron ja modernin digitaalitekniikan vauhdittamana. Esimerkiksi sähkö-, vesi- ja kaukolämpömittareiden etäluennassa aiempaa kustannustehokkaammat lisenssivapaat radioteknologiat ovat korvaamassa vanhempaa langatonta ja teleoperaattoreiden SIM-korttipohjaista teknologiaa.

Energiayhtiöiden perinteisten liiketoimintojen digitalisaatioasteen kasvattamisen ja kustannustehokkuuden lisäämisen näkökulmasta erilaisten alueellisten ja kiinteistökohtaisten langattomien tietoverkkojen merkitys tulee korostumaan sekä olemassa olevien arvoketjujen tehostamisessa että uusien asiakaslähtöisten digitaalisten palveluiden kuten IoT-ratkaisujen kehittämisessä.

2.4 Pirkanmaan IoT-verkko

Tämän esiselvitystyyppisen opinnäytetyön tehtäväasettelussa keskeisenä tavoitteena oli arvioida pitkän- ja lyhyen kantaman langattomien IoT-verkkoteknologioiden eroja ja soveltamista energiayhtiöiden liiketoimintaympäristöissä

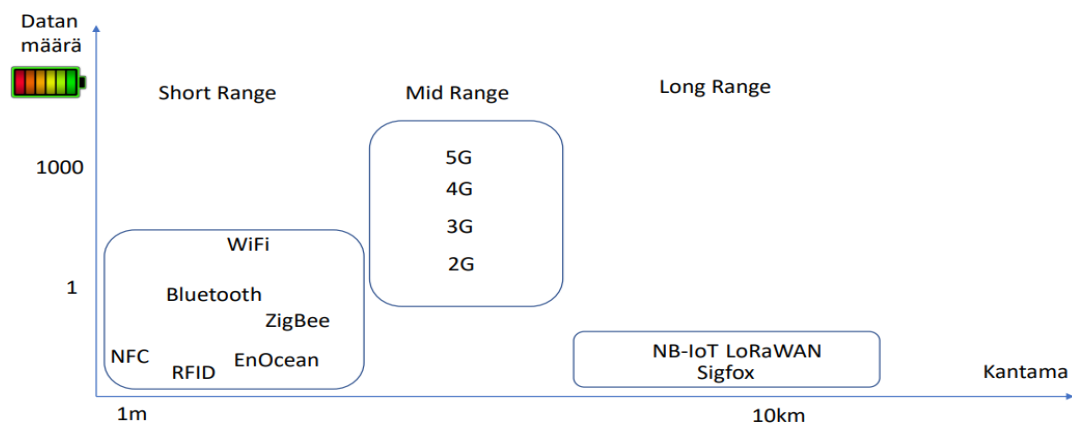
ja asiakasrajapinnoissa. Opinnäytetyöllä lisätään energiayhtiöiden valmiutta soveltaa langatonta tiedonsiirtoteknologiaa nykyisissä ja kehitteillä olevissa uusissa digitaalisissa energiapalveluissa. Energiayhtiöiden kannalta oma tai palveluun perustuva alueellinen IoT-tiedonsiirtoverkko voi mahdollistaa aiempaa kustannustehokkaampia liiketoimintaprosesseja ja monipuolistuvia palveluita. Esiselvityksen perusteella oma alueellinen asiakastarpeiden mukaan skaalautuva langaton IoT-tietoverkko on toteutettavissa joko omana investointina tai erikseen hankittavana ostopalveluna. Verkko voidaan toteuttaa joko yhtä tai useita eri teknologioita hyödyntävänä hybridiratkaisuna.

Tämä opinnäytetyö on esiselvitys, joka on taustaselvitys sen teettäneiden osapuolten uusien IoT-palveluiden kehitystyölle. Energiayhtiöiden tavoitteena on synnyttää uutta, kasvavaa ja kannattavaa palveluliiketoimintaa, joka samalla tukee nykyistä energiamurroksen kourissa kamppailevaa perusliiketoimintaa. Teknologialtaan tarkoituksenmukainen, kapasiteetiltaan skaalautuva, monikäyttöinen ja käytöltään ja investoinneiltaan kilpailukykyinen langaton tiedonsiirtoverkko niveltyy hyvin tulevaisuuden energiayhtiöiden ja niiden asiakkaiden uusiin palveluratkaisuihin.

3 LPWAN-TEKNOLOGIAT

Esineiden internetin ja kiinteistöautomaation nopea globaali kehitys on johtanut tilanteeseen, jossa markkinoilla on saatavissa useiden eri valmistajien toteuttamia langattomia radiopohjaisia ja johdotettuja väyläpohjaisia tiedonsiirto-ratkaisuja. Tarjolla on myös hybridiratkaisuja, joissa tiedonsiirron teknologia on valinnainen. Eri ratkaisuissa käytettyjen teknologioiden taustalla on yleensä erilaisia kansallisia ja kansainvälisiä standardeja, joiden soveltamisessa voi olla maa- ja laitevalmistajakohtaisia eroja. Standardien väljä soveltaminen voi aiheuttaa ongelmia eri laite- tai anturivalmistajien laitteiden toiminnallisessa yhteensovittamisessa.

Kuvissa 3.1-3.2 esitetään eräiden langattomien verkkoteknologioiden keskeisiä ominaisuuksia (energian kulutus, datamäärä ja kantama). Esimerkiksi laajalla maantieteellisellä alueella sijaitsevien kiinteistöjen valaistuksen ohjaukseen tai huonelämpötilan säätöön käytettävän langattoman tiedonsiirtoteknologian vaatimukset poikkeavat merkittävästi reaaliaikaisesti etävalvottavan liikkuvan koneen tai nopean teollisen säätöprosessin ohjaukseen käytettävästä verkkoteknologiasta. Mikään yksittäinen langaton tiedonsiirtoteknologia ei kuitenkaan sellaisenaan sovellu kaikkien erilaisten IoT-ratkaisujen yleisteknologiaksi ja kullakin teknologialla on omat tyypilliset sovellusalueensa









Kuva 3.1. Yleisesti sovellettavat langattomat tiedonsiirtoteknologiat ja niiden keskeiset toiminnalliset ominaisuudet. [6]

Eri langattomien tiedonsiirtoteknologioiden soveltamisessa on otettava huomioon soveltamiskohde ja tarvittavan teknologiaratkaisun käyttötarkoitus. Kullakin eri teknologialla on omat erityispiirteensä ja soveltamiskohteensa. Eri toimialojen tarpeet vaihtelevat merkittävästi. Yleisiä langattoman tiedonsiirtoteknologian valintakriteerejä ovat mm. seuraavat tekijät:

- sovellusalue (mihin tarkoitukseen teknologiaa hyödynnetään, kuva 3.2)
- kiinteistön tai rakennuksen sisäinen tiedonsiirtoverkko (lyhyen kantaman teknologiat, satoja metrejä)
- laajemman alueen kattavat verkot (pidemmän kantaman verkot, kilometrejä tai kymmeniä kilometrejä)
- langattoman signaalin eteneminen ja kuuluvuus (rakennusten sisällä, kellaritilat, rakennusmateriaalit jne.),

- radiolaitteiden ja sensoreiden energiankulutus (kiinteä sähköverkko, paristot ja akut)
- tiedonsiirtonopeus ja yhteyden tyyppi (siirrettävän datan määrä, latenssi, yhteydellinen, yhteydetön)
- mobiili- vai kiinteäverkko
- verkon rakenne ja topologia (säteittäinen, mesh-verkko jne.)
- teknologian yleisyys (miten laajasti käytetty)
- verkon tiedonsiirron hallinta ja käyttö jne.
- ratkaisun kustannustehokkuus

	Local Area Network Short Range Communication	Low Power Wide Area (LPWAN) Internet of Things	Cellular Network Traditional M2M
	40%	45%	15%
	Well established standards In building	Low power consumption Low cost Positioning	Existing coverage High data rate
	Battery Live Provisioning Network cost & dependencies	High data rate Emerging standards	Autonomy Total cost of ownership
	Bluetooth 4.0 	LoRa 	GSM 

Kuva 3.2. Eräiden langattomien verkkotyyppien vahvuudet ja heikkoudet. [7]

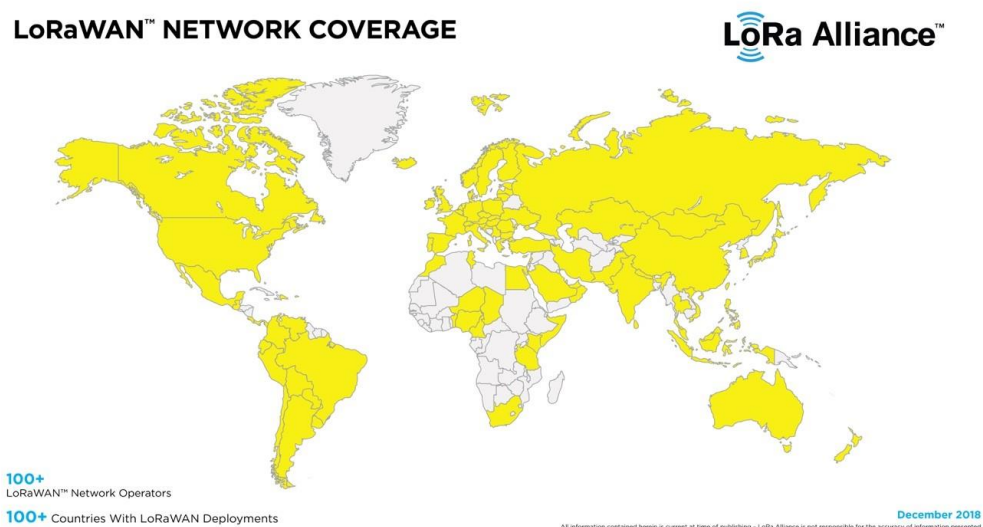
Tässä opinnäytetyössä läpikäydään kiinteistöjen ja muiden staattisten verkko-kohteiden yleisimmin käytettyjä langattomia tiedonsiirtoteknologioita. Langattomien teknologioiden etuna on mm. verkon totutuksen kustannustehokkuus sekä helppo ja nopea asennettavuus niin uusissa kuin olemassa olevissa kohteissa.

Tämä opinnäytetyö painottuu ns. pitkän kantaman langattomien verkkoteknologioiden esittelyyn. Työn loppuosassa tarkastellaan myös eräiden lyhyen kantaman verkkoteknologioiden ominaisuuksia. Lyhyen kantaman teknologioita hyödynnetään erityisesti kiinteistökohtaisissa IoT-ratkaisuissa. Tehtäväasettelun mukaisesti tämä työ painottuu erityisesti LoRa-teknologiaan, joka on avoimen standardin lisenssivapaana teknologiana kasvattanut nopeasti suosioaan globaalisti erilaisissa IoT-sovelluksissa. Suomessa LoRa-teknologian

hyödyntäminen on vasta yleistymässä ja teknologian ensimmäisiä kaupallisia merkittäviä soveltajia on Digita Oyj (<https://www.digita.fi/yrityksille>), joka on rakentamassa maanlaajuista IoT-verkkoa ja tarjoaa teknologiaa hyödyntäviä IoT-palveluita. LoRa LPWAN-teknologian merkittävimpiä kilpailijoita ovat Sigfox (kappale 3.3) ja yhdysvaltalainen Ingenu, jonka RPMA-teknologia (Random Phase Multiple Access) toimii 2,4 GHz ISM-taajuuksilla. Ingenu on rajattu tämän opinnäytetyön teknologiakartoituksen ulkopuolelle.

3.1 LoraWAN™

LoRaWAN™ on LoRa Alliance-järjestön kehittämä ja LoRa-teknologialle räätälöity LPWAN-verkkoprotokolla (Low Power Wide Area Network), joka kuuluu pitkän matkan, pienten datamäärien ja vähäisen virrankulutuksen IoT-tiedon siirtoteknologioiden nopeimmin kehittyvään kärkeen. Protokollasta on muodostumassa jossain määrin massiivisten maantieteellisesti laajojen IoT-ratkaisujen defacto standardi. Nimi LoRaWAN on lyhenne sanoista Long Range Wide Area Network. LoRaWAN-tietoliikenneprotokolla on globaalisti avoin standardi, jolle alan toimijat voivat kehittää omia IoT-ratkaisuja päätelaitteista aina loppuasiakkaiden kokonaisvaltaisiin älykkäisiin palveluihin. Kaksisuuntainen LoRaWAN soveltuu erityisesti pienten datamäärien lähettämiseen ja vastaanottamiseen maantieteellisesti laajoissa skaalautuvissa sovelluksissa. LoRaWAN-tietoliikenneprotokollan kehitystä hallinnoi 2015 perustettu LoRa Alliance-järjestö, johon kuuluu jo satoja yrityksiä ja järjestöjä. [2]

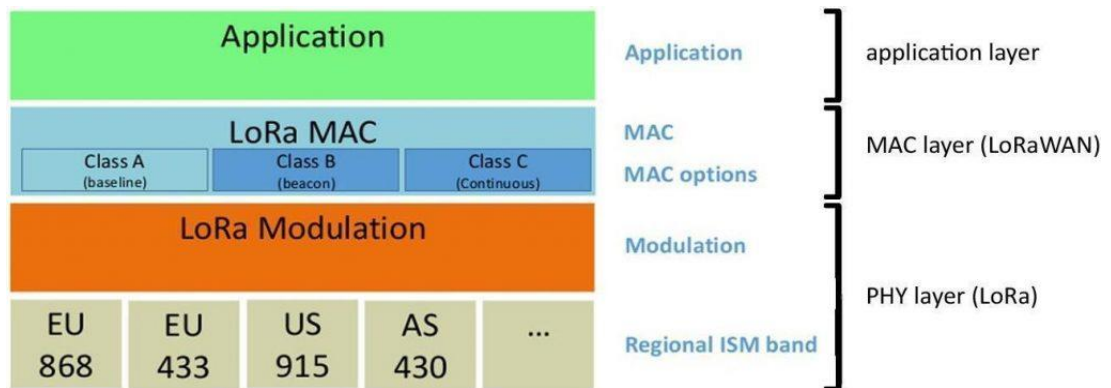


Kuva 3.3. LoRaWAN-verkkojen levinneisyys joulukuu 2018. [13]

3.1.1 LoRa-verkon arkkitehtuuri ja protokolla

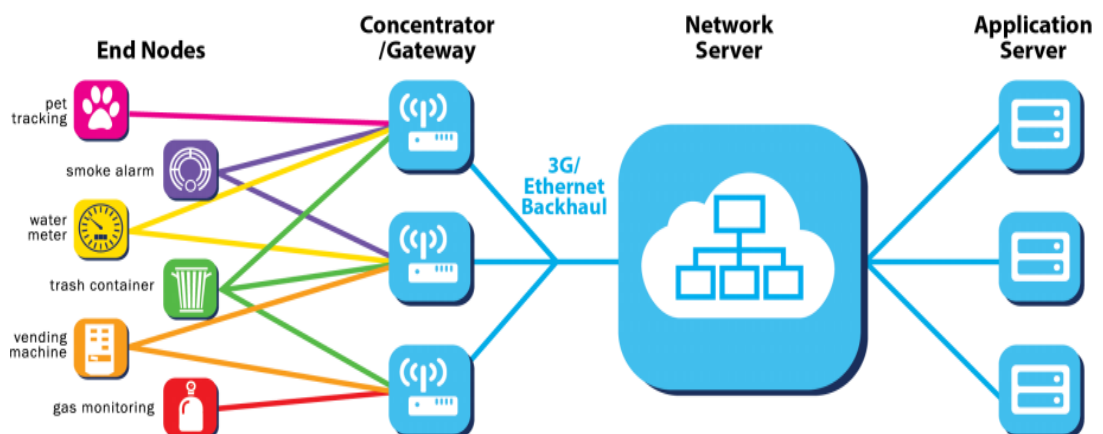
LoRaWAN™ määrittää kommunikaatioprotokollan ja järjestelmän arkkitehtuurin verkolle (MAC-taso, Media Access Control). LoRa® fyysinen kerros

mahdollistaa pitkän kantaman kommunikoinnin päätelaitteilta yhdyskäytävälle (LoRa Modulaatio). Verkon arkkitehtuurilla ja viestien lähetyksnopeudella (tässä tarkoitetaan lähetettyjen yksittäisten up- ja downlink-viestien lukumäärä eli lähetystiehyttä esimerkiksi tunnissa) on suuri vaikutus päätelaitteiden paristojen elinikään, verkon kapasiteettiin sekä verkon soveltuvuuteen eri käyttötarkoituksiin. [7]



Kuva 3.4. LoRaWAN-kommunikaatioprotokolla. [10]

LoRaWAN-protokolla muodostuu kolmesta tasosta: sovellus-, MAC- ja fyysinen taso [10]. LoRaWAN-verkkoarkkitehtuuri muodostuu päätelaitteista, yhdyskäytävistä, palvelimista ja käyttäjän sovelluksista, eli se käsittää koko protokollan rakenteen. Star-of-stars-topologia on yleisin toteutustapa, jossa gateway toimii tiedonsiirron siltana päätelaitteiden ja verkkopalvelimien välillä.



Kuva 3.5. LoRaWAN-verkkoarkkitehtuuri. [6]

LoRa-päätelaitteet eivät käytä IP-protokollaa ja ne toimivat omissa internetistä erotetussa radioverkossa. Päätelaitteet käyttävät paikallisia lisensoimattomia

alle gigahertsin ISM-radiotaajuuksia tiedonsiirrossa päätelaitteelta yhdyskäytävälle. Yhdyskäytävä (gateway) välittää tietoa palvelimille vakiomuotoisilla IP-liitännöillä kuten matkapuhelinverkkojen tai WiFi:n välityksellä. Päätelaitteet voivat olla myös mobiileja, koska niiden viestit eivät sisällä osoitetta eli ne voivat kommunikoida samanaikaisesti useiden yhdyskäytävien kanssa. Riittää että päätelaite on jonkin kyseisen verkon gatewayn kuuluvuuden sisällä. [2]

3.1.2 LoRa-verkon suorituskyky

Pitkänkantaman LoraWAN-tähtiverkon hyvän toimivuuden kannalta yhdyskäytävän kapasiteetilla on suuri merkitys, jotta se pystyy vastaanottamaan viestejä suurilta päätelaitemääriltä. Suuri kapasiteetti voidaan saavuttaa hyödyntämällä LoRa-tekniikan mukautuvaa tiedonsiirtonopeutta (ADR, Adaptive Data Rate) ja käyttämällä monikanavaista vastaanotinta yhdyskäytävässä. Tällöin yhdyskäytävä pystyy vastaanottamaan useita samanaikaisia viestejä useilta päätelaitteilta eri kanaville. Kriittisimmät tekijät, jotka vaikuttavat kapasiteettiin ovat [7]:

- aukinaisten kanavien määrä
- tiedonsiirtonopeudet (ToA, Time on Air)
- viestien koko
- viestien lähetystiheys päätelaitteilta

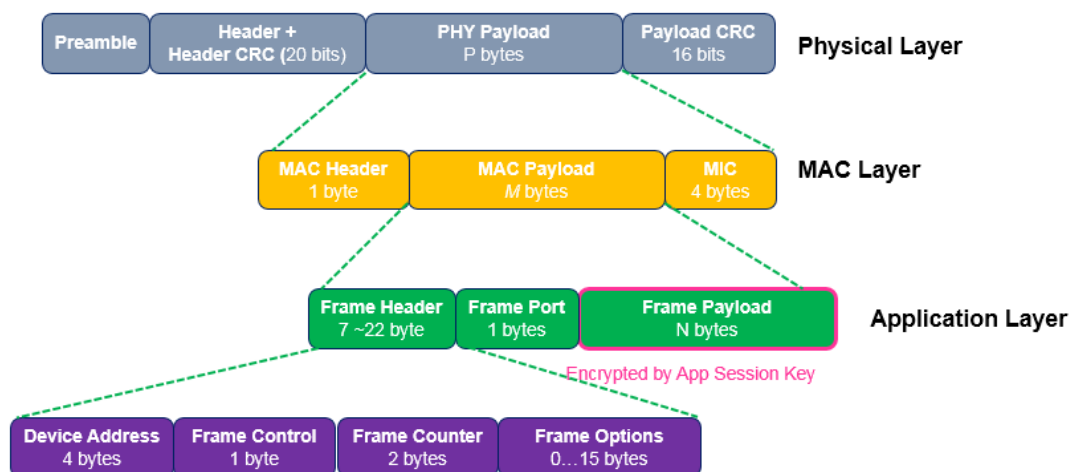
LoRa-laitteet käyttävät hajaspektrimodulaatiota (Chirp Spread Spectrum), jolloin lähetetyt radiosignaalit matkaavat eri pituisia aikoja yhdyskäytävälle. Spreading Factorin (SF) muuttuessa tiedonsiirtonopeus (Time on Air) muuttuu. Gateway hyödyntää tätä ominaisuutta siten, että se pystyy vastaanottamaan samanaikaisesti avoimiin kanaviin eri tiedonsiirtonopeuksilla ja päätelaitteilta tulevia viestejä. Mitä lähempänä päätelaite on yhdyskäytävää ja mitä parempi on niiden välinen radioyhteys, sitä pienempää Spreading Factoria voidaan käyttää. Tällöin hitaampaa tiedonsiirtonopeutta ei varata tarpeettomasti. Näin yhä useampi eri etäisyydellä sijaitseva päätelaite pystyy lähettämään viestejä yhdyskäytävän kanavaan. Yhdyskäytävän käyttämä CR-arvo (Coding Rate)

määrittää signaalin häiriönsietokyvyn. Mitä suurempi CR-arvo, sitä paremmin yhteys kestää virheitä lähetyksissä, mutta samalla tiedonsiirron kapasiteetti pienenee [7].

Mukautuva tiedonsiirtonopeus edellyttää symmetristä lähetystä ja vastaanottoa riittävällä vastaanottokapasiteetilla. Näiden ominaisuuksien ansiosta LoRaWAN-verkko skaalautuu paremmin erilaisiin päätelaittekuormiin. LoRaWAN-protokolla ei rajoita vastaanottokapasiteettia tai tee vastaanottoaluetta epäsymmetriseksi lähetyksiin nähden. Mukautuva tiedonsiirtonopeus optimoi päätelaitteiden paristojen eliniän - jos päätelaite sijaitsee lähellä yhdyskäytävää, se voi lähettää pienemmällä lähetysteholla ja suuremmalla datanopeudella. Verkon tähtiarkkitehtuuri on toimiva ratkaisu paristojen eliniän ja halutun kantaman kannalta. LoRa-verkon kapasiteettia voidaan kasvattaa lisäämällä yhdyskäytävien lukumäärää verkossa. [7]

3.1.3 LoRa-viestin rakenne

LoRa-viestit koostuvat alustusosasta (Preamble), otsikosta (Header, ei pakollinen) ja hyötykuormasta (Payload). Viestin otsikko ja hyötykuorma sisältävät CRC (Cyclic Redundancy Check) tarkisteen, jolla voidaan tarkistaa viestin eheys.



Kuva 3.6. LoRa-viestin rakenne. [34]

3.1.4 LoRa-verkon tietoturvallisuus

LoRaWAN verkon viestien salaus perustuu AES128-salaukseen (Advanced Encryption Standard). AES algoritmi on symmetrinen lohkosalausmenetelmä (Block Cipher), joka salaa ja purkaa siirrettävät tiedot usean kerroksen läpi. Kerrosten lukumäärä riippuu käytettävän salausavaimen pituudesta. Kerroksia on 10, 12 tai 14 ja avaimien pituudet voivat olla standardin mukaan 128, 192 vai 256-bittinä. [5] Suojauksen 128-bittiset sessionavaimet ovat kahdella kerroksella laitekohtaisia [9]:

- päätelaitteen ja palvelimen välillä **NwkSKey** (Network Session Key),
- päätelaitteen ja sovelluksen välillä **AppSKey** (Application Session Key)
- laitekohtainen tunnistus **DevAddr** (Device Address)

NwkSKey:tä käytetään viestien aitoustarkastuksessa (MIC, Message Integrity Code) ja Device Address:n asettamisessa uniikkeihin DevEUI ja AppEUI tunnistuksiin. AppSKey:tä käytetään viestien salaamiseen ja salauksen purkamiseen päätelaitteen, yhdyskäytävän ja sovelluksien välillä. Asetetut NwkSKey ja AppSKey ovat uniikkeja jokaisessa kyseisen verkon päätelaitteessa. [11]

AES = *Advanced Encryption Standard*

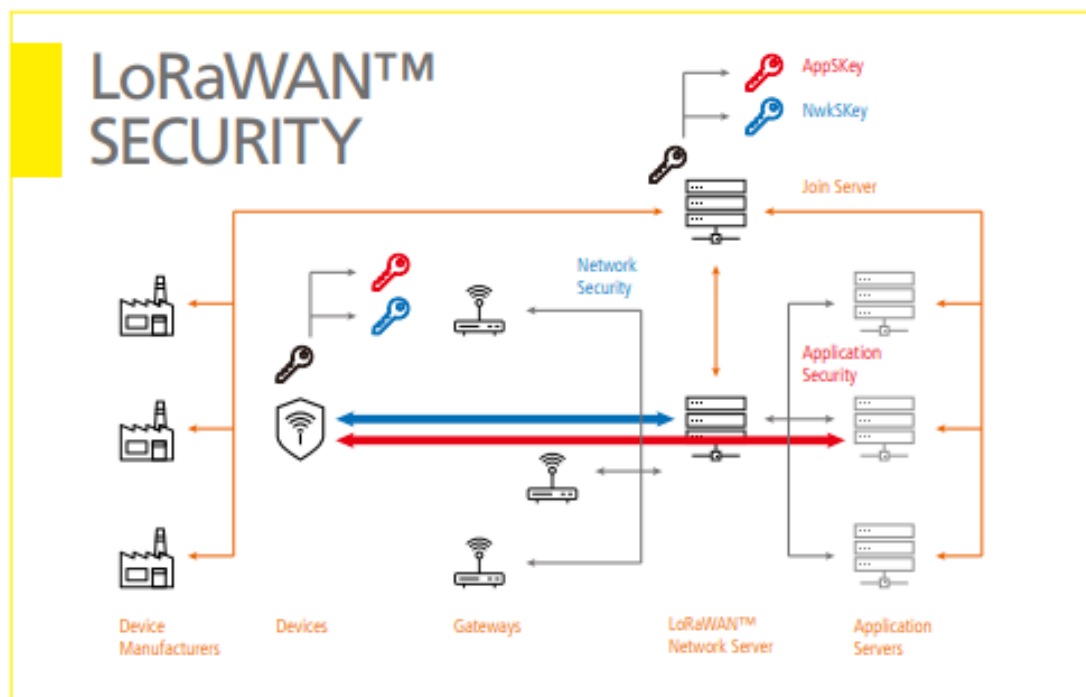
Esimerkki:			
ID	DevEUI	AppEUI	AppKey
5042	70B8D57BA1000BEC	70B3D77ED00006B3	B1EAFBB9DF09034CC94E73E9D9D96A72

Kuva 3.7. Esimerkki laitekohtaisesta DevEUI, AppEUI ja AppKey avaimista. [6]

Jos verkon laitteet on aktivoitu verkkoon dynaamisesti (OTAA, Over The Air Activation) sessionavaimet generoidaan uudelleen jokaisella aktivoinnilla. Jos päätelaitteet on aktivoitu staattisesti (ABP, Activation By Personalization) salausavaimet pysyvät samoina, jollei niitä vaihdeta manuaalisesti. Dynaamisesti aktivoidut laitteet käyttävät sovellusavainta (AppKey, Application Key) määrittääkseen kaksi salausavainta aktivoinnin yhteydessä. AppKey voi olla yhteinen kaikille verkon laitteille tai määritelty erikseen laitekohtaisesti.

Jälkimmäinen vaihtoehto on suositeltavampi tietoturvan kannalta. [11] AES-salauksen heikkouksia ovat esimerkiksi [10]:

- Salatut viestit, jotka vastaavat pituudeltaan salausavaimia.
- NwkSKey ja AppSKey avaimiin liittyvä mahdollinen turvallisuusriski (avainten asiaton käyttö ja koko verkon salauksen murtumisriski ja verkon kaikkien komponenttien salausavainten muutostarve).
- AES-avainten säilytyspaikka (mahdollisessa tietomurrossa kaikki verkon laitteet ovat alttiita hyökkääjille).



Kuva 3.8. LoRaWAN salaus kahden kerroksen läpi. [9]

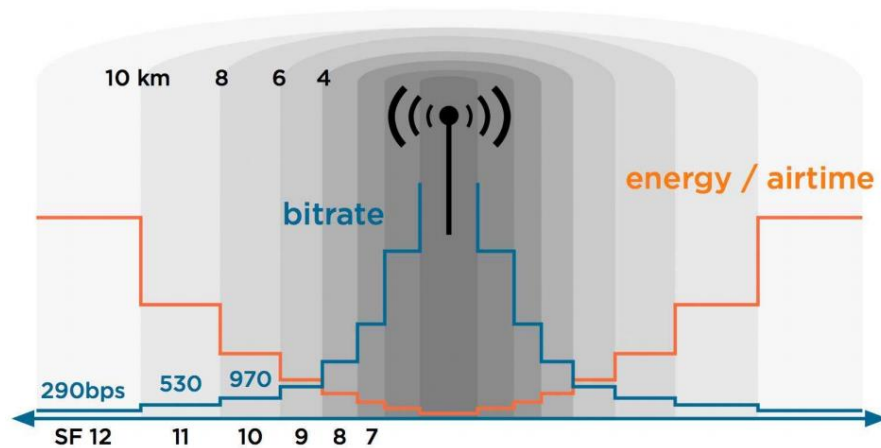
AES-salausmenetelmää pidetään eräistä puutteista huolimatta yhtenä luotettavimmista salaustavoista. AES-salauksella on myös nopeusetuja, koska nykyaikaiset prosessorit tukevat AES-NI-käskykanta (Advanced Encryption Standard New Instructions), joka nopeuttaa salausta ja sen purkamista. [6]

3.2 LoRa® fyysinen kerros

LoRa®:lla tarkoitetaan joko yhdysvaltalaisen teknologiayrityksen Semtech:n patentoimaa ja kehittämää päätelaitteiden käyttämää LoRa® LPWAN-radioverkkoteknologiaa tai teknologian langatonta modulaatiota, jolla mahdollistetaan pitkänkantaman langattomat kommunikointiyhteydet päätelaitteiden ja reitittimien välillä [7]. LoRa-teknologia soveltuu maantieteellisesti laajoihin IoT- ja älysovelluksiin, joissa siirretään pieniä datamääriä kuten kiinteistöjen ja erilaisten laajojen infrastruktuurijärjestelmien (esimerkiksi sähkö-, kauko- lämpö- sekä vesi- ja viemäriverkot) anturidataa ja tilatietoja. Kaksisuuntainen tietoturvallinen tiedonsiirto, päätelaitteiden liikuteltavuus ja niiden helppo käyttöönotto ovat LoRa:n tärkeimpiä vahvuuksia. [2]

3.2.1 LoRa:n toimintaperiaate

LoRa perustuu Semtechin kehittämään CSS-modulaatioon (Chirp Spread Spectrum, ns. hajaspektri-modulaatio). LoRa-teknologian avulla riittävä radio-kuuluvuus säilyy pitkälläkin etäisyyksillä tehonkulutuksen pysyessä samalla kohtuullisena [7]. Lisäksi hajaspektrimodulaatiolla saadaan radiosignaalille parempi häiriönsietokyky, jolloin esimerkiksi maaperästä tai rakenteista aiheutuville heijastumilla tai diffraktioilla on vähäisempi vaikutus verkon signaaleihin. Hajaspektritekniikan avulla vastaanotettu signaali pystytään tunnistamaan kohinatason alapuolelta. Spreading Factor valitaan päätelaitteen ja yhdyskäytävän etäisyyden ja lähetettävien datamäärien perusteella. Mitä pidempi on päätelaitteen lähetyksen kesto yhdyskäytävälle, sitä parempi on viestin kantama, koska radiosignaali on havaittavissa kauemmin. Teknologian tiedonsiirtonopeudet vaihtelevat ~293 b/s – 50 kb/s välillä ja siirrettävät datamäärät ovat tyypillisesti vain muutamia tavuja [2]. Datamäärän ylärajaksi suositellaan sata tavua [12].



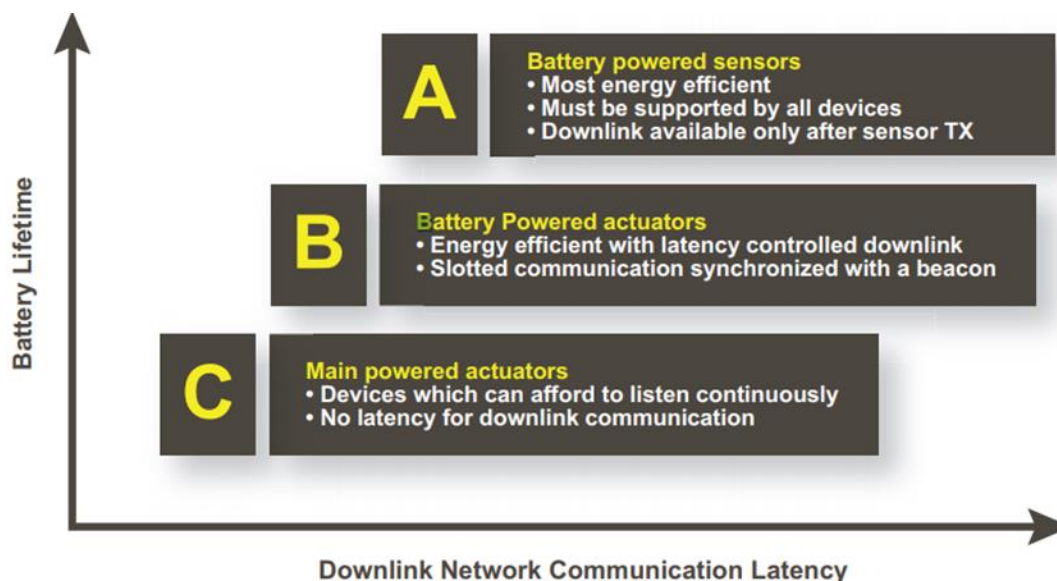
Kuva 3.9. Mukautuva tiedonsiirtonopeus (ADR) havainnollistettuna. [6]

LoRa-päätelaitteet kommunikoivat lisensoimattomilla radiotaajuuksilla, jotka eivät edellytä maksullista lisenssiä. Koska kyse on avoimista radiotaajuuksista, niiden käyttöä säädellään mm. lähetystehon ja toiminta-ajan perusteella - esimerkiksi duty cycle eli lähetys- ja odotusajan suhde voi olla 1% tai 0,1 %. Jos päätelaitteen toiminta-ajaksi on määritelty 1 % niin yhden sekunnin lähetysajan jälkeen laitteen on odotettava 99 sekuntia ennen seuraavaa lähetystä.

Päätelaitteet on suunniteltu point-to-point tyyppiseen yhdyskäytävyyhteyden muodostamiseen. LoRa-päätelaitteet eivät keskustele keskenään verkossa ja tämä parantaa päätelaitteiden energiatehokkuutta ja radioverkon kapasiteettia. Yksi riittävän korkealle asennettu yhdyskäytävä tai tukiasema voi luoda kattavan radiopeiton aina 20km säteelle [7] ja se voi käsitellä samanaikaisesti jopa tuhansia LoRa-päätelaitteita. [12]

3.2.2 LoRa-päätelaitteet

LoRa-teknologiaa hyödyntäviä päätelaitteita on olemassa useaan eri käyttötarkoitukseen. Laitteet luokitellaan niiden radioiden vastaanottoikkunoiden laatussin (aika, joka kuluu datapaketin lähetykseen lähettäjältä vastaanottajalle ja takaisin) ja paristojen eliniän mukaan. Päätelaitteet luokitellaan kolmeen luokkaan (Kuva 3.10).



Kuva 3.10. Laiteluokat. [7]

A-luokka (Baseline): Virrankulutukseltaan pienimmät kaksisuuntaiset paristokäyttöiset päätelaitteet. Jokaista lähetystä seuraa kaksi lyhyttä vastaanottoikkunaa kaksisuuntaisen kommunikoinnin mahdollistamiseksi tai ohjaukskäskyjen vastaanottamiseksi. Se on ns. ALOHA-tyyppinen protokolla, jossa päätelaite lähettää datapaketin vain tarvittaessa. Päätelaite voi mennä ohjelmallisesti määriteltävään lepotilaan, eikä se vaadi säännöllisiä herätysaikoja lähetysvalmiuden ylläpitämiseksi. Minimoidun kommunikoinnin ansiosta A-luokan päätelaiteen tehonkulutus on vähäistä. A-luokan päätelaite odottaa lähettämänsä datapaketin vastaanottoviestiä radioverkon palvelimelta vasta sen jälkeen, kun se on jo itse lähettänyt viestin verkkoon. [4]

B-luokka (Beacon): Kaksisuuntaiset päätelaitteet, joilla on ajastetut vastaanottoikkunat. A-luokan kahden vastaanottoikkunan lisäksi B-luokan laitteet on synkronisoitu verkon kanssa ns. Beacon-viestiin (majakka), minkä jälkeen päätelaite menee hetkeksi vastaanottotilaan. Tämä johtaa ylimääräiseen virrankulutukseen, mutta laite soveltuu yhä paristokäyttöiseksi. Beacon-viestin latenssi voi vaihdella aina 128 sekuntiin saakka, jotta päätelaite soveltuu eri ratkaisuihin. [4]

C-luokka (Continuous): Pienimmän latenssin kaksisuuntaiset päätelaitteet. C-luokan laitteen vastaanotin on aina auki, kun päätelaite ei itse lähetä (half duplex). Näin verkon palvelin voi milloin tahansa lähettää paketin

päätelaitteelle oletuksena, että sen vastaanotin on auki. C-luokan laitteen virrankulutus voi olla jopa kymmeniä milliwatteja ja edellyttävät jatkuvaa virransyöttöä päätelaitteelle pariston sijaan. Tietyissä sovelluksissa C-luokan laitteet soveltuvat lähes reaaliaikaiseen monitorointiin. [4]

3.2.3 LoRa-teknologian käyttötarkoitukset

Tällä hetkellä teknologian oikeudet omistava Semtech on ainoa LoRa-mikrosiruvalmistaja. Tulevaisuudessa yritys tullee antamaan teknologian oikeuksia myös muille mikrosiruvalmistajille [3]. Päätelaitteita ja yhdyskäytäviä myyvät laitevalmistajat hyödyntävät Semtech:n siruteknologiaa. Muun muassa Cisco valmistaa LoRaWAN-yhdyskäytäviä, jotka ovat myös LoRa Alliance:n hyväksymiä.

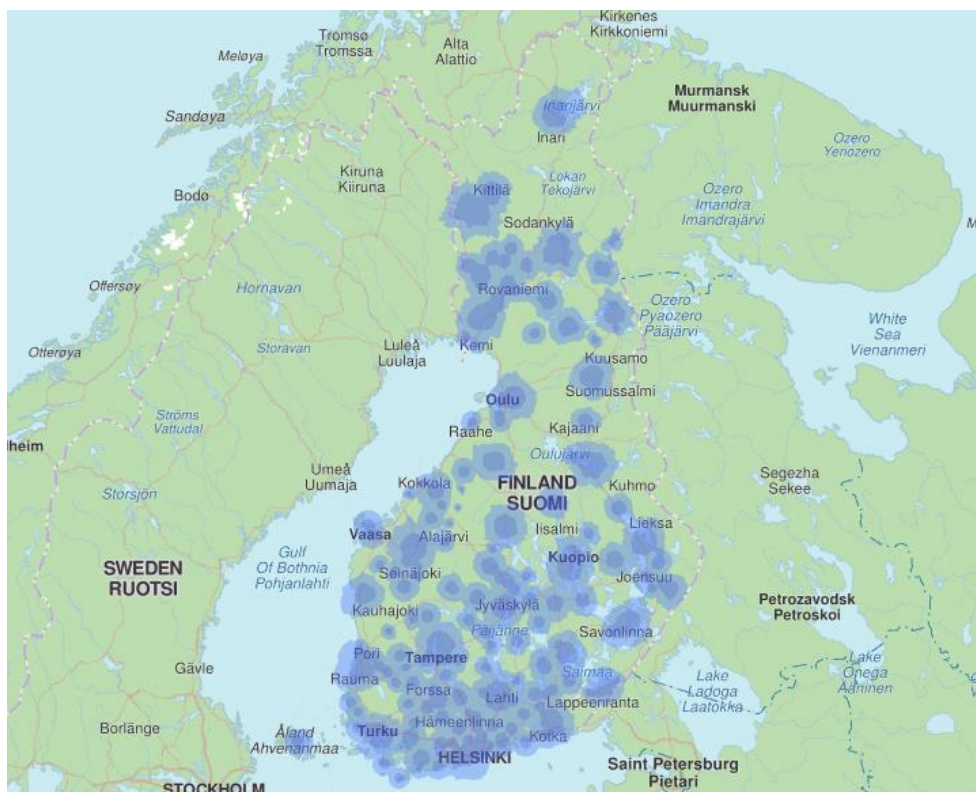
Tällä hetkellä arvioidaan, että yli sadassa maassa LoRa-päätelaitteita on käytössä jo noin 50 miljoonaa ja niiden määrä kasvaa [1]. LoRa-teknologiaa voidaan hyödyntää monissa digitaalisissa IoT- ja etävalvontasovelluksissa kuten:

- energia- ja vesimittareiden etäluenta
- etäohjattavat venttiilit
- valaistuksen ohjaus (esim. katu- ja puistovalaistusten ohjaus)
- sisä- ja ulkoilman olosuhdemittaukset
- ympäristömittaukset
- jätehuolto (esim. jäteastioiden tyhjennystarve)
- paikannus
- liikenne- ja kulunvalvonta
- läsnäolo ja tilatiedot (esim. pysäköintihallien parkkiruutujen valo)



Kuva 3.11. Kuva 3.12. Kuva 3.13. Kuva 3.14. Elsys:n valmistamia LoRa-antureita. Vasemmalta oikealle LoRa ERS, LoRa ERS-Lite, LoRa ELT 2 ja LoRa ELG gateway. [37-39]

Kuvissa 3.11-3.14 esitetään ruotsalaisen Elsysin valmistamia LoRa-päätelaitteita ja yhdyskäytävä. LoRa ERS (kuva 3.11) mittaa huoneilman suhteellista kosteutta, huonelämpötilaa, valoisuutta ja liikettä. Lite-malli (kuva 3.12) mittaa suhteellista kosteutta ja lämpötilaa. LoRa ELT 2 - anturi (kuva 3.13) on analogisten ja digitaalisten signaaleiden mittaamiseen tarkoitettu pulssianturi. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi sähkö- ja vesimittareiden etäluentaan. LoRa-ELG (kuva 3.14) on LoRa-yhdyskäytävä julkisille ja yksityisille verkoille.



Kuva 3.15. Digitaalisen LoRaWAN-verkon peittokartta 2019. [15]

Teknologiaa hyödyntävät sekä julkiset että yksityiset toimijat. Verkot voivat olla avoimia (julkisia) tai suljettuja yritysverkkoja. Julkisen verkon operaattoreita toimii jo 49:ssä maassa ja niiden lisäksi on myös monia yksityisiä toimijoita [8]. Suomessa tunnetuin LoRa-toimija on Digita Oyj (<https://www.digita.fi>), jonka viestintäverkkoyhtiö ylläpitää langatonta LoRaWAN-verkkoa. Digitan verkkokartassa (kuva 3.15) esitetään tummansinisellä LoRa-radioverkon sisäkuuluvuus ja vaaleansinisellä ulkokuuluvuus. Digitan LoRa-verkon peittoalueen rajat ovat mallinnettu SF12 (hitain tiedonsiirtonopeus ja pisin kantama) spreading factorin perusteella. [15]

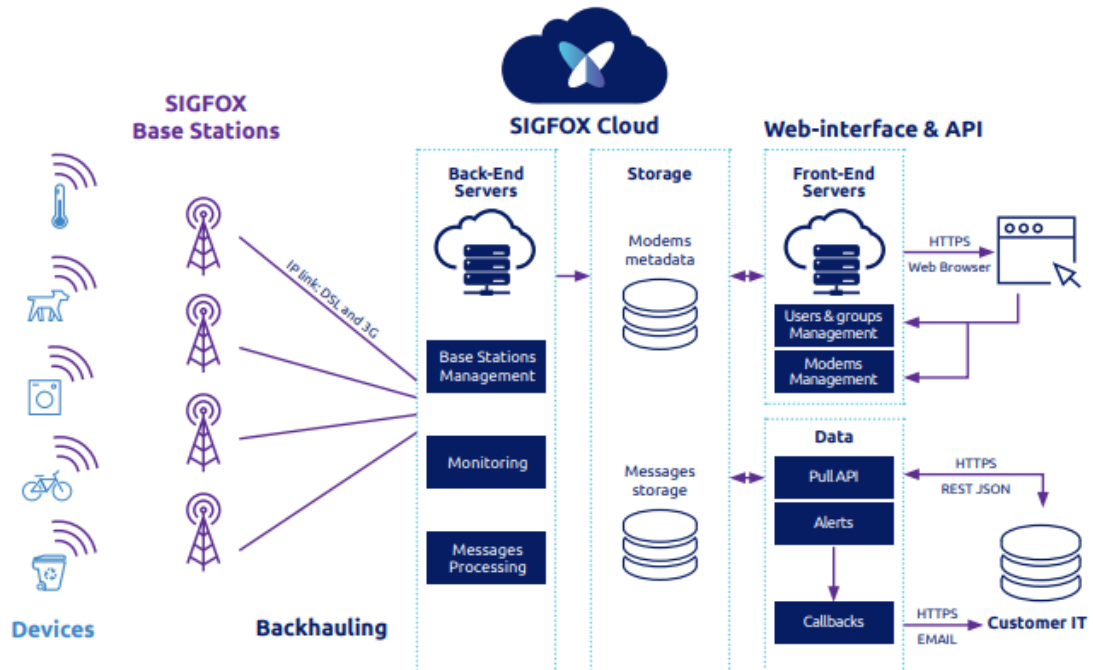
3.3 Sigfox-teknologia

Sigfox on ranskalainen yritys, joka keskittyy langattomien lisenssivapaiden IoT-teknologioiden kaupallistamiseen. Sigfox on kehittänyt ja patentoinut Sigfox LPWAN-verkkoteknologian. Sigfox-teknologian ominaisuuksia ovat mm. päätelaitteiden vähäinen tehonkulutus, yksinkertaisuus, kilpailukykyinen hinta, pieni viestien koko ja lyhyenkantaman verkkojen kuten WiFi:n puutteiden täydentäminen. Sigfox-kumppaniverkosto koostuu eri maiden paikallisista verkko-operaattoreista, jotka vastaavat alueensa Sigfox-verkon ja päätelaitteiden saatavuudesta sekä niihin liittyvistä palveluista. Sigfox kilpailee hinnallaan ja teknologiallaan ensisijaisesti LoRa- ja kappaleessa 4.2 esiteltävän NB-IoT-teknologioiden kanssa. Sigfox-teknologia on käytössä jo noin 60:ssä eri maassa. [25]

3.3.1 Sigfox-verkon arkkitehtuuri ja protokolla

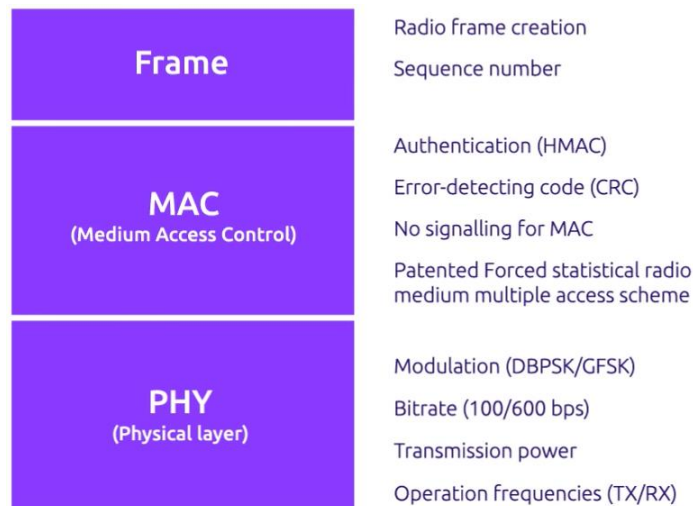
Sigfox-tähtiverkkoarkkitehtuuri koostuu päätelaitteista, Sigfox-tukiasemista, Sigfox-datapilvestä ja käyttäjien sovelluksista. Sigfox-päätelaitteet ja tukiasemat käyttävät tiedonsiirrossa lisensoimattomia ISM-radiotaajuuksia. Kaikki Sigfox-tukiasemat ovat suorassa yhteydessä Sigfox CLOUD-palvelimeen. Tukiasemat kuuntelevat radioverkkoa ja vastaanottavat kaikilta kantaman sisällä olevilta päätelaitteilta UNB (Ultra Narrowband) signaaleja, jotka tukiasema demoduloi ja raportoi Sigfox-pilveen. Pilvestä viestit lähetetään asiakkaiden

palvelimille, joissa niitä hyödynnetään mm. erilaisten raportointi- ja IoT-palveluiden tuottamiseen. Vain Sigfox-verkon asiakas pystyy lähettämään päätelaitteilleen downlink-viestejä rajapintansa kautta. [25, 44]



Kuva 3.16. Sigfox-tähtiarkkitehtuuri. [44, figure 6]

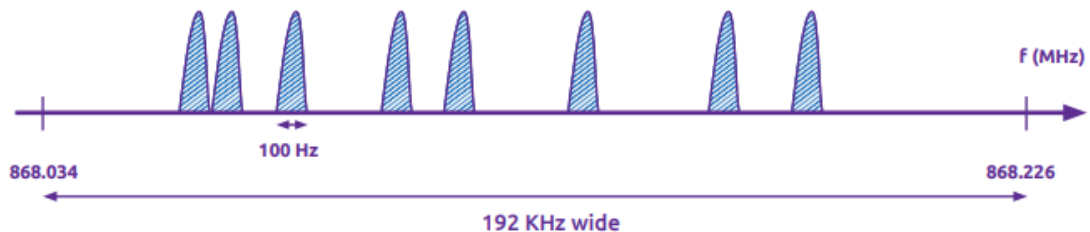
Sigfox-protokollapino koostuu fyysisestä tasosta, MAC-tasosta, Frame-tasosta ja sovellustasosta. Protokollapino sijoittuu arkkitehtuurissa päätelaitteiden ja tukiasemien välille ja protokolla on käyttäjilleen maksuton. Frame-taso vastaanottaa viestien sisällön sovellustasolta ja generoi radioviestin rungon, jolle annetaan systemaattisesti sarjanumero. MAC-taso tunnistaa verkon päätelaitteet ja havaitsee viestien mahdolliset virheet. Koska Sigfox poistaa MAC-tason signalointimahdollisuuden, laitteet ja verkko eivät ole synkronoituja. Tällöin laitteet pääsevät satunnaisesti yhteyteen verkon kanssa. Fyysinen taso määrittelee viestin lähetyksen ja vastaanoton modulointitavan sekä kommunikoinnin taajuusalueet. Euroopassa Sigfox-päätelaitteet käyttävät 868MHz taajuutta ja Amerikassa 902MHz taajuutta pääsevät satunnaisesti yhteyteen verkon kanssa. Fyysinen taso määrittelee viestin lähetyksen ja vastaanoton modulointitavan sekä kommunikoinnin taajuusalueet. Euroopassa Sigfox-päätelaitteet käyttävät 868MHz taajuutta ja Amerikassa 902MHz taajuutta. [25]



Kuva 3.17. Sigfox-protokollapinnan kerrosten ominaisuudet. [25]

3.3.2 Sigfox-verkon suorituskyky

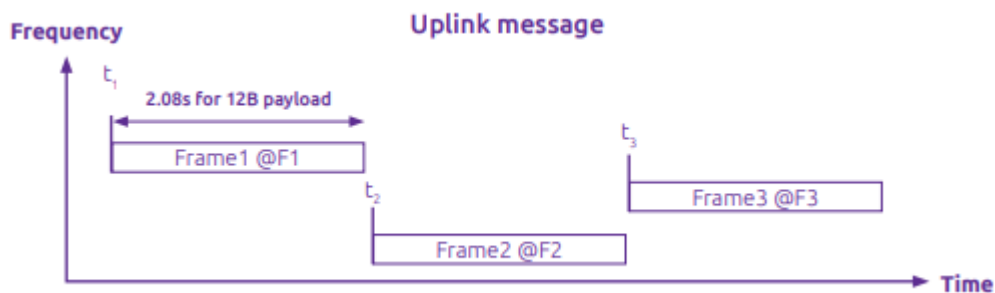
Sigfox käyttää tiedonsiirrossa Ultra Narrow Band (UNB) radioteknologiaa ISM-taajuuksilla, josta sen varaama kaistanleveys on 192 kHz. Viestien lähettämiseen käytetään DBPSK-modulaatiota (Differential Binary Phase-Shift Keying) ja niiden vastaanottamiseen GFSK-modulaatiota (Gaussian Frequency-Shift Keying). Sigfox-verkossa liikkuvat radioviestit ovat datamääriltään pieniä. Kevyen protokollan ansiosta lähetykset ovat 0-12-tavuisia ja vastaanotettavat viestit 8-tavuisia. Pienen datamäärän vuoksi päätelaitteiden tehonkulutus pysyy alhaisena ja verkon kapasiteetti on siten parempi, sillä viestirunko sisältää pääasiassa vain päätelaitteen datan. Tiedonsiirto tapahtuu joko 100 b/s tai 600 b/s nopeudella ja signaalin kaistanleveys on 100 Hz. [27] Kun päätelaite on lepotilassa, sen virrankulutus on minimissä eli yleensä vain muutamia nanoampeereita. [44]



Kuva 3.18. Sigfox-tekniikan käyttämä Ultra Narrow Band-modulaatio. [44, figure 2]

Viestien lähetyksessä DBPSK-modulaatio mahdollistaa hyvän spektritehokkuuden, kun yksi siirrettävä bitti sekunnissa vie yhden hertsin kaistanleveyttä. Sigfox-tekniologia hyödyntää DBPSK-modulaatiota kolmesta syystä:

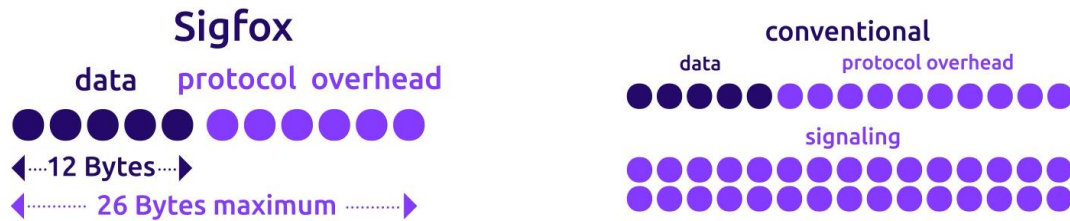
- järjestelmän tekninen toteutus on helppoa,
- järjestelmän komponenttien hinta pysyy mahdollisimman alhaisena ja
- häiriönsietokyky paranee, koska tukiasemat ovat erittäin herkkiä demoduloimaan viestejä häiriöistä riippumatta. [27]



Kuva 3.19. Sigfox-tekniologian käyttämä frequency hopping-tekniikka lähettää viestin kolmella eri taajuudella eri aikoina. [31]

Viestien vastaanotossa GFSK-modulaation periaate on suodattaa vastaanotettavat datapulssit ns. Gaussin suodattimella, joka lyhentää signaalin laskevaa ja nousevaa jaksoa [viite26]. Tällöin sivukaistan tehonkulutus pysyy pienempänä ja häiriöt naapurikanaville vähäisempinä. Ratkaisun haittapuolena on symboleiden välisten häiriöiden lisääntyminen. Gaussin suodattimen toimintaa kutsutaan pulssin muotoiluksi, koska signaalin spektrin leveys pienee. [26]

Sigfox-tukiasemat eivät voi välittää viestejä päätelaitteelle, jos päätelaite ei ole pyytänyt ensin viestin lähetystä ja käytettävä sovellus varmistanut sen lähettämistä takaisin päätelaitteelle. Vastaanotettava viesti voi sisältää kahdeksan tavua, joiden avulla voidaan muuttaa päätelaitteen parametrisointia, mutta se ei riitä esimerkiksi päätelaitteen ohjelmapäivitykseen. Downlink-viestin nopeus on 600 b/s ja näiden viestien määrä on rajattu neljään päivässä. [27]



Kuva 3.20. Sigfox-viestin rakenne verrattuna tavanomaiseen runkoon. [27]

Päätelaitteiden ja tukiasemien välinen tiedonsiirtonopeus riippuu Sigfox-verkon sijaintimaasta tai maanosasta ja niissä sovellettavista radioliikenteen standardeista. Tällä hetkellä Sigfox-verkot on jaettu kuuteen maantieteelliseen luokkaan RC1-RC6 (Radio Configuration). Jokaisella alueluokituksella on omat parametrit kuten taajuusalue ja lähetysteho, jotka vaikuttavat laitteiden tekniseen toteuttamiseen. Lisää luokituksia on tulossa mahdollisesti siinä vaiheessa, kun Sigfox teknologian käyttö leviää uusiin maihin. [28] Tällä hetkellä maat on jaettu alueluokkiin seuraavasti:

- **RC1:** Eurooppa (Belgia, Kroatia, Tšekki, Tanska, Viro, Suomi, Ranska, Saksa, Unkari, Irlanti, Italia, Luxemburg, Malta, Alankomaat, Norja, Puola, Portugali, Slovakia, Espanja, Ruotsi, Sveitsi, Yhdistynyt kuningaskunta),
merentakainen Ranska (Ranskan Guayana, Ranskan Polynesia, Guadeloupe, Martinique, Mauritius, Mayotte, Uusi-Kaledonia, Reunion),
Lähi-itä ja Afrikka (Iran, Kenia, Oman, Etelä-Afrikka, Tunisia, Yhdistyneet arabiemiirikunnat).
- **RC2:** Yhdysvallat, Meksiko, Brasilia.
- **RC3:** Japani.
- **RC4:** Latinalainen Amerikka (Argentiina, Chile, Kolumbia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Panama, Peru),
Aasian ja Tyynenmeren alue (Australia, Hong Kong, Malesia, Uusi-Seelanti, Singapore, Taiwan, Thaimaa).
- **RC5:** Etelä-Korea.
- **RC6:** Intia. [28]

Sigfox-radiokonfiguraatio määrittelee radioparametrit, joilla päätelaite toimii. Näitä parametreja ovat mm. toimintataajuus, lähetysteho, taajuuksien käyttömekanismi, suoritusteho ja rinnantoiminta muiden radioteknologioiden kanssa. [28]

Taulukko 1. Luokitusten tekniset tiedot. [28]

	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6
Uplink center frequency (MHz)	868.130	902.200	923.200	920.800	923.300	865.200
Downlink center frequency (MHz)	869.525	905.200	922.200	922.300	922.300	866,300
Uplink data rate (bit/s)	100	600	100	600	100	100
Downlink data rate (bit/s)	600	600	600	600	600	600
Sigfox recommended EIRP (dBm)	16	24	16	24	14	16
Specifics	Duty cycle 1% *	Frequency hopping **	Listen Before Talk ***	Frequency hopping **	Listen Before Talk ***	

Taulukon (1) tulkintaa:

- ***Duty cycle**, eli työjakso on 1% tunnista (36 sekuntia lähetystä). Tämä tarkoittaa noin 6 viestiä tunnissa ja 140 viestiä päivässä.
- ****Frequency hopping** tarkoittaa sitä, että laite lähettää jokaisen viestin 3 kertaa kolmella eri taajuudella. Maksimi päälläoloaika on 400 ms/kanava, eikä uusia lähetyksiä saa tulla kahteenkymmeneen sekuntiin.
- *****Listen Before Talk (LBT)**, tarkoittaa vaatimusta tarkistaa, että Sigfox:n operoima 200 kHz kanava on vapaa kaikista signaaleista, jotka ovat vahvempia kuin -80 dBm ennen päätelaitteen tiedonsiirron aloittamista. [28]

Sigfox-verkon päätelaitteiden paikantamiseen voidaan käyttää GPS-, WiFi- tai Sigfox-verkkopaikannusta. Paikannustapa valitaan päätelaitteen käyttötarkoituksen mukaan, koska eri paikannustapojen tarkkuus ja energiatehokkuus vaihtelevat. Energiatehokkain on Sigfox-verkkopaikannus, jonka tarkkuus on luokkaa 1-10 km. WiFi-paikannuksen energiatehokkuus on huonompi, mutta tarkkuus noin 25-50 m. WiFi-paikannuksen käyttöönotto edellyttää maksullisen WiFi-piirisarjan lisäämistä päätelaitteeseen. GPS-paikannus on tarkin

(noin 15 m), mutta sen käyttö lyhentää päätelaitteen pariston elinikää ja edellyttää maksullisen GPS-moduulin lisäämisen päätelaitteeseen. [30]

3.3.3 Sigfox Monarch

Sigfox Monarch ominaisuus mahdollistaa päätelaitteille vapaaehtoisen globaalin radioasetusten tunnistamistoiminnon Sigfox-verkoissa. Sen avulla päätelaite voi automaattisesti vaihtaa paikalliselle ISM-radiotaajuudelle ja RC-parametreille ilman GPS-paikannusta tai WiFi-piirisarjaa. Tämän ominaisuuden ansiosta Sigfox-päätelaitteita voidaan hyödyntää maailmanlaajuisesti esimerkiksi tavaralogistiikassa, lentokoneissa ja junaliikenteessä ilman päätelaitteiden paristojen käyttöajan lyhenemistä. Myös kiinteästi laitteisiin asennettavat päätelaitteet hyötyvät tästä ominaisuudesta, koska voidaan valmistaa siirrettäviä valmiiksi päätelaitteilla varustettuja laitteita, joita voidaan tarvittaessa sijoittaa tai myydä valmistusmaan ulkopuolelle yksinkertaisemmalla jakelulla ja käyttöönotolla. [29]



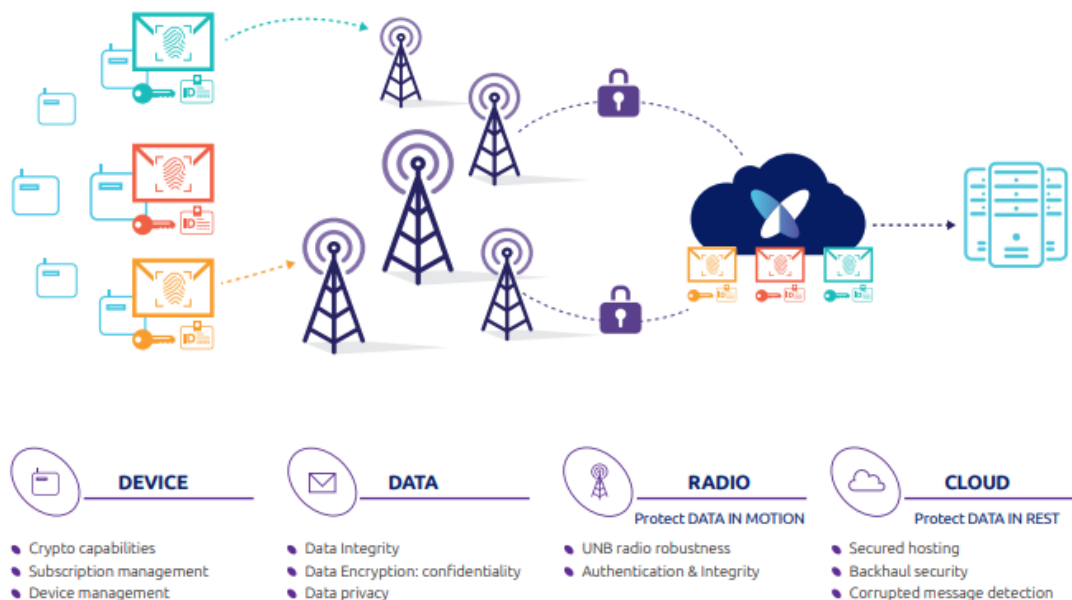
Kuva 3.21. Monarch-toiminnon periaate. [29]

Sigfox Monarch:n toiminta perustuu tukiasemiin, jotka lähettävät beacon-viestejä. Vastaanotetun viestin avulla laite tunnistaa sen toimintaan tarvittavat RC-parametrit. Lähes kaikki Sigfoxia käyttävät puolijohderatkaisut tukevat myös Monarch-toimintoa. On suositeltavaa käyttää vain Sigfox Verified ratkaisuja Monarch-toiminnallisuuden kanssa. Päätelaitteen valmistajan vastuulla on määrittää beacon-viestin etsinnän ajoitukset laitteen asetuksiin. [29]

3.3.4 Sigfox-verkon tietoturvallisuus

Päätelaitteiden ja Sigfox CLOUD-palvelimen välillä on end-to-end salaus-avain. Salausavainta käytetään viesteissä niiden uniikkina allekirjoituksena, joka vahvistaa viestin lähettäjän aitouden. Allekirjoitus sisältyy sarjanumerona radioviestin runkoon. Jokainen viesti lähetetään kolmella eri taajuudella, mikä suojaa radioviestejä mahdolliselta asiattomalta vastaanotolta. Viestin asiattoman vastaanottajan ei ole mahdollista tietää ennakolta millä kaistan taajuudella päätelaite lähettää viestinsä seuraavaksi. UNB-teknologia suojaa myös radioverkon häirinnältä. Koska päätelaitteet toimivat itsenäisesti (määrittävät milloin ja millä taajuudella ne ottavat vastaan viestejä), Sigfox-teknologia suojaa päätelaitteita mahdollisilta asiattomilta downlink-viesteiltä.

Sigfox-tukiasemat ovat point-to-point yhteydessä Sigfox CLOUD-palvelimeen käyttäen VPN-yhteyttä (Virtual Private Network) ja SSL-salausta (Secure Sockets Layer). Skaalautuvat ja tietoturvalliset Sigfox CLOUD-palvelimet sijaitsevat useassa eri paikassa. Asiakkaiden IT-alustat ovat yhteydessä Sigfox CLOUD-palvelimiin HTTPS salauksellisilla rajapinnoilla. [32]



Kuva 3.22. Sigfox-verkon tietoturva havainnollistettuna Sigfox-arkkitehtuurin eri tasoilla. [44, figure 12]

3.3.5 Sigfox-päätelaitteet ja käyttötarkoitukset

Sigfox-operaattoreiden eri maissa ylläpitämät Sigfox-verkot toimivat tyypillisesti maantieteellisesti laajalle alueelle hajautettujen IoT-sovellusten yhteydessä. Sigfox-teknologian hyödyntäminen on edelleen kasvussa. Vuonna 2024 päätelaitteiden määrän arvioidaan ylittävän 1,5 miljardin rajan (kuva 3.23). Sigfox-päätelaitteita hyödynnetään mm. teollisuudessa, kiinteistöissä ja infrastruktuuripalveluissa:

- teollisuuden tuotantolinjat ja niiden tuotantologistiikka,
- älykkäät kaupungit ja rakennukset (smart city/building; esimerkiksi kiinteistö- huolto, energiatehokkuus, liikenne, paikoitus, kulunvalvonta, olosuhdevalvonta),
- julkiset palvelut (esimerkiksi vesi- ja jätehuolto),
- energia- ja vesimittauksiin ja maanviljelyyn (esimerkiksi kasvuolosuhteet).



Kuva 3.23. Arvio vuoteen 2024-mennessä käytössä olevista Sigfox-päätelaitteista eri käyttötarkoituksissa (miljoonina). [44, figure 1]

Valvottavia ja mitattavia asioita voivat olla esimerkiksi: sijainti, tilatieto, etäisyys, liike, nopeus, siirtymä, lämpötila, suhteellinen kosteus, ääni, värinä, kaasut, kemikaalit, kiihtyvyys, kallistus, jännite, vuodot, virtaus, voima, kuorma, vääntö, rasitus, paine ja valo.

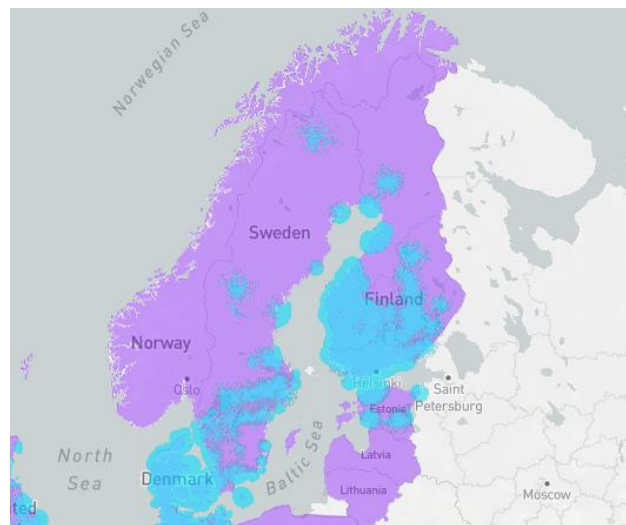
Suomessa Sigfox-operaattorina toimii Connected Finland Oy (<https://www.connectedfinland.fi>), joka toteuttaa kokonaisvaltaisia IoT-projekteja. Päätelaitteiden osalta yrityksen tuotevalikoimaan kuuluu mm. lämpötila-,

kosteus-, TVOC-, PM- ja CO₂-antureilla varustettuja yhdistelmäpäätelaitteita sekä liiketunnistimia ja paine-eroantureita.



Kuva 3.24. Kuva 3.25. Kuva 3.26. Kuva 3.27. Connected Finland:n valmistamia Sigfox-antureita. Vasemmalta oikealle: Connected AirWits, Connected Detectify, Connected PressGuard ja Connected AirWits TVOC. [40]

Kuvissa 3.24-3.27 esitetään eräitä Connected Finland Oy:n edustamia Sigfox-antureita. **AirWits** (kuva 3.24) on itsenäinen lämpötila- ja ilmankosteusanturi sisäkäyttöön. **Detectify** (kuva 3.25) on sisäkäyttöön tarkoitettu liiketunnistin. **PressGuard** (kuva 3.26) on kahden tilan paine-eron mittaamiseen tarkoitettu mittalaite. **AirWits TVOC** (kuva 3.27) mittaa lämpötilan ja kosteuden lisäksi haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaismäärää sisäilmasta.



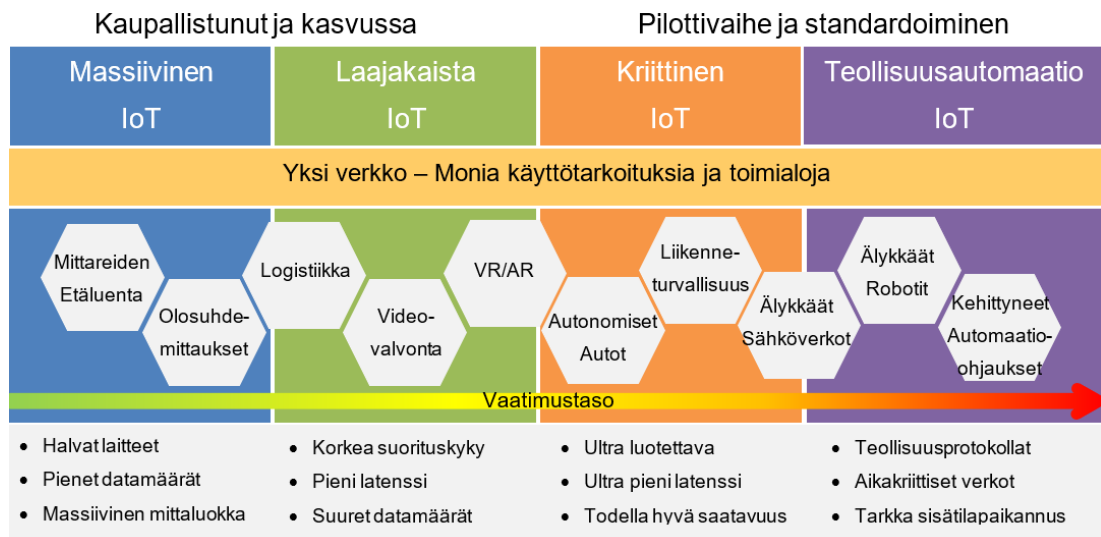
Kuva 3.28. Sigfox-verkon peittoalue Pohjoismaissa 2019 marraskuu. [33]

Sigfox-verkko Suomessa kattaa tällä hetkellä noin 85% väestöstä. Kuvassa 3.28 esitetään Sigfox-verkon peittoalue Suomessa vuonna 2019. Kuva on suuntaa antava. [33] Teknologia kilpailee LoRaWAN ja NB-IoT teknologioiden kanssa. LoRa-tekniikan tavoin Sigfox-tekniikka soveltuu käyttötarkoituksiin, joissa ei ole tarvetta reaaliaikaiseen kaksisuuntaiseen tiedonsiirtoon.

4 MOBIILI IOT

Mobiili IoT (MIoT) tai toiselta nimeltään Cellular IoT (CIoT) tarkoittaa 3GPP (3rd Generation Partnership Project) yhteistyöorganisaation standardoimia IoT-teknologioita, joilla on RAN (Radio Access Network) lisensoituilla LTE tai GSM matkapuhelinverkkojen taajuuksilla ja jatkossa myös 5G taajuuksilla. Cellular-IoT ei rajoitu LPWA-teknologioihin ja siksi yksi matkapuhelinverkko mahdollistaa erilaisia IoT-ratkaisuja moniin erilaisiin käyttötarkoituksiin. Cellular IoT voidaan jakaa segmentteihin (kuva 4.1) joista vain osa on tällä hetkellä kaupallistettuja tai standardoituja. Cellular IoT:n neljä segmenttiä ovat seuraavat käyttötarkoitukset:

- **Massive IoT** (Massiivinen IoT, joka sisältää esimerkiksi LPWA-teknologiat)
- **Broadband IoT** (Laajakaista IoT, joka sisältää esimerkiksi LTE Broadband IoT ratkaisut)
- **Critical IoT** (Kriittinen IoT, joka sisältää esimerkiksi 5G-teknologiat)
- **Industrial Automation IoT** (Teollisuusautomaatio IoT, joka sisältää esimerkiksi teollisuuden ratkaisut) [50]



Kuva 4.1. Cellular IoT-segmentit. Nuoli kuvastaa vaatimustason nousua mitä enemmän käyttötarkoitus sijoittuu segmenteissä oikealle.

Critical IoT ja Industrial Automation IoT ratkaisut ovat tällä hetkellä (2019) pilot-vaiheessa ja niiden käyttötarkoituksia koskevien teknologioiden standardoiminen on edelleen kesken. [50]

4.1 LTE:n kehittyminen LPWA-teknologioiden hyödynnettäväksi

Vuonna 2015 GSMA (Global System for Mobile Communications Association) käynnisti mobile IoT-hankkeen, joka tähtäsi vakioituihin LPWA-pohjaisiin IoT-ratkaisuihin machine-to-machine (M2M) tyyppiselle kommunikoinnille lisensoituilla radiotaajuuksilla. [45] Tämän IoT-hankkeen tuloksena markkinoille on saatu kolme 3GPP:n standardoimaa LPWA-teknologiaa:

- **Narrowband-IoT** (NB-IoT, LTE-Cat NB1, LTE-Cat NB2)
- **LTE Machine Type Communications** (LTE-MTC, eMTC, LTE-Cat M1, LTE-Cat M2 ja LTE-Cat 0)
- **Enhanced Coverage GSM IoT** (EC-GSM-IoT)

EC-GSM-IoT pohjautuu GSM-teknologiaan ja NB-IoT ja LTE-M kuuluvat niin sanottuihin LTE IoT-teknologioihin. Ne hyödyntävät teleoperaattoreiden olemassa olevia matkapuhelinverkkoja ja tämä nopeuttaa niihin perustuvien IoT-ratkaisujen kaupallistamista. Matkapuhelinverkkojen hyödyntämistä eivät koske myöskään lisensoimattomia ja avoimia ISM-taajuuksia koskevat rajoitukset. Mobiili-IoT on skaalautuva ja pitkällä aikavälillä toimintavarma ja laajasti tunnettu teknologia. NB-IoT ja LTE-M LPWA-teknologiat tulevat tukemaan jatkossa myös 5G-teknologiaa. [45] Matkapuhelinverkkopohjaiset IoT-ratkaisut ovat tulevaisuudessa keskeisessä roolissa langattomiin tiedonsiirto-teknologioihin perustuvissa IoT-ratkaisuissa.

3GPP (3rd Generation Partnership Project) yhteistyöorganisaation LTE:tä koskevien standardien kehittäminen yhteensopivammaksi LPWA-teknologiaa varten on edesauttanut Cellular IoT-ratkaisuiden kaupallistamista. Standardoidut IoT-teknologiat ovat päässeet LPWA-teknologioiden tavoitteisiin, joita ovat mm.:

- pariston pitkä elinikä
- laitteiden kilpailukykyinen hinta
- laitteiden teknologian yksinkertaisuus
- laitteiden helppo käyttöönotto
- signaalin pitkä kantama
- järjestelmän skaalautuvuus
- liikuteltavuus suurilla nopeuksilla (ei välttämätön vaatimus)

Jotta tavoitteisiin päästään, olemassa olevien matkapuhelinverkkojen tulee olla yhteensopivia teknisesti yksinkertaisempien ja hinnaltaan edullisimpien päätelaitteiden kanssa. Tavoitteena on päätelaitteiden tehonkulutuksen vähentäminen, signaalin pitkä kantama ja hyvä kuuluvuus sisätiloissa ja haja-asutusalueilla kuten maaseudulla. [46]

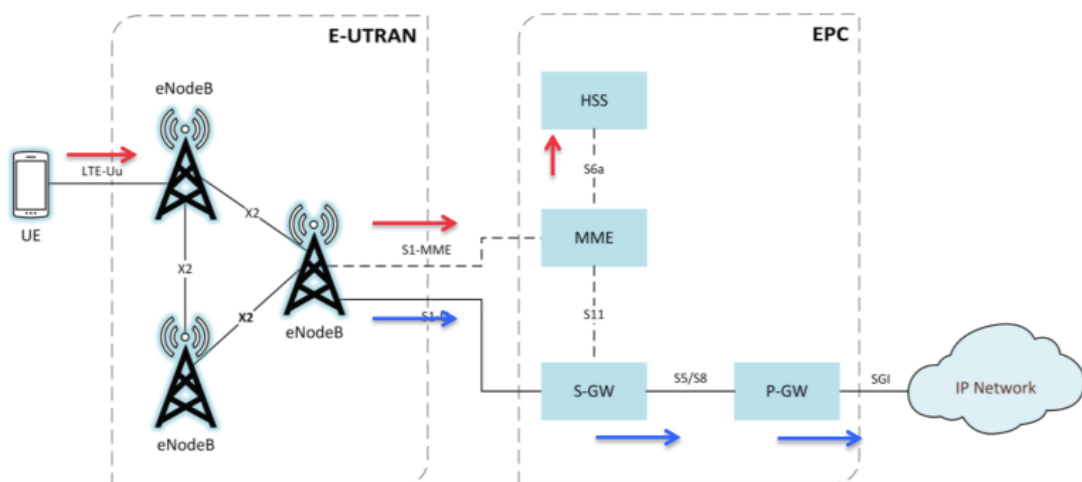
Kappaleessa 4.2 sivutaan LTE:n arkkitehtuuria ja protokollaa NB-LoT-teknologian esittelyn yhteydessä. Tässä työssä mobiiliverkon IoT-ratkaisujen esittelyssä painotetaan NB-LoT teknologiaa, jonka arvioidaan olevan tällä hetkellä yleisimmin IoT-ratkaisuissa sovellettavaa LTE-teknologiaa Suomessa.

4.2 NB-IoT

NB-IoT on 3GPP yhteistyöorganisaation standardoima matkapuhelinverkko-pohjainen (CIoT, Cellular IoT) LPWAN-teknologia. Standardi keskittyy sisätilojen langattomiin IoT-yhteyksiin, kapeaan kaistanleveyteen, yhteyden edullisempaan hintaan ja päätelaitteiden paristojen pitkään elinikään. Lyhenne NB-IoT muodostuu sanoista Narrowband Internet of Things. NB-IoT toimii lisensoituilla matkapuhelinverkkojen taajuuksilla ja standardi rajoittaa kaistanleveyden 200 kHz. NB-IoT-ratkaisuja tarjoavat pääasiassa teleoperaattorit, joiden verkkojen tukiasemat ovat päivitetty tukemaan NB-IoT-teknologiaa.

4.2.1 NB-IoT-verkon arkkitehtuuri ja protokolla

NB-IoT-verkon arkkitehtuuri on sama kuin 4G/LTE verkossa, mutta ominaisuuksiltaan NB-IoT-verkko sisältää vain osan LTE toiminnallisuuksista. Verkko koostuu NB-IoT päätelaitteista (UE, User Equipment), NB-IoT:tä tukemaan päivitetystä eNodeB tukiasemista (E-UTRAN, Evolved Universal Terrestrial Radio Access) ja internettiin yhdistyvästä ydinverkosta (EPC, Evolved Packet Core). LTE-teknologiaan pohjautuvan NB-IoT käyttöönoton ja hyödyntämisen voidaan arvioida olevan teknisesti ja sovellusten osalta helpompaa ja nopeampaa kuin kilpailevien LPWAN-teknologioiden. [20]

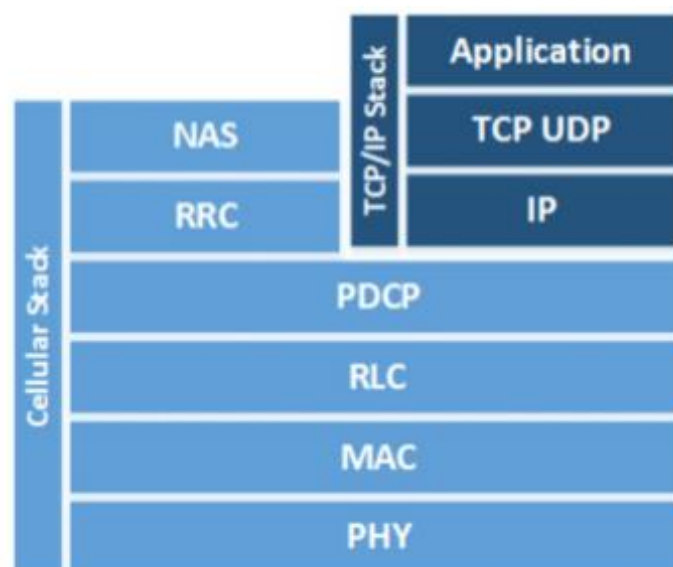


Kuva 4.2. Yksinkertaistettu kuva LTE-arkkitehtuurista. [22]

SIM-kortilliset NB-IoT päätelaitteet ovat tunnistettavissa ja yhteydessä tukiasemiin. Tukiasemista koostuva mesh-tyyppinen E-UTRAN-verkko demoduloi päätelaitteiden radiosignaaleja ja lähettää niistä muodostettuja ja generoituja IP-datapaketteja edelleen ydinverkolle. Vastaavasti tukiasemat moduloivat sekä lähettävät ydinverkolta tulevat IP-paketit päätelaitteille radiosignaaleina. X2 Interface tarkoittaa tukiasemien välisiä yhteyksiä keskenään. Ydinverkko käsittää:

- **HSS** (Home Subscriber Server)
- **MME** (Mobility Management Entity)
- **S-GW** (Serving Gateway)
- **P-GW** (Packet Data Gateway)

Ydinverkon HSS säilyttää käyttäjien tunnuksia ja kriittisimmät turvallisuustiedot. MME ei kommunikoi käyttäjäliikenteen kanssa vaan se tallentaa laitteiden tietoja, luo väliaikaisia ID:tä, lähettää sivuja, valvoo todennuksia, ja valitsee käytettävän S-GW:n ja P-GW:n. S-GW on tiedonsiirron reititin eNodeB:n ja P-GW:n välillä, joka siirtää käyttäjien dataa ja ankkuroi käyttäjien laitteet eNB-tukiasemiin. P-GW on reititin, joka varaa IP-osoitteita ja ohjaa datapaketteja. P-GW yhdistää matkapuhelinverkon TCP/IP-verkkoon. [22]



Kuva 4.3. LTE-protokollapino. [22]

4.2.2 NB-LoT-verkon suorituskyky

NB-LoT-päätelaitteet käyttävät tiedonsiirrossa lisensoituja matkapuhelinverkon taajuuksia. Päätelaitteiden käytössä oleva kapea 200 kHz kaistanleveys voidaan sijoittaa kolmella eri tavalla operaattorin matkapuhelinverkon taajuusalueelle:

- muiden taajuuksien seassa eli ”**in-band**”
- muiden taajuuksien välissä varokaistoilla eli ”**guard-band**”
- muista taajuuksista erillään eli ”**standalone**”.



Kuva 4.4. NB-LoT kaistan sijoitus LTE-kaistalle tai GSM-kaistalle (Stand alone). [24]

In-band ja guard-band sijoitukset ovat yleisimpiä. In-band sijoituksella NB-LoT varaa taajuusalueesta käyttöönsä 180 kHz yhden tai useamman LTE:n fyysisestä resurssilohkosta (PRB, Physical Resource Block). Guard-band sijoituksella NB-LoT voidaan sijoittaa häiriöiden estoon tarkoitettulle alueelle, jota LTE ei voi hyödyntää muuhun tarkoitukseen. Tämä tapa ei vähennä yhtään LTE:n kapasiteettia. Standalone tavalla NB-LoT sijoittuu yhdelle erilliselle GSM kaistalle. [20]

NB-LoT käyttää LTE:n tapaan tiedonsiirrossa OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) modulaatiota viestien vastaanottamiseen ja SC-FDMA (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access) modulaatiota viestien lähettämiseen.

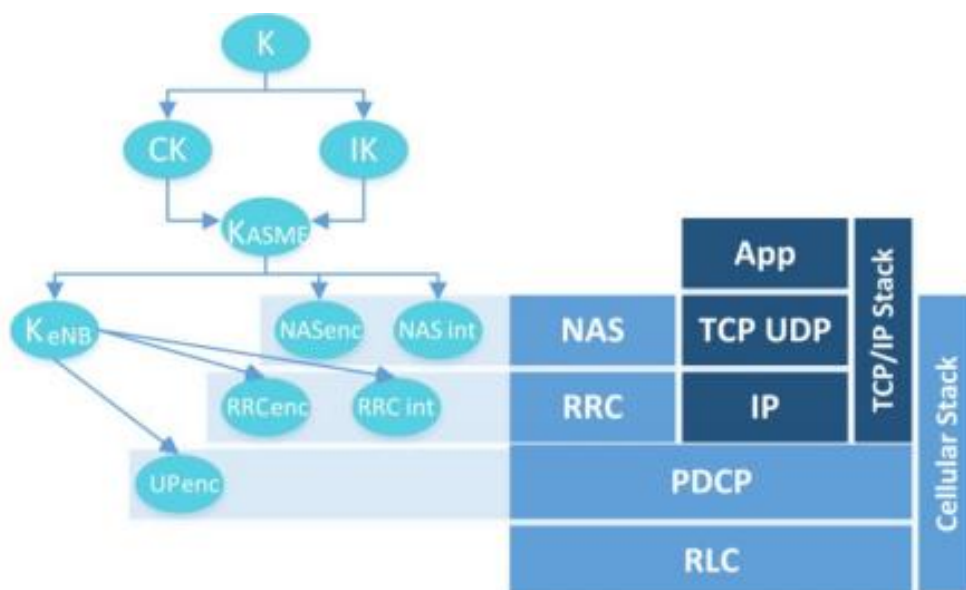
NB-LoT tiedonsiirto toimii parhaiten alueilla, joissa on hyvä 4G-kuuluvuus. Esimerkiksi taajama-alueet ovat NB-LoT-tekniikan potentiaalisia soveltamisalueita [12]. NB-LoT-signaalin tiedonsiirtonopeuden ja signaalin lävistyskyvyn

ansiosta sen kuuluvuus kattaa yleensä sisätilat jopa monen seinän läpi. Tämä on joidenkin IoT-sovellusten kannalta välttämätöntä. Esimerkiksi vesi- ja kaasumittareiden etäluenta rakennusten kellarikerroksissa tai teknisissä tiloissa edellyttää, että radiosignaaliin lävistysteho on riittävä, jotta päätelaitteen vastaanotin ja lähetin pystyvät keskustelemaan tukiasemien kanssa. [20]

NB-IoT on suunniteltu tukemaan noin 100000 – 200000 päätelaitetta kullakin matkapuhelinverkon 200 kHz kaistalla. NB-IoT-verkoissa tiedonsiirtonopeus on esimerkiksi LoRaWAN- ja Sigfox-verkkoja parempi ja lähetettyjen viestien määrä on rajaton vuorokaudessa (duty cycle). [20]

4.2.3 NB-IoT-verkon tietoturvaluisuus

NB-IoT on matkapuhelinverkkopohjainen LPWAN-teknologia sisältää LTE:n tietoturvaluisuusominaisuudet. Salausavain sisältyy jokaiseen NB-IoT SIM-korttiin ja avainta käytetään verkon ja päätelaitteen välisenä yksilöivänä tunnisteenä. Sen avulla myös luodaan jatkuvasti päivittyvät pakettien salaamiseen tarkoitettua ns. sessionavaimet laitteen ja ydinverkon välillä. [20]. NB-IoT on tietoturvaluisuuden osalta useimpiin käyttötarkoituksiin hyvin soveltuva teknologia.



Kuva 4.5. LTE-salausavaimien sijainnit protokollassa. [22]

Ilmarajapinta (Air Interface) ja runkoliityntäyhteys (Backhaul) ovat myös suo-
jattuja. Ilmarajapinnaksi kutsutaan päätelaitteen ja eNodeB tukiaseman välistä
radioyhteyttä. Sitä suojaa kolme algoritmia: SNOW 3G, AES ja ZUC, jotka nou-
dattavat 3GPP määrittelemiä standardeja ja joita käytetään tiedonsiirron luot-
tamuksellisuuden ja eheyden suojaamisessa. [22]

Runkoliitäläyhteys voidaan suojata S1 Interface eNodeB:n ja SEG (Security
Gateway) välille IPSEC (Internet Protocol Security) tunnelin avulla. IPSEC to-
dentaa ja salaa siirrettävän datan. [22] Kyberturvallisuuden merkitys IoT-pal-
veluissa tulee korostumaan. Esimerkiksi ETSI (Internet Standard organisaat-
tion) on keväällä 2019 julkaissut uuden standardin, jossa otetaan kantaa myös
GDPR:n asettamiin reunaehtoihin.

4.2.4 NB-IoT-päätelaitteet

NB-IoT ja LTE ovat 3GPP-yhteistyöorganisaation määrittelemiä standardeja ja
siksi ohjelmistopäivitys LTE-tukiasemaan riittää NB-IoT-tekniologian
tukemiseksi. Koska NB-IoT-pääteläitevalmistajia on niin monia, kilpailun
arvioidaan pitävän tekniologian hinnat kilpailukykyisinä samalla, kun NB-IoT-
laitteiden kehitystyö uusin käyttötarkoituksiin on aktiivista. NB-IoT-
pääteläitteiden paristojen eliniäksi on arvioitu jopa 10-15 vuotta. [20]

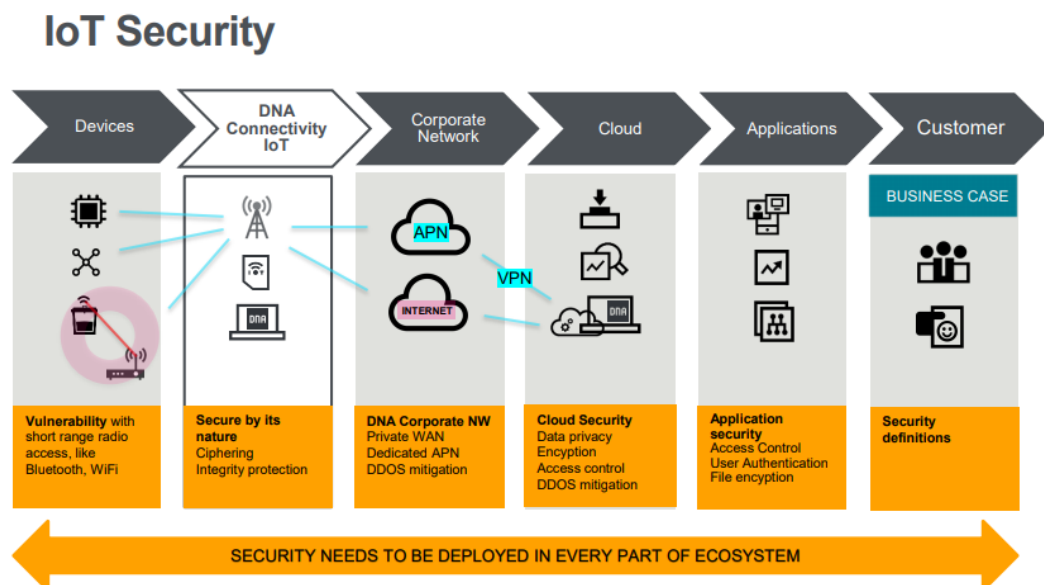


Kuva 4.6. Efento:n valmistama NB-IoT sensori lämpötilan ja kosteuden mit-
taamiseen. [41]

Suomessa Telia päivitti keväällä 2018 kaikki tukiasemansa tukemaan NB-IoT:ta osana matkapuhelinverkkoa. Myös Elisalla ja DNA:lla on NB-IoT-valmius. NB-IoT-markkinoiden kehityksen voi arvioida olevan nyt nopeampaa, koska kaikki teleoperaattorit ovat ottaneet tuotevalikoimaansa NB-IoT teknologiaan perustuvia palveluita. Pohjoismaissa NB-IoT hyödyntäminen on edennyt nopeasti esimerkiksi sähkömittareiden etäluennassa. NB-IoT ei edellytä internetiä, joten sillä on sovelluksia myös kehittyvissä maissa, joissa tietoliikenneverkot eivät ole vielä kehittyneet. NB-IoT on nopea tapa ottaa mobiiliverkon IoT-käyttöön.

4.3 APN

APN eli Access Point Name on yhdyskäytävä johon yritysverkon (VPN, Virtual Private Network) päätelaitteet yhdistyvät. APN koostuu kahdesta osasta: verkon tunnisteesta operaattorin tunnisteesta. Mobiiliverkon operaattori varmentaa tunnisteet ja yhdistää laitteen niiden perusteella oikeaan verkkotyyppiin tiettyillä APN asetuksilla. Operaattorin verkon rakenne vaikuttaa siihen mihin APN asetuksiin asiakas voi vaikuttaa itse.

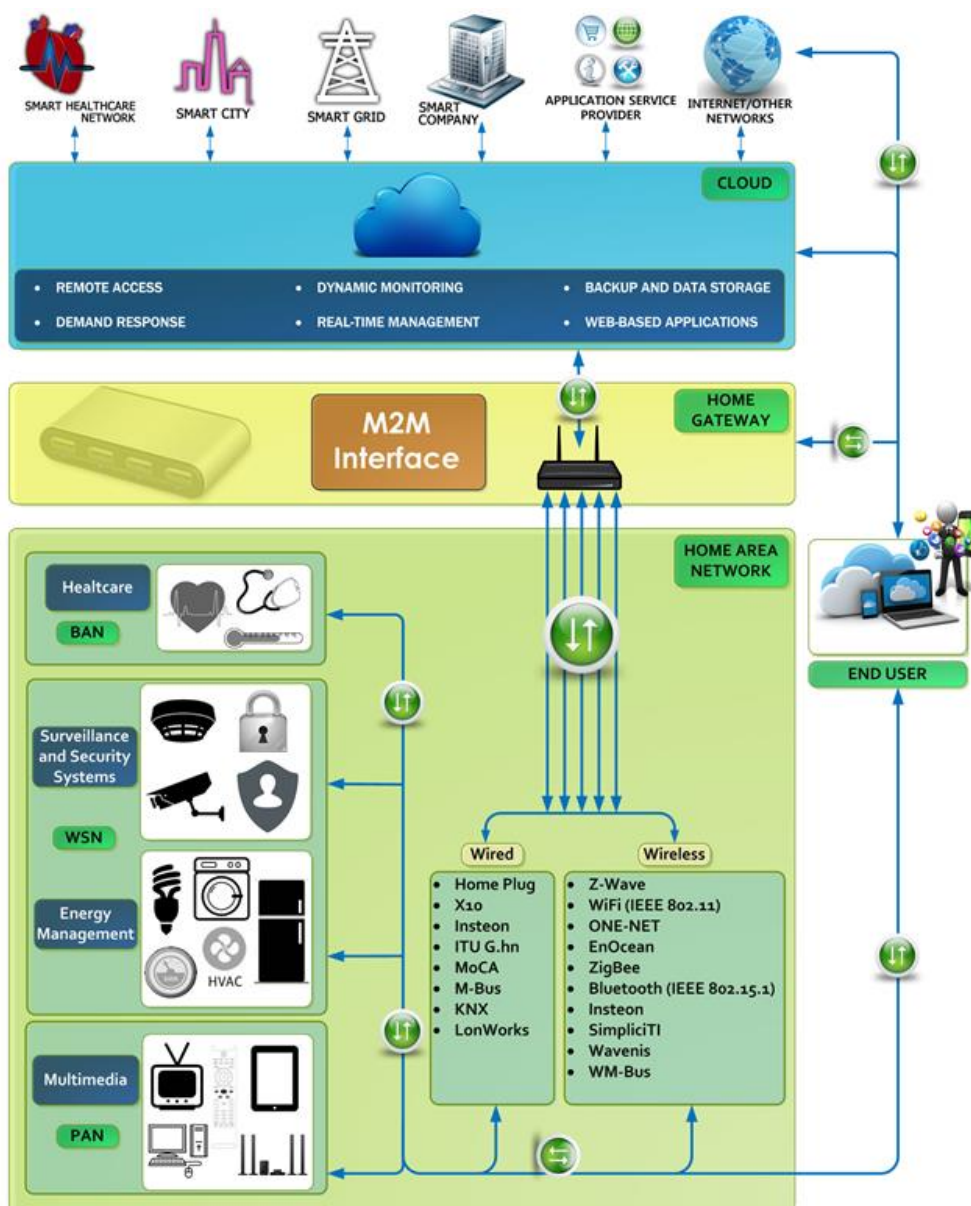


Kuva 4.7. DNA:n turvallisuuskäytäntö asiakkaan APN yhteyden muodostamiseksi. [79]

Ilman yritysverkkoa APN on jaettu ja internetin kautta yhteydessä pilvipalvelimeen.

5 KIINTEISTÖ- JA TALOAUTOMAATION IOT-VERKOT

Pitkänkantaman langattomien verkkoteknologioiden lisäksi monissa kiinteistö ja talokohtaisissa IoT- ja automaatoratkaisuissa (älykoti, smart home) sovelletaan laajasti ns. lyhyenkantaman langattomia verkkoteknologioita. Näitä laajasti kaupallisesti sovellettuja verkkoteknologioita ovat mm. Bluetooth, WiFi Halow, Zigbee, KNX, Wirepas, DASH7, EnOcean, Wireless MBus sekä Thread. LoRa- ja Sigfox-tekniologioiden tavoin ne kaikki hyödyntävät lisensoimattomia ISM-radiotaajuuksia.



Kuva 5.1. periaatekuva taloautomaatiosta osana laajempaa äly- ja IoT-kontekstia. [76]

Lyhyenkantaman teknologioita ja protokollia käytetään yleisesti kiinteistö- ja taloautomaatiojärjestelmissä ja niitä sovelletaan osin myös väyläratkaisuna (esimerkiksi KNX). Lyhyenkantaman langattomia teknologioita ei luokitella LPWAN-teknologioiksi, vaikka niillä on vastaavia teknisiä ominaisuuksia kuten päätelaitteiden matala tehonkulutus ja ISM-radiotaajuudet. Lyhyen- ja pitkänkantaman LPWAN-teknologioiden erona on yleensä se, että lyhyenkantaman langaton verkko rakentuu paikallisen kiinteistökohtainen tukiaseman varaan ja verkon radiosignaalin kantamat vaihtelevat tyypillisesti muutamista metreistä muutamiin satoihin metreihin. Lyhyenkantaman protokollat noudattavat yleensä IEEE:n standardeja poikkeuksena esimerkiksi EnOcean. Lyhyenkantaman verkot soveltuvat kiinteistöissä myös nopeutta edellyttävien prosessien kuten ilmanvaihdon, valaistuksen tai lämmityksen ohjaukseen ja valvontaan. Lyhyenkantaman verkkojen merkitys on kasvava kiinteistö- ja taloautomaatiojärjestelmien ja niihin perustuvien web-pohjaisten etäratkaisujen yleistyessä. Lyhyenkantaman verkkoja hyödynnetään myös erilaisissa hajautetuissa energian tuotanto- ja tehokkuusratkaisuissa. Kohdissa 5.1 - 5.9 esitellään eräitä yleisimpiä lyhyenkantaman verkkoteknologioiden ominaisuuksia.

5.1 Bluetooth

Bluetooth on standardi lyhyenkantaman langattomalle tiedonsiirrolle 2.4 - 2.485 GHz ISM-radiotaajuuksilla. Bluetooth muodostaa langattoman yhteyden joko liikkuvien tai staattisten verkko- ja päätelaitteiden välille noin 10-100 m etäisyyksillä toimintaympäristön mukaan (ympäristön rakenteet ja materiaalit vaikuttavat kantamaan). Bluetooth-teknologialla toteutettu verkko on PAN eli Personal Area Network. Bluetooth-teknologia perustuu IEEE 802.15.1 standardiin. IEEE:n luovuttua ylläpidosta standardia ylläpitää 30000 jäsenyrityksen muodostama Bluetooth Special Interest Group (SIG), joka valvoo standardin kehityksen suuntaa. [52] Tällä hetkellä käytössä on kaksi Bluetooth-radioteknologiaa:

- Bluetooth Low Energy (LE) ja
- Bluetooth Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR)

Energiätehokkaampi Bluetooth Low Energy hyödyntää taajuushyppelyä, joka käsittää yli 40 kanavaa. Bluetooth LE tukee monia eri verkkotopologioita kuten point-to-point, broadcast- ja mesh-topologioita. Bluetooth LE on ominaisuuksiltaan joustava ja se tarjoaa vaihtoehtoja fyysiselle-tasolle ja tietoturvalle, tiedonsiirtonopeudelle (125 kB/s – 2 Mb/s) ja tehonkulutukselle (1 – 100 mW). Bluetooth BR/EDR on myös energiatehokas ja käyttää 79-kanavaista taajuushyppelyä. Bluetooth BR/EDR tukee monia vaihtoehtoisia fyysisiä tasoja ja tietoturvallisuuden toteutustapoja, parempaa tiedonsiirtonopeutta (1 – 3 Mb/s) ja LE:tä vastaavaa tehonkulutusta (1 – 100 mW). BR/EDR tukee vain point-to-point-topologiaa, joka on optimoitu äänen suoratoistolle. [51]

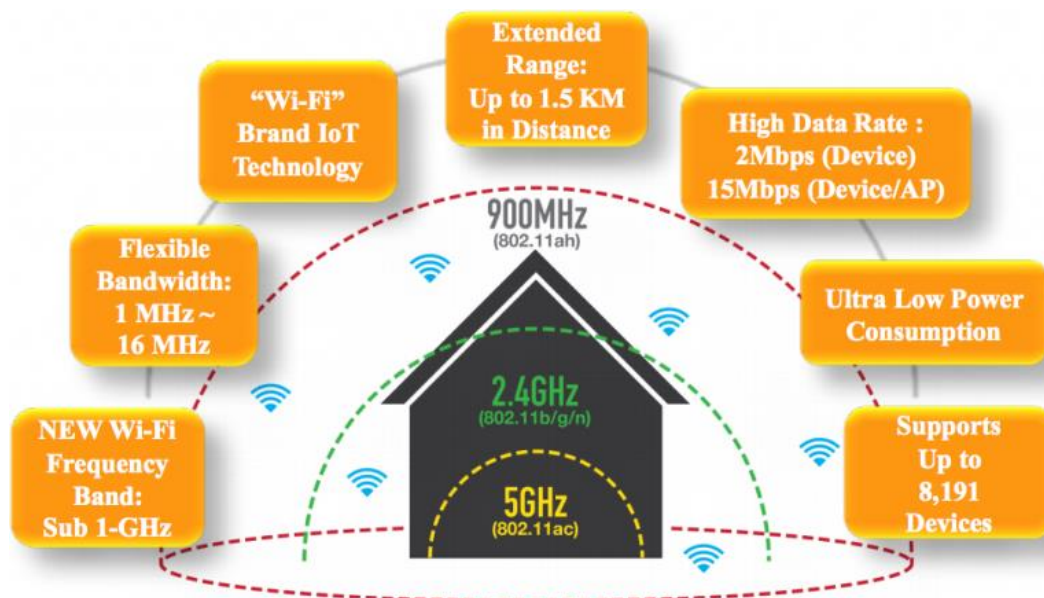
Kuvassa 5.2 on esitetty eräitä Bluetooth-radioteknologian teknisiä ominaisuuksia. Viihde-elektronikan ja mm. matkapuhelimien ja muiden henkilökohtaisten elektronisten laitteiden (esim. älykellot, kuulokkeet, kamerat jne.) lisäksi teknologiaa sovelletaan mm. taloautomaatiojärjestelmissä (esim. huonelämpötilamittaukset).

	Bluetooth Low Energy (LE)	Bluetooth Basic Rate/ Enhanced Data Rate (BR/EDR)
Optimized For...	Short burst data transmission	Continuous data streaming
Frequency Band	2.4GHz ISM Band (2.402 – 2.480 GHz Utilized)	2.4GHz ISM Band (2.402 – 2.480 GHz Utilized)
Channels	40 channels with 2 MHz spacing (3 advertising channels/37 data channels)	79 channels with 1 MHz spacing
Channel Usage	Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS)	Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS)
Modulation	GFSK	GFSK, $\pi/4$ DQPSK, 8DPSK
Power Consumption	~0.01x to 0.5x of reference (depending on use case)	1 (reference value)
Data Rate	LE 2M PHY: 2 Mb/s LE 1M PHY: 1 Mb/s LE Coded PHY (S=2): 500 Kb/s LE Coded PHY (S=8): 125 Kb/s	EDR PHY (8DPSK): 3 Mb/s EDR PHY ($\pi/4$ DQPSK): 2 Mb/s BR PHY (GFSK): 1 Mb/s
Max Tx Power*	Class 1: 100 mW (+20 dBm) Class 1.5: 10 mW (+10 dBm) Class 2: 2.5 mW (+4 dBm) Class 3: 1 mW (0 dBm)	Class 1: 100 mW (+20 dBm) Class 2: 2.5 mW (+4 dBm) Class 3: 1 mW (0 dBm)
Network Topologies	Point-to-Point (including piconet) Broadcast Mesh	Point-to-Point (including piconet)

Kuva 5.2. Bluetooth radioteknologioiden tekniset-tiedot. [51]

5.2 Wi-Fi HaLow

Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah) on vuonna 2017 julkaistun Wi-Fi-protokollan standardi energiatehokkaalle pitkänkantaman Wi-Fi-verkolle. Se on ensimmäinen Wi-Fi standardi, joka on tarkoitettu erityisesti IoT-ratkaisuihin. Tämä alle yhden gigahertsin taajuusalueella toimiva Wi-Fi mahdollistaa pienemmän tehonkulutuksen päätelaitteet kuten anturit. Wi-Fi HaLow-verkon kantama on noin kaksinkertainen ja signaalin läpäisykyky parempi ns. normaaliin Wi-Fi-verkkoon verrattuna. Vahvan tietoturvan ja helpon käyttöönoton osalta Wi-Fi HaLow vastaa muita yleisesti tunnettuja Wi-Fi-protokollia. Energiatehokkuudeltaan Wi-Fi HaLow kilpailee mm. Bluetooth-tekniikan kanssa, mutta mahdollistaen kuitenkin nopeamman ja jopa kilometritason tiedonsiirron ja mesh-topologian hyödyntämisen. Kuvassa 5.3 esitetään Wi-Fi HaLow-tekniikan keskeisiä teknisiä ominaisuuksia.



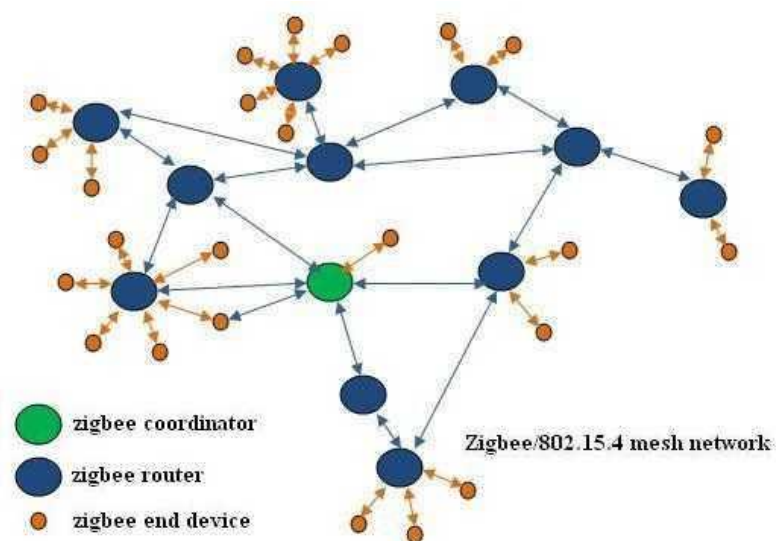
Kuva 5.3. IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow) tekniset-tiedot. [54]

Tyypillisiä Wi-Fi HaLow-tekniikan käyttötarkoituksia ovat mm. sensoriverkot, puettavat laitteet, teollisuusautomaatio, energiamittareiden luenta ja pitkänkantaman WLAN kotikäyttö. Tyypillisiä asiakkaiden päätelaitteita laitteita ovat mm. erilaiset lämpötila- ja kosteusanturit, termostaatit, älyrannekellot, hoitolaitteet, teollisuuslaitteiden ohjaimet, pinnankorkeusmittarit, älypuhelimet ja tabletit.

5.3 Zigbee

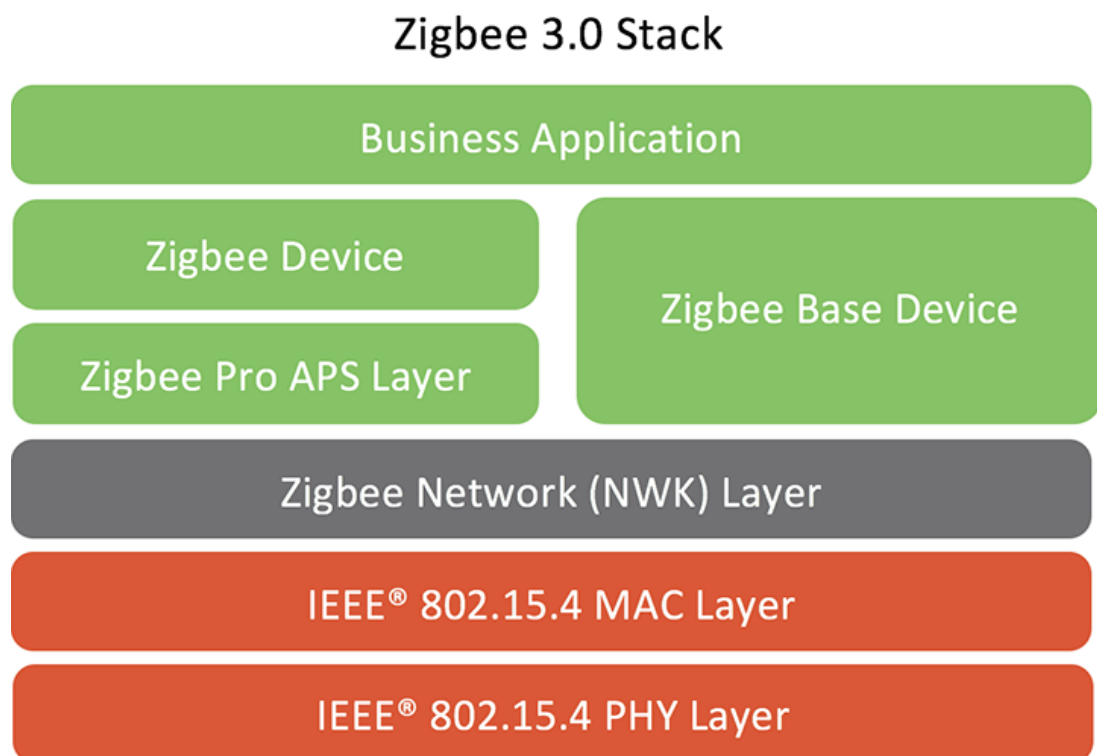
Zigbee on Zigbee Alliancen kehittämä langaton tiedonsiirtoprotokolla IEEE 802.15.4 standardin mukaisille PAN-verkoille. Zigbee-teknologia on kustannustehokas ja sitä hyödynnetään esimerkiksi kiinteistö- ja taloautomaatiossa. Verkon kantama on tyypillisesti noin 10-100 m. Zigbee voi käyttää kaikkia IEEE 802.15.4 standardin tukemia lisensoimattomia ISM-radiotaajuuksia (868 MHz, 902 MHz, 928 MHz ja 2.4 GHz). Protokollaa ei ole tarkoitettu mobiiliopeeraattoreiden käyttöön. Zigbee on suunniteltu mahdollistamaan IEEE 802.15.4 standardin mukaisten radioiden muodostama mesh-verkko (kuva 5.4), jota standardi ei normaalisti määrittele. [55] Zigbee-protokollaa hyödyntävät laitteet voivat olla:

- koordinaattoreita (master), jotka tallentavat verkon tietoja ja määrittelevät parhaat tiedonsiirtoreitit minkä tahansa kahden pisteen välillä (verkossa voi olla vain yksi koordinaattori),
- reitittäjiä/toistimia (full function device), jotka välittävät tietoja muilta laitteilta ja
- päätelaitteita (reduced function device), joiden toiminta on minimoitu kommunikointiin reitittimen tai koordinaattorin kanssa (pätelaitte ei pysty välittämään muiden laitteiden viestejä). [55]



Kuva 5.4. Zigbee verkon arkkitehtuuri. [73]

Zigbee käyttää IEEE 802.15.4 standardia määrittääkseen verkon fyysisen- ja MAC-tason (taajuudet, kaistanleveyden ja modulointitavan). Kuvassa 5.5 esitetään Zigbee-verkkoteknologian protokollapino. Tietoturvallisuus toteutetaan AES-128 salauksella. [56] Tiedonsiirtonopeus on 250 kb/s sekä lähetyksissä että vastaanotoissa. Sisätiloissa viestien kantama on 75-100 m ja ulkona noin 300 m. Verkon maksimi kapasiteetti on 65 000 päätelaitetta. Jokainen yksittäinen päätelaite tukee kommunikoinnissa 240 muuta päätelaitetta. Zigbee-verkko pystyy itse korjaamaan toimintaansa esimerkiksi huonon yhteyden tai toimimattoman laitteen varalta. [57].



Kuva 5.5. Zigbee-protokollapino. [56]

Tyypillisiä Zigbee käyttötarkoituksia taloautomaatiossa ovat mm. valaistuksen, ilmastoinnin, turvajärjestelmien ja esimerkiksi sädekaihdinten ja markiisien ohjaukset

5.4 KNX

KNX on kansainvälinen avoin standardi rakennusautomaatiolle, joka perustuu EN 50090 ja ISO/IEC 14543 standardeihin. KNX-teknologiaa on saatavissa sekä langattomana että väyläratkaisuna. KNX:sää voidaan käyttää kiinteistö- ja taloautomaatiossa esimerkiksi valaistuksen, ilmastoinnin ja turvallisuusjärjestelmien ohjauksissa. KNX-teknologia on muotoutunut kolmesta aikaisemmasta IEEE:n standardista:

- **European Home Systems Protocol (EHS)**, EHSA
- **European Installation Bus (EIB or Instabus)**, EIBA
- **BatiBUS**, BCI [59]

Näiden standardien omistajayhdistykset perustivat KNX Association vuonna 1999 ja he omistavat KNX standardin ja KNX-logon. KNX Association on voittoa tavoittelematon organisaatio, jota valvoo Belgian laki. [59]



Kuva 5.6. KNX käyttötarkoitukset. [61]

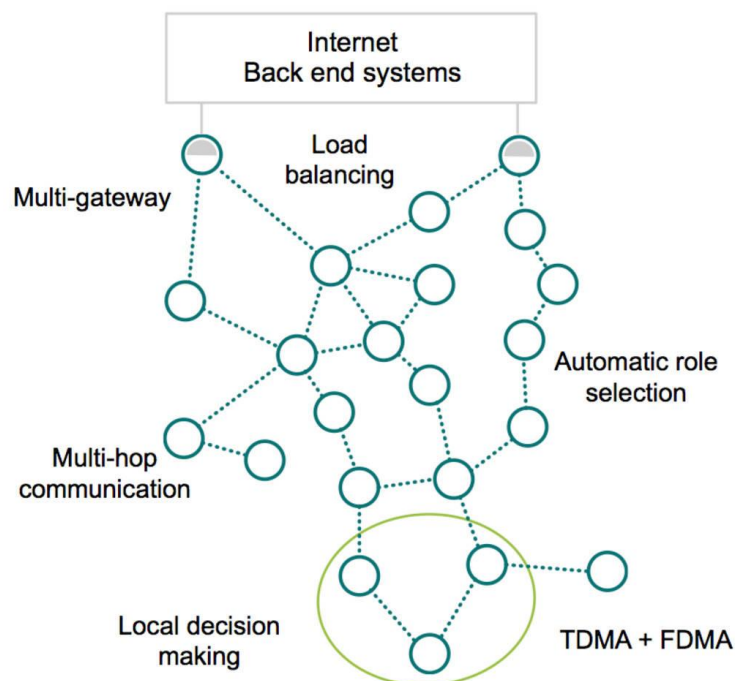
Johdotetut KNX-laitteet ovat yhdistetty parikaapeliväylällä, valokaapelilla, langattomasti tai normaalilla sähköverkon kaapeloinnilla. Väyläteknikassa laitteet kommunikoivat keskenään ilman keskitettyä tietokonetta. Laitteet, kuten anturit ja ilmaisimet antavat komentonsa ohjausväylän kautta toimilaitteille.

Toimilaitteet suorittavat talon toiminnot kuten lämmityksen ja jäähdytyksen. KNX-järjestelmiä ohjataan kytkimillä, ohjauspainikkeilla tai matkapuhelimilla. [58]

KNX-protokollan osalta harvinaisempia tiedonsiirtoratkaisuita ovat radiotaajuudet, Ethernet, valokuitu ja sähköverkon kantoaallot. Joidenkin valmistajien yhdyskäytävillä on mahdollista yhdistää KNX muihin ohjausprotokolliin kuten DALI. KNX on myös ollut tekemisissä ylemmän tason hallintaprotokollien kanssa, kuten BACnet jotta näiden yhteistyö olisi tarvittaessa mahdollista. [60]

5.5 Wirepas Mesh

Wirepas Mesh on Tampereen Teknisessä Yliopistossa kehitetty langaton keskittämätön verkkoarkkitehtuuri ja ohjelmistoprotokolla IoT-laitteille. Kaikki Wirepas Mesh verkon laitteet pystyvät muodostamaan oman optimaalisen tiedonvälitysratkaisunsa (reititys) paikallisesti vallitsevien radio-olosuhteiden mukaan. Koska ohjelmiston arkkitehtuuri on keskittämätön, Wirepas Mesh mahdollistaa luotettavan ja hyvän kuuluvuuden tiedonsiirrolle isoillakin pinta-aloilla. [63]



Kuva 5.7. Wirepas Mesh-verkon arkkitehtuuri. [62]

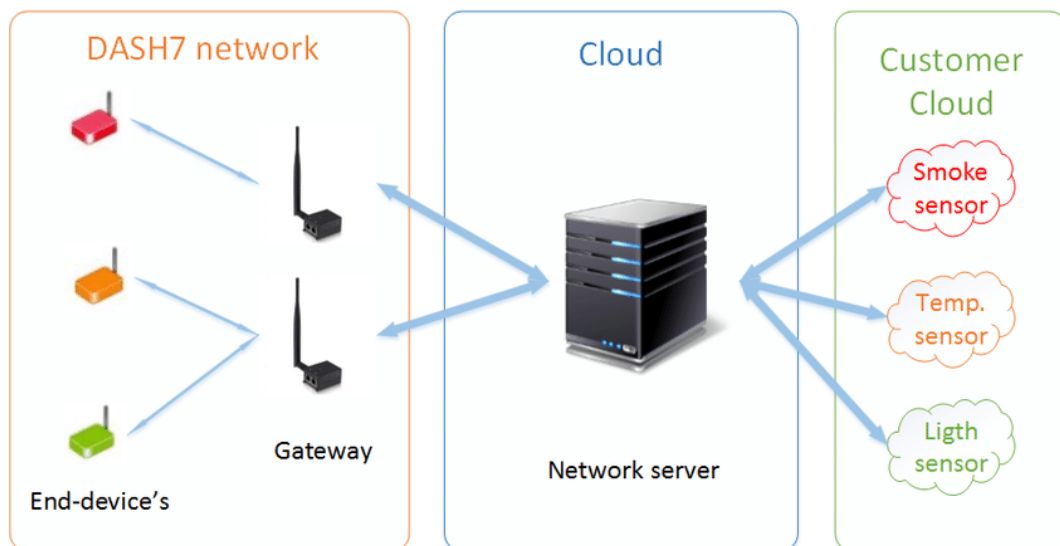
Wirepas Mesh-verkkojen suorituskyky perustuu autonomisten laitteiden tekemien välitysreittien valintoihin, jotka ottavat huomioon vallitsevat radio-olosuhteet ja tarvittavan tiedon lähetys- tai välitystehon. Wirepas-päätelaite voi välittää viestinsä pilvipalvelimelle ja takaisin monen muun päätelaitteen kautta. Toisin kuin esimerkiksi Zigbee-verkossa, Wirepas-päätelaitteet eivät tarvitse erikseen määritettyjä rooleja, vaan kaikki laitteet toimivat toistensa viestien välittäjinä olosuhteiden mukaan. Jos jokin päätelaitteista menettää toimintakykynsä tai sen yhteys on epäluotettava, verkko pystyy korjaamaan itsensä ja vaihtamaan viestien välitysreittiä. Wirepas Mesh tukee useita kommunikointiprotokollia ja eri valmistajien radiolaitteistoja ja -moduuleita. Se on yhteensopiva esimerkiksi Bluetooth Low Energy:n yhteydessä. Lisäverkon konfiguraatio voidaan muokata ohjelmiston parametreilla esimerkiksi vaadittuun kaistanleveyteen, latenssiin, kantamaan ja energiankulutukseen. Wirepas Mesh tukee alle GHz sekä 2.4 GHz taajuuksia. [63]

Wirepas Mesh:iä käyttäviä päätelaitteita voi olla kussakin verkossa rajaton määrä. Ohjelmiston lisenssiä myydään useille moduuli- ja radiovalmistajille. Wirepas Mesh-ohjelmisto mahdollistaa laitevalmistajan päätelaitteiden optimoinnin vaadituille radiotaajuuksille. Wirepas verkon viestien suojaus perustuu AES-128 salaukseen. Laitteen liittäminen verkkoon edellyttää oikean salaus- ja todennusavaimen. [63]

Wirepas-laitteiden paikantaminen toteutetaan Wirepas Position Engine:n avulla, joka laskee päätelaitteiden sijainnit verkon ns. ankkurilaitteilta saatujen tietojen perusteella. Ankkurilaitteet ovat verkossa paikallaan ja tunnistavat muut verkon laitteet niiden viestien tagien perusteella - kun tagi havaitsee ankkurilaitteen, ne kertovat oman ID:n, viestin aikaleiman ja radiomittauksen, jonka datan ankkurilaitte välittää lähimmän yhdyskäytävän kautta datapilveen. [63]

5.6 DASH7

DASH7 Alliance Protocol (D7A) on avoin standardi kaksisuuntaiselle alle gigahertsin ISM-taajuuksien yksityisverkkojen langattomille IoT-ratkaisuille. D7A perustuu ISO 18000-7 standardiin aktiiviselle RFID:lle, (Radio Frequency Identification) eli radiotaajuiselle etätunnistukselle, jota tyypillisesti käytetään armeijan logistiikassa. Anturit kommunikoivat tietoturvallisesti AES-128 salatuilla viesteillä ja toimilaitteet voivat vastaanottaa käskyjä esimerkiksi yhden sekunnin latenssilla. DASH7-protokolla tarjoaa päätelaitteiden paristojen eliniäksi muutamia vuosia pienen virrankulutuksen vuoksi (keskimäärin 30 μ A). Viestien kantama on suurimmillaan 5 km tasolla ja maksimi tiedonsiirtonopeus on 167 kb/s. [65]

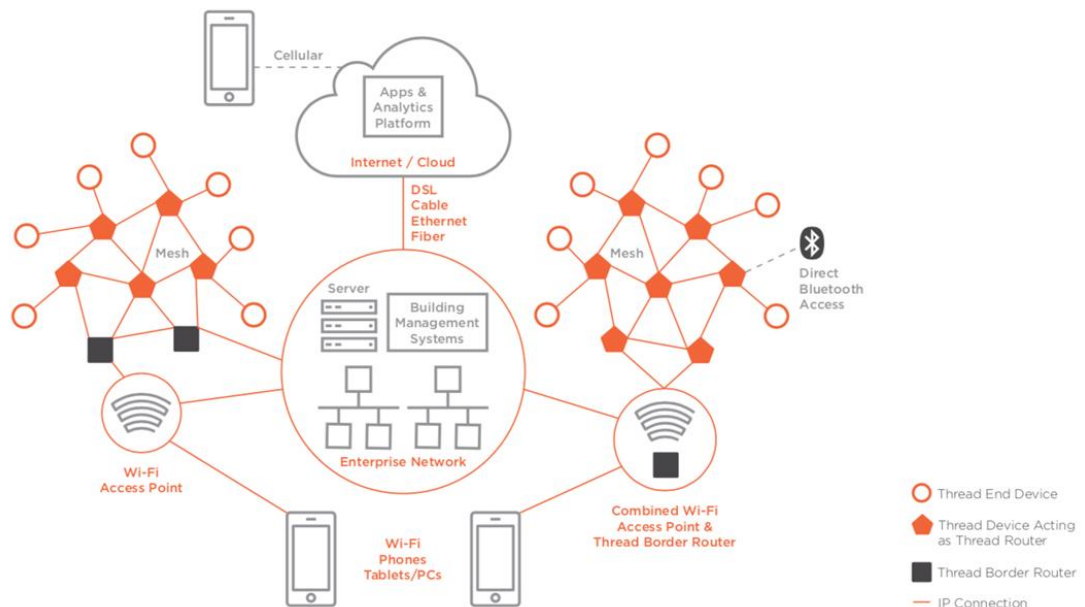


Kuva 5.8. DASH7-verkon arkkitehtuuri. [66]

DASH7-verkot ja protokolla on tarkoitettu pienien datamäärien siirtoon keskipitkällä matkalla (maksimi 256 bittiä/viesti) ja ne eivät edellytä säännöllistä kätelyä laitteiden ja verkon kesken. DASH7-verkko on lähetysohjaus, eli se ei tarvitse yhdyskäytävien tai tukiasemien laajaa johtamista. Kaikki verkon laitteet ovat liikuteltavissa ja pystyvät kommunikoimaan muiden verkossa olevien laitteiden kanssa. D7A käyttää 433, 868 ja 916 MHz taajuuksia. Tyypillisiä DASH7 verkkojen käyttökohteita ovat rakennusautomaatio, paikantaminen ja logistiikka. [65]

5.7 Google Thread

Thread on IPv6-pohjainen matalan tehonkulutuksen mesh-verkkoprotokolla, joka perustuu IEEE 802.15.4 matalan tehonkulutuksen radiostandardiin. Sen kehitykseen on osallistunut useita kymmeniä yrityksiä. Nämä yritykset muodostavat Thread Group Alliance:n ja siihen kuuluvat mm. Nest Labs, Samsung, Qualcomm ja Apple. Thread luokitellaan 6LoWPAN-tekniologiaksi (IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Network). Thread mahdollistaa kommunikoinnin laitteelta laitteelle ja laitteelta pilveen (kuva 5.8). Mesh-verkko kykenee itsensä korjaamiseen, mikäli verkossa oleva laite ei toimi suunnitellusti tai laite poistetaan verkosta.



Kuva 5.9. Thread-verkon arkkitehtuuri. [67]

Thread-verkon laitteet eivät käytä yhdyskäytäviä kääntämään IP-paketteja päätelaitteiden protokollalle sopivaan muotoon. Tämä parantaa Thread-verkon tietoturva. Thread-reunareitin (edge/border router) toimii yhdyskäytävänä Wi-Fi- tai Ethernet-verkon, pilven sekä IEEE 802.15.4 standardin Thread-radiolaitteiden välillä. Kuten muissakin mesh-verkoissa, Thread-verkon laitteet kykenevät välittämään datapaketteja myös muilta laitteilta ja eteenpäin datapilveen. Thread-päätelaitteet ovat aktiivisia verkossa vain silloin, kun niillä on tiedonsiirtotarvetta ja muulloin ne ovat lepotilassa. [67]

Koska Thread muodostaa end-to-end IP-verkon, se mahdollistaa laitteiden ja sovellusten kehittämistä samoilla kehitystyökaluilla kuin muissa IP-pohjaisissa ratkaisuissa. Thread-sovellustasoa ja sen pilvipalveluita voidaan haluttaessa päivittää ja siksi IP-runkoverkko (IPv6) on tulevaisuuden muutoksia paremmin kestävä verkkoratkaisu. Laitevalmistajat voivat hyödyntää monia tuettuja protokollapinoja ja moduuleita Thread-laitteiden suunnittelussa. Markkinoilla onkin saatavissa laaja valikoima sertifioituja Thread-tuotteita. [67]

5.8 EnOcean

EnOcean on teknologia, jonka päätelaitteet voivat hyödyntää sijoituspaikkansa ympäristön vapaata energiaa (esimerkiksi valo, lämpötilaero, liike-energia). EnOcean perustuu ISO/IEC 14543-3-1X standardiin pienen tehonkulutuksen langattomalle kommunikoinnille, jossa optimoidaan päätelaitteen tehonkulutus hyödyntämällä sijaintipaikan vapaata energiaa esimerkiksi valoa tai kytkimen liikettä. EnOcean käyttää alle gigahertsin ISM-radiotaajuuksia, joilla mahdollistetaan noin 30 m sisäkuuluvuus. Käytetyt taajuudet ovat 868 MHz Euroopassa ja Kiinassa, 902 MHz Amerikassa ja 928 MHz Japanissa. [68]



Kuva 5.10. EnOcean protokollapino EPP määrittää sovellustason ja ISO/IEC 14543-3-1X standardi määrittelee muut tasot. [68]

EnOcean päätelaite voi toimia ilman paristoa keräämällä tarvitsemansa energian toimintaympäristöstään. Esimerkiksi moduulin pienellä aurinkokennolla voidaan kerätä tarpeeksi energiaa lämpötila-, kosteus- ja CO₂-antureille olosuhteissa, joissa valoisuus on riittävä [70]. Osa päätelaitteista sisältää myös pariston tai akun. Päätelaitteiden toimintaikä voi olla jopa kymmeniä vuosia. Kun päätelaite on lepotilassa, se kuluttaa tyypillisesti 100 nanoampeeria tai vähemmän. Viestin lähettäminen 30 metrin päähän kuluttaa noin 50 μ W. [69]



Kuva 5.11. Esimerkkejä valoa hyödyntävistä päätelaitteista. [77]

Anturit ja toimilaitteet voivat kommunikoida toistensa kanssa keskenään tai niitä voidaan ohjata paikallisesti tai web-etäkäyttösovelluksilla esimerkiksi erillisellä huoneohjaimella tai taloautomaatioon liitetyllä yhdyskäytävällä. Tiedonsiirto on suojattu AES-128 salauksella ja tiedonsiirtonopeus on 125 kb/s. Viestien dataosuus vie vain yhden tavun ja muut osat vievät yhteensä 7 tavua, minkä vuoksi lähetyksen tekoon ei kulu kuin pieni määrä tehoa. [71] EnOcean-tekniikan sovelluksia ja ratkaisuja löytyy rakennus- ja kotiautomaatiolle sekä ympäristön monitoroinnille. Tekniikka tukee kolmea topologiaa (point to point, star, mesh) ja EnOcean-gateway liitännäiset laitteet tukevat myös yleisiä kotiautomaatio standardeja (KNX, BACnet, LON, M-Bus and Modbus).

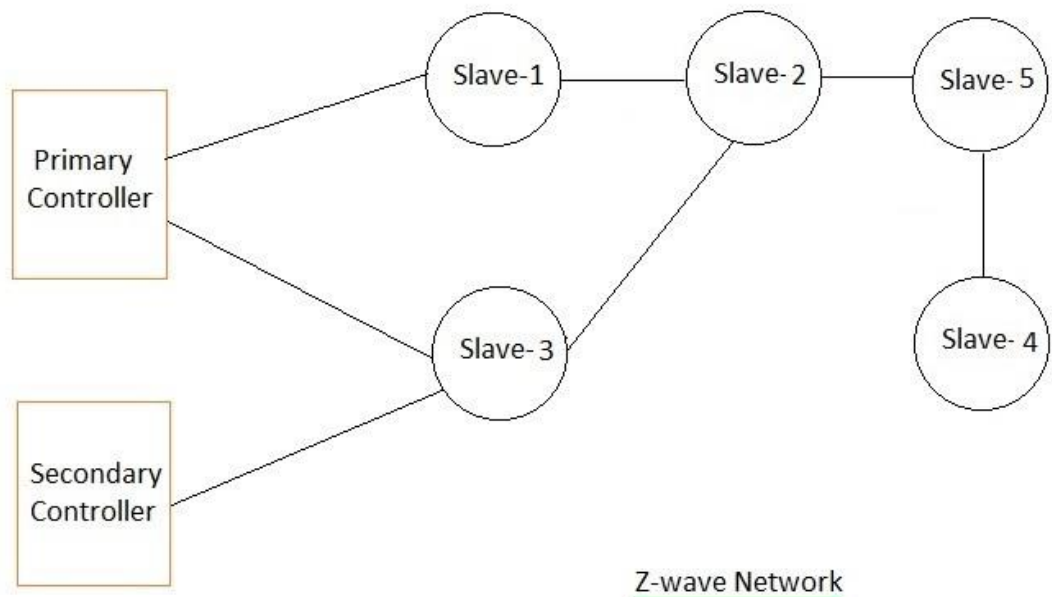


Kuva 5.12. EnOcean-verkon arkkitehtuuri. [69]

EnOcean-tekniikan käyttötarkoituksia löytyy rakennus- ja kotiautomaatiolle sekä ympäristön monitoroinnille.

5.9 Z-Wave

Z-Wave on Zensys:n vuonna 1999 kehittämä lyhyenkantaman langattoman kommunikoinnin protokolla, jota käytetään pääasiassa taloautomaatiossa. Z-Wave Alliance perustettiin vuonna 2005 johon kuuluu jo yli 700 jäsenyritystä ja Z-Wave on suunniteltu saavuttamaan luotettavat kommunikointiyhteydet Z-Wave Alliance:n laitevalmistajien päätelaitteille, joita on tällä hetkellä yli 2600 mallia. [72]



Kuva 5.13. Z-Wave verkon Master-Slave arkkitehtuuri. [72]

Z-Wave verkko on mesh-tyyppinen eli päätelaitteet kommunikoivat suoraan toistensa kanssa verkossa. Se koostuu ohjaimista (Master) ja ohjattavista

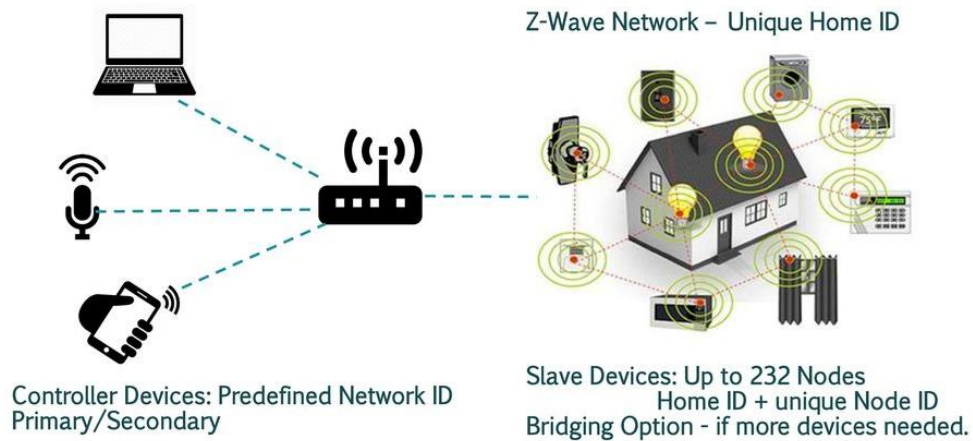
päätelaitteista (Slave). Verkossa on aina yksi pääohjain ja yksi tai useampi varaohjain. Ohjaimien tehtävänä on lähettää komentoja muille verkon päätelaitteille. Slave-laitteet toistavat käskyt ohjaimen kantaman ulkopuolella oleville päätelaitteille. Pääohjain (Master) pystyy valitsemaan mitkä päätelaitteet kuuluvat verkkoon (Home ID) ja hoitaa päätelaitteiden tunnistusten jaon (Node ID). [72]

Jokaisella Z-Wave verkolla on yksilöivä tunniste Home ID, jolla erotetaan verkot toisistaan. Home ID on 32 bittinen ja se on valmiiksi ohjelmoitu jokaiseen ohjaimeen. Aluksi jokaisen Slave-laitteen Home ID on nolla, mutta kommunikoidakseen niille on asetettava jonkun ohjaimen Home ID. Varaohjaimet pystyvät myös ohjaamaan verkon päätelaitteita. [72]

Z-Wave protokollapino koostuu PHY, MAC, Transport ja Network tasoista.

- PHY-taso vastaa modulaatiotavasta ja radiotaajuuksista.
 - MAC-taso huolehtii Home ja Node tunnisteista sekä vastaa päätelaitteiden välisestä kommunikoinnista, joka perustuu törmäyksien esto ja backoff algoritmeihin.
 - Transport-taso vastaa tiedonsiirrosta.
 - Network-taso vastaa reitittämisestä ja verkon topologian valvomisesta.
- [72]

Z-Wave verkon maksimi kapasiteetti on 232 laitetta. Tiedonsiirtonopeus on 9.6, 40 tai 100 kb/s. Päätelaitteiden radio käyttää FSK ja GFSK modulaatiota ja taajuusalue on alle gigahertsin ISM-taajuuksilla. Euroopassa 868.42 MHz ja Yhdysvalloissa 908.42 MHz. Viestien kantama on noin 30 m sisätiloissa ja 100 m ulkona. [72]



Kuva 5.14. Pelkistetty periaatekuva Z-Wave taloautomaatiosta.

6 LANGATTOMIEN IOT-RADIOTEKNOLOGIOIDEN VERTAILUA

Tässä opinnäytetyössä on esitelty esineiden internetin ja kiinteistöautomaation sovelluksissa käytettäviä tunnetuimpia pitkän- ja lyhyenkantaman langattomia tiedonsiirtoteknologioita. Jäljempänä esitettävässä yhteenvedossa esitellään läpikäytyjen teknologioiden soveltamiseen liittyviä tärkeimpiä teknisiä ominaisuuksia kuten, energiatehokkuus, skaalautuvuus, tiedonsiirron nopeus, luotettavuus, kantama ja tietoturvallisuus. Esimerkiksi näiden ominaisuuksien perusteella voidaan arvioida eri teknologioiden soveltuvuutta suunniteltuihin käyttötarkoituksiin. Tämän opinnäytetyön perusteella voidaan todeta, että ei ole olemassa yhtä kaikkiiin erilaisiin käyttötarkoituksiin sopivaa yleisteknologiaa ja kyse on usein sekä teknistaloudellisesta että strategisesta valinnasta oman verkon tai ostettavan palvelun välillä.

6.1 Teknologioiden vertailu ja ominaisuuksien yhteenveto

Seuraavissa taulukoissa esitetään koosteet opinnäytetyössä läpikäytyjen langattomien teknologioiden keskeisistä teknisistä ominaisuuksista. Taulukoissa esitettävät tekniset tiedot eivät ole siten tyhjentyviä ja osaa teknologioista voidaan soveltaa joko osittaisena tai täydellisempänä.

Taulukko 2. Lyhyen ja keskipitkänkantaman MESH-teknologiat.

Feature	Z-Wave	EnOcean	DASH7	Google Thread	WiFi-Halow	Wirepas Mesh	Bluetooth LE	Zigbee
Standardization organization	Zensys	EnOcean Alliance	DASH7 Alliance	Thread Group	IEEE 802.11 working group	WIREFAS Ltd.	Bluetooth Special Interest Group	Zigbee Alliance
Channel Width	300-400 kHz	280 kHz	25/200 kHz	600 kHz – 5 MHz	1/2/4/8/16 MHz	2 MHz	2 MHz	600 KHz - 5 MHz
Transmission Duplexity	Half	Full/Half	Half	Half	Half	Full/Half	Full/Half	Half
Downlink (DL) peak rate	40 kb/s	125 kb/s	9.6, 55.5, 167 kb/s	20 – 250 kb/s	150 kb/s – 347 Mb/s	1 Mb/s	125 kb/s, 500 kb/s, 1 Mb/s, 2 Mb/s	20 – 250 kb/s
Uplink (UL) peak rate	40 kb/s	125 kb/s	9.6, 55.5, 167 kb/s	20 – 250 kb/s	150 kb/s – 347 Mb/s	1 Mb/s	125 kb/s, 500 kb/s, 1 Mb/s, 2 Mb/s	20 – 250 kb/s
Number of Antennae	1	1	1	1	1	1	1	1
Latency range	1 s	< 3 ms	< 100 ms	< 100 ms, 13.5 ms – 1 s	Low	< 10 ms	< 3 ms	15 ms
Data limit	-	-	-	-	-	-	-	-
Size of payload in a data packet	64 bytes	1 - 4 bytes	256 bytes	MAC PDU 0 – 102 bytes	8 bytes, 66 bytes	102 bytes	0 – 2790 bits	MAC PDU 0 – 102 bytes
Duty cycle	< 1%	< 1%	< 1%	<1% in some bands	-	-	-	< 1%
Data Encryption	AES 128	AES 128	AES 128	TLS, DTLS, SHA-256	WPA, WPA2 AES	AES 128	AES-CCM, HMACSHA256, P256 ECDH, HMACSHA-256	AES 128
Device Authentication	Unique ID	Unique ID	Authentication Key	EC-JPAKE	EAP-TLS	Authentication Key	SAFER+, HMAC SHA256	Zigbee device authentication
Voice communication support	No	No	No	No	Yes	No	Yes	No
Positioning	Routing table	-	Beacons	-	WiFi Aware	Wirepas Positioning Engine	iBeacon	Yes
UE bandwidth	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum Transmission power	0 dBm	6 dBm	10 dBm, 27 dBm	Case dependent (~0 dBm)	10 – 30 dBm	< 10 dBm (EU), < 19 dBm (US)	0, 4, 20 dBm	Case dependent (~0 dBm)
Link Budget	101 dB	103 dB	140 dB	110 dB	115 dB	-	92 dB	106 dB
Number of hops	4	2	2	16	-	Multi-hop	127	32
Range	0 - 100 m	0 - 300 m	0 - 5 km	0 - 30 m	0 - 1 km	0 - 5 km	0 - 100 m	0 - 100 m

Taulukko 3. LPWAN-tekniikat ja 3GPP standardit.

Feature	Sigfox	LoRaWAN	Ingenu RPMA	LTE Cat 1	LTE Cat M1	EC-GSM-IoT	NB-IoT
Standardization organization	Sigfox (Private company, open standard)	LoRa Alliance	Ingenu	3GPP	3GPP	3GPP	3GPP
Channel Width	0.1 kHz*100/600	125/250/500 kHz	1 MHz*40	1.4 MHz	1.08 MHz	200 kHz	180 kHz
Transmission Duplexity	Half	Half	Half	Full	Full/Half	Half (FDD)	Half
Downlink (DL) peak rate	100 - 600 b/s	300 b/s – 50 kb/s	624 kb/s	10 Mb/s	1 Mb/s	70 kbps (GMSK) - 240kbps (8PSK)	240 kb/s
Uplink (UL) peak rate	100 – 600 b/s	300 b/s – 50 kb/s	156 kb/s	5 Mb/s	1 Mb/s	70 kbps (GMSK) - 240kbps (8PSK)	127 kb/s
Number of Antennae	1	-	-	2	1	1 - 2	1
Latency range	> 20 s	1 – 100 ms	Low	10 – 15 ms	10-15 ms	700 ms – 2 s	< 10 s
Data limit	140 msg/day	-	-	-	-	-	-
Size of payload in a data packet	0 – 12 bytes (uplink), 8 bytes (downlink)	51 – 222 bytes	6 bytes -10 kilo bytes	-	100 – 1000 bytes	-	-
Duty cycle	< 1%	< 1%	-	-	-	-	-
Data Encryption	Private key, VPN+SSL	AES 128-bit NwkSkey/ AppSkey	AES 128	EPS-AKA	EPS-AKA	UMTS AKA	EPS-AKA
Device Authentication	Unique ID/Private key	64-b DevEUI	OTA	SIM	SIM	SIM	SIM
Voice communication support	No	No	No	VoLTE	VoLTE	GSM	No
Positioning	Sigfox Geolocation	Native positioning	-	E-CDI	E-CDI	Cell ID	OTDOA, E-CID
UE bandwidth	200 kHz	125 kHz	-	20 Mhz	1.4 MHz	2.4 Mhz	200 kHz
Maximum Transmission power	22 dBm	22 dBm	21 dBm	23 dBm	20/23 dBm	23/33 dBm	14, 20, 23 dBm (depending on UE power class)
Maximum Coupling Loss	162 dB	157 dB	164 dB	144 dB	160 dB	164 dB	164 dB
Range	0 – 40 km	0 - 15 km	0 – 48 km	0 – 5 km	0 – 5 km	0 – 10 km	0 – 10 km

Standardization Organization: Organisaatio, joka on kehittänyt ja standardoinut kyseisen teknologian. Avoimia standardeja pidetään yleensä skaalautuvimpina ja niiden ekosysteemejä laajempina, koska niiden olemassa oleva teknologiaekosysteemi on laajempi, eivätkä ne rajoitu yhden moduulivalmistajan tai palveluntarjoajan taakse. Yksityisomistukselliset teknologiat puolestaan hyödyntävät lisensoimattomia ISM-radiotaajuuksia, jotka ovat maksuttomia ja siten useissa IoT-sovelluksissa kustannustehokkaampia.

Channel bandwidth: Kanavan kaistanleveys tarkoittaa yhden kommunikointilinkin luomiseen varattua kaistan osaa. Kaistanleveys (bandwidth) ja kaista (band) annetaan hertseinä (Hz). Kaista muodostuu useimmiten useista eri kanavista (channel). Mitä isompi kanavan kaistanleveys teknologialla on, sitä nopeammat yhteydet sillä voidaan muodostaa. Kanavan kaistanleveys voi tärkein valintakriteeri erimerkiksi sovelluksissa, joissa IoT-ratkaisulta edellytetään reaaliaikaisuutta ja luotettavia kommunikointilinkkejä.

Transmission Duplexity (Tx/Rx): Tiedonsiirron kaksisuuntaisuus määrittelee tavan, jolla radiolaite lähettää ja vastaanottaa viestejä. Protokollia on kaksi: Half Duplex ja Full Duplex. Half Duplex laite vuorottelee lähetyksien ja vastaanotto ikkunoiden kanssa. Full Duplex tiedonsiirrossa laite kykenee lähettämään ja vastaanottamaan viestejä samanaikaisesti. True Full Duplex tarkoittaa, että laitteella on oma antenni lähetystä ja vastaanottoa varten. Jos IoT-ratkaisulta ei edellytetä reaaliaikaisuutta, Half Duplex tiedonsiirto on yleensä riittävä ja on kustannustehokkaampi.

Downlink Peak Rate: Laitteelle saapuvien viestien huipputiedonsiirtonopeus on maksiminopeus (b/s), jolla laite pystyy vastaanottamaan sille lähetettyjä radioviestejä. Maksiminopeuteen päästään yleensä vain ideaalisissa olosuhteissa. Nopeus voi olla tärkeä valintakriteeri, mikäli radioverkossa olevien laitteiden ohjelmia tai muita ominaisuuksia päivitetään usein verkon yli. Ominaisuudella on vaikutus myös verkon laitteiden energian kulutukseen (esim. paristojen tai akkujen käyttöaika) - mitä vähemmän aikaa vastaanotin on päällä sitä vähemmän se kuluttaa energiaa.

Uplink Peak Rate: Laitteelta lähtevien viestien huipputiedonsiirtonopeus on maksiminopeus (b/s), jolla laitteelta lähtevät viestit voidaan siirtää radioverkkoon. Maksiminopeuteen päästään yleensä vain ideaalisissa olosuhteissa. Mitä nopeampi on lähtevien viestien tiedonsiirtonopeus, sitä lyhyempi on lähetetyn signaalin kantama. Ominaisuudella on vaikutus radioverkon laitteiden energian kulutukseen – mitä vähemmän aikaa radiolähetin on päällä sitä vähemmän lähetykseen, kuluu energiaa (esim. paristojen ja akkujen käyttöikä). Vastaavasti hitaalla tiedonsiirtonopeudella viestin kantama kasvaa, mutta radiolähetin joutuu olemaan pidempään päällä, mikä lisää laitteen energiankulutusta. Nopea laajalla alueella toimiva radioverkko edellyttää kattavaa tukiasemaverkostoa, mikä lisää radioverkon investointi- ja käyttökustannuksia. Jos verkon kantamaa kompensoidaan hitaammalla tiedonsiirtonopeudella, kauimpana tukiasemista sijaitsevien päätelaitteiden paristojen tai akkujen elinikä lyhenee. Useiden langattomien IoT-ratkaisujen kannalta päätelaitteiden paristojen pitkä toiminta-aika on keskeinen valintakriteeri.

Number of Antennae: Laitteen antennien vaadittu määrä. Yksiantenninen laite vuorottelee lähetyksien ja vastaanottojen välillä (Half Duplex) ja kaksiantenniset laitteet lähettävät ja vastaanottavat samanaikaisesti erillisillä antenneilla (Full Duplex). Jos IoT-ratkaisu ei edellytä nopeaa kaksisuuntaista kommunikointia, yhtä antennia tukevat Half Duplex-laitteet ovat yleensä riittäviä ja kustannustehokkaita.

Latency Range: Verkon responsiivisuutta mitataan latenssin avulla. Latenssilla tarkoitetaan lähetyksen ja päätelaitteen vastauksen vastaanottoon kuluvaa kokonaisaikaa. Latenssi ja energiankulutus ovat toisiinsa sidoksissa – mitä pidempiä aikoja valmiustilassa oleva IoT-päätelaite kuuntelee radioverkkoa, sitä lyhyempi on laitteen käyttämä aika lepotilassa ja sitä suurempaa on laitteen energian kulutus. Reaaliaikaiset sovellukset edellyttävät pientä latenssia ja yleensä tämä johtaa päätelaitteen jatkuvaan virransyöttöön (esim. verkkovirta) poissulkien esimerkiksi vain paristoa hyödyntävät päätelaitteet. Esimerkiksi LoRa-teknologiassa latenssin perusteella päätelaitteet jaetaan A-, B- ja C-kategorioihin. Mikäli IoT-ratkaisu ei edellytä päätelaitteelta reaaliaikaisuutta ja jatkuvaa valmiutta, suuremmat latenssit eivät ole este teknologian

valinnassa. Koti- ja kiinteistöautomaatioissa lyhyen kantaman langattomat teknologiat ovat edelleen yleinen ja perusteltu teknologiavalinta kiinteistöradioverkkojen matalan latenssin ja pienen energiankulutuksen vuoksi.

Data Limit: Data-raja on radioverkolle asetettu yläraja, mikä rajoittaa verkon laitteiden kommunikointiin käytettyä radioliikennettä (viestinen lukumäärä tietyssä aikaikkunassa). Lisensoimattomia ISM-radiotaajuuksia hyödyntävien verkkojen laitteille on määritetty ns. Duty Cycle, joka ei saa ylittää ko. maanosan taajuusaluetta koskevia rajoituksia. Tässä työssä läpikäydyistä teknologioista Sigfox-teknologialla on yläraja vuorokaudessa lähetettävien viestien lukumäärälle.

Size of payload in a datapacket: Paketin datamäärä ilmoittaa laitteiden lähettämien radioviestien ns. hyötykuorman maksimikoon. Teknologiat, jotka käyttävät optimoituja protokollia, voivat rajoittaa pakettien kokoa. Jos taulukossa ei ole esitetty datapaketin tarkkaa kokoa, kyseisen teknologian laitteiden viesteille ei ole määritetty datapaketin maksimikokoa. Viestin sisältämän datan määrä tulee olla oikeassa suhteessa IoT-ratkaisuun. Verkon kapasiteetin kannalta viestien pienemmät hyötykuormat ovat yleensä toimiva vaihtoehto.

Duty Cycle: Työjakso viittaa lisensoimattomilla ISM-radiotaajuuksilla toimivien päätelaitteiden toiminta-aikojen rajoituksiin. Rajoitukset vaihtelevat maanosien mukaan ja liittyvät esimerkiksi laitteiden lähetystehoon ja -aikaan. Laitteiden sallittua lähetysaikaa (lähetysaika sekunteina yhdessä tunnissa annetaan yleensä myös prosenttilukuna) kutsutaan työjaksoksi, jota käytetään eräänä kriteerinä ISM-taajuuksia hyödyntävien radioverkkojen suunnittelussa. Määritetyn rajoitetun työjakson tarkoitus on mahdollistaa taajuusalueen jakaminen suurille laitemäärille mahdollisimman vähäisillä häiriöillä. Lähetysaikoja koskevia rajoituksia on erityisesti teknologioilla, jotka käyttävät alle yhden gigahertsin ISM-taajuuksia. Mikäli IoT-ratkaisulle on olennaista, että laitteiden lähetysaikoja ei ole rajoitettu, joko 3GPP teknologiat ja yli gigahertsin taajuusaluetta käyttävät teknologiat ovat järkeviä lähestymistapoja ratkaisulle.

Frequency band	Power	Comment
6785 – 6795 kHz	42 dB μ A/m @ 10 m	ITU ISM band
13.553 – 13.567 MHz	42 dB μ A/m @ 10 m	ITU ISM band
26.957 – 27.283 MHz	42 dB μ A/m	ITU ISM band
40.660 – 40.700 MHz	10 mW ERP	ITU ISM band
138.2 – 138.45 MHz	10 mW ERP	Only available in some states
433.050 – 434.790 MHz	10 mW ERP	< 10% duty cycle (ITU ISM band)
433.050 – 434.790 MHz	1 mW ERP	Up to 100% duty cycle (ITU ISM band)
434.040 – 434.790 MHz	10 mW ERP	Up to 100% duty cycle (ITU ISM band)
863.000 – 870.000 MHz	25 mW ERP	FHSS, DSSS Modulation, 0.1% duty cycle
868.000 – 868.600 MHz	25 mW ERP	< 1% duty cycle
868.700 – 869.200 MHz	25 mW ERP	< 0.1% duty cycle
869.400 – 869.650 MHz	500 mW ERP	< 10% duty cycle
869.700 – 870.000 MHz	5 mW ERP	Up to 100% duty cycle
2400 – 2483.5 MHz	10 mW ERP	ITU ISM band
5725 – 5875 MHz	25 mW ERP	ITU ISM band
24.00 – 24.25 GHz	100 mW	ITU ISM band
61.0 – 61.5 GHz	100 mW ERP	ITU ISM band
122 – 123 GHz	100 mW ERP	ITU ISM band
244 – 246 GHz	10 mW ERP	ITU ISM band

Kuva 6.1. Eri ISM-taajuusalueita koskevat rajoitukset. [80]

Data Encryption: Datan ja viestien tarkoituksenmukainen salaaminen ja siirretyn datan suojaaminen radioverkossa on eräs toimivan IoT-ratkaisun arvostuskriteeri. Matkapuhelinverkkoja hyödyntävien teknologioiden tietoturvasalaaminen ja viestien salaaminen perustuu käytettyjen matkapuhelinverkkojen ominaisuuksiin ja teknologiaratkaisuihin. Lisensoimattomilla ISM-radiotaajuuksilla toimivien järjestelmien tietoturva toteutetaan tyypillisesti erilaisilla salausalgoritmeilla kuten 128-bittisellä lohkosalausteknologialla AES:llä (Advanced Encryption Standard). Salauksen murtumisella voi olla fataali seuraus IoT-ratkaisulle ja sen käyttäjille ja voisi pahimmillaan johtaa merkittäviin taloudellisiin menetyksiin. Suurin osa tässä työssä läpikäydyistä ISM-taajuusalueella toimivista teknologioista perustuu AES-salausalgoritmiin, jota pidetään edelleen turvallisena ratkaisuna.

Device Authentication: Verkon laitteiden tunnistaminen ja varmentaminen on tietoturvan kannalta välttämätöntä. Matkapuhelinverkkojen laitteet perustuvat sekä SIM että IMEI tunnisteisiin. ISM-radiotaajuuksien laitteiden tunnistaminen

perustuu esimerkiksi laiteavaimiin, jolloin esimerkiksi asiattomiin käsiin joutunut kadonnut päätelaite ei aiheuta tietoturvauhkaa.

Voice Communication Support: Osa langattomista IoT-teknologioista tukee äänen lähettämistä verkon yli esimerkiksi 4G:n avulla.

Positioning: Laitteiden sijainnin paikantamistapa verkossa. Kaikki teknologiat eivät tue liikkuvien tai kiinteästi asennettujen päätelaitteiden sijainnin paikantamista. Osa teknologioista tukee paikantamista, mutta päätelaitteen liikkuminen voi vaikuttaa paikantamiseen, jos päätelaitteen tukiasema vaihtuu. Esimerkiksi LTE-M laiteluokat kykenevät katkottomiin solunvaihtoihin ja paikannukseen, mutta vastaavasti NB-IoT verkossa päätelaitteen liikkuminen aiheuttaa ongelmia paikannukseen.

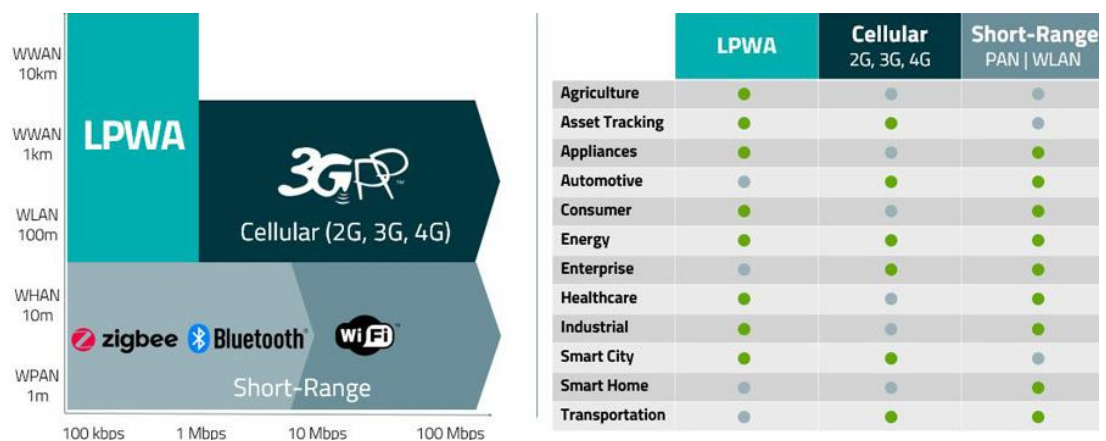
UE Bandwidth: Käyttäjän laitteen lähettimen kaistanleveys, joka on suunniteltu toimimaan tietyillä kaistoilla. Sillä tarkoitetaan laitteen vahvistimen kaistanleveyttä, ennen modulaatoratkaisua radioverkon taajuuksille.

Max Transmission Power: Laitteen teholuokka, joka määrittää laitteen suurimman lähetystehon tietyille kaistoille. Mitä kauempana laite on tukiasemasta, sitä suurempaa lähetystehoa se joutuu käyttämään, jotta signaali saadaan perille. Vastaavasti lähellä olevat päätelaitteet voivat käyttää alhaisempaa lähetystehoa, mikä pidentää niiden pariston elinikää.

Link Budget/Coverage: Häviön tai signaalin vaimeneman määrä langattoman radiosignaalin kuuluvuudessa (dB) lähettimen antennilta vastaanottimille, jolla langattomaan radiosignaaliin perustuvan kommunikation ylläpito on vielä mahdollista. Kun Link budget arvo (LB) ylittää Maximum Coupling Loss (MCL) rajan, yhteyden ylläpito vaikeutuu radiosignaalin kuuluvuusongelmien vuoksi. Mitä suurempi LB-arvo teknologialla on, sitä enemmän radiosignaali sietää esteitä ja mahdollistaa kuuluvuuden myös vaativiin sijainteihin kuten rakennusten sisälle.

Number of hops: Hyppyjen määrä (koskee MESH-verkkoja) tarkoittaa kuinka monta kertaa laitteen lähettämä viesti voidaan toistaa verkon muiden laitteiden kautta ennen kuin viestin eteneminen verkossa estyy. Rajoituksen tarkoituksena on estää viestien tarpeeton kierto MESH-verkoissa laitteelta laitteelle. Mitä suurempi määrä hyppyjä voidaan tehdä sitä kauemmas viesti voisi teoreettisesti edetä verkossa.

Range: Laitteen radiolähtetimen ja viestin määränpään (yhdyskäytävä, tukiasema, toimilaite tai toinen anturi) välinen suurin etäisyys. Taulukon numerot ovat kokemusperäisiä ja teknologiakohtaisia arvioita, eivätkä ne siten käytännössä vastaa IoT-ratkaisun lopullista toimintaympäristöä. Maksimi kantama riippuu verkon sijainnista, mutta kantamaan vaikuttavat myös mm. taajuusalue, lähetysteho ja tiedonsiirtonopeus. Jos päätelaitteilla ja tukiasemalla on esteetön ”näköyhteys” (LoS, Line of Sight), kantama on yleensä parempi. Käytännössä yhdyskäytävien ja päätelaitteiden välistä tiedonsiirtoa häiritsevät ja signaalia vaimentavat ympäristön esteet ja muusta radioliikenteestä aiheutuva kohina.



Kuva 6.2. Eräitä arvioita eri teknologiatyyppien soveltuvuudesta tiettyihin käyttötarkoituksiin. [81]

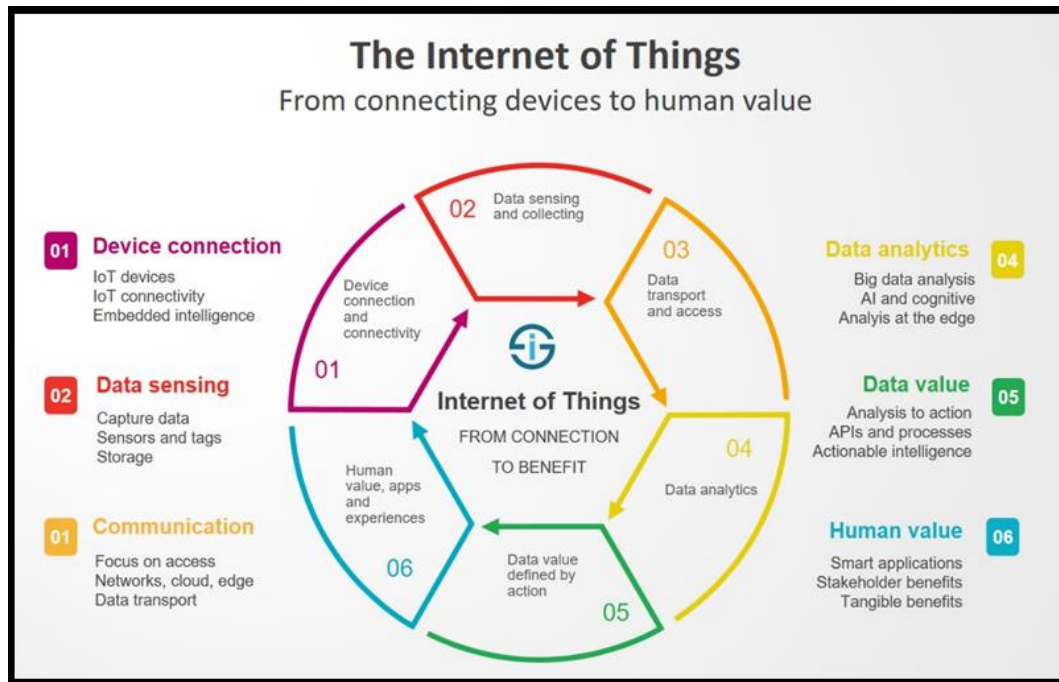
Eri teknologioiden investointi- ja käyttökustannukset vaihtelevat mm. teknologian käyttösovelluksen sekä radioverkon toteutustavan, laajuuden (kattavuuden), siirrettävän datan määrän ja siirtonopeuden perusteella. Lisenssivapaat avoimet ISM-teknologiat ovat parantaneet kilpailukykyään teknologian käytön yleistyessä. Oman IoT-verkon investoinnin vaihtoehtona on ostopalvelu mm. teleoperaattoreilta ja IoT-verkko-operaattoreilta.

7 LANGATTOMIEN IOT-TEKNOLOGIAMARKKINOIDEN TULEVAISUUDEN KEHITYSNÄKYMIÄ

Älykkäiden verkottuneiden sensoreiden ja päätelaitteiden nopea tekninen kehitys ja teknologian laskenut hinta avaa uusia liiketoimintamahdollisuuksia. Langattomien verkkojen hyödyntäminen esimerkiksi erilaisissa IoT-ratkaisussa on erittäin nopeassa kasvussa. Erilaisia lisenssivapaita ja lisensoituja lyhyen ja pitkän kantaman IoT-verkkoteknologioita on jo kymmeniä. Samoin verkkoihin liitettyjen älykkäiden päätelaitteiden lukumäärä kasvaa nopeasti - eräiden arvioiden mukaan 2020-luvulla IoT-verkkoihin liittyvien päätelaitteiden määrä ylittäisi 50 miljardin päätelaitteen määrän. [86] Kehitys on johtamassa siihen, että yksittäisen päätelaitteen IoT-verkkoon liittämisen kustannus ja datan siirron kustannus on laskemassa murto-osaan aiemmasta ja laskee edelleen kasvavan teknologiatarjonnan ja lisääntyvän kilpailun vuoksi.

Olemassa olevien tieto- ja automaatiojärjestelmien sekä modernin IoT-teknologian integroinnin ja soveltamisen yhteydessä syntyvän monimuotoisen datan analyysi ja jatkojalostaminen mahdollistaa palveluiden ja olemassa olevien liiketoimintaprosessien datapohjaisen kehittämisen. Erityisesti energiasektorilla toimivien yritysten mahdollisuudet ja tarve monipuolisen liiketoimintadatan kasvavaan hyödyntämiseen on ilmeinen.

Kuvassa 7.1 esitetään periaatekuva IoT-teknologian osa-alueiden eräistä kaupallista sovellusalueista [85]. IoT-on yleistermi, joka käsittää monia erilaisia teknologioita ja niitä määritteleviä standardeja. Kokonaisuus muodostuu mm. seuraavista datan jalostukseen liittyvistä osa-alueista: älykkäät kytkettävät sensorit ja laitteet eli datan synty (1), datan keruu ja yhdistäminen (2), datan siirto ja saatavuus, tallennus, verkot ja datapilvet ja datan hyödyntäminen (3), datan analyysi kuten tekoäly ja (4), datan jatkojalostus tiedoksi, älykkäät sovellukset, arvonmuodostus ja kokemusten soveltaminen (5,6).



Kuva 7.1. Periaatekuva IoT-tekniikan osa-alueiden eräistä kaupallista sovellusalueista. [85]

Uudessa datapohjaisessa liiketoiminnassa erilaiset langattomat tiedonsiirto-tekniikat ja verkkoprotokollat ovat keskeisessä roolissa digitaalisten ekosysteemien nopeasti laajenevassa markkinassa. Energiasektorilla esineiden Internetin potentiaalisia sovellusalueita ovat mm. kiinteistöjen energiatehokkuuteen tai taloteknisten järjestelmien käyttöön liittyvät ohjaus- ja automaatiojärjestelmät sekä energian tuotanto- ja jakelujärjestelmiin liitettävät älykkäät mittalaitteet ja etäohjattavat toimilaitteet (smart grid). Kappaleissa 7.1 ja 7.2 käsitellään uuden langattomaan tiedonsiirtoon liittyvän datapohjaisen energialiiketoiminnan kahta keskeistä osa-aluetta energiasektorin IoT-pohjaista alustataloutta ja IoT-ratkaisujen kyberturvallisuutta.

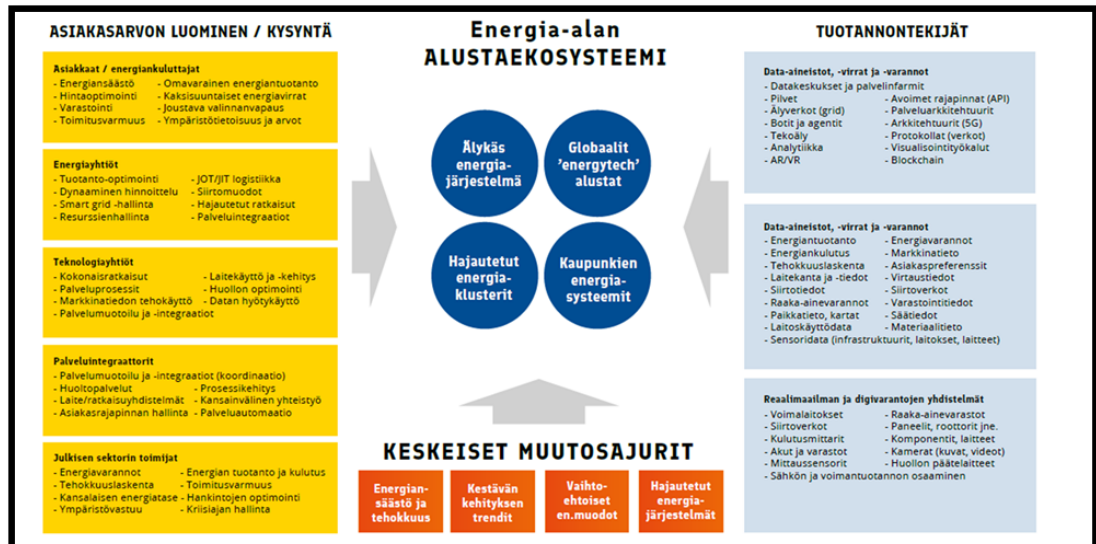
7.1 Alustatalous yhdistää datapohjaisia digitaalisia ekosysteemejä

Alustatalouden perusta on yritysten liiketoiminnassa syntyvä ja avoimista tietolähteistä saatava monimuotoinen data. Energiasektorilla esimerkkinä uudesta datapohjaisesta liiketoiminnasta ovat IoT-pohjaiset energiatehokkuuspalvelut, joissa verkottuneiden älykkäiden sensoreiden ja kiinteistöjen automaatiojärjestelmien tuottaman monimuotoisten olosuhde- ja ohjausdatan

hyödyntäminen on nopeassa kasvussa. Alustataloudessa tietotekniikkaa ja ohjelmisto-osaamista (esim. AI, ohjelmistorobotiikka, koneoppiminen) sovelletaan kokonaisvaltaisesti toiminnan alustana sekä olemassa olevan että uuden liiketoiminnan ohjaamiseen, kehittämiseen ja tehostamiseen. Alustatalouspohjaisen digitaalisen liiketoimintamallin yleistyminen lisää myös eri toimialojen alustoilla toimivien yritysten sekä näiden alustojen yritysten muodostamien sisäisten verkostojen välistä data- ja tietopohjaista vuorovaikutusta (sector coupling).

Alustatalous on monelle yritykselle nopeasti kehittyvä uuden liiketoiminnan kehitys- ja organisointimalli, jota käytetään skaalautuvien digitaalisten palvelukonaisuuksien toteuttamiseen. Alustataloudessa yritys parantaa tuottavuuttaan ja asiakasarvoaan avaamalla liiketoimintojensa rajapintoja ja yhdistelemällä omaa osaamistaan, dataa ja verkostojaan samalla alustalla toimivien kumppaneiden ekosysteemeihin. Alustatalous yhdistää datatasolla yhä useampia aikaisemmin Internetiin erikseen kytkettyjä digitaalisia ekosysteemejä ja lisää niiden välistä datapohjaista vuorovaikutusta. Alustatalous ja datapohjainen liiketoiminta (esim. IoT) lisää langattomien tiedonsiirtoteknologioiden ja -verkkojen osaamisen ja soveltamisen tarvetta, kun uusia langattomia päätelaitteita ja muuta hajautettua älyä kytketään olemassa oleviin keskitettyihin ohjaus- ja automaatiojärjestelmiin.

Kuvassa 7.2 esitetään periaatekuva energiasektorin alustaekosysteemistä [83]. Energia-alan alustaekosysteemissä hyödynnetään edelleen laajasti perinteisiä keskitettyjä ohjaus- ja valvontajärjestelmiä, mutta samalla järjestelmiin liittyy kiihtyvällä vauhdilla uutta hajautettua tuotantoteknologiaa kuten tuuli- ja aurinkovoimaa. Energiasektorilla digitaalisten ratkaisujen ja uuden datapohjaisen liiketoiminnan kasvu on osa datapohjaista energiatehokkuuteen ja energian säästöön liittyvää energiamurrosta. Alustan nykyiset tietojärjestelmät ja niiden data sekä uutta dataa ekosysteemeistä tuottavat älykkäät päätelaitteet ja kiinteistökohtaiset ohjausjärjestelmät avaavat monipuoliset mahdollisuudet uudelle datapohjaiselle liiketoiminnalle ja liiketoimintojen prosessien tehostamisille ohjelmistoautomaation menetelmin (AI, ohjelmistorobotiikka, koneoppiminen).

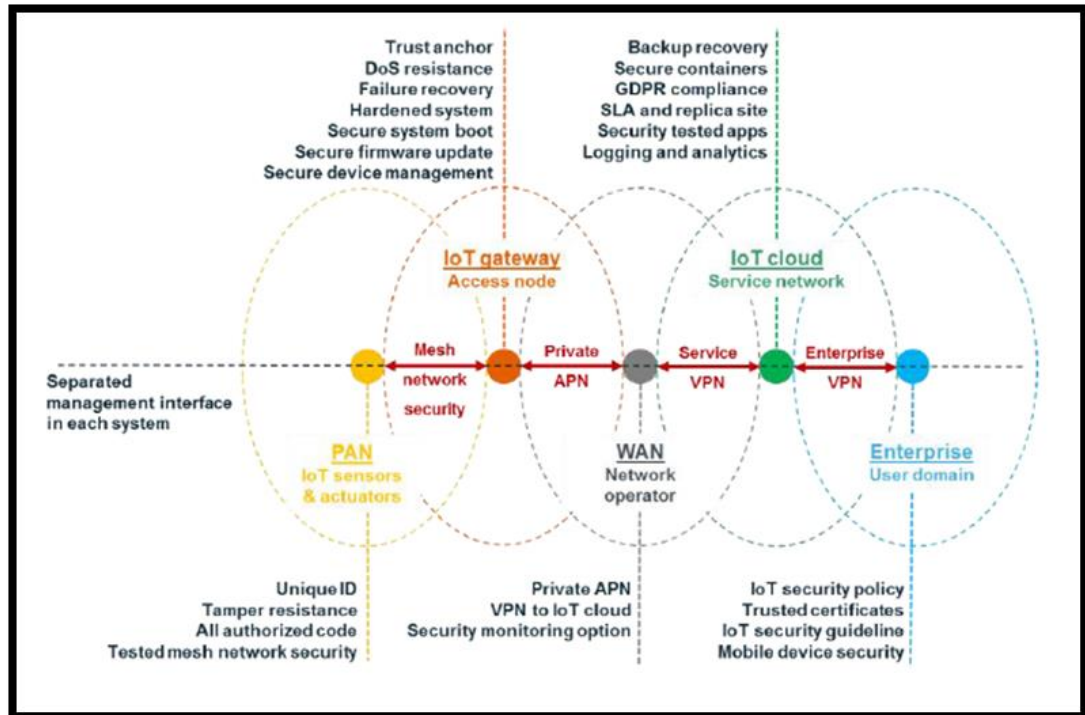


Kuva 7.2. Periaatekuva energiasektorin alustaekosysteemistä. [83]

7.2 IoT-järjestelmien kokonaisvaltainen tietoturvaluisuus korostuu

Alusta-ajatteluun ja alustan eri toimijoiden järjestelmien avoimiin rajapintoihin perustuva datapohjainen liiketoiminta lisää verkottuneiden tietojärjestelmien tietoturvariskiä. Esimerkiksi IoT-järjestelmien kokonaisvaltainen tietoturvaluisuuden tulisi perustua riittävään ennakkosuunnitteluun ja kattavaan riskinarviointiin koko järjestelmän elinkaaren kestäväen hyvän kyberturvaluisuuden varmistamiseksi. Kuvassa 7.3 esitetään periaatekuva langattoman IoT-ratkaisun toiminnallisista osa-alueista [84]. Kuvassa verkkoalueiden turvaluisuusominaisuuksia on esitetty esimerkkien kautta vasemmalta oikealle:

- PAN-verkoissa mesh-verkon teknologia-ähtöinen tietoturva
- Operaattorilla IoT-radioverkon liittymä- ja teknologia-ähtöinen tietoturva
- Mobiilioperaattorin verkossa liittymä- / teknologia-ähtöinen tietoturva
- Pilvipalveluissa palveluntarjoajan tarjoama ICT-tietoturvaluisuus
- Asiakkaan yritysverkossa yritystasoinen ICT-tietoturvaluisuus



Kuva 7.3. Periaatekuva langattoman IoT-ratkaisun toiminnallisista osa-alueista. [84]

Hyvä tietoturvan ennakkosuunnittelu ja määrittely on olennainen osa IoT-pohjaisia liiketoimintaa ja digitaalisten alustojen palveluiden hankintaprosessia. Digitaalisten alustojen eri toimijoiden on pystyttävä osoittamaan tarjoamiensa teknologioiden ja palveluiden kyberturvallisuuden riittävä taso. Olemassa oleviin järjestelmiin erilaisten kommunikaatorajapintojen välityksellä integroitavat uutta teknologiaa hyödyntävät IoT-teknologiat ja langattomat tietoverkot lisäävät eri osapuolten tieto- ja automaatiojärjestelmiin ja älykkäisiin päätelaitteisiin liittyvää kyberturvallisuushkaa.

8 ENERMIX OY:N IOT-ALUSTA

Erilaisia tiedonsiirtoprotokollia ja -teknologioita hyödyntävien älykkäiden IoT-laitteiden ja automaatiojärjestelmien tuottaman datan hyödyntäminen edellyttää monipuolisia tietojärjestelmiä, digitaalisia alustoja, joissa eri lähteistä kerättävää monimuotoista dataa jalostetaan ja yhdistellään. Älykkäiden IoT-päätelaitteiden yleistyminen moninkertaistaa tulevaisuudessa erilaisen mittausdatan, tiedonsiirron ja tiedonsiirrossa käytettävien yhteyksien ja teknologioiden lukumäärän.

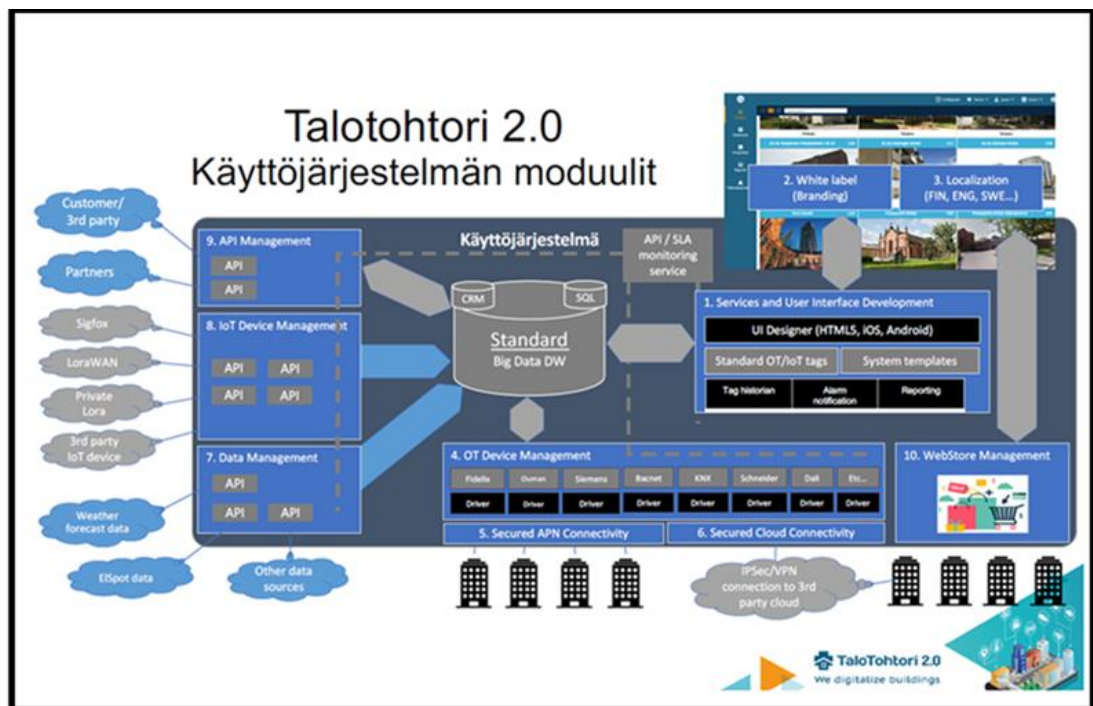
Tämä opinnäytetyö on tehty Enermix Oy:ssä (www.enermix.fi), joka tuottaa asiakkailleen mm. älykkäitä lämmityksen ohjauspalveluita, sisäilman olosuhdepalveluita, talotekniikan etävalvontapalveluita ja kiinteistöjen energiaan ja vedenkultukseen liittyvä raportointi-, mittaus- ja analyysipalveluita.

Yrityksen päätuote, Talotohtori 2.0, on digitaalinen integraatio IoT-alusta, joka yhdistää mm. modernin IoT-teknologian ja eri sukupolvien kiinteistöjen automaatiojärjestelmät. Yhdistämisen eli integraation jälkeen Talotohtori 2.0 alusta tarjoaa yhdenmukaisen eli vakioitun tavan monimuotoisen datan jatkojalostukseen ja siitä generoitavan tiedon jatkohyödyntämiseen erilaisten digitaalisten palveluiden ja niiden käyttöliittymien toteutuksessa. Järjestelmän vakioitu ja yhdenmukainen tiedonhallinta ja siihen yhdistetyt API/Rest rajapinnat mahdollistavat kolmansien osapuolten tuottamat datapohjaiset lisäarvopalvelut.

Enermix Oy:n kehittämä digitaalinen IoT-alusta mahdollistaa myös järjestelmään liitettävien automaatio- ja ohjausjärjestelmien etäohjauksen ja -valvonnan. Tämä ominaisuus mahdollistaa mm. olemassa olevaan vanhaan rakennuskantaan tuotavat älykkäät ohjaus- ja valvomopalvelut (digitaaliset käyttöliittymät, visualisoinnit, prosessikaaviot ym.).

Kuvassa 8.1 esitetään Talotohtori 2.0 digitaalisen IoT-alustan periaatekuva. Järjestelmässä on valmiit rajapinnat useimmille Suomessa kaupallisesti sovellettavalle langattomalle ja väyläpohjaiselle tiedonsiirtoteknologialle. Järjestelmä integroi sekä talo- ja kiinteistöautomaation järjestelmiä että hajautetun

IoT:n kuten LoRa- ja Sigfox-tekniikan erillisalustoja. Mahdollisuus uuden ha-
 jautetun ja perinteisen automaation integrointiin mahdollistaa yhdenmukaisen
 valvomokäyttöliittymän esimerkiksi talotekniikan hallintaan, mikä helpottaa esi-
 merkiksi kiinteistöjen teknisen isännöinnin ja kiinteistövalvonnan työtä. Yhden-
 mukainen, teknologianeutraali ja harmonisoitu käyttöliittymä integroi eri val-
 mistajien ja ikäkauden teknologiat ja mahdollistaa älykkäät kiinteistöjen IoT-
 ratkaisut suurille kiinteistömassoille.



Kuva 8.1. Talotohtori 2.0 digitaalisen IoT-alustan periaatekuva.

8.1 Ilmastomuutoksen hillintä lisää IoT-ratkaisujen soveltamista

Ilmastomuutoksen hillitseminen lisää energiatehokkaan teknologian kysyntää. Tarve erilaisia ohjaus- ja automaatioteknologioita datatasolla integroiville järjestelmille kasvaa, kun keväällä 2018 annettu rakennusten energiatehokkuutta koskeva direktiivi (2018/844/EU) astuu voimaan maaliskuussa 2020. Rakennusten osalta tavoitellaan CO₂-neutraalisuutta vuoteen 2050 mennessä osana ilmastonmuutosta hillitseviä politiikkatoimenpiteitä.

Direktiivissä korostetaan rakennusten energia- ja ilmanvaihtojärjestelmien digitalisoinnin tarvetta ja erilaisten teknisten järjestelmien kykyä liittyä erilaisiin

tietoverkkoihin (kommunikointikyky). Talo- ja kiinteistöautomaatiolta edellytetään jatkossa lisää älykkyyttä ja kykyä kommunikoida sekä uuteen että vanhaan (olemassa olevaan) teknologiaan perustuvien järjestelmien kanssa. Tarve järjestelmä- ja tilakohtaisille mittauksille kasvaa ja tämä lisää mm. langattomien tiedonsiirtoteknologioiden käyttöä olemassa olevien asuinkerrosten huonekohtaisissa mittauksissa ja olemassa olevan kiinteistöautomaation modernisoinnissa. Energiatehokkuustavoitteet edellyttävät aiempaa parempaa ja tehokkaampaa monitorointia ja järjestelmien automaattisia ohjauksia (järjestelmien hyötysuhdevalvonta, toimivuuden tarkastuksia, sähköautojen lataus jne.).

8.2 Digitaalinen talo- ja kiinteistöautomaation integraatioalusta

Erilaisten älykkäiden IoT-laitteiden yleistyminen moninkertaistaa datan, tiedonsiirron ja tiedonsiirrossa käytettävien yhteyksien ja teknologioiden määrän. Erilaisia tiedonsiirtoprotokollia ja -teknologioita hyödyntävien älykkäiden IoT-laitteiden ja automaatiojärjestelmien tuottaman datan hyödyntäminen edellyttää monipuolisia tietojärjestelmiä, digitaalisia alustoja, joissa monimuotoista dataa jalostetaan ja yhdistellään.

Seuraavissa kappaleissa esitellään yleisellä tasolla kaksi Enermix Oy:n digitaaliseen IoT-alustaan liittyvää IoT-asiakassovellusta, joissa hyödynnettiin eräitä tässä opinnäytetyössä esiteltyjä langattomia teknologioita. Asiakastapaukset kuvataan alla kohdassa 8.3 kuvattavan NABC- mallin avulla ja molemmat asiakkaiden kuvaukset tapauksista sisältää niiden osa-alueiden läpikäymisen ja tiivistämisen.

8.3 NABC lähestymistapa IoT-ratkaisun arvioinnissa

NABC lähestymistapa tarkoittaa tarpeen (need), ratkaisun (approach), hyötyjen (benefits) ja kilpailun (competition) arvioimista ongelmaa lähestyttäessä. Tarvetta ajatellaan asiakkaan näkökulmasta ja ratkaisutapa räätälöidään asiakkaalle kyseisten tarpeiden mukaiseksi. Ratkaisutavan hyötyjä punnitaan

yleensä taloudellisen hyödyn hinnan (kustannus, säästö, tuotto), toimivuuden ja nopeuden (ajan säästö tms.) osalta ja sopivan ratkaisun löydyttyä edellytetään selkää perustelua sille, miksi juuri kyseinen tapa on parempi kuin kilpailevat vaihtoehdot.

8.4 Leppäkosken Sähkö Oy toimitalo Ikaalisissa

Leppäkoski on Pirkanmaalla toimiva energiakonserni (www.leppakoski.fi). Konserniin kuuluvat emoyhtiö Leppäkosken Sähkö Oy:n verkkoliiketoiminnan (sähkön siirto) lisäksi konserniyhtiöt, Leppäkosken Energia Oy (sähkökauppa, sähkön hankinta ja myynti), Leppäkosken Lämpö Oy (lämmön hankinta ja myynti, maakaasuliiketoiminta). Vuonna 2018 konsernin liikevaihto oli noin 55 miljoonaa euroa. Yhtiön toimialue käsittää mm. Nokia, Ylöjärven, Hämeenkyrön, Ikaalisten ja Parkanon kunnat.

Leppäkoski on kehittänyt ja pilotoinut omissa ja asiakaskohteissaan uusia hajautettuja tuotantoteknologioita (aurinkoenergia) ja IoT-tyyppisiä älyratkaisuja (energiatehokkuus). Ikaalisten toimitalon aurinkokeräimet ja -paneelit sekä älykäs vesipattereiden lämmityksenohjaus otettiin käyttöön vuonna 2017.

Toimitalon kaukolämpöjärjestelmään liitettiin erillisillä lämmönvaihtimilla nimelisteholtaan noin 40 kW tehoinen aurinkokeräinjärjestelmä. Kiinteistön sähköverkkoon integroitiin 5,7 kW aurinkopaneelijärjestelmä ja sen 7,2 kWh:n sähkövarasto (akusto). Toimitalon vesikiertoisien lämmitysjärjestelmän mekaaniset patteritermostaatit (50 kpl) korvattiin uusilla etäohjattavilla älytermostaateilla ja kiinteistöön asennettiin huone- ja tilakohtaisia olosuhdemittauksia (lämpötila, suhteellinen kosteus, CO₂, paine-ero).

Aurinkolämmön osalta järjestelmä on 2-suuntainen ja kesällä ylimääräinen aurinkolämpö syötetään kaukolämpöverkkoon. Akuston käyttöä optimoidaan sähkön spot-hinnan perusteella. Tilalämmityksessä otettiin käyttöön älykäs sisälämpötilaohjaus, joka mahdollistaa tila- ja vesipatterikohtaisen lämpötilasäädön.

Kiinteistön olemassa olevan ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmän ohjaus sekä päävesimittari integroitiin uuteen IoT-ohjausjärjestelmään erillisen väylän ja kommunikaatorajapinna avulla.

8.4.1 Asiakkaan tarpeet

Leppäkosken Sähkö Oy:n tavoitteena oli uusia kiinteistön vanhentunut kauko-
lämpövaihdin sekä samalla pilotoida uuden teknologian mahdollistamia aurin-
koenergia-, energiatehokkuus- ja älyohjausratkaisuja 1970-luvulla rakenne-
tussa toimitalossa.

Toimistorakennuksen lämpötilansäädössä päädyttiin langattomaan ratkai-
suun, jossa huonetiloihin asennettiin lämpötilasensoreita ja langattomasti oh-
jattavia vesipatterikohtaisia älytermostaatteja. Langattomat ja paristottomat
älytermostaatit tuottavat oman akkuvarmennetun käyttövoimansa termostattiin
integroidulla termogeneraattorilla (TEG-teknologia, lämpösähköpari). Langat-
tomat lämpötilasensorit saavat käyttövoimansa laitteeseen integroidusta pie-
nestä aurinkokennosta ja laiteparistosta. Älytermostaatteja voidaan ohjata esi-
merkiksi huonelämpötilamittauksen tai aikaohjauksella tunti, päivä tai viikkota-
solla (kuvat 8.3 ja 8.4).

8.4.2 Projektin toteutus

Hankkeen automaatio- ja IoT-osuuden esi- ja toteutussuunnittelusta vastasi
Enermix Oy yhdessä asiakkaan kanssa. Mekaanista laiteasenneuksista ja nii-
den käyttöönotosta vastasivat laitetoimittajat (aurinkosähkö, aurinkolämpö).
Lämmitysjärjestelmän putki- ja laiteasenneuksista ja sähköistyksestä vastasivat
paikalliset LVI- ja sähköurakoitsijat. Järjestelmän automaation ja älyohjauksen
toiminnallisuudet määritteli asiakas yhdessä automaatiotoimittajan kanssa.
Järjestelmän ohjaukset toteutettiin EnOcean- ja Modbus-teknologialla. Ku-
vassa 8.2 esitetään EnOcean-teknologiaan perustuvan lämmityksen langatto-
man älyohjauksen periaatekuva.



Kuva 8.2. Periaatekuva älykkään lämpötilaohjauksen toteutuksesta.

Toimitilan kattava langaton EnOcean-radioverkko edellytti kahta reititintä ja neljää signaalin toistinta. Kuvissa 8.3 ja 8.4 esitetään langaton huonesensori ja langattomasti ohjattava patteriventtiili.



Kuva 8.3. ja kuva 8.4 Valokennolla ja paristolla varustettu langaton EnOcean lämpötila-anturi sekä EnOcean teknologialla langattomasti etäohjattava patteritermostaatti.

Toimitaloon asennettiin 35 langatonta sensoria. Osa sensoreista mittaa lämpötilan (T-anturi) lisäksi suhteellista kosteutta (TH-anturi) ja CO₂-pitoisuuksia (THC-anturi).

Kiinteistöön asennettiin myös kolme paine-eromittaus (paine-ero rakennuksen vaipan yli). Erilaiset sensorit kommunikoivat 600 - 1000 sekunnin välein järjestelmää ohjaavan automaation kanssa (kommunikoinnin aika on aseteltavissa). Järjestelmään liitettyjen sensoreiden ja toimilaitteiden viestiliikenteen toimivuutta valvotaan automaattisesti ja viestiliikenteen katkos generoi hälytyksen. Sensoreille on aseteltavissa erillisiä hälytysrajoja kuten lämpötilan ylä- ja alarajahälytykset. Hälytykset voidaan lähettää esimerkiksi haluttujen vastaanottajien sähköposteihin. Kuvassa 8.5 esitetään pelkistetty kaaviokuva erillisestä huonetilojen valvontanäytöstä. Kuvassa esitetään mm. huone ja tilakohtaisia lämpötiloja ja älytermostaatin säädön %-arvoa.



Kuva 8.5. Esimerkki Talotohtorin käyttäjäliittymän etävalvomonäytöstä. Trendikuvake avaa trendinäkömän (vapaa aika-asettelu, sekunti, tunti, vrk). Työkalukuvakkeesta voidaan asettaa mm. yksittäisen patteritermostaatin toimintoja ja hälytysrajoja.

8.4.3 Projektin tulokset

Älykkään langattoman lämpötilaohjauksen ja aurinkojärjestelmien käyttöönoton jälkeen toimitalon kaukolämmön kulutus on vuodessa pienentynyt noin 30 % (noin 100 MWh). Energian säästö on merkittävä.

Eri huonetilojen väliset lämpötilaerot ovat tasoittuneet. Yöajan ja viikonloppujen tilakohtainen lämpötilapudotus on toiminut suunnitellusti. Käyttäjäkokeemukset ovat olleet pääasiassa myönteisiä ja osa tilojen käyttäjistä kokee parempaa viihtyvyyttä (huonetilojen yli- ja alilämmön hallinta). Älykäs ohjaus reagoi nopeasti ulkopuolisiin lämmönlähteisiin kuten auringon lämmitysvaikutukseen ja tilojen henkilömäärään. Tyypillisesti yhden asteen sisälämpötilan pudotus vähentää energian kulutusta noin 5 %.

IoT-projektin noin kahden vuoden käyttökokemusten perusteella kiinteistön energiajärjestelmän älykkyyden nosto ja ohjausjärjestelmien tekninen uudistaminen on ollut taloudellisesti, toiminnallisesti ja energiatehokkuuden kannalta perusteltua. Langaton älykäs IoT-teknologia soveltuu hyvin vanhan kiinteistön olemassa olevan lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien energiatehokkuuden parantamiseen.



Kuva 8.6. Leppäkosken Sähkö Oy Ikaalisten toimitalo.

8.5 Y-Säätiö KIRA-digi hanke

Y-Säätiö on Suomen neljänneksi suurin vuokranantaja (<https://ysaatio.fi/>). Kaukolämmitettävissä vuokrakiinteistöissä asuntojen sisäilman olosuhteiden säätö ei yleensä ole asukkaan omassa käsissä ja usein lämmitysjärjestelmän käyttö ei ole optimaalista suhteessa lämmitystarpeeseen ja sisäilmaolosuhteisiin. Y-Säätiön KIRA-digikokeiluhankkeen (Kiinteistö- ja Rakennusalan digitalisaatiohanke) tarkoituksena oli pilotoida ja tutkia sitä, kuinka luotettavasti ja tarkasti toimisi älykäs lämmityksen ohjauspalvelu, jolla vuokrakerrostalon asukkaat pystyisivät itse vaikuttamaan asuntonsa olosuhteisiin huoneistotasolla. Lisäksi haluttiin selvittää kaukolämmön kysyntäjoustop toteutettavuutta ja soveltuvuutta näissä kohteissa. Enermix Oy osallistui hankkeen toteutukseen älyohjauksen palveluntuottajana. Hankkeen yhteistyökumppaneita olivat Pirkanmaan Vedenkäsittely Oy (<https://pirkanmaanvedenkasittely.fi/>) ja APIInf Oy. Hankkeen toteutettiin aikavälillä 1.5.2018 – 31.12.2018.

8.5.1 Asiakkaan tarpeet

Pilot-hankkeen kohteeksi valittiin kolme Y-Säätiön asuinkerrostaloa, jotka sijaitsevat Tampereella ja Pirkkalassa. Y-Säätiön odotukset hankkeelta olivat mm. seuraavia:

- Energian kulutuksen optimoinnin tuottamat kustannussäästöt,
- Asuntojen sisäilmaolosuhteet pysyvät hyvinä lämpötila-anturien mahdollistaman seurannan avulla,
- Lämmityksen hallinta helpottuu,
- Poikkeamiin ja vikatilanteisiin pystytään reagoimaan helpommin järjestelmän tuottaman datan perusteella,
- Asukkailla on mahdollisuus seurata keskimääräistä sisälämpötilaa ja antaa palautetta sovelluksen avulla ja
- Asukkailla on mahdollista tulevaisuudessa vaikuttaa itse asunnon lämpötilaan itse.

Hankkeen laajuus oli aluksi kymmenen Y-Säätiön kerrostalokohdetta, mutta hankkeen aikataulun vuoksi toteutukseen valittiin kolme vuokrakerrostalolla. [82]

8.5.2 Hankkeen tavoitteet

Päätavoite oli todentaa toteutetun palvelun ja laskentamallien toimintaa käytännön olosuhteissa ja selvittää palvelun toimivuus ja luotettavuus. Yksi seurattavista tavoitteista oli kahden vierekkäisen huoneiston lämpötilahallinta tilanne, jossa toisen haluttu lämpötila on esimerkiksi + 20C ja sen viereisen huoneistossa + 22C. Toinen tavoite oli vähintään 10 % keskimääräinen energiansäästö kohdekiinteistössä. Lisäksi haluttiin selvittää, onko mahdollista määrittää riittävän tarkka ja oikeudenmukainen laskentamalli, joka jyvittäisi kuukausittain lämmityskustannuksen eri asuinhuoneistojen välillä. Tavoitteiden mittareina olivat seuraavat asiat [82]:

1. **Tavoite:** Palvelun toimivuus huoneistotason säädölle.
Mittari: kuinka tarkasti lämpötilan säätö toteutuu (tavoite +/- 1 C-aste)
2. **Tavoite:** Laskentamallin toimivuus.
Mittari: kustannuksen jyvitys on oikeudenmukainen eri asuinhuoneistojen välillä. Oikeudenmukaisuutta arvioitaessa huomioidaan myös pilotkohteiden palaute.
3. **Tavoite:** API-rajapinta on valmis ja dokumentoitu sekä julkaistu APIInf alustalle.
Mittari: API rajapintaa käytetään dokumentin mukaisesti ja se toimii kuten dokumentti kuvaa.
4. **Tavoite:** Palvelulla saadaan merkittävää energiansäästöä.
Mittari: Palvelu kokonaisuutena tuottaa keskimäärin vähintään 10% säästön lämmityskustannuksiin

Kaikissa pilot-kohteiden asunnoissa huoneiston tavoitelämpötilaksi asetettiin 21,0-22,0 C-astetta, jota palvelun tuli ylläpitää automaattisesti sisälämpötilan kompensointialgoritmilla. [82]

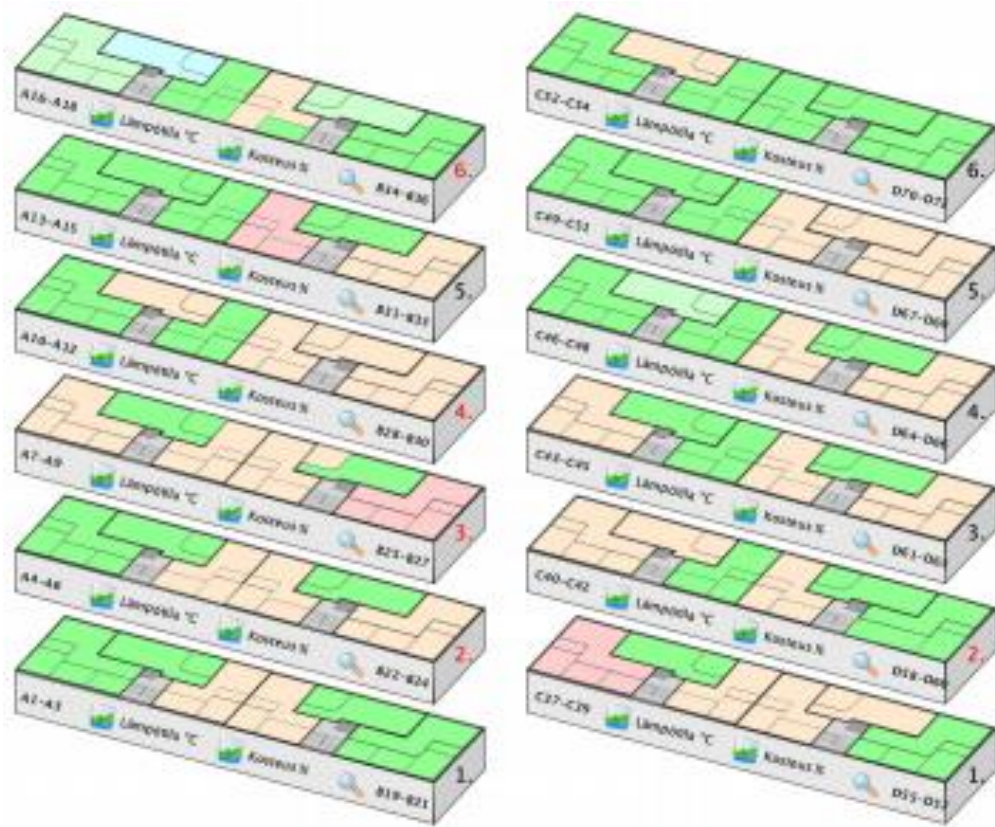
8.5.3 Hankkeen toteutus

Yhteensä 155 huoneistoon asennettiin lämpötilaa ja ilmankosteutta mittaavat MESH- tai Sigfox-sensorit. Lisäksi 11:sta huoneistoon asennettiin patterikoh-
 taiset älytermostaatit. Asennukset toteutettiin heinä- ja syyskuun välisenä ai-
 kana. Syys-lokakuussa asukkaille annettiin käyttöön Enermix Oy:n Talotohtori
 Home mobiilisovellus, jolla asukas pystyi vaikuttamaan asunnon sisälämpöti-
 laan ja seuraamaan asunnon lämpötilan ja ilmankosteuden arvoja. Sovellus
 sisälsi myös asukkaan sähköisen palautejärjestelmän, jolla asukas pystyy an-
 tamaan palautetta huoneiston olosuhteista. Asukkaiden perehdytys sovelluk-
 sen käyttöön suoritettiin Enermix Oy:n toimesta. [82]



Kuva 8.7. Talotohtori valvomon trendinäkömää lämpötilan muutoksista ja patteriventtiilin asentotiedosta asukkaan asettaman sisälämpötilan pyyntiarvon mukaan, sekä oikealla Talotohtori Home mobiilisovelluksen käyttöliittymä. [82]

Pilot-kohteista luotiin Talotohtori valvomoon 2D- ja 3D-mallit, joista kunkin rakennuksen huoneistojen tilanne oli nähtävissä yhdellä silmäyksellä. Kuvan värit esittävät sitä, kuinka hyvin sisälämpötila tai sisäilmankosteus vastaavat haluttua lämpötilaa tai kosteutta (vihreällä värillä esitetty) – kuvassa liian matala lämpötila esitetään vaaleanvihreällä sekä sinisellä ja liian korkea lämpötila oransilla sekä punaisella. Antureiden mitaamat arvot tallennetaan järjestelmään ja halutun aikavälin historiadata voidaan esittää trendeinä. Älytermostaattien ohjaamisessa voidaan käyttää sekä asunnon lämpötila-anturin mitaamaa arvoa ja patteritermostaattiin integroidun älykkään mittauksen arvoa.



Kuva 8.8. 3D-grafiikkaa Talotohtori valvomossa yhdestä KiRa-digi-hankkeen kohde kiinteistöistä. [82]

Kunkin huoneiston asukas näkee mobiilisovelluksesta vain oman asuntonsa tilanteen. Asukkailla ei ole pääsyä koko kiinteistön tilannetta esittävään Talotohtori-järjestelmän valvomoon.

8.5.4 Hankkeen tulokset

Hankkeelle asetetut tavoitteet saavutettiin pääosin asetetulla tavalla:

1. Tavoite saavutettiin, koska sisälämpötilojen keskiarvo pystyttiin pitämään tavoitellun vaihteluvälin sisällä. Vaihteluväli voidaan saavuttaa parhaimmillaan jopa +/- 0,3 C-asteen tarkkuudella.
2. Tavoite laskentamallin toimivuudesta jäi saavuttamatta kokeilun lyhyen keston takia. Kokeilu päättyi kesken lämmityskauden ja mittauksia sekä säätötoimenpiteitä olisi pitänyt jatkaa yhden tai useamman lämmityskauden ajan laskentamallin luotettavuuden parantamiseksi.

3. Tavoite saavutettiin - API rajapinta julkaistiin, testattiin ja dokumentoitiin APIInf alustalle.
4. Tavoite saavutettiin. Tehdyt ohjaukset, säädöt ja älykkäät algoritmit pienensivät kaukolämmön huipputehoa 20-30 % ja energiankulutusta keskimäärin 5 %. Energiakulutuksen pienehkö lasku johtuu siitä, että sisälämpötilan keskiarvo on ollut tavoitetasoa korkeampi. Huipputehon pienentyminen laskee kaukolämmön perusmaksua, joten tavoiteltu vähintään 10 % kustannussäästö pystytään saavuttamaan. Mittausta tulisi jatkaa vähintään täyden lämmityskauden ajan, jonka jälkeen todellinen säästö voidaan laskea riittävän luotettavasti. [82]

KiRa-Digi-hanke osoitti, että olemassa olevissa asuinkerrostaloissa on edelleen merkittävä hyödyntämätön potentiaali asumismukavuuden parantamiselle ja energiansäästölle. Tilastokeskuksen mukaan suomalaista noin 1,9 miljoonaa asuu kerrostaloasunnoissa ja kerrostaloasumisen suosio on kasvanut viimeisen kymmenen vuoden ajan. [82]

Hankkeessa sovellettu langaton IoT-teknologia soveltuu hyvin asuinkiinteistöjen lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien älyohjaukseen, jolla parannetaan energiatehokkuutta ja asukkaiden asumisviihtyvyyttä (sisäilmaolosuhteet). Vähentynyt energiakulutus pienentää asumisen energiakustannuksia ja ilmasto- ja ympäristövaikutuksia. Langattoman teknologian käyttöönotto olemassa olevassa kiinteistössä on yleensä nopeaa ja kustannustehokasta. Uusi langaton teknologia soveltuu hyvin vanhojen asuinkerrostalojen energiatehokkuuden nostoon ja asumisviihtyvyyden parantamiseen.

KiRa-digi-kokeiluhankkeesta hyötyivät ensisijaisesti hankkeessa mukana olevien kerrostalojen asukkaat ja kiinteistön omistaja. Hankkeen aikana luodusta järjestelmän avoimesta rajapinnasta saatavista tiedoista hyötyvät monet toimijat. Lisäksi hankkeen tuottamaa tietoa on mahdollista käyttää tutkimuskäytössä, palvelun jatkokehityksessä ja uusien palveluiden kehittämisessä. Hankkeen arviointiraportti on julkaistu 16.5.2019. [82]

9 YHTEENVETO

Tässä insinööriyössä läpikäytiin erilaisissa IoT-ratkaisuissa käytettäviä langattomia teknologioita, joiden soveltaminen on nopeassa kasvussa monilla toimialoilla kuten energiasektorilla. Langattoman teknologian soveltamisen suosiota ovat kasvattaneet lisenssivapaiden ISM-radiotaajuuksia hyödyntävien teknologioiden nopea kehitys ja maailmanlaajuinen soveltaminen, teknologioiden helppo ja nopea käyttöönotto, investointien ja teknologioiden käytön laskevat hinnat sekä eri toimialojen kiristynyt kilpailu, joka on vauhdittanut perinteisten liiketoimintaprosessien digitalisointia ja uusien datapohjaisten liiketoimien kehittämistä.

Langattomissa etäluentaja- ja IoT-sovelluksissa lisenssivapaat teknologiat tulevat kilpailemaan sekä perinteisen että uuden matkapuhelinverkkoteknologioiden kanssa. Energiasektorilla uudet kilpailukykyiset lisenssivapaat teknologiat tulevat laajempaan käyttöön esimerkiksi sähkö- ja kaukolämpöverkkojen energiamittauksissa sekä asiakkaille tarjottavissa uusissa digitaalisissa olosuhdepalveluissa, joissa tiedonsiirron nopeus ei ole keskeinen teknologian valinta-peruste.

Talo- ja kiinteistöautomaation sekä näiden kiinteistökohtaisiin järjestelmiin liittyvien älykkäiden toimintojen yleistyminen ja energiatehokkuus- ja älypalveluita tarjoavien uusien yritysten markkinoille tulo vauhdittaa langattomien lisenssivapaiden IoT-teknologioiden soveltamista myös kiinteistöaloilla.

Lisenssivapaaseen langattomaan tiedonsiirtoon perustuvien IoT-palveluiden markkinoiden kasvu ja muut vaihtoehtoiset langattomat teknologiat vaikuttavat myös mobiiliverkko-operaattoreiden liiketoimintaan. Suomessa mobiiliverkon operaattorit ovatkin tuoneet markkinoille omiin verkkoihinsa perustuvaa NB-IoT-teknologiaa ja langattomia älyratkaisuja, jotka kilpailevat lisenssivapaiden LPWAN-teknologioihin perustuvien erilliskäyttöjen kanssa.

Useissa sovelluksissa uudet langattomat IoT-ratkaisut ja niiden älykkäät päätelaitteet täydentävät olemassa olevia automaatio- ja mittausjärjestelmiä.

LPWAN-tekniikat soveltuvat hyvin pienten datamäärien siirtämiseen sekä laajoissa alueellisissa verkoissa että suljetuissa yritys- ja kiinteistöverkoissa.

Tulevaisuudessa yhä useampi älykäs laite tulee olemaan jossain määrin yhteydessä internetiin ja laitteiden välinen monipuolinen kommunikointi kasvaa ja yleistyy. Uusien datapohjaisten älysovellusten ja -palveluiden (keinoäly ja koneoppiminen) markkinat kasvavat. Selvityksen perusteella voidaan todeta, että ei ole kaikkii käyttötarkoituksiin optimaalisesti soveltuvaa langatonta teknologiaa ja useimmat laajat ratkaisut perustuvat useiden eri teknologioiden hybridiverkkoihin.

Energiasektorilla ja monilla muilla infrastruktuuri- ja palvelu-aloilla uusien lisenssipaiden IoT-tekniikoiden soveltaminen on vielä vähäistä. Toisaalta energiamaarkkinoiden murros ja alan kiristynyt kilpailu on lisännyt energiayhtiöiden uusien liiketoimintojen ja palveluiden kehityspanostuksia ja teknologiapilotoiteja mm. kiinteistöjen energiatehokkuus- ja IoT-pohjaisten olosuhdepalveluiden suuntaan. Langattoman IoT-tekniikan valinta on suurissa ja maantieteellisesti laajoissa IoT-sovelluksissa sekä teknistaloudellinen että strateginen valinta. Usein vielä joko oman verkon tai ostettavan palvelun välillä.

10 POHDINTAA

Tämän insinööritöön tekeminen antoi laajan yleisen tason kuvan tämän hetken keskeisimmistä sekä markkinoille saapuvista IoT-tekniikoista ja niiden soveltamisalueista. Lisäksi töön tekeminen syvensi teoreettista tietämystäni muidenkin radiotekniikoiden toimintaperiaatteista, kuten GSM, LTE sekä 5G ja töötä tehdessä törmäsin myös suureen määrään erilaisia teknisiä termejä ja lyhenteitä, jotka jäivät hyvin mieleen kirjoittamisen yhteydessä. Insinööritöön jälkeen ymmärrän myös energia-alan yritysten näkökulman nopeasti etenevään digitalisaatioon ja sen tuomiin alan toimintamallien kehitysmahdollisuuksiin ja niiden edellytyksiin. Insinööritöön tekeminen herätti kiinnostuksen aihepiiriä kohtaan ja pyrin jatkossakin pitämään tietoni aihepiiristä ajan tasalla.

LÄHTEET

- [1] Semtech. What is LoRa®? Artikkele. <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora> Viitattu 6.2.2019.
- [2] Digita Oy, Mikä on LoRaWAN? Artikkele. https://www.digita.fi/yrityksille/iot/mika_on_lorawan Viitattu 6.2.2019.
- [3] LoRa Alliance™, About Lora Alliance™, LoRa Alliance™ FAQs. Artikkele. <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance> Viitattu 6.2.2019.
- [4] LoRa Alliance™, What is the LoRaWAN™ Specification? Artikkele. <https://lora-alliance.org/about-lorawan> Viitattu 6.2.2019.
- [5] Wikipedia, Advanced Encryption Standard, Security. Artikkele. https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Encryption_Standard#cite_note-improved-17 Viitattu 6.2.2019.
- [6] LoRa teknologian ratkaisut ja tuotteet, Jari Makslahti, Effectio Oy. PDF.
- [7] LoRaWAN What is it? A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. PDF. <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf> Viitattu 7.2.2019.
- [8] 10 Things About LoRaWAN & NB-IoT. PDF. <https://info.semtech.com/compare-lora-and-nb-iot-infographic> Viitattu 7.2.2019.
- [9] LoRaWAN Security. PDF. https://lora-alliance.org/sites/default/files/2019-05/lorawan_security_whitepaper.pdf Viitattu 22.2.2019.
- [10] Security in LoRaWAN Applications, SmartMakers. Artikkele. <https://smartmakers.io/en/security-in-lorawan-applications/> Viitattu 28.2.2019.
- [11] LoRaWAN Security, The Things Network. Artikkele. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/security.html> Viitattu 28.2.2019.
- [12] LPWAN, LoRa, LoRaWAN and the Internet of Things, Prashant Ram. Artikkele. <https://medium.com/coinmonks/lpwan-lora-lorawan-and-the-internet-of-things-aed7d5975d5d> Viitattu 30.2.2019.
- [13] LoRa Alliance Passes 100 LoRaWAN™ Network Operator Milestone with Coverage in 100 Countries. Artikkele. <https://lora-alliance.org/in-the-news/lora-alliance-passes-100-lorawantm-network-operator-milestone-coverage-100-countries> Viitattu 30.2.2019.
- [14] LoRa Designer's Guide, Semtech. PDF. https://www.semtech.com/uploads/documents/LoraDesignGuide_STD.pdf Viitattu 30.2.2019.
- [15] Digita LoRaWAN-verkon peittokartta. Artikkele. https://www.digita.fi/yrityksille/iot/iot_lorawan-verkon_peittokartta Viitattu 30.2.2019.

- [16] LTE-A:n kolmen kanta-aallon yhdistäminen DL-tiedonsiirrossa. Jesse Ke-tonen 2017. PDF. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/137470/Ke-tonen_Jesse.pdf?sequence=1 Viitattu 11.3.2019.
- [17] 3GPP NB-IOT DEPLOYMENT AND OPTIMIZATION CHALLENGES. Genis Sanchez. 18.12.2017. Blog. <https://blog.viavi-solutions.com/2017/12/18/3gpp-nb-iot-deployment-and-optimization-chal-lenges/> Viitattu 11.3.2019.
- [18] LTE Protocol Stack Layers. TutorialsPoint. Artikkele. https://www.tuto-rialspoint.com/lte/lte_protocol_stack_layers.htm Viitattu 14.3.2019.
- [19] LTE Network Architecture. TutorialsPoint. Artikkele. https://www.tuto-rialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm Viitattu 15.3.2019.
- [20] Narrowband-IoT: pushing the boundaries of IoT. Vodafone Group. 2017. PDF. https://www.vodafone.com/business/news-and-insights/white-pa-per/narrowband-iot-pushing-the-boundaries-of-iot?ecmp=marcom_ad-words_nbiot &src=marcom_adwords_nbiot #form-content Viitattu 15.3.2019.
- [21] LTE Protocol Stacks. Artiza Networks. Figure 1. Artikkele. http://www.arti-zanetworks.com/resources/tutorials/pro_sta.html Viitattu 17.3.2019.
- [22] LTE Security – How Good Is It? Jeffrey Cichonski & Joshua Franklin. 2015. PDF. https://www.rsaconference.com/writable/presentati-ons/file_upload/tech-r03_lte-security-how-good-is-it.pdf Viitattu 17.3.2019.
- [23] Air Interface Concepts CHAPTER 2. Figure 2.3-1. https://m.eet.com/me-dia/1072709/LTE_Chapter2_38to42.pdf Viitattu 17.3.2019.
- [24] Narrowband Internet of Things Whitepaper. J. Schlien, D. Raddino. 8.8.2016. https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_applica-tion/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf Viitattu 17.3.2019.
- [25] What is Sigfox? Artikkele. <https://build.sigfox.com/sigfox> Viitattu 27.5.2019.
- [26] Frequency-shift keying. Wikipedia. Gaussian frequency-shift keying. Ar-tikkele. https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-shift_keying#Gaussian_fre-quency-shift_keying Viitattu 27.5.2019.
- [27] Radio Technology Keypoints. Artikkele. <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-radio-technology> Viitattu 27.5.2019.
- [28] Technical Topics. Network services & information. Radio Configurations. Artikkele. <https://build.sigfox.com/sigfox-radio-configurations-rc> Viitattu 27.5.2019.
- [29] Technical Topics. Network services & information. Monarch. Artikkele. <https://build.sigfox.com/monarch> Viitattu 27.5.2019.

- [30] Technical Topics. Network services & information. Location. Artikkele. <https://build.sigfox.com/location> Viitattu 27.5.2019.
- [31] Sigfox Technology Overview. Design choices and benefits. Artikkele. <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview> Viitattu 1.6.2019
- [32] Make things come alive in a secure way. Security of the Sigfox Network. Artikkele. <https://www.sigfox.com/en/technology/security> Viitattu 1.6.2019.
- [33] Sigfox. Coverage. Artikkele. <https://www.sigfox.com/en/coverage> Viitattu 1.6.2019.
- [34] Techplayon. LoRa- (Long Range) Network and Protocol Architecture with Its Frame Structure. LoRa Frame Format. 10.10.2018. Artikkele. <http://www.techplayon.com/lora-long-range-network-architecture-protocol-architecture-and-frame-formats/> Viitattu 22.6.2019.
- [35] GSMA. Extended Coverage – GSM – Internet of Things (EC-GSM-IoT). Artikkele. <https://www.gsma.com/iot/extended-coverage-gsm-internet-of-things-ec-gsm-iot/> Viitattu 3.7.2019.
- [36] 3GPP Standards for the Internet-of-Things. Philippe Reininger. 14.12.2016. Diaesitys. <https://www.slideshare.net/eikoseidel/3gpp-standards-for-the-internetofthings> Viitattu 3.7.2019.
- [37] LoRa ELG. Artikkele. <https://www.elsys.se/en/elg/> Viitattu 5.7.2019.
- [38] LoRa ERS/ERS Lite. Artikkele. <https://www.elsys.se/en/ers/> Viitattu 5.7.2019.
- [39] LoRa ELT 2. Artikkele. <https://www.elsys.se/en/lora-elt-2/> Viitattu 5.7.2019.
- [40] Sovellukset. Connected Inventions. Artikkele. <https://www.connectedfinland.fi/ratkaisut/> Viitattu 7.7.2019.
- [41] Efento. NB-IoT Temperature and humidity sensor. Artikkele. <https://getefento.com/product/nb-iot-temperature-and-humidity-sensor/> Viitattu 5.7.2019.
- [42] GSMA. Long Term Evolution for Machines: LTE-M. Artikkele. <https://www.gsma.com/iot/long-term-evolution-machine-type-communication-lte-mtc-cat-m1/> Viitattu 5.7.2019.
- [43] Wikipedia. LTE-M. Artikkele. <https://en.wikipedia.org/wiki/LTE-M> Viitattu 7.7.2019.
- [44] Sigfox Technical Overview. PDF. <https://halberdbastion.com/sites/default/files/2017-06/Sigfox-Technical-Overview.pdf> Viitattu 7.7.2019.

- [45] Halberd Bastion. 3GPP Low Power Wide Area Technologies GSMA white paper. GSMA Mobile IoT Industry Alignment group. PDF. 2016. <https://halberdbastion.com/sites/default/files/2017-06/3GPP-Low-Power-Wide-Area-Technologies-GSMA-White-Paper.pdf> Viitattu 7.7.2019.
- [46] Halberd Bastion. Nokia. LTE evolution for IoT connectivity. PDF. 2017. https://halberdbastion.com/sites/default/files/2017-06/Nokia_LTE_Evolution_for_IoT_Connectivity_White_Paper.pdf Viitattu 20.7.2019.
- [47] u-blox. LTE-Cat-1. Artikkele. <https://www.u-blox.com/en/lte-m> Viitattu 20.7.2019.
- [48] Leading the LTE IoT evolution to connect the massive Internet of Things. Heinäkuu 2018. PDF. <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/leading-the-lte-iot-evolution-to-connect-the-massive-internet-of-things.pdf> Viitattu 24.7.2019.
- [49] 5G and Massive IoT. Christian Kim. Helmikuu 2019. Artikkele. <https://technology.ihs.com/611104/5g-and-massive-iot> Viitattu 24.7.2019.
- [50] Ericsson. Cellular IoT Evolution for Industry Digitalization. 2018. <https://www.ericsson.com/en/white-papers/cellular-iot-evolution-for-industry-digitalization> Viitattu 24.7.2019.
- [51] Bluetooth Technology radio versions. Artikkele. <https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology/radio-versions/> Viitattu 14.8.2019.
- [52] Bluetooth. Artikkele. <https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth> Viitattu 14.8.2019.
- [53] Wi-Fi HaLow. Low power, long range Wi-Fi. Artikkele. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-halow> Viitattu 14.8.2019.
- [54] Giant strides to connect all things with Wi-Fi 802.11ah (HaLow). Claus Hetting. Kesäkuu 2017. <https://wifinowevents.com/news-and-blog/giant-strides-connect-things-wi-fi-802-11ah-halow/> Viitattu 14.8.2019.
- [55] Halberd Bastion. Zigbee. Artikkele. <https://halberdbastion.com/technology/iot/iot-protocols/zigbee> Viitattu 19.8.2019.
- [56] Zigbee Wireless Mesh Networking. Artikkele. <https://www.digi.com/resources/standards-and-technologies/zigbee-wireless-mesh-networking> Viitattu 19.8.2019.
- [57] Zigbee Alliance. Zigbee is the only complete IoT solution, from the mesh network to the universal language that allows smart objects to work together. Artikkele. <https://www.zigbee.org/zigbee-for-developers/zigbee-3-0/> Viitattu 19.8.2019.

- [58] National KNX Finland. KNX-standardi. Artikkel. <http://knx.fi/index.php?k=220446> Viitattu 23.8.2019.
- [59] KNX (standard). Wikipedia artikkeli. [https://en.wikipedia.org/wiki/KNX_\(standard\)](https://en.wikipedia.org/wiki/KNX_(standard)) Viitattu 23.8.2019.
- [60] National KNX Finland. KNX urakoitsijoille. Artikkel. <http://knx.fi/index.php?k=220452> Viitattu 23.8.2019.
- [61] KNX käyttötarkoitukset. Kuva. <http://3-e.co.uk/wp-content/uploads/2018/09/B01765C5-5E09-4702-A1DD-F4E9D7BEF845.jpeg> Viitattu 23.8.2019.
- [62] Wirepas Mesh verkon arkkitehtuuri. Kuva. <https://www.electronicweek.com/news/business/dense-network-wirepas-mesh-nordic-socs-2018-12/> Viitattu 23.8.2019.
- [63] Haltian. What is Wirepas Mesh? Artikkel. <https://haltian.com/connectivity-garage/iot-protocols-overview/mesh-iot/wirepas-mesh/> Viitattu 23.8.2019.
- [64] Wirepas. Technology Overview. Artikkel. <https://wirepas.com/products-and-services/technology-overview/> Viitattu 23.8.2019.
- [65] DASH7. Wikipedia artikkeli. <https://en.wikipedia.org/wiki/DASH7> Viitattu 24.8.2019.
- [66] DASH7 verkon arkkitehtuuri. Kuva. https://www.researchgate.net/figure/DASH7-Alliance-Protocol-Architecture_fig7_328382234 Viitattu 24.8.2019
- [67] Thread in Commercial Network Topology Explained. Jorg Kennis ja Jos Bruins. Toukokuu 2018. Blog. <https://www.threadgroup.org/news-events/blog/ID/185/Thread-in-Commercial-Network-Topology-Explained#.XTmw9OgzaUk> Viitattu 26.8.2019
- [68] EnOcean Wireless Standard. Artikkel. <https://www.enocean-alliance.org/what-is-enocean/enocean-wireless-standard/> Viitattu 26.8.2019.
- [69] EnOcean. Radio Technology. Artikkel. <https://www.enocean.com/technology/radio-technology/> Viitattu 26.8.2019.
- [70] EnOcean. Energy Harvesting. Artikkel. <https://www.enocean.com/en/technology/energy-harvesting/> Viitattu 26.8.2019.
- [71] EnOcean. Ultra-low Power Management. Artikkel. <https://www.enocean.com/technology/energy-harvesting-wireless/> Viitattu 26.8.2019.
- [72] IoT-Point. Z-Wave Tutorial. Avind Singh. Blogi artikkeli. <https://iot-point.wordpress.com/z-wave-tutorial/> Viitattu 20.9.2019.

- [73] IoT-Point. Zigbee Tutorial. Avind Singh. Blogi artikkeli. <https://iot-point.wordpress.com/zigbee-tutorial/> Viitattu 20.9.2019.
- [74] Kuva. <https://www.woodmac.com/our-expertise/focus/Power--Renewables/smart-grid-in-2010/> Viitattu. 26.9.2019.
- [75] Kuva. [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626091/IPOL_STU\(2018\)626091_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626091/IPOL_STU(2018)626091_EN.pdf) Viitattu 29.9.2019.
- [76] Kuva. <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/7/7279> Viitattu 29.9.2029.
- [77] Kuva. <https://www.nissha.com/english/products/allproducts/wireless.html> Viitattu 29.9.2019.
- [78] IoT Protocols Comparison. Haltian. <https://haltian.com/connectivity-garage/iot-protocols-overview/iot-communications-protocols-comparison/> Viitattu 29.9.2019.
- [79] DNA Connectivity IoT. Tuomas Kolkka. Marraskuu 2018. PDF.
- [80] Kuva. <https://www.mdpi.com/1999-5903/11/1/16/pdf> Viitattu 20.10.2019.
- [81] Kuva. <https://www.sierrawireless.com/iot-blog/iot-blog/2016/07/what-is-lpwa-for-the-internet-of-things-part-1-the-three-cs-of-iot/> Viitattu 20.10.2019.
- [82] Kiradigi kokeiluhankkeen loppuraportti. Älykäs lämmityksen ohjaus asuinkerrostaloille asukkaiden ehdoilla. Enermix Oy. 16. maaliskuuta 2019. PDF. http://www.kiradigi.fi/media/hankemateriaali/loppuraportit/loppuraportti_kiradigi-ym108-612-2018.pdf Viitattu 22.10.2019.
- [83] Kuva. Digitaalisen alustatalouden tiekartasto, Tekijät: Jukka Viitanen, Reijo Paajanen, Valto Loikkanen, Aki Koivistoinen. Copyright: Valtioneuvoston kanslia, Työ- ja elinkeinoministeriö, Innovaatorahoituskeskus Business Finland. PDF. https://www.businessfinland.fi/globalassets/julkaisut/alustatalouden_tiekartasto_web_x.pdf Viitattu 7.10.2019.
- [84] VTT TECHNOLOGY 353, KYBER-ENE Energia-alan kyberturvaaminen 1-2 Julkisten tulosten kooste, ISBN 978-951-38-8687-5
- [85] Kuva. <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/> Viitattu 7.10.2019.
- [86] IoT World Today. IoT Connectivity Options: Comparing Short-, Long-Range Technologies. Alex Makarevich. Elokuu 2018. Artikkel. <https://www.iotworldtoday.com/2018/08/19/iot-connectivity-options-comparing-short-long-range-technologies/> Viitattu 10.10.2019.
- [87] Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025. Statista. Artikeli. <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/> Viitattu 18.11.2019.