



Pekka Silen

LoRaWAN- olosuhdesensorien suorituskyvyn arviointi talonrakennuskohteessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietotekniikka

Insinöörityö

12.12.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Pekka Silen
Otsikko:	LoRaWAN- olosuhdesensorien suorituskyvyn arviointi talonrakennuskohteessa.
Sivumäärä:	25
Aika:	12.12.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Tietotekniikka
Ammatillinen pääaine:	
Ohjaajat:	Janne Salonen Hakim Laukkoski

Insinööriyössä tutkittiin LoRaWAN-verkkoa käyttävien olosuhdesensorien toiminnan luotettavuutta talonrakennuskohteessa. Olosuhdesensoriinnin tarkoitus on varmistaa sellaiset olosuhteet, joilla rakennuksen kuivuminen tapahtuu suunnitellussa aikataulussa.

Työssä 5-kerroksiseen asuinkerrostalokohteeseen asennettiin yhteensä 81 LoRaWAN-verkkoa käyttävää olosuhdesensoria sekä yksi LoRaWAN-tukiasema. Tämän jälkeen kullekin sensorille laskettiin sensorin ja tukiaseman väliselle suoralle osuvat teräsbetonirakenteet, seinät ja välipohjarakenteet eroteltuna. Kultakin sensorilta kerättiin tämän jälkeen 30 minuutin lähetysväliä käyttäen 500 onnistuneen paketin otos, jonka perusteella selvitettiin hävinneiden pakettien määrä sekä tukiaseman mittaamien keskimääräisten signaalivoimakkuuksien arvot. Mittauksille tehtiin regressioanalyysi suhteessa läpäistävinä oleviin teräsbetonirakenteisiin.

Tulosten perusteella läpäistävien välipohjien määrällä on kohtalainen merkitys sekä hävinneisiin paketteihin että mitattuun signaalinvahvuuteen. Seinärakenteilla vastaavaa yhteyttä ei havaittu, ja signaalin kulkuun sekä häviöihin vaikuttavat tekijät ovat todennäköisesti huomattavasti monimutkaisempia kerrosten sisällä.

Avainsanat: LoRaWAN, LPWAN, kuivattaminen, olosuhdesensori

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Pekka Silen
Title: Analysis of LoRaWAN-based temperature and humidity sensors in apartment building worksite
Number of Pages: 25
Date: 12 December 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Information technology
Professional Major:
Supervisors: Janne Salonen
Hakim Laukkoski

This paper presents an analysis of condition sensors which rely on LoRaWAN- network in apartment building construction site. Condition measurements are done in worksites to ensure that the building is drying on planned schedule.

Study was conducted in 5-storey building, and total of 81 LoRaWAN-based sensors and one base station was installed to the building. After installation, each sensor was given counts based on how many concrete structures they had to penetrate to send their messages to the base station. Floors and walls were counted separately. Sensors were set to send measurements with 30-minute intervals, and total of 500 successful packets were counted. After that, each sensor was studied to find out how many packets they had lost during the 500 successful packet transmission period. Beside lost packets, also average signal strength values were calculated.

Finally, regression analysis was performed to relate lost packets and signal strength measurements to structures that were penetrated for each sensor.

Results are inconclusive with respect to the walls and signal propagation in same floor. Transmission that included passing floors, had somewhat meaningful correlation. It is obvious that the performance of sensors depends on more complex set of factors than just the line-of-sight structures.

Keywords: LoRaWAN, LPWAN, drying, condition sensor

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kuivatuksen toteutus ja seuranta	3
3	Radioverkot ja olosuhdesensorit	5
4	LoRaWAN-verkon analyysin suoritus	12
5	Tulokset	18
6	Päätelmät	22
	Lähteet	25

Lyhenteet

Nb-IoT	Narrowband Internet of Things, kapeakaistainen tiedonsiirtoteknologia LPWAN-laitteille
LTE-M	Long Term Evolution for Machines, LTE mobiiliverkkojen rinnalla käytettävä LPWAN-verkko
LPWAN	Low Power Wide Area Network, verkko joka on suunniteltu harvakseltaan lähetäville akkukäyttöisille IoT-laitteille
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying, modulaatoratkaisu radioliikenteeseen
bps	bits per second, bittiä sekunnissa, tietoliikenteen nopeus
dBm	Decibel-milliwatt, logaritminen säteilytehon yksikkö suhteessa 1 mW tehoon
LOS	Line Of Sight, suora linja kahden pisteen, esimerkiksi lähettimen ja vastaanottimen välillä

1 Johdanto

Rakenteiden kuivamisen varmistaminen on eräs rakennustyömaan keskeisistä tehtävistä. Kuivuminen vaikuttaa merkittävästi niin työmaan aikatauluun kuin rakentamisen laatuunkin. Rakenteiden on kuivuttava riittävästi ennen kuin ne voidaan pinnoittaa, ja riittävän matala kosteus on todettava rakenteista tehtävin mittauksin.

Kosteus voi aiheuttaa rakennukselle vaurioita useilla mekanismeilla. Tyypillisiä esimerkkejä vauriomekanismeista ovat rakennusmateriaalien kastumisen mahdollistamat homekasvustot ja niiden rakennusteknisten ominaisuuksien heikkeneminen. Kummassakin mainitussa tapauksessa riskit rakennuksen loppukäyttäjälle ovat ilmeiset. Rakennuksen terveyttä ja turvallisuutta koskevia periaatteita ja menettelytapoja ohjaa lainsäädännön tasolla erityisesti Maankäyttö- ja rakennuslain 17. luku.

Helsingin kaupungin rakennusvalvonnan ohjeen mukaan kosteudenhallinta on koko rakennushanketta läpileikkaavaa toimintaa. Kunnallinen rakennusvalvonta vaatii kosteudenhallintaselvitystä jo rakennuslupahakemuksen yhteydessä, joten kosteushaittojen torjunta alkaa jo suunnitteluvaiheessa. Selvitykseksi ei riitä pelkästään kosteudenhallintaa koskevien vaatimusten luettelu, vaan rakennushankkeeseen ryhtyvän on myös eriteltävä uskottavat toimenpiteet ja allokoitava riittävät resurssit vaatimusten toteutumiseksi. (1.)

Rakentamisaikaisen kosteudenhallinnan merkitys kokonaisuuden onnistumiselle on ratkaisevan tärkeä. Työmaan olosuhdeseuranta tarjoaa työkaluja työmaan henkilöstölle kosteudenhallinnan onnistumiseen ja siitä muodostuu myös osa rakentamisen dokumentaatiota laadunvarmistusta varten. Yhä useammin olosuhdeseurantaa toteutetaan automaattisesti IoT-sensoreita hyödyntäen. Tässä työssä käsiteltävässä testikohteessa olosuhdeseurannan rungon muodostaa kohteen jokaiseen asuntoon (n=302, yhteensä kolmessa talossa)

asennettu olosuhdesensori, joka tuottaa tietoa ilman suhteellisesta kosteudesta sekä lämpötilasta. Muita työmaan seuraamia datalähteitä ovat esimerkiksi sää-tiedot, jotka vaikuttavat sekä kuivumiseen että materiaalilogistiikkaan.

Työmaan olosuhdeseuranta voidaan toteuttaa lukuisilla tavoilla. Tavalliset lämpö- ja kosteusmittarit, joiden lukemat käydään lukemassa paikallisesti koh-teessa, eivät ole kadonneet rakennustyömailta. Jatkuva ja yhtenäinen kirjaami-nen sitoo kuitenkin merkittävän työpanoksen, eikä paperille kirjattu data ole myöskään käytössä koneellisia analyysejä varten. Tästä syystä yhä suositu-maksi vaihtoehdoksi on tullut valita akkukäyttöinen, radiolla kommunikoiva sen-sori, jonka data saadaan rakenteisessa muodossa pilveen.

Rakennustyömaa on erittäin haastava kohde radiolaitteille. Uudisrakennuskoh-teiden osalta vaikeutta lisää usein se, että koska talot eivät ole vielä valmiita, myöskään verkko-operaattorien infrastruktuuria ei ole välttämättä voitu rakentaa lähetyville. Jatkovasti muuttuva työmaaympäristö tekee myös kattavien paikal-listen verkkojen rakentamisen paikoin haasteelliseksi tehtäväksi, jonka tekemi-nen vaatii asiantuntemusta ja tapauskohtaista kokeilua työmaalta työmaalle skaalautuvan pakettiratkaisun sijaan.

Payam et al. selittävät omassa WiFi- ja Zigbee-verkkojen kokeilua kuvaavassa artikkelissaan jatkuvasti muuttuvan ympäristön vaikuttavan työmaan radioverk-kojen toimintavarmuuteen. Signaalien heikkeneminen riippuu vahvasti siitä, mil-laisia materiaaleja lähettimen ja vastaanottimen välissä on. Toisaalta sähkö-magneettinen säteily ei ainoastaan heikkene, vaan myös heijastuu ennakoimat-tomilla tavoilla työmaaympäristössä. Tästä seuraavasta monitie-etenemisestä voi aiheutua liikaa häiriöitä luotettavan tiedonsiirron toteuttamiseksi. (2.)

Tässä työssä keskitytään runko- ja sisävaiheessa toteutettavaan asuinraken-nuskohteen ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaamiseen julkiseen, Suomessa Digita Oy:n operoimaan LoRaWAN-verkkoon liittyviä IoT-sensoreita käyttäen. Työssä käytetään julkisen verkon sijaan kuitenkin paikallista tukiase-maa, jotta koeasetelma kvantitatiivista analyysia varten olisi mielekkäästi

toteutettavissa. Työ lähtee liikkeelle hypoteesista, jonka mukaan kadonneiden pakettien lukumäärä olisi riippuvainen sensorin ja tukiaseman väliselle suoralle linjalle osuvien teräsbetonirakenteiden määrästä ja vastaanotetun signaalin voimakkuus puolestaan kääntäen verrannollinen samaan tekijään. Työ käsittää tilastollisen analyysin tämän hypoteesin pohjalta, eikä se huomioi esimerkiksi monimutkaisempia heijastumiseen, monitie-etenemiseen tai rakenteiden läpäisevyyden eroihin perustuvia eroja.

2 Kuivatuksen toteutus ja seuranta

Rakennuskohteen kuivattamista toteutetaan rakennusaikaisesti tyypillisesti kahdella menetelmällä. Ilman lämpötilaa voidaan nostaa, jolloin sen kyky sitoa kosteutta itseensä kasvaa. Toisaalta taas ilman sitomaa kosteutta voidaan pienentää, jolloin betonin ja ilman muodostaman dynaamisen tasapainon saavuttamiseksi betoni luovuttaa aiempaa enemmän kosteutta ilmaan. Lämpötilan nostaminen lisää vesimolekyylien käytettävissä olevaa energiaa, jolloin haihtuminen kiihtyy. Kosteuden poistaminen ilmasta puolestaan vähentää kondensatiota, eli kosteuden palaamista betoniin.

Betonin kuivuminen on merkittävästi monimutkaisempi prosessi, eikä haihtumisprosessin ymmärtäminen riitä kuvaamaan sitä kokonaan. Esimerkiksi kapillaari-ilmiöllä ja betonin eri kerrosten huokoisuudella on ratkaiseva merkitys kuivumisen mallintamisessa. Tässä työssä käsiteltävän kuivumisolosuhteiden mittaamisen kannalta haihtumisen tarkastelu on kuitenkin riittävä.

Haihtumista lämpötilan funktiona kuvataan tasapainohöyrynpaineella. Se kertoo kuinka suuren höyrynpaineen tässä tapauksessa vesihöyry muodostaa tilanteessa, jossa haihtuminen ja kondensoituminen ovat yhtä suuria. Haihtumisen lämpötilariippuvuutta voidaan mallintaa yhtälöllä 1, joka tunnetaan myös nimellä Clausius-Clayperonin yhtälö. (3, s.473-475)

$$\ln \left(\frac{P_{Vap,T1}}{P_{Vap,T2}} \right) = \frac{\Delta H_{Vap}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (1)$$

$P_{Vap,T1}$ Höyrynpaine lämpötilassa 1

P_{vap,T_2}	Höyrynpaine lämpötilassa 2
ΔH_{vap}	Höyrystymislämpö
R	Moolinen kaasuvakio
T_2	Lämpötila paineessa 2
T_1	Lämpötila paineessa 1

Esimerkiksi veden höyrynpaine 10°C lämpötilassa on noin 1227 Pa ja 20°C lämpötilassa jo noin 2338 Pa.

Kuivattamisessa rakennukseen tuodaan lämpöenergiaa hyödyntäen niitä menetelmiä, joita kussakin projektissa on saatavilla. Sähkökäyttöiset lämmittimet erityisesti huoneistoissa ovat varsin tavallisia, mutta rakennuksen ulkopuolelle voidaan tuoda myös esimerkiksi polttoainekäyttöisiä suuritehoisia lämmittimiä. Myös kaukolämpöä hyödynnetään silloin, kun se on mahdollista. Tavoitelämpötilat tulisi määrittellä sen mukaan, millaista kuivumisaikataulua projektille on suunniteltu. Liian korkeat lämpötilat eivät tuo kokonaisuikataulun kannalta ratkaisevaa hyötyä, mutta lisäävät energiakustannuksia ja toisaalta voivat vaikuttaa myös työergonomiaan. Tämän työn kokeen kohteessa tavoitelämpötila on 20°C - 25°C.

Kosteuden poistamista rakennuksesta tehdään käytännössä kahdella tavalla. Mikäli ulkoilman olosuhteet sen sallivat, eli ilmankosteus ei ole liian korkea, kohdetta voidaan tuulettaa nopeasti avaamalla ikkunoita ja ovia eri puolilla rakennusta. Rakennusta voidaan kuivattaa myös koneellisesti kondensoivilla kuivaimilla tai yksinkertaisimmillaan puhaltimilla, jotka poistavat paikallisesti kosteaa ilmaa muualle rakennukseen tai ulkoilmaan.

Betonirakentamisessa kuivamisen seuranta tehdään sekä rakenteista että rakennuksen sisäilmasta. Rakennusteollisuuden RATU-kortistoon on koottu tuotannosuunnittelun kannalta olennaiset mittaukset myös kuivamisesta. Työmaan laadunvarmistusta, tarkastuksia ja mittauksia käsittelevässä kortissa esitellään betonin suhteellisen kosteuden mittaustapa, jota pääurakoitsijat käytännössä noudattavat poikkeuksetta. Korttiohjeen menetelmässä mittaukset

tehdään betonirakenteisiin poratuista rei'istä tai näytepaloista varsin tarkasti määritellyllä spesifikaatiolla. Nämä kajoavat menetelmät antavat tietyllä tapaa lopullisen totuuden, eivätkä esimerkiksi ilman olosuhdemittauksiin perustuvat mallit korvaa niitä laadunvarmistuksessa. (4, s.7.)

Huoneilman lämpötilan ja kosteuden mittaaminen toteutetaan ohjeiden mukaisesti työalueilta siten, etteivät ulkoiset olosuhteet, kuten auringonpaiste tai vetoisa oviaukko, vaikuta mittaustulokseen (4, s.6). Nykyisin käytössä on useimmiten yhdistelmäsensorit, jotka tuottavat tietoa sekä lämpötilasta että suhteellisesta kosteudesta suoraan pilveen sen sijaan että lukemat käytäisiin paikan päällä kirjaamassa mittauspöytäkirjoihin. Jotkin laitteet voivat mitata samanaikaisesti sekä valuun upotettuna rakenteiden kosteus- ja lämpötilaolosuhteita että huoneilman olosuhteita.

3 Radioverkot ja olosuhdesensorit

Lämpötilaa ja ilman suhteellista kosteutta mittaavia, viestintään radioverkkoja hyödyntäviä sensoreita on markkinoilla huomattava määrä. Käyttötapausten määrittely on tärkeää, jotta käytettävän teknologian ja sensorin valinta onnistuu. Valintaan vaikuttavat esimerkiksi kohteen sijainti, julkisten radioverkkojen peitto, kohteen rakennustekniset ominaisuudet, sensorin ja tukiaseman välinen etäisyys sekä olosuhteet, joille sensori kohteessa altistuu.

Useat tekijät vaikuttavat radiosignaalien etenemiseen ja heikkenemiseen kohteessa. Vapaan tilan polkuhäviötä tapahtuu aina, vaikka signaali etenisi tyhjiössä. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että pinta, jolle ympäristäilevästä antennista lähetetty energia jakaantuu, kasvaa suhteessa etäisyyden neliöön. Vapaan tilan polkuhäviöön vaikuttaa myös käytetty lähetyksen aallonpituus. Yhtälön 2 mukaisesti vastaanotettu teho voidaan laskea kaavalla. (5, s. 186.)

$$P_r = P_x G_x G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (2)$$

Jossa

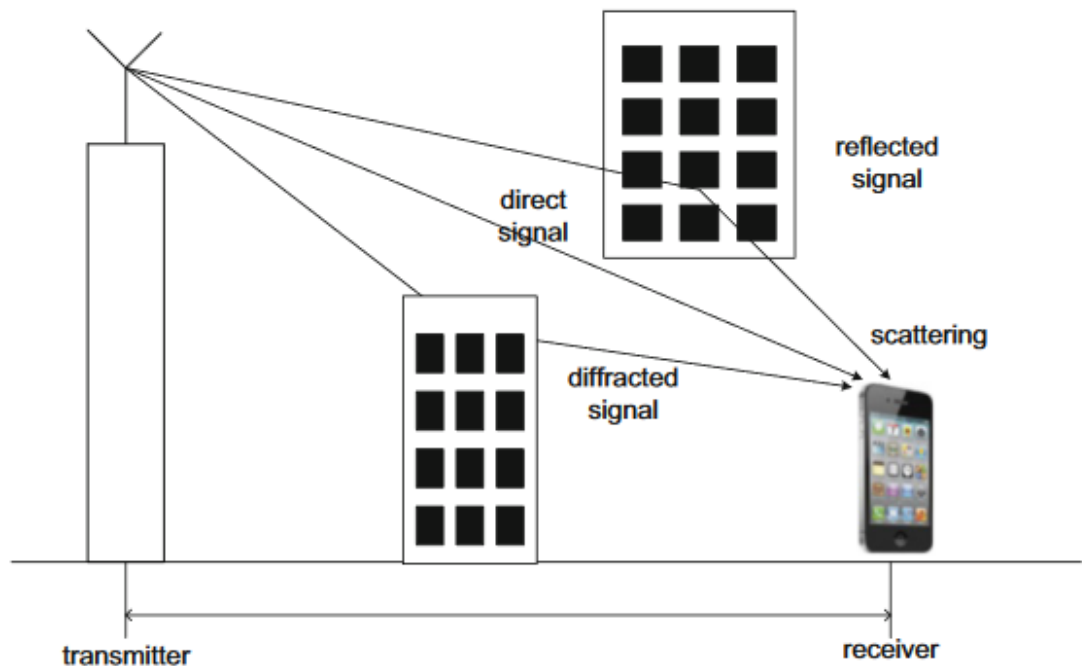
P_r	Vastaanotettu teho
P_x	Lähetysteho
G_x	Lähettävän antennin vahvistus
G_r	Vastaanottavan antennin vahvistus
λ	Käytetty aallonpituus
d	antennien välinen etäisyys

Mikäli säteily joutuu läpäisemään esteitä, joiden väliaine vaimentaa sitä, vastaanotettu teho luonnollisesti heikkenee entisestään. Viestin välittyminen edellyttää lähtökohtaisesti sitä, että vastaanotettu teho ylittää vastaanottavan radiolaitteen herkkyyden. Erilaiset häiriöt voivat lisäksi vaikuttaa siihen, kykeneekö vastaanottava laite ymmärtämään viestin oikein.

Antennin vahvistus tarkoittaa käytännössä säteilykeilan suuntaamista tiettyyn avaruuden osaan. Koska rakennustyömaan kaltaisissa olosuhteissa ei tyypillisesti ole yhtä oikeaa suuntaa, käytetään ympärisäteileviä antenneja.

Geometrian ja väliaineen aiheuttamien häviöiden lisäksi radiosignaalin polkuhäviötä lisäävät heijastukset, diffraktio ja sironta. Kuvassa 6 on esitetty kaavamaisesti nämä ilmiöt. Heijastuminen tarkoittaa nimensä mukaisesti signaalia, joka heijastuu väliaineiden rajapinnasta, diffraktio taas terävien geometrioiden synnyttämiä muutoksia aaltoliikkeen etenemisessä. Sirontaa puolestaan syntyy

käytettyyn aallonpituuteen nähden pienehköistä esteistä, joita on suhteellisen paljon radioliikenteen ympäristössä. (5, s. 191-192.)



Kuva 1. Radiosignaalin etenemiseen vaikuttavia mekanismeja (5, s.191)

Suomessa julkisia LPWAN radioverkkoja on tarjolla ainakin matkapuhelinverkko-operaattoreilla sekä Digitan ja Connected Finlandin kaltaisilla erikoistuneilla operaattoreilla. Matkapuhelinverkko-operaattorit tarjoavat ensisijaisesti Nb-IoT ja LTE-M ratkaisuja, jotka linkittyvät tiiviisti niiden tarjoamiin mobiili-verkko-toimintoihin. Digita Oy ylläpitää suomessa julkista LoRaWAN-verkkoa, ja Connected Finland puolestaan Sigfox-verkkoa.

Julkisia verkkoja käyttävien sensorien lisäksi markkinoilla on sensoreita, jotka edellyttävät oman verkkoratkaisun käyttämistä paikallisesti. Näissä käytetään usein WiFi-, LoRa- tai Bluetooth- yhteyksiä sensorin ja paikallisen tukiaseman välillä, jonka jälkeen tukiasema siirtää datan eteenpäin internetin yli haluttuun palveluun.

Rakennustyömaiden kohdalla luotettavien tiedonsiirtoyhteyksien toteuttaminen on osoittautunut haastavaksi. Päivittäin muuttuva ympäristö ja mahdollisesti puutteellinen infrastruktuuri koko rakennuskohteen ympäristössä kuormittavat kaikkia yleisesti käytössä olevia teknologioita paikoin voimakkaastikin. Itse rakennustyötäkään ei voi häiritä kohtuuttoman monimutkaisilla paikallisilla verkko-laiteratkaisuilla. Olosuhdesensorit asennetaan työmaalle vaiheessa, jonka jälkeen lähtökohtaisesti jokainen pinta on vielä työstettävä vähintään kertaalleen.

Radioviestinnän onnistuminen edellyttää sitä, että vastaanottava radiolaitte havaitsee lähetettävän signaalin riittävän vahvana ja että häiriöiden suhde signaaliin on riittävän matala. Viestin koodaus signaaliin, eli radiotekniikassa modulaatio, vaikuttaa myös radiolaitteiden kykyyn erottaa viesti häiriöiden seasta. Signaalin heikkenemiseen vaikuttavat lähettävän ja vastaanottavan laitteen etäisyys, antennien suuntaus sekä erityisesti näiden välisellä linjalla olevien esteiden materiaalit. Ohut lastulevystä valmistettu väliovi ja teräsbetonirakenteinen välipohja ovat ratkaisevasti erilaisia materiaaleja signaalin heikkenemisen kannalta. Häiriöihin taas vaikuttaa alueen muun radioliikenteen lisäksi heijastumisien ja taittumisien aiheuttama monitie-eteneminen, jonka vuoksi samakin viestinnässä käytetty taajuuden tai amplitudin muutos voi näkyä toisena ajanhetkenä ylimääräisenä häiriönä.

Sitedrive Oy on käyttänyt asiakkaidensa kohteissa pääasiassa Sigfox- ja LoRaWAN-verkkoja hyödyntäviä olosuhdesensoreita. Aiemmin käytössä on ollut myös Bluetooth-sensoreita, mutta niiden käytöstä on sittemmin luovuttu. Lisäksi pienimuotoisia kokeiluja on tehty WiFi- ja LoRaWAN-laitteilla.

Soveltuvan ratkaisun kehittäminen ei ole yksinomaan radioteknologiaan liittyvä kysymys, vaan myös teknologiaa hyödyntävien laitteiden saatavuus, hallinnointi ja kustannukset ovat ratkaisevan tärkeitä. Tästä syystä Sitedriven käytössä on edelleen rinnakkain sekä LoRaWAN- että Sigfox-laitteita, vaikka LoRaWAN-laitteet ovatkin kokemusperäisesti suorituneet rakennustyömailla paremmin. Sigfox-laitteet edellyttävät käytännössä aina paikallista tukiasemaa, kun taas LoRaWAN-laitteet ovat yleensä saavuttaneet riittävän toimintavarmuuden myös

valtakunnallista Digitan verkkoa käyttäen. Toisaalta Sigfox-verkkoon on saatavilla esimerkiksi pienhiukkasia mittaavia sensoreita ratkaisevasti alhaisemmalla kustannustasolla.

Rakennusteollisuuden pyrkimyksenä on edetä kohti teollisempaa tuotantotapaa, ja tätä silmällä pitäen myös konnektiviteettiin liittyvät kysymykset tulevat jatkossa olemaan monimutkaisempia. Pelkästään vaatimattomille datamäärille – esimerkiksi Sigfoxin tapauksessa vain 12 tavun hyötykuormalle vähintään 10 minuutin intervallein – tarkoitetut LPWAN-verkkoratkaisut eivät enää jatkossa riitä. Teollinen rakentaminen edellyttää reaaliaikaisuutta, sekä ohjaavien toimilaitteiden kohdalla myös kaksisuuntaista, nopeaa ja luotettavaa tiedonsiirtoa. Paikalliset LAN- ja WLAN-verkkoratkaisut tulevat todennäköisesti yleistymään. Niiden kohdalla kapasiteetti, tiedonsiirron latenssit ja tiedonsiirron toimintavarmuus ovat huomattavasti paremmat kuin LPWAN-verkoilla. Laittevalmistajien on kuitenkin ratkaistava esimerkiksi akunkestoon liittyvät ongelmat, ennen kuin WLAN-verkkoihin perustuvista ratkaisuista olosuhdesensoroinnin kaltaisten perustason käyttötapauksen kohdalla voidaan ryhtyä kehittämään vakioituja palveluita.

Seuraavassa on vielä lyhyesti esitelty tyypillisimpiä Suomessa käytettävissä olevia ratkaisuja, jotka soveltuvat rakennustyömaan IoT-laitteiden tiedonsiirtoon.

Nb-IoT ja LTE M

Telia Oyj on eräs mobiiliverkko-operaattoreista, joka tarjoaa Nb-IoT- sekä LTE M- verkkoratkaisuja valtakunnallisesti. Molemmat tekniikat käyttävät operaattorin hankkimia taajuusalueita erotuksena esimerkiksi LoRaWAN- ja Sigfox-verkoista, jolloin niiden ei tarvitse kilpailla vapaiden taajuuksien laitteiden kanssa lähetysajasta. Kaksisuuntainen tiedonsiirtonopeus voi olla Nb-IoT-laitteilla korkeintaan 250kbps ja LTE M-laitteilla 1Mbps.

LoRaWAN

Suomessa valtakunnallista LoRaWAN-verkkoa operoi Digita Oy. LoRaWAN on verkkoinfrastruktuuri, jota LoRa-laitteet voivat hyödyntää. Päätelaitteet viestivät radioverkon reitittimille, jotka puolestaan ohjaavat radioliikenteen internetin yli operaattorin palveluihin ja siitä tarvittaessa eteenpäin asiakkaan rajapintoihin.

Digitan LoRaWAN-verkko toimii 868MHz lisenssivapaalla taajuusalueella. Se siis operoi taajuuksilla, jotka ovat myös yksityiskäyttäjille avoimia. LoRa:n käyttämä modulaatoratkaisu – hajaspektrimodulaatio – on vähemmän herkkä häiriöille kuin esimerkiksi Sigfoxin käyttämä DBPSK- modulaatio. Lisenssivapaata taajuutta käytettäessä liikenteen määrä on aina rajoitettu. Digitan LoRaWAN-verkon liikennettä rajoitetaan myös sopimuksella. Tyypillisimmillään sopimus sallii päätelaitteen lähettävän viestin 5–30 minuutin välein, ja valittu lähetystiheys vaikuttaa myös hinnoitteluun.

Sigfox

Sigfox on LoRa-ratkaisujen tapaan lisenssivapailla taajuuksilla toimiva radioverkko-operaattori, jonka kumppanit implementoivat globaalisti standardoidun infrastruktuurin narrowband- radioviestien välittämiseksi internetin yli operaattorin palvelimelle. Suomessa verkkoa operoi Connected Finland 868MHz taajuusalueella. Julkisen verkon lisäksi Sigfox-verkkoja voidaan käyttää paikallisella tukiasemalla, jonka käyttäjä voi asentaa kohteeseen, mikäli kuuluvuus julkisen verkon tukiasemaan on liian heikko.

Sigfox on siirtokapasiteetiltaan muista tyypillisistä verkkoratkaisuista poikkeava. Se ei salli päätelaitteen lähettävän verkkoon yli 140 viestiä tai verkon lähettävän päätelaitteelle yli neljää viestiä vuorokaudessa. Varsinaisen viestin sisällön pituus on korkeintaan 12 tavua, joten käyttötapauksen mukaan, viestien rakenne ja sisältö voidaan joutua optimoimaan hyvinkin pitkälle. Sigfox-verkon käyttö perustuu kuukausiveloitukseen, joka ei LoRaWAN-verkosta poiketen riipu lähetettävien viestien määrästä.

Olosuhdesensorit

Jatkuvatoimiset elektroniset lämpötila- ja ilmankosteussensorit perustuvat muutamien globaalien toimijain komponentteihin. Esimerkiksi Bosch ja Texas Instruments tuottavat tarkoitukseen sopivia komponentteja, mutta tällä hetkellä erityisesti sveitsiläisen Sensirion AG:n komponentit näyttävät yleistyneen huomattavasti kaupallisissa olosuhdesensortuotteissa, jotka käyttävät Sigfox-, Nb-IoT- ja LoRaWAN-verkkoja tiedonsiirtoon.

Tässä työssä käytetyn kiinalaisen Milesightin EM300-TH olosuhdesensorin toiminta perustuu myös Sensirionin komponenttiin, joskaan tarkkaa komponenttia ei määritellä laitteen spesifikaatioissa. Mittaustarkkuuden perusteella laite käyttää kuitenkin todennäköisimmin SHT-4X-sarjan sensorikomponenttia.

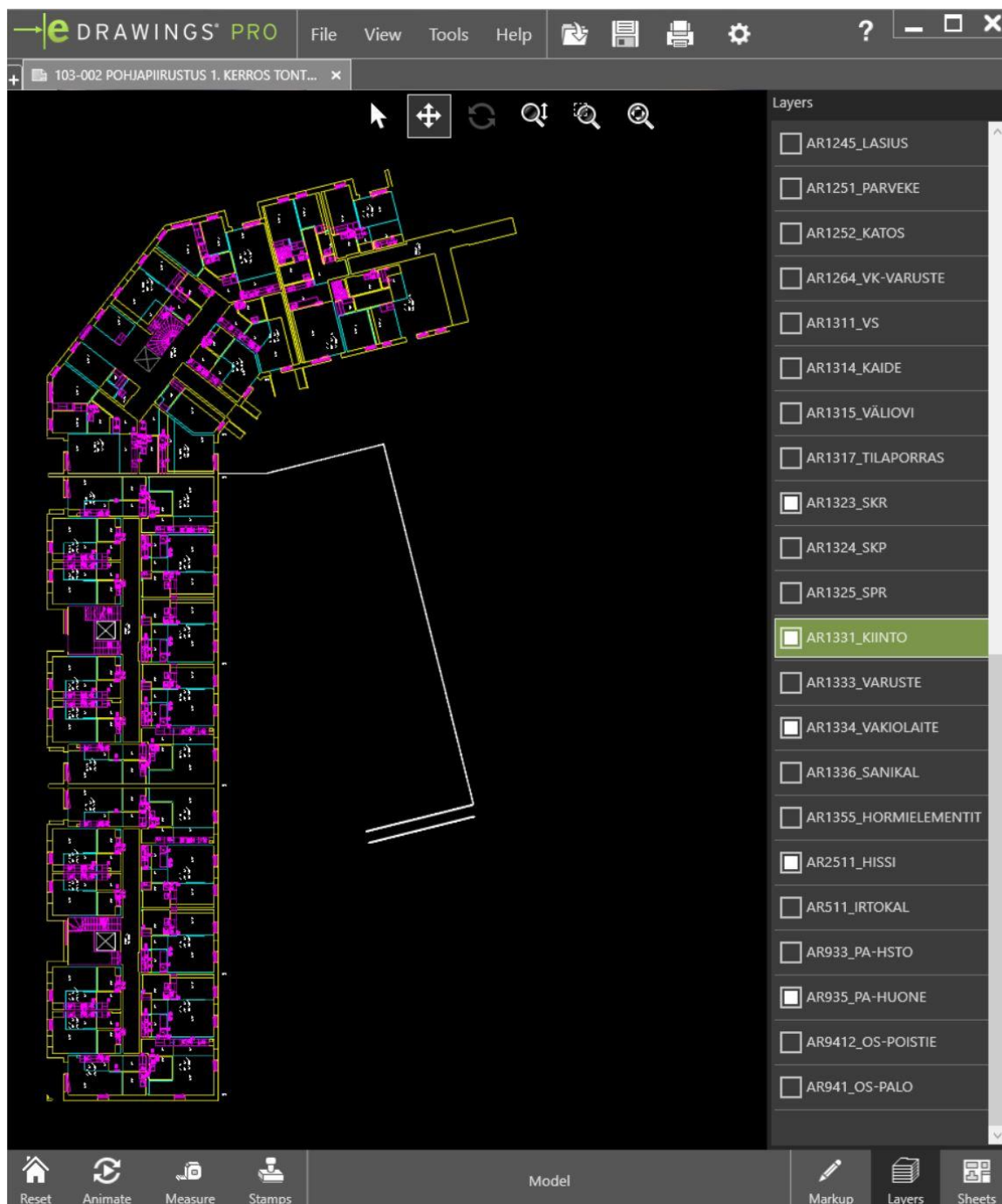
Milesight EM300-TH olosuhdesensori mahdollistaa 300bps tiedonsiirtonopeuden herkkyydellä -137dBm (6). Herkkyys on erinomaisen hyvä ja tiedonsiirto onnistuu todennäköisesti myös radioympäristössä, jossa häiriöitä on odotettavissa runsaasti. Laitteen 4000mAh akun tulisi riittää useiden vuosien toiminta-ajaksi käyttäen vakioasetuksena 30 minuutin lähetysväliä. Kuvassa 2 on esitetty kohteeseen asennettu sensori.



Kuva 2. Milesight EM300-TH olosuhdesensori.

4 LoRaWAN-verkon analyysin suoritus

Työn mittaukset tehtiin Etelä-Suomessa sijaitsevalla rakennustyömaalla, jonka pohjapiirros on esitetty kuvassa 1. Pohjapiirroksista on riisuttu eDrawings-ohjelmassa valtaosa merkinnöistä. Kuvassa on näkyvissä kaikki kohteen kolme rappukäytävää, vaikka mittauksia suoritettiin aikataulusyistä vain rapuissa A ja B. Mittausten ulkopuolelle jäänyt rappu C sijaitsee kuvan kaareutuvassa yläosassa. Rakennuksen suora osuus jakaantuu kahteen yhtä suureen rappuun, joista A sijaitsee kuvassa alempana ja B ylempänä.

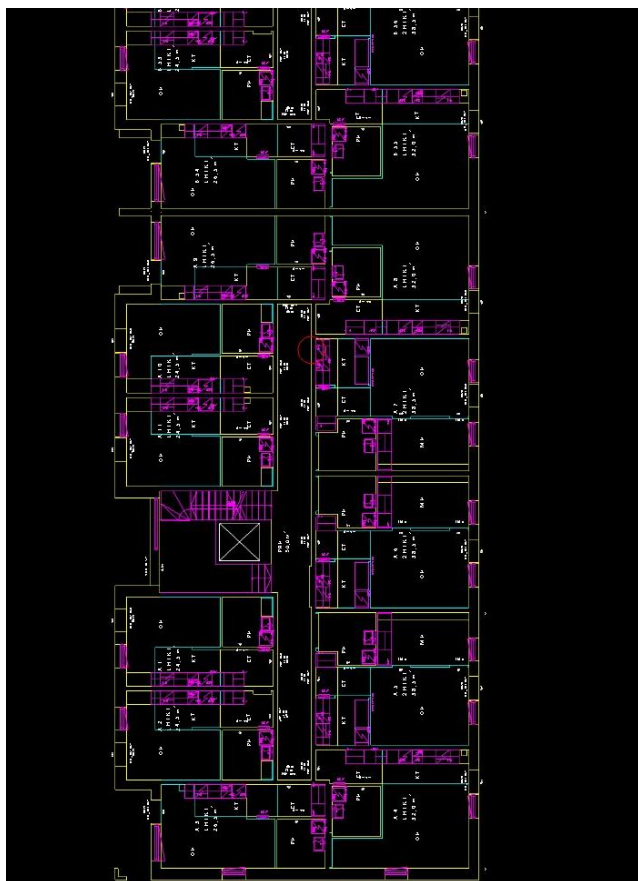


Kuva 3. Tutkittavan kohteen pohjapiirros

Työn suoritus aloitettiin asentamalla Milesight EM300-TH olosuhdeanturit kohteen asuntoihin. Sensori kiinnitettiin kaksipuolisella teipillä kunkin asunnon keittiöön siten, että asennuskohta sijaitsi liesituulettimen ja liedien välissä. Linjakohdallisesti identtiset asennuskohdat lisäävät mittausten vertailukelpoisuutta

kerrosten välillä. LoRaWAN- verkkoa käyttäviä sensoreita asennettiin kohteeseen yhteensä 81 kappaletta.

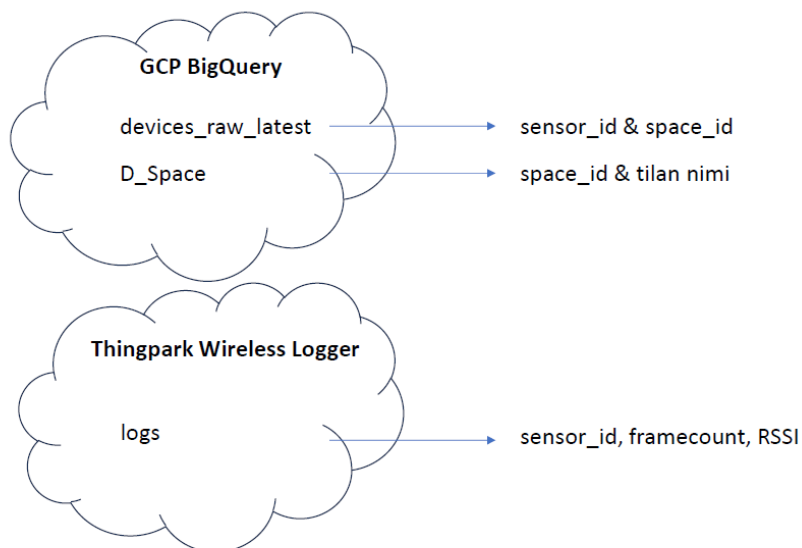
Sensorien asennusten jälkeen A-rapun ylimpään, eli viidenteen kerrokseen, asennettiin Multitechin Conduit Access Point V1.5- LoRaWAN-tukiasema, joka on konfiguroitu Digtan verkon tukiasemaksi. Tukiaseman sijainti on esitetty punaisella ympyrällä kuvassa 2.



Kuva 4. LoRaWAN-tukiaseman sijainti kohteessa. Tukiasema sijaitsee kuvassa hieman keskilinjan yläpuolella, käytävän oikealla puolella.

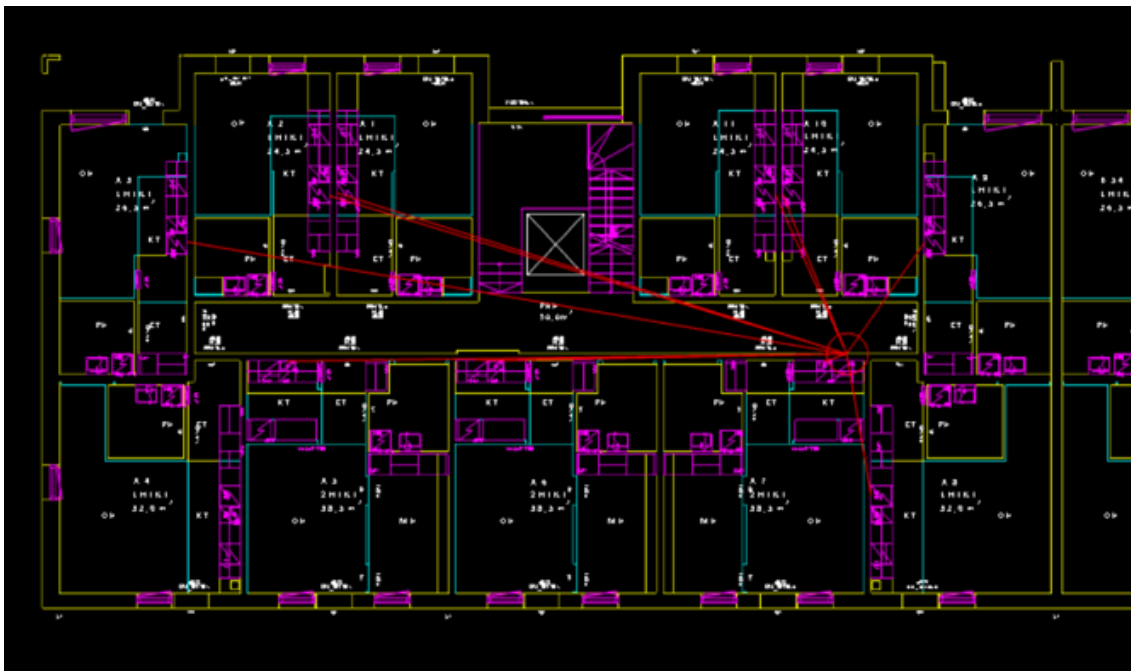
Sensorien annettiin asennusten jälkeen lähettää dataa seitsemän vuorokauden ajan, jonka jälkeen varsinainen analyysi tehtiin kunkin sensorin 500 edellisen läpitulleen viestin tietojen perusteella. Analyysissä tarvittavat tiedot haettiin Sitedriven Google Cloud Platformin konsoliin kautta BigQuery-tietokannasta. Tilaaja sensoritiedot haettiin device_raw_latest-taulusta, jonka lisäksi D_Space-

taulusta haettiin tilan selkokielineen kuvaus. Digtan Thingpark- alustalta noudettiin kunkin 81 sensorin lokitiedot edellisen 500 lähetyksen osalta. Kuvassa 3 on vielä selvennetty tietojen alkuperä ja tarvittavat kentät.



Kuva 5. BigQuerystä ja Thingpark- alustalta haetut tiedot.

D_Space-taulun tiedot tuotiin tämän jälkeen Exceliin, jotta kullekin asunnolle voitiin luoda käsin uudet kentät pohjakuvista tehtyjen läpäistävien rakenteiden esittämistä varten. Kullekin kohteen sensorille piirrettiin suora linja sensorin asennuspaikan ja tukiaseman välille. Kuvassa neljä on esitetty esimerkinomaisesti muutamien sensorien LOS-linjat tukiasemaan nähden. jokainen LOS-linjalle jäänyt teräsbetonirakenteinen seinä kasvatti uuden penetrating_walls-kentän arvoa yhdellä, ja vastaavasti jokainen läpäistävä välipohjan ontelolaatta puolestaan kasvatti penetrating_floors-kentän arvoa yhdellä. Kun jokainen sensori oli käyty tällä menetelmällä läpi, analyysia varten tarvittava data oli koossa.



Kuva 6. Tukiaseman ja sensorien LOS-linjan läpäistävien esteiden määrittäminen pohjakuvista.

Analyysi ja visualisointi toteutettiin Python-skriptillä käyttäen pandas-, numpy- sekä matplotlib- kirjastoja. Ensin csv- tiedostojen tiedot luettiin pandasin DataFrame-rakenteiksi.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#sp = spaces and penetration, ss= sensors and spaces
sp = pd.read_csv("tilat_ja_penetraatio.csv", sep=';')
ss = pd.read_csv("tilat_sensorit.csv", sep=';')
```

Tämän jälkeen DataFrame- rakenteita muokattiin siten että jäljelle jäivät vain analyysin kannalta olennaiset kentät, muut kuin LoRaWAN-sensoreita sisältävät tilat poistettiin, rakenteet yhdistettiin yhdeksi DataFrameksi ja siihen lisättiin vielä laskettavat lost_packets- sekä ave_rssi-kentät. Lost_packets- kenttään laskettiin puuttuvien pakettien lukumäärä ja ave_rssi-kenttään puolestaan kyseisen sensorin keskimääräinen RSSI-arvo.

```

sp = sp[['space_id', 'name', 'penetrating_floors', 'penetrating_walls']]
ss = ss[["space_id", "external_id"]]
sp = pd.merge(sp, ss)
sp = sp[sp["external_id"].str.startswith("24E")]
print(len(sp))
sp["lost_packets"] = 0
sp["ave_rssi"] = 0

```

Seuraavaksi DataFramen kukin rivi käytiin läpi silmukalla siten, että jokaisella toistokerralla sensoridata-kansiosta noudettiin käsiteltäväksi riviä vastaavan sensorin lokitiedot. Kunkin lokitiedoston perusteella laskettiin 500 perille pääsyyttä viestiä vastaava kadonneiden pakettien lukumäärä sekä keskimääräinen RSSI-arvo. Koodin oikeellisuus validoitiin laskemalla käsin kahden sellaisen sensorin lokit, joissa eri kehyslukujen muutokset esiintyivät.

```

for index, row in sp.iterrows():
    sensor_id = row["external_id"]
    filepath = "sensoridata/{}.csv".format(sensor_id)
    packet_count = 0
    lost_packet_count = 0
    rssi = 0
    sensor_data = pd.read_csv(filepath, sep=",")[:, :-1].reset_index(drop=True)
    for i in range(len(sensor_data)):
        fcount = int(sensor_data.loc[i, "FCnt"])
        packet_count += 1
        if i == 0:
            last_framecount = fcount
            rssi += float(sensor_data.loc[0, "LRR RSSI"])
        else:
            if fcount == (last_framecount + 1):
                last_framecount += 1
            else:
                if fcount < last_framecount:
                    last_framecount = fcount
                else:
                    lost_packet_count += (fcount - last_framecount - 1)
                    last_framecount = fcount
            rssi += float(sensor_data.loc[0, "LRR RSSI"])
    sp.loc[index, "lost_packets"] = lost_packet_count
    sp.loc[index, "ave_rssi"] = rssi/500

```

Käsiteltävä data oli tämän jälkeen saatu sellaiseen muotoon, että regressio-analyysin tekeminen sekä kadonneiden pakettien että RSSI-arvon suhteen oli vaivatonta. Numpy-kirjaston polyfit-funktiolla ratkaistiin pienimmän neliösumman sovitusta käyttäen regressiosuora ja corrcoef-funktiolla puolestaan Pearsonin korrelaatiokerroin, jolla voidaan arvioida korrelaation vahvuutta. Lopuksi

matplotlib-kirjastoa käyttäen luotiin vielä graafit tuloksista. X- ja Y-muuttujien arvoja muuttamalla ohjelma valikoi analyysia varten eri sarakkeet dataframesta.

```
x = "penetrating_walls"
y = "lost_packets"
walls_range = [i for i in range(1,26)]
floors_range = [i for i in range(5)]

coeff = np.polyfit(sp[x],sp[y],1)
m,b = coeff
reg_line = m * sp[x] + b
c_matrix = np.corrcoef(sp[x],sp[y])
corr = c_matrix[0,1]
r_squared = corr**2
print("m: ",m," b: ",b, "r2: ",r_squared)
plt.scatter(sp[x], sp[y], label="Kadonneet paketit / Lämpäistyt seinät")
plt.plot(sp[x],reg_line)
plt.xticks(walls_range)
plt.legend()
plt.show()
```

5 Tulokset

Tulosten perusteella kadonneiden pakettien määrä ei ole riippuvainen horisontaalisista, samassa kerroksessa sijaitsevista sensorin ja tukiaseman väliselle LOS-suoralle osuvista esteistä. Sen sijaan sensorin ja tukiaseman väliin jäävät kerrokset vaikuttavat jossakin määrin sekä kadonneiden pakettien määrään, että mitattuun RSSI-arvoon.

Yhteensä analyysissä käytiin läpi 81 sensorilta kultakin 500 vastaanotettua pakettia, eli paketteja käsiteltiin kaikkiaan 40 500 kappaletta.

Taulukossa 1 on esitetty regressiosuorien yhtälöt sekä R^2 – kertoimet analyysistä. Kuten taulukosta nähdään, lineaarisella regressiolla ei näissä koeolosuhteissa saatu konklusiivisia tuloksia sen enempää kadonneiden pakettien kuin signaalin voimakkuudenkaan osalta.

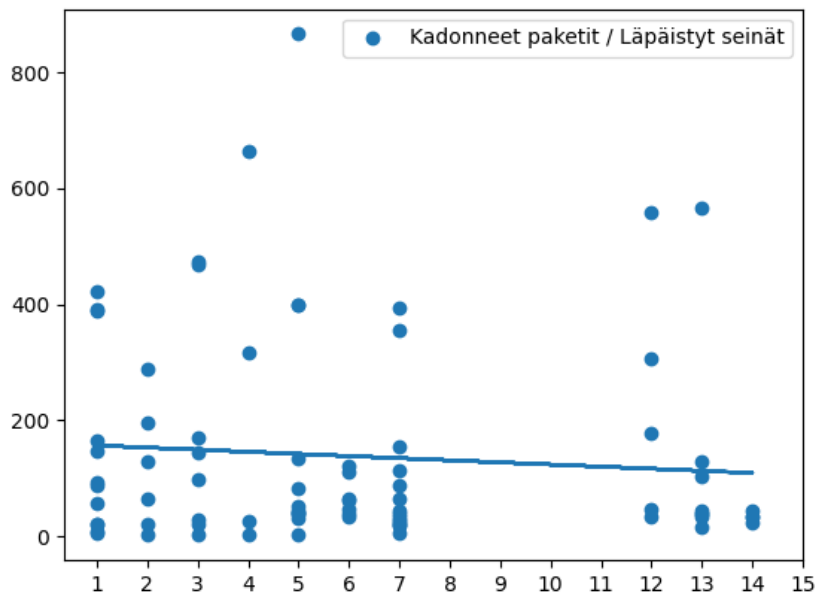
Taulukko 1. Regressioyhtälöt ja korrelaatiokertoimet. Regressiosuoran yhtälössä esiintyvä n viittaa rivikohtaisesti joko läpäistäviin seiniin tai läpäistäviin kerroksiin.

	Regressiosuora	R^2
Kadonneet paketit / läpäistävät seinät	$-3,65 * n + 160$	0,0072
Kadonneet paketit / läpäistävät kerrokset	$59,56 * n - 11,10$	0,18
RSSI / läpäistävät seinät	$-0,39 * n - 110,36$	0,058
RSSI / läpäistävät kerrokset	$-2,12 * n - 107,41$	0,16

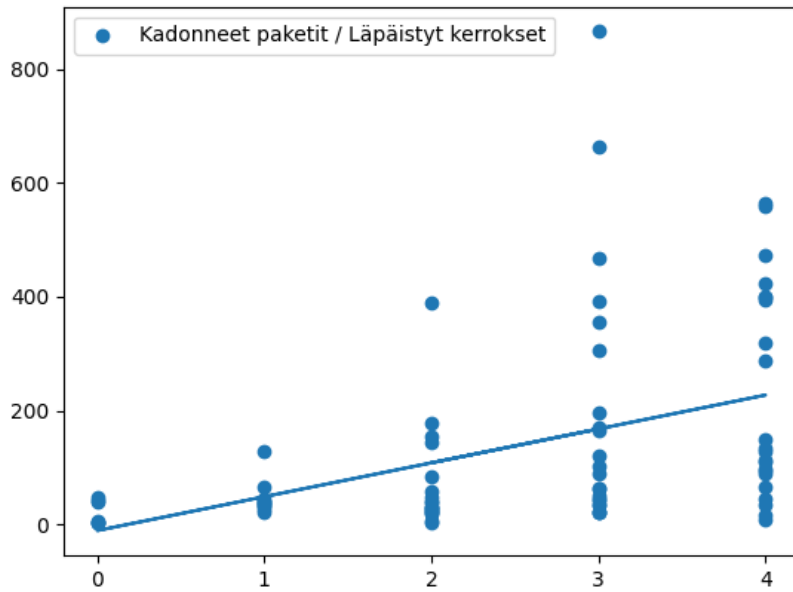
Kuvissa 7-10 on esitetty graafisessa muodossa vastaavat tulokset datapisteineen ja regressiosuorineen. Kuvien perusteella ainoastaan kuvan 8 esittämä kadonneiden pakettien määrä läpäistyjen kerrosten funktiona näyttää antavan merkityksellisen tuloksen. Tukiaseman kanssa samassa kerroksessa, tai vain yhden kerrosvälin päässä siitä, olevat sensorit hävittävät huomattavan vähän paketteja verrattuna muissa kerroksissa oleviin sensoreihin. Sen sijaan kuvassa 5 näkyvä kadonneiden pakettien määrä suhteessa läpäistäviin seiniin näyttää käyttäytyvän täysin satunnaisesti. Tämä viittaa vahvasti siihen, että radiosignaalin kulku kerroksissa on huomattavan monimutkaista, ja heijastuksilla on todennäköisesti paljon suurempi merkitys kuin LOS- linjan esteillä. Havaintoa selittänee se, että huoneistot olivat koetilanteessa vielä avoimia, ja käytävään

kulkeutuakseen signaalin ei tarvinnut välttämättä läpäistä ainuttakaan rakennetta, vaan heijastuminen huoneistossa riitti. Sen sijaan kerrosten välillä kulke-
miseksi signaalin on väistämättä läpäistävä esteitä.

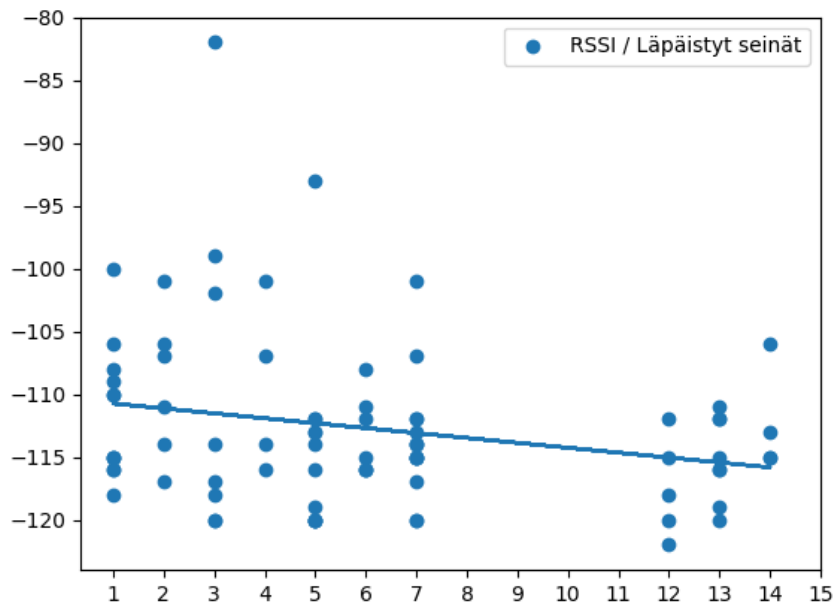
Tukiaseman vastaanottaman signaalin vahvuuden mittaamisessa on havaittavissa vastaavaa käyttäytymistä, joskin korrelaatiokerroin jää hiukan kadonneiden pakettien määrän laskentaa alhaisemmaksi.



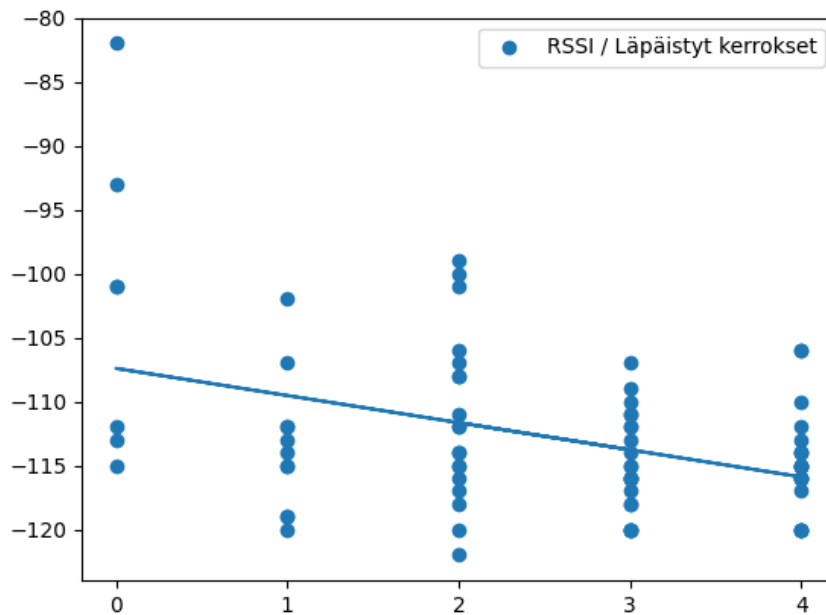
Kuva 7. Kadonneiden pakettien määrä 500 perille päässyttä pakettia kohden (y-
akseli, kpl) LOS-linjan läpäisemien seinien funktiona.



Kuva 8. Kadonneiden pakettien määrä 500 perille päässyttä pakettia kohden (y-akseli, kpl) sensorin ja tukiaseman väliin jäävien kerrosten funktiona.



Kuva 9. Tukiaseman mittaamien RSSI-arvojen (y-akseli, dBm) keskiarvo sensoria kohden LOS-linjan läpäisemien seinien funktiona



Kuva 10. Tukiaseman mittaamien RSSI-arvojen (y-akseli, dBm) keskiarvo sensorin ja tukiaseman väliin jäävien kerrosten funktiona.

Tulosten perusteella vahvaa korrelaatiota kokeessa käytetyssä kohteessa ei voida näyttää. Selvästi hävinneiden pakettien määrä pysyy matalana tukiaseman kerroksessa sekä yhtä tai kahta kerrosta alemmissa tiloissa. Kolmen ja neljän kerroksen etäisyydellä yhä useammat sensorit hävittävät jo keskimäärin lähes puolet paketeista.

6 Päätelmät

Tutkimuksessa käytetty kohde tiedettiin jo ennalta yhteyksien kannalta varsin haastavaksi. Sisätiloissa niin 4G-verkon kuin Sigfox-verkon laitteiden kuuluvuus on ollut heikkoa. LoRaWAN- laitteet ovat selviytyneet silmämääräisesti arvioiden parhaiten, mutta osassa tiloista niidenkin suorituskyky on ollut alentunut. Kadonneiden pakettien määrä kasvoi yllättävänkin suureksi jopa varsin lähellä paikallista tukiasemaa. Tällä perusteella uskottavaa mallia, jolla sensorien toiminnan luotettavuutta voisi laskea etukäteen, ei voi esittää.

Kadonneiden pakettien määrän analyysi oli kuitenkin tulevia kehityshankkeita ajatellen erittäin merkityksellinen. Se osoitti, ettei ratkaisuja, jotka eivät tue pakettien kuitaamista ja uudelleenlähetyistä, voi käyttää edes hyvissä kuuluvuusolosuhteissa kriittisemmissä kohteissa. Olosuhdeseurannan kannalta puuttuvilla paketeilla ei ollut juurikaan merkitystä. Yleisenä tavoitteena asuntorakentamisen kohteissa on pidetty sitä, että mittaustuloksia saadaan perille yksi tunnissa, eikä yhtä useampi sensori kerrosta kohden tuota mittauksia lainkaan.

Tämän havainnon perusteella teollisen rakentamisen ratkaisut, joissa reaaliaikaisuus ja kaksisuuntaisuus ovat välttämättömiä ominaisuuksia, vaativat tuekseen kerroksen, joka varmistaa pakettien perille pääsyn sekä mukauttaa läheystiheyden todelliseen suoritukseen. Julkisten palvelutarjoajien LoRaWAN-verkot ovat todennäköisesti liian haasteellisia käytettäväksi tällaisissa ratkaisuissa, sillä verkon kuormituksen kriteerit ovat erittäin tiukat.

Tuloksien perusteella voidaan sanoa, että tukiaseman ja sensorin väliin jäävien välipohjien läpäisy vaikuttaa sensorin suoriutumiseen, mutta kerroksen sisällä, kun asuntojen ovia ei vielä kuivumisen kannalta olennaisessa vaiheessa ole asennettu, selvää vaikutusta ei voi mallintaa. Viisikerroksinen kohde ei myöskään vienyt LoRaWAN-verkkoa ja käytettyjä sensoreita ääriarajoille. Heikoimmat mitatut signaalitasot olivat hieman alle -120dBm tasolla, kun käytettyjen laitteiden pienin mahdollinen herkkyys oli -137dBm. Muutaman kilometrin säteellä kohteesta sijaitsi myös kaksi Digitan valtakunnallisen verkon tukiasemaa, ja sensorit olisivat kyenneet lähettämään paketteja radioteitse niihin, mikäli yhteys paikalliseen tukiasemaan olisi heikentynyt liiaksi. Tällainen siirtymä olisi todennäköisesti tapahtunut esimerkiksi siinä tapauksessa, että kohteessa olisi ollut huomattavasti enemmän kerroksia.

Analyysiä olisi voinut viedä hiukan pidemmällekin tekemällä regressiosuorat myös esimerkiksi kerroskohtaisille keskiarvoille tai mediaaneille. Mitään konklusiivista sillä ei olisi kuitenkaan paljastunut. Sen sijaan korkeampi kohde olisi voinut tuottaa enemmän tietoa sensoreiden käytettävyydestä ja erityisesti siitä, millaisella määrällä kerroksia laitteiden herkkyys ei enää riittäisi luotettavaan

yhteyteen tukiasemaan. Kerrosten sisällä syntyvät erot näyttäytyivät datan perusteella niin hajaantuneilta, ettei LOS-etäisyyden arvioinnilla voida sanoa toiminnasta juuri mitään. Radiosignaalien eteneminen rakennustyömaalla on monimutkaista, ja edellyttää jatkossakin kokemusta laitteiden toiminnasta asennuksen onnistumiseksi.

Lähteet

1. Kosteudenhallinnan menettelyohje rakennushankkeeseen ryhtyvälle. 2016. Verkkoaineisto. Helsingin kaupungin rakennusvalvonta. <<https://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/Kosteudenhallinta.pdf>>. Luettu 19.11.2023.
2. Payam, R ym. 2014. Performance of short and long range wireless communication technologies in construction. Automation in Construction vol 47, s. 50-61.
3. Zumdahl, S.S. & Zumdahl, S.A. 2010. Chemistry (8. painos). Brooks Cole.
4. Rakennustieto. 2006. Työmaan laadunvarmistus, tarkastukset ja mittaukset. 1215-S
5. Yang, Sung-Moon Michael. 2020. Modern Digital Radio Communication Signals and Systems. E-kirja. Springer Cham.
6. Milesight EM300-TH datasheet. Verkkoaineisto. <<https://resource.milesight-iot.com/milesight/document/em300-th-datasheet-en.pdf>>. Luettu 1.12.2023.

