

## **KAHDEN RADION OTA-TESTIYMPÄRISTÖ**

Testauskapasiteetin kasvattaminen

Lara Laamanen  
Opinnäytetyö (AMK)  
Kevät 2025  
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma  
Ohjelmistokehitys

Tekijä: Lara Laamanen

Opinnäytetyön otsikko: Kahden radion OTA-testiympäristö – Testauskapasiteetin kasvattaminen

Työn ohjaaja: Janne Kumpuoja

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2025

Sivumäärä: 59

Tässä opinnäytetyössä kehiteltiin uutena ratkaisuna kahden radion testiympäristö lisäämään testikapasiteettia integraatioryhmälle radioiden 5G-testaukseen. Työn tavoitteena oli tutkia, mitkä tekijät rajoittavat kahden radion yhtäaikaista testausta. Työn ympäristöt ja testitapaukset toteutettiin yksityisen toimeksiantajan toiveiden mukaan. Ennakkotapauksina oli jo muutama aiemmin rakennettu kahden radion ympäristö, mutta niiden todellisia rajoitteita ja kapasiteettia ei ollut tutkittu.

Koska työssä pyrittiin kehittämään systemaattista ympäristöjen testausta, tehtiin toimeksiantajan kanssa testaus suunnitelma. Testitapauksiin päädyttiin rakentamaan FDD- ja TDD-ympäristöt. FDD-ympäristössä tutkittiin solujen asettelu merkitystä ja TDD-ympäristössä käytettyjen kehysrakenteiden vaikutuksia tuloksiin. Itse testaus oli kaksivaiheinen. Valmiista ympäristöistä kerättiin ensimmäiset referenssitulokset niin, että vain toinen radio oli toiminnassa. Tällä pyrittiin minimoimaan tuloksissa näkyvä häiriö. Referenssituloksia verrattiin ympäristön teoreettisiin maksimituloksiin. Verifiointitestauksissa molemmilla radioilla oli meneillään yhtäaikaiset datansiirrot.

Saatujen tuloksien valossa voidaan todeta, että kahden radion ympäristö on toimiva ratkaisu, mutta se vaatii lisäinvestointeja. Käytetyt ympäristöt on suunniteltu yhdelle radiolle, joten niiden kapasiteetti ei ole tilan ja varustelun puolesta riittävä. FDD-ympäristön tuloksissa ei nähdä selkeitä muutoksia eri testitapausten välillä. Suurimmat puutteet johtuvat käyttäjän laitteista ja niiden säädöistä. TDD-ympäristössä puolestaan nousee esille kehysrakenteiden yhteensovittelu, sillä kahden täysin toisistaan poikkeavan kehysrakenteen yhtäaikainen testaus aiheuttaa huomattavia häiriöitä testituloksiin.

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Program in Information and Communication Technology  
Option of Software Development

Author: Lara Laamanen

Title of thesis: Two-radio OTA-Test Environment – Increasing Testing Capacity

Supervisor: Janne Kumpuoja

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2025

Number of pages: 59

This thesis explores the development of a new test environment involving two radios to increase test capacity for an integration team focusing on 5G radio testing. The objective was to investigate the factors limiting the simultaneous testing of two radios.

Test plan was created in cooperation with the commissioning company. The test cases involved building both FDD and TDD environments. In the FDD environment, the focus was on the impact of cell layout. While in the TDD environment, the influence of frame structures on the results was examined. The testing process consisted of two phases. In the first phase, reference results were collected with only one radio powered on, aiming to minimize interference in the results. These reference results were compared to the theoretical maximum values of the environment. In the verification phase, simultaneous data transmission was conducted with both radios active.

Based on the results, the two-radio environment proves to be a viable solution, though it requires additional investments. The existing setups were originally designed for single-radio use and thus lack sufficient capacity in terms of space and equipment. The test case variations did not produce significant changes in the results in the FDD environment. The main limitations were caused by the user equipment and the lack of rotator. The TDD environment highlighted the challenge of frame structure compatibility, as simultaneous testing with two entirely different frame structures caused significant interference in the test outcomes.

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ .....	2
ABSTRACT .....	3
SISÄLLYS .....	4
SANASTO .....	6
1 JOHDANTO .....	11
2 5G-TEKNOLOGIA .....	13
2.1 5G-standardi.....	13
2.2 Radioaallot ja taajuudet.....	14
2.3 Taajuusalueet.....	16
2.3.1 Kehysrakenteet.....	19
2.3.2 Duplex-tekniikat.....	22
2.4 Antennitekniikka .....	23
2.4.1 Polarisaatio.....	24
2.4.2 Massiivinen MIMO .....	26
2.4.3 Keilanmuodostus .....	27
3 TESTIYMPÄRISTÖ .....	31
3.1 OTA RF -kammio .....	31
3.2 Kahden radion teline .....	32
3.3 Radiot.....	33
3.4 Antennit.....	34
4 TESTIYMPÄRISTÖN VERIFIOINTI.....	35
4.1 Testaussuunnitelma .....	35
4.2 Tulosten mittaus .....	37
4.3 Testiympäristön 1 referenssitestaus.....	38
4.4 Testiympäristön 1 verifiointitestaus .....	40
4.5 Testiympäristön 2 referenssitestaus.....	44
4.6 Testiympäristön 2 verifiointitestaus .....	46
5 TULOKSET.....	48
5.1 FDD-tekniikkaa hyödyntävä ympäristö .....	48
5.2 TDD-tekniikkaa hyödyntävä ympäristö .....	51
5.3 Testauksen kehittäminen ja lopputulema .....	53

LÄHTEET ..... 56

## SANASTO

1G	First Generation. Ensimmäisen sukupolven teknologia.
2G	Second Generation. Toisen sukupolven teknologia.
3G	Third Generation. Kolmannen sukupolven teknologia.
3GPP	3rd Generation Partnership Project. Kolmannen sukupolven kumppanuusprojekti.
4G	Fourth Generation. Neljännen sukupolven teknologia.
5G	Fifth Generation. Viidennen sukupolven teknologia.
5G-Advanced	5G:n kehitysaskel 5G:n ja 6G:n välillä. Lanseerattu 3GPP:n julkaisussa 18.
5G NR	5G New Radio. 5G-verkon radioteknologia.
6G	Sixth Generation. Kuudennen sukupolven teknologia.
BF	Beamforming. Keilanmuodostus.
BLER	Block Error Rate. Lohkovirhesuhde, kertoo vastaanotettujen virheellisten tietolohkojen osuuden lähetetyistä lohkoista.
CON	Conducted. UE:t hyödyntävät omien antennien sijaan ulkoisia antennia.
CP	Cyclic Prefix. Syklinen etuliite, lisätty aikaväli ennen OFDM-symbolia.
CSI	Channel State Information. Tietoa langattoman kanavan tilasta.
CQI	Channel Quality Indicator. Kanavan laatuilmaisin. UE:n gNB:lle lähettämä arvo radiokanavan laadusta.

DAC	Digital-to-Analog Converter. Digitaal-analogiamuunnin.
dB	Desibeli.
dBm	Desibeli-milliwatti, absoluuttinen tehoarvo.
DL	Downlink. Alaspäin suuntautunut lähetystie tukiaseman ja UE:n välillä.
DMRS	Demodulation Reference Signal. Referenssisignaali PBCH:n demodulointiin.
eMBB	Enhanced Mobile Broadband. Parannettu mobiili-laajakaista.
FDD	Frequency Division Duplex. Taajuusjakoduplexi.
FR1	Frequency Range 1. Taajuusalue 1: 410–7 125 MHz
FR2	Frequency Range 2. Taajuusalue 2: 24 250–71 000 MHz
Gbps	Gigabits per second. Gigabittiä sekunnissa.
gNB	5th Generation NodeB. Viidennen sukupolven (5G) tukiasema.
IMT	International Mobile Telecommunications. ITU:n määrittelemä mobiiliverkkoteknologioita ja palveluita määrittelevä standardi.
IoT	Internet of Things. Esineiden internet.
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. Tieto- ja viestintäteknologiajärjestön osasto, joka on keskittynyt radioviestintään.
HPBW	Half Power Beam Width. Puolitehosäteen leveys.

LTE	Long-Term Evolution. Neljännen sukupolven datayhteys ja standardi 4G-teknologiassa.
LTE-Advanced	4G:n kehitysaskel 4G:n ja 5G:n välillä.
MCS	Modulation and Coding Scheme. Langattomien viestintäjärjestelmien käyttämä modulaatio- ja koodausmenetelmä.
Mbps	Megabits per second. Megabittiä sekunnissa.
MIB	Master Information Block. Sisältää järjestelmätietoja mm. solusta ja kaistasta.
MIMO	Multiple-Input, Multiple-Output. Antennitekniikka, jossa käytössä monilähtöinen ja -tuloinen antennijärjestelmä
mMIMO	Massive Multiple-Input, Multiple-Output. Vähintään kymmeniä lähetin-vastaanottimia.
mMTC	Massive Machine-Type Communication. Massiivinen konetyyppinen tietoliikenne.
NGMN	Next Generation Mobile Networks. Maailmanlaajuinen operaattorivetoinen johtamisverkosto.
NSA	Non-Standalone. 5G-hybridimalli, jossa käytetään 4G LTE- ja 5G-teknologiaa.
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Ortogonaalinen taajuusjakokanavointi.
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplex Access. Monikäyttöinen ortogonaalinen taajuusjakokanavointi.
OTA	Over-the-Air. Testaus ilmarajapintaa pitkin.
PBCH	Physical Broadcast Channel. Fyysinen lähetyskanava.
PCI	Physical Cell ID. Fyysinen solutunniste.

PSS	Primary Synchronization Signal. Ensisijainen synkronointisignaali.
RAN	Radio Access Network. Radioliityntäverkko.
Rank	Ilmaisee datansiirrossa käytettyjen Uplink- ja Downlink-kerrosten määrää.
RF-ketju	Radio Frequency Chain. Radiotaajuuslaitteiden ja -komponenttien sarjan kuvaus signaalien lähetyksessä ja vastaanotossa.
RSSI	Received Signal Strength Indicator. Ilmaisee vastaanotetun signaalin voimakkuuden.
RSRP	Reference Signal Received Power. Referenssisignaalin vastaanotettu teho.
SA	Standalone. Täysin 5G-tekniikan käyttömuoto ilman aiempien sukupolvien tekniikkaa.
SCS	Subcarrier Spacing. Alikantaaltojen väli.
SDL	Supplementary Downlink. Taajuuskaista täydentämään alaspäin suuntautunutta tietoliikennettä.
SNR	Signal-to-Noise ratio. Signaali-kohinasuhde.
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio. Signaali-taustamelu-kohinasuhde.
SRS	Sounding Reference Signal. Viitesignaali yhteyden laadusta ja kanavan tiedoista.
SS	Synchronization Signal. Synkronointisignaali käyttäjän laitteen ja tukiaseman välille.
SSB	Synchronization Signal Block. Synkronointisignaali lohko, sisältää PSS:n ja SSS:n.

SSS	Secondary Synchronization Signal. Toissijainen synkronointisignaali.
SUL	Supplementary Uplink. Taajuuskaista täydentämään ylöspäin suuntautunutta tietoliikennettä.
TDD	Time Division Duplex. Aikajakoduplexi.
Tput	Throughput. Järjestelmän läpikulkevan tiedon määrä.
TRX	Transceiver. Lähetin-vastaanotin.
UE	User Equipment. Käyttäjän laite.
UL	Uplink. Ylöspäin suuntautunut lähetystie tukiaseman ja UE:n välillä.
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications. Erittäin luotettava matalan viiveen viestintä.

# 1 JOHDANTO

Viidennen sukupolven teknologia on ollut markkinoilla jo joitakin vuosia, mutta sen kehitystyö jatkuu edelleen. On tärkeää ymmärtää, ettei mikään teknologia pysy hengissä ja ajan hermoilla, jos kehitys ei ole jatkuvaa. Tämän takia myös jo julkaistuille teknologioille pyritään jatkuvasti löytämään ja kehittämään entistä toimivampia ratkaisuja. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa uusi toimiva ratkaisu integraatioryhmälle radioiden 5G-testaukseen.

Tämä työ tehdään tarpeesta lisätä testauskapasiteettia, jonka seurauksena on mahdollista tehostaa integrointia ja tehdä tarkempaa tutkimusta testiympäristöissä. Työ pyrkii selvittämään, millaisia radiotekniikoita on mahdollista integroida ilmarajapintatestaukseen (OTA) suunnitelluissa ympäristöissä yhtäaikaisesti. Halutaan myös selvittää, millaisia rajoittavia tekijöitä yhtäaikaiseen integrointiin liittyy ja millaisia mahdollisia lisäkomponentteja tai -kustannuksia ympäristö voi vaatia. Ennakkokäsityksenä on, että kahden radion integrointi yhtäaikaisesti ja sen vaatiman ympäristön rakentaminen on mahdollista, ja työtä suunnitellessa on piirtynyt ajatus siitä, mitä kaikkea työ vaatii.

Kyseessä on tutkimuspainotteinen työ, jonka alussa käsitellään 5G-tekniikan perusteita pääpiirteissään ja siltä osin, kun ne ovat merkittäviä rakennettavan ympäristön kannalta. Luku 2 siis tiivistää teknisesti olennaisimmat asiat. Työssä ei käsitellä aiempien sukupolvien teknologioita tekniseltä kannalta, sillä ne eivät ole enää merkittävässä roolissa integraation OTA-tutkimuksessa.

Luku 3 sisältää testiympäristöjä koskevaa tietoa. Työ sijoittuu jo valmiiksi olemassa oleviin testiympäristöihin, joita tullaan muokkaamaan kahdelle radiolle sopiviksi ja niihin asennetaan tarvittavia lisälaitteita. Asennuksissa käytetään työn ulkopuolista henkilöä, jolla on vaadittavat koulutukset ja osaaminen tehdä työn vaatimia liitäntä- ja sähkötöitä. Muut asennukset ja radiotelineen suunnittelu on suoritettu oman osaamisen mukaan ja tarkastutettu koulutetun tahon toimesta turvallisiksi.

Kun tarvittavat ympäristömuutokset on saatu tehtyä, työssä voidaan siirtyä tekemään ympäristön käyttöönottoa varten tarvittavat testaukset. Luvussa 4 käsitellään ympäristöjen testaus ja toimivuus. Se voidaan todistaa toimivaksi ottamalla ennalta suunnitellun testisuunnitelman mukaiset tulokset jo olemassa olevasta yhden radion testiympäristöstä ja vertaamalla niitä kahden radion testiympäristön tuloksiin. Viimeisessä luvussa 5 pohditaan lopullisia tuloksia ja analysoidaan niitä. Lisäksi suunnitellaan mahdollisia kehityskohteita ja -suuntia.

Haluan osoittaa kiitokset ohjaavalle opettajalleni Janne Kumpuojalle sekä työni ohjaajalle Janne Koivurannalle. Työ on toteutettu yksityiselle toimeksiantajalle.

## 2 5G-TEKNOLOGIA

Vuosikymmenten saatossa yhteiskunta on rakentunut yhä enemmän uusien teknologioiden varaan, jotka ovat riippuvaisia niiden jatkuvasta kehityksestä ja uusista innovaatioista. Käyttäjämäärät ovat kasvaneet merkittävästi ja kasvun on odotettu olevan tuhatkertainen seuraavan vuosikymmenen aikana. Tämä on asettanut teknologian kehityksen merkitykselle uuden painoarvon, sillä aiempien sukupolvien teknologiat eivät olleet kyvykkäitä kattamaan läheskään koko maailman tarpeita. (Rodriguez 2015, luku 1.1.)

Uusia matkapuhelinverkkojen sukupolvia voidaan karkeasti sanoa syntyneen noin kymmenen vuoden välein alkaen vuodesta 1982, jolloin julkaistiin ensimmäisen sukupolven mobiiliverkko. Tällöin onnistuttiin tekemään ensimmäistä kertaa puhelu, joka ei katkennut yhteyden siirtyessä tukiasemalta toiselle. Tämän jälkeen jo vuonna 1991 otettiin käyttöön 2G. 2000-luvulla aikansa ovat nähneet 3G-teknologia vuonna 2001 ja 4G-teknologia vuonna 2011. (Järvinen 2013, 8–11.)

Viimeisin ja laajalti käytössä oleva teknologia on 5G vuodelta 2019. (European 5G Observatory s. a.) Sen päätavoitteiksi nimettiin äärimmäinen mobiililaajakaista jopa yli 10 Gbps:n tiedonsiirtonopeuksiin ja kuitenkin takaamaan myös 100 Mbps:n kapasiteetti kaikkialla sekä kyvykkyys kymmentuhatkertaistamaan verkkoliikenne. 5G:llä tavoitellaan lisäksi yli 99,9 prosentin luotettavuutta ja alle 1 millisekunnin viivettä. Sen halutaan myös maksimoivan sekä optimoivan IoT-viestintää matalilla kustannuksilla ja pitkällä käyttöiällä. (Holma, Toskala & Nakamura 2024, luku 1.2.) Tässä luvussa perehdytään 5G-teknologian eri osa-alueisiin ja innovaatioihin, jotka ovat omalta osaltaan vieneet eteenpäin matkapuhelinverkkojen kehitystä.

### 2.1 5G-standardi

5G:lle määriteltiin standardit osana kolmannen sukupolven kumppanuushanketta eli 3GPP:tä, jonka määrittelyssä ovat mukana olleet useat eri matkapuhelinverkoista ja niiden kehityksestä vastaavat tahot, kuten konferenssit ja unionit, joissa on mukana alan johtavia henkilöitä sekä yrityksiä. Näitä vaikuttavia tahoja ovat

esimerkiksi ITU-R ja NGMN. 3GPP on mukana edistämässä ja julkaisemassa matkapuhelinverkkoihin liittyviä standardeja julkaisuina, jotka antavat tarkkoja määrittelyjä tuleville teknologioille ja nykyisten jatkuvalle kehitykselle. Vuonna 2015 järjestettiin RAN 5G -työpaja, joka keskittyi 5G:n vaatimuksiin. Yksimielisesti päätettiin, että 5G tulee olemaan uusi teknologia, joka tukee LTE-Advanced-kehitystä ja ne voivat jatkaa myös keskenään rinnakkaista kehitystä.

Julkaisussa 15 (2018) olivat ensimmäiset 5G NR -standardit kuten NSA- ja SA-määritelmät, julkaisu 16 (2020) laajensi 5G:n käyttösovelluksia mm. ajoneuvoihin ja teollisuuteen sekä kehitti URLLC-tukea. 17. julkaisu painotti vielä laajempaa 5G:n soveltamista, parannuksia IoT-sovelluksiin ja edisti verkon kattavuutta. (Holma, Toskala & Nakamura 2024, luku 2.) Julkaisussa 18 lanseerattiin 5G-advanced ja tekoälyn sekä koneoppimisen mukaan tuominen. Seuraavaksi odotetaan joulukuussa 2025 tulevaa julkaisua 19, joka tulee jatkamaan 5G:n kehitystä, mutta myös johdattamaan kehitystä 6G:n standardointiin. (Liberg 15.12.2023.)

Jotta 5G:tä voidaan pitää todellisena viidennen sukupolven teknologiana, täytyy sen täyttää tietyt ITU:n IMT-2020 asettamat standardit. Näistä keskeisimpinä pidetään kolmea tärkeintä käyttöskenaariota. Ensimmäisenä on eMBB eli parannettu mobiililaajakaista, joka merkitsee parempaa suorituskykyä. Toisena on URLLC eli erittäin luotettava ja lyhyen viiveen viestintä, jolla pyritään tukemaan tiukkoja vaatimuksia viiveen, suorituskyvyn ja laaja-alaisen käytettävyyden suhteen. Viimeisenä on mMTC eli massiivinen konetyyppinen tietoliikenne, jolla tuetaan maksimaalisia määriä liitettyjä laitteita tietyllä alueella. (Holma, Toskala & Nakamura 2024, luku 2.2.1.)

## **2.2 Radioaallot ja taajuudet**

Yksi tyhjiössä valonnopeudella ( $c = 2,99 * 10^8$ ) kulkeva sähkömagneettisen säteilyn muoto on radioaalto. Niitä käytetään monenlaiseen tiedonsiirtoon eri käyttötarkoituksissa. Kun tiedetään sen värähtelytaajuus  $f$ , saadaan johdettua säteilyn aallonpituus kaavalla 1. (Poole 1998, luku 2.)

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

KAAVA 1

$\lambda$  = aallonpituus (m)

$c$  = valonnopeus (m/s)

$f$  = keskitaajuus (Hz)

Radiotaajuusspektriin kuuluu laajamäärä signaaleja välillä 0,003–300 000 MHz ja sen yläpuolella sijaitsee muita säteilymuotoja. Itse radiotaajuusspektrin alueille on annettu omat rajaukset (taulukko 1) helpottamaan alueiden tunnistettavuutta ja kuvaamaan niiden tarkoituksia. (Poole 1998, luku 2.)

TAULUKKO 1. Radiotaajuusspektri (Poole 1998, luku 2; Koivuranta 2021, 8.)

Nimetty alue	Lyhenne	Alue Hertzeinä	Käyttötarkoitus
Very Low Frequency	VLF	0,003–0,03 MHz	
Low Frequency	LF	0,03–0,3 MHz	AM-radio
Medium Frequency	MF	0,3–3 MHz	
High Frequency	HF	3–30 MHz	Lyhytaaltoradio
Very High Frequency	VHF	30–300 MHz	FM-radio
Ultra High Frequency	UHF	300–3 000 MHz	Televisio, mobiililaitteet, 1G, 2G, 3G, 4G
Super High frequency	SHF	3 000–30 000 MHz	Satelliittilinkit, langaton kommunikointi, 5G
Extremely High Frequency	EHF	30 000–300 000 MHz	

<sup>1</sup> Sarakkeet 1-3, Poole.

<sup>2</sup> Sarake 4, Koivuranta.

Aiemmat teknologiat hyödyntävät UHF-aluetta, jonka seurauksena viidettä sukupolvea suunniteltaessa vaihtoehtoina oli korvata jokin olemassa olevista teknologioista tai ottaa käyttöön uutta käyttämätöntä aluetta. 5G-teknologia on suunniteltu hyödyntämään kaikkia käytössä olevia taajuusvaihtoehtoja välillä 400 MHz–90 GHz. (Holma, Toskala & Nakamura 2024, luku 4.)

Aiemmin mainituista 5G:n tavoitteista suorituskyvyn parantaminen ja viiveen minimointi ovat riippuvaisia spektrin käytöstä. Mitä tehokkaampi spektrin käyttö, sitä parempi suorituskyky. Spektriä pyritään parantamaan uusilla tekniikoilla, joita käsitellään seuraavissa luvuissa. Teoreettiset rajat spektritehokkuudelle ja datanopeudelle määrittävät kaistanleveys, signaali-kohinasuhde (SNR) sekä Shannonin raja. (Holma, Toskala & Nakamura 2024, luku 10.4.1.)

### 2.3 Taajuusalueet

5G:llä on hyvin laaja taajuusalue ultrakorkeistataajuuksista (UHF) millimetriaaltoihin. Tämän takia alue on jaettu kahteen osaan (taulukko 2) 3GPP 15. julkaisun mukaan. Taajuusalue 1 (FR1) eli senttimetriaaltojen (cmW) alue on välillä 410–7 125 MHz (taulukko 3). Alunperin alue määriteltiin julkaisussa 15 vain 6 000 MHz:iin asti, mutta myöhemmässä julkaisun 15 versiossa aluetta jatkettiin aina 7 125 MHz:iin asti. (3GPP TS 38.101-1 2019, versiot 15.4.0 & 15.5.0.) Taajuusalue 2 (FR2) eli millimetriaaltojen (mmW) alue on jaettu kahtia (taulukko 4). FR2-1-alue on välillä 24 250–52 600 MHz ja FR2-2-alue on välillä 52 600–71 000 MHz. (5G-tools 2025a.) FR1:n kattamalla taajuusalueella radioaallot ovat suurempia, jonka seurauksena ne tarjoavat loppukäyttäjille kohtuullisen kapasiteetin ja hyvän kantavuuden. FR2 kattaa laajemman taajuusalueen, jolla radioaallot ovat pienempiä. Suuren taajuusalueen ansiosta FR2 tarjoaa paremman kapasiteetin kuin FR1, mutta kantavuus on heikompaa.

*TAULUKKO 2. 5G NR -taajuusalueet. (5G-tools 2025a.)*

Määritelty taajuusalue	Vastaava taajuusalue
<b>FR1</b>	FR1 (410–7 125 MHz)
<b>FR2</b>	FR2-1 (24 250–52 600 MHz)
<b>FR2</b>	FR2-2 (52 600–71 000 MHz)

TAULUKKO 3. FR1-alueen taajuuskaistat. (5G-tools 2025a.)

NR taajuus- kaista	Uplink	Downlink	Duplex-tekniikka
<b>n1</b>	1 920–1 980 MHz	2 110–2 170 MHz	FDD
<b>n2</b>	1 850–1 910 MHz	1 930–1 990 MHz	FDD
<b>n3</b>	1 710–1785 MHz	1 805–1 880 MHz	FDD
<b>n5</b>	824–849 MHz	869–894 MHz	FDD
<b>n7</b>	2 500–2 570 MHz	2 620–2 690 MHz	FDD
<b>n8</b>	880–915 MHz	925–960 MHz	FDD
<b>n12</b>	699–716 MHz	729–746 MHz	FDD
<b>n13</b>	777–787 MHz	746–756 MHz	FDD
<b>n14</b>	788–798 MHz	758–768 MHz	FDD
<b>n18</b>	815–830 MHz	860–875 MHz	FDD
<b>n20</b>	832–862 MHz	791–821 MHz	FDD
<b>n24</b>	1 626.5–1 660,5 MHz	1 525–1 559 MHz	FDD
<b>n25</b>	1 850–1 915 MHz	1 930–1 995 MHz	FDD
<b>n26</b>	814–849 MHz	859–894 MHz	FDD
<b>n28</b>	703–748 MHz	758–803 MHz	FDD
<b>n29</b>	N/A	717–728 MHz	SDL
<b>n30</b>	2 305–2 315 MHz	2 350–2 360 MHz	FDD
<b>n34</b>	2 010–2 025 MHz	2 010–2 025 MHz	TDD
<b>n38</b>	2 570–2 620 MHz	2 570–2 620 MHz	TDD
<b>n39</b>	1 880–1 920 MHz	1880–1920 MHz	TDD
<b>n40</b>	2 300–2 400 MHz	2 300–2 400 MHz	TDD
<b>n41</b>	2 496–2 690 MHz	2 496–2 690 MHz	TDD
<b>n46</b>	5 150–5 925 MHz	5 150–5 925 MHz	TDD
<b>n48</b>	3 550–3 700 MHz	3 550–3 700 MHz	TDD
<b>n50</b>	1 432–1 517 MHz	1 432–1 517 MHz	TDD
<b>n51</b>	1 427–1 432 MHz	1 427–1 432 MHz	TDD
<b>n53</b>	2 483,5 – 2 495 MHz	2 483,5–2 495 MHz	TDD
<b>n65</b>	1 920–2 010 MHz	2 110–2 200 MHz	FDD
<b>n66</b>	1 710–1 780 MHz	2 110–2 200 MHz	FDD

(jatkuu)

TAULUKKO 3. (jatkuu).

<b>n67</b>	N/A	738–758 MHz	SDL
<b>n70</b>	1 695–1 710 MHz	1 995–2 020 MHz	FDD
<b>n71</b>	663–698 MHz	617–652 MHz	FDD
<b>n74</b>	1 427–1 470 MHz	1 475–1 518 MHz	FDD
<b>n75</b>	N/A	1 432–1 517 MHz	SDL
<b>n76</b>	N/A	1 427–1 432 MHz	SDL
<b>n77</b>	3 300–4 200 MHz	3 300–4 200 MHz	TDD
<b>n78</b>	3 300–3 800 MHz	3 300–3 800 MHz	TDD
<b>n79</b>	4 400–5000 MHz	4 400–5 000 MHz	TDD
<b>n80</b>	1 710–1 785 MHz	N/A	SUL
<b>n81</b>	880–915 MHz	N/A	SUL
<b>n82</b>	832–862 MHz	N/A	SUL
<b>n83</b>	703–748 MHz	N/A	SUL
<b>n84</b>	1 920–1 980 MHz	N/A	SUL
<b>n85</b>	698–716 MHz	728–746 MHz	FDD
<b>n86</b>	1 710–1 780 MHz	N/A	SUL
<b>n89</b>	824–849 MHz	N/A	SUL
<b>n90</b>	2 496–2 690 MHz	2 496–2 690 MHz	TDD
<b>n91</b>	832–862 MHz	1 427–1 432 MHz	FDD
<b>n92</b>	832–862 MHz	1 432–1 517 MHz	FDD
<b>n93</b>	880–915 MHz	1 427–1 432 MHz	FDD
<b>n94</b>	880–915 MHz	1 432–1 517 MHz	FDD
<b>n95</b>	2 010–2 025 MHz	N/A	SUL
<b>n96</b>	5 925–7 125 MHz	5 925–7 125 MHz	TDD
<b>n97</b>	2 300–2 400 MHz	N/A	SUL
<b>n98</b>	1 880–1 920 MHz	N/A	SUL
<b>n99</b>	1 626,5–1 660,5 MHz	N/A	SUL
<b>n100</b>	874,4–880 MHz	919,4–925 MHz	FDD
<b>n101</b>	1 900–1 910 MHz	1 900–1 910 MHz	TDD
<b>n102</b>	5 925–6 425 MHz	5 925–6 425 MHz	TDD
<b>n104</b>	6 425–7 125 MHz	6 425–7 125 MHz	TDD

TAULUKKO 4. FR2-alueen taajuuskaistat. (5G-tools 2025a.)

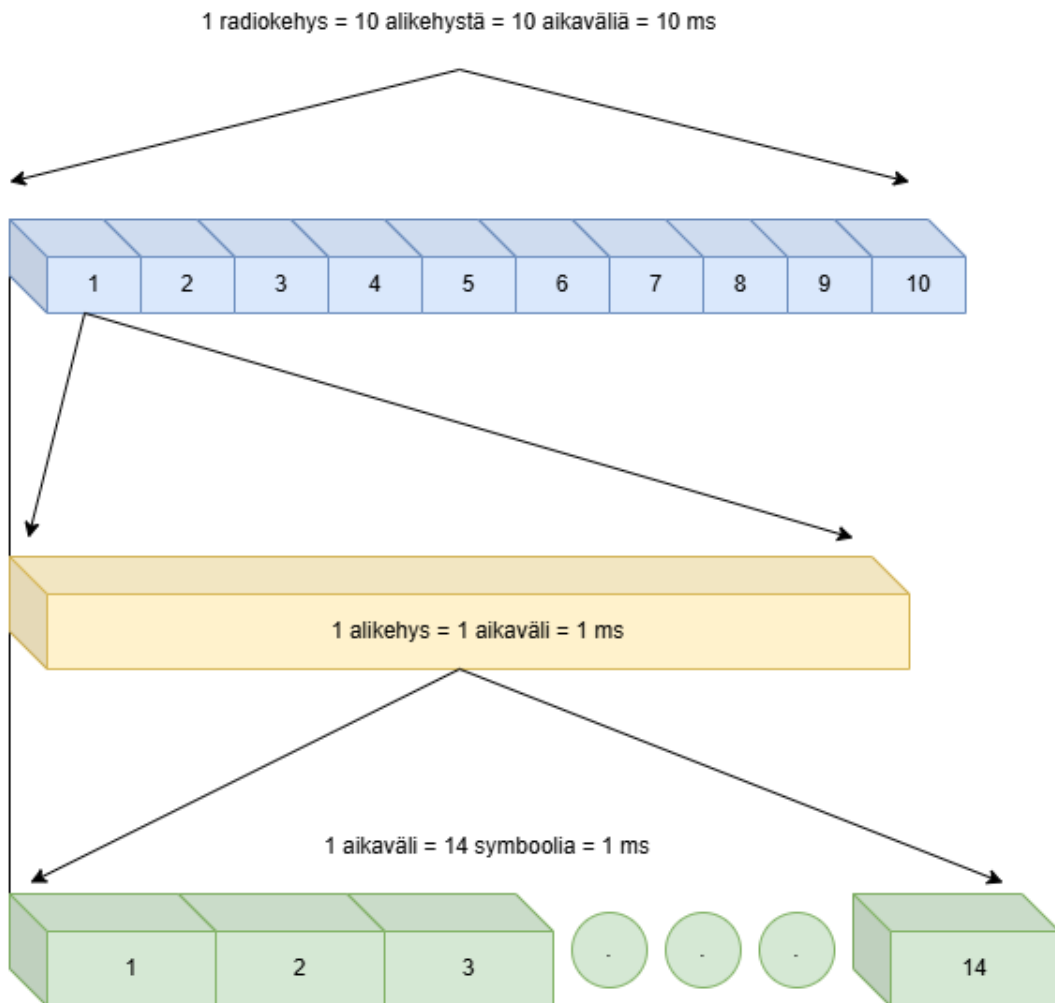
NR taajuuskaista	Uplink ja Downlink	Duplex-tekniikka
n257	26 500–29 500 MHz	TDD
n258	24 250–27 500 MHz	TDD
n259	39 500–43 500 MHz	TDD
n260	37 000–40 000 MHz	TDD
n261	27 500–28 350 MHz	TDD
n262	47 200–48 200 MHz	TDD
n263	57 000–71 000 MHz	TDD

### 2.3.1 Kehysrakenteet

Kehysrakenteet (engl. frame structures) ovat tapa, joilla dataa järjestetään ja lähetetään tiedonsiirtokanavissa. Niiden avulla hallitaan datan synkronointia, virheenkorjausta ja multiplexointia. 5G NR -kehysrakenteessa (kuva 1) perusyksikkönä voidaan pitää radiokehystä (engl. radio frame), joka kestää aina 10 ms. Radiokehys puolestaan jakautuu alikehyksiin (engl. subframes), joista yksi kestää aina 1 ms. Alikehys jakautuu aikaväleihin (engl. slots), jotka sisältävät aina CP-tyypistä eli syklistä etuliitteestä riippuvaisen määrän symboleita. Aikavälien määrä alikehyksissä riippuu alikantoaaltojen välistä eli SCS:tä, joita on tuettuna 5G:ssä useita (taulukko 5) verrattuna aiempaan sukupolveen. (ShareTechnote, s. a. c.)

5G:ssä kehysrakenne perustuu OFDM-tekniikkaan, josta nimenomaan sen monikäyttötekniikkaan OFDMA:han. Se perustuu ajatukseen useasta viestintäkanavasta, jotka voivat elää rinnakkain, kun jokaiselle kanavalle on oma pieni pala taajuuskaistasta eli oma alikantoaalto. Käytännössä ylä- ja alälähetysteitä pitkin suuntautuvat tiedonsiirrot jaetaan pienempiin alikantoaaltoihin. Tällöin radioaalloilla voidaan kuljettaa dataa tehokkaammin ja suorittaa tiedonsiirtoa useamman käyttäjän kanssa yhtäaikaisesti. Nämä alikantoaallot ovat toisilleen ortogonaalisia eli niiden häiriösuhteet toisiinsa on minimoitu. Tämä perustuu matemaattisesti

Fourier-muunnoksen sovelluksiin. (Holma & Toskala 2011, luku 4; Holma, Toskala & Nakamura 2024, luku 6.)



KUVA 1. Kehysrakenteen kokonaiskuva, kun alikantoaaltojen väli on 15 kHz. (ShareTechnote s. a. c.)

Syklinen etuliite eli CP on olennainen osa OFDM-tekniikkaa. CP:n tehtävä on olla osaltaan parantamassa laatua monitie-etenemisessä. Se lisää ylimääräisen, symbolikohtaisen etuliitteen signaalin alkuun puskuriksi ja vähentää aaltojen keskinäisiä vaikutuksia toisiinsa. CP:tä on käytössä kahta erilaista tyyppiä, joita ovat normaali ja laajennettu CP. Käytetty CP-tyyppi viittaa symbolin pituuteen aikavälissä. Käytetympi normaali CP on kestoltaan noin 7,03 % symbolin pituudesta, jolloin yhteen aikaväliin mahtuu 14 OFDM-symbolia. Laajennettu CP puolestaan

on 25 % symbolin pituudesta, jolloin yhteen laajennettuun aikaväliin mahtuu 12 OFDM-symbolia. (ShareTechnote s. a. c.)

*TAULUKKO 5. 5G:ssä tuetut kehysrakenteet. (ShareTechnote s. a. c.)*

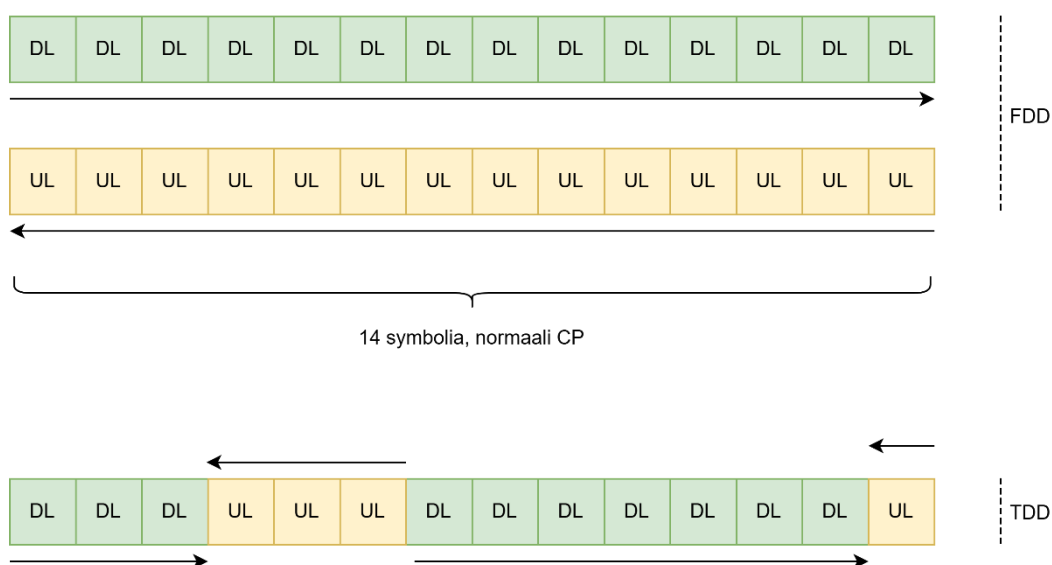
<b>Numero- logia</b>	<b>Alikanto- aaltojen väli (kHz)</b>	<b>Alikehyk- sessä aika- välejä</b>	<b>CP-tyyppi, aikavä- lissä symboleita</b>	<b>Radioke- hyksessä aikavälejä</b>
<b>0</b>	15	1	Normaali CP, 14	10
<b>1</b>	30	2	Normaali CP, 14	20
<b>2</b>	60	4	Normaali CP, 14 <b>TAI</b> laajennettu CP, 12	40
<b>3</b>	120	8	Normaali CP, 14	80
<b>4</b>	240	16	Normaali CP, 14	160
<b>5</b>	480	32	Normaali CP, 14	320
<b>6</b>	960	64	Normaali CP, 14	640

Olennainen tekijä kehysrakenteen kanssa on SSB eli synkronointisignaali lohko, jonka avulla 5G NR -järjestelmässä voidaan muodostaa yhteys käyttäjän laitteen ja NR-tukiaseman eli gNB välille. SSB koostuu synkronointisignaaleista (SS) sekä fyysisestä lähetystietokanavasta (PBCH). SS sisältää yleiset synkronointisignaalit (PSS) sekä toissijaiset synkronointisignaalit (SSS). Näitä käytetään solun hakuprosessissa, jossa käyttäjän laite hakee ajan ja taajuuden synkronoinnin, määrittää kehysajan ajoituksen ja tunnistaa solun fyysisen solutunnisteen (PCI). PBCH puolestaan sisältää MIB:n, jossa on järjestelmätiedot sekä DMRS:n, jota käytetään MIB:n dekoodaukseen. Kehysrakenteessa SSB:n pituus on neljän OFDM-symbolin verran. (Telecom Trainer 16.3.2023.)

### 2.3.2 Duplex-tekniikat

Erilaisilla Duplex-tekniikoilla dataa voidaan lähettää ja vastaanottaa ilmarajapintaa pitkin langattomasti. Yleisesti käytössä on kaksi tekniikkaa, joita ovat aikajakoduplexi (TDD) ja taajuusjakoduplexi (FDD). Nämä termit kuvaavat sitä, millä tekniikalla tiedon lähetys ja vastaanotto tapahtuvat (kuva 2). TDD:tä käytettäessä ylä- ja alatielähettykset käyttävät samaa radiokanavaa eri ajanhetkillä eli UL:n ja DL:n OFDM-symbolit ovat samalla kaistalla. FDD käyttää kahta erillistä radiokanavaa, jolloin luonnollisesti ylöspäin suuntautuneelle tiellä sijaitsee UL:n OFDM-symbolit ja alaspäin suuntautuvalla DL:n OFDM-symbolit. (ShareTechnote s. a. c.) Tarkastellessa FR1- ja FR2-taajuusalueiden NR-taajuuskaistoja (taulukot 3 ja 4), voidaan huomata, miten jokaiselle taajuuskaistalle on määritelty oma Duplex-tekniikka, joka kuvaa datansiirrossa käytettävää tekniikkaa. (RF Wireless World s. a. a.)

On kuitenkin tärkeää ymmärtää, että Duplex-tekniikasta riippumatta kaistoilla menee useita muitakin järjestelmän ja rakenteen vaatimia symboleita kuin vain UL- ja/tai DL-symboleita. Näistä osa esiteltiin aiemmassa alaluvussa SSB:n yhteydessä. Jokainen aikaväli vaatii siis useita erilaisia symboleita datansiirron onnistumiseen ja oheinen kuva 2 edustaa vain Duplex-tekniikoiden ideologiaa. (ShareTechnote s. a. c.)



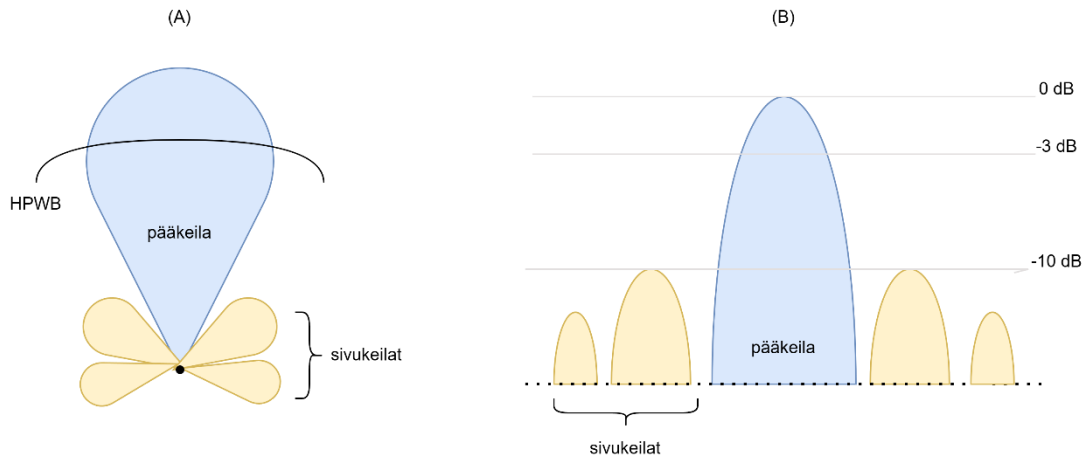
KUVA 2. TDD- ja FDD-tekniikoiden ero datan siirrossa. (ShareTechnote s. a. c.)

Edellä mainittujen lisäksi taulukoista voidaan myös havaita kaksi muuta tilaa. Näitä ovat täydentävä ylätielähetys (SUL) ja täydentävä alatielähetys (SDL), jotka ovat varattuja vain yksi suuntaiselle liikenteelle. SUL-kaistojen ideana on, että ne voidaan konfiguroida käyttöön toiseksi ylöspäin suuntautuvaksi kaistaksi reitillä käyttäjän laitteelta (engl. user equipment) tukiasemalle. Tällä voidaan vahvistaa UL-lähetyksen kapasiteettia ja erillisen UL-kaistan käyttö (ShareTechnote s. a. a.). SDL puolestaan viittaa alaspäin suuntautuvan liikenteen vahvistamiseen li-säkaistalla, mutta tavoitteet kapasiteetin ja lyhyemmän viiveen suhteen ovat samoja (ShareTechnote s. a. b.)

## **2.4 Antennitekniikka**

Laitetta sähkömagneettisten aaltojen lähettämiseen tai vastaanottamiseen kutsutaan antenniksi. Se muuttaa sähkövirrat sähkömagneettisiksi aalloiksi lähetykseen lähetyksiantennissa ja vastaanottopäässä toisinpäin eli vastaanottoantennissa aalloista virroiksi. (Visser 2012.) Antennien kolmeksi pääominaisuudeksi voidaan nimetä aaltokentän voimakkuus, polarisaatio ja etenemissuunta. Jokaisen antennin säteilykuvio määrittää sähkömagneettisen energian tai tehon suhteelliseksi jakautumiseksi avaruudessa. Tämä säteilykuvio määrittää kaukokenttäalueella, jossa kuvioon ei tule muutoksia etäisyyden muutosten myötä. Säteilykuvioista tehokuvio on kiinteällä säteellä säteily tai vastaanotettu tehon jälki (kuva 3) ja amplitudikenttäkuviossa voidaan nähdä sähkökentän spatiaalinen vaihtelu samalla säteellä. Säteilyä voidaan kuvata useilla eri tavoilla. (Christodoulou & Blaunstein 2014, luku 2.)

Yksi tapa kuvata säteilykuvioita on myös kertoa sen puolitehosäteiden leveys (HPWB). Säteilykuvion elementeistä pääkeila kuvastaa vahvistettua signaalia, joka on kohdistettu haluttuun säteilysuuntaan. Sivuille ja taaksepäin kohdistetusta suunnasta säteilevä säteily muodostaa sivukeiloja. Käytännössä siis antenniin syötetty teho säteilee eri suuntiin, mutta vahvistuksella voidaan määrittellä, mihin suuntaavuus kohdistetaan eli minne säteilyn pääkeila suunnataan ja säteily on voimakkainta. (Poole 1998, luku 7.) Tätä kutsutaan myös keilanmuodostamiseksi, jota käsitellään myöhemmin tässä luvussa.



*KUVA 3. Vahvistetun signaalin muodostamat tehomallit. A) Polaarinen, lineaarisessa mittakaavassa. B) Logaritminen, desibeliasteikon koordinaateissa. (Christodoulou & Blaunstein 2014.)*

Antennit voidaan myös jaotella luokkiin niiden ominaisuuksien perusteella. Esimerkiksi lanka-, dipoli- ja torviantennit ovat kaikki omiin käyttötarkoituksiinsa suunniteltuja luokkia. Erilaiset antennit on suunniteltu toimimaan vain tietyillä taajuuksalueilla sekä kaistanleveyksillä ja yleensä antennin koko antaa viitettä sen taajuuksalueesta. Mitä suurempi kokoinen antenni on, sitä matalammille taajuuksalueille se on. (Christodoulou & Blaunstein 2014, luku 2.)

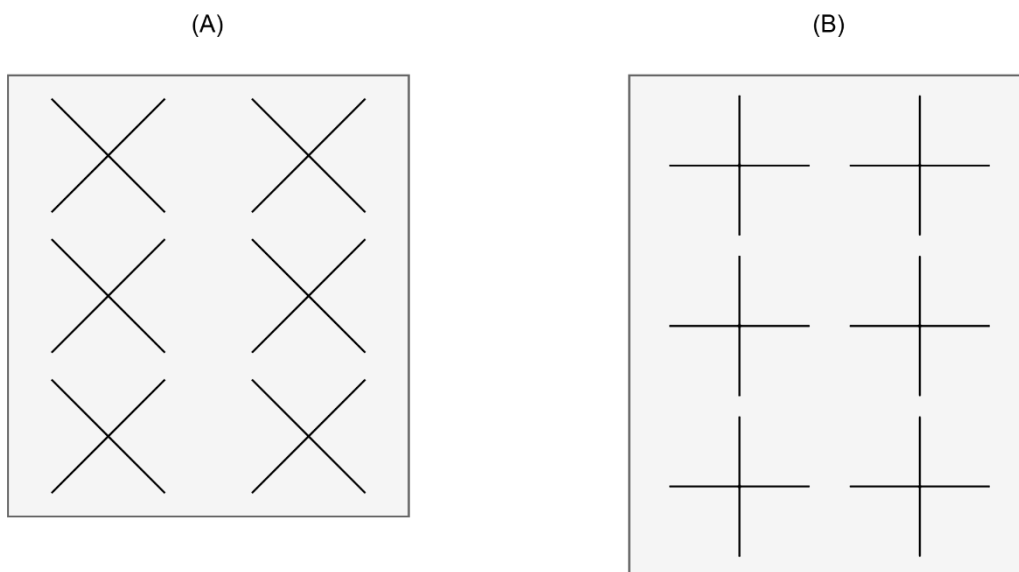
Jossain tapauksissa antenneilta voidaan vaatia ominaisuuksia, jotka jonkin luokan antenni voi täyttää, mutta yhden antennin kapasiteetti ei riitä vaadittuun toimintaan. Näihin tapauksiin voidaan käyttää ratkaisuna antenniryhmiä. Vaiheistettu antenniryhmä käyttää joukkoa antenneja, joita kutsutaan elementeiksi. Näiden elementtien säteilyt yhdistyvät keskitetyksi signaaliksi, jonka ansiosta voidaan muodostaa suuntaavia säteilykuvioita, kuten vahvistusmallissa (kuva 3) esitettiin. Suuntaus toteutetaan säätämällä yksittäisten elementtien vaihetta halutun vahvistuksen suuntaan. (Christodoulou & Blaunstein 2014, luku 7.)

### 2.4.1 Polarisaatio

Antennien säteilyä myös määrittää olennaisesti polarisaatio, joka määrittelee sähkömagneettisen aallon sähkökentän värähtelysuunnan. Se kuvaa myös

sähkökentän suhteen asteina maanpintaan nähden. Lähtökohtaisesti sekä lähetys- että vastaanottopään antennien tulisi olla samassa kallistuskulmassa tai niiden välille syntyy polarisaatiovaimennusta. Antenniryhmissä elementit ovat aseteltu tyypillisesti 45:n tai nollan asteen kulmaan, kuten kuvassa 4 esitetään.

Signaalien polarisaatio voi olla lineaarinen, ympyrä tai elliptinen. Lineaarinen polarisaatio koostuu pysty- ja vaakapolarisaatiosta. Värähtely tapahtuu vertikaalisessa tasossa pystypolarisaatiossa ja vaakapolarisaatiossa värähtely on horisontaalisessa tasossa. Näissä tapauksissa sähkökenttä värähtelee kohtisuorassa yhdellä tasolla aallon etenemissuuntaan nähden. Ympyräpolarisaatio muodostaa ympyrää edetessään. Ympyräpolarisaatio voi olla myötä- tai vastapäivään polarisoitunut. Elliptinen polarisaatio puolestaan etenee elliptisellä radalla, joka muodostuu, kun kaksi lineaarisesti polarisoitunutta aaltoa yhdistyvät ja niiden amplitudit sekä vaiheet eroavat toisistaan. (Christodoulou & Blaunstein 2014, luku 2.5.)



*KUVA 4. Antenniryhmien polarisaatiot. A) Polarisaatio 45°. B) Polarisaatio 0°. (Christodoulou & Blaunstein 2014.)*

## 2.4.2 Massiivinen MIMO

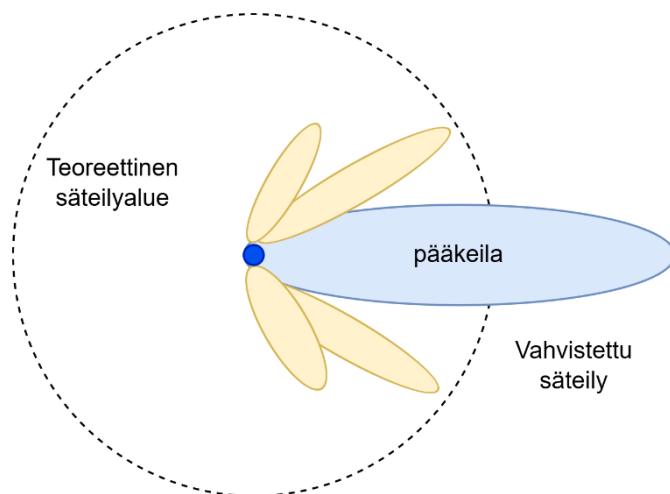
MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) käsitteenä viittaa antennitekniikkaan, jossa käytössä on monilähtöinen sekä -tuloinen antennijärjestelmä. Käytössä on useita antenneja sekä lähetyksen että vastaanoton päässä, jotka mahdollistavat datan kulkemisen useita signaaleja pitkin samanaikaisesti samalla kanavalla. Nämä useat antennit muodostavat antenniryhmän. Tekniikkana MIMO kehitettiin parantamaan suorituskykyä ja kapasiteettia langattomille viestintäjärjestelmille. Sillä on suuri merkitys erityisesti 5G:n kannalta, kun tavoitteet parempiin tuloksiin ovat kasvaneet merkittävästi edellisistä teknologioista. (Webster 2021.)

MIMOa voidaan käyttää eri tekniikoilla, joita ovat paikallinen diversiteetti (engl. spatial diversity) ja paikallinen multipleksointi (engl. spatial multiplexing). Paikallinen diversiteetti on suunniteltu alueille, joissa signaalit heikkenevät tai häiriintyvät helposti. Tällöin tietoa joko lähetetään tai vastaanotetaan usean eri antennin kautta, jolloin tietoliikenne saadaan turvattua, sillä on epätodennäköistä, että kaikki signaalit heikkenisivät yhtäaikaisesti. Sen tavoitteena on parantaa luotettavuutta. Paikallinen multipleksointi puolestaan soveltuu ruuhkaisille ja tiheään asutetuille alueille, joissa verkon kuormitus ja käyttöaste on suuri ja tiedonsiirtonopeuden on oltava huipussaan. Silloin eri antennien kautta lähetetään samanaikaisesti eriäviä tietovirtoja, jotka mahdollistavat suurien tietomäärien liikkumisen kerrallaan sekä viiveen lyhentymisen. (Viswanathan 6.8.2014.)

Massiivinen MIMO eroaa tavallisesta MIMO-järjestelmästä sen suuren antennimäärän takia, sillä MIMO:t hyödyntävät yleensä kahta tai neljää antennia. Yleisesti mMIMOissa antenneja voi olla esimerkiksi 32, 64 tai enemmän. Tämä mahdollistaa lisääntyvän määrän signaalireittejä jokaista lähetin-vastaanotinta kohden, joka puolestaan parantaa suorituskykyä. Lisäksi sen etu on kuuluvuuden parantaminen, sillä se reagoi korkeisiin taajuuksiin entistä paremmin ja mahdollistaa toiminnan myös millimetrialloilla. (Kavanagh & Mundy 17.11.2022.)

### 2.4.3 Keilanmuodostus

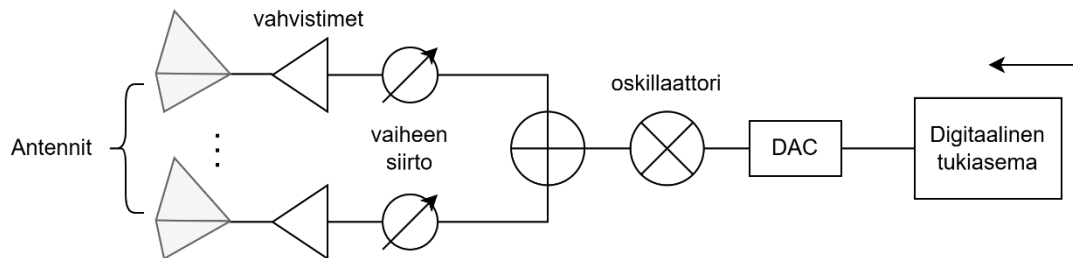
Keilanmuodostus (engl. beamforming) on asetettu 5G-spesifikaatioihin 3GPP:n 15. julkaisussa. Se on nähty ratkaisuna mobiiliverkkojen suorituskyvyn parantamiseen yhdessä mMIMO:n kanssa. Sen perusideana on signaalin vahvistaminen keilaksi, jolla päästään suurempaan kapasiteettiin ja kuuluvuuteen (kuva 5) verrattuna ei-keilanmuodostusta hyödyntävissä tapauksissa, joissa data vain siirretään koko solualueelle. Kuten jo aiemmin kerrottiin, antennien suuntaaminen tapahtuu vaihdetta ja amplitudia säätämällä, jolloin saadaan muodostettua säteilykuvio haluttuun suuntaan. Tätä kutsutaan keilaksi, joka muodostuu pää- ja sivukeiloista. Antennien vaihteen ja amplitudin säätö toteutetaan osoittamalla säteilykuvion suurin teho haluttuun suuntaan ja mahdollisimman pieni teho muualle. (Holma, Toskala & Nakamura 2024, luku 3.3.)



*KUVA 5. Isotrooppinen, teoreettinen säteilyalue ja vahvistettu säteily. (Christodoulou & Blaunstein 2014.)*

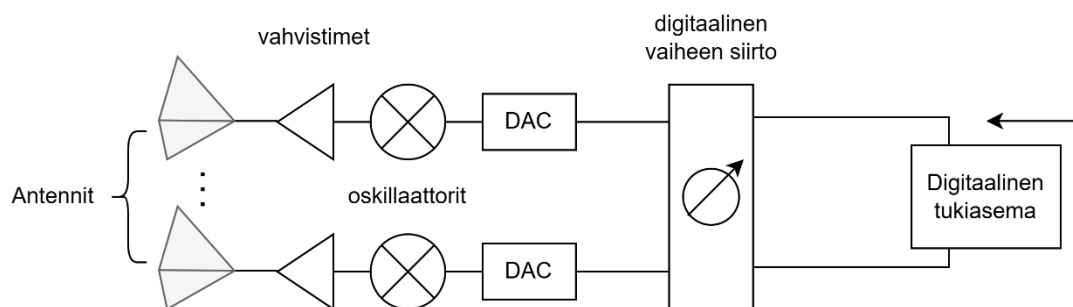
Keilanmuodostus voidaan toteuttaa kolmella eri tekniikalla, joita ovat analoginen, digitaalinen ja hybridikeilanmuodostus. Analogisessa keilanmuodostuksessa käytetään vain yhtä porttia digitaaliselta tukiasemalta ja RF-ketjua (engl. radio frequency chain), jossa digitaali-analogiamuunnin (DAC) muuntaa signaalin analogiseksi, kuten kuvassa 6. Tämän jälkeen signaali jaetaan ja syötetään vahvistimiin ja siitä jokaiseen antennielementtiin. Ennen vahvistusta signaalin amplitudia ja vaihetta säädetään analogisesti. Analogisen keilanmuodostuksen etuja on sen

kustannustehokkuus, alhainen virrankulutus sekä arkkitehtuurin yksinkertaisuus verrattuna digitaaliseen, mutta se ei sovellu monimutkaisimpiin säteilykuvioihin. Se on yleisimmin käytössä FR2-taajuusalueilla. (Chaudhari s. a.; RF Wireless World s. a. b.)



*KUVA 6. Analogisen keilanmuodostuksen arkkitehtuuri kuvattuna lähetyspäästä. (RF Wireless World s. a. b.)*

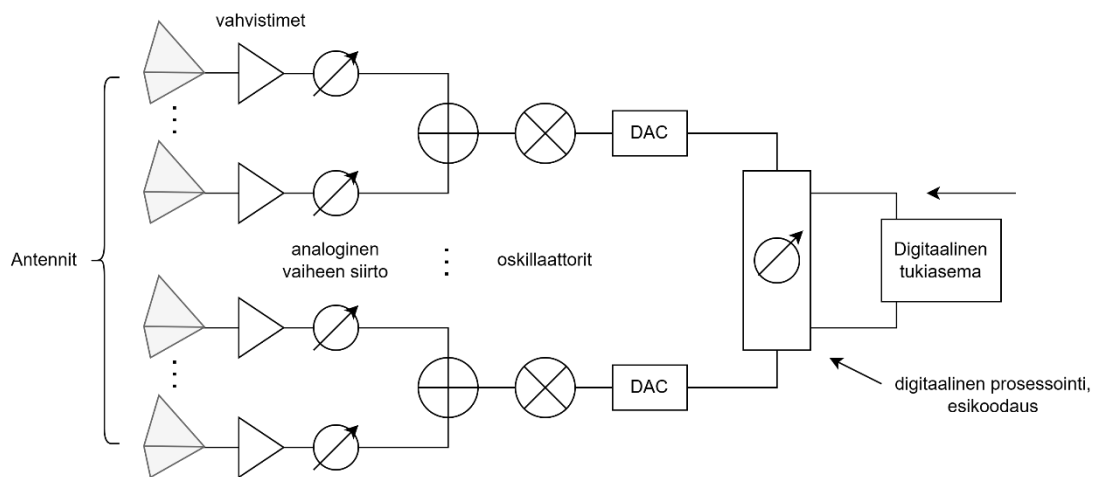
Digitaalisessa keilanmuodostuksessa vaihetta ja amplitudia säädetään ennen DAC-muunnosta. Jokaista antennielementtiä kohtaan tarvitaan oma portti digitaaliselta tukiasemalta ja RF-ketju (kuva 7). Jokainen signaali muutetaan yksittäin digitaalisesta analogiseksi. Digitaalisessa keilanmuodostuksessa virrankulutus on suurempaa ja se vaatii enemmän myös fyysisiä resursseja. Sitä käytetään pääasiassa FR1-taajuusalueilla ja se soveltuu myös monimutkaisemmille säteilykuvioille. (Chaudhari s. a.; RF Wireless World s. a. b.)



*KUVA 7. Digitaalisen keilanmuodostuksen arkkitehtuuri kuvattuna lähetyspäästä. (RF Wireless World s. a. b.)*

Kolmas vaihtoehto on käyttää hybridikeilanmuodostusta, joka yhdistelee analogisen ja digitaalisen keilanmuodostuksen etuja (kuva 8). Arkkitehtuuri on

kaksivaiheinen, jossa digitaalisen tukiaseman portit yhdistetään digitaaliseen esikoodaukseen, kuten digitaalisessa keilanmuodostuksessa. Sen avulla tehdään digitaalinen esikoodaus jokaiselle signaalille. Tämän jälkeen arkkitehtuuri jäljittelee analogista keilanmuodostusta, jolloin signaalit menevät DAC-muuntimien kautta jakajiin, vaiheensiirtoon, vahvistimiin ja lopulta elementteihin. Tällä ratkaisulla mahdollistetaan monimutkaisten säteilykuvioiden muodostaminen myös FR2-taajuusalueella, jossa digitaalisen keilanmuodostuksen kulut nousisivat korkeiksi ja analogisesti niiden tarkka muodostaminen olisi haastavaa. Hybridimalli on optimaalisin kustannuksien ja kompleksisuuden kannalta. (Chaudhari s. a.; RF Wireless World s. a. c.)



*KUVA 8. Hybridikeilanmuodostuksen arkkitehtuuri yhdistää analogisen ja digitaalisen keilanmuodostuksen. (RF Wireless World s. a. c.)*

Esitellyjen keilanmuodostusarkkitehtuurien rinnalla käytetään myös erilaisia ratkaisuja, millaisilla keiloilla keilanmuodostus toteutetaan ja miten. Keiloja on myös keskenään erilaisia, kuten SSB-keilat, jotka ovat lähetystyyppisiä (engl. Broadcast Type Beams) sekä SRS-keilat, jotka ovat liikennetyypisiä (engl. Traffic Type Beams).

SRS-keilanmuodostus (engl. Sounding Reference Signal) on tarkoitettu parantamaan keilanmuodostusalgoritmien suorituskykyä. Se on käyttäjän laitteen (UE) tukiasemalle (gNB) lähettämä viitesignaali, jolla gNB saa tarvittavaa tietoa UE:n ja gNB:n välisen kanavan tilasta ja ominaisuuksista. SRS-pohjainen keilanmuodostus painottuu tarkkojen kanavan tilatietojen eli CSI:n (engl. Channel State

Information) arviointiin. CSI sisältää tietoa esimerkiksi signaalin vaiheesta ja amplitudista. Käytännössä UE lähettää näitä SRS-signaaleja gNB:lle säännöllisesti. Tukiasema arvioi ja laskee keilanmuodostuksessa tarvittavat painotukset CSI:stä, jonka perusteella pyritään maksimoimaan vastaanotetun signaalin voimakkuutta UE:n päässä sekä minimoidaan ulkopuolista häiriötä. Tällä tavoin signaalin laatua pystytään parantamaan huomattavasti, otetaan huomioon muuttuvat kanavaolosuhteet ja spektritehokkuus paranee. (Telecom Trainer 2.1.2024.)

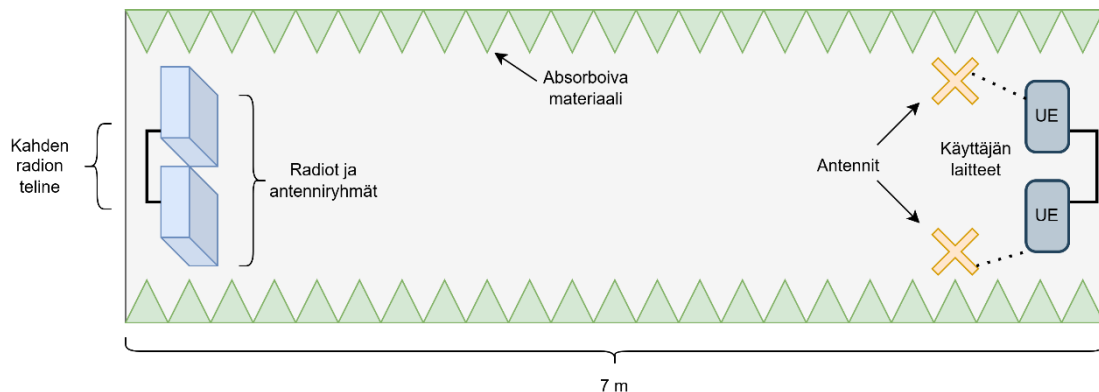
SSB-keilanmuodostuksessa käytetään aiemmin esiteltyä SSB-rakennetta ja toimintaa. Se soveltuu erityisesti FR2-taajuusalueelle. Käytännössä gNB lähettää useita SSB-keiloja eri suuntiin, joita UE:t voivat havainnoida ja valita parhaan mahdollisen signaalin. Keilojen leveydet riippuvat taajuusalueesta. FR2-alueella keilat ovat tyypillisesti kapeampia ja suunnattuja, sillä korkeammilla taajuuksilla signaalin vaimennus on suurempaa. SSB-keilanmuodostuksesta vielä edistyneempänä tekniikkana voidaan pitää tarkennettua keilanmuodostusta (engl. SSB with refined beams), jossa UE:n valitsema keila tarkennetaan ennestään kapeammaksi ja kohdennetummaksi säteilykuvioksi. (Telecom Trainer 11.12.2023.)

### 3 TESTIYMPÄRISTÖ

Tässä luvussa kerrotaan testiympäristöistä, joihin työn toteutus kohdistetaan. Ympäristön mittakaavoja, rakenteita ja laitteistoa käsitellään työn tarkkuuden vaatimalla tavalla. Luku pyrkii kertomaan rakenteellisesti olennaisimmat asiat sekä työn mahdollistaman kahden radion telineen rakenteen. Lisäksi käsitellään työssä käytettävät radioyksiköt ja antennit.

#### 3.1 OTA RF -kammio

Työssä käytettävät testiympäristöt ovat jo aiemmin hankittuja Orbis Systemsin OTA RF -kammioita. Tässä työssä ympäristöjä muokataan soveltuviksi kahdelle radiolle, sillä aiemmin niitä on käytetty vain yhden radioyksikön integrointiin. Kammiot ovat 7 metriä pitkiä ja ne on rakennutettu merikonttien sisälle. Konttien sisäseinät on eristetty absorboivalla materiaalilla, joka eristää radiotaajuisen säteilyn vuotamisen kontin ulkopuolelle sekä poistaa kaikua. (Orbis Systems Oy 3.12.2020.) Kontin sisällä telineet ja laitteisto on sijoitettu omille paikoillensa kuten kuvassa 9.



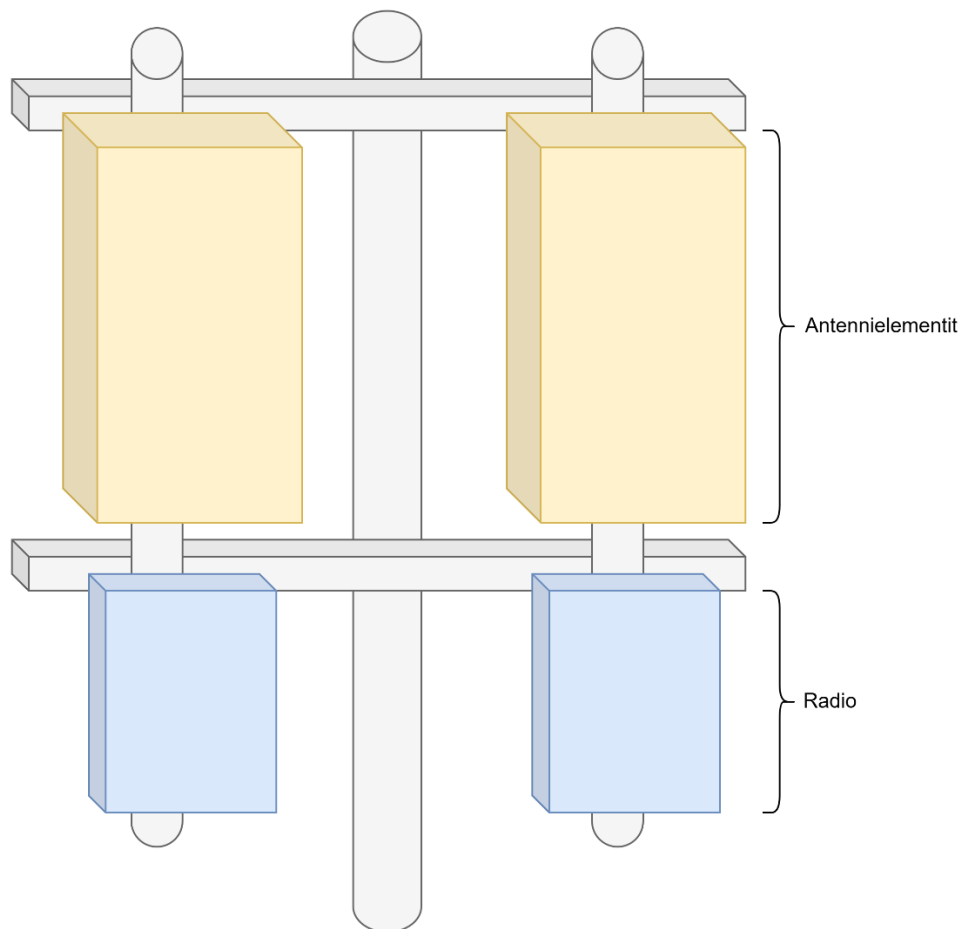
KUVA 9. Testiympäristön pohjapiirros.

Sen toisessa päässä eli lähetyspäässä sijaitsee kahden radion teline, johon on kiinnitetty käytetyt radioyksiköt sekä mahdolliset ulkoiset antennielementit. Tähän päähän myös voidaan kiinnittää mahdolliset radioiden säätimet, joilla radion asentoa voidaan säätää haluttuun kulmaan pysty- ja vaakasuunnassa. Toinen pääty kontista eli niin sanottu vastaanottopää sisältää UE:t, niiden antennit sekä

yhden UE-telineen, jolla voidaan tarvittaessa myös säätää UE:ta haluttuun suuntaan.

### 3.2 Kahden radion teline

Yhdelle radiolle suunnitellun ympäristön muokkaaminen kahdelle radiolle sopivaksi vaatii uudenlaisen telineen. Kontin toisessa päässä on pyöriteltävä tolppa, johon uusi teline saadaan kiinnitettyä. Se koostuu kevytmetallisista putkista sekä kiinnittimistä, joilla saadaan muodostettua neliömäinen teline (kuva 10). Poikittaisten putkien hahloihin asennetaan kiinnittimet, joilla ne kiinnitetään kontin tolppaan. Pystyputket asennetaan kiinnittimillä molemmista päistä poikittaisiin putkiin. Tämän ratkaisun avulla saadaan sivutolppiin radiot sekä mahdolliset ulkoiset antennielementit. Radioiden säätimet voidaan myös tarvittaessa kiinnittää pystyputkiin.



KUVA 10. Esimerkki kahden radion telineen asettelusta.

### 3.3 Radiot

Molempiin työssä käytettäviin kontteihin asennetaan kaksi radiota. Toisessa kontissa on käytössä 5G NR -radiot, jotka tukevat mMIMO-tekniikkaa ja niissä on integroidut antenniryhmät itsessään. Toisessa kontissa on vanhemmat MIMO-radiot, joihin asennetaan ulkoiset antennielementit säteilijöiksi. Radioiden olennaisimmat ominaisuudet on esitetty oheisessa taulukossa 6.

*TAULUKKO 6. Kontteihin käyttöön tulevat radiot ja niiden ominaisuudet. (MIND 2025.)*

Ra- dioyksikkö	Taajuus- kaista(t)	Taajuusalue(et)	TRXien määrä	Dup- lex	Tehot
Radio 1	n2  n25  n66	1 850–1 910 MHz, 1 930–1 990 MHz  1 850–1 915 MHz, 1 930–1 995 MHz  1 710–1 780 MHz, 2 110–2 200 MHz	4TX4RX	FDD	30–46 dBm
Radio 2	n2  n25  n66	1 850–1 910 MHz, 1 930–1 990 MHz  1 850–1 915 MHz, 1 930–1 995 MHz  1 710–1 780 MHz, 2 110–2 200 MHz	4TX4RX	FDD	39–49 dBm
Radio 3	n78	3 300–3 800 MHz	32TX32RX	TDD	23–34 dBm
Radio 4	n78	3 300–3 800 MHz	64TX64RX	TDD	23–35 dBm

### 3.4 Antennit

Radiot 1 ja 2 vaativat antennit ulkoisiksi säteilijöiksi. Käyttöön otetaan kaksi Amphenol Antennasin valmistamaa antennia, joiden taajuusalueet ovat radioille sopivat sekä ne kokonsa puolesta mahtuvat konttiin. Antennit kytketään niihin sovitetuilla kaapeleilla radioille porteista Y1, Y2, Y3 ja Y4.

12-porttinen paneeliantenni:

- Ristipolarisaatio
- Mitat 2 750 x 469 x 205 mm
- 4 x 4 MIMO tuettu
- Neljällä portilla kaksi ristipolarisaatiota taajuusalueella 690–960 MHz
- Kahdeksalla portilla neljä ristipolarisaatiota taajuusalueella 1 695–2 690 MHz
- Säteilykuvion leveys vaakatasossa 65 astetta
- Sähköinen vaiheensäätö 2–12 astetta

(APXVBB4L26H2\_43-C-I20 8.7.2024.)

## 4 TESTIYMPÄRISTÖN VERIFIOINTI

Testiympäristöjen käyttöönottoa varten työssä tehdään erilaisia testauksia. Tässä luvussa käsitellään testaussuunnitelmaa, jonka perusteella pystytään varmistamaan kahden radion toimivuus testiympäristössä ja kartoittamaan sen heikkoudet. Testaussuunnitelman tarkoitus on saada testauksesta suunnitelmallista ja tarpeenmukaista. Sitä käyttämällä varmistetaan, että kaikki tehtävät testit tehdään jokaisessa ympäristössä samalla tavalla, jolloin niitä voidaan pitää verrannollisina keskenään.

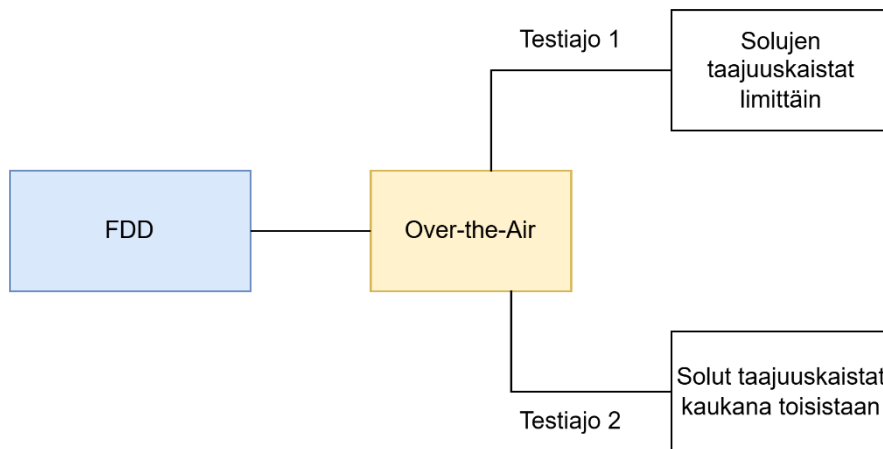
Testaussuunnitelman valmistuttua otetaan ensimmäisenä referenssitestaukset molemmista testiympäristöistä yhdellä radiolla. Nämä kertovat ympäristön kapasiteetista ja määrittelevät laadun, johon myös kahden radion kanssa pyritään tähtäämään. Referenssitestauksen jälkeen voidaan siirtyä testiympäristöjen verifiointitestauksiin, joista saadaan lopulliset toimivuudesta indikoivat tulokset.

### 4.1 Testaussuunnitelma

Testaussuunnitelma on toteutettu toimeksiantajan toiveiden mukaan ja lopuksi saatavien tulosten perusteella tiedetään, toimiiko kahden radion testiympäristö ja mitkä sen mahdolliset heikkoudet ovat. Tavoitteena oli muodostaa selkeä suunnitelma, jota voidaan soveltaa jokaiseen ympäristöön, jolloin tulokset olisivat verrannollisia keskenään. Suunnitelman laatimista kuitenkin haastaa myös erilaisten ympäristöjen monimuotoisuus, joten testaussuunnitelmat piti rakentaa Duplex-tekniikasta riippuvaiseksi.

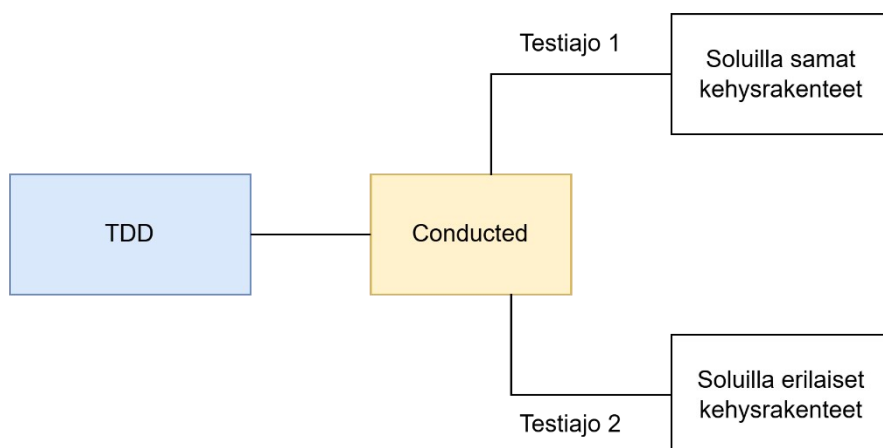
FDD-tekniikalle soveltuvat ympäristöt hyödyntävät kuvassa 11 esiteltyä testaussuunnitelmaa. Tällainen ympäristö vaatii kaksi erilaista testiajoa. Testit tullaan toteuttamaan OTA:na eli tiedonsiirto tapahtuu ilmarajapintaa pitkin, joka on integraatiryhmälle ominainen tapa testata. Samat testiajot voitaisiin tarvittaessa tehdä myös CON-tilassa (engl. Conducted) eli käyttäjän laitteet olisivat kaapeloituina ulkoisille antennille. Molempien radioiden konfiguroinnit ovat suhteellisen toistensa kaltaiset ja molemmille konfiguroidaan omat solut, jolloin kontissa on kaksi solua. Näiden solujen taajuuskaistat asetellaan käytetylle taajuuskaistalle

ensiksi mahdollisimman limittäin ja toisessa ajossa mahdollisimman kauaksi toisistaan. Tällä voidaan havainnoida, häiritsevätkö taajuudet toisiaan.



KUVA 11. FDD-tekniikan testiajot, kun käyttäjän laitteet ovat OTA-tilassa.

TDD-tekniikalle tarvitaan erilaisia testejä (kuva 12), sillä se on jo sen aiemmin esitellyn kehysrakenteen vuoksi kompleksisempi. Lisäksi TDD hyödyntää myös keilanmuodostusta. Myös TDD:n tapauksessa molemmille radioille on konfiguroitu omat solut. Ensimmäisissä testeissä nämä solut konfiguroidaan hyödyntämään keskenään samanlaisia kehysrakenteita. Toisissa testiajoissa ne puolestaan suunnitellaan hyödyntämään erilaisia kehysrakenteita eli niiden DL- ja UL-lähetysten ajoitukset ovat erilaiset. Tällöin DL- ja UL-lähetykset eivät liiku identtisesti solujen taajuuskaistoilla, vaan DL- ja UL-aikavälien järjestykset kehysrakenteissa eroavat.



KUVA 12. TDD-tekniikan testiajot, kun käyttäjän laitteet ovat kaapeloituna.

## 4.2 Tulosten mittaus

Testiympäristöjen tulokset saadaan testiajojen myötä erilaisina arvoina. Tässä alaluvussa käsitellään ympäristöjen kannalta tärkeimmät parametrien arvot, joiden pohjalta voidaan tulkita, onko kahden radion ympäristö yhtä tehokas ja laadukas ratkaisu kuin yhden radion. Arvot saadaan kerättyä erilaista lokitiedostoista ja työkaluista, joita voidaan seurata reaaliajassa datansiirron aikana.

Yleisesti tiedonsiirtonopeutta tukiaseman ja UE:n välillä voidaan tarkastella megabitteinä per sekunti eli Mbps. Se kuvastaa datan lataus- ja lähetysnopeuksia. (Pensworth 7.3.2020.) Tavoitteena on saada tiedonsiirtonopeus lähelle teoreettista maksiminopeutta. Tuloksen eli teoreettisen maksimi tiedonsiirtonopeuden määrittelee toimeksiantajan sisäinen työkalu, joka kykenee laskemaan annetun konfiguraatitiedoston perusteella maksimitulokset UL- ja DL-kaistoille.

Yleistä häiriötä tuloksissa kuvaa lohkovirhesuhde eli BLER. Se kuvastaa virheelisten tietolohkojen osuutta lähetyksessä. Siihen vaikuttaa myös ympäristön tekijät sekä erityisesti muut säteilevät laitteet, joista voi aiheutua häiriötä lähetykselle. Tavoitteena on saada BLER lähes nolnaan eli minimoida lähetyksen häiriötekijät. Yleensä BLERin määrä korreloi suoraan huonojen testitulosten kanssa, sillä se vaikuttaa lähetyksien tuloksiin ja on linjassa muiden mahdollisesti huonojen arvojen kanssa. Sitä voidaan säädellä tehojen muuttamisella sekä laitteiden säädöillä ympäristön häiriöiden minimoimisen rinnalla. (Kalyani 6.12.2021.)

Modulaatio- ja koodausindeksi (MCS) puolestaan on tärkeä mittari datansiirrossa, sillä se määrittelee bittien lähetysmäärän symbolissa. Sen suuruus on riipuvainen yhteyden laadusta ja BLERin määrästä. Testiympäristössä tavoitellaan ihannetulosta MCS 27 sekä 256 QAM-arvoa, jolloin on mahdollista lähettää maksimaalinen määrä bittejä symbolia kohden. (5G Networks 16.11.2020.) Lisäksi lähetyksen tuloksista on merkittävää seurata datan lähetyksen "Rank"-arvoja. Ne ilmaisevat, kuinka montaa tiedonsiirtopolkua systeemi käyttää tiedonsiirtoon, ja esimerkiksi kahden tiedonsiirtopolun kapasiteetti on kaksi kertaa suurempi kuin vain yhden tiedonsiirtopolun. Ympäristön maksimaalisten tuloksien saamiseksi tulisi DL-datan kulkea neljässä kerroksessa ja UL-datan kahdessa kerroksessa. CQI taas kuvaa kanavan laatua tietyllä ajanhetkellä. Sen tarkoituksena on kertoa

kanavan laadusta, mutta sen arvo myös ohjaa tiedonsiirtonopeutta. Mitä korkeampi CQI-arvo on, sitä parempi modulaatio ja koodausnopeus on mahdollista ottaa käyttöön. (ShareTechnote s. a. d.) Kyseisissä testiajoissa tähdätään korkeimpaan teoreettiseen arvoon, joka on näissä tapauksissa 15.

Erilaiset tehoarvot kertovat yhteyden voimakkuudesta ja datansiirron laadusta. UL-tehoarvona katsotaan RSRP:tä (engl. Reference Signal Received Power), joka kertoo vastaanotetun referenssisignaalin voimakkuudesta, jonka perusteella tullaan määrittelemään datansiirtonopeutta. Erinomaisena RSRP-arvona voidaan pitää -89 dBm tai sitä suurempaa arvoa. DL-tehoja katsotaan RSSI-arvosta, joka kertoo kokonaisvoimakkuudesta sisältäen signaalin ja häiriöt. Erinomaisena arvona voidaan pitää -65 dBm tai sitä suurempaa arvoa. Tehoja tarkastellessa merkittävästi pienemmät tehoarvot voivat kertoa signaalin tehottomuudesta, kun taas liian suuret arvot liian kovista tehoista. Lisäksi molempien SINR-arvot eli signaali-häiriö-kohinasuhteet kertovat signaalien tehojen suhteista häiriöiden ja kohinan summaan. (RF Wireless World, s. a. d.; Telecom Trainer 28.12.2023.) Näissä testitapauksissa ihanteellinen SINR-arvo on 27 dBm tai enemmän.

### **4.3 Testiympäristön 1 referenssitestaus**

Referenssitestaukset ajetaan ympäristössä molemmille radioille 1 ja 2 käyttäen vain yhtä radiota. Testiympäristössä 1 käytetään FDD-tekniikkaa hyödyntäviä radioita. Referenssitestauksia varten on useamman viikon konfigurointivaihe, sillä kummallekin testilinjalle tulee rakentaa oma konfiguraatio. Näissä tiedostoissa määritellään erilaisten parametrien arvoja, jotka määrittelevät datan siirron ja ympäristön ominaisuuksia sekä sitä, millaisia tekniikoita hyödynnetään. Lopulta onnistuneen konfiguroinnin myötä tukiasema on toiminnassa ja testaukset voidaan aloittaa.

Radiolle 1 tehdyssä konfiguraatiossa huomioidaan aiemmin taulukossa 6 esitellyt ominaisuudet. Samassa konfiguraatiossa luotiin Solu-29, joka määriteltiin sijaitsemaan taajuuskaistan 66 sisälle. FDD-tekniikan mukaisesti UL- ja DL-siirrot tapahtuvat omilla kaistoillaan ja sijainteja kaistoilla kuvaa omat 5G NR ARFCN -arvot, jotka voidaan laskea halutuista taajuuksista yleisesti internetistä löytyvillä laskimilla. Referenssiajossa UL:n keskitaajuudeksi määriteltiin 1 720 MHz, jolloin

ARFCN on 344 000 ja DL:n keskitaajuudeksi 2 130 MHz, jolloin ARFCN on 426 000. (5G-tools 2025b.) Kun kaistanleveys on 20 MHz, sijaitsee Solu-29 kaistalla taajuuksissa 1 710–1 730 MHz ja 2 120–2 140 MHz. Solu on tyypiltään 4DL2UL, joka tarkoittaa sen käyttävän neljää DL-kerrosta ja kahta UL-kerrosta datansiirrossa. Konfigurointi on suunniteltu hyödyntämään täysin 5G-teknologiaa eli se on SA ja siinä on käytössä paikallinen multipleksointi. Lisäksi maksimitehoarvoksi radiolle on annettu 42 dBm. Kyseisellä konfiguraatiolla ja radiolla saadut tulokset ovat taulukossa 7, sarakkeessa ”Radio 1, Solu-29”.

Radiolle 2 tehdään pitkälti samat määrittelyt ja sille konfiguroidaan Solu-13, jotta myöhemmin yhtäaikaisissa testeissä on helpompi identifioida tulokset jommallekummalle solu-ID:lle. Solu-13 sijoittuu myös taajuuskaistalle 66, jolloin sen UL:n keskitaajuudeksi määriteltiin 1 745 MHz, jolloin ARFCN on 349 000, ja DL:n keskitaajuudeksi 2 155 MHz, jolloin ARFCN on 431 000. (5G-tools 2025b.) Kun kaistanleveys on 20 MHz, sijaitsee Solu-29 kaistalla taajuuksissa 1 735–1 755 MHz ja 2 145–2 165 MHz. Radion konfiguraatiossa toiseen verrattuna ainoa ero on tehomaksimi, joka on 40 dBm. Tehdyllä konfiguraatiolla saadut tulokset ovat taulukossa 7, sarakkeessa ”Radio 2, Solu-13”.

Molemmissa referenssiajoissa radioilla on omat UE:t, joiden kanssa radiot kommunikoivat ja näille on myöskin annettu arvoja sekä määrittelyjä. Ne on asetettu tukemaan taajuuskaistaa 66 ja tukemaan vain 5G NR -konfiguraatiota. Tarvittaessa UE:lle voidaan myös antaa Solu-ID:n ARFCN-keskiarvo, jolloin se voidaan lukita haluttuun soluun eikä se yritä muodostaa yhteyttä toiseen soluun. Referenssitestauksissa ei kuitenkaan solulukoille ole tarvetta, sillä referenssitestauksessa on ympäristön toinen radio pois päältä. Tämä tarkoittaa, että vain toinen solu on toiminnassa, jottei referenssitestauksen tuloksiin tule mukaan häiriötä. Valmiit konfiguraatiot annetaan sisäiselle työkalulle, joka laskee tuloksille teoreettiset maksimit. Radion 1, Solu-29:n DL-arvo on 407,4 Mbps ja UL-arvo 219,7 Mbps. Radion 2, Solu-13:n teoreettiset arvot ovat samat DL:lle ja UL:lle. (NR Dimensioning Tool 2025.)

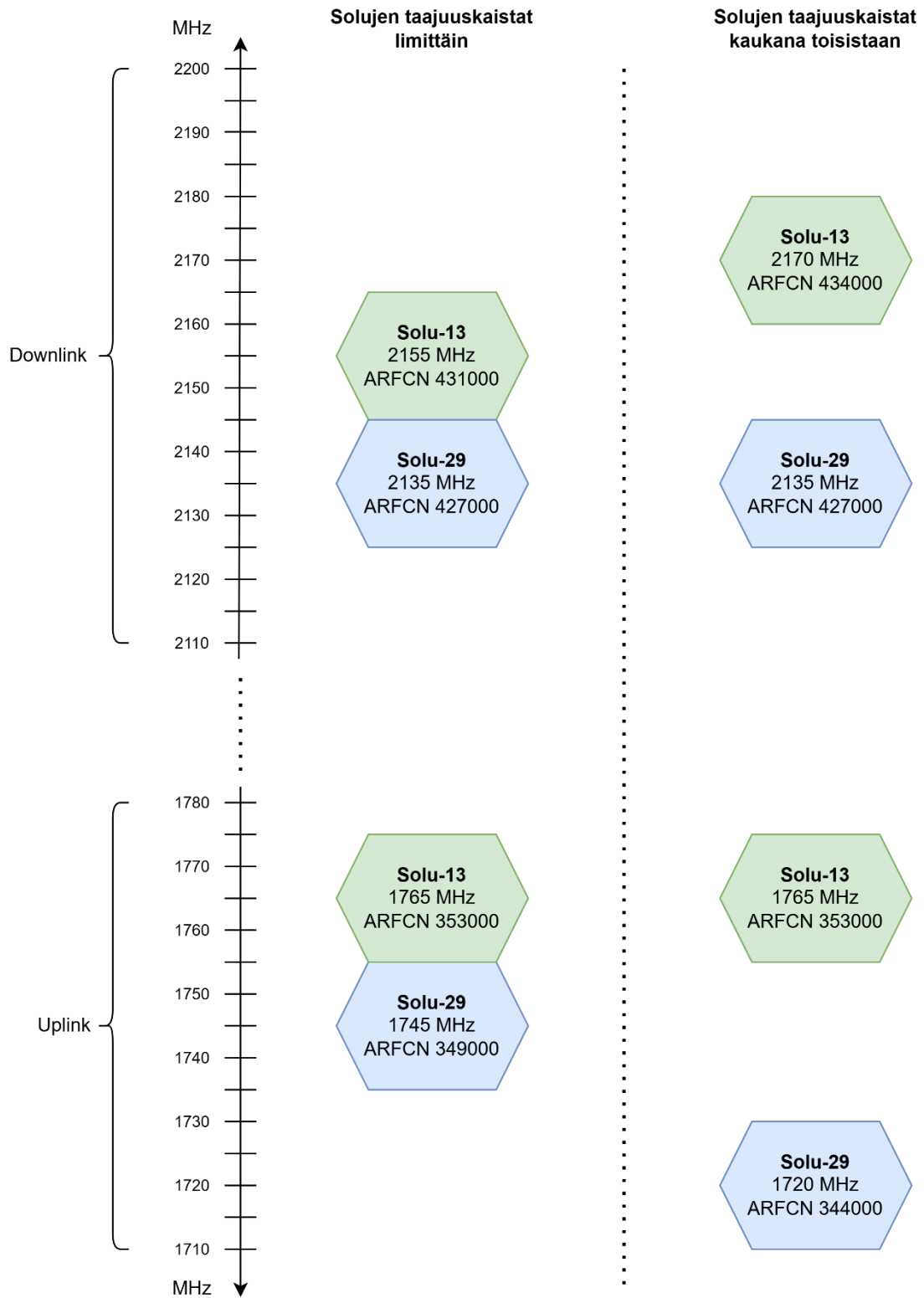
TAULUKKO 7. Testiympäristön 1 referenssitestaukset yhdellä radiolla kerrallaan käyttäjän laitteiden ollessa OTA-tilassa.

<b>Duplex-tekniikka</b>	<i>FDD</i>	
<b>UE Mode</b>	<i>OVER-THE-AIR</i>	
<b>Radio</b>	<i>Radio 1</i>	<i>Radio 2</i>
<b>Solu ID</b>	<i>Solu-29</i>	<i>Solu-13</i>
<b>Tput DL/UL</b>	397 Mbps / 217 Mbps	393 Mbps / 217 Mbps
<b>BLER DL/UL</b>	0,19 % / 0,57 %	0,23 % / 0,02 %
<b>MCS DL/UL</b>	256 QAM/27 / 256QAM/27	256 QAM/27 / 256 QAM/27
<b>Rank DL/UL</b>	4 / 2	4 / 2
<b>CQI</b>	15	15
<b>Tehot DL/UL</b>	-57 dBm / -81,2 dBm	-59 dBm / -81,3 dBm
<b>SINR DL/UL</b>	31 dBm / 32,2 dBm	29 dBm / 30,3 dBm

#### 4.4 Testiympäristön 1 verifiointitestaus

Referenssitestauksen jälkeen voidaan siirtyä tekemään verifiointitestaukset. Verifiointitestauksissa molempien radioiden sekä niiden solujen tulee olla yhtä aikaa toiminnassa. Verifiointitestauksissa testiajot vaikuttavat merkittävästi konfiguroinnin suunnitteluun.

Ensimmäisessä testiajossa solujen taajuuskaistojen tulisi olla mahdollisimman lähellä ja limittäin. Käytännössä tämä voidaan toteuttaa niin, että UL:n keskitaajuudet ovat Solu-29:lle 1 745 MHz ja Solu-13:lle 1 765 MHz. DL:n keskitaajuudet ovat puolestaan Solu-29:lle 2 135 MHz ja Solu-13:lle 2 155 MHz. Tällöin ARFCN-arvot ovat pienimmästä suurimpaan: 349 000, 353 000, 427 000 ja 431 000. (5G-tools 2025b.) Asettelu on ilmennetty kuvassa 13.



KUVA 13. Solujen UL- ja DL-kaistojen asettelu taajuuskaistalla 66. Solujen taajuuskaistat limittäin vs. solujen taajuuskaistat kaukana toisistaan.

Tällä toteutuksella UL-kaistat ovat taajuusalueella 66 määritellyn UL-taajuusalueen yläreunassa vierekkäin. Myöskin DL-kaistat ovat puolestaan DL-taajuusalueella vierekkäin, mutta mahdollisimman matalilla taajuuksilla, jolloin myös UL- ja DL-kaistat ovat suhteellisen lähellä toisiinsa. Tällaisella asetelulla voidaan odottaa mahdollisten solujen välisten häiriöiden näkyvän. Referenssitestauksiin tehdyt konfiguroinnit eivät vaadi muita muutoksia siirryttäessä verifointitesteihin. Ensimmäisen testiajon tulokset ovat taulukossa 8, otsikon ”Solujen taajuuskaistat limittäin” alla. Testitulokset on kerätty samalta ajanhetkeltä, kun molemmilla radioilla on yhtä aikaa datansiirrot käynnissä

Testiajossa kaksi halutaan taajuuskaistojen olevan mahdollisimman kaukana toisistaan, jolla puolestaan voidaan minimoida mahdollinen toisista kaistoista tuleva häiriö. UL:n keskitaajuudet ovat Solu-29:lle 1 720 MHz ja Solu-13:lle 1 765 MHz. DL:n keskitaajuudet ovat puolestaan Solu-29:lle 2 135 MHz ja Solu-13:lle 2 170 MHz. Tällöin ARFCN-arvot ovat pienimmästä suurimpaan: 344 000, 353 000, 427 000 ja 434 000, kuten kuvassa 13. (5G-tools 2025b.) Toisen testiajon tulokset ovat taulukossa 8, otsikon ”Solujen taajuuskaistat kaukana toisistaan” alla. Testitulokset on kerätty samalta ajanhetkeltä, kun molemmilla radioilla on yhtä aikaa datansiirrot käynnissä.

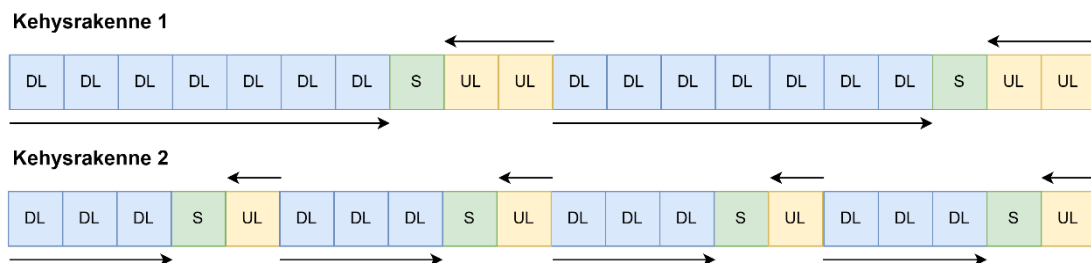
TAULUKKO 8. Testiympäristön 1 verifiointitestaus kahdella radiolla käyttäjän laitteiden ollessa OTA-tilassa.

<b>Duplex- tekniikka</b>	<i>FDD</i>			
<b>UE Mode</b>	<i>OVER-THE-AIR</i>			
<b>Testiajo</b>	<i>Solujen taajuuskaistat limittäin</i>		<i>Solujen taajuuskaistat kaukana toisistaan</i>	
<b>Radio</b>	<i>Radio 1</i>	<i>Radio 2</i>	<i>Radio 1</i>	<i>Radio 2</i>
<b>Solu ID</b>	<i>Solu-29</i>	<i>Solu-13</i>	<i>Solu-29</i>	<i>Solu-13</i>
<b>Tput DL/UL</b>	395 Mbps / 217 Mbps	396 Mbps / 219 Mbps	393 Mbps / 219 Mbps	397 Mbps / 219 Mbps
<b>BLER DL/UL</b>	0,19 % / 0,69 %	0,0 % / 0,03 %	1,0 % / 0,17 %	0,0 % / 0,01 %
<b>MCS</b>	256QAM/27 / 256QAM/27	256QAM/27 / 256QAM/27	256QAM/27 / 256QAM/27	256QAM/27 / 256QAM/27
<b>Rank</b>	4 / 2	4 / 2	4 / 2	4 / 2
<b>CQI</b>	15	15	15	15
<b>Tehot DL/UL</b>	-64 dBm / -80,4 dBm	-57 dBm / -81,2 dBm	-57 dBm / -76,8 dBm	-60 dBm / -78,7 dBm
<b>SINR DL/UL</b>	26 dBm / 32,7 dBm	28 dBm / 29,7 dBm	30 dBm / 30,3 dBm	29 dBm / 34,9 dBm

## 4.5 Testiympäristön 2 referenssitestaus

Referenssitestaukset ajetaan ympäristössä molemmille radioille 3 ja 4. Testauksissa käytettävät linjat ovat olleet jo valmiiksi rakennettuja ja käytössä, jonka johdosta niiden rakenteet ja konfiguraatiot ovat hieman erilaiset. Radio 3 toimii NSA-tilassa, jolloin sen ankkurina toimii toinen 4G LTE -radio. Radio 4 puolestaan on SA-tilassa. Testiympäristössä 2 käytetään TDD-tekniikkaa hyödyntäviä radioita. Radioiden tarkemmat tekniset tiedot on esitelty taulukossa 6. Radiolta 4 otetaan kahdet referenssitestaukset, sillä testiajoissa se hyödyntää kahta erilaista kehysrakennetta. Eriävät kehysrakenteet samalla radiolla vaikuttavat teoreettisiin maksimituloksiin, jolloin eri testiajoissa on merkittävä tietää referenssit jokaiselta erilaiselta kehysrakenteelta.

Radion 3 konfiguraatiossa luodaan Solu-1, joka määritellään sijaitsemaan taajuuskaistan 78 sisällä. Datansiirrot tulevat tapahtumaan samalla kaistalla eri ajanhetkillä, jonka leveys on 100 MHz, keskitäajuus 3 650,010 MHz ja ARFCN 643 334. (5G-tools 2025b.) Solu-1 on tyypiltään 4DL2UL, jolloin sen on mahdollista käyttää neljää DL-kerrosta ja kahta UL-kerrosta datansiirrossa. Tässä tapauksessa kuitenkin se käyttää vain yhtä kerrosta UL-siirrossa, sillä NSA-tilassa vain yksi UL-kerros on tuettu. Radio 3 on määritelty jokaisessa testiajossa hyödyntämään kehysrakennetta 1, joka on esitelty kuvassa 14. Ympäristössä on käytössä paikallinen multipleksointi ja keilanmuodostus on aktivoitu. Lisäksi maksimitehoarvoksi radiolle on annettu 26 dBm. Radiolta 3 saadut tulokset ovat taulukossa 9, sarakkeessa "Radio 3, Solu-1".



KUVA 14. Testattavien kehysrakenteiden 1 ja 2 välinen rakenteellinen ero datansiirrossa aikavälitasolla, jossa S havainnollistaa erikoisaikavälejä.

Radio 4:lle tehdään testiajoja varten kaksi erilaista konfiguraatiota. Toisessa määritellään käytettäväksi kehysrakenteeksi 1 ja toisessa 2. Konfiguraatiot ovat muuten samanlaiset keskenään. Määritellään Solu-114 sijaitsemaan taajuuskais-tan 78 sisälle, kaistanleveydeksi 100 MHz, keskitaajuudeksi 3 549,990 MHz ja sen perusteella ARFCN-arvoksi tulee 636 666. (5G-tools 2025b.) Solu-114 on tyypiltään 4DL2UL ja SA-tilassa data liikkuu neljässä DL-kerroksessa ja kahdessa UL-kerroksessa. Ympäristössä on käytössä paikallinen multipleksointi ja keilanmuodostus on aktivoitu. Radion maksimi tehoarvoksi on annettu 31 dBm. Radiolta 4 saadut tulokset ovat taulukossa 9, sarakkeissa "Kehysrakenne 1, Ra-dio 4" ja "Kehysrakenne 2, Radio 4".

Sisäinen työkalu määrittelee radion 3, Solu-1:lle teoreettisiksi maksimeiksi DL:lle 1 379 Mbps ja UL:lle 84,6 Mbps. Radion 4, Solu-114:n ensimmäinen konfiguraa-tio, jossa on käytössä kehysrakenne 1, saa arvoiksi DL:lle 1 398 Mbps ja UL:lle 169,2 Mbps. Kehysrakenteella 2 se saa arvoiksi DL:lle 1 430 Mbps ja UL:lle 169,2 Mbps. (NR Dimensioning Tool 2025.) Testaukset suoritetaan käyttäjän laitteiden ollessa kaapeloituina.

TAULUKKO 9. Testiympäristön 2 referenssitestaus yhdellä radiolla käyttäjän laitteiden ollessa kaapeloituna.

<b>Duplex- tekniikka</b>	<i>TDD</i>		
<b>UE Mode</b>	<i>CONDUCTED</i>		
<b>Referenssi</b>	<i>Kehysrakenne 1</i>		<i>Kehysrakenne 2</i>
<b>Radio</b>	<i>Radio 3</i>	<i>Radio 4</i>	<i>Radio 4</i>
<b>Solu ID</b>	<i>Solu-1</i>	<i>Solu-114</i>	<i>Solu-114</i>
<b>Tput DL/UL</b>	1 298 Mbps / 84,4 Mbps	1 299 Mbps / 169,2 Mbps	1 301 Mbps / 169,2 Mbps
<b>BLER DL/UL</b>	0,7 % / 0,0 %	2,1 % / 0,0 %	4,4 % / 0,0 %
<b>MCS DL/UL</b>	256 QAM/27 / 256 QAM/27	256 QAM/27 / 256 QAM/27	256 QAM/27 / 256 QAM/27
<b>Rank DL/UL</b>	4 / 1	4 / 2	4 / 2
<b>CQI</b>	15	14	14
<b>Tehot DL/UL</b>	-57 dBm / -81,2 dBm	-65 dBm / -85,4 dBm	-65 dBm / -83,7 dBm
<b>SINR DL/UL</b>	31 dBm / 31,3 dBm	26 dBm / 28,3 dBm	31 dBm / 29,4 dBm

#### 4.6 Testiympäristön 2 verifiointitestaus

Verifiointitestauksien tarkoituksena on selvittää, vaikuttavatko erilaiset kehysrakenteet yhtäaikaissa datansiirroissa. Testiajossa ”Soluilla samat kehysrakenteet”, ovat molemmat radiot konfiguroitu hyödyntämään kehysrakennetta 1. Toisessa testiajossa ”Soluilla erilaiset kehysrakenteet”, on puolestaan radio 3

konfiguroitu hyödyntämään kehysrakennetta 1 ja radio 4 kehysrakennetta 2. Verifiointitestauksen tulokset ovat taulukossa 10.

*TAULUKKO 10. Testiympäristön 2 verifiointitestausta kahdella radiolla käyttäjän laitteiden ollessa kaapeloituna.*

<b>Duplex-tekniikka</b>	<i>TDD</i>			
<b>UE Mode</b>	<i>CONDUCTED</i>			
<b>BF-tekniikka</b>	<i>SSB BF</i>			
<b>Testiajo</b>	<i>Soluilla samat kehysrakenteet</i>		<i>Soluilla erilaiset kehysrakenteet</i>	
<b>Radio</b>	<i>Radio 3</i>	<i>Radio 4</i>	<i>Radio 3</i>	<i>Radio 4</i>
<b>Solu ID</b>	<i>Solu-1</i>	<i>Solu-114</i>	<i>Solu-1</i>	<i>Solu-114</i>
<b>Tput DL/UL</b>	<i>1 298 Mbps / 84,6 Mbps</i>	<i>1 297 Mbps / 169,2 Mbps</i>	<i>239,2 Mbps / 46,16 Mbps</i>	<i>1 231 Mbps / 85,7 Mbps</i>
<b>BLER DL/UL</b>	<i>0,4 % / 0,0 %</i>	<i>3,9 % / 0,0 %</i>	<i>29,1 % / 9,1 %</i>	<i>12,5 % / 9,2 %</i>
<b>MCS DL/UL</b>	<i>256 QAM/27 / 256QAM/27</i>	<i>256 QAM/27 / 256 QAM/27</i>	<i>256 QAM/27 / 64 QAM/16,7</i>	<i>256 QAM/26,7 / 64 QAM/15,6</i>
<b>Rank DL/UL</b>	<i>4 / 1</i>	<i>4 / 2</i>	<i>1 / 1</i>	<i>4 / 2</i>
<b>CQI</b>	<i>15</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>14</i>
<b>Tehot DL/UL</b>	<i>-57 dBm / -80,9 dBm</i>	<i>-65 dBm / -85,3 dBm</i>	<i>-56 dBm / -81,2 dBm</i>	<i>-65 dBm / -82,3 dBm</i>
<b>SINR DL/UL</b>	<i>31 dBm / 31,4 dBm</i>	<i>26 dBm / 28,6 dBm</i>	<i>31 dBm / 25,6 dBm</i>	<i>26 dBm / 22,9 dBm</i>

## 5 TULOKSET

Työn viimeinen luku käsittelee edellisessä luvussa 4 saatuja testituloksia. Ensiksi käsitellään testiympäristöstä 1 saadut tulokset omana kokonaisuutenaan, jonka jälkeen siirrytään testiympäristöön 2. Järjestys on lopputuleman kannalta merkittävä, sillä FDD-ympäristön testit suoritettiin ensin. Tehtyjen testien ja huomioiden pohjalta myös testaussuunnitelmaa vielä päädyttiin muokkaamaan ennen siirtymistä toiseen ympäristöön, jotta TDD-ympäristön testauksessa ei törmättäisi samoihin ongelmiin.

### 5.1 FDD-tekniikkaa hyödyntävä ympäristö

Testiympäristöön 1 päädyttiin valitsemaan kaksi FDD-tekniikalla toimivaa radiota. Tämän tyylistä ympäristöä ei ollut aiemmin toteutettu. Jo suunnitteluvaiheessa ilmeni ensimmäisiä rakentamiseen liittyviä haasteita, jotka johtuivat pääasiassa siitä, ettei ympäristöjä ole suunniteltu kuin yhdelle radiolle ja UE:lle sopiviksi. Kun radiot oli valikoitu, etsittiin niiden kanssa sopivat antennit. Lisäksi ympäristön virransyöttöä piti säätää ja hankkia AC/DC-muunnin toiselle radiolle, jotta molemmat radiot saatiin omien sulakkeiden taakse. Rakennelmasta kokonaisuutena tuli kokonsa kannalta hyvin epäkäytännöllinen. Oli selvää, että vikatilanteessa ei mitään pääsisi helposti korjaamaan, vaan osa rakennelmasta tulisi purkaa pois tieltä. Onneksi vikatilannetta ei kuitenkaan kohdattu, sillä kaiken muun korjauksen päälle olisi rakennelman kasailuun kulunut paljon aikaa.

Konfigurointivaiheessa työskentelyä auttoi hyvin tehty testaussuunnitelma sekä vanhoista ympäristöistä esimerkiksi otetut konfiguraatitiedostot, joiden perusteella pystyi suoraa arvioimaan, millaisia parametrisarvoja tulee konfiguroida. Radioiden tehojen asettelussa puolestaan auttoi ainoastaan testaaminen, jotta ne olisivat suhteessa toisiinsa tasapainossa, eikä kumpikaan kuuluisi toista lujemmin ja täten aiheuttaisi merkittävää häiriötä toiselle radiolle. Lopulta radiolle 2 asetettiin kaksi desibeliä suurempi tehojen maksimiarvo, jotta jo referensseissä päästiin suhteellisen samoihin tehotasoihin radioiden välillä. Tiedonsiirtomäärät olivat hyvät matalammillakin tehoilla, mutta todennäköisesti verifiointitestauksissa olisivat radion 2 datamäärät pudonneet huonommiksi, sillä radiolla 1 olisi

olleet kovemmat tehot ja ne olisivat saattaneet häiritä matalampitehoista radiota 2.

Solujen asettelussa pyrittiin referenssitestauksissa antamaan solujen olla suhteellisen keskellä taajuuskaistaa, sillä siinä on yleensä paras kuuluvuus. Tämä on yleisestikin tyyppillistä ja järkevintä oikeassa integroinnissa. Lisäksi tärkeä tavoite oli saada referensseihin maksimaaliset tulokset, jotta voidaan todistaa ympäristön olevan edes yhdellä radiolla toimiva ratkaisu. Taulukosta 7 nähtävät referenssitulokset ovat lähes teoreettisten maksimien tasoa, datansiirto tapahtuvat täydellä kapasiteetilla neljää DL-kerrosta ja kahta UL-kerrosta pitkin. Myös kanavan laadullinen arvo eli CQI on 15 eli ympäristön maksimi. BLER arvot ovat myös pienet. Näissä testitapauksissa BLER-arvoja katsottiin kerätystä lokitiedostosta, josta ne näki aikavälikohtaisesti sadasosan tarkkuudella. Tulosten ollessa kauttaaltaan linjassa sisäisellä työkalulla laskettujen teoreettisten maksimitulosten kanssa, voitiin todeta radioiden toimivan yksinään erinomaisesti.

Verifiointitestauksia suunnitellessa oli selkeä näkemys siitä, että halutaan nähdä, miten solujen asettelu vaikuttaa toisiinsa. On nimittäin tyyppillistä testata monen solun konfiguraatioita yhdelläkin radiolla, jolloin solujen asettelun merkitys korostuu. Solujen asettelu ei itsessään vaikuttanut testeihin. Kuitenkin konfiguroidessa DL:n sijaintia Solu-13:lle, ei se taajuuskaistan reunalla enää ollut toiminnassa. Keskitaajuus 2 170 MHz oli suurin arvo, jolla solu lopulta saatiin toimintavalmiuteen. Tätä todennäköisimmin selittää huono kuuluvuus kaistan reuna-alueilla ja suuri etäisyys UL-kaistan sijaintiin, eikä radion kyvykkyys ollut riittävä haastavampiin olosuhteisiin. Tällaisessa tapauksessa yhdellä radiolla olisi voinut koettaa radion säteilijän siirtoa eli sen kulman kääntöä, mutta kummankin radion sekä erillisten säteilevien antennielementtien ollessa kiinni samassa telineessä, olisi se tarkoittanut myös toisen radion liikuttamista. Tämä olisi puolestaan vaikuttanut toiselta solulta saataviin tuloksiin. Käytännössä tämä siis johtui jo rakentamisvaiheessa havaitusta rakennelman massiivisuudesta, eikä telineeseen oltaisi saatu mahdutettua kummallekin radioille omia säädettäviä telineitä, jotka myös olisivat vaatineet virtaa.

Lähdettäessä verifiointitestauksien ensimmäiseen testiajoon, jossa solujen taajuuskaistat ovat limittäin, oli odotuksena, että tämän asettelun takia lähetyksissä

olisi häiriöitä. Oletus perustui aiempiin kokemuksiin yhden radion ja kahden solun ympäristöistä. Tämä oletus kuitenkin osoittautui vääräksi, sillä lopulta häiriötä ei ollut. Onnistumisen kannalta merkittävässä asemassa oli tehojen suunnittelu, jotka jo aluksi konfiguroitiin sopiville tasoille. Yhteyksiä muodostaessa oli tärkeää saada oikea solu pysyvään yhteyteen halutun UE:n kanssa. Useamman solun ollessa samassa ympäristössä, saattaa UE liikkua kahden solun väliä. Tämä tarkoittaisi hyvin epävakaita yhteyksiä, joka ratkaistiin asettamalla kummallekin UE:lle solulukot. Käytännössä UE:lle annetaan Solu-ID sekä DL- että UL-ARFCN-arvojen keskiarvo. Näiden perusteella UE voi muodostaa yhteyden vain soluun, jonka arvot täsmäävät sille annettuihin tietoihin.

Tuloksissa näkyi, miten solujen välillä erityisesti DL:n tehot eroavat toisistaan. On kuitenkin merkittävää huomioida, että käytössä oli kaksi erilaista UE:ta. Molemmat toki soveltuvat taajuuskaistalle 66, mutta Solu-13:n kanssa yhteydessä oleva UE oli kiinnitettynä käännettävään telineeseen, kun taas Solu-29:n kanssa yhteydessä ollut UE ei ollut. Tämän takia asettelua voitiin hienosäätää vain toiselle UE:lle. Käytännössä radiolla 2 BLER saatiin lähes olemattomiksi, mutta radion 1 ja UE:n välille yhteyttä ei saatu hienosäädettyä aivan täydelliseksi.

Toisessa testiajossa solujen taajuuskaistat aseteltiin kauas toisistaan. Oletuksena oli, että tässä tapauksessa BLERiä näkyisi epätodennäköisemmin, sillä toisilta kaistoilta vuotavat häiriöt olisivat kauempana. Tässä tapauksessa kuitenkin maksimaalisten datamäärien saaminen osoittautui haastavammaksi kuin aiemmassa testiajossa. Useassa yrityksessä toisesta UL-lähetyksestä jäi puuttumaan noin 10 % referenssissä saadusta datamäärästä. Lopulta UL-lähetykseen lisättiin hieman tehoja sekä vaimennuksia säädettiin, jonka avulla molemmat UL-lähetykset saatiin lähes maksimiin. Säädöt vaikuttivat hieman DL-lähetykseen, jossa on näkyvissä 1 % BLERiä.

Testiajojen aikana myös UE-asettelun heikkous todennettiin yhdistämällä Solu-29 vuorostaan käännettävässä telineessä olevan UE:n kanssa ja Solu-13 toisen UE:n kanssa, jota ei voinut säätää. Tällöin oli nähtävissä heikompia tuloksia radion 2 kanssa, jonka takia myös UL-BLERiä näkyi. Käytännössä siis toisessakin testiajossa saatiin maksimi datamäärät kulkemaan ja heikommat tulokset korreloivat aina huonomman UE:n kanssa. Todennäköisesti DL BLERiä ei olisi nähty,

jos kumpaakin UE:ta olisi voitu säätää kuuluvampiin kohtiin, jolloin tehoja ei olisi tarvinnut nostaa kuuluvuuden edistämiseksi. Jos tehot olisi voitu pitää samoina, olisi puolestaan DL näkynyt liian kovista tehoista johtuvaa häiriötä vähemmän. Toisen ajon tulokset saavutettiin tehosäätelyn lisäksi askartelemalla vaahtomuovista ja nippusiteestä teline toisellekin UE:lle, jolla sen kallistuskulma saatiin hie-  
man paremmaksi. Tämä tosin käy vain väliaikaseksi ratkaisuksi, eikä tätäkään pysty etänä säätämään, kuten toista UE:ta. Alkuperäiseen testisuunnitelmaan oli kirjattu, että testiajot tehtäisiin seuraavaksi CON-tilassa. Tätä ei kuitenkaan toteutettu, sillä lähes erinomaiset tulokset oli jo saavutettu OTA-tilassa, joka on ensisijainen testausmenetelmä integroinnissa.

## **5.2 TDD-tekniikkaa hyödyntävä ympäristö**

Testiympäristön 2 testaukset aloitettiin ympäristön 1 valmistuttua. TDD-ympäristön haasteeksi arvioitiin jo alkumetreillä kehysrakenteiden monimuotoisuus. Kuten mainittu, datansiirrot tapahtuvat samalla kaistalla eri ajan hetkillä, jolloin lähe-  
tyksien aikaväleihin jakaminen on merkittävässä asemassa. Ennakko-olettamuk-  
seni oli, että erilaisten kehysrakenteiden yhtäaikainen testaaminen olisi haasta-  
vaa, eikä tällaista tiedettävästi ollut aiemmin toteutettu.

Ympäristön linjojen toimivuus oli helposti nähtävillä heti aluksi, sillä ympäristö oli jo aiemmin kasattu ja ollut käytössä. Muutamalla yhtäaikaisella datansiirrolla oli nähtävissä jo merkittäviä häiriöitä, jonka johdosta päädyttiin kaikki testit suoritta-  
maan CON-tilassa. Lisäksi tämä mahdollistaisi tasavertaisen testauksen radioi-  
den ja UE:iden välille, sillä tässäkin ympäristössä vain toista UE:ta olisi voitu sää-  
tää, jolloin se olisi automaattisesti ollut paremmassa asemassa toiseen verrat-  
tuna. Kummankin UE:n kaapeloinnin jälkeen tehtiin konfiguraatioon pientä hie-  
nosäätöä tehoihin. Toinen linja oli ennestään SA ja toinen NSA, joka oli yhdistel-  
mänä myös hyvä testata kattavuuden turvaamiseksi. Ainoastaan linjojen toteu-  
tukset olisivat erilaiset, mutta tuloksien pitäisi olla yhtäläiset. Jälleen solujen si-  
jainnit päädyttiin määrittelemään vierekkäin keskelle kaistaa, jotta kummallakin  
olisi mahdollisimman optimaalinen kuuluvuus.

Referenssitestauksessa oli jälleen tavoitteena saavuttaa hyvät ja lähes maksi-  
maaliset tulokset. Radiolla 3 päästiinkin suhteellisen lähelle tavoitteita. UL-

tulokset ovat maksimia ja muut arvot lähes ihanteelliset. Huomioitavaa kuitenkin on, että radio käyttää datansiirrossa vain yhtä UL-kerrosta, sillä NSA:ssa vain yksi kerros UL:n suuntaan on tuettu. Radion 3 ollessa NSA-tilassa, päädyttiin siinä pitämään kokoajan sama kehysrakenne. Radion 4 ollessa SA, vaikutti sen konfiguraation muuttaminen eri kehysrakenteiden välillä yksinkertaisemmalle. Radiolle 4 siis oli tarpeen tehdä kahdet referenssitestaukset. Heti alkuun oli jo kuitenkin selvää, että radio 4 on vanhempaa mallia ja käyttökokemukset ympäristöstä kertoivat, ettei sillä ole päästy lähellekään tavoitteita. CON-tilassa kuitenkin tulokset paranivat jo huomattavasti aiempaan. Silti voidaan nähdä, että CQI on vain 14, eikä ympäristön maksimi 15. Tähän ei kuitenkaan saatu ratkaisua yrityksistä huolimatta, joten tämä oli parasta mitä tällä radiolla sai. Kehysrakenteen 2 referenssitestaus onnistui myös hyvin, eikä sen konfiguroinnissa ilmennyt ongelmia. Käytännössä ainoa muutos oli aikavälien uudelleenjärjestely.

Verifiointitestauksen ensimmäisessä testiajossa oli molemmilla soluilla samanlaiset kehysrakenteet. Käytännössä taajuuskaistalla 78 liikkui vierekkäin samoilla ajanhetkillä samanlaiset lähetykset. Oletuksena oli, että pientä häiriötä ilmentyisi, mutta tuloksien pitäisi pysyä edelleen linjassa referenssien kanssa. Oletus osui oikeaan, sillä datamäärät, tehot ja muut arvot vastasivat edelleen aiemmin saatuja tuloksia. Ainoa merkittävä muutos tapahtui radion 4 BLER-määrissä, mutta tätä selittää jo sen valmiiksi hieman epävakaampi yhteys.

Toisessa testiajossa puolestaan oli ajatuksena, että datansiirrot tapahtuisivat keskenään erilaisilla kehysrakenteilla. Oletuksena oli, että nyt viimeistään olisi nähtävillä häiriötä UL-päässä, sillä lähetykset sekoittaisivat toisiaan. Eriävät ja käyttöön otetut kehysrakenteet esiteltiin kuvassa 15, jossa DL- ja UL-lähetykset edustavat datansiirtoa omiin suuntiinsa ja S esittää kaikkea muuta kaistalla liikkuvaa informaatiota, johon sisältyvät esimerkiksi SS ja PBCH. Tässä testiajossa tulosten kerääminen osoittautui jo itsessään haastavaksi, sillä molempien yhteyksien yhtä aikainen pysyminen oli korkeintaan sekunteja. Testiä toistettiin noin 20 kertaa, jonka aikana aina vuoroteltiin kumpi yhteys muodostettiin ensin, sillä yleensä toisena muodostunut yhteys pysyi ylhäällä ensimmäisenä muodostuneen katketessa.

Lopulta kerätyistä tuloksista voidaan nähdä, että ne ovat huonot. Radiolla 3 yhteys on niin heikko DL-suuntaan, että data liikkuu vain yhtä kerrosta pitkin säilyttääkseen CQI-arvona 15 ja MCS:n hyvänä. UL myös näyttää heikolle senkin nosttaessa BLERiä sekä tiputtaessa QAM-arvoa. Radiolla 4 on myös nähtävissä toisesta lähetyksestä vuotava häiriö. Voidaan huomata, että esimerkiksi tehoarvot ovat kohonneet, UL QAM on tipahtanut ja MCS:t ovat heikentyneet. Kaikkien tulosten BLERit ovat hyvin korkeat. Nähtävä häiriö ja sen aiheuttamat tulokset johtuvat yksinkertaisesti kehysrakenteesta.

Testauksessa käytetyissä kehysrakenteissa (kuva 14) on molemmissa nähtävillä aikavälit 0–19, jotka toistavat tiettyä kaavaa. Ensimmäiset kolme aikaväliä 0–2 ovat molemmissa DL-lähetyksiä. Ensimmäinen merkittävä ero tapahtuu aikaväleissä 3–4, jolloin kehysrakenteessa 1 tapahtuu edelleen DL-lähetys, mutta kehysrakenteessa 2 liikkuu jo erikoisaikaväli (engl. Special Slot), jonka jälkeen yhden aikavälin kestävä UL-lähetys. Tämä kaava toistuu uudelleen ja uudelleen 10 millisekunnin välein jokaisen aikavälin kestäessä 0,5 millisekuntia, joka puolestaan aiheutti merkittävää häiriötä lähetyksessä. Ympäristössä, jossa datat liikkuvat yhtä aikaa lähekkäin, vaikkakin omilla kanavillaan, ovat pienet vuodot kaisalta toiselle mahdollisia. Tässä tilanteessa UL-lähetyksen saavuttaessa radion, oli sen teho merkittävästi matalampi verrattuna toisen radion DL-lähetykseen, jolloin häiriö oli taattu.

### **5.3 Testauksen kehittäminen ja lopputulema**

Lopuksi voidaan siis todeta, että kahden radion testiympäristö on mahdollista toteuttaa niin FDD- kuin TDD-radioilla. Testiympäristöstä 1 saadut tulokset todistavat laadun pysyvän saman tasoisena yhtäaikaista datansiirroista huolimatta, eikä häiriöitä juurikaan havaita. Kuitenkin kahden UE:n sijoittelu yhdelle UE:lle suunniteltuun ympäristöön on haastavaa ja tähän täytyisi kehitellä toimivampi ratkaisu, jos useammalle UE:lle on tarvetta virallisessa integroinnissa. Toimivin ratkaisu olisi hankkia ympäristöön toinen etänä säädeltävä teline, joka mahdollistaa säätelyn myös datasiirron aikana, jolloin tuloksiin voidaan vaikuttaa reaaliajassa ja työskentelystä tulee tehokkaampaa.

TDD-radioiden testaaminen yhtä aikaa on puolestaan monimutkaisempi kokonaisuus. Ensimmäisessä testiajossa ei huomattu juurikaan muutoksia verrattuna aiempiin referensseihin. Toisessa testiajossa huomattiin merkittäviä häiriöitä ja puutteita tuloksissa. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, etteikö TDD-radioiden testaaminen kahden radion ympäristöissä olisi mahdollista. Testaus vain vaatii tarkempaa suunnittelua eli esimerkiksi keskenään samanlaisia kehysrakenteita testataan tiettyinä aikoina. Tällä tavoin voidaan optimoida maksimaalisten tulosten kerääminen.

Toisaalta kaikki testitapaukset eivät aina merkitse maksimituloksia, vaan joissain tapauksissa on tärkeää voida testata mahdollisia häiriöitä ja ristiriitoja yhteyksissä. Esimerkiksi raja-alueilla valtiot käyttävät tyypillisesti erilaisia kehysrakenteita ja vaikka ongelma on tiedossa, aiheutuu näistä usein päänvaivaa. Häiriöistä aiheutuvaa vahinkoa ja haittaa voidaan kuitenkin pienentää ennakoimalla tämänkaltaisia tilanteita. Näkisin, että myös häiriötestaukseen suunniteltu ympäristö voi olla yhtä merkittävässä asemassa tulevaisuudessa. Tuottamalla ja tutkimalla häiriöitä ennakkotapauksina, voidaan mahdollisesti kehittää sovelluksia ja ratkaisuja häiriötorjuntaan.

Tulevaisuudessa kahden radion testiympäristöjen kehitystä voisi jatkaa erilaisilla testitapauksilla. Tämän työn tutkimustyö lähti asetelmasta, jossa on kaksi ympäristöä, toinen FDD ja toinen TDD. Seuraava tutkimussuunta voisi olla näiden yhdistäminen eli samaan ympäristöön laitettaisiin FDD- ja TDD-radio. Tämä vaatisi tarkkaa suunnittelua, jotta löydettäisiin yhdistelmä, joka olisi taajuuksien ja radioiden puolesta järkevä yhdistelmä samaan konttiin. Toinen tutkimussuunta voisi olla kahden eri taajuuskaistalla olevan radion testaaminen tai kahden samanlaisen radion testaaminen, mutta ne olisi konfiguroitu eri taajuuskaistoille.

Ympäristön näkökulmasta olisi kuitenkin merkittävää kehittää sen arkkitehtuuria. Nykyinen RF-kammio on kahdelle radiolle suhteellisen pieni. Se on toimiva vielä TDD-ympäristönä, mutten kasaisi FDD-ympäristöä kyseiseen mittakaavaan enää toiste. Jotta oikeasti voitaisiin olla varmoja tulosten paikkansa pitävyydestä, tulisi kummallakin UE:lla olla tasavertainen asettelu eli kumpaakin tulisi voida säätää etänä reaaliajassa.

Tärkeimpinä tekijöinä kahden radion ympäristöä suunnittelevalle haluan nostaa vielä muutamia asioita. Ensimmäisenä täytyy tietää tarkasti, mitä testaa ja millaista rautaa eli radiota, tukiasemaa ja muita komponentteja suunnittelee käyttävänsä. Onko kyseessä FDD- vai TDD-ympäristö? Lisäksi tulee olla alkuun selkeä kuva tulevista testitapauksista, jotta jo referenssitestaukset voidaan suorittaa samoilla konfiguraatioilla. On nimittäin tärkeää voida osoittaa, että tulokset eivät kärsi tämänkaltaisessa ympäristössä. Tämän työn loppuun haluan vielä kannustaa kaikkia miettimään ympäristöjensä käyttöastetta ja tarpeita. Tämänkaltaisen ratkaisu on optimaalinen testaustilanteisiin, joissa käytössä olevia ympäristöjä on rajallisesti, mutta testauskapasiteetti halutaan jopa tuplata.

## LÄHTEET

3GPP TS 38.101-1 2019. 5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception. Osa 4: Range 1 Standalone. Versio 15.4.0. Julkaisu 15. ETSI. Luettavissa:

[https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138100\\_138199/13810101/15.04.00\\_60/ts\\_13810101v150400p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/13810101/15.04.00_60/ts_13810101v150400p.pdf)

Luettu: 3.3.2025.

3GPP TS 38.101-1 2019. 5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception. Osa 4: Range 1 Standalone. Versio 15.5.0. Julkaisu 15. ETSI. Luettavissa:

[https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138100\\_138199/13810101/15.05.00\\_60/ts\\_13810101v150500p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/13810101/15.05.00_60/ts_13810101v150500p.pdf)

Luettu: 3.3.2025.

5G Networks. 16.11.2020. 5G NR Modulation and Coding Scheme – Modulation and Code Rate. Luettavissa: <https://www.5g-networks.net/5g-nr-modulation-and-coding-scheme-modulation-and-code-rate/> Luettu: 14.4.2025.

5G-tools. 2025a. Frequency bands for 5G NR. Luettavissa: <https://5g-tools.com/5g-nr-frequency-band/> Luettu: 5.2.2025.

5G-tools. 2025b. 5G Tools for RF Wireless. 5G NR ARFCN calculator. Käytettävissä: <https://5g-tools.com/5g-nr-arfcn-calculator/> Käytetty: 14.4.2025.

APXVBB4L26H2\_43-C-I20. 8.7.2024. Amphenol Antennas. Luettavissa: [https://amphenol-antennas.com/wp-content/uploads/datasheets/APXVBB4L26H2\\_43-C-I20,%20-A-I20,%20-C-I20S,%20-A-I20S.pdf](https://amphenol-antennas.com/wp-content/uploads/datasheets/APXVBB4L26H2_43-C-I20,%20-A-I20,%20-C-I20S,%20-A-I20S.pdf)

Luettu: 16.5.2025.

Chaudhari, Q. s. a. What is the Difference between Analog, Digital and Hybrid Beamforming? Wireless Pi. Luettavissa: <https://wirelesspi.com/what-is-the-difference-between-analog-digital-and-hybrid-beamforming/> Luettu: 11.2.2025.

Christodoulou, C. G. & Blaunstein, N. 2014. Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Networks. Wiley. Luettavissa: O'Reilly for Higher Education. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu: 18.2.2025.

European 5G Observatory. s. a. What is 5G? Luettavissa: <https://5gobservatory.eu/about/what-is-5g/> Luettu: 3.3.2025.

Holma, H., Toskala, A. & Nakamura, T. 2024. 5G technology. 3GPP evolution to 5G-advanced. 2. painos. Wiley. Luettavissa: O'Reilly for Higher Education. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu: 2.2.2025.

Holma, H. & Toskala, A. 2011. LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced. 2. painos. Wiley. Luettavissa: O'Reilly for Higher Education. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu: 19.2.2025.

Järvinen, M. 2013. Mobiiliverkkojen kehitys. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, tietotekniikan tutkinto-ohjelma. Luettavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013121721568> Luettu: 1.2.2025.

Kalyani, K. 6.12.2021. BLER: A critical parameter in cellular receiver performance. 5G Technology World. Luettavissa: <https://www.5gtechnology-world.com/bler-a-critical-parameter-in-cellular-receiver-performance/> Luettu: 14.4.2025.

Kavanagh, S. & Mundy, J. 17.11.2022. What Is Massive MIMO Technology? 5G.co.uk. Luettavissa: <https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/> Luettu: 11.2.2025.

Klalid, A. 15.6.2023. 5G Beams Types: Broadcast & Traffic Beams – SSB, CSI-RS, PMI & SRS. Our Technology Planet. Luettavissa: [https://ourtechplanet.com/5g-beams-types-broadcast-traffic-beams-ssb-csi-rs-pmi-srs/#google\\_vignette](https://ourtechplanet.com/5g-beams-types-broadcast-traffic-beams-ssb-csi-rs-pmi-srs/#google_vignette) Luettu: 11.3.2025.

Koivuranta, J. 2019. 5G ilmarajapinnan kauko- ja lähikenttämittaukset. Kandidaatintyö. Oulun yliopisto, elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Luettavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201912213430> Luettu: 2.2.2025.

Liberg, O. 15.12.2023. The next wave of 5G – 3GPP Release 19. Ericsson. Luettavissa: <https://www.ericsson.com/en/blog/2023/12/3gpp-release-19> Luettu 12.2.2025.

MIND. 2025. Radioiden tiedot. Sisäinen työkalu.

NR Dimensioning Tool. 2025. Teoreettisten tuloksien laskenta. Sisäinen työkalu.

Orbis Systems Oy. 03.12.2020. OTA RF chamber 7m Technical Specification. Versio 0.4.0. Sisäinen lähde.

Pensworth, L. 7.3.2020. What is Mbps? DailyWireless. Luettavissa: <https://daily-wireless.org/internet/what-is-mbps/> Luettu: 14.4.2025.

Poole, I. 1998. Basic Radio. Newnes. Luettavissa: O'Reilly for Higher Education. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu: 4.2.2025.

RF Wireless World, s. a. a. FDD vs. TDD. Difference between FDD and TDD In Wireless Communication. Luettavissa: <https://rfwireless-world.com/Articles/difference-between-TDD-and-FDD.html> Luettu 6.2.2025.

RF Wireless World, s. a. b. Analog Beamforming Vs Digital Beamforming. Difference Between Analog Beamforming And Digital Beamforming. Luettavissa: <https://www.rfwireless-world.com/terminology/antenna-terms/analog-vs-digital-beamforming> Luettu: 12.2.2025.

RF Wireless World, s. a. c. Hybrid Beamforming Basics. Hybrid Beamforming Types. Luettavissa: <https://www.rfwireless-world.com/terminology/rf-basics/hybrid-beamforming-basics-and-types> Luettu: 12.2.2025.

RF Wireless World, s. a. d. 5G NR RSRP, RSRQ and SINR Measurement Explained. Luettavissa: <https://www.rfwireless-world.com/articles/5g/5g-nr-rsrp-rsrq-sinr-measurements> Luettu: 14.4.2025.

Rodriguez, J. 2015. Fundamentals of 5G Mobile Networks. Wiley. Luettavissa: O'Reilly for Higher Education. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu: 1.2.2025.

ShareTechnote, s. a. a. 5G/NR – SDL. Luettavissa: <https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G SDL.html> Luettu 11.2.2025.

ShareTechnote, s. a. b. 5G/NR – SUL. Luettavissa: <https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G SUL.html> Luettu: 11.2.2025.

ShareTechnote, s. a. c. 5G/NR – Frame Structure. Luettavissa: [https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G\\_FrameStructure.html](https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FrameStructure.html) Luettu: 20.2.2025.

ShareTechnote, s. a. d. 5G/NR – CSI Report. Luettavissa: [https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G\\_CSI\\_Report.html](https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_CSI_Report.html) Luettu: 14.4.2025.

Telecom Trainer. 2.1.2024. SRS (Sounding Reference Signal) based beamforming. Luettavissa: <https://www.telecomtrainer.com/srs-sounding-reference-signal-based-beamforming/> Luettu: 11.3.2025.

Telecom Trainer. 28.12.2023. 5G NR SINR Measurement and Its Mapping. Luettavissa: <https://www.telecomtrainer.com/5g-nr-sinr-measurement-and-its-mapping/> Luettu: 14.4.2025.

Telecom Trainer. 11.12.2023. SSB Beamforming. Luettavissa: <https://www.telecomtrainer.com/ssb-beamforming/> Luettu: 11.3.2025.

Telecom Trainer. 16.3.2023. SS/PBCH Block. Luettavissa: <https://www.telecomtrainer.com/ss-pbch-block/#:~:text=The%20SS%2FPBCH%20block%20is%20a%20critical%20component%20of,to%20establish%20a%20connection%20with%20the%205G%20network>. Luettu: 20.2.2025.

Visser, H. J. 2012. Antenna Theory and Applications. Wiley. Luettavissa: O'Reilly for Higher Education. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu: 18.2.2025.

Viswanathan, M. 6.8.2014. Diversity techniques and spatial multiplexing. GaussianWaves. Luettavissa: <https://www.gaussianwaves.com/2014/08/diversity-techniques-and-spatial-multiplexing/> Luettu: 11.2.2025.

Webster, E. 2021. What is MIMO (multiple input, multiple output)? TechTarget. Luettavissa: <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/MIMO> Luettu 11.2.2025.