



Olli Kuokka

Starlink-satelliittiverkon mahdollisuudet syrjäseutujen tietoliikenteessä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintätekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

8.11.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Olli Kuokka
Otsikko:	Starlink-satelliittiverkon mahdollisuudet syrjäseudun tietoliikenteessä
Sivumäärä:	56 sivua
Aika:	8.11.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Tieto- ja viestintätekniikka
Ammatillinen pääaine:	Monimuotokoulutus
Ohjaajat:	Kari Järvi, Tekn. lis. Janne Salonen, osaamisaluejohtaja

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Starlink-satelliittiverkon mahdollisuuksia parantaa tietoliikenneyhteyksiä syrjäseuduilla, joilla perinteisten tietoliikenneverkkojen rakentaminen on maantieteellisesti ja taloudellisesti haastavaa tai kannattamatonta.

Työn taustalla on globaali tieto- ja viestintätekniikan kehitys, joka mahdollistaa yhä parempia yhteyksiä, mutta jakautuu alueellisesti epätasaisesti. Opinnäytetyössä arvioidaan Starlink-satelliittiverkon suorituskykyä syrjäseutujen näkökulmasta ja sen sosioekonomisia vaikutuksia.

Opinnäytetyötä taustoitettiin teoreettisella viitekehyksellä, jossa perehdyttiin syrjäseutujen tietoliikenteen erityishaasteisiin sekä satelliittitekniikan kehitykseen historiasta nykypäivään.

Starlinkin potentiaalia syrjäseutujen tietoliikenteen parantamisessa arvioitiin kirjallisuuskatsauksen ja teknisten mittausten perusteella. Tulosten perusteella analysoitiin Starlinkin suorituskykyä ja sen tarjoamia mahdollisuuksia syrjäseuduilla sekä pohdittiin sosioekonomisia vaikutuksia, kuten digitaalisen saavutettavuuden ja alueellisen tasa-arvon edistämistä.

Johtopäätöksissä todetaan, että Starlinkin kaltaiset satelliittipohjaiset tietoliikennematkaisut voivat merkittävästi parantaa tietoliikenneyhteyksiä ja elinolosuhteita syrjäseuduilla, mutta teknologia kohtaa myös haasteita, joiden ratkaisu on keskeistä satelliittilaajakaistan tulevan kehityksen kannalta.

Avainsanat: Starlink, satelliitti, tietoliikenne, syrjäseutu

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Olli Kuokka
Title: The Possibilities of the Starlink Satellite Network in Telecommunications in Remote Areas
Number of Pages: 56 pages
Date: 8 November 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Information and Communication Technology
Professional Major: Blended learning
Supervisors: Kari Järvi, Lic. Sc.
Janne Salonen, Director, School of ICT

The aim of this thesis was to examine the potential of the Starlink satellite network to improve telecommunications in remote areas where the construction of traditional telecommunications networks is geographically and economically challenging or unfeasible.

The study is grounded in the global development of information and communication technology, which enables increasingly robust connections but remains unevenly distributed across regions. This thesis evaluates the performance of the Starlink satellite network from the perspective of remote areas and assesses its socioeconomic impacts.

The theoretical framework of the thesis explores the unique challenges of telecommunications in remote areas and the development of satellite technology from its history to present-day innovations. Starlink's potential for enhancing telecommunications in remote areas was assessed through a literature review and technical measurements. Based on the results, the thesis analyzed Starlink's performance and the opportunities it offers to remote areas, including its impact on digital accessibility and regional equity.

The conclusions indicate that satellite-based telecommunications solutions like Starlink can significantly improve telecommunications and living conditions in remote areas. However, the technology also faces challenges that need to be addressed to ensure the sustainable development of satellite broadband in the future.

Keywords: Starlink, satellite, communication networks, remote area

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tavoitteet ja tutkimuskysymykset	1
2	Teoreettinen viitekehys	2
2.1	Digitaalinen kuilu	2
2.2	Syrjäseutujen tietoliikennehaasteet	3
2.2.1	Maantieteelliset olosuhteet	4
2.2.2	Teknologiset haasteet	5
2.2.3	Taloudelliset tekijät	6
2.2.4	Sosioekonomiset tekijät	7
2.2.5	Ratkaisut	8
2.3	Satelliittiteknologian historia	10
2.4	Satelliittipohjainen internet	13
2.4.1	Kehityksen alku	13
2.4.2	Teknologian Evoluutio	14
2.4.3	Haasteet ja ratkaisut	15
2.4.4	LEO-kiertoradan satelliittijärjestelmät	16
2.4.5	Starlink-satelliittijärjestelmän esittely	17
2.4.6	Tulevaisuuden näkymät	18
3	Tutkimusmenetelmät	19
3.1	Valitut tutkimusmenetelmät	19
3.2	Tutkimusalueen valinta	20
4	Kirjallisuuskatsaus	21
4.1	Kuvaileva kirjallisuuskatsaus	21
4.2	Aineiston valinta	22
4.3	Analyysi	23
4.3.1	Starlink-satelliittiverkon tekninen suorituskyky	24
4.3.2	Starlinkin rooli syrjäseutujen tietoliikenteen parantamisessa	25
4.3.3	Starlinkin sosioekonomiset vaikutukset	26

4.3.4	Ongelmat ja haasteet	27
4.3.5	Tarkastelu ja johtopäätökset	28
5	Tekniset mittaukset	29
5.1	Mittausympäristön toteutus	29
5.2	Mittausten toteutus	31
5.2.1	Nopeusmittaukset	31
5.2.2	PING-testi	33
5.2.3	Kaistanleveysmittaus	34
5.2.4	Latauskapasiteetin mittaus	36
5.2.5	Useiden samanaikaisten yhteyksien suorituskykymittaus	37
5.2.6	Kaistanleveyden ja viivevaihtelun mittaus	39
5.2.7	Laajennettu läpäisytesti	41
5.2.8	Vuorokauden läpäisymittaus	43
5.3	Mittaustulosten analyysi	45
5.3.1	Suorituskyky ja soveltuvuus syrjäseuduille	45
5.3.2	Latenssin ja kaistanleveyden hallinta	46
5.3.3	Yhteenveto	46
6	Analyysi ja johtopäätökset	47
6.1	Analyysi	47
6.1.1	Teknologian soveltuvuus ja rajoitukset	48
6.1.2	Sosioekonomiset vaikutukset	49
6.1.3	Haasteet ja tulevaisuuden näkymät	50
6.2	Johtopäätökset	51
	Lähteet	52

Lyhenteet

- GEO:** *Geostationary Earth Orbit.* Kiinteällä radalla Maan ympäri kiertävä satelliittirata, joka sijaitsee noin 35 786 kilometrin korkeudessa maanpinnasta.
- IEEE:** *Institute of Electrical and Electronics Engineers.* Kansainvälinen tekniikan alan järjestö.
- IoT:** *Internet of Things.* Esineiden internet. Verkostoituneiden, internetin kautta keskenään kommunikoivien laitteiden ja sensorien järjestelmä, joka mahdollistaa tiedon automaattisen keräämisen ja analysoinnin.
- Jitter:** *Vaihtelu viiveessä.* Pakettien saapumisajan epäsäännölliset vaihtelut tietoliikenneverkoissa.
- LEO:** *Low Earth Orbit.* Matala Maan kiertorata, joka sijaitsee noin 180 – 2 000 kilometrin korkeudessa maanpinnasta.
- Mbit/s:** *Megabits per second.* Tiedonsiirtonopeuden yksikkö, joka mittaa miljoonia bittejä sekunnissa.
- MBytes:** *Megabytes.* Tietomäärän yksikkö, joka mittaa miljoonia tavuja.
- NT:** *Terrestrial-networks.* Maanpäälliset tietoliikenneverkot.
- NTN:** *Non-terrestrial-networks.* Satelliitti- tai ilmalaivapohjaiset tietoliikenneverkot.
- ROI:** *Return on Investment.* Sijoitetun pääoman tuotto, taloudellinen mittari, joka lasketaan jakamalla nettohyöty (tai tappio) sijoitetulla pääomalla.

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Maailmanlaajuisesti tieto- ja viestintätekniiikan nopea kehitys on avannut uusia mahdollisuuksia yhdistää ihmisiä ja yhteisöjä. Kuitenkin nämä kehityksen hyödyt eivät ole jakautuneet tasaisesti, ja etenkin syrjäseuduilla kohdataan merkittäviä haasteita nykyaikaisten tietoliikenneyhteyksien saamisessa. Näiden alueiden tehokas palveleminen edellyttää innovatiivisia ratkaisuja, jotka voivat ylittää maantieteelliset ja taloudelliset esteet.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan, kuinka Starlink-satelliittiverkko voi tarjota ratkaisun syrjäseutujen tietoliikenteen haasteisiin. Aihetta lähestytään teoreettisen viitekehyksen avulla, jossa esitellään syrjäseutujen tietoliikenteen erityishaasteet sekä satelliittiteknologian kehitys historiasta nykypäivän innovaatioihin. Työssä analysoidaan kirjallisuuskatsauksen ja teknisten mittausten avulla Starlink-satelliittiverkon potentiaalia tietoliikenneyhteyksien tarjoajana alueilla, joilla perinteiset ratkaisut eivät ole taloudellisesti tai teknisesti toteutettavissa.

1.2 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Opinnäytetyön tavoitteena on arvioida Starlink-satelliittiverkon potentiaalia tietoliikenneolosuhteiden parantamisessa syrjäseuduilla ja digitaalisen kuilun kaventamisessa. Tarkoituksena on tutkia, kuinka satelliittiteknologia voisi edistää tasavertaisempaa pääsyä tiedon ja viestinnän pariin kaikkialla maailmassa.

Tämä opinnäytetyö pyrkii vastaamaan kysymyksiin:

- a) Mikä on Starlink-satelliittiverkon suorituskyky ja mitä mahdollisuuksia se tarjoaa syrjäseutujen tietoliikenteelle?
- b) Millaisia sosioekonomisia vaikutuksia Starlink-satelliittiverkon käyttöönotolla on syrjäseutujen kannalta?

2 Teoreettinen viitekehys

Tieto- ja viestintätekniikan kehitys on ollut nopeaa viime vuosikymmeninä, mutta tämä kehitys on jakautunut epätasaisesti maailman eri kolkkiin. Digitaalisesta kuilusta on tullut iso ongelma.

Globaalin internetin tiedonsiirron rakenne perustuu suurelta osin merenalaisiin kaapeleihin ja maanpäällisiin runkoverkkoihin, jotka mahdollistavat laajamittaisen datan liikkuvuuden eri mantereiden välillä. Merenalaiset kaapelit kattavat yli 95 prosenttia mannertenvälisestä internet-liikenteestä ja ovat keskeisiä globaalin dataliikenteen infrastruktuurissa. (Atlantic Council 2021.)

Paikallisesti internetin saatavuudessa on kuitenkin suuria eroja. Erityisesti syrjäseuduilla on merkittäviä haasteita pääsyssä nykyaikaisiin tietoliikenneyhteyksiin. Satelliittitekniikan kehitys voi tuoda muutoksen tähän asetelmaan. Tässä luvussa tarkastellaan digitaalista kuilua, syrjäseutujen kohtaamia tietoliikenteen haasteita, satelliittitekniikan historiaa ja satelliittipohjaisen internetin kehitystä aina Maan matalan kiertoradan (LEO) satelliittikonstellatioihin saakka, joista Starlink-satelliittijärjestelmä on noussut kehityksen kärkeen.

2.1 Digitaalinen kuilu

Digitaalisella kuilulla eli digitaalisella kahtiajakoilla tarkoitetaan tieto- ja viestintätekniikan epätasaista jakautumista yhteiskunnassa. Eroja voidaan tarkastella sekä tietokoneiden ja internetin saatavuuden että taitojen tasolla erilaisten sosioekonomisten ryhmien välillä. (Schweitzer 2024.)

IEEE:n (2024.) mukaan digitaalinen kahtiajako kuvastaa eroa niiden ihmisten välillä, jotka voivat päästä käsiksi ja käyttää digitaalista teknologiaa, ja niiden, jotka eivät voi. Tämä kuilu on pahenemassa, kun miljardit ihmiset ympäri maailmaa ovat yhä ilman internet-yhteyttä. Tekniikan nopea kehitys on tullut välttämättömäksi elämän eri osa-alueilla, mutta samalla se on syventänyt digitaalista kuilua. Infrastruktuurin puutteet ja digitaalisen osaamisen puute ovat jättäneet

monet ihmiset, erityisesti kehittyvissä maissa, teknologisen kehityksen ulkopuolelle. (IEEE 2024.)

Instituutioiden rooli digitaalisen kuilun kaventamisessa on keskeinen, sillä ne voivat edistää sekä teknologian saatavuutta että digitaalista osaamista. Ilman aktiivista puuttumista tähän eriarvoisuuteen, digitaalinen kuilu ei ainoastaan pysy ennallaan, vaan myös syvenee. (IEEE 2024.)

2.2 Syrjäseutujen tietoliikennehaasteet

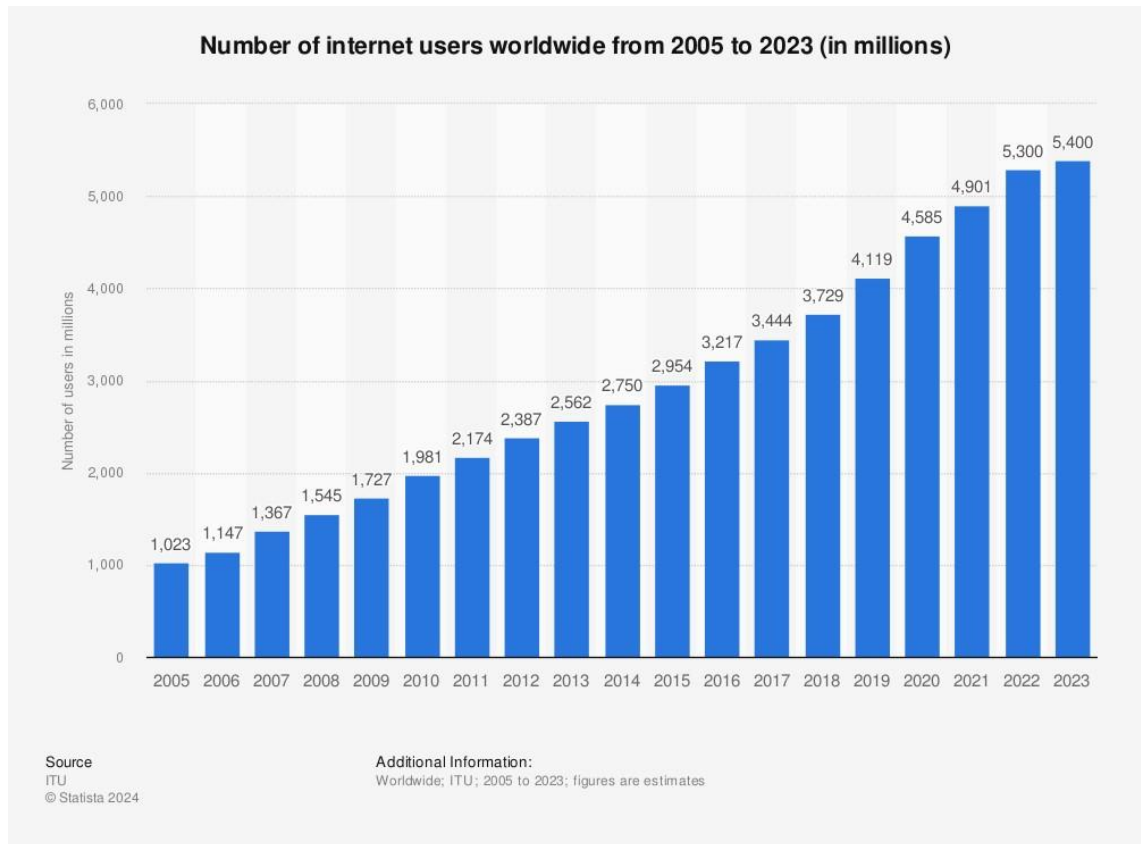
Syrjäseutujen tietoliikenteeseen liittyy monenlaisia haasteita, jotka riippuvat paljon paikallisista olosuhteista, infrastruktuurista, taloudellisista resursseista ja sosioekonomisista tekijöistä. Tämä on merkittävä osa digitaalista kuilua.

Internet on monille arkipäivää, mutta se pätee vain niille, joilla on helppo pääsy siihen. Todellisuudessa miljardit ihmiset ovat yhä digitaalisesti eristyksissä, sillä tietyille alueille yhteyksien tuominen ei ole taloudellisesti kannattavaa (Saldana ym. 2017). Esimerkiksi Lópezin ja muiden (2023.) mukaan 85 % planeetan pinta-alasta on edelleen ilman matkapuhelinverkkojen kattavuutta digitalisaatiotrendistä huolimatta, koska tarvittavan infrastruktuurin rakentaminen kattavuuden tarjoamiseksi maaseudulla ja syrjäisillä alueilla ei ole kustannustehokasta.

Jaldénin ja muiden (2020.) mukaan YK:n kestävän kehityksen toimintaohjelman, Agenda 2030:n, 17 tavoitteen toteutuminen liittyy suorasti tai epäsuorasti laajan alueen kattavaan ICT-infrastruktuuriin. Ne koskevat esimerkiksi ihmisten hyvinvointia, hyvää terveyttä, tasa-arvoista koulutusta, ihmisarvoista työtä ja talouskasvua, eriarvoisuuden vähentämistä, kestäviä kaupunkeja ja yhteisöjä sekä ilmastotoimia.

Vuonna 2023 internetin käyttäjien määrä oli maailmanlaajuisesti arviolta 5,4 miljardia, mikä on edustaa 67 % maailman väestöstä. Internetin käyttöä lisää helppo pääsy tietokoneisiin, maiden modernisoituminen maailmanlaajuisesti ja

älypuhelimien lisääntynyt käyttö. Viestintäverkkojen kehitystaso liittyy kuitenkin internetin levinnäisyyteen. (Petrosyan, 2024.)



Kuva 1. Internetin käyttäjien määrä globaalisti 2005-2023 (Statista, 2024).

2.2.1 Maantieteelliset olosuhteet

Globaali internetin tiedonsiirto kuituyhteyksien kautta jaetaan paikallisesti ihmisille eri tavoin: kuituyhteyksien, langattomien 3G-, 4G- ja 5G-yhteyksien sekä nykyisin myös satelliittiyhteyksien avulla.

Maanpäällisissä verkoissa tiedonsiirto tapahtuu yleensä optisten kuituyhteyksien kautta, joiden etenemisnopeus on noin 200 000 km/s, mikä aiheuttaa viivettä 5 mikrosekuntia kilometriä kohti. Vaikka kuituoptiset yhteydet tarjoavat nopeaa tiedonsiirtoa, niiden tehokkuuteen vaikuttavat merkittävästi maantieteelliset esteet, kuten aavikot, vuoristot ja meret, ja reitityksen mutkat, jotka voivat

pidentää todellista siirtomatkaa huomattavasti, kasvattaen näin viivettä. (Conde 2024.)

Kaikilla alueilla ei ole tieto- ja viestintätekniikan infrastruktuuria. Näiden alueiden yhdistämisen kustannukset ovat usein kohtuuttoman korkeat verrattuna saavutettaviin hyötyihin. (Cello ym. 2015.)

Paikalliset olosuhteet vaikuttavat monin tavoin tietoliikenneyhteyksiin ja niiden perustamiseen. Maantieteellinen sijainti ja luonnonesteet voivat rajoittaa tietoliikenneinfrastruktuurin rakentamista ja ylläpitoa. Esimerkiksi Ahmmedin ja muiden (2022.) mukaan maantieteelliset alueet muodostavat esteitä laajakais-tainfrastruktuurille. Tietoliikenneteknologian kehityksen myötä alhaista väestötiheyttä ja suurempia maantieteellisiä etäisyyksiä ei kuitenkaan pitäisi enää pitää pääsyyinä eriarvoisuudesta liittyen digitaaliseen kahtiajakoon. (Ahmmed ym. 2022.)

2.2.2 Teknologiset haasteet

Syrjäseuduilla kohdattavat teknologiset haasteet ovat monitahoisia ja vaikuttavat merkittävästi tietoliikenneyhteyksien laatuun ja saatavuuteen. Keskeiset haasteet liittyvät vanhentuneeseen teknologiaan ja rajoitettuihin teknologiavalintoihin, jotka voivat estää nykyaikaisen tietoliikenneinfrastruktuurin käyttöönoton.

Syrjäseuduilla alhainen väestötiheys on rajoittanut televiestintäoperaattoreita tuomasta yhteyksiä eristyneisiin kyliin ja siksi sellaisilla alueilla on pyritty hyödyntämään monenlaisia vaihtoehtoisia teknologioita yhteyksien aikaansaamiseksi. (Saldana ym. 2017.)

Cellon ja muiden (2015.) mukaan syrjäseutujen tietoliikenteen haasteisiin liittyy ICT-infrastruktuurin puuttumisen lisäksi myös luotettavuuteen ja turvallisuuteen liittyviä ongelmia, kuten luonnonkatastrofeja, kuten maanjäristyksiä, ja poliittisia tapahtumia, kuten sotia.

Cavalcanten ja muiden (2021.) mukaan syrjäseutujen tietoliikenteen teknologiset haasteet liittyvät kattavuuteen ja infrastruktuurin kustannuksiin sekä lisäksi syrjäseuduilla kärsitään enemmän sähkökatkoksista, mikä vaikeuttaa verkon ylläpitoa ja toimintaa.

Syrjäseutujen tietoliikenteen teknologiset haasteet liittyvät erityisesti suurten solujen vaatimukseen, korkeaan läpäisykykyyn ja taajuuden joustavuuteen. Tämä korostaa tarvetta kehittää ratkaisuja, jotka pystyvät tukemaan laajaa kattavuutta ja suurta datanopeutta sekä mahdollistamaan taajuusalueiden tehokkaamman käytön syrjäisillä alueilla. (Mendes ym. 2020.)

Ahmedin ja muiden (2022.) mukaan teknologiset haasteet voidaan voittaa uusilla innovaatioilla, mutta maaseutu- ja syrjäisillä alueilla maanpäällisen infrastruktuurin käyttöönottoa rajoittaa isot kustannukset. Taloudellisia tekijöitä tarkastellaan enemmän seuraavassa kappaleessa.

2.2.3 Taloudelliset tekijät

Globalisaation, digitalisaation ja kaupungistumisen nopea eteneminen vaikuttaa erityisesti kaupunkialueisiin, jotka tyypillisesti saavuttavat uusien teknologioiden ja innovaatioiden tuomat kehityskulut ensisijaisesti. Näillä alueilla sijoitetun pääoman tuotto (ROI) on korkeampi verrattuna syrjäseutuihin. Väestötiheyden alaisuus, pitkät etäisyydet ja suuret investointikustannukset asukasta kohden ovat haasteita syrjäseuduille. Tämä ero kaupunkien ja syrjäseutujen välillä johtaa digitaalisen kuilun kasvuun, joka on jatkuva haaste tietoliikenneteknologian saavutettavuudessa. (Cavalcante ym. 2021.)

Maaseudun kattavuuden tarjoaminen on tyypillisesti kaksi kertaa kalliimpaa, ja potentiaaliset tulot ovat vain kymmenesosa verrattuna kaupunkikäyttöön (Jaldén ym. 2020). Syrjäseutujen ja maaseutualueiden verkkoyhteyksien korkeat laajentamis-, investointi- ja ylläpitokustannukset sekä tulotason epävarmuus tekevät näiden alueiden palvelemisesta taloudellisesti haastavaa. Tämän

vuoksi operaattorit usein priorisoivat investointejaan tiheimmin asutuille alueille, jättäen syrjäseudut vähemmälle huomiolle. (Mendes ym. 2020.)

2.2.4 Sosioekonomiset tekijät

Monet alueet ympäri maailmaa, erityisesti kehittyvässä maissa, kärsivät riittämättömästä internetyhteydestä, mikä heijastuu väestön tuloeroihin ja koulutusmahdollisuuksiin. Digitaalisen kuilun syventämistä pahentaa se, että monet ihmiset eivät pysty maksamaan internetpalveluista tai laitteista, jotka mahdollistavat digitaalisen yhteyden. Lisäksi monet syrjäiset alueet kärsivät energian epävakaisuudesta, mikä vaikeuttaa kestävän ja luotettavan internetyhteyden ylläpitämistä (Saldana ym. 2017.)

Jaldénin ja muiden (2020) mukaan syrjäisten alueiden mobiililaajakaistan puute estää digitaalista osallisuutta ja paikallisten yritysten kasvua, rajoittaen näin maiden bruttokansantuotteen kasvua. Tämän lisäksi riittämätön yhteys vaikuttaa koulutuksen ja terveydenhuollon laatuun, mikä on merkittävä este alueelliselle kehitykselle. Myös suorien ulkomaisten investointien houkuttelemineen on haasteellista ilman luotettavaa mobiililaajakaistaa, mikä korostaa tarvetta kehittää kustannustehokasta viestintäinfrastruktuuria syrjäisille alueille. (Jaldén ym. 2020.)

Vartiainen ja muiden (2021) tutkimuksen mukaan yhteyksien saatavuus syrjäisillä ja maaseutualueilla on globaali haaste, johon nykyiset 5G-verkkojen kehitystoimet eivät riittävästi vastaa. Tutkijat ovat erityisesti keskittyneet Brasilian tilanteeseen, jossa alueelliset eriarvoisuudet kaupunkien ja syrjäseutujen välillä aiheuttavat merkittäviä sosiaalisia ja taloudellisia ongelmia. Maaseutualueiden kattamattomuus voi Brasiliassa merkittävästi rajoittaa ihmisten mahdollisuuksia hyödyntää digitaalisen maailman tarjoamia etuja, mikä vaikuttaa heidän kykynsä osallistua ja hyötyä digitaalisesta yhteiskunnasta.

2.2.5 Ratkaisut

Syrjäseutujen tietoliikenteen haasteiden voittaminen edellyttää monipuolista lähestymistapaa, joka sisältää teknologisia innovaatioita, taloudellista tukea, koulutusta ja politiikkaa, jotta voidaan parantaa tietoliikenneyhteyksiä syrjäseuduilla ja edistää digitaalista osallisuutta. On tärkeää kehittää kustannustehokasta viestintäinfrastruktuuria, mikä on keskeistä digitaalisen osallisuuden ja sosioekonomisen kehityksen edistämiseksi syrjäseuduilla. On tärkeää ymmärtää ja puuttua näihin sosioekonomisiin tekijöihin, jotta voidaan ratkaista tietoliikennehaasteet ja tukea kestävä kehitys.

Satelliittiyhteydet tarjoavat sopivan ratkaisun digitaalisen kuilun ylittämiseksi, jolloin maanpäällisten verkkojen (TN) ja ei-maanpäällisten verkkojen (NTN) integrointi voi taata jatkuvan ja saumattoman palvelun. TN-NTN-integraatio ja moniyhteyksien käyttö niiden välillä voivat paitsi varmistaa palvelun jatkuvuuden, myös edistää suorituskykytavoitteiden saavuttamista tietyissä sovelluksissa. (López ym. 2023.)

Kohtuuhintaisten yhteyksien tarjoaminen syrjäseuduilla on globaali haaste, johon perinteiset 5G-verkkojen kehityssuunnat eivät ole pystyneet tarjoamaan kattavia ratkaisuja. Tämän seurauksena on noussut tarve kehittää vaihtoehtoisia malleja, jotka mahdollistavat verkko- ja tietoliikenneyhteydet myös haasteellisille alueille, jotka perinteisesti jäävät digitaalisen kuilun toiselle puolelle. (Vartiainen ym. 2019.)

NTN-verkoilla eli ei-maanpäällisillä verkoilla odotetaan olevan merkittävä rooli 5G:n ja sitä seuraavien järjestelmien kehityksessä. NTN-järjestelmät mahdollistavat laajan alueellisen kattavuuden ja tarjoavat yhteyksiä alueille, jotka ovat kalliita tai vaikeita kattaa maanpäällisillä verkoilla, kuten syrjäseuduille, laivaliikenteelle ja lentokoneille. Tämä tekee niistä tärkeän laajennuksen maanpäällisten verkkojen tarjoamalle kattavuudelle globaaleilla markkinoilla, jossa asiakastarpeet ovat jatkuvassa muutoksessa. NTN-järjestelmien ainutlaatuisuus perustuu niiden kykyyn tarjota laajaa alueellista kattavuutta, mikä mahdollistaa yhteydet alueille, joita on taloudellisesti haastavaa tai teknisesti vaikeaa palvella

maanpäällisillä verkoilla. Satelliittien tuomat mahdollisuudet syrjäseutujen tietoliikennehaasteiden ratkaisemisessa ovat merkittäviä, sillä ne tarjoavat kriittistä infrastruktuuria palveluiden saatavuuden, jatkuvuuden ja skaalautuvuuden varmistamiseksi alueilla, joilla maanpäälliset verkot eivät yksin pysty takaamaan riittävää kattavuutta. (Rinaldi ym. 2020.)

Digitaalisen kahtiajaon ylittämiseksi on tarpeen rakentaa infrastruktuuria, parantaa digitaalista lukutaitoa ja varmistaa instituutioiden tuki digitaalisen kehityksen edistämiseksi. Esimerkkeinä onnistuneista toimista mainitaan Euroopan unionin, Korean tasavallan ja Viron toimenpiteet digitaalisen kahtiajaon kuromiseksi kiinni infrastruktuurin rakentamisen, digitaalisen koulutuksen edistämisen ja julkisen sekä yksityisen sektorin yhteistyön kautta. (IEEE 2024.)

5G-verkko syrjäisille alueille voi tarjota useita sosiaalisia ja taloudellisia etuja. Syrjäisten alueiden laajakaistayhteys voi tuoda suuren osan väestöstä digitaali-ajalla. Kansainvälisen televiestintäliiton (ITU) mukaan vain 51 prosentilla maailman väestöstä on internetyhteys, mikä tarkoittaa, että miljardeja ihmisiä elää edelleen informaation aikakauden ulkopuolella. Syrjäinen 5G-verkko voi yhdistää suuren joukon näitä ihmisiä tarjoamalla viihde-, koulutus- ja sosiaalisen median palveluita. Tätä pitkän kantaman mobiiliverkkoa voidaan käyttää myös maatalouden esineiden internetin (IoT) tukemiseen, mikä parantaa maatalojen tuottavuutta. IoT:tä voidaan käyttää myös logistiikassa tehostaakseen maataloustuotannon kuljetuksia, tiepalveluita sekä ympäristön, karjan ja katastrofien seurantaa. Kaivosteollisuus on toinen toimiala, joka voi hyötyä etäalueen mobiiliverkosta, jossa autonomisia koneita voidaan käyttää ihmisille haitallisissa ja vaarallisissa tilanteissa. (Mendes 2020.)

Syrjäisten ja etäisten alueiden asukkaille internetyhteyksien tarjoaminen satelliittiteknologian avulla edustaa merkittävää ratkaisua digitaalisen kuilun ylittämiseen. LEO-satelliittien käyttöönotto tarjoaa kustannustehokkaan lähestymistavan, joka voi nopeuttaa laajakaistapalveluiden saavutettavuutta näillä alueilla, joilla maanpäällisen infrastruktuurin rakentaminen ei ole taloudellisesti perusteltua. (Ahmmed ym. 2022.)

Starlinkin satelliittikommunikaatiojärjestelmän käyttöönotto tarjoaa merkittäviä etuja syrjäisillä ja eristyneillä alueilla, joiden maanpäällisen infrastruktuurin rakentaminen ei ole taloudellisesti tai logistisesti toteutettavissa. Tämä teknologia mahdollistaa nopean internetyhteyden tarjoamisen alueille, joilla perinteiset kommunikaatiomenetelmät ovat rajallisia tai olemattomia, edistäen näin sosioekonomista kehitystä ja digitaalista osallisuutta. (Ma & Zhang 2022).

Vaikka digitaalinen kahtiajako kattaa laajan joukon ongelmia, jotka liittyvät digitaalisen saatavuuden ja käytön epätasa-arvoon, verkkoviestinnän haasteet syrjäisillä alueilla liittyvät erityisesti yhteyksien tarjoamisen fyysisiin, taloudellisiin ja teknisiin esteisiin. Verkkoviestinnän parantaminen syrjäisillä alueilla on kriittinen askel kohti digitaalisen kuilun kaventamista, koska se ratkaisee yhden digitaalisen osallisuuden perusesteistä.

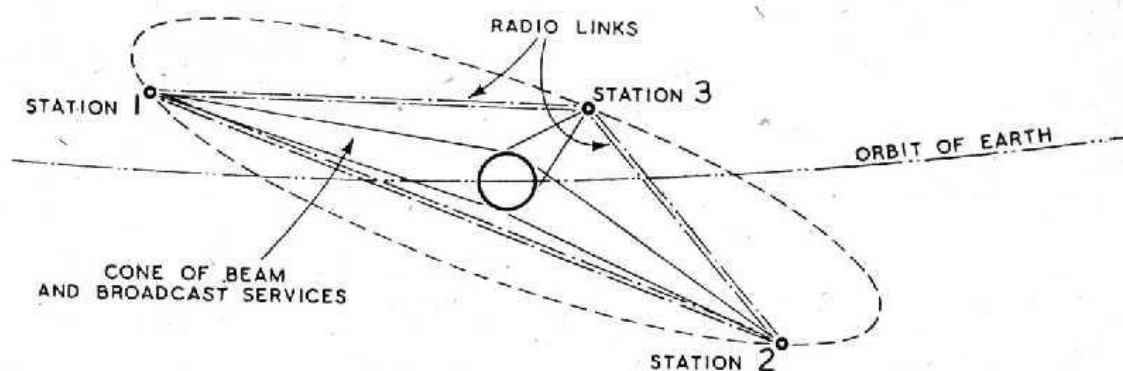
2.3 Satelliittiteknologian historia

Satelliitti on suuremman kappaleen ympärillä avaruudessa kiertävä pienempi kappale. Aurinkoa kiertävä Maa ja Maata kiertävä Kuu ovat luonnollisia satelliitteja. Yleiskielessä satelliitti tarkoittaa kuitenkin ihmisen valmistamaa laitetta, joka laukaistaan avaruuteen ja joka kiertää Maata tai muuta kappaletta avaruudessa. (Manning 2018.)

Sir Isaac Newton tutki ensimmäisenä luonnollisten satelliittien liikettä vuonna 1728 postuumististi julkaistussa teoksessaan ”De mundi systemate”. Siinä hän kuvasi Newtonin kanuunankuulakoneena tunnetussa ajatuskokeessaan sitä, miten korkealta mielikuvitusvuorelta ammuttu, oikealla nopeudella etenevä kivi voisi teoriassa kiertää Maan ympäri pyöreää kiertorataa pitkin palaten lähtöpaikkaansa. (Newton 1728.) Ensimmäisen idean keinotekoisten satelliittien hyödyntämisestä esitti Edward Everett Hale vuonna 1869 julkaistussa novellissaan ”The Brick Moon”, jossa hän esitti fiktiivisen ajatuksen suuren tiilistä tehdyn kappaleen lähettämisestä Maan kiertoradalle merenkulun navigoinnin avuksi. (Labrador 2024.) Ajatukset ja ideat ihmiskunnan avaruuteen pääsystä alkoivat

yleistyä tieteiskirjallisuudessa ja tiedemiesten keskuudessa. Kesti kuitenkin vielä pitkän aikaa ennen kuin avaruusaika alkoi.

Ensimmäisen todellisen käytännöllisen konseptin satelliittiviestinnästä esitti brittiläinen Royal Air Force -upseeri Arthur C. Clarke vuonna 1945, ehdottaen geostationaarista kiertorataa satelliittiviestinnälle (Labrador 2024.) Hän esitti vuonna 1945 julkaistussa *Wireless World* -artikkelissa, että kolme satelliittia voisi tarjota lähes maailmanlaajuisen tietoviestintäkattavuuden. Clarke visioi satelliitit geostationaarisella kiertoradalla selittäen, että satelliitti, joka on sijoitettu 42 000 km:n etäisyydelle Maan keskikohdasta, kiertoradalle, joka vastaa Maan pyörimisnopeutta, näyttäisi olevan paikallaan suhteessa Maahan. Tämä mahdollistaisi sen, että satelliitti voisi tarjota keskeytyksettömän tietoviestintäkattavuuden sille puolelle maapalloa, jonka se kohtaa. (Clarke 1945.). Clarken idean merkittävyyttä satelliittien historiassa kuvastaa se, että Geostationaarinen kiertorata satelliittien sijoittelussa tunnetaan myös käsitteenä Clarke Orbit. (Wiktionary 2023.)



Kuva 2. Arthur C. Clarken hahmotelma kolmen satelliitin tarjoamasta globaalista viestintäkattavuudesta (Clarke 1945).

Visiot alkoivat toteutua, kun ihmiskunnan avaruusaika alkoi 1950-luvulla. Neuvostoliiton onnistunut Sputnik 1:n laukaisu 4. lokakuuta 1957, maailman ensimmäisenä keinotekoisena satelliittina, aloitti Yhdysvaltojen ja Neuvostoliiton välisen avaruuskilpailun. Halkaisijaltaan 58 cm:n kokoinen ja neljällä antennilla varustettu Sputnik 1 kiersi Maata elliptisellä radalla lähettäen radiosignaaleja 22

päivää ennen akun loppumista ja pysyi kiertoradalla kolme kuukautta. (Labrador 2024.) Yhdysvaltojen vastaus tuli heti seuraavan vuoden alussa, kun sen ensimmäinen satelliitti, Explorer 1, laukaistiin avaruuteen 31. tammikuuta 1958. Se antoi merkittävän panoksen avaruustieteeseen kantamalla mukanaan kosmisen säteilyn ilmaisimen, joka johti Van Allenin säteilyvöiden löytämiseen. (NASA 2015.) Yhdysvaltojen SCORE-projektissa kehitetty ensimmäinen äänisignaaleja välittävä satelliitti puolestaan nousi avaruuteen 19. joulukuuta 1958 ja välitti maailmalle presidentti Dwight D. Eisenhowerin rauhanviestiä. Satelliittiteknologian kehitys kohti monenlaisia käyttötarkoituksia oli alkanut. (Labrador 2024.)

1960-luvulla satelliittien kehitys jatkui merkittävästi, kun alettiin perustaa suuria kansainvälisiä järjestöjä, kuten Intelsat, joka loi pohjan globaalille satelliittiviestinnälle. Tämä ajanjakso merkitsi myös transatlanttisten linkkien syntyä, mikä oli merkittävä askel satelliittiviestinnän kaupallisessa hyödyntämisessä. Satelliitit alkoivat tarjota tärkeitä palveluita, kuten televisiolähetysten ja puhelinviestinnän välitystä mantereiden välillä, mullistaen näin globaalin viestinnän. (Evans ym 2011.)

Syncom 3, lanseerattu elokuussa 1964, oli ensimmäinen geostationaarinen satelliitti, joka asetettiin 180 asteen pituuspiirille Tyynenmeren ylle. Tämä NASA:n kehittämä satelliitti oli ratkaisevassa roolissa vuoden 1964 Tokion olympialaisten televisiolähetysten välittämisessä ympäri maailmaa, osoittaen satelliittiteknologian kykyä mullistaa kansainvälinen viestintä. Syncom 3:n tekniset ominaisuudet, kuten sen kyky käsitellä puhelin- ja tietoliikennettä sekä teletyypiviestejä, olivat aikansa huippua ja auttoivat muotoilemaan tulevia viestintäsatelliitteja. Satelliitin käyttöönotto ja sen myöhempi siirto Yhdysvaltain puolustusministeriön hallintaan korostavat sen monipuolista käyttöpotentiaalia sekä siviili- että sotilaskäytössä, mikä on edelleen tärkeää nykypäivän satelliittiohjelmille. (NASA 2022.)

GPS:n (Global Positioning System) historia ulottuu Sputnik-satelliitin aikaisiin Doppler-efektin hyödyntämiseen perustuviin seurantateknikoihin. Yhdysvaltain laivaston 1960-luvulla tekemät kokeet ydinsukellusveneiden paikannukseen

osoittivat satelliittinavigoinnin potentiaalin, joka johti Yhdysvaltain puolustusministeriön NAVSTAR-projektin käynnistämiseen 1970-luvulla. Täydellinen 24 satelliitin järjestelmä, joka tuli toiminnalliseksi vuonna 1993, tarjoaa nykyään kaksi palvelutasoa: Standard Positioning Service kaikille käyttäjille ja Precise Positioning Service valikoiduille sotilaallisille ja liittoutuneiden hallitusten käyttäjille. GPS:n rooli nyky maailmassa on korvaamaton, sillä se palvelee sekä kansallista turvallisuutta että siviilikäyttäjiä, ja sen tulevaisuuden kehitys voi tuoda mukanaan entistä tarkempia ja monipuolisempia navigointiratkaisuja. (Walker 2012.)

Satelliittiteknologian kehitys ja sen sovellukset, aina navigoinnista viestintään, osoittavat kuinka pitkälle olemme edenneet Arthur C. Clarken aikaisista visioista. GPS:n kaltaiset järjestelmät ovat olleet teknologisen edistyksen kärjessä, tarjoten tarkkuutta ja luotettavuutta, jotka ovat mullistaneet niin sotilaalliset operaatiot kuin siviilikäytönkin ympäri maailmaa. Tämä edistyksen jatkumo luo luontevan siirtymän seuraavaan aiheeseen, joka on satelliittipohjainen internet, joka lupaa tuoda globaalin yhteydenpidon ja tiedonsiirron mahdollisuudet jokaisen ulottuville.

2.4 Satelliittipohjainen internet

Internetin ja World Wide Webin keksimisen jälkeen syntyi kiinnostus satelliittien kautta tarjottaviin internetyhteyksiin. Satelliittipohjaisen internetin juuret ulottuvat 1990-luvulle, jolloin ensimmäiset kaupalliset satelliitti-internetpalvelut tulivat saataville. Siitä on edetty nykyisiin tuhansien satelliittien konstellaatioihin, jotka edustavat nyt kehityksen kärkeä.

2.4.1 Kehityksen alku

1990-luvulla internetin suosion kasvaessa puhelinlinjat tukkeutuivat ja televiestintäpalveluntarjoajat kiinnostuivat satelliittiverkkojen käytöstä internetpalvelujen tarjoamiseen. Teledesic-nimisellä yrityksellä oli aikaansa edellä oleva idea rakentaa satojen satelliittien konstellaatio matalalle Maan kiertoradalle (LEO), mutta yritys epäonnistui. (Viasat 2019.) Teledesicin epäonnistuminen johtui

monista syistä. Suunnitelma oli kallis ja rahoituksen saaminen osoittautui vaikeaksi, vaikka satelliittien suunniteltua määrää vähennettiin 800 satelliitista 288 satelliittiin. Kysyntä satelliittipohjaisille palveluille jäi odotettua pienemmäksi ja muiden kilpailevien teknologioiden, kuten maanpäällisten langattomien verkkojen, kehitys tarjosi kustannustehokkaampia vaihtoehtoja datansiirtoon. Tämä teki suuren mittakaavan satelliittiverkon taloudellisesti kannattamattomaksi. Lisäksi kilpailijat, kuten Iridium ja Globalstar, joilla oli samankaltaisia suunnitelmia, joutuivat konkurssiin, mikä laski sijoittajien luottamusta vastaaviin hankkeisiin. Teledesic keskeytti lopulta satelliittien rakentamisen 2000-luvun alussa taloudellisten vaikeuksien ja sijoittajien tuen puutteen vuoksi (Chan 2002.)

Hughes Network Systems oli yksi satelliitti-internetpalvelujen kehityksen pioneereista. Heidän palvelunsa, HughesNet, tarjosi nopeampia yhteyksiä verrattuna perinteisiin puhelinlinjoihin, joka oli merkittävä parannus erityisesti alueilla, joilla maanpäällistä infrastruktuuria ei ollut. Hughesin insinöörien käyttämä satelliittitekniikka lyhensi internetin latausaikoja huomattavasti. (Hughes 2022.)

Tämä ajanjakso merkitsi käytännön sovellusten ja ideoiden kohtaamista, jolloin ensimmäiset satelliitti-internetpalvelut alkoivat mahdollistaa yhteydet maantieteellisesti haastaville alueille. Vaikka nämä varhaiset yhteydet olivat usein hitaita ja kalliita, ne tarjosivat uuden mahdollisuuden tarjota välttämättömiä palveluja alueille, joissa muita internetyhteyksiä ei ollut saatavilla.

2.4.2 Teknologian Evoluutio

Teknologian kehittyessä 2000-luvun alussa, satelliitti-internetin nopeudet parantivat merkittävästi. Erityisen merkittävä askel otettiin vuonna 2004, kun kansainvälisen satelliittiyhtiö Telesat Canadan Anik F2 -satelliitti laukaistiin geostationaariselle kiertoradalle. Anik F2 oli tuolloin maailman suurin kaupallinen telekommunikaatiosatelliitti. Tämä satelliitti paransi huomattavasti internetyhteyksien nopeuksia tarjoten laajan kattavuuden koko Pohjois-Amerikassa. Anik F2 kantoi 38 Ka-band, 32 Ku-band ja 24 C-band transponderia, joiden ansiosta se

pystyi tarjoamaan kaksisuuntaisia, nopeita internetyhteyksiä. (Arianespace 2004.)

Lisäksi Anik F2 toimi alustana WildBlue-internetpalvelulle, joka oli Viasatin edeltäjä ja tarjosi nopeuksia, jotka olivat yli 30 kertaa nopeampia kuin perinteiset puhelinmodeemit. Tämän palvelun myötä yhteyksien nopeus oli jopa 1.5 Mbps, kapasiteetin ollessa jopa 2 Gbps. (Viasat 2024.)

2010-luvulla Maan matalan kiertoradan (LEO) satelliittiteknologian kehitys ja onnistunut käyttöönotto toivat merkittäviä parannuksia viiveen vähentämisessä ja yhteyksien laadussa (Daehnick ym. 2020.). Tämä kehitys teki satelliittipohjaisesta internetistä entistä kilpailukykyisemmän vaihtoehdon maanpäällisille verkoille, erityisesti syrjäisillä ja vaikeapääsuisillä alueilla. LEO-satelliitit, toimiesaan paljon lähempänä maapalloa kuin geostationaariset satelliitit, mahdollistavat nopeammat yhteydet ja pienemmän latenssin, joka on kriittistä reaaliaikaisia vastauksia vaativissa sovelluksissa.

2.4.3 Haasteet ja ratkaisut

Satelliittipohjainen internet on kehittynyt merkittävästi viime vuosina, mutta sen kehitykseen liittyy edelleen useita haasteita. Keskeisimpiä haasteita ovat latenssin hallinta, sään vaikutus yhteyslaatuun, ja kasvavat ympäristöhuolet, kuten avaruusromun määrän lisääntyminen. Uudet teknologiset innovaatiot, kuten laser-teknologiaa hyödyntävät satelliittien väliset linkit, ovat auttaneet parantamaan datan siirtonopeuksia ja vähentämään latenssia luomalla avaruuteen verkkomaisen infrastruktuurin. (Dascalu 2024.)

Toinen keskeinen haaste on globaalin sääntelyn monimutkaisuus, joka vaikuttaa satelliittipohjaisen internetin laajempaan käyttöönottoon ja lisenssien hallintaan (Dascalu 2024.). Näistä haasteista huolimatta satelliittipohjainen internet tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia, erityisesti syrjäisille ja vaikeapääsuisille alueille, joilla perinteinen maanpäällinen infrastruktuuri puuttuu.

2.4.4 LEO-kiertoradan satelliittijärjestelmät

Starlink, OneWeb ja Kuiper ovat pääkilpailijoita Maan matalan kiertoradan satelliittikonstellaatioissa, jotka tarjoavat globaalisti saatavilla olevaa laajakaistayhteyttä. LEO-järjestelmien tarjoama matalampi kiertorata mahdollistaa nopeammat datasiirtoajat ja lyhyemmät viiveet, mikä on olennaista nykyaikaisissa mediasovelluksissa, mutta haastavaa viiveherkissä sovelluksissa kuten videopuheiluissa ja online-pelaamisessa. (Osoro & Oughton, 2021.)

Vaikka LEO-satelliittiyhteyksien kapasiteetti voi olla rajoitettua, kun resurssit jaetaan kasvavassa määrin käyttäjille jokaisessa satelliitin peittoalueella, tutkimuksen mukaan Starlink pystyy tarjoamaan keskimäärin 24,94 Mbps käyttäjäkohtaista kapasiteettia alueilla, joilla on 0,1 käyttäjää neliökilometriä kohden. Tämä osoittaa, että vaikka kapasiteetti on rajoitettua, Starlinkilla on potentiaalia tarjota kilpailukykyistä palvelua syrjäseuduilla, missä muut laajakaistavaihtoehdot eivät ole taloudellisesti toteutettavissa. (Osoro & Oughton, 2021.)

Starlinkin, OneWebin ja Kuiperin kaltaiset satelliittimegakonstellaatiot tarjoavat lukuisia etuja, kuten verkon kattavuuden lisääntymisen, latenssien vähenemisen ja langattoman viestinnän luotettavuuden kasvun. Nämä teknologiat mahdollistavat uusien markkinoiden kehittämisen, palvelujen tarjoamisen katastrofitilanteissa sekä esineiden internet (IoT) -palveluiden paremman toteuttamisen. (Bod ym. 2023.)

Vaikka nämä teknologiat tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia, niihin liittyy myös uhkia ja riskejä, kuten lisääntyvä taajuushäiriö, alentunut taivaan näkyvyys, kansallisten verkkojen valvonnan väheneminen ja turvallisuushaavoittuvuudet. On tärkeää, että päätöksentekijät analysoivat näitä uusia teknologioita huolellisesti, välttämällä ennako-oletuksia. (Bod ym. 2023.)

2.4.5 Starlink-satelliittijärjestelmän esittely

Starlink on SpaceX-yhtiön kehittämä satelliittijärjestelmä, jonka tavoitteena on tarjota nopeita internetyhteyksiä maailmanlaajuisesti. Vuonna 2019 käynnistyneen hankkeen tarkoituksena on parantaa internetin saatavuutta erityisesti maantieteellisesti haastavilla ja vähemmän kehittyneillä alueilla. Starlink-verkon on suunniteltu käsittävän ainakin 12 000, tai jopa 40 000, satelliittia, jotka sijoituvat keskimäärin noin 500 kilometrin korkeudelle Maan pinnasta. (URSA 2024.)

Starlink on maailman ensimmäinen ja suurin Maan matalan kiertoradan satelliittikonstellaatio, joka tarjoaa laajakaistayhteyksiä internetiin maailmanlaajuisesti ja mahdollistaa suoratoiston, verkkopelit, videopuhelut ja muita toimintoja. Tämä satelliittiverkko koostuu tuhansista noin 550 kilometrin korkeudessa kiertävistä satelliiteista. Matalampi kiertorata vähentää viiveen noin 25 millisekuntiin, kun taas perinteisten geostationaaristen (GEO) satelliittien yhteyksissä viive voi ylittää 600 millisekuntia, mikä vaikeuttaa viiveherkkiä sovelluksia. Lisäksi SpaceX on maailman johtava laukaisupalveluiden tarjoaja ja ainoa satelliittioperaattori, jolla on mahdollisuus laukaista omia satelliittejaan tarpeen mukaan. Säännöllisten ja edullisten laukaisujen ansiosta Starlink-satelliitteja päivitetään jatkuvasti uusimmalla teknologialla. (Starlink Technology 2024.)

Starlink tarjoaa tällä hetkellä peruskäyttöön kolme erilaista palvelupakettia. Residential-paketti on peruspaketti, jota tarjotaan tällä hetkellä hintaan 50 €/kk rajoittamattomalla datalla. Roam-paketti sopii liikkuvan käytön tarpeisiin ja on saatavilla joko 50 GB datalla 40 €/kk tai rajoittamattomalla datalla 72 €/kk. Boats eli Mobile Priority -paketti on tarkoitettu merenkulkuun ja liikkuville yrityksille, ja sen hinta on 296 €/kk 50 GB datalla ja 1 185 €/kk 1 TB datalla. (Starlink Service Plans Personal 2024.)

Starlink tarjoaa liiketoimintaan tarkoitettuja palvelupaketteja eri käyttötarkoituksiin. Fixed Site -paketti on suunniteltu yrityksille ja suurkuluttajille, tarjoten rajoittamatonta standardidataa ja muita etuja, kuten julkisen IP-osoitteen, alkaen 70 €/kk 40 GB prioriteettidatalla. Land Mobility- ja Maritime-pakettien hinnat alkavat

239 €/kk 50 GB prioriteettidatalla, ja ne on suunnattu merenkulkuun, hätäpalveluihin ja liikkuville yrityksille, tarjoten liikkeessä käytettävää rajoittamatonta datayhteyttä. (Starlink Service Plans Business 2024.)

Starlinkin peruspaketti sisältää kaiken tarvittavan nopean internetyhteyden luomiseen. Pakettiin kuuluvat Starlink-satelliittiantenni, jalusta, Gen 3 -reititin, Starlink-kaapeli, AC-virtajohto ja virtalähde, jotka yhdessä mahdollistavat internetyhteyden muodostamisen Starlinkin satelliittiverkon kautta. (Starlink Residential 2024.)



Kuva 3. Starlink-satelliittiantenni (Starlink 2024).

2.4.6 Tulevaisuuden näkymät

Satelliittipohjaisen internetin tulevaisuus näyttää lupaavalta, kun uusien satelliittien laukaisut jatkuvat ja teknologia kehittyy. On tärkeää seurata, miten tämä kehitys vaikuttaa internetin globaaliin saatavuuteen, erityisesti syrjäseutujen osalta, ja miten satelliittipohjainen internet integroituu osaksi laajempaa tietoliikenneinfrastruktuuria ja millaisia uusia mahdollisuuksia se avaa tulevaisuudessa. Pravin Pradeepin mukaan, teollisuusanalyttikko ja konsultti Frost & Sullivanista, LEO-satelliittien merkitys kansalliselle turvallisuudelle korostuu, kun sekä Yhdysvaltojen että Euroopan investoinnit, kuten yli 8 miljardin dollarin

suuntaukset Proliferated Warfighter Space Architectureen, ovat merkittäviä. (Via Satellite 2024.)

Teknologian integraatio, kuten tekoälyn ja reunatietojenkäsittelyn hyödyntäminen, mahdollistaa monimutkaisen datan analysoinnin suoraan satelliiteissa, vähentäen viiveitä ja tehostaen tiedonkäsittelyä reaaliaikaisissa sovelluksissa kuten ympäristönvalvonnassa ja katastrofitilanteiden hallinnassa. Andrew Cavalier, ABI Researchin vanhempi analyytikko, korostaa, kuinka tekoälyn ja reunatietojenkäsittelyn yhdistäminen mahdollistaa nopeamman ja tehokkaamman datan käsittelyn, mikä on kriittistä reaaliaikaista tietoa vaativissa sovelluksissa. (Via Satellite 2024.)

Markkinatutkimukset ennustavat, että LEO-satelliittimarkkinat kasvavat merkittävästi tulevina vuosina, mikä viittaa teknologian kasvavaan merkitykseen niin kaupallisessa käytössä kuin kansallisessa turvallisuudessaakin. Tämä kehitys tulee varmasti jatkumaan, ja tulevaisuudessa voidaan odottaa vieläkin nopeampia yhteyksiä, parempaa globaalia peittoa ja uusien teknologioiden käyttöönottoa. Analyytikko Chris Baugh huomauttaa, että moniratastrategiat ja uudet markkinat, kuten suoraan laitteeseen -yhteydet, voivat tarjota uusia kasvumahdollisuuksia satelliittialalle (Via Satellite 2024.)

Yhteenvedona voidaan todeta, että LEO-satelliittiteknologian kehitys näyttää avaavan uusia ovia ja mahdollisuuksia globaalissa mittakaavassa, ja sen vaikutus tulee olemaan merkittävä niin teknologian, talouden kuin yhteiskunnallisenkin näkökulmasta.

3 Tutkimusmenetelmät

3.1 Valitut tutkimusmenetelmät

Tässä opinnäytetyössä käytetään tutkimusmenetelminä narratiivista kirjallisuuskatsausta ja teknisiä mittauksia. Näiden avulla analysoidaan Starlink-satelliittiverkon potentiaalia syrjäseutujen tietoliikennehaasteiden ratkaisijana.

Kirjallisuuskatsauksella pyritään luomaan laaja yleiskuva aiheesta, kun taas tekniset mittaukset tuovat käytännön tutkimustietoa Starlink-verkon suorituskyvystä.

3.2 Tutkimusalueen valinta

Starlink on noussut merkittäväksi satelliittipohjaisen internetin tarjoajaksi, ja sen mahdollisuudet erityisesti syrjäseuduilla ovat herättäneet kasvavaa kiinnostusta. Perinteisten kiinteiden ja mobiiliverkkoyhteyksien haasteet, kuten infrastruktuurin puutteellisuus ja korkeat kustannukset, rajoittavat tietoliikenneyhteyksien saatavuutta erityisesti harvaanasutuilla alueilla. Starlinkin innovatiivinen teknologia voi tarjota tähän ratkaisun, sillä sen kattava satelliittiverkosto mahdollistaa yhteydet jopa maantieteellisesti eristyneille alueille.

Tutkimusalueen valintaa tukee myös se, että syrjäseuduilla monesti tietoliikenneyhteyksien heikko saatavuus rajoittaa paitsi yksilöiden yhteyksiä, myös alueiden taloudellista ja sosiaalista kehitystä. Pääsy digitaalisiin palveluihin on tänä päivänä keskeinen osa terveydenhuollon, koulutuksen ja paikallisten yritysten toimintaa. Syrjäseutujen tietoliikenneyhteyksien parantaminen voi siis vahvistaa näiden alueiden taloutta, hyvinvointia ja tasa-arvoista kehitystä.

Lisäksi 3G-verkkojen poistuminen käytöstä korostaa tarvetta uusille ratkaisuille alueilla, joilla 4G- ja 5G-verkkoteknologiaa ei ole riittävästi saatavilla. Vaikka 3G-verkoista luopuminen on osa operaattoreiden siirtymää tehokkaampiin ratkaisuihin, se aiheuttaa samalla haasteita alueilla, joissa uusimpien teknologioiden käyttöönotto ei ole taloudellisesti perusteltua. Starlink voisi tällöin toimia vaihtoehtona tarjoamalla suorituskykyisiä tietoliikenneyhteyksiä, jotka täyttävät sekä nykyaikaiset teknologiset että käyttäjien tarpeet.

Näiden tekijöiden perusteella Starlink-satelliittiverkko on valittu tutkimuksen kohteeksi sen potentiaalin vuoksi vastata laajempiin sosiaalisiin, taloudellisiin ja infrastruktuurillisiin haasteisiin syrjäseuduilla.

4 Kirjallisuuskatsaus

Tämän kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on selvittää, miten Starlink-satelliittiverkko voi vaikuttaa tietoliikenneinfrastruktuuriin syrjäisillä ja huonosti saavutettavilla alueilla. Erityisesti katsauksessa tutkitaan Starlinkin teknistä kapasiteettia ja suorituskykyä, sekä verrataan sitä muihin tietoliikennetkaisuuihin. Lisäksi arvioidaan, millaisia sosioekonomisia vaikutuksia Starlinkin käyttöönotolla on syrjäseuduilla. Tuloksissa tarkastellaan satelliittiteknologian tarjoamia kestäviä ja tehokkaita yhteyksiä sekä niiden potentiaalia kaventaa globaalia digitaalista kii-
lua. Myös teknologian käyttöönottoon liittyvät haasteet ja mahdolliset sosioekonomiset vaikutukset otetaan huomioon. Näin ollen tämä kirjallisuuskatsaus pyrkii kokoamaan ja analysoimaan olemassa olevia tieteellisiä tutkimuksia, jotka kuvaavat Starlinkin teknisiä ominaisuuksia ja vaikutuksia syrjäseutujen kehitykseen.

4.1 Kuvaileva kirjallisuuskatsaus

Tässä kirjallisuuskatsauksessa käytetty lähestymistapa on kvalitatiivinen eli laadullinen, toteutettuna narratiivisena kuvailevana katsauksena. Salminen (2023) toteaa, että kuvaileva kirjallisuuskatsaus on yleinen perusmuoto, joka tarjoaa kattavan yleiskuvan aiheesta ilman tiukkoja metodologisia rajoituksia. Aineiston valinta ei ole rajattu tiukasti metodisiin kriteereihin, mikä mahdollistaa ilmiöiden laajan tarkastelun ja luokittelun tarvittaessa. Tämän tyyppisessä katsauksessa tutkimuskysymykset ovat tyypillisesti avoimempia kuin systemaattisissa kirjallisuuskatsauksissa tai meta-analyyseissä. (Salminen 2023.) Tässä kirjallisuuskatsauksessa tutkimuskysymyksiä käytettiin tämän opinnäytetyön tutkimuskysymyksiä.

Salmisen (2023) mukaan kuvailevasta kirjallisuuskatsauksesta erottuu kolme hieman erilaista versiota, joita ovat narratiivinen, kartoittava ja integroiva katsaus. Green ja muut (2006) selostavat, kuinka narratiiviset kirjallisuuskatsaukset edistävät tutkimustiedon ajantasaistamista, vaikkakaan ne eivät pääsääntöisesti tarjoa syvällisimpiä analyysyjä. He toteavat, että erityisesti opetuslalla

narratiivisia kirjallisuuskatsauksia käytetään paljon, sillä ne mahdollistavat ajan-kohtaisen tiedon tarjoamisen, mikä ei aina ole mahdollista käyttämällä muita tieteellisen tutkimuksen menetelmiä.

Tämä kirjallisuuskatsaus toteutettiin narratiivisena, koska Starlink-satelliittiverkko on melko uusi asia tutkimuskentässä ja sen moninaiset vaikutukset, erityisesti syrjäseutujen tietoliikenneinfrastruktuuriin, ovat vielä osittain tutkimatta. Narratiivinen lähestymistapa antaa mahdollisuuden laajempaan, tarinalliseen ja kokonaisvaltaiseen käsittelyyn, joka on olennaista uusien ja kehittyvien teknologioiden kohdalla. Lisäksi se mahdollistaa monipuolisten ja eri lähteistä peräisin olevien tietojen yhdistämisen, mikä on tärkeää, kun pyritään ymmärtämään Starlinkin kaltaisen innovaation monitahoiset sosioekonomiset vaikutukset ja tekniset ominaisuudet. Näin ollen narratiivinen katsaus ei vain valota Starlinkin teknisiä ja sosioekonomisia ulottuvuuksia, vaan myös rakentaa kattavan tarinan sen mahdollisista tulevaisuuksista ja haasteista.

4.2 Aineiston valinta

Tässä kirjallisuuskatsauksessa noudatettiin Kangasniemen ja muiden (2013) kuvaileman kirjallisuuskatsauksen metodologisia vaiheita. Aineiston valinta ohjautui tutkimuskysymysten mukaan, jonka jälkeen siirryttiin aineiston kuvailevaan analyysiin ja päätelmien tarkasteluun.



Kuva 4. Kuvailevan kirjallisuuskatsauksen vaiheet ja erityispiirteet (Kangasniemi ym. 2013).

Kangasniemen ja muiden (2013) mukaan kuvailevan kirjallisuuskatsauksen prosessi sisältää aineiston valinnan, joka perustuu tutkimuskysymyksiin. Tämän jälkeen aineistosta muodostetaan kuvaus ja analysoidaan tulokset. Tässä opinäytetyössä keskeistä aineistoa haettiin kansainvälisistä tietokannoista, kuten IEEE Xplore ja ACM Digital Library, käyttäen hakusanoja, jotka liittyivät suoraan Starlink-verkkoon ja sen käyttöön syrjäisillä alueilla. Lisäksi hakuja tehtiin myös Google-haulla, jolla pyrittiin löytämään lisätietoa edellä mainittujen tietokantojen ulkopuolelta.

Hakusanoina käytettiin "starlink remote area", "remote area internet starlink" ja "starlink internet". Hakutuloksista valittiin artikkelit ja tutkimukset, joista ensin luettiin tiivistelmät ja yhteenvedot. Valintaan vaikuttivat myös artikkelien julkaisuaikakohdat, joista pyrittiin valitsemaan mahdollisimman ajankohtaisia lähteitä nopeasti kehittyvän teknologian kuvaamiseksi. Hakuprosessin tuloksena valikoitui neljätoista keskeistä lähdettä, joista kolme karsittiin pois, koska niiden sisältö ei ollut olennainen tässä kontekstissa. Jäljelle jääneet lähteet muodostavat monipuolisen kokoelman tieteellisiä tutkimuksia, jotka tarjoavat kattavan ymmärryksen Starlinkin teknisistä ominaisuuksista, suorituskyvystä ja sosioekonomisista vaikutuksista syrjäseuduilla. Näistä kahdeksan valittua lähdettä on IEEE Xplore -tietokannasta, kaksi ACM Digital Library -tietokannasta ja yksi Google-haun kautta löytynyt tieteellinen tutkimus.

Nämä aineistot mahdollistavat syvällisen tarkastelun siitä, kuinka satelliittitekнологia voi auttaa kaventamaan globaalia digitaalista kuilua ja tuoda kestäviä yhteyksiä alueille, joille perinteiset tietoliikennetkaisuut eivät ulotu. Aineistojen avulla analyysi keskittyy erityisesti Starlink-verkon vaikutuksiin syrjäseutujen tietoliikenneinfrastruktuurin kehittämisessä, tuoden esille sekä teknologian mahdollisuuksia että haasteita.

4.3 Analyysi

Tässä kirjallisuuskatsauksen analyysissä tarkastellaan Starlink-satelliittiverkon teknisiä ominaisuuksia, sen vaikutuksia syrjäseutujen kehitykseen ja roolia

digitaalisen kuilun kaventajana. Pyrkimyksenä on ymmärtää ne keskeiset mekanismit, jotka mahdollistavat tämän teknologian mahdollisuuksia globaalina muutosvoimana alueilla, joilla nykyiset tietoliikenneyhteydet ovat puutteellisia. Analyysissä käsitellään vertailutietoja ja tutkimustuloksia, jotka liittyvät Starlinkin tarjoaman satelliittilaajakaistan suorituskykyyn ja sen käyttöönoton sosioekonomisiin vaikutuksiin. Tavoitteena on antaa kattava näkemys tämän modernin teknologian potentiaalista syrjäseutujen tietoliikenteen ja teknologisen tasa-arvoisuuden parantamisessa.

4.3.1 Starlink-satelliittiverkon tekninen suorituskyky

Starlink-satelliittiverkon tekninen suorituskyky on ollut keskeinen tekijä syrjäseutujen tietoliikenteen kehityksessä. Ahmmedin ja muiden (2022) mukaan Starlinkin tarjoama korkea datanopeus ja alhainen latenssi ovat mullistaneet internet-yhteyksien saatavuuden ja laadun kaukaisilla alueilla. Bod ja muut (2023) korostavat mega-konstellaatioiden, kuten Starlinkin, merkitystä nopeiden datayhteyksien lisäämisessä ja latenssin vähenemisessä, jotka ovat olennaisia etuja syrjäisillä alueilla, missä perinteiset yhteydet ovat rajallisia. Ma ja muut (2022) toteavat, että Starlinkin yli 100 Mbps latausnopeudet ylittävät usein Yhdysvaltojen 5G-verkkojen nopeudet, mikä tekee siitä varteenotettavan vaihtoehdon alueilla, joilla maanpäällinen infrastruktuuri puuttuu.

Beckman ja muut (2024) ovat tutkimuksissaan havainneet, että Starlink tarjoaa huomattavasti parempaa läpäisykykyä verrattuna kännykkäverkkoihin, saavuttaen jopa kymmenkertaisen mediaaniläpäisykyvyn. Tämä korostaa Starlinkin potentiaalia tarjota tehokkaampaa ja luotettavampaa internetyhteyttä alueille, joilla perinteiset yhteydet ovat heikkoja. Ma ja muut (2023) sekä Lian ja muut (2022) toteavat, että matalan kiertoradan satelliittiverkot, kuten Starlink, tarjoavat pienemmän viiveen ja suuremman kapasiteetin, mikä on ratkaisevan tärkeää syrjäisillä ja huonosti saavutettavilla alueilla.

López ja muut (2023) sekä Pachler ja muut (2021) ovat osoittaneet, että Maan matalan kiertoradan (LEO) satelliittiverkot tarjoavat alhaisen latenssin ja suuren

kapasiteetin, ja ovat vähemmän alttiita ulkoisille ympäristövaikutuksille, mikä tekee niistä ihanteellisia syrjäisille alueille. Lisäksi Mohan ja muut (2024) toteavat, että Starlink-verkon globaali suorituskykyanalyysi, joka perustuu 19,2 miljoonaa M-Lab-nopeustestiin 34 maasta, osoittaa, että Starlink pystyy kilpailemaan maanpäällisten verkkojen kanssa alueilla, joissa maanpäällinen infrastruktuuri on puutteellista tai puuttuu kokonaan.

4.3.2 Starlinkin rooli syrjäseutujen tietoliikenteen parantamisessa

Starlink-satelliittiverkon rooli syrjäseutujen tietoliikenteen parantamisessa on merkittävä. Ahmmedin ja muiden (2022) mukaan Starlink voi tarjota kestäviä ratkaisuja haasteisiin, jotka liittyvät luotettavan ja nopean internetyhteyden puutteeseen syrjäisillä alueilla. Tämän seurauksena voidaan saavuttaa merkittäviä parannuksia niin tietoliikenteen nopeudessa kuin yhteiskunnallisessa ja taloudellisessa inklusiivisuudessa. Bodin ja muiden (2023) mukaan, kun satelliittiverkot laajenevat, ne voivat tarjota kriittistä infrastruktuuria syrjäisille alueille, edistäen koulutusta, terveydenhuoltoa ja taloudellista kehitystä.

Ma ja muut (2022) toteavat, että vaikka Starlinkin käyttäjämäärä on tällä hetkellä rajallinen, sen potentiaali palvella syrjäisiä ja vaikeapääsyisiä alueita on merkittävä. Starlink-verkko voi tarjota nopean ja luotettavan internetyhteyden alueille, joille muutoin olisi haastavaa tai taloudellisesti kannattamatonta rakentaa perinteistä verkkoinfrastruktuuria. Beckman ja muut (2024) lisäävät, että Starlink mahdollistaa internetyhteyksien saatavuuden ja laadun parantumisen erityisesti Pohjois-Skandinavian kaltaisilla harvaan asutuilla ja maantieteellisesti haastavilla alueilla.

Lian ja muut (2022) korostavat, että Starlinkin globaali kattavuus tekee siitä sopivan käytettäväksi meri- ja ilmailuliikenteen viestinnässä sekä alueilla, joilla tietoliikenneinfrastruktuurin rakentaminen on taloudellisesti kestänytöntä. López ja muut (2023) toteavat, että Starlinkin tarjoama yleinen peitto ja palvelujatkuvuus tekevät siitä erinomaisen vaihtoehdon alueille, joilla perinteisen tietoliikenneinfrastruktuurin rakentaminen ei ole kustannustehokasta. Pachlerin ja muiden

(2021) tutkimus tukee näitä havaintoja, osoittaen että Starlinkin kaltaiset LEO-satelliittiverkot voivat tarjota kattavan ja jatkuvan tietoliikennepalvelun syrjäisille alueille, mikä on erityisen merkittävää digitaalisen kuilun kaventamiseksi.

Starlinkin kyky tarjota alhainen latenssi ja korkea kaistanleveys tukee reaaliaikaisia, latenssi- ja kaistanleveyskriittisiä sovelluksia, kuten Zoom-videoneuvotte-
luita ja pilvipelaamista, vertailukelpoisesti 5G- ja kuituverkkojen kanssa opti-
mioloissa (Mohan ym., 2024). Tämä osoittaa, että teknologia ei ainoastaan pa-
ranna yhteyksiä syrjäisillä alueilla, vaan se myös mahdollistaa modernien digi-
taalisten palveluiden saavutettavuuden alueilla, joilla perinteinen infrastruktuuri
puuttuu tai on puutteellinen.

4.3.3 Starlinkin sosioekonomiset vaikutukset

Starlink-satelliittiverkon vaikutus syrjäseutujen sosioekonomiseen kehitykseen on ollut merkittävä. Ahmmedin ja muiden (2022) tutkimuksen mukaan Starlinkin tarjoama nopea internet voi parantaa merkittävästi koulutuksen ja terveydenhuollon saatavuutta sekä tukea paikallista talouskasvua alueilla, joilla yhteydet ovat perinteisesti olleet hitaita tai epäluotettavia. Bod ja muut (2023) korostavat, että Starlinkin kaltaiset satelliittiyhteydet voivat vähentää digitaalista kuilua ja tarjota etäalueiden asukkaille pääsyn globaaleihin resursseihin ja markkinoihin, edistäen näin sosioekonomista kehitystä.

Ma ja muut (2022) ovat huomauttaneet, että nopea internet mahdollistaa etätyön ja digitaalisten palveluiden käytön, mikä voi kääntää väestökadon ja elvyttää paikallistalouksia. Beckmanin ja muiden (2024) mukaan Starlink voi myös tukea alueellista kehitystä ja taloudellista kasvua tarjoamalla uusia mahdollisuuksia etätyöhön, digitaalisiin palveluihin ja koulutukseen, mikä vähentää alueellista eriarvoisuutta ja edistää sosiaalista inklusiivisuutta.

Lian ja muut (2022) sekä López ja muut (2023) ovat todenneet, että Starlink-verkon laajentuminen voisi nopeuttaa syrjäseutujen digitalisaatiota ja tukea uusien sovellusten kehittämistä maataloudessa ja kuljetusalalla. Tämä ei

ainoastaan paranna kilpailukykyä, vaan myös edistää kustannustehokkaampaa ja kestävämpää liiketoimintaa. Pachler ja muut (2021) sekä Mohan ja muut (2024) lisäävät, että Starlinkin globaali internetyhteys voi mullistaa yhteydet erityisesti katastrofialueilla ja muilla vaikeapääsuisillä alueilla, tarjoten tärkeää tukea alueille, joissa maanpäällinen infrastruktuuri on vaurioitunut tai täysin puuttuu.

Nämä havainnot osoittavat, että Starlinkin vaikutukset ulottuvat laajalle, parantaen elämänlaatua ja taloudellisia mahdollisuuksia syrjäseuduilla, jotka aiemmin olivat jääneet digitaalisen kehityksen ulkopuolelle.

4.3.4 Ongelmat ja haasteet

Vaikka Starlink tarjoaa merkittäviä etuja syrjäisille alueille, sen toimintaan liittyy useita haasteita. Ahmmedin ja muiden (2022) mukaan yksi keskeisistä ongelmista on satelliittien lyhyt elinikä ja korkeat korvauskustannukset, jotka tekevät palvelun ylläpidosta haastavaa erityisesti syrjäisillä alueilla. Myös alhainen kierorata lisää tarvetta tiheille satelliittien vaihdoille, mikä nostaa operatiivisia kustannuksia ja haasteita. Lisäksi on välttämätöntä hallita avaruusromua ja taajuushäiriöitä, mikä vaatii jatkuvaa teknologista kehittämistä ja sääntelyn noudattamista.

Bodin ja muiden (2023) mukaan Starlinkin kaltaiset satelliittimegakonstellaatiot kärsivät myös taajuusinterferenssistä ja taivaan näkyvyyden vähenemisestä. Nämä teknologiat luovat lisäksi uhkia kansalliselle ja sotilaalliselle turvallisuudelle ja edistävät avaruusromun määrän kasvua, mikä korostaa sääntelyn ja teknologisen kehityksen tarvetta.

Ma ja Zhang (2022) huomauttavat, että vaikka Starlink voi tarjota lupaavia ratkaisuja syrjäisille alueille, se ei pysty kilpailemaan 5G:n kanssa kaupunkiympäristöissä viiveen ja kapasiteetin suhteen. Beckman ja muut (2024) puolestaan toteavat, että vaikka Starlink tarjoaa parempaa läpäisykykyä arktisilla alueilla

verrattuna matkapuhelinverkkoihin, se kärsii useammista yhteyskatkoksista, mikä voi olla haasteellista erityisesti politiikan ja tukipolitiikoiden näkökulmasta.

López ja muut (2023) korostavat maanpäällisten ja ei-maanpäällisten verkkojen (TN ja NTN) yhdistämisen merkitystä maaseutualueiden yhteyksien parantamisessa. Heidän tutkimuksensa mukaan yhdistetty lähestymistapa voi parantaa merkittävästi palvelua syrjäisillä alueilla, täyttämällä katvealueet ja saavuttamalla tärkeät latenssitavoitteet korkealla luotettavuudella.

Nämä haasteet ja ongelmat osoittavat, että vaikka Starlink tarjoaa monia mahdollisuuksia, sen laajamittainen käyttöönotto ja ylläpito vaativat merkittäviä investointeja, sääntelyä ja teknologista kehitystä, jotta voidaan varmistaa palvelun kestävyys ja luotettavuus globaalissa mittakaavassa.

4.3.5 Tarkastelu ja johtopäätökset

Tässä kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltiin Starlink-satelliittiverkon mahdollisuuksia ja haasteita syrjäseutujen tietoliikenneyhteyksien parantamisessa sekä digitaalisen kuilun kaventamisessa. Starlinkin tekninen suorituskyky ja kattavuus ovat osoittaneet merkittävää potentiaalia parantaa yhteyksiä syrjäisillä alueilla, joissa perinteiset tietoliikennetkaisuivat eivät ole toimivia. Nopea yhteys ja riittävän alhainen latenssi tukevat yhteiskunnallista ja taloudellista kehitystä alueilla, joilla puutteellinen infrastruktuuri on hidastanut digitaalista inklusiota ja taloudellista kasvua. Starlinkin avulla saavutettava yhteys voi mahdollistaa syrjäseuduille monipuolisempia palveluita, kuten koulutusta, terveydenhuoltoa ja etätömahdollisuuksia, mikä parantaa paikallisten asukkaiden elämänlaatua ja osallistumismahdollisuuksia globaalissa yhteisössä.

Katsaus kuitenkin osoittaa, että Starlinkin käyttöön liittyy merkittäviä teknologisia ja sääntelyyn liittyviä haasteita, jotka voivat rajoittaa sen laajamittaista käyttöä. Satelliittien elinkaari, korkeat korvauskustannukset ja operatiivisten kustannusten nousu, erityisesti tiheän satelliittiverkon tarpeen vuoksi, ovat suuria kysymyksiä palvelun taloudelliselle kestävyydelle. Lisäksi avaruusromun hallinta ja

taajuushäiriöiden ehkäisy edellyttävät jatkuvaa teknologista kehitystä ja sääntelyn päivittämistä, jotta varmistetaan avaruuden käytön kestävyys pitkällä aikavälillä. Näiden haasteiden ratkaiseminen on erityisen tärkeää laajamittaisen satelliittien käytön mahdollistamiseksi.

Starlinkin kohdalla merkittävää on myös sen verkon suorituskykyyn vaikuttavat tekijät, kuten 15 sekunnin välein tapahtuvat uudelleenkonfiguraatiot, jotka voivat heikentää yhteyden laatua ja aiheuttaa vaihteluita erityisesti syrjäisillä alueilla. Tämä osoittaa, että teknologian käyttö vaatii tarkkaa tasapainoilua luotettavuuden ja teknisten rajoitteiden välillä, erityisesti alueilla, joissa perinteisen infrastruktuurin tuki on vähäinen. Näiden seikkojen vuoksi Starlinkin täysi potentiaali syrjäisillä alueilla voi toteutua vasta, kun teknologian ja infrastruktuurin haasteisiin löydetään toimivia ratkaisuja.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että Starlinkilla on merkittävää potentiaalia syrjäseutujen tietoliikenneongelmien ratkaisemisessa ja digitaalisen kuilun kaventamisessa. On selvää, että Starlink voi olla keskeinen tekijä syrjäseutujen kestävä kehityksen tukemisessa, mutta tämän potentiaalın toteutuminen edellyttää jatkuvaa panostusta teknologiseen kehitykseen ja haasteiden ratkaisemiseen.

5 Tekniset mittaukset

Työssä oli tavoitteena mitata Starlink-satelliittiyhteyden kautta tapahtuvan tietoliikenteen ominaisuuksia ja arvioida suorituskykyä sellaisenaan sekä verrattuna sitä mobiiliverkkoyhteyteen. Tavoitteena oli saada käytännön mittauksilla tukea kirjallisuuskatsauksen tuotokseen analysointia ja johtopäätöksiä varten. Mittauksissa käytettiin Starlinkin peruspakettia.

5.1 Mittausympäristön toteutus

Mittausympäristö rakennettiin asettamalla yksi Windows 10 -tietokone julkisella IP-osoitteella varustettuun liitântään Metropolia Ammattikorkeakoulun 1 GB

ICT-laboratorioverkkoon. Tämän verkon internetpalvelut tarjoaa S1 Networks. Starlink-satelliittiyhteyden suorituskykyä mitattiin kolmesta eri mittauspaikasta sekä lisäksi tehtiin vertailumittaukset DNA 4G-mobiililaajakaistaliittymän kautta yhdessä paikassa. Mittaustyökaluna toimi iperf3, joka on suunniteltu verkon suorituskyvyn mittaamiseen ja tarjoaa mahdollisuuden suorittaa testejä sekä TCP- että UDP-protokollilla, ja se sisältää sekä palvelin- että asiakasominaisuudet. Datavirta voidaan suunnata yhteen tai molempiin suuntiin, mikä mahdollistaa yksityiskohtaisen analyysin verkkoliikenteen läpäisykyvystä. Ammattikorkeakoulun laboratorioverkossa ollut tietokone toimi mittauksissa iperf3-palvelinkoneena.

Mittauksissa keskityttiin läpäisykyvyn, viiveen, lataus- ja lähetysnopeuksien sekä verkon suorituskyvyn arviointiin eri aikoina ja eri testipaikoissa. Lisäksi vertailuyhteydellä selvitettiin eroja Starlinkin ja mobiililaajakaistan välillä, jotta voitaisiin arvioida Starlink-yhteyden suorituskyvyn vahvuuksia ja heikkouksia.

Mittauspaikat sijaitsivat eri ympäristöissä. Resurssit mittausten tekemiseen olivat rajalliset ja mittauspaikat valikoituivat sen mukaan, missä ne pystyttiin toteuttamaan ilman lisäkustannuksia.

Mittauspaikka 1 sijaitsi Helsingin Mellunmäessä ja mittauspaikalla oli käytössä Windows 10 -käyttöjärjestelmällä tietokone, johon iperf3-ohjelma asennettiin. Starlink-vastaanotin oli sijoitettu paritalon katolle. Mittauspaikan ympärillä oli jonkin verran puita.

Mittauspaikka 2 sijaitsi Pyhtäällä. Käytössä oli sama Windows 10 -tietokone, jota käytettiin ensimmäisellä mittauspaikalla. Starlink-vastaanotin oli sijoitettuna mökin rantaan. Alueella oli täysin esteetön näkymä etelään, mutta sivuilla ja takana oli joitakin puita.

Mittauspaikka 3 sijaitsi Vaskivedellä Virroilla. Tässä mittauspaikassa käytettiin Linux Ubuntu -käyttöjärjestelmää yhdessä iperf3:n kanssa. Mittausympäristö on sellainen, että mobiiliverkon kuuluvuus on hyvin huono johtuen mittauspaikan ympärillä olevasta mäkisestä maastosta, jonka takana operaattoreiden mastot

sijaitsevat. Täysin avointa sijoituspaikkaa Starlink-vastaanottimelle ei tässä sijainnissa löydetty ja yhteyksiä häiritsivät lähistöllä olevat korkeat puut.

Vertailuyhteys toteutettiin Espoonlahdessa, Espoossa. Mittaukset tehtiin kerrostaloalueella käyttäen Windows 10 -käyttöjärjestelmää, iperf3-ohjelmaa ja DNA:n 4G-mobiililaajakaistaliittymää.

5.2 Mittausten toteutus

Mittaukset suoritettiin monipuolisesti eri paikoissa useiden parametrien osalta, mikä mahdollisti monipuolisen arvioinnin Starlink-yhteyden suorituskyvystä. Tulosten perusteella arvioitiin Starlink-yhteyden suorituskykyä.

5.2.1 Nopeusmittaukset

Nopeusmittaukset suoritettiin käyttäen Speedtest.net-palvelua, jonka tavoitteena oli mitata verkkoyhteyksien latenssia sekä lataus- ja lähetysnopeuksia. Mittaukset toistettiin kolmesti, jotta yhteyksien suorituskykyä ja sen vaihteluita voitiin arvioida tarkemmin. Mittaukset suoritettiin eri aikoina, jotta voitiin havainnoida yhteyksien suorituskyvyn vaihtelua eri käyttöhetkillä.

Mittaukset (kuva 5) osoittavat vaihtelua mittauspaikkojen ja ajankohtien mukaan, mikä kuvastaa Starlink-yhteyden suorituskykyä erilaisissa käyttöympäristöissä. Mittauspaikassa 1 havaittiin erinomaista suorituskykyä, erityisesti aamulla, jolloin latausnopeus saavutti huippunsa 226,89 Mbit/s. Myös illalla nopeus oli korkea, 194,50 Mbit/s.

Mittauspaikassa 2, joka sijaitsee Pyhtään rannalla, havaittiin suurta vaihtelua latausviiveessä. Tämän alueen täysin esteetön näkymä etelään on ihanteellinen, mutta sivuilla ja takana olevat puut saattoivat vaikuttaa yhteyteen häiritsemällä satelliittisignaalin vastaanottoa tietyissä kulmissa. Jos satelliitit sattuivat olemaan metsän suunnassa signaalin reitillä, puiden läsnäolo saattoi aiheuttaa

yhteyden katkeamisia tai viiveen lisääntymistä, mikä voi selittää havaitun suorituskyvyn vaihtelun.

Mittauspaikassa 3 mittaustulokset osoittavat vaihtelevaa suorituskykyä eri aikoina. Iltapäivän mittauksessa saavutettiin latausnopeudeksi 145,50 Mbit/s, mikä on vertailukelpoista muiden mittauspaikkojen tulosten kanssa. Illalla nopeus laski hieman, saavuttaen 129,90 Mbit/s ja nousi jälleen 141,90 Mbit/s nopeuteen lähempänä keskiyötä. Lähetyksenopeudet olivat vaihtelevat, huippunsa saavuttaen 33,20 Mbit/s, mikä on korkeampi kuin muissa testipaikoissa samanaikaisesti saavutetut tulokset. Joutoajan viiveitä (eng. idle latency) ei mitattu tässä paikassa, mutta lataus- ja lähety sviiveet olivat kilpailukykyisiä, mikä viittaa siihen, että yhteys pysyy melko vakaana myös haastavammassa ympäristössä.

Vertailuyhteys tarjosi tasaisempaa suorituskykyä ja sen lähetyksenopeudet olivat huomattavasti korkeampia kuin Starlink-yhteyksillä, mikä osoittaa odotetusti sen parempaa soveltuvuutta raskaampien datasiirtojen käyttöön.

Mittauspaikka	Aika	Latausnopeus (Mbit/s)	Lähetyksenopeus (Mbit/s)	Joutoajan viive (ms)	Latausviive (ms)	Lähety sviive (ms)
Mittauspaikka 1	140524 07:30	226,89	20,94	80	79	71
	140524 14:00	69,38	11,13	70	74	77
	140524 20:30	194,50	17,70	70	66	74
Mittauspaikka 2	110624 18:00	151,98	5,36	76	153	105
	120624 11:30	133,38	7,68	82	107	146
	130624 07:30	166,62	17,54	101	107	82
Mittauspaikka 3	190924 13:00	145,50	21,90	-	77	-
	190924 20:50	129,90	12,00	-	88	-
	190924 23:00	141,90	33,20	-	68	-
Vertailuyhteys	140524 07:30	100,52	40,06	42	68	131
	140524 14:00	133,18	32,04	51	78	149
	140524 20:30	162,66	31,14	38	72	151

Kuva 5. Speedtest-nopeustestin tulokset.

Tulokset eri mittauspaikoista osoittavat, että Starlink-yhteys tarjoaa yleisesti ottaen korkeat latausnopeudet, mutta lähetysnopeudet ja viiveet voivat vaihdella merkittävästi paikasta ja ajankohdasta riippuen. Vaikka Starlink tarjoaa kilpailukykyisiä nopeuksia, vertailuyhteyden tasaisempi suorituskkyky ja korkeammat lähetysnopeudet osoittavat, ettei Starlink yllä mobiiliverkkoyhteyksien tasolle raskeampien datasiirtojen toteuttamisessa, erityisesti kun datan eheys ja välitön toimitus ovat kriittisiä.

5.2.2 PING-testi

PING-testin tarkoituksena oli mitata viivettä eli latenssia sekä tarkastella paketin hävikkiä lähetyksen aikana. Käytetty komento oli *ping <ammattikorkeakoulun_IP> -n 30*, ja mittaus suoritettiin jokaisella mittauspaikalla kolme kertaa eri aikoina, jotta voitiin arvioida verkon vakautta ja latenssin vaihteluita eri käyttötilanteissa.

Tuloksista (kuva 6) ilmenee, että kaikilla mittauspaikoilla pakettihävikki oli nolla prosenttia, mikä osoittaa yhteyden olleen erittäin luotettava testien aikana. Mittauspaikassa 1 latenssi pysyi suhteellisen vakiona; minimiarvot vaihtelivat 58 ms ja 67 ms välillä, ja maksimiarvot olivat 89 ms ja 103 ms. Keskimääräinen latenssi säilyi 70–80 ms välillä, mikä on riittävän hyvä tulos tavanomaisessa käytössä. Mittauspaikassa 2 latenssi pysyi samankaltaisena, ja vaikka se kohosi hetkittäin yli 100 ms, pysyi se pääosin matalana. Mittauspaikassa 3 koettiin kuitenkin suurimmat latenssin vaihtelut, minimilatenssin ollessa 75 ms ja maksimilatenssin kohotessa jopa 272 ms asti, mikä heijastaa suurempia haasteita yhteyden vakaudessa. Vertailuyhteys osoitti huomattavasti parempaa suorituskkykyä, latenssin pysyessä keskimäärin 35–38 ms välillä, mikä korostaa sen parempaa laatua verrattuna Starlink-yhteyksiin.

Yhteenvedona voidaan todeta, että vaikka kaikilla mittauspaikoilla havaittiin vaakaata paketin toimitusta ilman hävikkiä, latenssin vaihtelut olivat merkittäviä, erityisesti mittauspaikassa 3. Tämä voi vaikuttaa yhteyden käyttökelpoisuuteen latenssiherkissä sovelluksissa, kuten videoneuvotteluissa ja online-

pelaamisessa. Vertailuyhteys osoitti huomattavasti tasaisempaa ja matalampaa latenssia, mikä tekee siitä paremman vaihtoehdon sovelluksiin, joissa pieni viive on kriittinen tekijä. Näin ollen, vaikka Starlink tarjoaa laajaa peittoa ja hyvää perusvakautta, sen suorituskyky voi jäädä toissijaiseksi vaihtoehdoksi tietyissä käyttötarkoituksissa verrattuna perinteisiin verkkoyhteyksiin.

Mittauspaikka	Aika	Lähetetyt paketit	Vastaanotetut paketit	Hävikki	Minimi Latenssi	Maksimi Latenssi	Keskimääräinen Latenssi
Mittauspaikka 1	140524 07:30	10	10	0 %	67ms	97ms	79ms
	140524 14:00	10	10	0 %	58ms	89ms	71ms
	140524 20:30	10	10	0 %	66ms	103ms	81ms
Mittauspaikka 2	120624 11:30	30	30	0 %	63ms	116ms	88ms
	120624 22:00	30	30	0 %	68ms	116ms	86ms
	130624 07:30	30	30	0 %	62ms	96ms	70ms
Mittauspaikka 3	200824 13:00	30	30	0 %	75ms	220ms	142ms
	200824 16:00	30	30	0 %	94ms	218ms	131ms
	200824 20:00	30	30	0 %	116ms	272ms	186ms
Vertailuyhteys	140524 07:30	30	30	0 %	30ms	58ms	35ms
	140524 14:00	30	30	0 %	28ms	75ms	36ms
	140524 20:30	30	30	0 %	30ms	55ms	38ms

Kuva 6. PING-testin tulokset.

5.2.3 Kaistanleveysmittaus

Kaistanleveysmittaus suoritettiin käyttämällä *iperf3 -c <ammattikorkeakoulun_IP> -t 30 -komento*, joka on tarkoitettu TCP-kaistanleveyden lähetyksenopeuden mittaamiseen. Tämä testi toteutettiin Starlink-yhteyttä käyttäneeltä koneelta palvelinkoneelle, joka sijaitsi ammattikorkeakoulun verkossa. Jokaisella mittauspaikalla testit toistettiin kolmesti eri vuorokaudenaikoina, jotta voitiin

saada kattava kuva yhteyden suorituskyvystä päivän mittaan. Mittaustulokset (kuva 7) paljastivat, että lähetysnopeudet vaihtelivat sekä mittauspaikoittain että ajankohtain.

Mittauspaikassa 1 havaittiin optimaalinen suorituskyky illalla, jolloin sekä lähetys että vastaanotto saavuttivat nopeudet, jotka ylittivät 8 Mbit/s. Tämä osoittaa, että yhteys oli tehokkaimmillaan kyseisenä ajankohtana, tarjoten korkeat nopeudet molempiin suuntiin. Mittauspaikassa 2 nopeudet vaihtelivat huomattavasti päivän mittaan; aamulla yhteyden nopeus saavutti huippunsa noin 9,6 Mbit/s, mutta laski merkittävästi illan kuluessa. Mittauspaikassa 3 havaittiin iltapäivällä testijakson korkein lähetysnopeus, yli 10 Mbit/s, mikä oli kaikista mittauspaikoista ja -ajoista merkittävin huippu.

Vertailuyhteydessä havaittiin johdonmukaisesti korkeat nopeudet kaikissa mittauksissa, yltäen jopa 24,9 Mbit/s, mikä korostaa sen parempaa kaistanleveyden hallintaa ja suorituskykyä verrattuna Starlink-yhteyksiin.

Mittauspaikka	Aika	Lähetys (MBytes)	Lähetysnopeus (Mbits/sec)	Vastaanotto (MBytes)	Vastaanottonopeus (Mbits/sec)
Mittauspaikka 1	140524 07:30	24,5	6,85	24,4	6,81
	140524 14:00	19,8	5,52	19,6	5,48
	140524 20:30	30,1	8,42	30,0	8,37
Mittauspaikka 2	120624 13:30	23,4	6,54	23,1	6,47
	120624 22:00	13,9	3,88	13,7	3,84
	130624 07:30	34,4	9,61	34,3	9,58
Mittauspaikka 3	080924 12:00	30,9	8,63	29,7	8,26
	080924 15:00	37,9	10,6	35,2	9,82
	080924 20:00	24,0	6,71	23,0	6,38
Vertailuyhteys	140524 07:30	87,6	24,5	87,6	24,5
	140524 14:00	89,1	24,9	89,1	24,9
	140524 20:30	78,8	22,0	78,7	22,0

Kuva 7. Kaistanleveysmittauksen tulokset.

Yhteenvetona voidaan todeta, että vaikka Starlink-yhteys tarjoaa riittävät nopeudet monille sovelluksille, sen suorituskyky ja kaistanleveyden hallinta vaihtelevat huomattavasti, mikä voi olla rajoittava tekijä erityisesti datan intensiivisessä siirrossa ja latenssiherkissä sovelluksissa. Vertailuyhteys tarjoaa merkittävästi paremman ja tasaisemman suorituskyvyn, mikä tekee siitä paremman vaihtoehdon tilanteissa, joissa vaaditaan korkeaa kaistanleveyttä ja vähäistä viivettä.

5.2.4 Latauskapasiteetin mittaus

Latauskapasiteetin mittaus suoritettiin käyttäen komentoa *iperf3 -c <ammatti-korkeakoulun_IP> -t 30 -R*, joka on suunniteltu käänteiseen mittaukseen, missä palvelin lähettää dataa asiakkaalle. Tämä mahdollistaa asiakaslaitteen vastaanottokapasiteetin tarkkailemisen. Mittaukset toteutettiin jokaisella mittauspaikalla kolme kertaa tarjoten kattavan näkemyksen verkon suorituskyvystä.

Mittauksetulos (kuva 8) osoittavat, että lähetys- ja vastaanottonopeudet olivat yhteneväisiä jokaisessa mittauspaikassa, mikä korostaa mittauksen luotettavuutta. Mittauspaikassa 1 havaittiin tasainen suorituskyky, jossa nopeudet ylittivät 15 Mbit/s kaikkina mittausaikoina. Mittauspaikassa 2 koettiin suuria vaihteluja vastaanottonopeudessa, erityisesti illalla, jolloin nopeus laski alle 4 Mbit/s. Tämä voi johtua verkon kuormituksesta, mittauspaikan olosuhteista tai mahdollisista teknisistä ongelmista. Mittauspaikassa 3 havaittiin merkittäviä vaihteluja, joista erityisesti illalla tapahtunut mittaus osoitti huomattavimman nopeuden, jopa 57.9 Mbit/s, mikä oli kaikista mittauskerroista korkein.

Vertailuyhteydessä havaittiin johdonmukaisesti korkeammat nopeudet verrattuna Starlink-yhteyksiin, mikä osoittaa mobiililaajakaistan parempaa kapasiteettia ja suorituskykyä yleisesti.

Yhteenvetona voidaan todeta, että vaikka Starlink-yhteys tarjoaa riittävän latauskapasiteetin useimmille sovelluksille, sen suorituskyky vaihtelee merkittävästi, mikä voi vaikuttaa raskaampien tai kriittisten sovellusten toimivuuteen. Vertailuyhteys osoitti mobiiliverkkoyhteyden selkeästi parempaa ja tasaisempaa

suorituskykyä, mikä tekee siitä luotettavamman vaihtoehdon tilanteissa, joissa tarvitaan jatkuvaa ja korkeaa datan vastaanottoa.

Mittauspaikka	Aika	Lähetys (MBytes)	Lähetysnopeus (Mbit/s)	Vastaanotto (MBytes)	Vastaanottonopeus (Mbit/s)
Mittauspaikka 1	140524 07:30	63,6	17,8	63,6	17,8
	140524 14:00	55,4	15,5	55,4	15,5
	140524 20:30	55,1	15,4	55,1	15,4
Mittauspaikka 2	120624 13:30	31,5	8,81	31,5	8,80
	120624 22:00	14,0	3,91	13,9	3,89
	130624 07:30	46,4	13,0	46,4	13,0
Mittauspaikka 3	210824 15:00	27,2	7,62	27,0	7,55
	260824 20:30	207	57,9	207	57,8
	070924 16:00	119	33,3	116	32,3
Vertailuyhteys	140524 07:30	112	31,4	112	31,3
	140524 14:00	118	32,9	117	32,8
	140524 20:30	109	30,5	109	30,5

Kuva 8. Latauskapasiteetin mittaustulokset.

5.2.5 Useiden samanaikaisten yhteyksien suorituskykymittaus

Useiden samanaikaisten yhteyksien suorituskykymittaus suoritettiin käyttämällä komentoa `iperf3 -c <ammattikorkeakoulun_IP> -t 30 -P 10`, joka on suunniteltu arvioimaan verkon suorituskykyä monien rinnakkaisten yhteyksien kautta. Tämä mittaus antaa tärkeää tietoa siitä, miten verkko selviytyy useiden samanaikaisten datavirtojen käsittelystä, mikä on olennaista monikäyttäjäisille sovelluksille ja pilvipalveluille. Mittaukset suoritettiin jokaisella mittauspaikalla kolme kertaa päivän aikana, jotta saatiin kattava kuva verkon suorituskyvyn vaihteluista.

Starlink-yhteydet näyttivät vaihtelevia nopeuksia eri mittauskerroilla. Mittauspaikassa 1 korkein nopeus saavutettiin aamulla, 29,4 Mbit/s lähetysnopeudella ja 29,0 Mbit/s vastaanottonopeudella. Iltamittauksissa nopeudet laskivat, mutta pysyivät yli 17 Mbit/s. Mittauspaikassa 2 havaittiin vahvaa suorituskykyä, erityisesti aamun mittauksessa, jolloin nopeudet kohosivat 35,6 Mbit/s lähetysnopeuteen ja 35,2 Mbit/s vastaanottonopeuteen. Mittauspaikassa 3 ylläpidettiin

tasainen suorituskyky koko päivän ajan, saavuttaen parhaimmillaan 26,2 Mbit/s lähetysnopeuden ja 25,5 Mbit/s vastaanottonopeuden.

Vertailuyhteydessä mitattiin johdonmukaisesti korkeampia nopeuksia kuin Starlink-yhteyksissä kaikissa mittauksissa. Esimerkiksi aamulla, vertailuyhteys saavutti 40.4 Mbit/s lähetysnopeuden ja 40.0 Mbit/s vastaanottonopeuden, osoittaen suorituskykynsä olevan parempi kuin mitä Starlink-yhteydet kykenivät saavuttamaan missään mittauksessa. Tämä kuvaa mobiiliverkkoyhteyden tehokkaampaa tiedonsiirtoa verrattuna Starlink-yhteyksiin.

Mittauspaikka	Aika	Lähetys (MBytes)	Lähetysnopeus (Mbit/s)	Vastaanotto (MBytes)	Vastaanottonopeus (Mbit/s)
Mittauspaikka 1	140524 07:30	105	29.4	104	29.0
	140524 14:00	65.5	18.3	63.8	17.8
	140524 20:30	78.6	22.0	76.9	21.5
Mittauspaikka 2	120624 13:30	71.1	19.9	69.5	19.4
	120624 22:00	76.9	21.5	75.2	21.0
	130624 07:30	127	35.6	126	35.2
Mittauspaikka 3	080924 12:00	93.9	26.2	91.7	25.5
	080924 15:00	93.5	26.1	91.7	25.6
	080924 20:15	76.4	21.4	72.4	20.2
Vertailuyhteys	140524 07:30	144	40.4	143	40.0
	140524 14:00	118	32.9	116	32.5
	140524 20:30	84.2	23.6	83.0	23.2

Kuva 9. Suorituskyvyn mittaustulokset samanaikaisille yhteyksille

Kun tarkastellaan rinnakkaisten yhteyksien tarkempaa suorituskykyanalyysiä, huomataan, että Starlink-yhteyksien keskiarvoinen lähetysnopeus vaihteli välillä 1,85 Mbits/s ja 3,56 Mbits/s ja vastaanottonopeudet olivat samankaltaisia. Vertailuyhteyden keskiarvot olivat selvästi korkeammat, mikä osoittaa sen parempaa kykyä käsitellä useita yhteyksiä samanaikaisesti. Tämä vertailu korostaa, että vaikka Starlink-yhteydet tarjoavat riittävän suorituskyvyn monille sovelluksille, niissä on vielä parannettavaa saavuttaakseen mobiiliverkkoyhteyksien kaltaisen suorituskyvyn tasaisuuden ja luotettavuuden.

Mittauspaikka	Aika	Keskiarvo Lähetysopeus (Mbit/s)	Keskihi-jonta Lähe-tys (Mbit/s)	Keskiarvo Vas-taanottonopeus (Mbit/s)	Keskihi-jonta Vas-taanotto (Mbit/s)	Keskiarvo Lähetetty Data (MBytes)	Keskiarvo Vastaan-otettu Data (MBytes)
Mittauspaikka 1	140524 07:30	2,95	0,15	2,92	0,15	10,50	10,40
	140524 14:00	1,85	0,07	1,79	0,06	6,55	6,38
	140524 20:30	2,20	0,12	2,17	0,10	7,86	7,69
Mittauspaikka 2	120624 13:30	1,99	0,21	1,94	0,20	7,11	6,95
	120624 22:00	2,15	0,23	2,10	0,23	7,69	7,52
	130624 07:30	3,56	0,18	3,52	0,19	12,73	12,59
Mittauspaikka 3	080924 12:00	2,63	0,15	2,55	0,13	9,38	9,18
	080924 15:00	2,61	0,11	2,56	0,11	9,35	9,17
	080924 20:15	2,14	0,11	2,02	0,11	7,64	7,24
Vertailuyhteys	140524 07:30	4,04	0,74	4,00	0,73	14,44	14,31
	140524 14:00	3,29	0,58	3,25	0,59	11,78	11,64
	140524 20:30	2,36	0,52	2,32	0,52	8,42	8,30

Kuva 10. Yksityiskohtaiset tulokset useiden yhteyksien testauksesta

Näiden tulosten perusteella voidaan päätellä, että vaikka Starlink-yhteydet tarjoavat riittävän suorituskyvyn monille sovelluksille, niiden suorituskyky vaihtelee ja on alhaisempi kuin vertailuyhteydessä, erityisesti monen yhteyden tilanteissa. Tämä korostaa tarvetta parannuksille Starlink-yhteyksien hallinnassa ja suorituskyvyssä, jotta ne voivat saavuttaa mobiililaajakaistan kaltaisen tasaisuuden ja luotettavuuden, mikä on erityisen tärkeää monikäyttö- ja pilvipalveluissa.

5.2.6 Kaistanleveyden ja viivevaihtelun mittaus

Kaistanleveyden ja viivevaihtelun mittaus suoritettiin käyttäen komentoa `iperf3 -c <ammattikorkeakoulun_IP> -u -t 30 -b 100M`, jonka tarkoituksena oli arvioida viivevaihtelua eli jitter-arvoa ja pakettihäviöitä määritellyllä 100 Mbps kaistanleveydellä. Tämä mittaus on keskeinen reaaliaikaisten sovellusten kannalta, joissa on tärkeää minimoida viiveet ja häviöt. Mittaukset suoritettiin jokaisella

mittauspaikalla kolme kertaa eri vuorokaudenaikoina, tarjoten kattavan kuvan verkon suorituskyvystä vaihtelevissa olosuhteissa.

Mittauspaikka 1 näytti erinomaista suorituskykyä kaikissa mittauksissa, saavuttaen lähes täyden kaistanleveyden (99,7–99,8 Mbps) ilman merkittäviä pakettihäviöitä. Jitterin korkea taso, yli 400 ms, kuitenkin viittaa mahdollisiin viiveisiin datan käsittelyssä. Mittauspaikka 2 kohtasi yhdessä mittauksessa 14% pakettihäviön, mutta muutoin suorituskyky oli samankaltainen kuin mittauspaikassa 1, kaistanleveyden ollessa lähes täydellinen ja jitterin vaihdellessa 366–415 ms välillä. Erityisesti illan mittauksen matalampi jitter viittaa parempaan verkon tilanteeseen tuolloin.

Mittauspaikka 3 osoitti johdonmukaisesti täydellistä kaistanleveyden hyödyntämistä (100 Mbit/s) ilman pakettihäviöitä kaikissa mittauksissa. Jitter tietoja ei saatu mittauspaikalta.

Teknisten ongelmien vuoksi vertailuyhteyden kaistanleveysasetusta jouduttiin alentamaan iperf3-testin aikana, jotta iperf3-testit saatiin tehtyä. Suurempaa arvoa käytettäessä mittaukset eivät onnistuneet lainkaan. Tämä saattoi johtua jonkinlaisista mobiililaajakaistayhteyden rajoitteista tai kuormituksesta. Kun kaistanleveyden parametrina käytettiin *-40M* mittaukset onnistuivat ja mitattu kaistanleveys toteutui myös arvolla 40 Mbit/s. Yhteys toimi ilman pakettihäviöitä ja jitter-arvot olivat huomattavasti pienemmät, 15–25 ms, verrattuna Starlink-yhteyksiin. Tämä osoittaa, että mobiililaajakaistayhteys oli vakaampi ja koki vähemmän viivevaihtelua kuin Starlink-yhteydet, mikä on merkittävää erityisesti reaaliaikaisten sovellusten kannalta.

Tulokset antavat tärkeää tietoa verkon käyttäytymisestä reaaliaikaisten sovellusten kannalta, jotka vaativat vähäisiä viiveitä ja minimaalista datan hävikkiä. Vaikka Starlink-yhteydet pystyivät ylläpitämään korkeita kaistanleveyksiä, havaittu korkea viivevaihtelu korostaa Starlink-yhteyden ongelmia verrattuna perinteisiin tietoliikennesyhteyksiin. Tämän perusteella voidaan sanoa, että Starlink-satelliittiyhteyksien osalta on iso tarve kehittää tehokkaampia ratkaisuja verkon

latenssin hallintaan ja parantaa palvelun laatua erityisesti reaaliaikaisia toimintoja vaativissa sovelluksissa.

Testipaikka	Aika	Siirretty (MBytes)	Kaistanleveys (Mbit/s)	Jitter (ms)	Häviöprosentti
Testipaikka 1	140524 07:30	357	99,7	416,91	0%
	140524 14:00	357	99,7	417,78	0%
	140524 20:30	357	99,8	419,97	0%
Testipaikka 2	120624 11:30	357	99,7	414,55	14%
	120624 22:00	357	99,8	366,06	0%
	130624 07:30	357	99,8	381,98	0%
Testipaikka 3	200824 13:25	358	100		0%
	210824 15:30	358	100		0%
	260824 20:30	358	100		0%
Vertailuyhteys	140524 07:30	148	40	15	0%
	140524 14:00	148	40	20	0%
	140524 20:30	148	40	25	0%

Kuva 11. Kaistanleveyden ja viivevaihtelun mittaustulokset.

5.2.7 Laajennettu läpäisytesti

Laajennettu läpäisytesti suoritettiin käyttäen komentoa `iperf3 -c <ammattikorkeakoulun_IP> -t 3600`, jonka tarkoituksena oli arvioida TCP-yhteyden läpäisykyvyn vakautta pitkällä aikavälillä. Mittaukset oli tarkoitus toteuttaa kussakin testipaikassa kahteen kertaan, jotta voitaisiin tarkastella, miten verkon suorituskyky vaihtelee eri aikoina ja kestää pitkiä yhteysjaksoja.

Mittauspaikka 1:ssä havaittiin vaihtelevia tuloksia: ensimmäinen mittaus tuotti 1,59 gigatavun datan siirron ja kaistanleveydeksi mitattiin 9,57 megabittia

sekunnissa, kun taas seuraavan päivän mittauksessa datamäärä väheni 0,89 gigatavuun, kaistanleveyden ollessa 9,18 Mbit/s.

Mittauspaikka 2:n osalta oli teknisiä ongelmia toteuttaa pidempiä testejä iperf3-palvelimen suuntaan ja testit katkeilivat. Siksi testipaikka 2:ssa otettiin otantoja, joiden perusteella keskimääräinen kaistaleveys laskettiin. Tulokset olivat suhteellisen vakaita, aamun kaistanleveys oli 6,45 Mbit/s ja illan 6,19 Mbit/s. Tämä viittaa tasaiseen, mutta alhaisempaan suorituskykyyn verrattuna muihin mittauspaikkoihin.

Mittauspaikka 3:ssa havaittiin iltapäivällä 3,06 gigatavun datan siirto, kaistanleveyden ollessa 7,31 Mbit/s. Iltamittauksessa saatiin heikommat tulokset, datan siirto 2,31 gigatavua ja kaistanleveys 5,30 Mbit/s.

Vertailuyhteys osoitti huomattavasti korkeampia kaistanleveyksiä molemmissa mittauksissa, yli 25 Mbit/s. Myös datan siirto oli ylivoimaista Starlink-yhteyksiin verrattuna. Tämä kertoo mobiililaajakaistan paremmasta suorituskyvystä ja suuremmasta kaistanleveyden vakaudesta verrattuna Starlink-yhteyksiin.

Mittauspaikka	Aika	Siirretty (GBytes)	Kaistanleveys (Mbit/s)	Huomautukset
Mittauspaikka 1	140524 17:45	1,59	9,57	
	150524 20:30	0,89	9,18	
Mittauspaikka 2	130624 07:30		6,45	Otantojen keskiarvo
	120624 22:00		6,19	Otantojen keskiarvo
Mittauspaikka 3	080924 15:15	3,06	7,31	
	260824 20:30	2,31	5,30	
Vertailuyhteys	140524 09:00	10,60	25,30	
	140524 22:00	9,85	23,50	

Kuva 12. Laajennetun läpäisytestin tulokset

Vaikka Starlink-yhteydet tarjoavat hyväksyttävän suorituskyvyn, ne eivät yllä mobiililaajakaistayhteyden korkeampaan suorituskykyyn. Tämä nostaa esiin

tarpeen verkon kehittämiseksi, erityisesti reaaliaikaisten sovellusten vaatimusten täyttämiseksi, jotka edellyttävät vakaata ja korkeaa kaistanleveyttä.

5.2.8 Vuorokauden läpäisymittaus

Vuorokauden läpäisymittaus oli tarkoitus toteuttaa käyttämällä komentoa *iperf3 -c <ammattikorkeakoulun_IP> -t 86400*, jonka tavoitteena oli mitata vuorokauden ajan kestävä yhteyden läpäisykykyä. Mittauksissa ilmeni kuitenkin teknisiä ongelmia, minkä vuoksi yhtäjaksoiset pitkät mittaukset eivät onnistuneet. Tämän seurauksena mittaukset suoritettiin otantamittauksina eri vuorokauden aikoina, ja näiden perusteella laskettiin laskennallisen vuorokauden arvot kullekin testipaikalle. Mittauspaikka 3:n mittaukset epäonnistuivat kokonaan.

Mittauspaikka 1 osoitti tasaista suorituskykyä. Mittaus pyrittiin suorittamaan vuorokauden pituisena, mutta *iperf3*-yhteys katkesi jokaisella yrityksellä. Tulokset otettiin otannoiksi ja niiden perusteella laskettiin laskennallisen vuorokauden arvot, jotka olivat datan kokonaissiirron osalta 97,03 gigatavua ja keskimääräisen kaistanleveyden osalta 9,64 Mbit/s.

Mittauspaikka 2:n kohdalla oli enemmän teknisiä haasteita mittauksien aikana, ja data otettiin otantoina lyhyemmistä mittauksista eri vuorokauden aikoina. Tulokset vaihtelivat niin, että parhaat tulokset saatiin aamulla. Otantojen perusteella laskettu laskennallinen vuorokausi mittauspaikka 2:n otantojen perusteella osoitti data siirron olevan 59,74 GBytes ja keskimääräisen kaistanleveyden 5,94 Mbit/s.

Vertailuyhteys antoi huomattavasti korkeammat tulokset. Tässäkin mittaus pyrittiin suorittamaan vuorokauden pituisena, mutta *iperf3*-yhteys katkesi taas jokaisella yrityksellä. Mittaustulokset otettiin otannoiksi ja niiden perusteella laskettu laskennallinen vuorokausi osoitti Starlink-yhteyksiin verrattuna huomattavasti suuremman kokonaissiirron, 300,94 gigatavua, ja keskimääräisen kaistanleveyden 30,31 Mbit/s. Tämä korostaa huomattavaa eroa Starlink-yhteyksien ja mobiililaajakaistayhteyden välillä.

Mittauspaikka 1	Päivämäärä ja Aika	Kesto (s)	Keskimääräinen Siirto (MBytes)	Kokonais-siirto (GBytes)	Keskimääräinen Kaistanleveys (Mbit/s)
Otanta 1	16.05.24 07:00	28799	1,15	32,34	9,67
Otanta 2	16.05.24 15:00	5257	1,14	5,85	9,54
Otanta 3	16.05.24 19:30	10799	1,13	11,92	9,50
Otanta 4	16.05.24 23:00	28799	1,17	32,91	9,86
Laskennallinen vuorokausi		86400	1,15	97,03	9,64

Testipaikka 2	Päivämäärä ja Aika	Kesto (s)	Keskimääräinen Siirto (MBytes/s)	Kokonais-siirto (GBytes)	Keskimääräinen Kaistanleveys (Mbit/s)
Otanta 1	13.06.24 07:30	300	0,82	0,24	6,90
Otanta 2	13.06.24 09:30	300	0,89	0,26	7,48
Otanta 3	13.06.24 10:30	300	0,72	0,21	6,07
Otanta 4	13.06.24 15:00	300	0,67	0,20	5,58
Otanta 5	13.06.24 16:00	300	0,64	0,19	5,35
Otanta 6	13.06.24 16:30	300	0,64	0,19	5,37
Otanta 7	13.06.24 18:00	300	0,78	0,23	6,51
Otanta 8	13.06.24 20:00	300	0,65	0,19	5,42
Otanta 9	13.06.24 21:00	300	0,67	0,20	5,61
Otanta 10	13.06.24 22:00	300	0,61	0,18	5,11
Laskennallinen vuorokausi		86400	0,71	59,74	5,94

Vertailuyhteys	Päivämäärä ja Aika	Kesto (s)	Keskimääräinen Siirto (MBytes/s)	Kokonais-siirto (GBytes)	Keskimääräinen Kaistanleveys (Mbit/s)
Otanta 1	17.05.24 07:00	18712	3,94	72,00	33,04

Otanta 2	17.05.24 12:00	18000	3,48	61,17	29,90
Otanta 3	17.05.24 19:00	14400	3,42	48,09	29,40
Otanta 4	17.05.24 07:00	7764	3,14	23,81	26,36
Laskennallinen vuorokausi		86400	3,57	300,94	30,31

Kuva 13. Vuorokauden läpäisymittauksen tulokset

Tulosten perusteella, vaikka Starlink-yhteydet tarjoavat hyväksyttävän suorituskyvyn, ne eivät yllä mobiililaajakaistan tasolle. Tämä osoittaa Starlink-yhteyksien heikommat tulokset pitkissä ja vakaisissa yhteyksissä, mikä tarkoittaa huonompaa suorituskykyä erityisesti raskaampien reaaliaikaisten sovellusten kohdalla niiden vaatiman kapasiteetin osalta.

5.3 Mittaustulosten analyysi

Tämän opinnäytetyön teknisten mittausten tulokset tarjoavat suuntaa antavan katsauksen Starlink-satelliittiyhteyden suorituskykyyn verrattuna perinteiseen mobiililaajakaistayhteyteen. Mittaukset suoritettiin eri ympäristöissä ja vuorokaudenaikoina, mikä lisää tulosten luotettavuutta.

5.3.1 Suorituskyky ja soveltuvuus syrjäseuduille

Mittaustulosten perusteella Starlink tarjoaa kilpailukykyisiä latausnopeuksia, mikä on merkittävä edistysaskel monille syrjäseuduille, joissa kiinteän verkon tai kattavan mobiililaajakaistainfrastruktuurin rakentaminen voi olla taloudellisesti ja logistisesti haastavaa. Syrjäseuduilla, joilla paremmat tietoliikenneyhteydet eivät ole realistinen vaihtoehto esimerkiksi maantieteellisten esteiden tai vähäisen väestötiheyden vuoksi, Starlinkin kyky tarjota riittävän nopea ja suhteellisen vakaa yhteys voi merkittävästi parantaa alueen yhteysmahdollisuuksia ja siten alueen elinvoimaisuutta.

Vaikka Starlinkin suorituskyky ei kaikilta osin yllä perinteisen mobiililaajakaistan tasolle, sen tarjoama internetyhteys täyttää perustarpeet ja mahdollistaa palveluiden, kuten etätöiden, verkkoselailun ja suoratoistosisältöjen, käytön. Tällä on syrjäseutujen kannalta huomattava vaikutus, sillä parempien yhteyksien puuttuessa Starlinkin kaltaiset ratkaisut voivat vähentää digitaalista eriarvoisuutta ja parantaa asukkaiden, yritysten ja palveluiden saavutettavuutta.

5.3.2 Latenssin ja kaistanleveyden hallinta

Vaikka Starlink tarjoaa kilpailukykyisiä lataus- ja lähetysnopeuksia, latenssi- ja jitter-arvot olivat paikoin korkeampia kuin mobiililaajakaistassa, mikä asettaa haasteita latenssiherkille sovelluksille, kuten videoneuvotteluille ja reaaliaikaiselle pelaamiselle. Mobiililaajakaista tarjoaakin tässä mielessä tasaisemman ja matalamman latenssin, tehden siitä ensisijaisen vaihtoehdon silloin, kun reaaliaikaiset sovellukset ovat keskeisessä asemassa. Tästä huolimatta Starlink-yhteys pystyy hyvin tukemaan useimpia yleisiä verkkopalveluita, joita syrjäseuduilla tarvitaan.

3G-verkkojen poistuminen käytöstä ja mobiiliverkkojen kapasiteettihaasteet korostavat Starlinkin roolia vaihtoehtoisena ratkaisuna alueilla, joilla mobiililaajakaistan kehittäminen ei ole mahdollista tai kannattavaa. Tällaisissa tapauksissa Starlink voi tarjota yhteyden, joka parantaa alueiden tietoliikennevalmiuksia ja vähentää syrjäytymisen riskiä teknologian kehityksessä.

5.3.3 Yhteenveto

Yhteenvetona voidaan todeta, että vaikka Starlink ei kaikilta osin yllä perinteisen mobiililaajakaistan suorituskyvyn tasolle, se tarjoaa kuitenkin merkittäviä mahdollisuuksia tietoliikenneyhteyksien parantamiseen alueilla, joilla muut ratkaisut eivät ole realistisia. Starlinkin tarjoama yhteys on riittävä monien päivittäisten digitaalisten palveluiden käyttöön ja sillä on potentiaalia vähentää syrjäseutujen digitaalista eriarvoisuutta. Tämä korostaa myös jatkotutkimuksen ja -kehityksen tarvetta, jotta Starlinkin tai muiden vastaavien satelliittiteknologioiden tarjoamaa

suorituskykyä ja yhteyden laatua voidaan edelleen parantaa erityisesti vaativissa olosuhteissa ja käyttötilanteissa.

6 Analyysi ja johtopäätökset

Tässä opinnäytetyössä suoritettu kirjallisuuskatsaus ja tekniset mittaukset tarjoavat vahvaa näyttöä siitä, että Starlink-satelliittiverkko voi olennaisesti parantaa tietoliikenneyhteyksiä syrjäisillä alueilla. Kirjallisuuskatsauksesta käy ilmi, että Starlink tarjoaa kilpailukykyisiä latausnopeuksia verrattuna perinteisiin tietoliikennetarkaisuihin. Myös Starlink-yhteyden latenssi on riittävän alhainen, jotta se tukee reaaliaikaisten palveluiden käyttöä. Starlinkin tarjoama suorituskyky on erityisen tärkeää alueilla, joissa maantieteelliset ja taloudelliset haasteet estävät perinteisten kaapelipohjaisten tai mobiililaajakaistaverkkojen rakentamisen.

Tekniset mittaukset puolestaan vahvistavat kirjallisuuskatsauksessa esitettyjä havaintoja osoittamalla, että Starlink-verkon suorituskyky on kilpailukykyinen mobiililaajakaistayhteyksiin verrattuna. Mittaukset suoritettiin eri mittauspaikoissa ja niiden avulla arvioitiin Starlinkin lataus- ja lähetyksenopeuksia, viiveitä sekä yhteyden vakautta. Näissä mittauksissa Starlink osoitti kykynsä tarjota suhteellisen stabiili ja nopea internetyhteys, joten se parantaa tietoliikenteen mahdollisuuksia alueilla, jotka ovat perinteisesti kärsineet heikoista tai epäluotettavista yhteyksistä. Starlinkin latausnopeudet olivat hyviä, ja latenssi pysyi tarpeeksi matalana verkkosovellusten käyttöön.

6.1 Analyysi

Tulosten perusteella on selvää, että Starlinkin teknologia ei ainoastaan paranna tietoliikenteen infrastruktuuria syrjäisillä alueilla, vaan avaa myös uusia mahdollisuuksia sosiaalisen ja taloudellisen toiminnan elävöittämiseen alueilla, joilla tietoliikenneyhteyksien puutteellisuus tai heikko laatu on aiemmin ollut esteenä. Starlinkin kaltaiset uudet satelliittipohjaiset tietoliikennetarkaisut voivat mullistaa käsityksemme digitaalisesta yhdenvertaisuudesta ja saavutettavuudesta globaalissa mittakaavassa.

6.1.1 Teknologian soveltuvuus ja rajoitukset

Vaikka Starlink-satelliittiverkko tarjoaa merkittäviä parannuksia tietoliikenneyhteyksiin syrjäisillä alueilla, sen teknologia ei ole ilman rajoituksia. Teknisissä mitauksissa havaittiin, että vaikka Starlink tarjoaa huomattavasti nopeampia latausnopeuksia, sen latenssi ja jitter-arvot ovat ajoittain selvästi heikommat perinteisen mobiililaajakaistan tasoon verrattuna. Tämä voi heikentää käyttökokemusta erityisesti latenssiherkillä sovelluksilla, kuten reaaliaikaisilla videoneuvotteluilla tai online-pelipalveluilla, joissa viiveen minimointi on kriittistä.

Latenssihaasteet johtuvat Starlinkin käyttämän Maan matalan kiertoradan (LEO) satelliittien etäisyydestä Maahan. Vaikka Maan matalan kiertoradan satelliitit mahdollistavat pienemmät viiveet kuin korkeammilla kiertoradoilla toimivat satelliitit, niin kuitenkin niillä on teknisiä haasteita verrattuna perinteisiin tietoverkkoyhteyksiin. Lisäksi, vaikka Starlink voi tarjota stabiileja yhteyksiä syrjäisillä alueilla, sen suorituskyky voi vaihdella sääolosuhteiden ja muiden ympäristötekijöiden mukaan, jotka voivat vaikuttaa satelliittisignaalien välitykseen. Esimerkiksi metsäpeitteisyys tai sääolosuhteet voivat heikentää signaalin laatua ja vaikuttaa yhteyden vakauden lisäksi myös tiedonsiirtonopeuksiin.

Lisäksi satelliittien lyhyt elinikä ja korkeat korvauskustannukset ovat myös merkittäviä taloudellisia ja logistisia haasteita. Starlink-verkon ylläpito ja laajentaminen vaativat jatkuvaa satelliittien uusimista, mikä lisää kustannuksia. Satelliittien suuri määrä lisää avaruusromun määrää ja vaatii kehittyneitä ratkaisuja sen hallitsemiseksi. Korkea satelliittitiheys voi aiheuttaa myös taajuuskonflikteja.

Nämä haasteet korostavat tarvetta jatkuvasti kehittää ja optimoida satelliittiteknologiaa, jotta voidaan varmistaa palvelun kestävyys ja luotettavuus pitkällä aikavälillä. Voidaan todeta, että Starlink edustaa merkittävää teknistä edistystä, mutta sen täysimääräinen hyödyntäminen syrjäseuduilla vaatii kehitystyötä haasteiden ja rajoitteiden minimoimiseksi.

6.1.2 Sosioekonomiset vaikutukset

Starlink-satelliittiverkon käyttöönotolla syrjäseuduilla on potentiaalia tuoda merkittäviä sosioekonomisia muutoksia. Tämä teknologia ei ainoastaan paranna tietoliikenneyhteyksiä, vaan sillä on laaja-alainen vaikutus paikalliseen elinkeinotoimintaan, koulutuksen ja terveydenhuollon saatavuuteen sekä yleiseen sosiaaliseen ja taloudelliseen kehitykseen. Parantuneet yhteydet voivat elvyttää taloudellista toimintaa alueilla, joissa perinteiset kehitysmahdollisuudet ovat olleet rajoittuneita.

Sosioekonomisen osallisuuden edistämiseksi Starlink voi auttaa kaventamaan digitaalista kuilua tarjoamalla syrjäseutujen asukkaille pääsyn globaaleihin markkinoihin ja resursseihin. Tämä edistää taloudellista osallisuutta, sillä yhteydet mahdollistavat etätönn, verkko-oppimisen ja digitaalisten palveluiden käytön. Alueet, jotka aiemmin kärsivät eristyneisyydestä ja taloudellisesta jälkeenjääneisyydestä, voivat näin ollen kokea väestönkasvua ja taloudellista elinvoimaisuutta, kun asukkaat saavat mahdollisuuden osallistua laajemmin kansalliseen ja globaaliin talouteen.

Terveydenhuollon sektorilla Starlink voi merkittävästi parantaa palveluiden saatavuutta ja laatua syrjäseuduilla. Nopea internet mahdollistaa esimerkiksi etälääkärikäynnit ilman pitkiä matkoja. Tämä on erityisen tärkeää alueilla, joilla terveydenhuollon palvelut ovat vähäisiä tai olemattomia. Lisäksi reaaliaikainen tiedonsiirto voi tukea paikallisesti terveydenhuollon ammattilaisten työtä, mikä parantaa terveystalvelujen laatua syrjäseuduilla.

Starlinkin tarjoama nopea ja luotettava internetyhteys on erityisen merkittävä koulutuksen saavutettavuuden kannalta. Paremmat etäopetusmahdollisuudet voivat radikaalisti muuttaa opetuksen laatua ja saavutettavuutta globaalilla tasolla. Starlink mahdollistaa videoyhteydet ja pääsyn digitaalisiin oppimisalustoihin, mikä laajentaa opiskelumahdollisuuksia ja tarjoaa työkaluja tietotekniikan ja modernin tiedon hyödyntämiseen opetuksessa.

Starlinkin käyttöönotto voi olla alku isolle sosioekonomiselle muutokselle syrjäseuduilla, parantaen merkittävästi elämänlaatua ja taloudellisia mahdollisuuksia alueilla, joille perinteisen tietoliikenneinfrastruktuurin rakentaminen ei ole ollut aiemmin kannattavaa tai mahdollista. Tämä teknologia tarjoaa välineet pitkäaikaisten haasteiden ratkaisemiseen ja uusien mahdollisuuksien luomiseen niille, jotka ovat olleet digitaalisen kehityksen ulottumattomissa.

6.1.3 Haasteet ja tulevaisuuden näkymät

Starlink-verkon laajamittainen käyttöönotto tarjoaa suuria mahdollisuuksia, mutta siihen liittyy myös haasteita, jotka vaativat merkittäviä investointeja ja jatkuvaa teknologista kehitystä. Vaikka Starlink tarjoaa jo nopeita ja kilpailukykyisiä yhteyksiä, sillä on edelleen ongelmia verrattuna kehittyneisiin maanpäällisiin verkkoihin. Etenkin heikommat viiveet ja alttius häiriöille edellyttävät uusia innovaatioita.

Satelliittilaajakaistan laatua voidaan parantaa investoimalla uusiin teknologioihin, kuten laserteknologiaan, jotta nopeutta, viivettä ja kattavuutta saadaan parannettua ja häiriöitä minimoitua. Taloudellinen haaste satelliittitekniologiassa liittyy satelliittien korvauskustannusten hallintaan, sillä lyhyet elinkaaret ja suuret laukaisumäärät kasvattavat ylläpitokustannuksia. Taloudellisen kestävyuden takaamiseksi tarvitaan kestäviä rahoitusmalleja.

Sääntelyn osalta tulee pyrkiä siihen, että satelliittiyhteydet ovat globaalisti yhä useampien saatavilla ja että avaruuden käyttö on kestävä. Avaruusromun hallinta ja taajuushäiriöiden minimointi ovat keskeisiä avaruuden käytön kestävyuden ja turvallisuuden kannalta. Avaruusromun hallinta on erityisen kriittistä, sillä satelliittien määrän kasvaessa törmäysriskit lisääntyvät. Taajuushäiriöiden hallinta edellyttää tiivistä kansainvälistä yhteistyötä, jotta satelliittiverkot eivät häiritse toisiaan tai maanpäällisiä yhteyksiä.

6.2 Johtopäätökset

Tässä opinnäytetyössä esitetyt tutkimukset ja analyysit osoittavat, että Starlink-satelliittiverkolla on potentiaalia ratkaista monia syrjäseutujen tietoliikenteen haasteita. Teknologian tarjoamat lataus- ja lähetyksnopeudet sekä kohtuullinen viive mahdollistavat useimpien verkkopalveluiden käytön, mikä edistää digitaalista yhdenvertaisuutta ja avaa uusia sosioekonomisia mahdollisuuksia syrjäisillä alueilla.

Vaikka Starlinkin latenssi ja vakaus eivät täysin yllä mobiililaajakaistan tasolle, se tarjoaa kuitenkin merkittäviä etuja alueille ilman perinteisiä tietoliikennematkaisuja. Syrjäseutujen asukkaat, yritykset ja palveluntarjoajat hyötyvät erityisesti parantuneesta yhteydestä, mikä auttaa kaventamaan digitaalista kuilua ja edistää sosiaalista ja taloudellista kehitystä. Yhteyden laatu voi edelleen kehittyä teknologian parantuessa, mikä vahvistaa sen roolia digitaalisen yhdenvertaisuuden edistäjänä.

Tulevaisuudessa teknologinen kehitys, yhteyksien vakauden parantaminen, tehokkaammat satelliittien uudistamiskeinot ja parempi avaruuden käytön hallinta voivat vahvistaa Starlinkin kaltaisten palveluiden roolia globaalissa tietoliikenneinfrastruktuurissa. Näiden innovaatioiden myötä Starlink voi vakiinnuttaa asemansa kestävästä ja monipuolisena ratkaisuna syrjäseutujen tietoliikenteen haasteisiin, mikä tekee siitä merkittävän osan globaalista digitaalisen tasa-arvon toteutumisesta.

Lähteet

Ahmed, T., Alidadi, A., Zhang, Z., Chaudhry, A.U., Yanikomeroğlu, H. 2022. The Digital Divide in Canada and the Role of LEO Satellites in Bridging the Gap. IEEE Communications Magazine, vol. 60, no. 6 (2022), s. 24-30. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2100795>>. Luettu 9.7.2024.

Arianespace. 2004. Ariane 5 delivers! Anik F2 is the largest commercial telecom satellite ever launched. <<https://www.arianespace.com/mission-update/ariane-5-delivers-anik-f2-is-the-largest-commercial-telecom-satellite-ever-launched/>>. Luettu 6.6.2024.

Atlantic Council. 2021. Cyber defense across the ocean floor: The geopolitics of submarine cable security. Verkkoaineisto. <<https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/report/cyber-defense-across-the-ocean-floor-the-geopolitics-of-submarine-cable-security/>>. Luettu 8.6.2024.

Beckman, C., Garcia, J., Mikkelsen, H., Persson, P. 2024. SWOT Analysis of the Mega Constellation Technology and Satellite Internet. 2024 Wireless Telecommunications Symposium (WTS). Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/WTS60164.2024.10536679>>. Luettu 9.7.2024.

Bod, M., Sojoodi, P., Mohammadi, L. 2023. Starlink and Cellular Connectivity under Mobility: Drive Testing Across the Arctic Circle. 31st International Conference on Electrical Engineering (ICEE). Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/ICEE59167.2023.10334809>>. Luettu 9.7.2024.

Cavalcante, A. M., Marquezini, M. V., Moreno, C. S. 2021. 5G for remote areas: Challenges opportunities and business modeling for Brazil. IEEE Access, vol. 9 (2021), s. 10829-10843. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050742>>. Luettu 29.3.2024.

Cello, M., Marchese, M., Patrone, F. 2015 HotSel: A hot spot selection algorithm for internet access in rural areas through nanosatellite networks. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), s. 1-6. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2015.7417202>>. Luettu 29.3.2024.

Chan, S. P. , 2002. The birth and demise of an idea: Teledesic's 'Internet in the sky'. Verkkoaineisto. <<https://archive.seattletimes.com/archive/?date=20021007&slug=teledesic070>>. Luettu 8.6.2024.

Clarke, A. W., 1945. Extra-terrestrial Relays, Can Rocket Stations Give Worldwide Radio Coverage? Wireless World, pages 305-308. Verkkoaineisto. <<http://clarkeinstitute.org/wp-content/uploads/2010/04/ClarkeWirelessWorldArticle.pdf>> Luettu 7.4.2024.

Conde, J., Martínez, G., Reviriego, P., Hernández, J. A. 2024. Round Trip Times (RTTs): Comparing Terrestrial and LEO Satellite Networks. 27th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN). IEEE. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/ICIN60470.2024.10494421>> Luettu 2.8.2024.

Daehnick, C., Klinghoffer, I., Maritz, B., Wiseman, B. 2020. Large LEO satellite constellations: Will it be different this time? Verkkoaineisto. <<https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/large-leo-satellite-constellations-will-it-be-different-this-time>> Luettu 3.8.2024.

Dascalu, J. 2024. Breakthroughs in satellite internet enable truly remote connectivity. Verkkoaineisto. <<https://insights.globalspec.com/article/22473/breakthroughs-in-satellite-internet-enable-truly-remote-connectivity>> Luettu 3.8.2024.

Evans, B. G., Thompson, P. T., Corazza, G. E., Vanelli-Coralli, A., Candreva, E. A. 2011. 1945–2010: 65 Years of Satellite History From Early Visions to Latest Missions. Proceedings of the IEEE, vol. 99 (2011), s. 1840-1857. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2159467>>. Luettu 8.6.2024.

Green, B. N., Johnson, C. D., Adams, A. 2006. Writing narrative literature reviews for peer-reviewed journals: secrets of the trade. ScienceDirect. Verkkoaineisto. <[https://doi.org/10.1016/S0899-3467\(07\)60142-6](https://doi.org/10.1016/S0899-3467(07)60142-6)>. Luettu 21.7.2024.

Hughes. 2022. Celebrating 25 Years of Satellite Internet. Verkkoaineisto. <<https://www.hughes.com/resources/insights/hughesnet/celebrating-25-years-satellite-internet>>. Luettu 6.6.2024.

IEEE. What Is the Digital Divide? 2024. Verkkojulkaisu. <<https://ctu.ieee.org/what-is-the-digital-divide/>> Luettu 29.3.2024.

Jaldén, N., Lun, J., Frenger, P., Furuskär, A., Venkatasubramanian, S., Trojer, E. 2020. Full Coverage with 3GPP technologies On the feasibility of providing full rural cellular coverage. 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129041>>. Luettu 3.4.2024.

Kangasniemi, M., Utriainen, K., Ahonen, S-M., Pietilä, A-M., Jääskeläinen, P., Liikanen, E. 2013. Kuvaileva kirjallisuuskatsaus: eteneminen tutkimuskysymyksestä jäsenettyyn tietoon. Hoitotiede 2013, 25 (4), 291–301. Verkkoaineisto. <<https://journal.fi/hoitotiede/article/view/128286/77409>> Luettu 5.8.2024.

Labrador, V. 2024. Satellite communication. Britannica. Verkkoaineisto. <<https://www.britannica.com/technology/satellite-communication>> Luettu 7.4.2024.

Lian, Z., Dong, Y., Yin, L., Wang, Y. 2022. An Economic Evaluation Method for LEO Satellite Constellation Considering Revenue and Efficiency. 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/ICCCWorkshops55477.2022.9896712>>. Luettu 9.7.2024.

López, M., Damsgaard, S.B., Rodríguez, I., Mogensen, P. 2023. Connecting Rural Areas: an Empirical Assessment of 5G Terrestrial-LEO Satellite Multi-Connectivity. 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10199206>> Luettu 9.7.2024.

Ma, R., Zhang, Z. 2022. A Case Study of Starlink and 5G in Future Space based Internet Services. 4th International Symposium on Smart and Healthy Cities (ISHC). Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/ISHC56805.2022.00022>>. Luettu 9.7.2024.

Ma, S., Chou, J. C., Zhao, H., Chen, L., Ma, X., Liu, J. 2023. Network Characteristics of LEO Satellite Constellations: A Starlink-Based Measurement from End Users. IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/INFOCOM53939.2023.10228912>>. Luettu 9.7.2024.

Manning, C. G. 2018. What is a satellite? Verkkoaineisto. <<https://www.nasa.gov/general/what-is-a-satellite/>>. Luettu 7.4.2024.

Mendes, L. L., Moreno, C. S., Marquezini, M. V., Cavalcante, A. M., Neuhaus, P., Seki, J., Aniceto, N. F. T., Karvonen, H., Vidal, I., Valera, F., Barreto, P. S., Caetano, M. F., Dias, W. D., Fettweis, W. 2020. Enhanced Remote Areas Communications: The Missing Scenario for 5G and Beyond 5G Networks. IEEE Access, vol. 8 (2020), s. 219859-219880. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3042437>>. Luettu 29.3.2024.

Mohan, N., Ferguson, A. E., Cech, H., Bose, R., Renatin, P. R., Marina, M. K., Ott, J. 2024. A Multifaceted Look at Starlink Performance. WWW '24: Proceedings of the ACM on Web Conference 2024, s. 2723 – 2734. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1145/3589334.3645328>>. Luettu 10.7.2024.

NASA. 2015. Explorer 1 Overview. Verkkoaineisto. <<https://www.nasa.gov/history/explorer-1-overview/>>. Luettu 8.6.2024.

NASA. 2022. Syncom 3. NASA Space Science Data Coordinated Archive. Verkkoaineisto. <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1964-047A>>. Luettu 8.6.2024.

Newton, I., Motte, A. 1728. A Treatise Of The System Of The World, s. 5. Verkkoaineisto. <<https://archive.org/details/1728-newton-a-treatise-of-the-system-of-the-world/page/n29/mode/2up>>. Luettu 7.4.2024.

Osoro, O. B., Oughton, E. J. 2021. A Techno-Economic Framework for Satellite Networks Applied to Low Earth Orbit Constellations: Assessing Starlink, One-Web and Kuiper. IEEE Access, vol. (2021), s. 141611-141625. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119634>> Luettu 3.8.2024.

Pachler, N., Del Portillo, I., Crawley, E. F., Cameron, B. G. 2021. An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband. 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/IC-CWorkshops50388.2021.9473799>>. Luettu 10.7.2024.

Petrosyan, A. 2024. Global number of internet users 2005-2023. Verkkoaineisto. <<https://www.statista.com/statistics/273018/number-of-internet-users-worldwide/>>. Luettu 3.4.2024.

Rinaldi, F., Määttänen, H.-L., Torsner, J., Pizzi, S., Andreev, S., Iera, A., Koucheryavy, Y., Araniti, G. 2020. Non-terrestrial networks in 5G & beyond: A survey. IEEE Access, vol. 8 (2020), s. 165178-165200. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3022981>>. Luettu 29.3.2024.

Saldana, J., Arcia-Moret, A., Sathiaselvan, A., Braem, B., Pietrosemoli, E., Zenaro, M., Simo-Reigadas, J., Komnios, I., Rey-Moreno, C. 2017. Alternative networks: Toward global access to the internet for all. IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 9 (2017), s. 187-193. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600663>>. Luettu 29.3.2024.

Salminen, A. 2023. Mikä kirjallisuuskatsaus? Johdatus kirjallisuuskatsauksentyyppeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin. Vaasan yliopiston raportteja 40, 2. tarkistettu painos. Vaasa: Vaasan yliopisto. Verkkoaineisto. <<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-395-081-8>> Luettu 21.7.2024.

Schweitzer E. J. 2024. Digital divide. Verkkoaineisto. <<https://www.britanica.com/topic/digital-divide>>. Luettu 29.3.2024.

Starlink. 2024. Verkkoaineisto. <<https://www.starlink.com>>. Luettu 1.11.2024

Starlink Residential. 2024. Verkkoaineisto. <<https://www.starlink.com/residential>>. Luettu 1.11.2024

Starlink. Service Plans Personal. 2024. Verkkoaineisto. <<https://www.starlink.com/service-plans/personal>>. Luettu 1.11.2024

Starlink. Service Plans Business. 2024. Verkkoaineisto. <<https://www.starlink.com/service-plans/business>>. Luettu 1.11.2024

Starlink Technology. 2024. Verkkoaineisto. <<https://www.starlink.com/technology>>. Luettu 1.11.2024

Statista. 2024. Number of internet users worldwide from 2005 to 2023. Verkkoaineisto. <<https://www.statista.com/statistics/273018/number-of-internet-users-worldwide/>>. Luettu 3.4.2024.

URSA. 2024. Starlink-satelliitit. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa. Verkkoaineisto. <<https://www.ursa.fi/avaruustekniikka/satelliitit/erilaisia-taivaan-satelliitteja/starlink-satelliitit.html>>. Luettu 1.11.2024

Vartiainen, J., Matinmikko-Blue, M., Karvonen, H., Mendes, L. 2019. Spectrum sharing and operator model for rural and remote area networks. 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Oulu, Finland (2019), s. 53-57. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1109/ISWCS.2019.8877357>>. Luettu 29.3.2024.

Viasat. 2024. Anik F2 satellite. Verkkoaineisto. <<https://www.viasat.com/space-innovation/satellite-fleet/anik-f2/>>. Luettu 6.6.2024.

Via Satellite. 2024. Analysts Assess the Industry Landscape for SATELLITE 2024. Verkkoaineisto. <<https://interactive.satellitetoday.com/via/satellite-2024-show-daily-day-1/analysts-assess-the-industry-landscape-for-satellite-2024/>> Luettu 2.8.2024.

Viasat. 2019. Satellite communications: A brief history from Sputnik to ViaSat-3. Verkkoaineisto. <<https://news.viasat.com/blog/scn/satellite-communications-a-brief-history-from-sputnik-to-viasat-3>>. Luettu 8.6.2024.

Walker, J. 2012. Global Positioning System History. Verkkoaineisto. <<https://www.nasa.gov/general/global-positioning-system-history>>. Luettu 6.6.2024.

Wiktionary. 2023. Clarke orbit. Verkkoaineisto. <https://en.wiktionary.org/wiki/Clarke_orbit> Luettu 8.6.2024.