

Viestintäverkkojen kustannusselvitys

Päiväys

13/11/2020

Sisällys

1	Johdanto	2
2	Tiivistelmä	3
3	Matkaviestinverkkojen kapasiteetti ja peitto	6
3.1	Matkaviestinverkkojen kapasiteetti ja peitto	6
3.2	Matkaviestinverkkojen kapasiteetin ja peiton tekninen toteuttaminen	7
3.3	Matkaviestinverkon kapasiteettitarpeen mitoittaminen	10
3.4	Teknologiasukupolvien rooli tulevaisuuden kapasiteetin muodostumisessa	11
3.5	Matkaviestinverkon rakentamisen investointikustannukset	14
4	Liikenteen palveluiden asettamat tekniset vaatimukset matkaviestinverkolle	17
4.1	Liikenteen ja palveluiden kehitys	17
4.2	Liikenteen käyttäjien palvelut	18
4.3	Tieliikenteen palvelut	19
4.4	Rautatieliikenteen palvelut	24
4.5	Meriliikenteen palvelut	25
5	Matkaviestinverkkojen nykykapasiteetti ja peitto	26
5.1	Valtateiden nykykapasiteetti ja peitto	26
5.2	Rataverkon nykykapasiteetti ja peitto	36
5.3	Meriväylien matkaviestinverkkojen nykytila ja kehittyminen	42
6	Kustannusarviot kattavien matkaviestinverkkojen toteuttamiseksi tie- ja rataverkolle	44
6.1	Laskelmien ja arvioiden lähtökohdat	44
6.2	Skenaariotarkastelu	46
6.3	Laskelmiin liittyvät varaukset	48
6.4	Kustannuslaskelmiin liittyvä pohdinta	49
	Sanasto	51
	Liite 1 – Kantateiden nykykapasiteetti ja peitto	53
	Liite 2 - Tieliikenteen käyttötapauksia	57
	Lähdeluettelo	59

1 Johdanto

Suomen ensimmäistä valtakunnallista liikennejärjestelmäsuunnitelmaa (Liikenne 12) kehitetään ihmisten ja yritysten tarpeiden pohjalta. Viestintäverkot ovat olennainen osa liikenneinfrastruktuuria, ja verkkojen rooli tulee korostumaan tulevaisuudessa. Toimivat, riittävät ja luotettavat viestintäverkot mahdollistavat uusien liikenneverkkojen ja liikenteen palveluiden synnyttämisen.

Liikenne- ja viestintävirasto Traficomin Sitowise Oy:ltä tilaaman selvityksen tarkoituksena oli tutkia laajakaistaisten matkaviestinverkkojen (4G/5G) hyödyntämistä liikenteen sovelluksissa ja palveluissa. Työn toinen tavoite on tuottaa karkea arvio investointien mittakaavasta, mikäli kanta- ja valtateiden tiedonsiirtokapasiteettia halutaan parantaa valituille palvelutasoille.

Toimeksiannossa oli selvitettävä, mitä liikenteen palveluita ja palvelutasovaatimuksia nykyiset verkot mahdollistavat ja teknisiä vaatimuksia liikenteen palvelut asettavat viestintäverkoille. Matkaviestinverkkojen nykytilaa ja niiden kykyä palvella tulevaisuuden liikenteen tarpeita arvioitiin Traficomin saatavuusaineiston ja selvityksen yhteydessä toteutettujen kenttämittausten avulla. Suoritettujen operaattorihaastatteluiden ja asiantuntijatyöskentelyn pohjalta muodostettiin puolestaan arvio matkaviestinverkkojen markkinaehtoisesta kapasiteetin sekä peiton kehittymisestä eri liikennemuotojen ja niiden käyttämien palveluiden kannalta.

Selvityksen yhtenä keskeisimpänä sisältönä oli tuottaa karkeat esimerkkilaskelmat kilometrikohtaisista radioliityntäverkon investointikustannuksista valta- ja kantateillä.

Työ toteutettiin heinä - lokakuussa 2020. Selvitys tuotettiin pääsääntöisesti Sitowise Oy:n konsulttityönä, ja täydennettiin asiantuntijahaastatteluin, sekä Rejlers Oy:n suorittamin kenttämittauksin.

Sitowise Oy:n asiantuntijoita toimivat Pekka Eloranta, Olli Jokinen, Mikko Mäkipää, Juha-Pekka Piuva, Laura Riihentupa ja Samuli Virtanen.

Työn ohjauksesta vastasi Traficomin asiantuntijatiimi.

2 Tiivistelmä

Liikenteen automaatio ja erilaiset uudet liikenteen palvelut tulevat asettamaan uusia vaatimuksia liikenneväylien matkaviestinverkkojen tarjoamalle kapasiteetille, nopeudelle, viiveelle sekä toimintavarmuudelle. Eri liikennemuotojen näkökulmasta lähitulevaisuuden selkeimmät palvelutarpeet liittyvät liikenteen automatisaation video- ja kartta-aineistojen tiedonsiirtoon sekä matkustajien palvelutarpeisiin. Matkustajien videoneuvotteluiden sekä viihdepalveluiden, kuten korkearesoluutioisen kuvan, yleistymisen luo odotuksia väylien lataus- (download / downlink / DL) ja lähetystiedonsiirtokapasiteetin (upload / uplink / UL) merkittäväälle kasvulle.

Traficomin saatavuusaineiston perusteella nykyinen peruspeitto kattaa lähes kokonaan Suomen valta- ja kantatiet. 30 Mbit/s teoreettinen tiedonsiirtonopeus kattaa 95,9 % valtateistä ja 93,5 % kantateistä. 100 Mbit/s teoreettisen tiedonsiirtonopeuden peitto valtateilla on 54,4 % ja kantateilla 42,6 %. Selvityksessä toteutettiin mittauksia keskeisille valtatieosuuksille, joissa yli 30 Mbit/s latausnopeus saavutettiin 49 prosentilla reitin kokonaispituudesta ja yli 100 Mbit/s tiedonsiirtonopeus 3,7 prosentilla reitin kokonaispituudesta. Saatavuusaineiston peitto kuvaa kolmen operaattorin yhteisvaikutusta ja saatavuusaineiston tiedonsiirtonopeudet kuvaavat tilannetta hyvissä radio-olosuhteissa, jossa yhteen tukiasemaan kohdistuu samanaikaisesti vain vähän tiedonsiirtotarvetta. Tämän vuoksi mitatut tiedonsiirtonopeudet jäivät selkeästi saatavuusaineiston teoreettisia tiedonsiirtonopeuksia matalammiksi.

Tieliikenteen uudet palvelutarpeet kohdistuvat suuressa mittakaavassa automaattiajoneuvojen yleistymiseen. Tarkasteltujen käyttötapauksen näkökulmasta yksittäisten ajoneuvojen uudet tiedonsiirtotarpeet ovat kokonaisuudessaan maltillisia, eivätkä näytä edellyttävän merkittävää jatkuvaa tiedonsiirtokapasiteettia. Tunnistettujen käyttötapauksen tietoliikenneyhteydet on mahdollista tuottaa kohdistamalla tiedonsiirtotarpeita tiettyihin väyläosiin, jolloin suurta tiedonsiirtokapasiteettia ei ole välttämättä tarpeellista tarjota koko väylän matkalla. Tieliikenteen osalta suurimmat tunnistetut tiedonsiirtokapasiteetin riittävyyden potentiaaliset haasteet kohdistuivat yksittäisten ajoneuvojen käyttämien erikoispalveluiden, kuten ambulanssissa olevan potilaan etämonitorointi, yleistymiseen nopeasti laajassa mittakaavassa. Yleisesti ottaen tieliikenteen tiedonsiirtokapasiteetin näkökulmasta suurimmat potentiaaliset riskit kohdistuvat enemmän lähetyskapasiteetin riittävyyteen kuin latauskapasiteetin riittävyyteen. Tiedonsiirtokapasiteetin puolesta 4G riittää useimpiin lähitulevaisuuden käyttötapauksiin, mutta yksittäiset automaattiajoneuvon käyttötapaukset vaikuttaisivat edellyttävän 5G-verkkoja matalan viiveen puolesta. Operaattorihaastatteluiden perusteella 5G-verkot tulevat saavuttamaan nykyistä 4G-verkkoja vastaavan peiton, minkä pitäisi suurimmassa osassa valta- ja kantatieverkkoa lisätä tieverkon tiedonsiirtokapasiteettia nykyisestä sekä mahdollistaa tarvittavat viivevaatimukset.

Tiedonsiirtokapasiteetti vaatimusten kasvaessa maantieteellisesti haastavimpia alueita markkinaehtoiselle toteuttamiselle tulevat olemaan jo nykyisellään katvealueita sisältävät hyvin harvaan asutuilla alueilla sijaitsevat tieosuudet sekä suurten kaupunkien sisääntuloväylät, joilla liikennemäärät ovat hyvin korkeita. Tieliikenteen tarpeiden näkökulmasta tarkasteltuna katvealueiden kattaminen vähintään peruspeitolla olisi olennaista, jotta edes yksinkertaisten viestien välittäminen ajoneuvoille olisi mahdollista. Tulevaisuudessa näiden alueiden toteuttamiseksi saatetaan tarvita lisärakentamista markkinaehtoisen rakentamisen lisäksi. Mikäli kohtalaista jatkuvaa tiedonsiirtokapasiteettia halutaan jatkossa taata jokaiselle automaattiajoneuvolle esimerkiksi koko valtatieverkon osalta, tarvitaan markkinaehtoista rakentamista tukevaa lisärakentamista. Lisärakentaminen on tarpeen etenkin siirtymävaiheessa, kun ajoneuvojen absoluuttinen kokonaislukumäärä on liian vähäinen tarvittavien investointikustannuksien kattamiseksi.

Traficomien saatavuusaineiston perusteella nykyinen peruspeitto kattaa lähes kokonaan tarkastellun rataverkon. 30 Mbit/s teoreettinen tiedonsiirtonopeus kattaa 95,3 % rataverkosta ja 100 Mbit/s teoreettisen tiedonsiirtonopeuden peitto tarkastelulla rataverkolla on 57,1 %. Selvityksessä toteutettiin mittauksia keskeisille rataosuuksille, joissa yli 30 Mbit/s latausnopeus saavutettiin 39 prosentilla reitin kokonaispituudesta ja yli 100 Mbit/s tiedonsiirtonopeus 3,2 prosentilla reitin kokonaispituudesta. Saatavuusaineiston peitto kuvaa kolmen operaattorin yhteisvaikutusta ja saatavuusaineiston tiedonsiirtonopeudet kuvaavat tilannetta hyvissä radio-olosuhteissa, jossa yhteen tukiasemaan kohdistuu samanaikaisesti vain vähän tiedonsiirtotarvetta. Tämän takia mitatut tiedonsiirtonopeudet jäivät selkeästi saatavuusaineiston teoreettisia tiedonsiirtonopeuksia matalammiksi.

Rautatieliikenteessä palvelutarpeet jakaantuvat rautatieliikenteen ohjaukseen liittyviin tarpeisiin sekä matkustajien tarpeisiin, jotka ovat keskenään hyvin erilaisia.

Rautatieliikenteen ohjaukseen liittyvät tietoliikenneyhteydet tuotetaan tällä hetkellä pääosin kiinteiden verkkojen avulla. Liikenteen ohjauksen ja junien kulunvalvonnan turvallisuuskriittisiä järjestelmien uudistamista selvitetään erillisessä Digirata-hankkeessa. Rautatieliikenteen mobiiliverkkojen tarpeita on tässä selvityksessä tarkastelu pääosin matkustajien näkökulmasta. 5G-verkkojen kehittymisen myötä rautatieliikenteen matkustajien nimellisen tiedonsiirtokapasiteetin nähdään kehittyvän nykyisillä 4G-verkon peittoalueilla. Matkustajaliikenteelle tyypillisen suuren hetkittäisen kapasiteettitarpeen takia käyttäjien todelliset tiedonsiirtonopeudet eivät välttämättä kasva riittävästi vastaamaan käyttäjien odotuksiin. 5G-verkkojen rakentamisen myötä junamatkustajien tarvitseman tiedonsiirtokapasiteetin voidaan katsoa paranevan erityisesti kaupunkien ja taajamien ympäristössä. Markkinaehtoinen 5G-verkkojen kehittyminen ei todennäköisesti tule itsessään parantamaan kaupunkien välisten osuuksien tiedonsiirtoyhteyksiä, eikä se tule parantamaan rataverkon nykyisten katvealueiden tilannetta. Mikäli näiden rataosuuksien tiedonsiirtoyhteyksiä halutaan kehittää, se tulee todennäköisesti edellyttämään markkinaehtoista rakentamista tukevaa lisärakentamista.

Operaattoreiden verkkojen peruspeitto kattaa teoreettisesti Suomen sisävesialueet, meren saariston ja lähimmät rannikkovedet Itämerellä. Käytännössä haasteita aiheuttavat kaukana asutuksesta ja vilkkaasti liikennöidyistä väylistä sijaitsevat vesistöt, joiden tiedonsiirtoyhteyksien parantaminen edellyttäisi hyvin kalliita teknisiä ratkaisuja sekä uusien radiolinkkien ja vedenalaisten kaapeleiden rakentamista. Toistaiseksi ei ole nähtävissä uusia investointiohjelmiä, jotka olisi erityisesti kohdennettu meriliikenteen tarpeiden tukemiseen. Nykyisten tiedonsiirtoyhteyksien parantaminen edellyttäisi markkinaehtoista rakentamista tukevaa lisärakentamista.

Selvityksessä laadittiin karkeat esimerkkilaskelmat vaadituista investoinneista, joita 30 Mbit/s tai 100 Mbit/s jatkuvien latausnopeuksien takaaminen valta- ja kantatieverkon kaikille tieliikenteenkäyttäjille edellyttäisi. Laskelmissa huomioitiin ainoastaan radioliityntäverkon vaatimat investoinnit sisältäen valokuidun rakentamisen kustannukset tukiasemien välillä. Laskelmissa ei huomioitu tietoliikenteen alue- ja runkoverkkojen tai sähköjakeluverkon vaativia investointeja. 30 Mbit/s palvelutasolla radioliityntäverkon vaatimat investoinnit olivat laskelmien perusteella n. 35 - 65 k€/km ja 100 Mbit/s palvelutasolla toteutettuna n. 45 - 90 k€/km. Esimerkkilaskelmien perusteella jatkuvan 30 Mbit/s latauskapasiteetin takaaminen kaikille valta- ja kantateiden käyttäjille tarkoittaa vähintään noin 0,5 miljardin euron investointeja. Esimerkkilaskelmien sisältö on kuvattu yksityiskohtaisemmin luvussa 4.

Laskelmissa käytettyjä palvelutasoskenaarioita ja liikenteen palveluiden arvioituja tiedonsiirtovaatimuksia verrattaessa on huomioitava, että jo yksittäisiä ajoneuvoja koskevien liikenteen palveluiden yhteenlaskettu tiedonsiirtovaatimus nousee erityisesti korkealaatuista viidekuvaa lähettävien palveluiden vuoksi hyvin korkeaksi. Näiden suurta lähetykskapasiteettia

vaativien palveluiden kohdalla jatkuvaa kapasiteettia ei välttämättä pystytä takaamaan edes hetkittäisesti 100 Mbit/s palvelutasolla toteutetun verkon avulla.

3 Matkaviestinverkkojen kapasiteetti ja peitto

3.1 Matkaviestinverkkojen kapasiteetti ja peitto

Matkaviestinverkot muodostuvat radiokeskuslaiteverkosta, siirtoyhteyksistä ja radioliityntäverkosta. Kaikilla matkaviestinverkon osilla on oma välityskykynsä, joka kasvaa siirryttäessä kohti radiokeskuslaiteverkkoa. Tätä välityskykyä kutsutaan verkon kapasiteetiksi. Kapasiteetti jaetaan lataus- ja lähetykskapasiteettiin, joista käytetään englanninkielisiä lyhenteitä DL (lataus/download/downlink) ja UL (lähetyks/upload/uplink).

Radioliityntäverkko rakentuu tukiasemista, jotka voivat poiketa toisistaan fyysisiltä ja teknisiltä ominaisuuksiltaan paljonkin. Tukiaseman kapasiteetista puhuttaessa tulee erotella tukiaseman kokonaiskapasiteetti ja radiotien tarjoama kapasiteetti. Tukiaseman teoreettinen kokonaiskapasiteetti määräytyy sille toteutetun siirtoyhteyden mukaan. Tätä kokonaiskapasiteettia tukiasemalta jaetaan radioteitse tukiasemaan liittyneille käyttäjille.

Yleisessä keskustelussa tukiaseman kapasiteetista puhuttaessa tarkoitetaan nimenomaan radiotien kapasiteettia. Tukiaseman radiotien kapasiteettiin vaikuttavat lukuisat tekijät, kuten käytettävä verkkosukupolvi (esim. 4G ja 5G), käytettyjen taajuuksien kaistanleveys, ja valitut antenniratkaisut, niiden sijoittelu sekä suuntaus. Radiotien teoreettinen kokonaiskapasiteetti muodostuu näiden yhteisvaikutuksesta. Tätä kutsutaan myös radiotien nimelliskapasiteetiksi.

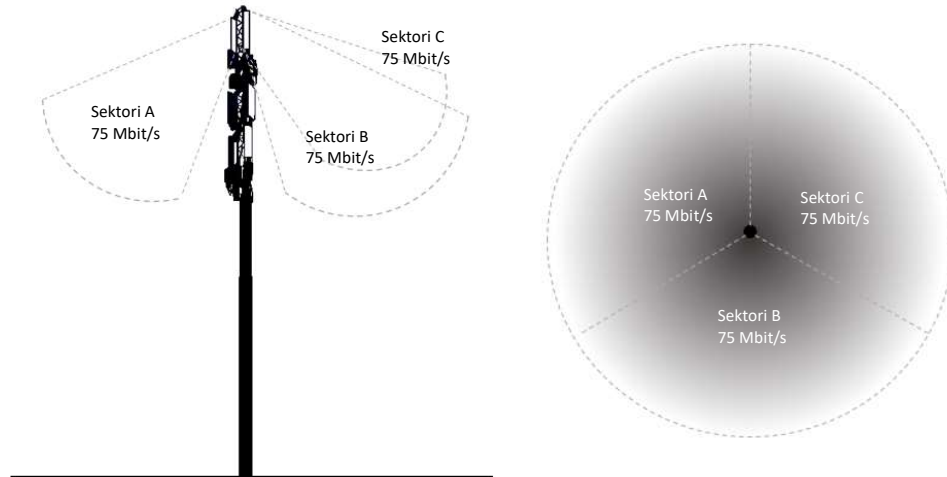
Käyttäjän kokemaan todelliseen kapasiteettiin, eli siihen kuinka nopeaa käytännössä tiedon siirto mobiiliverkossa on, vaikuttavat useat eri tekijät. Näitä tekijöitä ovat mm. sääolosuhteet, ympäristö, käyttäjän etäisyys tukiasemaan, päätelaitteen ominaisuudet, muiden samaan tukiasemaan liittyneiden käyttäjien lukumäärä ja heidän tarvitsema kapasiteetti. Yhteysnopeuteen vaikuttavien tekijöiden vuoksi operaattorit ovat määrittäneet mobiililiittymälleen nopeuden vaihteluvälin, mikä vaihtelee hieman operaattorikohtaisesti. Esimerkiksi maksiminopeudeltaan 150 Mbit/s (150 Mbit/s / 50 Mbit/s) 4G LTE mobiililiittymän keskimääräiseksi vaihteluväliksi on eräs Suomessa toimiva operaattori ilmoittanut saapuvan liikenteen osalta 10-80 Mbit/s ja lähtevän liikenteen osalta 0,5-40 Mbit/s. Koska käyttäjän kokemaa todellista kapasiteettia on monimutkaista arvioida, on usein mielekkäämpää ilmoittaa jonkin tukiaseman tarjoama nimelliskapasiteetti, tai vaihtoehtoisesti maantieteellisessä sijainnissa tarjolla oleva nimelliskapasiteetti.

Tässä selvityksessä käytetään termejä nimelliskapasiteetti, nimellislatausnopeus ja nimellislähetysnopeus, joilla tarkoitetaan radiotien tarjoamaa teoreettista tukiasemakohtaista kapasiteettia, radioteitse tietyssä maantieteellisessä sijainnissa saatavilla olevaa kapasiteettia tai yhdelle käyttäjälle tarjottavaa teoreettista kapasiteettia. Termeillä ei kuvata käyttäjän kokemaa todellista kapasiteettia, joka on teoreettista kapasiteettia pienempi.

Se miten laajalle tukiasemien kokonaiskapasiteettia kyetään radioteitse jakamaan, kutsutaan matkaviestinverkon peitoksi. Yksittäisen tukiaseman peiton muodostumiseen vaikuttavat samat tekijät kuin kapasiteetin muodostumiseen. Tukiaseman peiton laajuuteen vaikuttavat erityisesti käytettävät taajuuksat. Matalammat taajuuksat kantavat pidemmälle, joten niillä kyetään saavuttamaan suurempi tukiaseman peitto. Antenniteknologiat, niiden sijoittelu ja suuntaaminen vaikuttavat osaltaan tukiaseman peittoon ja peiton muotoon.

3.2 Matkaviestinverkkojen kapasiteetin ja peiton tekninen toteuttaminen

Radioliityntäverkon tukiasemat jakavat tukiaseman radiotien kapasiteettia radioyksikköön liitettyjen antennien kautta. Antennien avulla signaalia suunnataan halutulle alueelle. Antennisuuntia kutsutaan sektoreiksi tai soluiksi, joiden ominaisuudet ja kapasiteetti määräytyvät tukiaseman tarjoaman radiotien ominaisuuksien mukaan. Yksi tukiasema voi muodostua yhdestä tai useammasta solusta, usein niitä on tukiasemassa kolme.

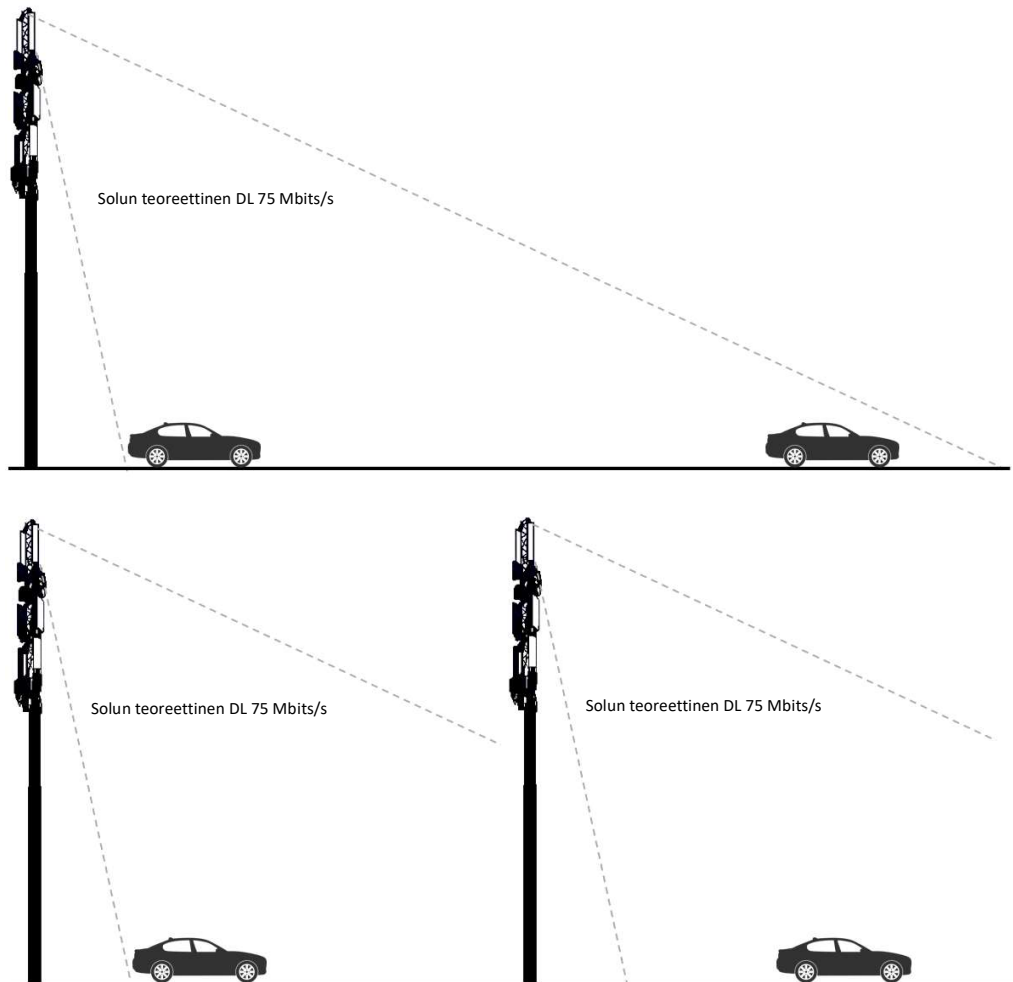


Kuva 1: Matkaviestinverkkojen yksi tukiasema voi jakaantua useampaan soluun (sektoriin)

Solun pinta-alaa ja muotoa voidaan muuttaa antenneja suuntaamalla. Taajuusalue, käytetty verkkosukupolvi, sekä käytettävät antenniteknologiat määrittävät yhdessä suurimman käytännön etäisyyden, jolle yhden solun kapasiteettia voidaan radioteitse jakaa.

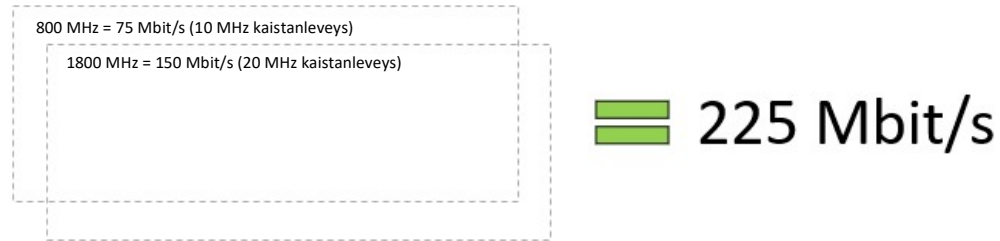
Solun alueella olevat käyttäjät jakavat solun radioteitse tarjottavan kapasiteetin niin lataus- kuin lähetyksenopeudenkin osalta. Mikäli solun alueella on kaksi päätelaitetta ja nimellislataus- kapasiteetti on esimerkiksi 75 Mbit/s, voivat molemmat päätelaitteet samanaikaisesti teoriassa saavuttaa 37,5 Mbit/s latausnopeuden. Vastaavasti tilanne on myös lähetyksenopeuden kohdalla, jossa jaettava kapasiteetti on jo lähtökohtaisesti pienempi. Esimerkiksi jos solun nimellislähetyksen kapasiteetti on 25 Mbit/s, voivat molemmat päätelaitteet samanaikaisesti teoriassa saavuttaa 12,5 Mbit/s nopeuden. Tästä syystä solun pinta-alalla ja muodolla on merkitystä yhden käyttäjän saavuttaman nimellisen lataus- ja lähetyksenopeuden kannalta. Jos samassa solussa olevien käyttäjien määrä kaksinkertaistuu, laskee käyttäjien kokema maksimitiedonsiirtonopeus puoleen.

Jos tietyn maantieteellisen alueen kapasiteettia halutaan kasvattaa, tulee tukiaseman solukokoa pienentää, eli esimerkiksi puolittaa solu ja suuntaamalla samalle alueelle kaksi sektoria yhden sijaan. Usein tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, sillä samalla taajuusalueella toimivien tukiasemien solut eivät voi limittyä häiritsemättä toisiaan. Tästä syystä on usein mielekkäämpää lisätä tukiasemia alueella.



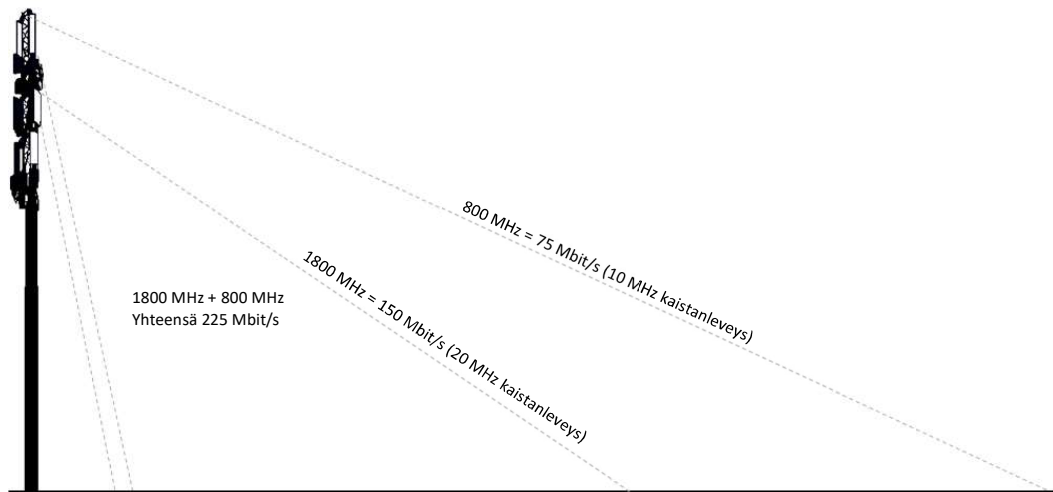
Kuva 2: Yhden solun tarjoama kapasiteetti jakaantuu solun käyttäjien kesken. Käytössä taajuusalue, jonka kaistanleveys on 10 MHz.

Alueen kapasiteettia voidaan nostaa myös lisäämällä sitä palvelevan tukiaseman radiotielle uusi taajuus. Korkeampien taajuuksien lisääminen lisää kapasiteettia kuitenkin vain korkeamman taajuuden kantomatkan alueelle ja tukiaseman palveluetaisyys ja kapasiteetti paranevat vain kyseisen kantomatkan alueella. Tästä syystä korkeampia taajuuksia suunnataan samalle alueelle usein eri tukiasemista, jotka sijaitsevat fyysisesti lähempänä tavoitesijaintia.



Kuva 3: Monikantaallon vaikutus radiotien kapasiteettiin käytettäessä 1800 MHz ja 800 MHz taajuualueita.

Yhden tukiaseman nimelliskapasiteettia voidaan nostaa myös toteuttamalla se välityskyvyllään paremmalla teknologialla, esimerkiksi uudemmalla verkkosukupolvella (4G vs 5G) tai paremmalla antenniteknologialla (esimerkiksi MAMIMO). Spektritehokkuus on arvo (bit/s/Hz), joka kuvaa radiotien välityskykyä. Radiotien teoreettinen kapasiteetti saadaan laskettua kertomalla taajuualueella käytössä oleva kaistanleveys (MHz) käytössä olevien teknologioiden teoreettisella spektritehokkuudella.



Kuva 4: Samasta tukiasemasta lähetettävän kahden erillisen taajuualueen vaikutus radiotien kapasiteettiin tukiaseman alueella. Käytössä monikantaalto 1800 MHz ja 800 MHz taajuualueilla. Luvut viitteellisiä. Tiedonsiirtonopeudet solun vieressä ja reunalla voivat poiketa merkittävästi, sillä tiedonsiirtonopeus heikkenee solun reunaa lähestyttäessä.

Matkaviestinverkkoa suunnitellaan maantieympäristössä useimmiten siten, että matalilla taajuuksilla toteutetaan laaja maantieteellinen peitto nk. makrosoluista. Lisäkapasiteettia tuomaan rakennetaan makrosolun peittoalueen sisälle pienempiä, korkeammilla taajuuksilla toimivia soluja. Tiheään rakennetussa ympäristössä, kuten kaupungeissa, suunnitteluperiaatteet ovat usein poikkeavia, koska korkeat rakennukset tuottavat katvealueita, esteitä, sekä aiheuttavat signaalin heijastumista ja hajoamista. Tästä syystä kaupungeissa saatetaan samasta solusta palvella kaikkia käytössä olevia taajuuksia.

Alla olevassa taulukossa on kuvattu eri matkapuhelintaajuuksien ominaisuuksia.

Taajuus- alue (MHz)	Verkko	Oletettu solun maksimikan- tama (km)	Kaistan- leveys (MHz)	FDD tai TDD	Teoreettinen spektritehok- kuus (bit/s/Hz) DL/UL	Nimellisa nopeus (Mbit/s)	
						Vastaan- otto	Lähetys
700	5G	10	10	FDD	11 / 5,5	110	55
800	4G	10	10	FDD	7,5 / 2,5	75	25
900	4G	10	11	FDD	7,5 / 2,5	75	25
1 800	4G	5	25	FDD	7,5 / 2,5	150	50
2 100	4G	4	20	FDD	7,5 / 2,5	150	50
2 600	4G	2	20 - 25	FDD (TDD)	7,5 / 2,5	150	50
3 500	5G	2	130	TDD	11 / 5,5	1200	400
26 000	5G	0,5	800	TDD	11 / 5,5	8 800	3 000

Taulukko 1: Käytössä olevien taajuuksien ominaisuuksia ja tekniikoita

3.3 Matkaviestinverkon kapasiteettitarpeen mitoittaminen

Yksittäisen käyttäjän kapasiteettitarve muodostuu käyttäjän käyttämien palveluiden ja sovel-
lusten vaatimasta kapasiteetista. Tietyn maantieteellisen alueen kapasiteettitarve muodos-
tuu alueen käyttäjien yhteenlasketusta kapasiteettitarpeesta. Verkon kapasiteetin mitoitta-
misen haasteena on, että alueellinen kapasiteettitarve vaihtelee eri vuorokaudenaikoina.

Verkon kapasiteetti rakennetaan useimmiten siten, että solu kykenee palvelemaan keski-
määrin käyttäjiä tietyllä tavoitenopeudella. Tällöin tiettyinä aikoina päivästä, jolloin käyttä-
jien määrä ja heidän tarvitsema tiedonsiirtokapasiteetti on suurimmillaan, käyttäjäkohtaiset
tiedonsiirtonopeudet laskevat merkittävästi. Puolestaan yöaikaan, tukiaseman välittömässä
läheisyydessä sijaitseva yksittäinen käyttäjä voisi teoriassa saada käyttöönsä koko solun tar-
joaman kapasiteetin, kun muita käyttäjiä ei ole lainkaan tai heidän kapasiteettitarpeensa on
pieni. Mikäli matkaviestinverkkojen kapasiteetti rakennettaisiin aina vastaamaan huipputun-
tien täyttää palvelutarvetta, johtaisi se merkittävän ylikapasiteetin rakentamiseen.

Tarkoituksenmukaista kapasiteettia rakennettaessa on otettava huomioon, millainen palve-
lutaso (esimerkiksi tiedonsiirron latausnopeus) verkon käyttäjille halutaan tarjota. Kapasi-
teetti- sekä peittotarpeen perusteella voidaan määritellä käytettävät taajuusalueet sekä tar-
vittava solun koko (tukiasematiheys). Mikäli solun halutaan palvelevan esimerkiksi erityisesti
tienkäyttäjiä, voidaan radioaaltojen suuntausta optimoida, eli muuttaa sektorin muotoa
suuntautumaan paremmin valitun käyttäjäryhmän tarpeisiin.

5G-verkoissa tietyille käyttäjäryhmille ja palveluille (esimerkiksi kriittiset liikenteen palvelut)
voidaan verkon viipaloinnilla varata tietty käyttötarkoituksen mukaan määräytyvä tiedonsiir-
tokapasiteetti. Tällöin käyttäjä tai käyttäjäkunta saa aina verkosta, joko maanlaajuisesti tai
maantieteellisesti rajatulla alueella. Tämä helpottaa tulevaisuudessa kapasiteetin toteutta-
mista kriittisille palveluille. Toisaalta muiden kuin kriittisiä palveluita käyttävien verkon käyt-
täjien, kuten esimerkiksi viihdekäyttäjien käyttöön, jää vähemmän jaettavaa kapasiteettia.

3.3.1 Verkon keskimääräisen käyttäjän kapasiteettitarve

Vuonna 2019 yhtä mobiililiittymää kohden ladattiin Suomessa dataa lähes 30 gigatavua kuu-
kaudessa, mikä tarkoittaa noin 1 gigatavua vuorokaudessa. Käytännössä lataaminen ei ja-
kaudu tasaisesti koko päivän ajalle, vaan se tapahtuu huomattavasti lyhyemmällä aikavälillä,
jolloin hetkellinen tarve on huomattavasti korkeampi. Yksittäisen käyttäjän palvelutarve voi

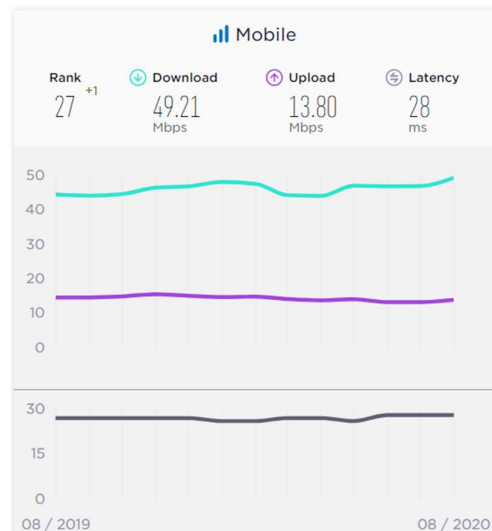
nousta esimerkiksi 4K-videota suoratoistettaessa jopa 20-25 Mbit/s, jatkuen koko suoratoiston ajan. Vastaavasti jos käyttäjä samanaikaisesti lataa elokuvaa puhelimensa muistiin ja lähettää itse kuvaamaansa teräväpiirtovideota sosiaalisen median palvelualustalle, voi käyttäjän hetkellinen kapasiteettitarve nousta vastaanoton osalta jopa 50 Mbit/s ja lähettämisen osalta 10 Mbit/s. Edeltävä esimerkki kuvaa, kuinka yksittäisen käyttäjän palvelutarve voi muuttua hyvin olennaisesti lyhyelläkin aikavälillä. Myös sovellusten palvelutarve vaihtelee ja se on usein myös kertaluonteista. Esimerkiksi sähköpostisovellus hakee tietoa uusista sähköposteista tietyin aikavälein ja internet selain tarvitsee tiedonsiirtokapasiteettia vain ladatakseen uusia sivuja ja niiden sisältöä. Kaikki sovellukset ja palvelut eivät kuitenkaan yleensä ole käytössä samanaikaisesti, eikä niiden tiedonsiirtotarve ole jatkuvaa. Yksittäisen käyttäjän kapasiteettitarve onkin hyvin vaihtelevaa ja purskeittaista.

Vaihtelevista ja hyvin purskeittaisista tiedonsiirtotarpeista johtuen yksittäisten käyttäjien kokema todellinen palvelutaso (lataus- ja lähetysopeus) voi vaihdella huomattavasti. Samasta syystä useampi verkon käyttäjä voi samanaikaisesti jakaa tukiasemien osittain rajallistakin nimelliskapasiteettia, saavuttaen silti hyvän käyttökokemuksen.

3.3.2 Mobiiliverkon keskimääräinen suorituskyky Suomessa

Verkon suorituskyvyn mittareina käytetään varsin yleisesti lataus- ja lähetysopeuksia sekä verkon viivettä. Useat eri palveluntarjoajat tarjoavat ilmaisia nopeustestejä verkossa, joiden avulla oman yhteyden suorituskykyä voi arvioida. Ooklan Speedtest.net -sivusto, yksi maailman suosituimmista nopeusteistä, kerää mittausdataa talteen esimerkiksi maakohtaisia vertailuja varten. Kuva 5. on kuvattuna elokuun 2020 aikana tehtyjen mobiilikäyttäjien nopeustestien mittausdatasta laskettu keskimääräinen mobiililiittymien suorituskyky Suomessa.

Mittausdatan perusteella käyttäjien kokemat keskimääräiset latausnopeudet ovat siis noin 49 Mbit/s ja lähetysopeudet noin 14 Mbit/s keskimääräisen viiveen ollessa 28 ms. Kyseisiä mittaustuloksia tulkitessa on huomiotava, että mitatut tiedonsiirtonopeudet ja viive ovat päätelaitteesta tukiaseman ja siirtoverkkojen kautta nopeustestin palvelimille mitattuja arvoja, joten ne eivät yksinään kuvaa pelkästään radiotien suorituskykyä. Lisäksi kyseisessä mittausdatassa ei ole eritelty käytössä ollutta mobiililiittymän tyyppiä tai verkkosukupolvea.



Kuva 5: Mobiililiittymän keskimääräinen suorituskyky Suomessa elokuussa 2020
(Lähde: www.speedtest.net)

3.4 Teknologiasukupolvien rooli tulevaisuuden kapasiteetin muodostumisessa

3.4.1 5G-verkon rooli kapasiteetin ja peiton kehittämisessä

Suomessa kaikki kolme valtakunnallisesti toimivaa operaattoria (Elisa, DNA ja Telia) aloittivat 5G-verkkojen rakentamisen vuoden 2019 aikana ja täysimittaiseen rakentamisvaiheeseen operaattorit pääsivät vuoden 2019 loppupuolella. Vuoden 2020 rakentamishjelmissään

5G-verkkojen rakentamista on edelleen kiihdytetty. Operaattoreiden omien arvioiden mukaan rakentamista ei ole ollut yhtä kiivasta yhdenkään edeltävän verkkosukupolven kohdalla.

Ensimmäisessä vaiheessa 5G-verkkoja on rakennettu ja otettu käyttöön 3,5 GHz taajuusalueella ja rakentaminen on pääsääntöisesti keskittynyt kaupunkien keskustoihin sekä keskustaajamiin. Operaattorihaastatteluiden mukaan pääosa 5G-verkkojen tarjoamasta lisäkapasiteetista, verrattuna aiempiin verkkosukupolviin, tullaan toteuttamaan 3,5 GHz taajuusalueella. 3,5 GHz verkkojen on ennakoitu teoriassa mahdollistavan jopa 1 200 Mbit/s latausnopeudet ja 400 Mbit/s lähetyksnopeudet. Käytännössä nopeudet tulevat jäämään näistä huomattavasti. 3,5 GHz-taajuusalueella toteutettavien 5G-verkkojen rakentuminen painottuu tulevaisuudessakin kaupunkien keskusta-alueille, keskustaajamiin ja suurimpiin seututaajamiin. Poikkeuksen tähän muodostavat esimerkiksi suuret tapahtumat ja viihdekeskukset, kuten laskettelukeskukset. 3,5 GHz taajuudella toteutettavia 5G-verkkoja tullaan toteuttamaan siis siellä, missä asuminen on tiheää tai ihmisiä muutoin liikkuu paljon.

5G-verkkojen 26 GHz taajuusalueet tulevat operaattori ja asiantuntija-arvioiden mukaan alkuvaiheessa käyttöön pistemäisesti alueilla, joissa verkkoja käyttäviä päätelaitteita on määrällisesti paljon ja käyttäjät tarvitsevat suurta tiedonsiirtokapasiteettia. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi suuret tapahtuma-areenat, kampukset, yrityspuistot, tehdas- ja teollisuusalueet. Lisäksi korkeampia taajuusalueita voidaan jatkossa hyödyntää myös täydentämään olemassa olevaa peruspeittoaluetta väliaikaisia käyttötapauksia, kuten tapahtuma-alueita varten. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi liikuteltavien mobiilitukiasemien avulla.

700 MHz taajuudella operaattorit tulevat toteuttamaan maantieteellisesti kattavimman peittoalueen, jolla voidaan solun läheisyydessä saavuttaa 5G-tekniikalla teoreettisesti jopa 110 Mbit/s latausnopeus ja 55 Mbit/s lähetyksnopeus. Matalilla taajuuksilla toteutettavien 5G-verkkojen peitto tulee todennäköisesti vastaamaan suunnilleen nykyistä 4G-verkon peittoa ja korkeammille 3,5 GHz ja 26 GHz taajuuksille siirryttäessä matkaviestinverkon solukoko ja sen myötä myös verkon peitto pienenee.

Ensimmäisessä vaiheessa 5G-verkot toimivat 4G-tekniikan avustamana, mutta ”aito” 5G, joka mahdollistaa esimerkiksi verkon viipaloinnin vaatii toimiakseen itsenäisen mobiilikeskusverkon (Standalone Core). Lähes koko maan kattavan ”aidon” 5G verkon rakentuminen tulee tapahtumaan operaattoreiden ja asiantuntija-arvioiden mukaan vuoden 2025 loppuun mennessä. Yli 90 % väestöpeitto arvioidaan saavutettavan jo muutamia vuosia aiemmin. Itsenäisen mobiilikeskusverkon käyttöönotto ei kuitenkaan todennäköisesti tarkoita, että verkoissa tullaan saavuttamaan valtakunnallisella tasolla useiden gigabittien latausnopeuksia. Tiiviisti asuttujen taajamien ulkopuolella latausnopeuksien voidaan arvioida olevan noin 200-300 Mbit/s suuruusluokkaa ja radiotien viiveen noin 1 - 5 ms. Kaupunkien keskustaajamissa ja suuremmissa seututaajamissa yli 1 Gbit/s latausnopeudet ovat mahdollisia ja todennäköisiä.

3.4.2 4G-verkon rooli kapasiteetin ja peiton kehittämisessä

5G-verkot ja niitä tukevat päätelaitteet tulevat yleistymään seuraavien vuosien kuluessa, säilyvät 4G-verkot 5G-verkkojen rinnalla ainakin kuluvan vuosikymmenen loppuun saakka. 4G-verkkojen suorituskvyyvyn voidaan odottaa entisestään parantuvan 4G-tekniologioiden elinkaarren viimeisinä vuosina 4G-standardin uusien julkaisuversioiden ominaisuuksien käyttöönoton myötä. Parannusta syntyy oletettavasti myös 4G-verkon kuormituksen keventyessä, verkko liikenteen siirtyessä osittain 5G-verkkoon. Seuraavan vuosikymmenen aikana on odotettavissa siirtymä, jossa taajuusalueita, erityisesti matalia, käytetään eri verkkosukupolville ja -tekniikoille tarpeiden mukaan.

Operaattorit ovat toteuttaneet nykyisen 4G-verkon, jossa melko yleisesti saavutetaan noin 30-50 Mbit/s latausnopeus. Pääsääntöisesti 100 Mbit/s tai sitä suuremmat keskimääräiset nopeudet saavutetaan tällä hetkellä ainoastaan tiheästi asutuilla alueilla, joissa peittoa on rakennettu alataajuuksien lisäksi keskitaajuuksilla. Tulevaisuuden 4G-verkot mahdollistavat alataajuuksilla toteutetun keskimääräisen perusnopeuden nostamisen 200-300 Mbit/s, kun useampaa alataajuutta käytetään rinnakkain. Operaattoreiden arvioiden mukaan tämä tulee tapahtumaan vuoden 2024 tai 2025 loppuun mennessä.

4G-verkot ovat tällä hetkellä merkittävässä asemassa matkaviestinverkkojen käyttöä ja yleisyyttä vertailtaessa. Tätä tukee myös vuonna 2019 DNA:n julkistama tieto, jossa kerrottiin noin 95 % matkaviestinverkkojen datasiirrosta tapahtuvan 4G-verkossa.

4G-verkkoja tullaan jatkossa hyödyntämään entistä tehokkaammin myös erilaisten uusien kehitettyjen ominaisuuksien ansiosta. Esimerkiksi dynaaminen spektrin jakaminen (Dynamic Spectrum Sharing) mahdollistaa jatkossa tietoliikenteen dynaamisen siirtämisen 4G- ja 5G-verkkojen välillä yhteystarpeen ja verkon kuormituksen mukaan siten, että verkkoja hyödynnetään mahdollisimman optimaalisesti.

3.4.3 3G- ja 2G-verkkojen rooli kapasiteetin ja peiton kehittämisessä

3G-teknologian vanhentumisen myötä, 3G-verkkojen taajuudet tullaan siirtämään ensin 4G-verkkojen ja myöhemmin myös 5G-verkkojen käyttöön, kun operaattorit vapauttavat 3G-verkkonsa taajuusalueet muuhun käyttöön. Tämä tulee lisäämään 4G- ja 5G-verkkojen käytössä olevia taajuusalueita eli mahdollistamaan näiden verkkojen peiton kasvattamisen ja kapasiteetin lisäämisen. Ensimmäisenä julkisuuteen 3G-verkon lakkauttamisen suhteen on tullut Elisa, joka aikoo vapauttaa 3G-verkkojen käytössä olleet 900 MHz ja 2100 MHz taajuusalueet 4G-verkkojen käyttöön vuoden 2023 loppuun mennessä. 900 MHz taajuusalue mahdollistaa 4G-käytössä 75 Mbit/s latausnopeuden ja 5G käytössä 110 Mbit/s latausnopeuden. 900 MHz taajuusalueella tukiaseman kantama on noin 20 km, mutta tiedonsiirtonopeudet heikkenevät lähestyttäessä solun reunaa. Vastaavasti 2100 MHz taajuusalueella 4G:llä ja 5G:llä voidaan saavuttaa 150 Mbit/s ja 220 Mbit/s latausnopeudet, tukiaseman kantaman ollessa noin 8 km. Samanlaista kehityskulkua voidaan ennakoida myös DNA:n ja Telian 3G-verkoille. 3G-verkkojen lakkauttamisen voidaan arvioida tapahtuvan kuluvan vuosikymmenen loppuun mennessä.

2G-verkkojen kohdalla vastaavan kehityskulun voidaan ennustaa alkavan viimeistään vuosikymmenen loppuun mennessä, mutta tarkempi aikataulu selkeytyy vuonna 2023 tapahtuvan verkkotoimilupaehtojen tarkastelun valmistuttua. 2G-verkkojen alasajoa hidastaa, että suurin osa puheliikenteestä välitetään edelleen 2G-verkoissa.

3.4.4 Virve

Uuden viranomaisverkon (Virve 2.0) toteuttavaksi operaattoriksi on valittu Elisa. Valinta viranomaisverkon toteuttajaksi on merkittävä myös operaattorin muun mobiiliverkkoliiketoiminnan osalta. Valittu operaattori pystyy hyödyntämään viranomaisverkkoa varten rakennettavaa infraa myös oman verkkonsa maantieteellisen peiton ja kapasiteetin kasvattamisessa koko Suomen laajuisesti. Toistaiseksi on vaikea arvioida, miten yhden toimijan kilpailuetu valtakunnallisesta peitosta vaikuttaa muiden mobiilioperaattoreiden verkon laajentumishalukkuuteen ja operaattoreiden keskinäiseen kilpailuasetelmaan.

3.5 Matkaviestinverkon rakentamisen investointikustannukset

3.5.1 Matkaviestinverkon investointikustannusten rakenne

Matkaviestinverkon ja sen rakentamisen kustannukset muodostuvat useista osatekijöistä, joita ei ole aina helppoa eritellä toisistaan. Matkaviestinverkko on tiiviisti sidoksissa muuhun tietoliikenneverkkoon, jolloin usein merkittävät investoinnit tiedonsiirtokapasiteetin nostamiseksi radioliityntäverkossa johtavat kasvaviin investointitarpeisiin myös siirto- ja runkoverkoissa. Tarkempi kustannusten erottelu ja kertautuvien kustannusvaikutusten ymmärtäminen vaatii syvempää ymmärrystä tietoliikenneverkoista.

Investointiluontoisten kertakustannusten lisäksi, investointien kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi myös juoksevat käyttö-, ylläpito- ja huoltokustannukset, jotka ovat investoinnin elinkaaren aikana huomattavia. Tältä osin matkaviestinverkon investointilaskelmat poikkeavat oleellisesti kiinteän tietoliikenneverkon investointilaskelmista. Matkaviestinverkkojen investointien kustannusrakenteessa korostuvat materiaali-, laite- ja lisenssi- ja maaomaisuudenhankintakustannukset. Kiinteän verkon rakentamiskustannuksissa työn osuus on merkittävän suuri suhteessa materiaaleihin.

Operaattoreiden ei kuitenkaan aina tarvitse rakentaa omaa mastoaan tai siihen liittyvää infraa, vaan he voivat vuokrata toiselta mastonomistajalta mastopaikan, laitepaikan ja tarvittaessa myös siirtoyhteyden. Tällöin mastopaikalle vuokralaisena operaattorina investointikustannukset muodostuvat pääosin radioverkon aktiivilaitteista ja niiden asentamiseen tarvittavasta työstä.

3.5.2 Radioliityntäverkon rakentamisen kustannustekijät

Matkaviestinverkon kustannustekijät muodostuvat radioliityntäverkon rakentamisen kustannuksista ja runkoverkon rakentamiskustannuksista. Runkoverkkoon tehtävien investointien tarve muodostuu useista osatekijöistä, eikä niitä ole niiden kompleksisuuden ja kerrannaisvaikutusten vuoksi yksinkertaista jyvittää yksittäisille tukiasemille. Tässä käsitellään ainoastaan radioliityntäverkon ja siihen liittyvän infran ja sille tarvittavan siirtoyhteyden muodostamia kustannustekijöitä.

Radioliityntäverkon rakentamisen kustannustekijät voidaan tämän työn tarkastelua varten jakaa pääpiirteittäin neljään päätyyppiin:

1. Infra (maa-alue, tiet)
2. Passiivi-infra (mm. mastot, laitesuojat ja -kaapit, varavoimalaitteet, sähkönsyöttö)
3. Siirtoyhteys (valokuitu, siirtolaitteet)
4. Matkaviestinverkon aktiivilaitteet (radioyksiköt ja antennit)

Suomessa mastonomistaja vastaa useimmiten ainakin infraan ja passiivi-infraan liittyvistä kustannuksista. Tukiasemalle vuokralaisena tuleva vastaa itse ainakin matkaviestinverkon aktiivilaitteista ja niiden asennustyöstä. Riippuen tukiaseman sijainnin ja siten siirtoyhteyden rakentamisen hinnasta, vuokralainen joko rakentaa itse tarvitsemansa siirtoyhteyden, tai vuokraa sen mastonomistajalta tai kolmannelta osapuolelta.

3.5.3 Tukiasematyyppit ja niiden komponentit

Tukiasemalla tarkoitetaan varsinaisesti radioyksikköä ja antennia, kuitenkin puhekielessä tukiasemasta puhuttaessa tarkoitetaan koko tukiaseman toteuttamiseen tarvittavaa kokonaisuutta. Käsiteltäessä radioliityntäverkon rakentamiskustannuksiin vaikuttavia tekijöitä onkin mielekkäämpää puhua tukiasemasta puhekielessä tarkoitettuna kokonaisuutena.

Tukiasematyyppejä on lukuisia erilaisia riippuen, mitä tekniikkaa tukiasemilla on, missä tukiasema sijaitsee, millaista maantieteellistä aluetta tukiaseman on tarkoitus palvella. Karkeasti tukiasemat voidaan jakaa,

1. rakenteisiin, kuten talojen seiniin ja katoille sijoitettaviin tukiasemiin,
2. pylväsmastoihin sijoitettaviin tukiasemiin, ja
3. mastoihin sijoitettaviin tukiasemiin.

Eri liikkumismuotojen kannalta kaupunkien ja taajamien ulkopuolella merkityksellisimpiä tukiasematyyppejä ovat mastoihin ja pylväsmastoihin sijoitettavat tukiasemat. Tukiasemien kalustus vaihtelee tukiaseman käyttötarkoituksen mukaan. Kuitenkin kaikilla tukiasemilla on yhteneväisyyksiä ja niille yhteisiä komponentteja ovat:

- Radioyksikkö/radioyksiköt
- Antenni/antennit
- Kuitu-/koaksiaalikaapeliyhteys antennin ja radioyksikön välillä
- Kuituyhteys radioyksiköltä siirtolaitteelle
- Sähkönsyöttö

Lisäksi useilta tukiasemilta löytyy:

- Laitesuoja
- Siirtolaite
- Valokuidulla tai radiolinkillä toteutettu yhteys siirtoverkkoon
- Masto/pylväsmasto
- Varavoimalaitteet

Tukiasemien rakentamiskustannukset vaihtelevat rakennettavan kohteen maston tai pylvään pituuden mukaan ja yleisesti kustannukset ovat sitä korkeammat mitä korkeampi masto tai pylväskohteeseen tarvitaan. Mastotyyppin valintaan vaikuttavat sijainnin ja korkeuden lisäksi myös kuormitus- sekä kapasiteettitarve ja kustannukset vaihtelevat myös maston toimittajan mukaan. Merkittävänä tekijänä rakentamiskustannusten vaihteluihin ovat myös perustuskustannukset, sillä ne ovat tapauskohtaisia ja saattavat kaksinkertaistua haastavassa maastossa esimerkiksi paalutustarpeen vuoksi.

Tyypillisimpien Suomessa rakennettavien mastojen ja pylväiden rakentamiseen liittyvät kustannusjakauman arviot on esitetty seuraavassa taulukossa.

Maston korkeus ja tyyppi	90 m masto	50 m masto	36-42 m masto	10 m pylvä
Mastomateriaalin osuus	55-60 %	45-50 %	45-50 %	45-55 %
Maston rakentamiskustannusten osuus	20-25 %	20-25 %	20-25 %	20-25 %
Maston perustusten osuus	15-20 %	25-30 %	15-20 %	20-25 %
Muut kulut (rahti, tarvikkeet ym.)	5 %	5 %	5 %	10 %
Yhteensä (€)	110 000 - 130 000	40 000 - 50 000	35 000 - 45 000	9 000 - 12 000

Taulukko 2: Mastojen ja pylväiden rakentamisen kustannusjakauman arviot ja keskimääräisiä kokonaiskustannusarvioita.

Edellä esitettyjen kustannusten lisäksi tukiasemia rakennettaessa tulee ottaa huomioon myös varsinaisen maston rakentamisen lisäksi syntyvät kustannukset, joita syntyy esimerkiksi huoltotien rakentamisesta ja sähköliittymän rakentamisesta tukiasemapaikalle. Tarvittavan maa-alueen koko riippuu mastotyyppistä ja asennustavasta. Keskimääräiset tilantarpeet ovat

pylväsmastojen osalta alle 100 m², vapaasti seisovien mastojen osalta 150-200 m² ja harustettujen mastojen osalta 2000 m². Seuraavaan taulukkoon on koostettu arvioita tukiasemarakentamisesta syntyvistä muista kustannuksista.

Muut kulut	Kustannusarvio
Aktiivilaitteet	15 000 - 25 000 €
Antenni ja radio (per sektori) 64x64 MaMIMO	10 000 - 20 000 €
Antenni ja radio (per sektori) 4x4 MIMO	5 000 - 10 000 €
Laitesuojat (8-25 m ²)	15 000 - 25 000 €
Sähköliittymä	2 000 - 5 000 €
Huoltotien rakentaminen	80 - 120 €/m
Voimalaitteet sis. akusto	5 000 - 14 000 €
Siirtoyhteyden rakentaminen	15 - 35 €/m (tyypillisesti 5 000 - 50 000 €)
Maa-alue (vuokra/osto)	Sopimuskohtainen maanomistajan kanssa

Taulukko 3: Tukiaseman perustamiskustannuksiin liittyviä kustannusarvioita

Tukiaseman kustannukset muodostuvat taajamien ulkopuolella merkittävien osin muista, kuin radioyksiköistä ja antennista. Kustannuksiin vaikuttaa erityisesti tukiaseman käyttötarkoitus ja sijainti. Mikäli tukiaseman on tarkoitus toimia nk. makrotukiasemana, joka palvelee matallilla taajuuksilla maantieteellisesti hyvin laajaa aluetta, on sen rakentamiskustannukset usein huomattavasti korkeammat kuin pientaloalueelle sijoitettavan pylväsmastotukiaseman. Suuret makrotukiasemat pyritään sijoittamaan korkeille paikoille, jotta niillä saavutetaan mahdollisimman suuri maantieteellinen ja väestöllinen peitto. Makrotukiasemia varten rakennettavien teiden, siirtoyhteyksien ja sähkönsyötön pituus on usein huomattava ja siksi ne monesti muodostavat myös merkittävän osan kustannuksista. Toisaalta, lähelle taajamia ja pääteitä rakennettavien tukiasemien osalta sähkönsyötön, siirtoyhteyksien ja teiden kustannusvaikutus voi olla hyvinkin pieni.

Mikäli tukiasemien sijainnin vaikutukset jätetään huomiotta, voidaan tukiasemien rakentamisen kustannukset kohtuullisesti vakioida, sillä merkittävimmät kustannukset muodostuvat maa-alueesta ja passiivi-infrasta. Passiivi-infran osalta maston ja pylväsmaston korkeudella on merkittävä rooli, samoin kuin hankittavalla maa-alueella, jonka koko riippuu maston korkeudesta. Tukiasemalaitteiden ja sen tarvitseman varavoimalaitteiden kustannusvaikutukset ovat merkittäviä, mutta ne eivät vaihtelee maston sijainnin tai sen korkeuden mukaan.

4 Liikenteen palveluiden asettamat tekniset vaatimukset matkaviestinverkolle

4.1 Liikenteen ja palveluiden kehitys

Liikenteen automaatio ja erilaiset uudet liikenteen palvelut tulevat asettamaan uusia vaatimuksia liikenneväylien matkaviestinverkoille. Uudet palvelut asettavat vaatimuksia tietoliikenneyhteyksien ja matkaviestinverkkojen tarjoamalle kapasiteetille, nopeudelle, viiveelle sekä virheettömyydelle.

Liikenteen tietoliikenneyhteystarpeet ja -vaatimukset tulevat todennäköisesti olemaan jatkossa erilaisia eri väylillä ja väyläverkkojen eri osissa, koska käyttäjien tarvitsemat palvelut ja käyttötapaudet eri verkon osissa ovat erilaisia. Esimerkiksi automaattiajamiseen liittyvät käyttötapaudet ovat erilaisia vähän liikennöidyillä maantieosuuksilla kuin vilkkaasti liikennöidyssä kaupunkien sisääntuloväylien risteysalueilla.

Toisaalta tietoliikenneyhteyksien kehitys ja käytettävissä olevat matkaviestinverkot tulevat vaikuttamaan palveluiden yleistymiseen sekä itse palveluiden ja tekniikan kehitykseen. Mikäli matkaviestinverkkojen kapasiteettia olisi jatkossa saatavissa ”rajoittamattomasti”, palvelut tulisivat hyödyntämään tätä mahdollisuutta. Mikäli saatava kapasiteetti on rajallinen, pakottaa se myös palvelukehitykseen palveluiden laadun ja sujuvuuden parantamiseksi. Esimerkiksi palvelun tarvitsemaa tietoa ei välitetä suurta kapasiteettia vaativana raakadatana, vaan kapasiteettitarvetta voidaan yrittää pienentää jalostamalla ja/tai analysoimalla kerättävää tietoa ja lähettämällä vain keskeinen tieto matkaviestinverkkoon. Etenkin tieliikenteessä palveluntuottajien arvioitavaksi jää, mikä osa palveluiden tarvitsemasta kapasiteetista voidaan siirtää suoraan ajoneuvojen välillä lyhyen kantaman viestintänä ja mikä pitkän kantaman viestintänä mobiiliverkon kautta.

Liikenteen palveluiden vaatimukset matkaviestinverkoille tulevat jatkossa muodostumaan liikenteen kaluston, liikenteen ohjauksen sekä liikenteen matkustajien tiedonsiirtotarpeiden yhteisvaikutuksena. Vaikka palvelutarpeita on tulevaisuudessa mahdollista eriyttää esimerkiksi viipaloinnin avulla erilaisiin palveluluokkiin ja palvelutasoihin, liikenteen tarvitsemaan kokonaistiedonsiirtotarpeeseen on pystyttävä vastaamaan tavalla tai toisella.

Liikenteen tarvitseman kokonaistiedonsiirtokapasiteettitarpeen voidaan nähdä kehittyvän eri liikennemuodoissa eri tavalla. Rautatieliikenteessä junien ja junaliikenteen ohjaukseen liittyvä automaatio ja tiedonsiirtotarpeet kasvavat. Koska yhdessä junassa on suuri määrä samanaikaisia matkustajia, vaikuttaa matkustajien tietoliikenneyhteyksien käyttö erittäin merkittävästi yhden junan tarvitsemaan tietoliikenneyhteyksien samanaikaiseen kokonaistarpeeseen. Tieliikenteessä ajoneuvot jakaantuvat tieverkolle tasaisemmin, mikä pienentää väyläverkon yhdeltä osalta vaadittavaa tiedonsiirron samanaikaista kapasiteettitarvetta suhteessa rautatieliikenteeseen. Tieliikenteessä kuitenkin yhden ajoneuvon tarvitseman kokonaistiedonsiirtokapasiteetin nähdään kasvavan tulevaisuudessa automaation myötä. Suurempi vaikutus tiedonsiirtokapasiteettiin saattaa kuitenkin alkuvaiheessa syntyä viihdepalveluiden kasvavasta käytöstä, kun ajoneuvojen ohjaustarpeen vähentyessä kuljettajat voivat alkaa käyttämään enemmän viihdepalveluita osana matkustamista.

4.2 Liikenteen käyttäjien palvelut

Liikenteen käyttäjien palvelutarpeiden kehitys myötäilee mobiiliverkkojen käyttäjien yleisiä palvelutarpeita. Verkkojen hyödyntäminen monipuolisiin viihde- ja etätyötarkoituksiin lisääntyy jatkuvasti ja verkoilta vaaditaan yhä suurempaa kapasiteettia ja pienempää viivettä myös matkustettaessa. Varsinkin eri laatuisten videoiden katselu, etänä pidettävät puhelin- ja videoneuvottelut sekä työhön liittyvien tiedostojen sijainti palvelimilla vaativat mobiiliverkolta riittävää kapasiteettia ja peittoa hyvän käyttökokemuksen saamiseksi. Lisäksi matkustettaessa aikaa kulutetaan käyttämällä vähemmän kaistaa tarvitsevia palveluita, kuten musiikin kuuntelun mahdollistavia palveluita, sosiaalista mediaa ja selaamalla internetsivuja.

Alla olevaan taulukkoon on listattu tyypillisiä mobiiliverkon käyttäjien yleisiä palvelutarpeita.

Käyttötapa	Latausnopeus	Lähetysnopeus	Suosittu viive
Korkealaatuinen musiikki	320 kbit/s	160 kbit/s	< 150 ms
Hifi- laatuinen musiikki	1,5 Mbit/s	320 kbit/s	< 150 ms
Normaali internetsivujen käyttö	3 Mbit/s	0,5 Mbit/s	< 150 ms
Kuvapainotteinen sosiaalinen media	1,5 Mbit/s	0,5 Mbit/s	< 150 ms
HD-videot (60 fps)	5 Mbit/s	0,5 Mbit/s	< 150 ms
FHD-videot (60 fps)	10 Mbit/s	0,5 Mbit/s	< 150 ms
4K-videot (60 fps)	25 Mbit/s	0,5 Mbit/s	< 150 ms
8K-videot (60 fps)	>80 Mbit/s	0,5 Mbit/s	< 150 ms
Online pelit	>5 Mbit/s	1 Mbit/s	< 30 ms
Puhelu (Teams, Zoom)	0,5 Mbit/s	0,5 Mbit/s	< 50 ms
Videopuhelu (HD, Teams, Zoom)	1,2 Mbit/s	1,2 Mbit/s	< 50 ms
Ryhmävideopuhelu, ruudunjako (yli 7 hlö, Teams, Zoom)	8 Mbps	512 Kbps	< 50 ms
Virtuaalitodellisuus ja lisätty todellisuus - matala resoluutio	20-50 Mbit/s	20-50 Mbit/s	< 40 ms
Virtuaalitodellisuus ja lisätty todellisuus - korkea resoluutio	200-1000 Mbit/s	200-1000 Mbit/s	< 10 ms

Taulukko 4: Tyypillisiä mobiiliverkon käyttäjien käyttötappauksia ja niiden keskimääräisiä arvioituja tiedonsiirtovaatimuksia.

Nykyisillä mobiiliyhteyksillä normaali internetsivujen selailu, sosiaalisen median käyttö sekä musiikin kuuntelu onnistuvat hyvin. Yleisimpiä palveluita ja sivustoja käytettäessä verkon latausnopeus nousee lähetysnopeutta suurempaan rooliin. Suurimmat vaatimukset mobiiliverkon kapasiteetille aiheuttavat korkealaatuisten videoiden käyttäminen sekä suurikokoisten tiedostojen siirtäminen palvelimen ja päätelaitteen välillä.

4G-verkot ja ensimmäiset 5G-verkot riittävät käytännössä hyvin myös suurempia tiedonsiirtotarpeita vaativien videoiden katseluun videopalveluiden buffer-toiminnon ansioista. Merkittävät haasteet tulevat, kun suurta kapasiteettia vaativaa videokuvaa tulee siirtää reaaliaikaisesti, esimerkiksi videopuheluita tai valvontaa varten. Tulevaisuuden riittävyyden kannalta keskeinen tekijä ei ole niinkään palvelun absoluuttiset tiedonsiirtovaatimukset, vaan enemmänkin samaan tukiaseman soluun kohdistuvien käyttäjien määrä sekä heidän käyttämänsä palvelut. Nykyisten verkkojen ja lähitulevaisuuden kehityksen osalta verkkojen riittävyyden voidaan nähdä olevan kohtuullinen etenkin taajamien läheisillä tieverkoilla.

Suurimmat haasteet kapasiteetin riittävyyden suhteen tulevat kohdistumaan jatkossakin rautatieverkolle johtuen syrjäisistä taajamien ulkopuolisista osuuksista sekä matkaviestinverkon kannalta suurista hetkellisistä käyttäjämääristä, jotka kuormittavat verkkoa.

4.3 Tieliikenteen palvelut

4.3.1 Nykyisten tieliikenteen palveluiden vaatimukset matkaviestinverkolle

Tällä hetkellä yleisimmät liikenteen palvelut liittyvät pääosin keliolosuhteisiin ja liikenteen sujuvuus- ja häiriötietoihin, joita pystytään käyttämään jo 3G- ja 4G-verkoissa. Ennen autonomisia ajoneuvoja tieliikenteessä otetaan käyttöön turvallisuuteen liittyviä ja kuljettajaa tukevia palveluja, joilla kuljettajaa pystytään informoimaan edessä olevista liikenneolosuhteista.

Seuraavaksi tieliikenteessä tulevat yleistymään ns. C-ITS-palvelut. C-ITS -palveluilla tarkoitetaan yhteistoiminnallista ajamista auttavia palveluja eli käytännössä tieto- ja viestintäteknologioiden soveltamista liikenteeseen. Euroopan Komission ajamat palvelut toteutuvat todennäköisesti laajasti lähivuosina, mutta todennäköisesti paljon laajemmin matkaviestinverkkoihin tukeutuvina kuin yhteistoiminnallisen ajamisen suunnitelmissa on alun perin ajateltu. Strategia määrittelee C-ITS palvelut ja jakaa ne kahteen luokkaan; ensimmäiseksi toteutettavat standardoidut palvelut (ns. Day 1 -palvelut) ja seuraavaksi standardoitavat ja toteutettavat palvelut (Day 1.5 -palvelut). C-ITS-palvelut ovat toteutettavissa lyhyen kantaman kommunikoinnin tai matkaviestinverkon välityksellä. Nykyiset matkaviestinverkot mahdollistavat nyt ns. Day 1-palvelut sekä useimmat Day 1.5-palvelut.

Day 1-palvelut	Day 1.5-palvelut
- Hitaan ajoneuvon ja edessä olevan liikenteen varoitus (Slow or stationary vehicles & Traffic ahead warning) - Tietyövaroitus (Road works warning) - Sääolosuhtevaroitusta (Weather conditions) - Hätäjarrutusvaroitus (Emergency brake light) - Vastaantulevan hälytysajoneuvon varoitus (Emergency vehicle approaching) - Varoitus muusta vaarasta (Other hazardous notifications) - Opastus ajoneuvoon (In-vehicle signage) - Nopeusrajoitus ajoneuvoon (In-vehicle speed limits) - Opasterikkomus / risteys turvallisuu (Signal violation / Intersection Safety) - Liikennevaloetuisuuden pyyntö (Traffic signal priority request by designated vehicles) - Vihreä aalto (Green Light Optimal Speed Advisory - GLOSA) - Anturijoneuvodata (Probe vehicle data) - Nopeussuositus (Shockwave Damping)	- Informaatio vaihtoehtoisten käyttövoimien tankkauspaikoista (Information on fuelling & charging stations for alternative fuel vehicles) - Haavoittuvien tienkäyttäjien suojelu (Vulnerable Road user protection) - Tienvarsipysäköinnin opastus (On street parking management & information) - Tienvarsien ulkopuolisen pysäköinnin opastus (Off street parking information) - Liittymäliikennetieto (Park & Ride information) - Yhteistoiminnallinen navigointipalvelu kaupunkiin/kaupungista (Connected & Cooperative navigation into and out of the city (1st and last mile, parking, route advice, coordinated traffic lights)) - Liikennetieto ja älykäs reititys (Traffic information & Smart routing).

Kuva 5: Matkaviestinverkkojen mahdollistamat C-ITS nk. Day 1 ja Day 1.5 palvelut

4.3.2 Tieliikenteen automaation vaatimukset matkaviestinverkoille

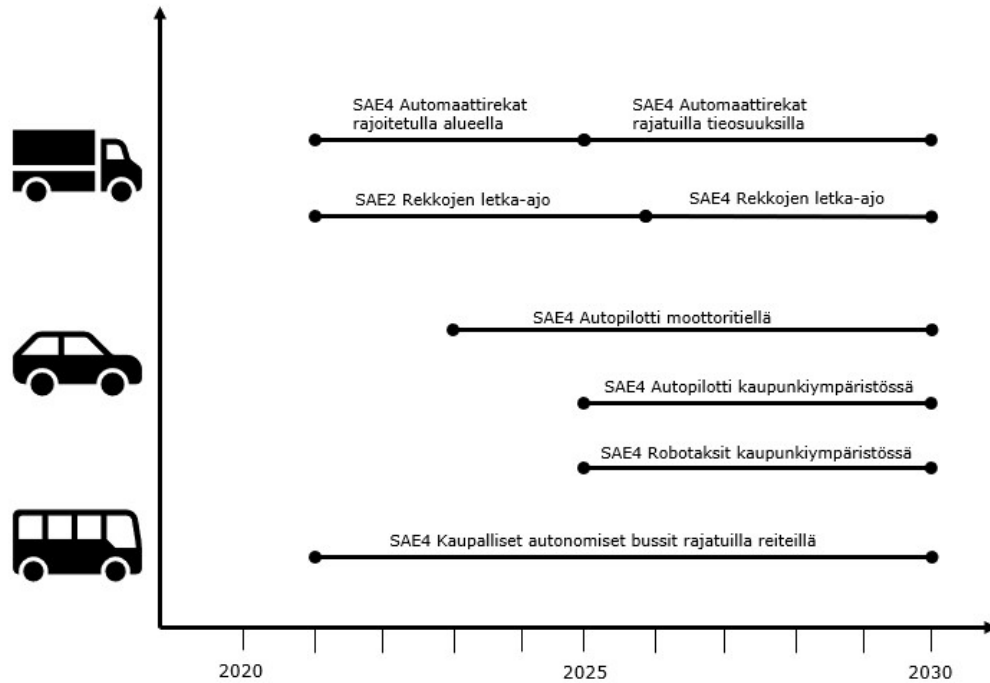
Yhteistoiminnallista ajamista auttavien palveluiden rinnalla tieliikenteen automatisoituminen etenee ja autonomisia ajoneuvoja tulee lähivuosina markkinoille. Automaattiajamisessa ajoneuvojen automatisaatiotaso on jaettu viiteen tasoon, joista tasot 3, 4 ja 5 ovat merkityksellisiä liikenteen tulevien palveluiden kannalta.

Tason 3 ajoneuvot voivat ajaa automaattisesti kuljettajan valvonnassa ja ne kykenevät ”aisti-maan” ympäristöään ja tekemään päätöksiä saadun informaation perusteella. Tasolla 3 ajotilannekohtainen automaattiajojärjestelmä kattaa kaikki dynaamisen ajotehtävän osa-alueet, mutta ihmisen täytyy ottaa tarvittaessa auto hallintaansa, kun järjestelmä niin pyytää. Tason 3 autot eivät vaadi toimiakseen matkaviestinverkkoja, mutta auton kuljettajat voivat hyödyntää ajamista tukevia palveluita, kuten liikenteen sujuvuus- ja häiriötilannetietoja.

Tason 4 ajoneuvot ovat tasoa 3 autonomisempia ja niissä on samat ominaisuudet kuin tason 3 ajoneuvoissa. Tason 4 autonomiset ajoneuvot kykenevät toimimaan täysin itsenäisesti esim. rajatuilla maantieteellisillä alueilla, myös muun liikenteen seassa. Ajotilannekohtainen automaattiajojärjestelmä kattaa kaikki dynaamisen ajotehtävän osa-alueet myös silloin, kun ihminen ei ota autoa hallintaansa, vaikka järjestelmä niin pyytää. Tällöin järjestelmän on pystyttävä itsenäisesti ohjaamaan ajoneuvo hallitusti tien sivuun. Tason 4 ajoneuvoja tulee voida seurata ja tarvittaessa ne tulee pystyä ottamaan ”etäkontrolliin”. Mobiiliverkkojen avulla voidaan esimerkiksi mahdollistaa etäohjauksessa tarvittavan videokuvan välittäminen ajoneuvon ja valvontakeskuksen välillä. Tällöin valvomo voi selvittää etänä ongelmaa ja suunnitella tarvittavia vaihtoehtoja esimerkiksi uudelleenreititykselle esteen ohi. Valvomon periaatteena on siis valvoa ajamista ja puuttua tarvittaessa asioihin, mutta ei varsinaisesti ajaa. Haastatteluissa asiantuntijat olivat pääosin sitä mieltä, että tason 4 ajoneuvojen tulee toimia autonomisesti ja ajoneuvoissa tulee olla tähän riittävä älykyys. Kaikki olennainen laskenta ja päätökset on pystyttävä tekemään ajoneuvossa, sillä matkaviestinverkoissa voi aina olla katveja tai katkoksia. Yksittäinen palveluntarve voidaan toteuttaa jo nykyisellään 4G:n avulla, mutta monen käyttäjän samanaikainen palveluntarve, esim. ruuhkatilanteessa, voi aiheuttaa merkittävää kuormitusta mobiiliverkolle.

Tason 5 ajoneuvot toimivat täysin autonomisesti ja itsenäisesti, joten suoriutuakseen ajotehtävästä ne eivät sinänsä tarvitse ulkoisia tietoliikenneyhteyksiä. Toisaalta kaikki asiat, jotka liittyvät muuttuvaan toimintaympäristöön, olosuhteisiin, häiriötilanteisiin ja joita tasoon 5 ajoneuvo ei kykene omilla järjestelmillään ja antureillaan havainnoimaan, on tärkeää saada välitettyä matkaviestinverkon välityksellä ajoneuvoihin. Sama koskee ohjelmistopäivityksiä autoihin, matkustajien käyttämiä kapasiteettia vaativia palvelua esim. reaaliaikaista videokuvaa. Näissä tapauksissa matalaviiveinen ja suurikapasiteettinen matkaviestinverkko on hyödyllinen ja tarpeen. SAE -tason 5 ajoneuvojen uskotaan olevan valmiina markkinoille ehkä n. 10 - 15 vuoden kuluessa, vaikka jotkut autonvalmistajat ovat esittäneet nopeampiakin aikatauluja.

Automaattiliikenteen toteutuminen ei ole tapahtunut niin nopeasti kuin autovalmistajat ovat viime vuosina julkisesti kertoneet. Asia on osoittautunut haasteellisemmaksi kuin aikaisemmin uskottiin. Lisäksi automaattiliikenteeseen liittyy monia toistaiseksi ratkaisemattomia turvallisuus- ja vastuukysymyksiä eivätkä autonvalmistajat tule laajassa mittakaavassa valmistamaan autoja ennen kuin lainsäädäntö mahdollistaa autojen käytön laajamittaisesti. Vuonna 2020 tehdyn Victoria Transport Policy Institutin arvion mukaan autonomisten ajoneuvojen myynti, lukumäärä ja ajatut kilometrit saavuttavat 20 % osuuden vasta 2040-luvulla. Alla olevassa kuvassa on esitetty eri SAE -tasojen ajoneuvojen markkinoille tulon ja yleistymisen odotettavissa oleva aikataulu. Tähän toki liittyy vielä epävarmuustekijöitä, varsinkin Suomessa.



Kuva 6: Autonomisen ajamisen eri tasojen markkinoille tulo (Lähde: Helsingin seudun pääväylien liikenteen hallinta 2030: Selvitys teknologian kehittymisen tuomista tarpeista ja mahdollisuuksista, Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen raportti 7/2019).

4.3.2.1 Muut tieliikenteen matkaviestinverkkoja hyödyntävät palvelut

Ajoneuvojen automatisointi ei tule olemaan yksittäinen palvelu, vaan se tulee muodostumaan useista yksittäisistä osakäyttötapauksia, jotka muodostavat lopulta ”kokonaispalvelun”. Palvelut tulevat muotoutumaan ja kehittymään tulevana vuosina.

Liikenteen palveluissa tapahtuva kommunikointi voidaan ratkaista kahdella päätavalla, joista toinen perustuu matkaviestinverkkojen käyttöön ja toinen suoraan kommunikointiin ajoneuvojen välillä. Suora ajoneuvojen välinen kommunikointi ei vaadi siis toimiakseen lainkaan matkaviestinverkkoa. Matkaviestinverkkojen kautta tapahtuvassa kommunikoinnissa vaatimukset matkaviestinverkon tasolle määräytyvät käytettävien sovellusten tiedonsiirtotarpeiden ja reaaliaikaisuustavoitteiden mukaan. Varsinaisessa autonomisessa ajamisessa tarvittavien palveluiden lisäksi liikenteen tulevista palveluista tunnistettiin seuraavia uusia palveluita, jotka tulevat todennäköisesti ainakin jossain määrin hyödyntämään mobiiliverkkoja.

Seuraavaan taulukkoon on tunnistettu ja kerätty keskeisiä osakäyttötapauksia ja arvioitu niiden tiedonsiirto- ja viivetarvetta. Tieliikennettä koskevat käyttötapaukset on jaettu taulukkoon kahteen eri kategoriaan: yksittäisiin ajoneuvoihin liittyviin käyttötapauksiin (henkilö- ja tavaraliikenne) sekä tieliikenteen hallintaan liittyviin käyttötapauksiin. Keskeiset käyttötapaukset on kuvattu tarkemmin liitteessä 2.

Taulukossa on myös arvioitu mahdollisuutta käyttötapauksen toteuttamiseen 4G-verkon avulla sekä lisätiedoksi on määriteltä teknisesti merkittävä tekijä tai havainto arvioinnin osalta. 4G:lle on määritetty tiedonsiirron maksimikapasiteetiksi latausnopeuden osalta 23 Mbit/s ja viiveen osalta 28 ms. Tiedonsiirtonopeuden maksimikapasiteetti perustuu Netradarin mittauksiin keskimääräisestä 4G-verkkojen tiedonsiirtonopeudesta Suomessa vuonna 2019 ja vastaavasti viive Ooklan Speedtest.net-sivuston mobiiliverkon käyttäjiltä koostamaan mittausdataan. Koska mitatut luvut ovat keskimääräisiä arvoja, tarkoittaa, että 4G-verkoilla voidaan keskimäärin päästä edellä mainittuihin arvoihin hetkellisesti. Nykyisten 4G-verkkojen avulla edellä mainittuja arvoja ei pystytä takamaan kaikille tienkäyttäjille samanaikaisesti jatkuvana tiedonsiirtonopeutena. Lähtökohtaisesti 4G-verkkoja voidaan hyödyntää kohtalaisen viiveen sallivissa kohtuullista tai pientä tiedonsiirtokapasiteettia hyödyntävissä liikenteen palveluissa. Käytännössä palvelun tarvitseman kapasiteetin todelliseen riittävyyteen vaikuttaa merkittävästi myös samassa tukiaseman solussa olevien käyttäjien määrä ja palvelutarve. Taulukkoon kirjatut tiedonsiirtotarpeet ja viivevaatimus perustuvat osittain teoriaan sekä arvioihin ja todellisessa tilanteessa arvot saattavat poiketa joissakin tapauksissa jopa merkittävästi annetuista arvoista.

Palvelu	Tiedonsiirto		Arvioitu viive- kriittisyys (jos alle 100 ms)	Toteutus mahdollinen 4G-tekno- logialla	Lisätieto
	Vastaanotto	Lähtettäminen			
Yksittäisiin ajoneuvoihin liittyvät käyttötapaukset (suuri määrä yksittäisiä ja satunnaisia yhteyksiä ja tiedonsiirtotarpeita)					
Kriisi- ja häiriötilanteiden hallinta	8 kbit/s	8 kbit/s	-	Kyllä	V2I/V2N
Työmaavaroitus	8 kbit/s	8 kbit/s	-	Kyllä	V2I/V2N
Tiesäävaroitus	8 kbit/s	8 kbit/s	-	Kyllä	V2I/V2N
Liikenneinformaation tarjonta	8 kbit/s	8 kbit/s	-	Kyllä	V2I/V2N
Nopeusrajoitustieto ajoneuvoon	6 kbit/s	6 kbit/s	-	Kyllä	V2I/V2N
Liikenteen ruuhkavaroitus	24 kbit/s	-	-	Kyllä	V2V/V2I/V2N
Letka-ajo	150 kbit/s	50 kbit/s	< 20 ms	Ei	V2V/V2N. Viivekriittinen palvelu.
eCall-hätäviestipalvelu	100 kbit/s	100 kbit/s	-	Kyllä	V2N. SIP-puhelun tiedonsiirtoa varten 100 kbit/s.
Ohjelmistopäivitysten välittäminen autoihin	0,5 Mbit/s (200 Mt/h)	-	-	Kyllä	V2N. Harkittava onko syytä kuormittaa matkaviestinverkkoa väylillä. Tiedonsiirto tulisi ajoittaa esim. sijainnin mukaan kotiin tai työpaikalle
Etätuki esteen ohittamiseksi (Obstructed view assist)	5 Mbit/s	-	< 20 ms	Ei	V2V/V2I/V2N. Viiveen tulee olla pieni esim. kun esteistä kertovaa dataa lähetetään ajoneuvolle
HD-karttatiedon välitys ja jakaminen autonomisille autoille	16 Mbit/s	47 Mbit/s (ilman LiDAR-dataa 12 Mbit/s)	50-100 ms	Ei	V2N. Tiedonsiirtokapasiteetti suuri 4G-verkolle erityisesti lähettämisen osalta
Potilaan siirron monitorointi (ambulanssi)	-	9 Mbit/s	-	Rajoitettu	V2N. Lähetyksikaistan riittävyys kriittistä potilaan elintoimintoja lähetettäessä. Harvaan asutuilla alueilla toimivuutta ei voida taata 4G-verkossa.
Autonomisen ajoneuvon raportointi sen irtaantuessa verkosta	-	27 Mbit/s	-	Rajoitettu	V2N/V2V. Ei viivekriittistä. Toteutus mahdollinen, mutta rajattu 4G-verkossa tiedonsiirtokapasiteettivaatimuksen vuoksi.

Etäoperoitu ajaminen V2N (etäajo)	400 kbit/s	36 Mbit/s	< 20 ms	Ei	V2N. Viiveen oltava hyvin pieni ja tiedonsiirtokapasiteetti suhteellisen suuri 4G-verkolle erityisesti lähettämisen osalta
Tieliikenteen hallintaan liittyvät käyttötapaukset (pieni määrä jatkuvia yksittäisiä tiedonsiirtotarpeita/kuormitusta verkolle)					
Etäoperoitun ajamisen tuki (esim. tieinfran valvontakamera)	400 kbit/s	36 Mbit/s	20-100 ms	Ei	V2N. Viiveen oltava hyvin pieni ja tiedonsiirtokapasiteetti suhteellisen suuri 4G-verkolle erityisesti lähettämisen osalta
Infran tukemat yhteydet ajoneuvojen ja "haavoittuvien" tienkäyttäjien kanssa (VRU) esim. näköestetilanteissa	24 Mbit/s	-	20 - 100 ms	Rajoitettu	V2I/V2N. Viiveen oltava hyvin pieni ja tiedonsiirtokapasiteetti suhteellisen suuri 4G-verkolle
Dynaaminen liittymien hallinta	25 kbit/s	25 kbit/s	20 - 100 ms	Ei	V2I/V2N. Viivekriittinen palvelu.
Infra-avusteinen ympäristönsuranta (sensorit tai kamera-valvonta lähettävät dataa verkkoon)	4 Mbit/s	110 Mbit/s	Yli 100 ms	Ei	V2N. Tiedonsiirtokapasiteetin tarve liian suuri 4G-verkolle.
Teiden kunnossapito (ml. talvikunnossapito)	16 Mbit/s	47 Mbit/s (ilman LiDAR-dataa 12 Mbit/s)	50-100 ms	Ei	V2N. Tiedonsiirtokapasiteetti suuri 4G-verkolle erityisesti lähettämisen osalta

Taulukko 5: Keskeisiä tieliikenteen palveluita sekä niiden tiedonsiirtoon ja viiveeseen liittyviä tarvearvioita (5GAA, 2020)

Tunnistettujen tulevaisuuden käyttötapauksien perusteella ajoneuvojen tiedonsiirron latauksen kapasiteettitarpeet ovat maltillisia, mutta lähettämisen kapasiteettitarpeet voivat nousta hyvinkin korkeiksi. Taulukossa tunnistettujen oleellisten yksittäisiä ajoneuvoja koskevien käyttötapauksien yhteenlaskettu tiedonsiirtokapasiteettitarve on lataamisen osalta noin 23 Mbit/s ja lähettämisen osalta 120 Mbit/s. Mikäli palvelut tulevaisuudessa toteutusivat kuvatus kaltaisina, näyttäisi, että tulevan verkon kapasiteettitarvetta määrittäisi enemmänkin ajoneuvojen lähetystarpeet kuin lataustarpeet.

Yhteenlasketut kapasiteettitarpeet näyttäisivät toisaalta kuvaavan enemmän ajoneuvojen tarvitsemaa huippukapasiteettia, jos kaikki käyttötapaukset tulisivat käyttöön samanaikaisesti. Suurin osa käyttötapauksista ei näyttäisi vaativan jatkuvaa tiedonsiirtokapasiteettia koko väylän pituudelta. Tunnistetut käyttötapaukset saattavat vaatia jatkuvaa tiedonsiirtokapasiteettia tietyssä osassa väylään esim. liittymäalueella, tai jatkuvan tiedonsiirron vaatimus näyttäisi liittyvän enemmän tiettyyn yksittäiseen tilanteeseen (event triggered).

Yksittäisten ajoneuvojen automaattiajamiseen liittyvät koko väylän matkalla aidosti jatkuvat käyttötapaukset tarvitsevat pääsääntöisesti vain vähän tiedonsiirtokapasiteettia. Koska ajoneuvoja on kuitenkin määrällisesti paljon, yhden tieosuuden kokonaistiedonsiirtokapasiteettitarve nousee helposti hyvin korkeaksi.

Käytännössä yhden ajoneuvon kokonaiskapasiteettitarve on huomattavasti suurempi kuin pelkkä edellä mainittu ajoneuvon liikkumiseen liittyvä kapasiteettitarve. Henkilöliikenteessä ajoneuvojen kapasiteettitarpeiden lisäksi matkustajat tulevat jatkossa hyödyntämään kasvavissa määrin viihdepalveluita. Joukkoliikenteessä yhdessä linja-autossa voi olla samanaikaisesti useita kymmeniä matkustajia, jolloin myös matkustajien tarpeet ovat moninkertaisia henkilöliikenteeseen nähden. Tavaraliikenteessä kaluston seurannan, ajotavan tehostamisen sekä reittien optimoinnin palvelut yleistyvät, mutta ainakin toistaiseksi näiden palveluiden tiedonsiirtovaatimukset ovat olleet maltillisia. Suuremman tiedonsiirtovaatimuksen aiheuttaa todennäköisesti ainakin ensivaiheessa kuljettajien hyödyntämien viihdepalveluiden liisäntyminen autonomisten ajoneuvojen yleistytessä.

Käytännössä yllä oleviin lähetyskapasiteettitarpeisiin pääseminen tulee olemaan teknisesti hyvin hankalaa 5G-verkoillakin etenkin vilkkaasti liikennöidyillä väylän osilla. Maissa, joissa

liikennemäärät ovat moninkertaisia tämä voi olla jopa teknisesti mahdotonta tai vaatia vähintään 6G-verkkoja. On siis oletettavaa, että käyttötapauksen lähetystarpeiden on pystyttävä laskemaan palveluiden kehittymisen myötä.

Tiedonsiirron latauksen näkökulmasta eniten tiedonsiirtokapasiteettia vaativat HD-kartat, ODD-päivitykset sekä ajoneuvojen ohjelmistopäivitykset. Käyttötapaukset ovat kuitenkin todennäköisesti enemmän kertaluonteisia, kuin jatkuvaa tiedonsiirtokapasiteettia vaativia. Tietynlaisena erikoistapauksena on ajoneuvojen etätuki liikenteen häiriötilanteessa, jossa ajoneuvo tarvitsee jatkuvaa tukea esim. valvomosta. Vaikka tiedonsiirtokapasiteetin tarve ei kohdistu jatkuvana koko väylälle, tiedonsiirtokapasiteetin näkökulmasta tilanteen tekee haastavaksi se, että vastaavaa etätukea tarvitsee samanaikaisesti todennäköisesti myös muut samalla alueella olevat ajoneuvot. Samanaikainen kysyntä aiheuttaa tiedonsiirron kokonaiskapasiteettiin selkeän piikin, johon on etukäteen vaikea varautua, ellei koko tieverkon tiedonsiirtokapasiteettia olisi merkittävästi ylimitoitettu tavanomaiseen käyttötarpeeseen nähden. Toisaalta ongelmatilanne on ratkaistavissa myös autojen välisen koordinaatiopalvelun kehittämisellä (vrt. letka-ajo), jolloin tiedonsiirtokapasiteetti ei kuormittuisi.

Lähtämisen tiedonsiirtokapasiteetin näkökulmasta tunnistetut käyttötapaukset eivät myöskään vaadi merkittävää jatkuvaa tiedonsiirtokapasiteettia, vaan suurin osa käyttötapauksista ovat vastaavalla tavalla kertaluonteisia (event triggered). Suurinta lähetyskapasiteettia vaativat palvelut, joissa videokuvaa tai muuta tietorikasta sisältö ladataan verkkoon. Tällaisia palveluita ovat esimerkiksi etäoperoitu ajaminen tai yksittäisiä erikoisajoneuvoja koskevat tarpeet, kuten ambulanssissa olevan potilaan etämonitorointi sairaalasta tai HD-kartta-aineistoa tuottava mitta-auto. Näidenkään käyttötapauksen tiedonsiirtotarpeet tarpeet eivät välttämättä ole täysin jatkuvia, vaan ne voivat tapahtua tietyin tasaisin väliajoin.

Pelkän viiveen näkökulmasta suurin osa käyttötapauksista ei ole viivekriittisiä tavalla, joka edellyttäisi 5G-teknologiaa. Osassa käyttötapauksia viiveen tarve on niin matala, että sitä ei pysty tuottamaan 4G-teknologian avulla, jolloin 5G-verkolta edellytetään kattavuutta.

Suoraan ajoneuvoihin liittyvien käyttötapauksen lisäksi tunnistettiin käyttötapauksia, jotka tarvitsevat suurta lähtämisen tiedonsiirtokapasiteettia. Näistä useat käyttötapaukset liittyvät vähintään epäsuorasti liikenteen hallintaan ja ohjaukseen. Tällaisia tapauksia olivat mm. risteyksen videovalvonta, jota voitaisiin hyödyntää esim. onnettomuustapauksessa, jolloin ajoneuvoille voidaan antaa täydentävää tilannekuvaa mahdollisista esteistä ja poikkeusreiteistä. Tällöin kamerasta voidaan tuottaa esimerkiksi jatkuvaa videokuvaa verkkoon, josta se voidaan jakaa pakattuina viesteinä ajoneuvoihin. Kiinteiden kameroiden ja muiden infran laitteiden osalta tiedonsiirto on mahdollista toteuttaa kiintein yhteyksin, jolloin ne eivät kuormita mobiiliverkkoja.

Teoriassa monet käyttötapaukset ovat tiedonsiirtokapasiteetin osalta toteutettavissa jo 4G-teknologian avulla, mutta palveluita tarvitsevien ajoneuvomäärien ja palveluiden tiedonvaimusten kasvaessa tulee 5G-teknologian tarve vastaan nopeasti. Viivekriittiset ratkaisut vaativat lähes poikkeuksetta taas 5G-teknologian käyttöä ja osa käyttötapauksista on lähtämisen tiedonsiirtotarpeen osalta toteutettava 5G-teknologian avulla, varsinkin kun useita vastaavia sovelluksia halutaan käyttää samanaikaisesti saman tukiaseman tai solun alueella.

4.4 Rautatieliikenteen palvelut

Rautatieliikenteessä mobiiliyhteyksiä hyödynnetään mm. kuljettajien päätelaitteissa, rautatiealueella toimivien urakoitsijoiden tarvitsemiin palveluihin sekä matkustajien tiedonsiirtoon. Kaupallisten mobiiliyhteyksien lisäksi rautatieliikenteen henkilöstön käytössä on viranomaisverkko VIRVE, jota käytetään puheviestintään niin viranomaisten kesken kuin viranomaisten ja rautatieliikenteen välillä.

Rautatieliikenne tuo yleisesti suuria haasteita mobiiliverkkojen toimivuudelle, sillä nopeasti harvaan asuttujen alueiden läpi kulkevassa, paljon käyttäjiä kuljettavassa, junassa mobiiliyhteys ei aina riitä kaikkien käyttäjien tarpeisiin. Markkinaehtoinen matkaviestinverkkojen rakentaminen ei ole toistaiseksi houkutellut operaattoreita rakentamaan tehokkaita yhteyksiä rautateiden varsille.

Tällä hetkellä junien henkilöstöllä on käytössään useita eri mobiilisovelluksia, joita hyödynnetään käyttötarkoituksesta ja -tarpeesta riippuen. Sovelluksia on kehitetty mm. tilanne- ja häiriötiedottamiseen, junien kokoonpanon suunnitteluun, henkilöstön keskinäiseen yhteydenpitoon, myyntipalveluihin sekä muuhun junatyöhön liittyen.

Lähivuosina etäsensoroinnin ja -ohjauksen mahdollisuudet kasvavat myös rautatieliikenteessä, jolloin esimerkiksi ratainfraa voidaan seurata tarkemmin uusia antureita hyödyntämällä. Etäsensoroinnin avulla voidaan seurata esimerkiksi radan ja kaluston huoltoon ja ylläpitoon liittyviä tarpeita sekä ennakoida niitä paremmin. Osa etäsensoroinnista on mahdollista toteuttaa jo nykyisten matkaviestinverkkojen avulla, mutta aikakriittisiä toimintoja varten tarvitaan 5G-verkkojen toiminnallisuuksia. 5G antaa myös mahdollisuuden huomattavasti suurempiin laitemääriin tukiasemaa kohden, joten sensoreiden ja niiden myötä kasvava datan määrä pystytään myös paremmin käsittelemään 5G-verkkojen avulla.

Kameroiden ja konenäön hyödyntämisen mahdollisuudet ovat korostumassa tulevaisuudessa mm. rataverkon kunnon seurannassa ja tarvittavien toimenpiteiden suunnittelussa. Kone näköä on käytetty mm. rataverkon merkkien ja opasteiden kunnon arviointiin keräämällä kuvia ja videoita mobiililaitteen avulla. Konenäön palveluissa yksittäisten siirrettävien kuvien koko on ollut n. 100 - 500 kilotavun luokkaa, 5 minuutin videon yli 150 Mt ja tunnin videon n. 2 Gt.

4.5 Meriliikenteen palvelut

Meriliikenteen osalta matkaviestinverkkojen kautta toimivat uudet palvelut keskittyvät pääosin satamaan ja mahdollisesti saaristoon. Satamille automaatio- ja kuljetusketjujen digitalisaatio tuo uusia palvelukonsepteja ja liiketoimintamahdollisuuksia. Satamatoimintojen ja kuljetusten logistiikassa matkaviestinverkkoja voidaan hyödyntää esimerkiksi automaattitrukkien etäohjauksessa, satamien valvonnassa, konttien ja ajoneuvojen sijainnin hallinnassa, kulunvalvonnassa sekä ympäristötiedon keruussa. Satamissa on myös suuri tarve suurille määrille sensoreita ja IoT-laitteita, joilla voidaan seurata sataman käyttöasteita ja huoltotarpeita. Yleisellä tasolla voidaan määritellä, että satamien palveluista ne palvelut ovat toteutettavissa 4G-verkon avulla, jotka eivät vaadi reaaliaikaista kommunikointia verkkoon tai toisiin laitteisiin ja joissa verkon kautta välitettävä tietomäärä pysyy maltillisena. Esimerkiksi jo nyt konttien sijainti- tai statustieto voidaan viestiä 4G-verkon kautta. 5G-verkko luo kuitenkin mahdollisuuksia uusille satamien toimintaa tehostaville ja turvallisuutta edistäville palveluille, sillä 5G-verkkojen avulla pystytään kasvava datan määrä siirtämään tehokkaasti myös jatkossa.

Merenkulun automatisaatio edellyttää parempaa tietoa muilta aluksilta, maasta ja satamasta liittyen alusten sijaintiin, liikkumiseen, lasteihin. Lisäksi jatkossa merenkulun käyttöön voidaan tarjota päivitettyjä 3D-karttoja sekä reaaliaikaista olosuhdetietoa meriväyliltä. Merenkulun palveluita voidaan tarjota jo 4G-verkon avulla, mutta 5G:n avulla mahdollisuudet lisääntyvät mm. karttapäivitysten osalta. Merialueet kauempana rannikosta ovat haasteellisia kaikille matkaviestinverkoille ja niihin tukeutuville palveluille, joten avomeriliikenteessä tullaan jatkossakin nojautumaan satelliitteihin pohjautuviin viestintäratkaisuihin.

5 Matkaviestinverkkojen nykykapasiteetti ja peitto

5.1 Valtateiden nykykapasiteetti ja peitto

5.1.1 Saatavuusaineiston analyysi

Valtateiden matkaviestinverkkojen nykykapasiteettia ja peittoa on arvioitu perustuen Traficomien mobiiliverkkojen saatavuusaineistoon, jota on täydennetty erillisillä mittauksilla valituille tieosuuksille.

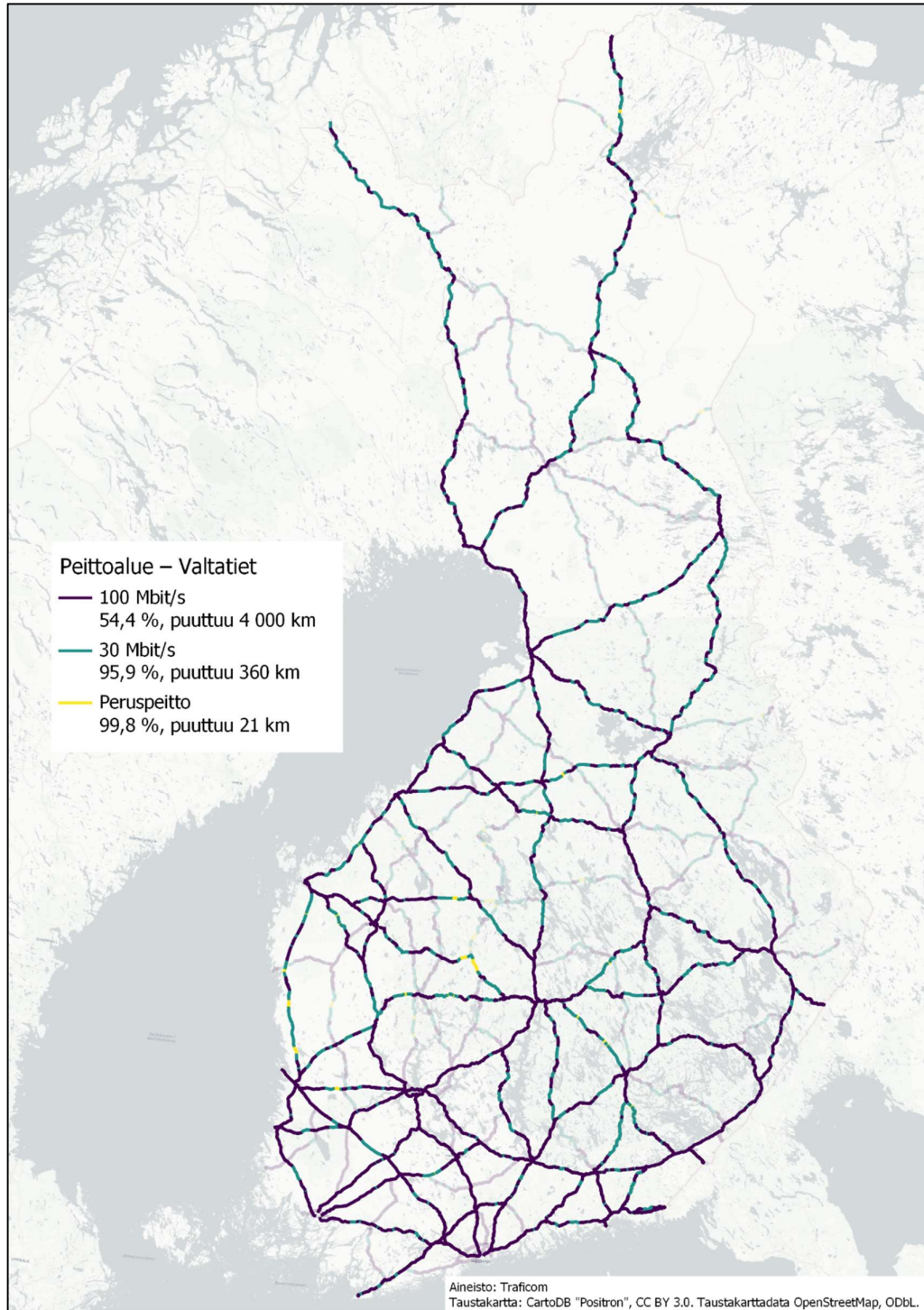
Traficomien mobiiliverkkojen saatavuusaineisto perustuu valtakunnallisten operaattoreiden Traficomille toimittamaan materiaaliin. Materiaalissa matkaviestinverkon osalta palvelujen saatavuus on ilmoitettu Traficomille verkon peittoalueena. Peittokartat perustuvat Traficomien määrittämiin signaalivoimakkuuden raja-arvoihin. Valtateiden mobiilisaatavuuden arvioimiseksi mobiiliverkkojen saatavuusaineisto on kohdistettu Väyläviraston julkaisemaan avoimeen Digiroad-tietoaaineistoon. Saatavuusaineiston analyysissä valtatieverkon mobiilisaatavuutta on tarkasteltu kolmen eri kapasiteetin näkökulmasta (peruspeitto, 30 Mbit/s, 100 Mbit/s).

Saatavuusaineistossa kolmen valtakunnallisen operaattorin peittokartat ovat yhdistetty yhdeksi aineistoksi, jolloin kunkin kapasiteetin peitto on laajempi kuin yhdenkään operaattorin todellisuudessa tarjoama peitto. Aineisto antaa tässä mielessä todellisuutta paremman kuvan eri alueiden kapasiteetista.

Tässä tarkastelussa operaattoreiden ilmoittama kapasiteetti on kohdistettu ainoastaan tieverkolle. Todellisuudessa mobiiliverkon kapasiteetti jakaantuu tienkäyttäjien lisäksi myös tieverkkoa ympäröivän alueen mobiilikäyttäjien kesken. Analyysit antavat tässä mielessä todellisuutta paremman kuvan tieverkon käytössä olevasta kapasiteetista. Mobiiliverkkojen saatavuusaineiston arvot eivät myöskään vastaa suoraan käyttäjien kokemaa todellista kapasiteettia. Mikäli saatavuusaineistossa ilmoitettua kapasiteettia hyödynnetään käyttäjän kokemaan jatkuvan kapasiteetin tarkasteluun, vastaa ilmoitettu kapasiteetti tapausta, jossa yhdessä tieverkon tukiaseman solussa olisi samanaikaisesti vain yksi käyttäjä, joka riittävän lähellä solua ollessaan saisi käyttöönsä koko solun tarjoaman kapasiteetin.

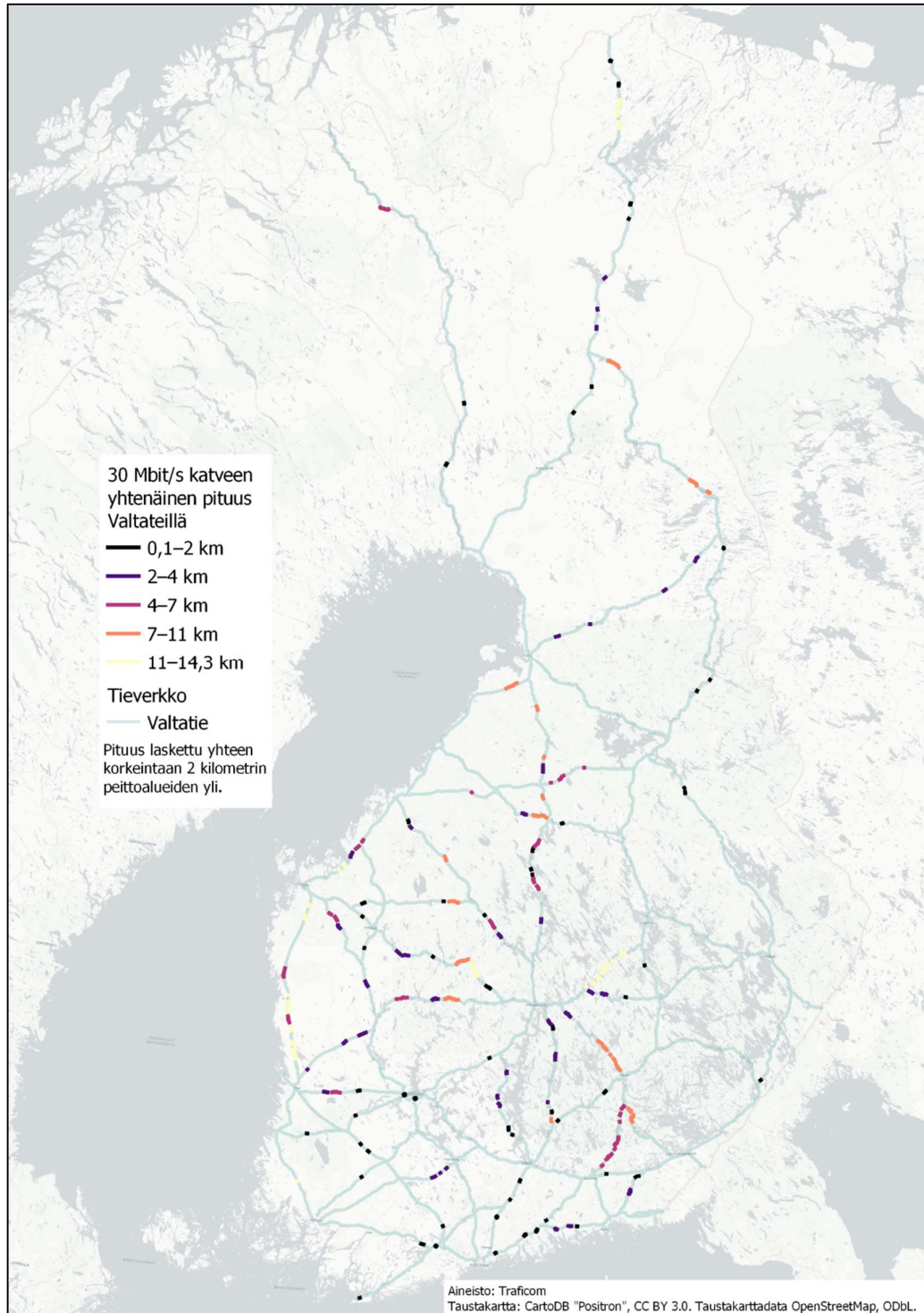
Saatavuusaineiston perusteella nykyinen peruspeitto kattaa lähes kokonaan Suomen valtatiet. Ruuhkattomassa verkossa ja hyvissä olosuhteissa 30 Mbit/s tiedonsiirtonopeus kattaa 95,9 % ja 100 Mbit/s tiedonsiirtonopeus 54,4 % valtateistä. Nopeamman tiedonsiirtoyhteyden mahdollistavat matkaviestinverkot ovat rakentuneet pääosin sinne, missä asumistiheys on suurempaa. Operaattorit eivät ole rakentaneet verkkoa niinkään liikenteen palveluita vaan yleistä mobiiliverkon käyttöä varten. Liikennemäärät ohjaavat kuitenkin kapasiteetin ja peiton kehittymistä myös väylien varsilla, johtuen käyttäjien tarpeista.

Kantateiden osalta peruspeitto kattaa lähes 100 % teistä ja 30Mbit/s on saatavilla 93,5 prosentilla kantateistä. 100 Mbit/s teoreettisen tiedonsiirtonopeuden peitto kantateillä on 42,6 %. Myös kantateiden osalta katvealueet sijoittuvat maantieteellisesti eri puolille Suomea ja eniten pitkiä katvealueita esiintyy harvemmin asutuilla alueilla. Kantateiden osalta vastaavat kartat löytyvät liitteestä 1.



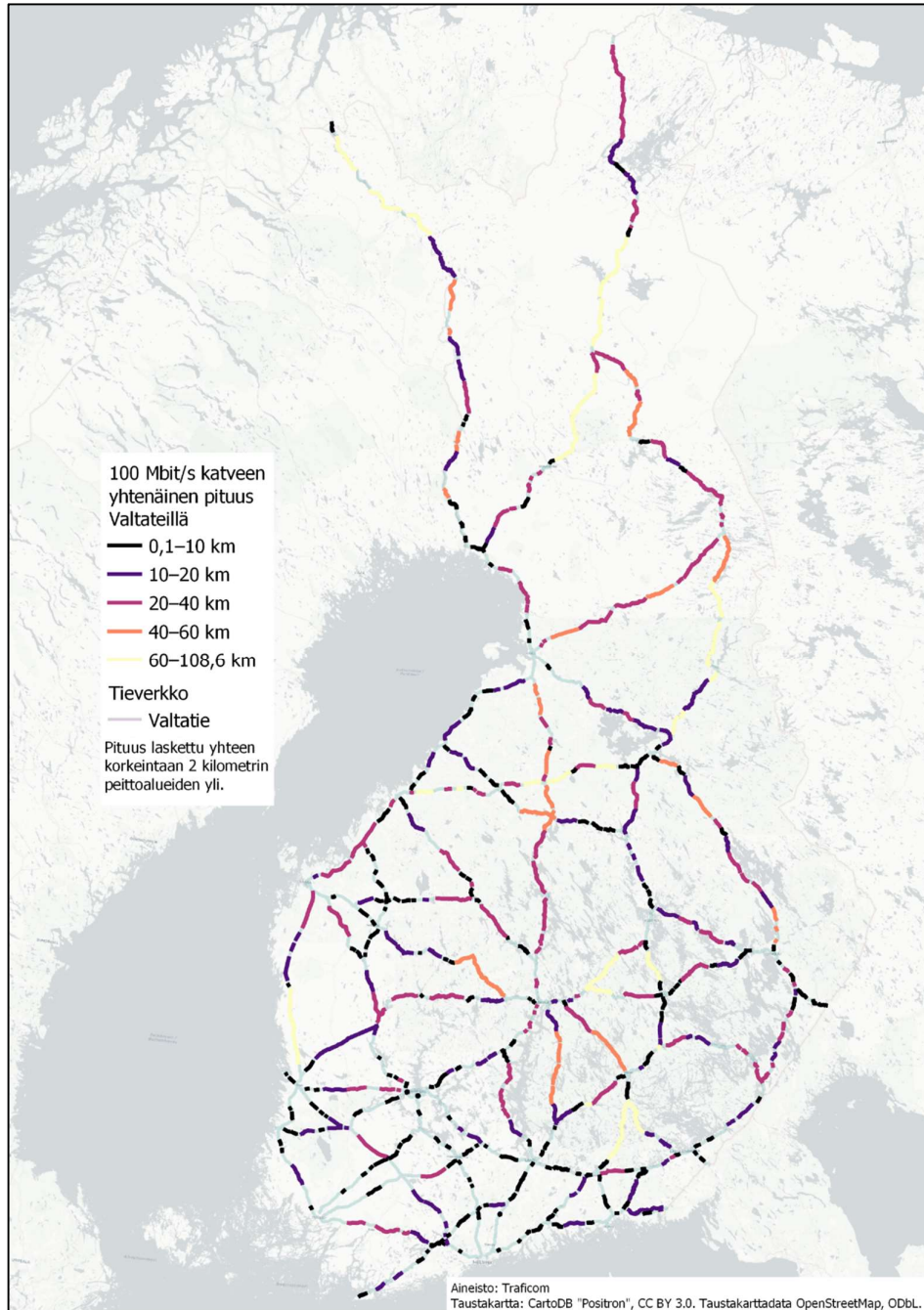
Kuva 5: Peittoalueet valtateillä.

30 Mbit/s yhteysnopeuden osalta katvealueita löytyi valtateiltä yhteensä 360 km ja kanta-teiltä 320 km. Yhtenäisten katvealueiden osalta lyhyimmät katvealueet sijoittuvat pääosin Etelä-Suomeen ja pisimmät yksittäiset katvealueet Länsi-Suomeen. Peittokarttojen perus-teella yhtenäisiä katvealueita oli vähän Itä-Suomessa.



Kuva 6: 30 Mbit/s yhtenäiset katvealueet valtateillä

100 Mbit/s yhteysnopeuden osalta katvealueita löytyi valtateiltä yhteensä 4 000 km ja kanta-teiltä 2 800 km. Yhtenäisten katvealueiden osalta lyhyimmät katvealueet sijoittuvat pääosin Etelä-Suomeen ja pisimmät yksittäiset katvealueet sijaitsevat Pohjois-Suomessa. Peittokart-tojen perusteella yhtenäisiä katvealueita oli vähän Itä-Suomessa. Muuten yhtenäiset katve-alueet sijoittuvat tasaisesti eri puolille Suomea.



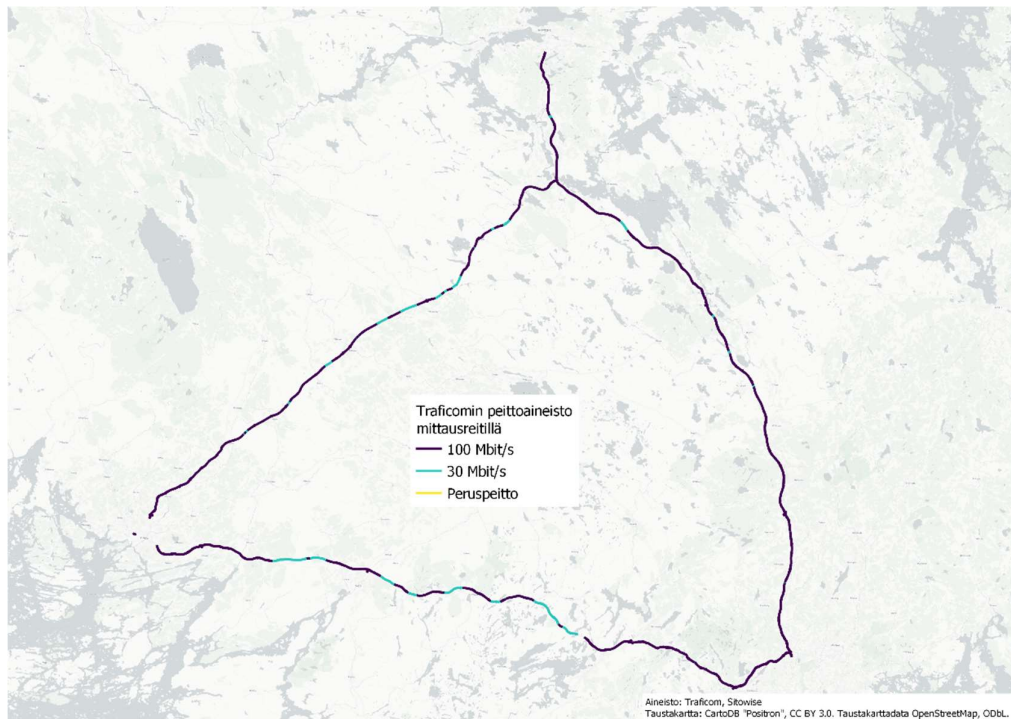
Kuva 7: 100 Mbit/s yhtenäiset katvealueet valtateillä

5.1.2 Tieverkon mittaustulokset

Valtateiden mobiiliverkkojen saatavuusaineiston tarkentamiseksi toteutettiin erilliset mittaukset Vantaa-Tampere-, Tampere-Turku-, Turku-Vantaa -väyläosuuksille. Mittauksissa tarkasteltiin kolmen valtakunnallisen operaattorin mobiiliverkkojen lataus- ja lähetyksenopeutta, viivettä sekä käytössä olevia taajuuksia. Mittauksissa operaattoreiden liittyminä käytettiin nopeimpia ja rajoittamattomimpia liittymiä sekä palvelinratkaisuna mittauksille varattua palvelinta symmetrisellä 2/2 Gbit/s liittymällä.

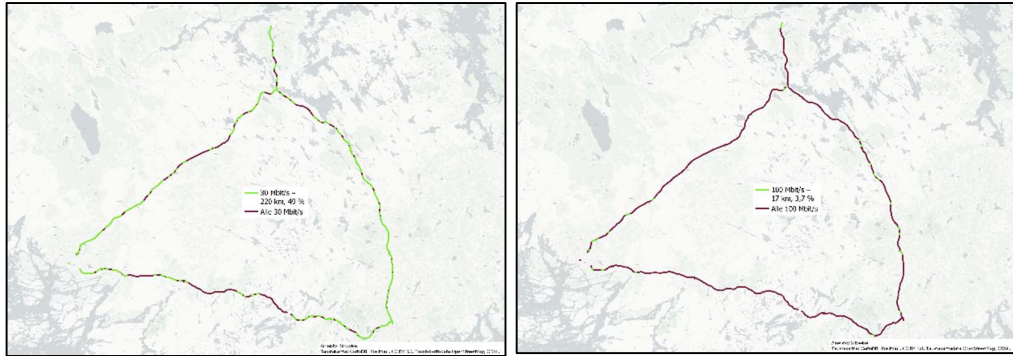
Mittausväli		Mittausaika	
Lähtöpiste	Päätepiste	Alku	Loppu
Keimola	Riihimäki	8:00	8:45
Riihimäki	Tampere	8:50	9:45
Tampere	Loimaa	9:45	11:10
Loimaa	Turku	11:10	12:20
Turku	Lohja	13:10	14:10
Lohja	Keimola	14:10	14:55

Taulukko 6: Tieverkon osuuksilla suoritettujen mittausten mittausvälit ja -ajat.



Kuva 7: Traficomin saatavuusaineiston mukainen peitto mitatuilla reiteillä

Mitatuilla valtatieosuuksilla yli 30 Mbit/s latausnopeus saavutettiin 49 prosentilla reitin kokonaispituudesta ja yli 100Mbit/s tiedonsiirtonopeus 3,7 prosentilla reitin kokonaispituudesta. Suurimmassa osassa reittiä mittaustulokset olivat saatavuusaineistoissa ilmoitettua kapasiteettia matalampia, mutta joissakin yksittäisissä kohdissa myös korkeampia. Mitatut tulokset olivat suunnilleen linjassa tavanomaisen 4G-verkon käyttäjän vuonna 2019 kokeman keskimääräisen kapasiteetin kanssa, joka on n. 23 Mbit/s (Netradar 2019). On kuitenkin huomiotava, että mittauksiin vaikuttaa mittausajankohdan osuminen kellonajalle 8.00-15.00 sekä mittausten suorittaminen koronapandemian aikana, jolloin tavanomaista vähäisemmät liikennemäärät ovat voineet vaikuttaa mittaustuloksiin positiivisesti.



Kuvat 8 ja 9: 30 Mbit/s ja 100 Mbit/s latausnopeuden saatavuus mittausalueiden mukaan

Mitatuilla valtatieosuuksilla yli 5 Mbit/s tiedonsiirtonopeus (lähetys) saavutettiin reitillä 41 prosentilla reitin kokonaispituudesta. Yli 10 Mbit/s tiedonsiirtonopeus 22 prosentilla reitin kokonaispituudesta ja yli 20 Mbit/s tiedonsiirtonopeus (lähetys) saavutettiin 3,5 prosentilla reitin kokonaispituudesta.

Kun mitattuja lataus- ja lähetykskapasiteetteja verrataan tunnistettuihin yksittäisiä ajoneuvoja koskeviin tieliikenteen käyttötapauksiin, vaikuttavat mitatut tiedonsiirtonopeudet olevan riittäviä tuleviin tieliikenteen palvelutarpeisiin vain niiden palveluiden osalta, mitkä eivät edellytä korkealaatuisen videokuvan lähetystä tai latausta.

Mitatut kapasiteettimäärät ovat kuitenkin niin matalia, että mikäli lähekkäin ajaa ajoneuvoja, jotka vaativat jatkuvaa suurta tiedonsiirtokapasiteettia (esim. hälytysajoneuvon etäyhteys) tai etäpuhelut yleistyvät merkittävästi ajoneuvoissa, on hyvin suuri riski, että tieverkkojen osuiksilla tällä hetkellä oleva matkaviestinverkkojen tiedonsiirtokapasiteetti ei riitä palvelemaan tulevia kapasiteettitarpeita.

Mittaukset toteutettiin yleistä tilannetta matalammilla liikennemäärillä, on vaikeaa arvioida kapasiteetin todellista riittävyyttä normaalien liikennemäärien aikana tai etenkin liikenteen ruuhka-ajoina.

5.1.3 Skenaariotarkastelu maantieverkon kapasiteettitarpeesta

Maantieverkon mahdollista tulevaa kapasiteettitarvetta on arvioitu laskennallisesti perustuen kahteen erilliseen skenaarioon. Ensimmäisessä skenaariossa jokaiselle ajoneuvolle taatettiin 30 Mbit/s jatkuvaa latauskapasiteettia Toisessa skenaariossa jokaiselle ajoneuvolle puolestaan varattaisiin 100 Mbit/s jatkuvaa kapasiteettia.

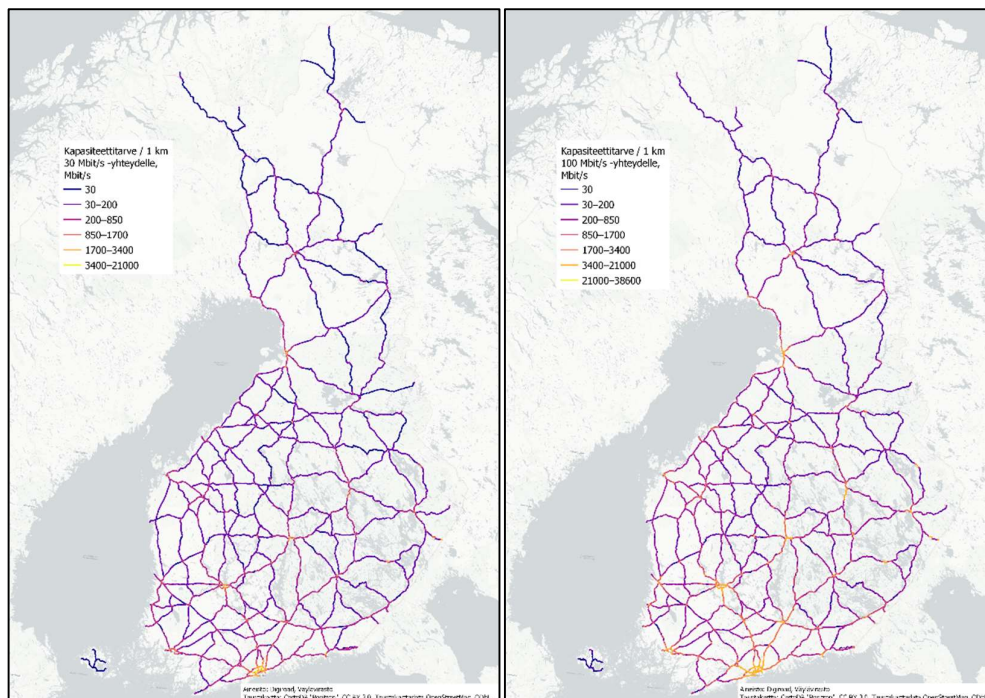
Skenaariotarkastelussa tieliikenteen käyttöön varattu kapasiteettitarve on ns. uutta kapasiteettia, joka tulisi luoda ainakin osin nykyisen mobiilikäytön kapasiteettitarpeen päälle. Ratkaisuun on päädytty, sillä uutta tarvittavaa kapasiteettitarvetta ei pystytä irrottamaan esimerkiksi viipaloinnilla nykyisestä mobiiliverkkojen kapasiteetista ilman, että se heikentäisi nykyisten mobiilikäyttäjien kokemaa kapasiteettia tai mobiiliverkkojen kokonaiskapasiteettia lisätään. Automaattiajamiseen liittyviä tulevia kapasiteettitarpeita on käsitelty uutena kapasiteettitarpeena, joka tulee nykyisen mobiilikäytön ja markkinaehtoisen kehittymisen päälle.

Skenaarioiden kapasiteettitarpeet ovat tätä työtä varten päätettyjä laskennallisia arvoja, joiden avulla on mahdollista simuloida mahdollisia tulevia kokonaiskapasiteettitarpeita. Kirjallisuusselvityksessä eikä asiantuntijahaastatteluissa tunnistettu sellaisia automaattiajamiseen liittyviä käyttötapauksia, jotka edellyttäisivät jatkuvaa 30 Mbit/s kapasiteettia jokaiselta ajoneuvolta. Hyvin suurta kapasiteettitarvetta vaativat ajoneuvoliikennettä koskevat käyttötapaukset liittyivät ajoneuvojen hetkelliseen kapasiteettitarpeeseen (esim. automaattiajoneu-

von ongelmatapauksen selvittämiseen liittyvän tilannekuvan välittäminen korkearesoluutiolla kuvalla valvomoon) tai yksittäisen ajoneuvon erikoiskäyttötapaukseen (esim. tieverkon kunnon arviointi korkearesoluutioisen videokuvan pohjalta).

On kuitenkin täysin mahdollista, että jatkuvaa suurta kapasiteettia vaativia käyttötapauksia syntyy automaation kehittymisen ja 5G-verkkojen yleistymisen myötä. Automaatiokehityksen alkuvaiheessa on kuitenkin todennäköisempää, että ajoneuvoikohtaisesti varattavasta jatkuvasta 30 Mbit/s tiedonsiirtokapasiteetista suurin osa käytettäisiin ajoneuvon matkustajien viihdekäyttöön, esimerkiksi kuljettajan ja matkustajan videopuheluun tai elokuvan katsomiseen. Esimerkiksi videopuhelussa, kuten useassa muussakin tunnistetussa automaattiajamiseen liittyvässä käyttötapauksessa, suurta tiedonsiirtokapasiteettia vaaditaan enemmänkin tiedon lataamiseen verkkoon kuin tiedon lataamiseen verkosta. Tällä hetkellä näyttää todennäköisemmältä, että erityisesti lähetykskapasiteetti olisi enemmän tietoliikenneyhteyksiä rajoittava tekijä kuin latauskapasiteetin riittävyys.

Skenaariotarkastelussa tieverkon latauskapasiteettitarvetta on arvioitu perustuen kunkin tieosuuden liikennemääriin. Tieverkko on tarkastelussa jaettu yhden kilometrin osuuksiin, jolle kullekin on arvioitu ajoneuvomäärä perustuen keskimääräisen vuorokausiliikenteen huipputunnin liikennemääriin. Tällöin ajoneuvot jakaantuvat laskennallisesti tasaisin välimatkoin tieosuudelle. Kunkin kilometrin tieosuuden kapasiteettitarve on arvioitu osuuden ajoneuvojen määrän ja ajoneuvon tarvitseman jatkuvan kapasiteettitarpeen avulla. Mikäli tiettyä jatkuvaa kapasiteettia pyrittäisiin takaamaan kullekin ajoneuvolle, olisi kokonaiskapasiteettitarve todellisuudessa merkittävästi suurempi, sillä todellisuudessa ajoneuvot eivät jakaannu tasaisesti tieverkolle eikä laskelma huomioi esimerkiksi juhlapyhien tai yksittäisten tapahtumien merkittävästi korkeampia liikennemääriä.



Kuva 10: Tieverkon kilometrikohtainen kokonaiskapasiteettitarve eri skenaarioissa

Skenaarioanalyysin tuloksena tiesakohtaisen kokonaiskapasiteettitarpeen arvioidaan olevan keskimäärin suhteellisen maltillinen väyläverkon hiljaisemmin liikennöidyillä alueilla. Vähäliikenteisillä tieverkon osilla keskimääräinen kapasiteettitarve olisi laskennallisesti mahdollista

tuottaa pitkälti nykyisistä tukiasemista, mikäli kaikki mobiiliverkkojen käytössä olevat taajuusalueet välillä 700 - 2 600 Mhz voitaisiin ottaa 5G:n käyttöön (kartoissa tieverkon osat, joissa kokonaiskapasiteettitarve on välillä 30 - 200 Mbit/s).

Käytännössä asia on huomattavasti monimutkaisempi. Keskimääräiset ajoneuvomäärät oletavat laskennallisesti, että hiljaisesti liikennöidyillä tieverkon osilla on kerralla keskimäärin noin yksi auto. Todellisuudessa missä tahansa tieverkon osassa voi muodostua vähintään muutaman auton letkoja, joita vastaan voi toista kaistaa tulla toisia autoletkoja. Tällöin muutaman sadan metrin alueella voi hetkellisesti olla useita ajoneuvoja, joille kaikille pitäisi pysyä takamaan haluttu jatkuva tiedonsiirtonopeus. Vaikka kaikki edellä mainitut taajuusalueet olisivat kohdennettu 5G-verkoille, tietoliikenneverkkojen riittävyyden kannalta ajaututaan tilanteeseen, jossa esimerkiksi 4 kilometrin osuudella jatkuva 30 Mbit/s-yhteys pystytään takaamaan samanaikaisesti noin 25 ajoneuville ja 100 Mbit/s-yhteys vain kahdeksalle ajoneuville. Tällaisessa tapauksessa kaikki alueen mobiiliyhteydet olisi kohdennettu vain tieliikenteeseen, eikä vapaata kapasiteettia jäisi lainkaan muulle mobiilikäytölle.

Edellä mainitut maksimijoneuvomäärät ovat todellisuudessa riittäviä vain hyvin pienellä osalla tieverkosta. Ajoneuvojen vaativan jatkuvan kapasiteettitarpeen varmistamiseksi suurimmalle osalle tieverkosta tulisi toteuttaa vähintään jatkuva 3,5 GHz 5G-verkko, jotta jatkuvaa tiedonsiirtokapasiteettia pystytään takaamaan ilman, että muiden mobiiliverkon käyttäjien tilanne heikkenisi merkittävästi. Jatkuvan 3,5 GHz 5G-verkon toteuttaminen edellyttäisi uusien tukiasemien rakentamista tieverkon yhteyteen muutaman kilometrin välein.

Pääväylillä ja suurten kaupunkien ympäristössä, joissa liikennemäärät ovat suuria, kilometrikohtaiset kokonaiskapasiteettitarpeet nousevat hyvin korkeiksi. Kartan tieosuuksilla, joilla yhden kilometrin kokonaiskapasiteettitarve on yli 3 400 Mbit/s, vastaaminen kapasiteettitarpeeseen edellyttäisi uusien tukiasemien toteuttamista tieverkon yhteyteen tiheimmin kuin yhden kilometrin välein. Nämä tukiasemat tulisi kattaa 2600MHz:n, 3,5 GHz:n ja 26 GHz:n tukiasemalaittein.

5.1.4 Näkemykset matkaviestinverkkojen markkinaehtoisesta kehittämisestä tieverkolla

Tällä hetkellä operaattorit ovat toteuttaneet 5G-peittoa suurin ja keskisuuriin kaupunkeihin ja käytännössä 5G-peittoa ei toistaiseksi löydy tieverkolta. Haastatteluiden perusteella operaattorit tulevat toteuttamaan maantieteellisesti kattavan 5G-peruspeiton 700 MHz taajuusalueella, jonka laajuuden voidaan karkeasti arvioida vastaavan suunnilleen nykyistä 4G-peittoa. Alueilla, joilla on paljon käyttäjiä, 5G-peruspeittoa täydennetään 3,5 GHz taajuusalueella, jolla lisätään näiden alueiden tiedonsiirtokapasiteettia. Tieverkon osalta 3,5 GHz taajuusalueet tulevat alkuvaiheessa ensisijaisesti suurten kaupunkien sisääntuloväylille sekä taa-
jamien läheisyydessä kulkeville tiealueille.

4G-verkko tulee pysymään jatkossakin 5G-verkon rinnalla, mikä jakaa käyttäjiä ainakin alkuvaiheessa kahteen eri verkkoon, mikä parantaa käyttäjien saamaa kapasiteettia myös 4G-verkossa, vaikka erillisiä investointeja ei tehtäisi. Tulevaisuudessa 4G ja 5G-yhteiskäyttöisyyden myötä tietoliikennettä ja etenkin lähetykskapasiteettia voidaan vieläkin paremmin optimoida 4G- ja 5G-verkkojen välillä, jolloin olemassa olevasta kapasiteetista saadaan mahdollisimman paljon irti. Lisäksi, jos 3G- ja 2G-taajuusalueet vapautuvat uusimmille teknologioille, mahdollistaa se 4G- ja 5G-verkkojen kapasiteetin noston kustannustehokkaasti nykyisistä tukiasemapaikoista.

Teknologisista kehityssuunnista huolimatta markkinaehtoisista mobiiliverkkojen kehittymistä maanteilla on hyvin vaikea ennakoida verkon suorituskyvystä kertovin absoluuttisin luvuin muutamasta syystä. Ensinnäkin verkon kapasiteetti jaetaan aina solun käyttäjien kesken, jolloin korkeiden taajuusalueiden käyttöönotto ei välttämättä nosta merkittävästi kapasiteettia

alueilla, joilla on paljon käyttäjiä. Toisin sanoen pelkkä arvio eri teknologioiden ja taajuusalueiden toteutuksesta ei ole riittävä, sillä verkon käyttäjämäärät vaikuttavat merkittävästi yhden käyttäjän kokemaan todelliseen kapasiteettiin. Tästä syystä esimerkiksi 700 MHz taajuusalueen 5G-peruspeitto voi jo tarjota vähäliikenteisillä alueilla suuren kapasiteettiparannuksen varsinkin alkuvaiheessa, kun 5G-liittymiä on vähän. Toiseksi operaattorit tulevat mitoittamaan mobiiliverkon kokonaiskapasiteetin keskimääräisen käyttäjän keskimääräisen palvelutarpeen mukaan. Ellei tienkäyttäjien keskimääräinen palvelutarve kasva merkittävästi ja elleivät käyttäjät ole valmiita maksamaan tarvittavia investointeja esimerkiksi korkeampana kuukausimaksuna, valtateiden tiedonsiirtokapasiteetti ei tule nousemaan 5G-tekniikan teknisen potentiaalin suhteessa. Toisin sanoen, ellei tieliikenteen ajoneuvojen tiedonsiirtovaatimukset kasva merkittävästi nykyisestä sekä kuluttajilta löydy samanaikaisesti merkittävää maksuhalukkuutta nopeampiin tietoliikenneyhteyksiin, on vaikea hahmottaa kehityskulkuja, joilla tieverkon tietoliikenneyhteydet parantuisivat merkittävästi nykyisestä tai tieverkon kapasiteetti kehittyisi muiden alueiden tiedonsiirtoyhteyksiä nopeammin.

Teknologisen kehityksen myötä 4G- ja 5G-matkaviestinverkkojen peiton sekä kapasiteetin odotetaan paranevan lähivuosina. Operaattoreiden omien ennusteiden mukaan matkaviestinverkot eivät tule aiheuttamaan pullonkauloja tienkäyttäjien tai liikenteen palveluille, ajoneuvojen nykyisten tiedonsiirtovaatimusten valossa. Yleisesti tieverkon langattomien tietoliikenneyhteyksien markkinaehtoinen kehittyminen edellyttää, että käyttäjille syntyy mielenkiintoisia ja laajaan käyttöön tulevia liikenteen palveluita, joiden tulisi toimia myös tieverkon alueella hyvin. Tämä luo myös operaattoreille intressin langattomien tietoliikenneyhteyksien ylläpitämiseksi ja kehittämiseksi tieverkkojen osuuksilla.

5.1.5 Tarpeet markkinaehtoista rakentamista tukevalle lisärakentamiselle

Tieverkon kattavan peruspeiton varmistaminen

Saatavuusaineiston perusteella mobiiliyhteyksien peruspeitto kattoi 99,8 % tarkastelussa olevasta tieverkosta, jolloin katvealueita jäi yhteensä noin 21 kilometriä. Koska saatavuusaineisto on yhteenveto operaattoreiden tilanteesta, on todellinen operaattorikohtainen katvealueiden määrä todennäköisesti suurempi. Mikäli operaattoreiden 3G- ja 4G-verkoissa on tällä hetkellä katvealueita, on epätodennäköistä, että tulevaisuudessa syntyy riittävästi kysyntää näiden alueiden kattamiseksi markkinaehtoisesti. Näiden alueiden osalta tulisi suorittaa mittaukset ja varmistaa todellinen katvealueutilanne.

Tieliikenteen tarpeiden näkökulmasta tarkasteltuna näiden alueiden kattaminen on olennaista, sillä jonkinlaiset tietoliikenneyhteydet tulisi jatkossa olla jokaisella tieosuudella, jotta edes yksinkertaisia viestejä on mahdollista välittää ajoneuvoille. Koska tienkäyttäjät voivat hankkia mobiiliyhteydet eri operaattoreilta, tulisi tieliikenteen näkökulmasta varmistaa, että katvealueita ei jäisi yhdellekään operaattorille.

Operaattoreiden näkökulmasta katvealueiden kattaminen tieliikenteen tarpeisiin tulisi kuitenkin toteuttaa tavalla, joka ei vääristä markkinatilannetta eri operaattoreiden välillä. Mikäli mobiiliyhteydet ovat markkinaehtoista toimintaa, tulisi operaattoreiden itse pystyä vaikuttamaan siihen, millä alueilla ja millä palvelutasolla he palveluitaan tarjoavat. Tällöin kiinnostuneet operaattorit voivat halutessaan profiloitua ”tieliikenteen mobiilioperaattoreiksi” tarjoamalla kilpailijoitaan parempaa palvelua, esimerkiksi takaamalla ”tienkäyttäjille riittävät mobiiliyhteydet ilman katvealueita tieverkolla”.

Tunnistetut tieliikenteen nykyiset ja tulevat tarpeet

Operaattoreiden verkkojen kehitys näyttäisi tällä hetkellä pystyvän vastaamaan markkinaehtoisesti tuleviin tarpeisiin nykyisten ja työssä tunnistettujen tieliikenteen tulevaisuuden sovellusten osalta. Arvio perustuu oletukseen, että 5G-verkot toteutuvat vastaavalla tavalla ja

laajuudessa kuin 4G-verkot ovat aikanaan toteutuneet sekä 5G-verkot toteutuvat niillä periaatteilla, joita operaattorit ovat tuoneet esille haastatteluissa.

Tietoliikenneyhteyksien riittävyden keskeisenä mahdollistaja etenkin 2020-luvun loppupuolella on, että vanhempien sukupolvien käytössä olevia taajuusalueita pystytään ottamaan 4G- ja 5G-käyttöön, jolloin paine uusiin tukiasemainvestointeihin pienenee ja markkinaehtoiseen kysyntään voidaan vastata nopeammin. Analyysin perusteella taajuusalueiden käyttöönotto olisi erityisen tärkeää etenkin harvaan asuttujen alueiden näkökulmasta, joissa käyttäjiä on vähän ja olemassa olevia tukiasemia on harvassa. Näillä alueilla isojen tukiasemainvestointien toteuttaminen markkinaehtoisesti vähäisiä käyttäjämääriä varten voi helposti muodostua taloudellisesti kannattamattomaksi. Uusien taajuusalueiden käyttöönotosta 5G-verkoille olisi hyötyä myös taajamien ja vilkkaasti liikennöityjen alueiden tietoliikenneyhteyksien kehittämisessä.

Skenaariotarkasteluiden mukaiset tietoliikenneyhteystarpeet

Skenaariotarkasteluissa tarkasteltiin kahta erilaista tulevaisuuden kehityskulkua. Ensimmäisessä kehityskulussa jokaiselle ajoneuvolle taataan jatkuva 30 Mbit/s DL tiedonsiirtoyhteys ja toisessa 100 Mbit/s DL tiedonsiirtoyhteys. Skenaariotarkastelussa käytetyt arvot olivat huomattavasti tunnistettuja käyttötapauksia suurempia.

Skenaariotarkasteluiden mukaiset tietoliikenneyhteydet tulevat edellyttämään hyvin merkittäviä investointeja. Jotta skenaarioiden mukaiset tiedonsiirtoyhteydet toteutuisivat markkinaehtoisesti, edellyttäisi se, että käyttäjät olisivat valmiita maksamaan niistä joko osana matkapuhelimien mobiililiittymiä, ajoneuvojen tiedonsiirtotarpeita varten syntyisi erillisiä mobiililiittymiä tai kustannuksia olisi mahdollista kerätä epäsuorasti esim. tienkäyttömaksun kautta. Mikäli markkinoilta puuttuu riittävä kysyntä ja maksuhalukkuus kalliimmille tietoliikenneyhteyksille, mutta poliittisella ohjauksella halutaan varmistaa suurikapasiteettisen verkon rakentuminen liikenteen tarpeisiin, edellyttää se jonkinlaista subventointia joko operaattoreille tai tienkäyttäjille.

Skenaarioiden mukaisen kokonaiskapasiteettitarpeen toteutuminen kustannustehokkaasti koko tieverkolle edellyttäisi todennäköisesti jonkinlaista operaattoreiden kesken tapahtuvaa kustannustehokasta verkon rakentamista sekä eri verkkojen yhteistä hyödyntämistä.

Tieverkon hiljaisemmin liikennöidyillä osilla, jossa käyttäjiä on vähän, kapasiteettitarve on teoriassa mahdollistaa toteuttaa nykyisistä tukiasemista, mikäli taajuuksia on mahdollista jatkossa hyödyntää 5G käyttöön. Mikäli kaikki operaattorit toimivat alueella, todellinen kokonaiskapasiteetti on periaatteessa kolminkertainen skenaariotarkasteluiden laskelmiin verrattuna. Jotta kolminkertaista kapasiteettia on todellisuudessa mahdollista hyödyntää täysimääräisesti, se edellyttää, että tienkäyttäjien liittymät olisivat aina tasaisesti jakaantuneet operaattoreiden kesken. Koska näin ei aina välttämättä ole, jatkuvan tiedonsiirtokapasiteetin takaamiseksi ainakin osa operaattoreista joutuisi toteuttamaan jatkuvan 3,5 GHz verkon tieverkolle, mikä synnyttäisi selkeästi turhaa ylikapasiteettia. Tällaisen ylikapasiteetin rakentamiseksi on hyvin vaikea löytää markkinaehtoisia perusteluita. Ylikapasiteetin toteuttaminen yksinomaan tieliikenteen tarpeita varten edellyttää todennäköisesti lisätukea. Vaihtoehtoinen teoreettinen kehityskulku olisi, jos ajoneuvojen tiedonsiirtotarpeisiin olisi mahdollista vastata riippumattomasti operaattoreiden välillä, jolloin ajoneuvot voisivat hyödyntää sen operaattorin kapasiteettia, jolla sitä on vapaana.

Vilkkammin liikennöidyillä tieosuuksilla tullaan tarvitsemaan merkittävää tiedonsiirtokapasiteetin nosta nykyisestä. Tämä korostuu etenkin skenaariossa, jossa jokaiselle ajoneuvolle taattaisiin jatkuva 100 Mbit/s tiedonsiirtoyhteys. Skenaariossa tieliikenteen tietoyhteystarpeita ei ole mahdollista toteuttaa nykyisistä tukiasemista, vaan tarvitaan laajamittaista uu-

sien tukiasemien lisärakentamista tiiviisti tieverkon yhteyteen. Tällöin tukiasemaverkosta tulee väistämättä hyvin tiivis ja jokaiseen tukiasemaan tarvitaan usean taajuusalueen antenni, mikä aiheuttaa jo itsessään teknisen haasteen mastojen ja pylväiden fyysiselle kantokyvylle. Tällaisilla tieosuuksilla tarvitaan operaattoreiden välistä yhteistoimintaa, jotta vältetään päällekkäisiltä investoinneilta ja voidaan luoda mahdollisimman kustannustehokas ja toimiva verkko. Skenaarioiden tiedonsiirtokapasiteetin tuottamiseksi voi olla tarve erilaisten "neutral host"-tyyppisten toimijoiden syntymiselle tukiasemainfran ja mahdollisesti myös tukiasemien toteuttamiseksi.

Skenaarioiden toteutuessa yksi haaste tulee olemaan edellä mainitun "lopullisen verkon" kustannustehokas toteutuminen. Markkinaehtoisen rakentamisen näkökulmasta tuen tarve syntyy ensisijaisesti siirtymävaiheen mahdollistamiseksi. Mikäli tieverkolle ilmaantuisi ajoneuvoja, jotka vaatisivat merkittävää jatkuvaa tiedonsiirtokapasiteettia (esim. 30 Mbit/s tai 100 Mbit/s), ruuhkauttaisi näiden ajoneuvojen tiedonsiirtotarpeet nopeasti nykyiset tiedonsiirtoyhteydet, mikä edellyttäisi jo itsessään merkittävää lisärakentamista. Koska ajoneuvokanta on Suomessa ainakin toistaiseksi uusiutunut kohtalaisen hitaasti, jatkuvaa tiedonsiirtoa vaativien ajoneuvojen kokonaismäärä tieverkolla jäisi oletettavasti ainakin alkuvaiheessa suhteellisen matalaksi. Tämä tarkoittaisi, että jouduttaisiin investoimaan selkeään ylikapasiteettiin, jonka kustannuksia olisi hankala kattaa pelkästään käyttäjiltä saatavin maksuin, vaikka uusia liiketoimintamalleja tieliikenteeseen syntyisikin. Siirtymävaiheen tukeminen edellyttäisi tällöin markkinaehtoisen rakentamiseksi lisäksi tapahtuvaa lisärakentamista tai tukea.

5.2 Rataverkon nykykapasiteetti ja peitto

5.2.1 Saatavuusaineiston analyysi

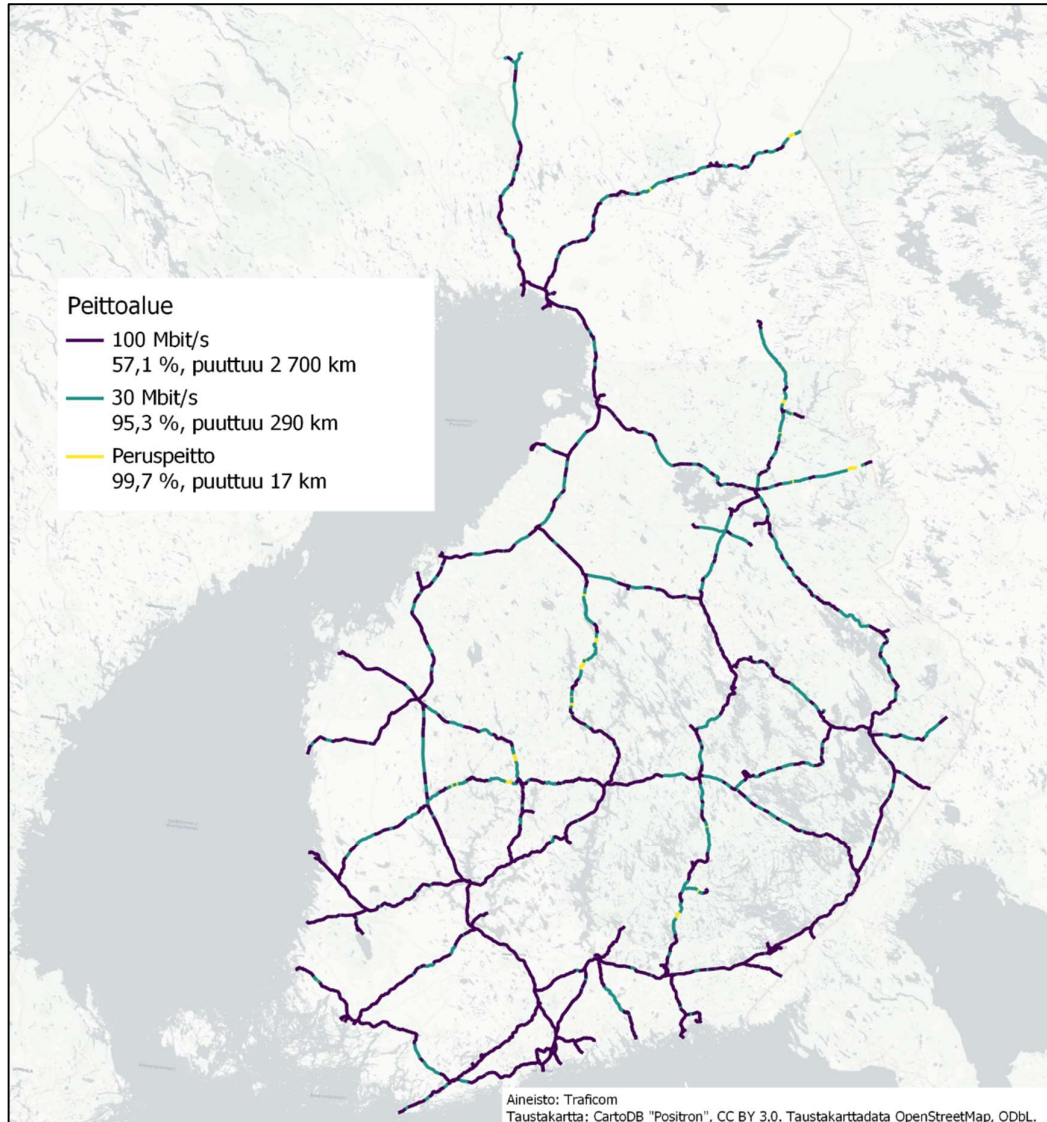
Rautateiden matkaviestinverkkojen nykykapasiteettia ja peittoa on arvioitu perustuen Traficomin mobiiliverkkojen saatavuusaineistoon, jota on täydennetty erillisillä mittauksilla valituille rautatieosuuksille.

Traficomin mobiiliverkkojen saatavuusaineisto perustuu valtakunnallisten operaattoreiden Traficomille toimittamaan materiaaliin matkaviestinverkkojen nimellisestä nykykapasiteetista ja peitosta. Rautatieverkon mobiilisaatavuutta on tarkasteltu kolmen eri kapasiteetin näkökulmasta (peruspeitto, 30 Mbit/s, 100 Mbit/s).

Saatavuusaineistossa kolmen valtakunnallisen operaattorin peittokartat ovat yhdistetty yhdeksi aineistoksi, jolloin kunkin kapasiteetin peitto on laajempi kuin yhdenkään operaattorin todellisuudessa tarjoama peitto. Aineisto antaa tässä mielessä todellisuutta paremman kuvan eri alueiden kapasiteetista.

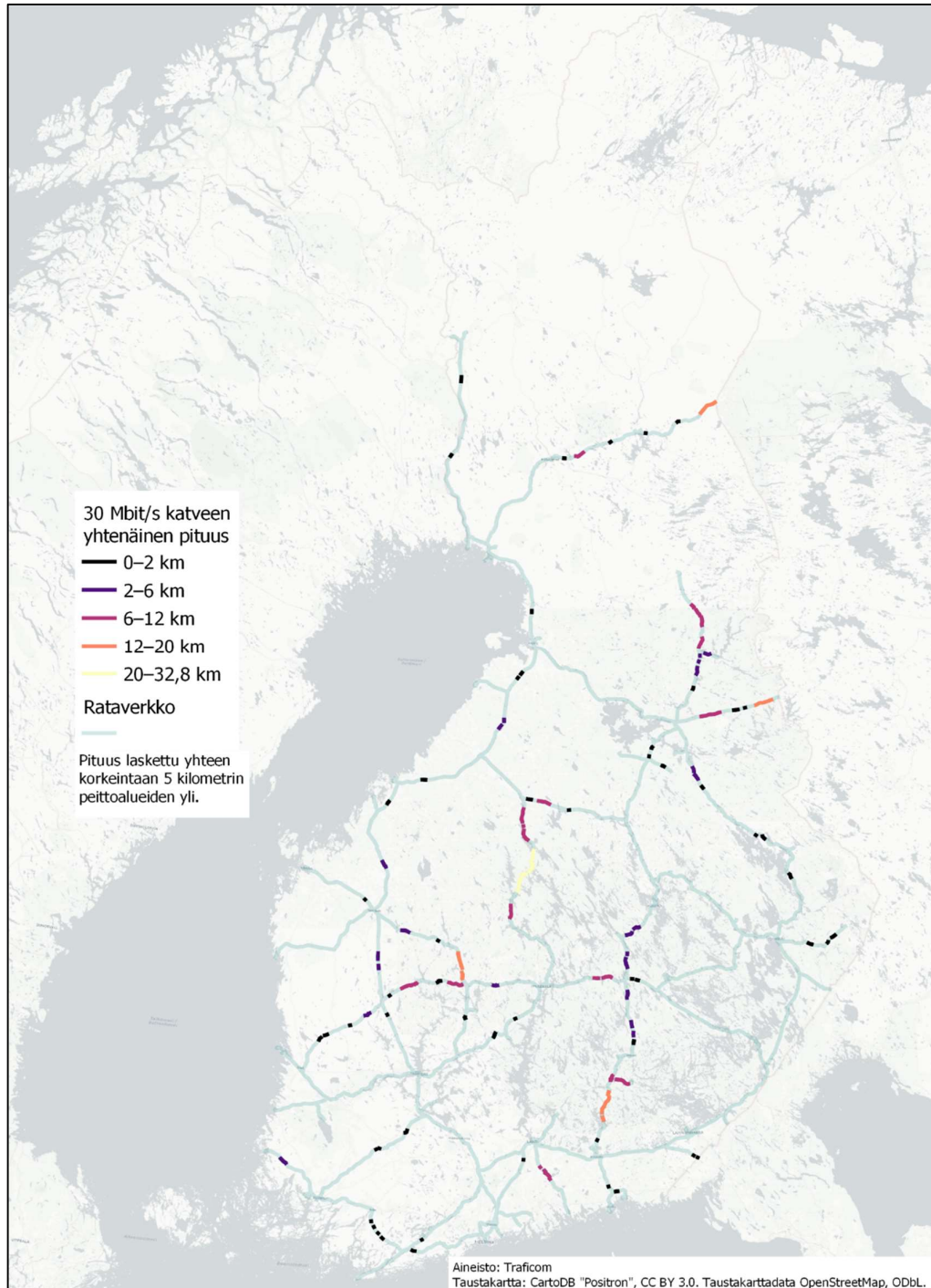
Tässä tarkastelussa operaattoreiden ilmoittama nimelliskapasiteetti on kohdistettu ainoastaan rataverkolle. Todellisuudessa mobiiliverkon kapasiteetti jakaantuu rataverkon lisäksi myös ympäröivän alueen mobiilikäyttäjien kesken, jolloin analyysit antavat tässä mielessä todellisuutta paremman kuvan rataverkon käytössä olevasta kapasiteetista. Mobiiliverkkojen saatavuusaineiston arvot ovat nimelliskapasiteettia, joten ne eivät myöskään vastaa suoraan käyttäjien kokemaa todellista kapasiteettia. Mikäli nimelliskapasiteettia hyödynnetään käyttäjän kokemaan jatkuvan kapasiteetin tarkasteluun, vastaa nimelliskapasiteetti enemmän tapausta, jossa yhdessä rataverkon tukiaseman solussa olisi samanaikaisesti vain yksi käyttäjä, joka saisi itselleen yhden tukiaseman solun koko kapasiteetin. Toisaalta koska peittokartta on yhteenvedo kaikkien kolmen operaattorin aineistosta, on todellinen yhden alueen nimellinen kokonaiskapasiteetti kolminkertainen, mikäli kaikki operaattorit tarjoavat alueelle samaa kapasiteettia.

Saatavuusaineiston perusteella nykyinen peruspeitto kattaa lähes kokonaan tarkastellun rataverkon. 30 Mbit/s teoreettinen tiedonsiirtonopeus kattaa 95,3 % rataverkosta ja 100 Mbit/s teoreettisen tiedonsiirtonopeuden peitto tarkastelulla rataverkolla on 57,1 %. Nopeamman tiedonsiirtoyhteyden mahdollistavat matkaviestinverkot ovat rakentuneet pääosin sinne, missä asumistiheys on suurempaa. Operaattorit eivät ole rakentaneet verkkoa niinkään rataliikenteen palveluita vaan yleistä mobiiliverkon käyttöä varten. Rataverkon katvealueet sijoittuvat maantieteellisesti eri puolille Suomea ja varsinkin harvemmin asutuille alueille.



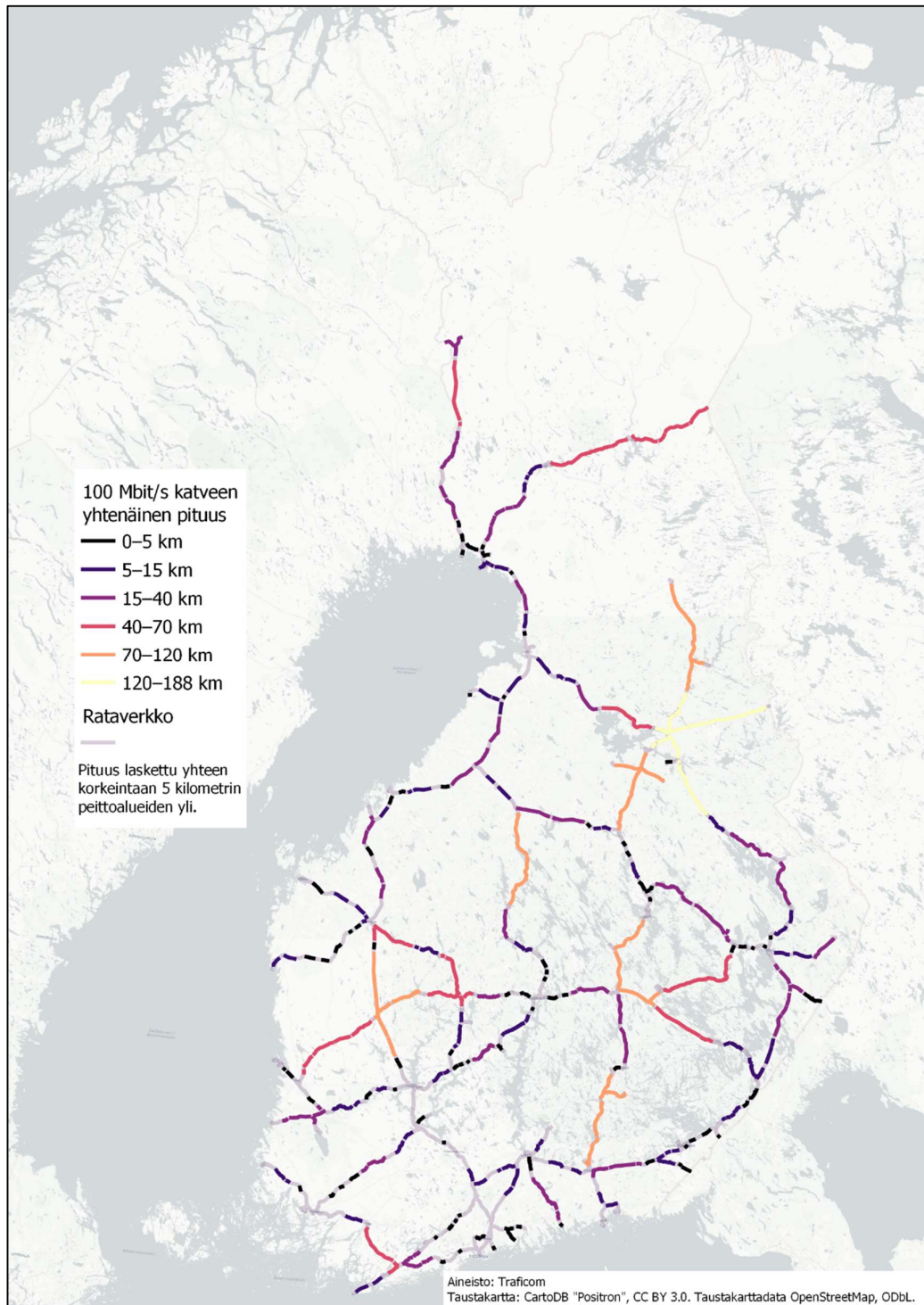
Kuva 11: Traficomin saatavuusaineiston mukaiset peittoalueet rataverkolla

30 Mbit/s yhteysnopeuden osalta katvealueita löytyi rataverkolta yhteensä 290 km. Yhtenäiset katvealueet sijoittuvat eri puolille Suomea. Eniten katvealueita esiintyy Keski- ja Länsi-Suomessa.



Kuva 12: Traficomın saatavuusaineiston mukaiset 30 Mbit/s katvealueet rataverkolla

100 Mbit/s yhteysnopeuden osalta katvealueita löytyi tutkitulta rataverkolta yhteensä 2 700 km. Yhtenäisten katvealueet sijoittuvat eri puolille Suomea. Pisimmät katvealueet sijoittuvat välille Kouvola-Kajaani. Peittokarttojen perusteella vähiten pitkiä katvealueita esiintyy Etelä-Suomessa.



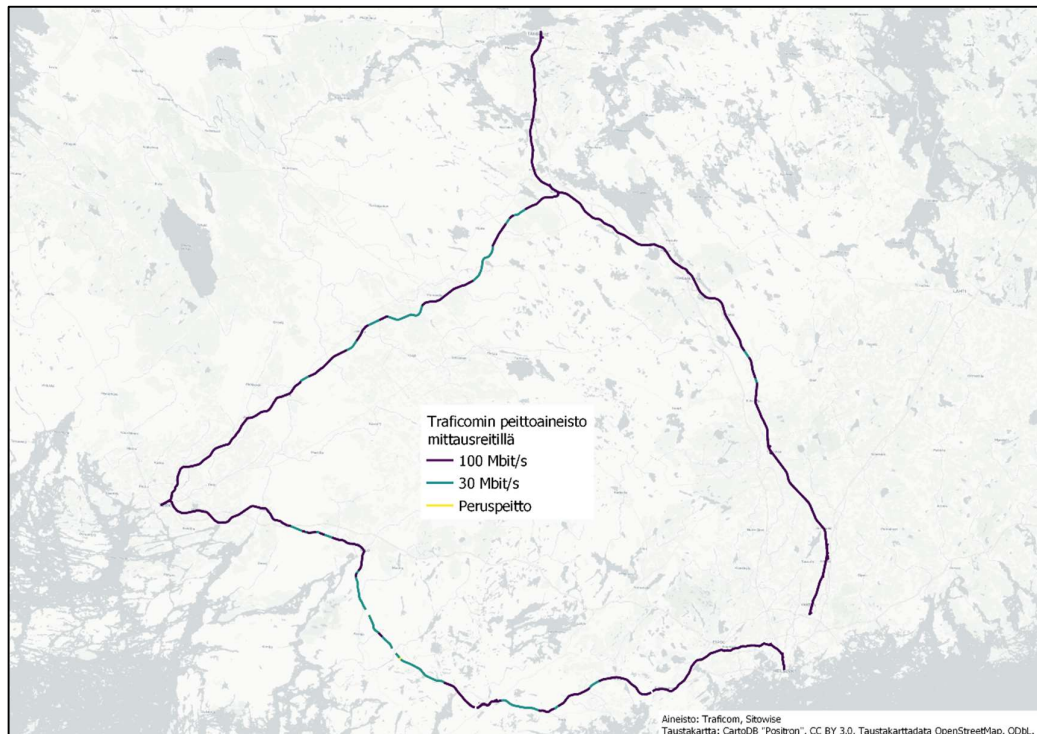
Kuva 12: Traficomın saatavuusaineiston mukaiset 100 Mbit/s katvealueet rataverkolla

5.2.2 Rataverkon mittaustulokset

Rataverkon mobiiliverkkojen saatavuusaineiston tarkentamiseksi toteutettiin erillisen mittaukset Vantaa-Tampere-, Tampere-Turku-, Turku-Helsinki -rataosuuksille. Mittauksissa tarkasteltiin kolmen valtakunnallisen operaattorin mobiiliverkkojen lataus- sekä lähetyksenopeutta, viivettä sekä käytössä olevia taajuuksia. Mittauksissa operaattoreiden liittyminä käytettiin nopeimpia ja rajoittamattomimpia liittymiä sekä palvelinratkaisuna mittauksille varattua palvelinta symmetrisellä 2/2Gbit/s liittymällä.

Mittausväli		Mittausaika	
Lähtöpiste	Päätepiste	Alku (Juna)	Loppu (Juna)
Tikkurila	Tampere	6:34 (6:39)	7:59 (7:58)
Tampere	Turku	9:03 (9:10)	10:51 (10:50)
Turku	Helsinki	11:15 (11:25)	13:49 (13:23)

Taulukko 7: Rataverkon osuuksilla suoritettujen mittausten mittausvälit ja -ajat.

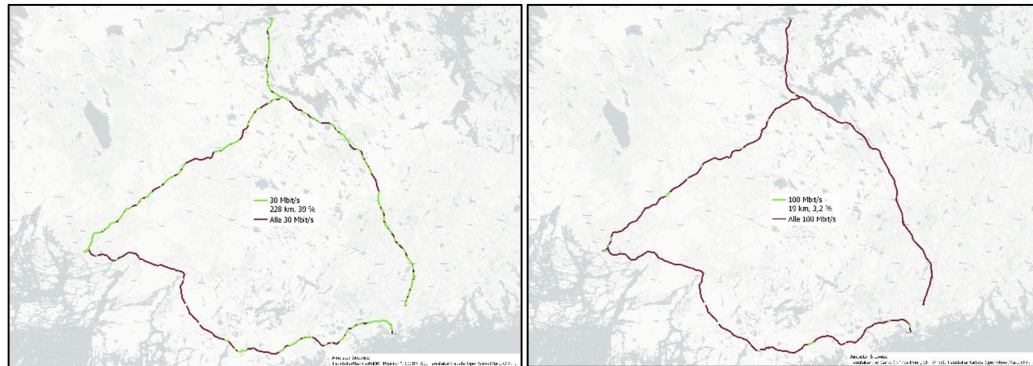


Kuva 13: Traficomin saatavuusaineiston mukainen peitto mitatuilla rataverkon reiteillä

Mitatuilla rataosuuksilla yli 30 Mbit/s tiedonsiirtonopeus (downlink) saavutettiin 39 prosentilla reitin kokonaispituudesta ja yli 100Mbit/s tiedonsiirtonopeus 3,2 prosentilla reitin kokonaispituudesta.

Mitatun rataverkon osalta mittaustulokset olivat suurimmassa osassa merkittävästi nimelliskapasiteettia matalampia, vaikka yksittäisissä kohdissa mittaustulokset olivat myös nimellis-

kapasiteettia parempia. Mittausten suorittaminen Korona-aikana, jolloin junaliikenteen matkustajamäärät ovat yleisesti olleet tavanomaista vähäisempiä, mikä on voinut nostaa mitaustuloksia.



Kuvat 14 ja 15: 30 Mbit/s ja 100 Mbit/s latausnopeuden saatavuus rataverkolla mittaustulosten mukaan

Mitatuilla rataosuuksilla yli 5 Mbit/s tiedonsiirtonopeus (lähetys) saavutettiin reitillä 34 prosentilla mitatun reitin kokonaispituudesta. Yli 10 Mbit/s tiedonsiirtonopeus 8 prosentilla reitin kokonaispituudesta ja yli 20 Mbit/s tiedonsiirtonopeus (lähetys) saavutettiin 2,2 prosentilla reitin kokonaispituudesta.

5.2.3 Näkemykset matkaviestinverkkojen markkinaehtoisesta kehittämisestä

Tällä hetkellä operaattorit ovat toteuttaneet 5G-peittoa suuriin sekä keskisuuriin kaupunkeihin ja käytännössä 5G-peittoa ei toistaiseksi löydy kaupungin ulkopuoliselta rataverkolta. Haastatteluiden perusteella operaattorit tulevat toteuttamaan maantieteellisesti kattavan 5G-peruspeiton 700 MHz taajuusalueella, jonka laajuuden voidaan karkeasti arvioida vastaavan suunnilleen nykyistä 4G-peittoa. Alueilla, joilla on paljon käyttäjiä, 5G-peruspeittoa täydennetään 3,5 GHz taajuusalueella, jolla lisätään näiden alueiden tiedonsiirtokapasiteettia. Rataverkon osalta 3,5 GHz taajuusalueet tulevat alkuvaiheessa ensisijaisesti suurten kaupunkien sekä taajamien sisäisille rataosuuksille, mikäli läheisyydessä on muita käyttäjiä.

4G-verkko tulee pysymään jatkossakin 5G-verkon rinnalla, mikä jakaa käyttäjiä ainakin alkuvaiheessa kahteen eri verkkoon, mikä parantaa käyttäjien saamaa kapasiteettia myös 4G-verkossa, vaikka erillisiä investointeja ei tehtäisi. Tulevaisuudessa 4G ja 5G-yhteiskäyttöisyyden myötä tietoliikennettä ja etenkin lähetyskapasiteettia voidaan vieläkin paremmin optimoida 4G- ja 5G-verkkojen välillä, jolloin olemassa olevasta kapasiteetista saadaan mahdollisimman paljon irti. Lisäksi, jos 3G- ja 2G-taajuusalueet vapautuvat uusimmille teknologioille, mahdollistaa se 4G- ja 5G-verkkojen kapasiteetin nosto kustannustehokkaasti nykyisistä tukiasemapaikoista.

Operaattorihaastatteluiden perusteella keskipitkällä aikavälillä markkinaehtoisesta rakentamisen voidaan olettaa tuovan lähes kaikille nykyisen 4G-peiton alueella oleville rataosuuksille jopa 200 Mbit/s ylittävät nimellis latausnopeudet. Matkustajaliikenteelle tyypillisen suuren ja hetkellisen kapasiteettitarpeen takia, käyttäjien todelliset tiedonsiirtonopeudet nopeudet jäävät huomattavasti matalammiksi.

Kapasiteetin kasvattaminen ja hyvinkin pienen tiedonsiirtonopeuden takaaminen vaatisi merkittäviä panostuksia matkaviestinverkkoihin rautateillä. Haasteen suuruusluokkaa voidaan kuvata esimerkiksi, jossa jokaiselle matkustajalle tarjottaisiin taattua jatkuvaa 5 Mbit/s yhteyttä, joka vastaa suunnilleen HD-tasoisesta videon (720p) lataamista. Jatkuvan 5 Mbit/s

kapasiteetin takaaminen yhdelle 400 matkustajan junalle, edellyttäisi 2000 Mbit/s nimellisenopeutta. Mikäli samalla alueella toimii kaikki kolme operaattoria, teknisen kapasiteetin toteuttaminen voisi teoriassa onnistua nykyisistä tukiasemista, jos tukiasemat olisivat optimaalisesti sijoitettu eikä alueella olisi muuta mobiilikäyttöä. Mikäli kokonaiskapasiteetti kohdistuisi vain yhden operaattorin verkkoon, tällaisen kapasiteetin tekninen toteuttaminen edellyttäisi tukiasemien toteuttamista suunnilleen 500 metrin välein koko rataosuuden pituudelta. Kahden junan kohtaamisessa kokonaiskapasiteetin tarve olisi kaksinkertainen.

Rautatieliikenteen näkökulmasta tiedonsiirtokapasiteetin kehittyminen on monimutkaista. Matkustajajunan ilmaantuessa suuren ja matalilla taajuuksilla toimivan matkaviestinverkon solun alueelle, kapasiteettitarve kasvaa muutamien minuuttien ajaksi, jopa useilla sadoilla käyttäjillä. Suurimman osan ajasta, kun liikennettä ei ole, tukiasema on vajaakäytöllä, koska raideosuudet kulkevat pääosin kaukana asutuksista. Lisäksi haasteita aiheuttaa junavaunujen rakenteet huonosti läpäisevä signaali. Ongelmaa on pyritty korjaamaan vaunuihin asennetuilla toistimilla, mutta ne eivät itsessään tuo lisää kapasiteettia matkaviestinverkkoon, vaan ne nimensä mukaisesti toistavat junan ulkopuolelta tulevaa signaalia.

Käytännön rakentamista ja kustannuksia rautatieliikennealueilla tulee nostamaan lisäksi myös haastava ja kallis toimintaympäristö. Verkon optimoinnin kannalta olisi ensiarvoisen tärkeää pystyä sijoittamaan tukiasemia aivan rataverkon tuntumaan, mutta toistaiseksi operaattoreille ei ole myönnetty tätä varten sijoituslupia. Toisaalta rataverkon yhteydessä rakentaminen ja toimiminen on myös työlästä, vaarallista ja kallista, mikä myös operaattoreiden näkökulmasta vähentää houkuttelevuutta. Toiminnalle asettaa haasteita myös nykyiset rautatiealueita koskevat sijoituslupaehdot, jotka kohdistavat kustannusvastuut verkkosiirroista operaattoreille, vaikka siirtotarve syntyi viranomaiselta.

Junamatkustajien tietoliikenneyhteyksien heikko taso on jo pitkään ollut esillä mm. mediassa, joten teema ei ole uusi. Edellä mainittujen haasteiden vuoksi parempien yhteyksien toteuttaminen rautatieliikenteelle ja erityisesti sen matkustajille on erittäin kallista. Vaikka monet matkustajat kaipaavat parempia yhteyksiä, myös matkustajilla on hyvin erilaisia tarpeita. Toisaalta ei ole myöskään yhteistä ja selkeää näkemystä siitä, mikä olisi se tietoliikenneyhteyksien taso, jota matkustajat voisivat aidosti edellyttää tietoliikenneyhteyksiltä. 5G-verkkojen myötä junamatkustajien kapasiteetin voidaan katsoa paranevan erityisesti kaupunkien ympäristössä. 5G-kehitys ei todennäköisesti tule itsessään parantamaan kaupunkien välisten osuuskien yhteyksiä, eikä se tule parantamaan rataverkon nykyisten katvealueiden tilannetta. Tällä hetkellä ei ole tunnistettavissa markkinaehtoisesti eteneviä kehityskulkuja, joilla junamatkustajien yhteydet parantuisivat tulevaisuudessa merkittävästi nykyisestä.

5.3 Meriväylien matkaviestinverkkojen nykytila ja kehittyminen

Operaattoreiden verkkojen peruspeitto kattaa teoreettisesti Suomen sisävesialueet, meren saariston ja lähimmät rannikkovedet Itämerellä. Suomen sisävesistöjen kannalta signaalin esteetön eteneminen vesistöjen päällä helpottaa kuuluvuusongelmia. Haasteita aiheuttavat lähinnä laajat syrjässä sijaitsevat vesistöt. Vastaava tilanne on Suomen rannikon lähialueilla ja saaristoissa, vaikka saaristojen peruspeiton toteuttaminen on usein teknisesti haastavampaa, sillä ne edellyttävät radiolinkkien ja merikaapeleiden rakentamista.

Ulkosaaristossa ja avomerellä tilanne on huomattavasti haastavampi. Avomeren väylien kattaminen edellyttäisi meriliikennettä varten rakennetun tukiasemaverkon, jonka sektorit suunnataan kantamaan kauas väylien suuntaisesti. Tällaisen verkon rakentaminen edellyttäisi hyvin kalliita teknisiä ratkaisuja, jotka ovat operaattoreiden näkökulmasta kannattamattomia.

Operaattorit rakentavat peittoaan pääsääntöisesti väestöpeittoa eli käyttäjiä ajatellen, eikä heillä ole toistaiseksi ollut erillisiä investointiohjelmia, jotka olisivat erikseen suunnattu eri meriliikenteen tarpeiden tukemiseen.

6 Kustannusarviot kattavien matkaviestinverkkojen toteuttamiseksi tie- ja rataverkolle

6.1 Laskelmien ja arvioiden lähtökohdat

Selvityksessä tarkasteltiin karkealla tasolla, millaisia investointeja kilometriä kohden vaadittaisiin, jotta Suomen valta- ja kantatieverkolla kyettäisiin takaamaan tietyt palvelutasot kaikille tienkäyttäjille ja liikenteen palveluille. Tarkasteluun valittiin saatavuusaineiston mukaiset 30 Mbit/s ja 100 Mbit/s latausnopeudet, joita on käytetty myös selvityksen muissa tarkasteluissa.

Koska tulevaisuuden liikenteen palvelut edellyttävät toimintavarmoja verkkoja, joissa on erityin lyhyet viiveet, on 5G ainoa toteutusvaihtoehto. Viipalointi ja verkon virtualisointi mahdollistavat 5G verkoissa tietyn palvelutason takaamisen, edellyttäen, että verkkoon on toteutettu riittävä kapasiteetti. Jotta tasainen palvelutaso ja kapasiteetti verkossa kyettäisiin takaamaan kaikissa olosuhteissa, tulisi myös verkon peitto optimoida tieverkkoa varten suunnitella tukiasemien kaksi solua teiden suuntaisesti. Tämä puolestaan pakottaa sijoittamaan tukiasemat teiden välittömään läheisyyteen. Käytännössä tämä tarkoittaa merkittäviä investointeja uuteen tukiasemaverkostoon.

Kustannusarvioita varten laskelmissa tehtiin muutamia yksinkertaistuksia. Tulevaa kehitystä ennakoitaen, tarkastelussa oletettiin kaikkien matkaviestinverkoille varattujen taajuusalueiden olevan 5G-käytössä. 5G-verkon spektritehokkuudeksi valittiin teoreettinen DL 11 bit/s/Hz. Laskelmissa myös oletettiin, että monikantaalitekniikkaa kyettäisiin hyödyntämään saman aikaisesti kaikilla käytössä olevilla taajuuksilla. Tukiasemien tarjoaman kapasiteetin oletettiin myös olevan yhtäläinen koko tukiaseman peittoalueella.

Laskelmissa ei ole otettu huomioon olemassa olevan tukiasemainfran hyödyntämistä. Laskelmat perustuvat kokonaan uuden tukiasemainfran rakentamiseen, jotta laskelmista on tarvittaessa eriteltävissä erilaisista skenaarioista syntyviä kustannuksia.

Tarkastelussa on otettu huomioon ainoastaan radioliityntäverkon toteuttamisesta aiheutuvat välittömät suorat kustannukset. On kuitenkin huomioitava, että tarkastelun mukaiset investoinnit aiheuttaisivat mittavia investointeja myös alue- ja runkoverkkoihin. Myös sähköverkkoihin kohdistuvat investoinnit olisivat huomattavan suuria.

6.1.1 Kustannusarvioiden laskentatapa

Kustannusarvioiden lähtökohtana käytettiin kohdan 5.1.3 mukaisen skenaariotarkastelun aineistoa, jossa arvioitiin valta- ja kantatieverkon kokonaiskapasiteettitarvetta kapasiteettitarveskenaarioilla DL 30 Mbit/s ja DL 100 Mbit/s.

Kapasiteettitarveskenaariossa laskettiin ensin keskimääräisen vuorokausiliikenteen tilastoihin pohjautuen, kuinka monta ajoneuvoa vuorokauden huipputunnilla on kilometrin tieosuutta kohden. Kilometrikohtainen kapasiteettitarve laskettiin kertomalla ajoneuvojen määrä valituilla ajoneuvokohtaisilla palvelutasoilla.

Kun tieosuuskohtainen kapasiteettitarve oli selvitetty, suunniteltiin tukiasemakombinaatio, jolla tieosuuden kapasiteettitarve voidaan tyydyttää, kummassakin tarkasteltavassa skenaariossa. Tukiaseman tarjoama solukohtainen teoreettinen kokonaiskapasiteetti jaettiin solun tiekilometripeitolla, jolloin saatiin tukiaseman tarjoama kapasiteetti tiekilometrillä. Tarkastelussa käytetyt tukiasematyypit on esitelty kappaleessa 6.1.2.

Tukiasemakombinaatioille laskettiin hinta-arvio, jotka perustuvat operaattori ja materiaali-valmistajien haastatteluihin. Arvio muunnettiin kilometrikohtaiseksi investointikustannukseksi.

Kun tieosuuksien kapasiteettitarve ja kyseistä kapasiteettitarvetta vastaavan tukiasemakombinaation kilometrikohtainen investointikustannus oli tiedossa, laskettiin investointikustannukset skenaarioille DL 30 Mbit/s ja DL 100 Mbit/s valta- ja kantateillä.

6.1.2 Tukiasematyyppit, niiden kokoonpano ja hinnoittelu

Alla olevassa on esitelty laskelmassa käytettyjen tukiasematyyppien ominaisuuksia ja hintoja.

Tukiasemakombinaatio	Taajuusalueet (MHz)	Solukoko (km)	DL kapasiteetti tiekilometrillä (Mbits/km)	UL kapasiteetti tiekilometrillä (Mbits/km)	Kustannusarvio (€/km)
Kombinaatio 1	700, 800, 900	10	30	10	23 - 46
Kombinaatio 2	700, 800, 900, 1800, 2100	4	200	65	36 - 65
Kombinaatio 3	2600, 3500	2	850	280	42 - 80
Kombinaatio 4	2600, 3500	1	1 700	565	69 - 125
Kombinaatio 5	2600, 3500	0,5	3 400	1 130	117 - 209
Kombinaatio 6	2600, 3500, 26000	0,5	21 000	7 000	137 - 249
Kombinaatio 7	2600, 3500, 26000	0,25	38 600	12 800	213 - 391

Taulukko 8: Laskelmassa käytettyjen tukiasemien tyypit ja kilometrikohtainen hinta

Tukiasemakombinaatio 1

Rakennetaan uusi tukiasema tien läheisyyteen. Suunnataan yksi sektori molempiin suuntiin tien suuntaisesti. Tukiasemien välinen etäisyys korkeintaan 20 km. Jokaiselle tukiasemalla rakennetaan laitesuoja ja voimalaitteet

Tukiasemakombinaatio 2

Rakennetaan uusi tukiasema tien läheisyyteen. Suunnataan sektorit molempiin suuntiin tien suuntaisesti. Tukiasemien välinen etäisyys korkeintaan 8 km. Jokaiselle tukiasemalla rakennetaan laitesuoja ja voimalaitteet

Tukiasemakombinaatio 3

Rakennetaan uusi tukiasema tien välittömään läheisyyteen. Suunnataan sektorit molempiin suuntiin tien suuntaisesti. Tukiasemien välinen etäisyys 4 km. Jokaiselle tukiasemalla rakennetaan laitesuoja ja voimalaitteet.

Tukiasemakombinaatio 4

Rakennetaan uusi tukiasema tien välittömään läheisyyteen. Suunnataan sektorit molempiin suuntiin tien suuntaisesti. Tukiasemien välinen etäisyys 2 km. Jokaiselle tukiasemalla rakennetaan laitesuoja ja voimalaitteet.

Tukiasemakombinaatio 5

Rakennetaan uusi tukiasema tien välittömään läheisyyteen. Suunnataan sektorit molempiin suuntiin tien myötäisesti. Tukiasemien välinen etäisyys 2 km. Jokaiselle tukiasemalla rakennetaan laitesuoja ja voimalaitteet.

Tukiasemakombinaatio 6

Rakennetaan uusi tukiasema tien välittömään läheisyyteen. Suunnataan sektorit molempiin suuntiin tien myötäisesti. Tukiasemien välinen etäisyys 1 km. Tukiasemalla 26 GHz taajuus käytössä. Jokaiselle tukiasemalla rakennetaan laitesuoja ja voimalaitteet

Tukiasemakombinaatio 7

Rakennetaan uusi tukiasema tien välittömään läheisyyteen. Suunnataan yksi solu/sektori molempiin suuntiin tien myötäisesti. Tukiasemien väli 0,5 km. Tukiasemien väli 0,5 km. Tukiasemilla käytössä 26 GHz taajuus. Laitesuoja ja voimalaitteet rakennetaan ainoastaan joka toiselle tukiasemalle.

6.2 Skenaariotarkastelu

6.2.1 Kustannusarviot tieverkolle skenaariossa 30 Mbit/s

Skenaariotarkastelussa tieverkolle toteutetaan jatkuva ja yhtämittainen 30 Mbit/s latausnopeus ja noin 10 Mbit/s jatkuva ja yhtämittainen lähetysopeus. Tunnistettujen käyttötapauksen perusteella tieliikenteen tarpeisiin dedikoitu 30 Mbit/s jatkuva latausnopeus vaikuttaa olevan riittävä kattamaan keskeiset automaattiajamiseen liittyvät käyttötapaukset samanaikaisesti. Yksinomaan automaattiajamisen näkökulmasta vähempikin jatkuva lataustiedonsiirto-kapasiteetti näyttäisi riittävän suurimmalla osalla väyläverkkoa, kunhan tietyissä väylän osissa on myös suurempaa tiedonsiirtokapasiteettia saatavissa. 10 Mbit/s jatkuva lähetysopeus vaikuttaa olevan riittävä automaattiajamisen perustarpeisiin. 10 Mbit/s lähetysopeus ei kuitenkaan mahdollista suurta lähetysopeutta vaativia käyttötapauksia, kuten etäajoa. Suurin osa suurta jatkuvaa tiedonsiirtokapasiteettia tarvitsevista palveluista ei edellytä jatkuvaa tiedonsiirtokapasiteettia koko väylän varrelta, vaan tiedonsiirtotarpeet liittyvät tiettyyn tapahtumaan (event triggered) tai tiettyihin väylän osiin, kuten liittymiin. Koska matkustajien viihdepalveluiden käyttö yleistyy ja tiedonsiirtotarpeet kasvavat, ajoneuvokohtaiset kokonaistarpeet ovat todennäköisesti merkittävästi pelkkiä ajoneuvojen tiedonsiirtotarpeita suuremmat. Tällöin viihdepalveluiden yleistymisen ja palveluiden tiedonsiirtovaatimusten kasvu vaikuttavat merkittävästi skenaarion tiedonsiirtokapasiteetin riittävyyteen.

Kustannuslaskelmassa arvioitiin rakentamiskustannuksia valta- ja kantatieverkolle toteutettavalle yhtäjaksoiselle ja tieliikenteelle dedikoidulle mobiiliverkolle, jolla pystytään takamaan jatkuva 30 Mbit/s latausnopeus tieverkon keskimääräisille liikennemäärille. Laskelmien perusteella verkon rakentamiskustannukset ovat 500 - 930 M€. Alla olevissa taulukoissa on esitetty skenaariotarkastelun tukiasemakombinaatioita kohden lasketut kilometrimäärät sekä kokonaiskustannusten jakaantuminen tieluokittain eri taajuusalueita koskeissa skenaarioissa.

Tukiasemakombinaatiot (Skenaario 30 Mbit/s)	Valtatiet (km)	Kantatiet (km)	Yhteensä (km)
Kombinaatio 1	1 552 km	1 720 km	3 272 km
Kombinaatio 2	4 402 km	2 791 km	7 193 km
Kombinaatio 3	2 673 km	399 km	3 072 km
Kombinaatio 4	240 km	69 km	310 km
Kombinaatio 5	52 km	62 km	113 km
Kombinaatio 6	2 km	7 km	9 km
Kombinaatio 7	0 km	0 km	0 km

Taulukko 9: Kapasiteettitarve tieverkolle skenaariotarkastelussa 30 Mbit/s

Todellisuudessa tieliikennettä ja sen käyttäjiä varten optimoitua matkaviestinverkkoa ei ole mielekästä toteuttaa vähäistenkään liikennemäärien tieosuuksilla pelkillä alataajuuksilla, niiden rajallisen tiedonsiirtokapasiteetin vuoksi. Jo kahden auton kohtaaminen tietyillä tie-

osuuksilla voi viedä tukiaseman kaiken kapasiteetin. Tämän vuoksi saattaisikin olla järkevää, että laskelman mukainen verkko rakennettaisiin ainoastaan keskitajuuksien ja korkeiden taajuuksien yhdistelmällä tai jopa pelkästään 3,5 GHz taajuuksilla. Tarvittaessa kapasiteettia voitaisiin täydentää 26 GHz tukiasemilla, esimerkiksi suurten kaupunkien sisääntuloväylillä ja pääkaupunkiseudun kehäteillä. 3,5 GHz ja 26 GHz ovat myös taajuuksia, joilla 5G verkkoa tullaan operaattoreiden toimesta rakentamaan. Skenaariolle, jossa matalia alle 1 GHz taajuusalueita ei käytettäisi, vaan ne rakennettaisiin kapasiteetin varmistamiseksi 3,5 GHz, 2600 MHz ja 26 GHz taajuusalueita hyödyntäen, arvioitiin kyseisessä 30 Mbit/s skenaariotarkastelussa investointikustannuksiksi noin 0,6 - 1,1 miljardia euroa.

Käytetyt taajuusalueet	Kokonaiskustannukset valtatiet	Kokonaiskustannukset kantatiet	Kokonaiskustannukset
700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz, 3,5 GHz ja 26 GHz	330 - 610 M€	170 - 320 M€	500 - 930 M€
2600 MHz, 3,5 GHz ja 26 GHz	385 - 730 M€	220 - 415 M€	600 - 1 145 M€

Taulukko 10: Investointien kokonaiskustannukset skenaariotarkastelussa 30 Mbit/s eri taajuusalueilla.

6.2.2 Kustannusarviot tieverkolle skenaariossa 100 Mbit/s

Skenaariotarkastelussa tieverkolle toteutetaan jatkuva ja yhtämittainen 100 Mbit/s latausnopeus ja noin 30 Mbit/s jatkuva ja yhtämittainen lähetysnopeus. Tunnistettujen käyttötapauksen perusteella tieliikenteen tarpeisiin dedikoitu 100 Mbit/s jatkuva latausnopeus vaikuttaa olevan hyvin riittävä kattamaan keskeiset automaattiajamiseen liittyvät käyttötapaukset samanaikaisesti. Yksinomaan automaattiajamisen näkökulmasta vähempikin jatkuva lataustiedonsiirto-kapasiteetti näyttäisi riittävän suurimmalla osalla väyläverkkoa, kunhan tietyissä väylän osissa on myös suurempaa tiedonsiirtokapasiteettia saatavissa. Jatkuva 100 Mbit/s latausnopeus vaikuttaa nykyisten käyttötapauksen perusteella olevan riittävä kattamaan automaattiajamisen toimintojen lisäksi myös matkustajien viihdepalvelut. Mikäli VR/AR-viihdepalvelut yleistyvät nopeasti, myös ajoneuvokohtainen jatkuva 100 Mbit/s voi jäädä riittämättömäksi. 30 Mbit/s jatkuva lähetysnopeus vaikuttaa olevan riittävä automaattiajamisen perustarpeisiin. 30 Mbit/s lähetysnopeuskaan ei mahdollista suurta lähetysnopeutta vaativia yksittäisiä käyttötapauksia, kuten etäajoa, eikä useiden käyttötapauksen käyttöä samanaikaisesti. Suurin osa suurta jatkuvaa tiedonsiirtokapasiteettia tarvitsevista palveluista ei edellytä jatkuvaa tiedonsiirtokapasiteettia koko väylän varrelta, vaan tiedonsiirtotarpeet liittyvät tiettyyn tapahtumaan (event triggered) tai tiettyihin väylän osiin, kuten liittymiin.

Kustannuslaskelmassa arvioitiin rakentamiskustannuksia valta- ja kantatieverkolle toteutettavalle yhtäjaksoiselle ja tieliikenteelle dedikoidulle mobiiliverkolle, jolla pystytään takaamaan jatkuva 100 Mbit/s latausnopeus tieverkon keskimääräisille liikennemäärille. Laskelmien perusteella verkon rakentamiskustannukset ovat 660 - 1 220 M€. Alla olevissa taulukoissa on esitetty skenaariotarkastelun tukiasemakombinaatioita kohden lasketut kilometrimäärät sekä kokonaiskustannusten jakaantuminen tieluokittain eri taajuusalueita koskevilla skenaarioissa.

Tukiasemakombinaatiot (Skenaario 100 Mbit/s)	Valtatiet (km)	Kantatiet (km)	Yhteensä (km)
Kombinaatio 1	772 km	544 km	1 317 km
Kombinaatio 2	1 952 km	2 420 km	4 372 km
Kombinaatio 3	4 100 km	1 691 km	5 791 km

Kombinaatio 4	1 275 km	191 km	1 467 km
Kombinaatio 5	592 km	82 km	674 km
Kombinaatio 6	330 km	117 km	347 km
Kombinaatio 7	0 km	1 km	1 km

Taulukko 11: Kapasiteettitarve tieverkolla skenaariotarkastelussa 100 Mbit/s

Vastaavasti kuin DL 30 Mbit/s skenaariotarkastelussa, arvioitiin laskelmien yhteydessä kustannukset myös DL 100 Mbit/s skenaariolle, jossa matalia alle 1 GHz taajuuksia ei käytettäisi, vaan ne rakennettaisiin kapasiteetin varmistamiseksi 2600 MHz, 3,5 GHz ja 26 GHz taajuuksia hyödyntäen. Tällä skenaariotarkastelulla investointikustannuksiksi arvioitiin noin 0,7 - 1,3 miljardia euroa.

Käytetyt taajuuksialueet	Kokonaiskustannukset valtatiet	Kokonaiskustannukset kantatiet	Kokonaiskustannukset
700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz, 3,5 GHz ja 26 GHz	450 - 830 M€	210 - 390 M€	660 - 1 220 M€
2600 MHz, 3,5 GHz ja 26 GHz	475 - 885 M€	235 - 440 M€	710 - 1 325 M€

Taulukko 12: Investointien kokonaiskustannukset skenaariotarkastelussa 100 Mbit/s eri taajuuksialueilla.

6.3 Laskelmiin liittyvät varaukset

6.3.1 Yleiset varaukset

Laskelmat perustuvat operaattori- ja materiaalitoimittajien haastatteluihin, sekä asiantuntija-arvioihin. Laskelman päämääränä oli tuottaa karkea arvio investointien kokoluokasta tiekilometriä kohden Suomen valta- ja kantateilla. Matkaviestinverkkojen suunnittelu vastaavassa mittakaavassa olisi todellisuudessa huomattavan monimutkaista, ja tarkempien laskelmien tuottaminen vaatisi syvempää perehtymistä mm. operaattoreiden olemassa oleviin verkkoihin ja maasto-olosuhteisiin, joita toteutetussa laskelmassa ei ole huomioitu.

Tukiasemien kantamat muodostettiin asiantuntija-arvioiden perusteella, jotka perustuvat käytännön kokemuksiin. Todellisuudessa kantamat ja solukoot voivat vaihdella huomattavasti. Uusien taajuuksialueiden 3,5 GHz ja 26 GHz kantamista tieolosuhteissa ei ole Suomessa vielä kokemuksia, ja niiden oletetut kantamat voivat todellisuudessa rajoittua 25 - 50 % välille arvioituista. Myöskään Suomessa vallitsevien sääolosuhteiden vaikutuksista 26 GHz taajuuksialueen kantamiin on hyvin rajallisesti käytännön kokemusta.

Laskelmassa oletettiin, että lisäkapasiteetti toteutettaisiin rakentamalla kokonaan uusia tukiasemia tien välittömään läheisyyteen. Uusia tukiasemia tarvitaan, koska teitä varten toteutettu optimoitu verkko vaatii sektoreiden suuntaamista teiden myötäisesti. Todellisuudessa valta- ja kantateiden läheisyydestä löytyy useita tukiasemia, joita voidaan hyödyntää verkon rakentamisessa, ainakin osittain. Rakennettavista tukiasemista oletettiin toteutettavaksi kaksi sektorisuuntaa, jotka kyettäisiin suuntaamaan täysin teiden suuntaisesti.

Selvityksessä tehty laskelma on tuotettu keskimääräisen ruuhkatunnin liikennemääriin pohjautuvan kapasiteettitarpeen pohjalta, eikä se ota huomioon esimerkiksi suurten juhlapyhien tai mahdollisten suuronnettomuuksien aiheuttamia ruuhkahuippuja. Suurten ruuhkahuippujen verkkojen kuormitukseen vaikuttaa paitsi kasvava liikennemäärä, mutta myös autojen matkustajamäärä.

6.3.2 Teknisiin yksityiskohtiin liittyvät varaukset

5G-verkkojen spektritehokkuudeksi arvioitiin DL 11 bit/s/Hz, joka on edellytys sille, että ensimmäisessä vaiheessa 5G käyttöön suunnitelluilla 700 MHz, 3,5 GHz ja 26 GHz taajuusalueilla saavutettaisiin markkinoidut 10 Gbit/s DL nopeudet monikantaaaltotekniikkaa hyödyntäen. Siitä millaiseksi 5G-verkkojen todellinen spektritehokkuus muodostuu, ei vielä ole riittäviä kokemuksia, ja siksi tukiasemakombinaatiolla saavutettava kapasiteetti voi jäädä alemmalle tasolle laskelman oletuksesta.

Laskelmassa oletettiin myös, että kaikkia matkaviestinverkon taajuusalueita voitaisiin hyödyntää 5G käytössä, ja ne kaikki voisivat hyödyntää monikantaaaltotekniikkaa. Tällä hetkellä ei kuitenkaan ole varmuutta kyetäkö tulevaisuudessa esimerkiksi monikantaaaltotekniikkaa hyödyntämään alle 1 GHz taajuuksilla. Vastaava epävarmuus monikantaaaltotekniikan hyödyntämiseen koskee myös 3,5 GHz ja 26 GHz taajuusalueita.

Tukiasemakombinaatiossa 6 ja 7 käytetään 26 GHz taajuutta, josta on vielä erittäin vähän kokemuksia. Vielä ei tarkalleen tiedetä esimerkiksi mille korkeudelle tukiasemia kannattaa sijoittaa ja millaisia pylväsrakenteita ne vaativat. Toteutetussa laskelmassa oletettiin, että 26 GHz tukiasemat sijoitettaisiin 10 metrin pylväisiin.

6.3.3 Muut kustannuksiin vaikuttavat varaukset

Koska tukiasemat oletettiin sijoitettavaksi tiestön välittömään läheisyyteen, ei niiden kustannuksissa otettu huomioon huoltoteiden rakentamista. Koska sähkönsyötön rakentamisesta aiheutuvat kustannukset vaihtelevat valtakunnallisella tasolla merkittävästi, huomioitiin myös sen osalta laskelmissa ainoastaan varsinaisen sähköliittymän ja mittareiden hankinnasta koituvat kustannukset.

Tukiasemien rakentamiskustannukset ovat operaattoreiden ja laitevalmistajien liikesalaisuuksia, joten tarkempien arvioiden tuottaminen vaatisi viranomaisen tietojenluovutuspyyntöä operaattoreille.

Koska selvityksessä haluttiin huomioida ainoastaan investointikustannukset, ei laskelmassa ole huomioitu maa-alueiden hintaa (operaattorit sekä vuokraavat että ostavat tukiasemien vaatimia maa-alueita) tai tukiasemapaikkojen vuokraamisesta aiheutuvia kustannuksia.

Laskelmassa ei ole otettu huomioon laskelman mukaisen radioliityntäverkon rakentamisen aiheuttamia investointitarpeita alue- ja runkoverkkoihin. Laskelmassa ei ole myöskään voitu huomioida kilpailutuksen vaikutuksia.

Laskelma ottaa huomioon yhden valtakunnallisen operaattorin investointitarpeet. Vaikka operaattorit hyödyntäisivät tehokkaasti toistensa rakentamia mastoja ja pylväitä, tulee laskelman kustannukset kertoa ainakin kahdella, jos halutaan arvioida kaikkien operaattoreiden investointikustannuksia.

6.4 Kustannuslaskelmiin liittyvä pohdinta

Selvityksessä laadittuihin kustannusarvioihin liittyen on oleellista huomioida, että laskelmat perustuvat liikenteen palveluiden kannalta optimaaliseen tilanteeseen. Tällä tarkoitetaan tilannetta, jossa verkko on varattu kokonaan tieliikenteen käyttöön ja monikantaaaltotekniikan on oletettu olevan käytettävissä myös alle 1 GHz taajuusalueilla. Lisäksi laskelmat perustuvat keskimääräisiin liikennemääriin, mikä voi joillakin tieosuuksilla tarkoittaa tiedonsiirto-kapasiteetin puolittumista jo kahden ajoneuvon kohdatessa. Keskimääräisestä merkittävästi lisääntynyt käyttäjämäärä tukiaseman solun alueella voisi pahimmillaan lamaannuttaa verkon toimintakyvyn ja siihen tukeutuvan liikenteen, mikäli tähän ei verkkojen toteutuksessa

varauduta ylikapasiteetilla. Ylikapasiteetin rakentaminen puolestaan nostaa tarvittavien investointien kokoluokkaa entisestään.

Laskelmien laadinnassa todetut varaukset tulisi ottaa huomioon niin jatkotoimenpiteitä kuin myös aikataulutusta ja investointien jaksottamista suunnitellessa. Lähtökohtaisesti olisi tärkeää tunnistaa mahdollisimman tarkasti tulevat tarvevaatimukset liikenteen palveluille. Lisäksi olisi tärkeää myös priorisoida palveluita sekä palvelutarvetta erilaisilla alueilla. Liikenteen palvelut ovat pääsääntöisesti toteuttavissa nykyisten matkaviestinverkkojen avulla. Kustannustehokkaan siirtymäajan ratkaisun suunnittelemiseksi tarvitaan parempaa näkemystä aikataulusta, jolla samalla tieosuudella esimerkiksi 30 ajoneuvoa tarvitsee samanaikaisesti jatkuvaa 30 Mbit/s yhteyttä.

Esimerkkilaskelmat antavat karkean arvion siitä, millaisia investointeja tarvitaan tieliikennettä varten optimoidun verkon toteuttamiseksi, vaikkakin laskentaan liittyy merkittäviä varauksia. Esimerkkilaskelmien perusteella jatkuvan 30 Mbit/s latauskapasiteetin takaaminen kaikille valta- ja kantateiden käyttäjille tarkoittaa vähintään n. 0,5 miljardin euron investointeja. Esimerkkilaskelmien investoinnit kattavat yhden tieliikenteen tarpeisiin optimoidun mobiiliverkon rakentamisen. Laskelmissa arvioitujen investointikustannusten suuruuden vuoksi olisi tärkeää selvittää myös mahdollisuudet kustannusten jakamiseen joko yhteisrakentamisen tai rakennettavan infran yhteisomistamisen osalta. Investointien kokoluokkaa kuvaa se, että yhden operaattorin mobiiliverkon investointibudjetti on vuositasolla noin 60 - 80 miljoonaa euroa, jolloin vähintäänkin investointien jaksottaminen pitkälle aikavälille on aiheellista.

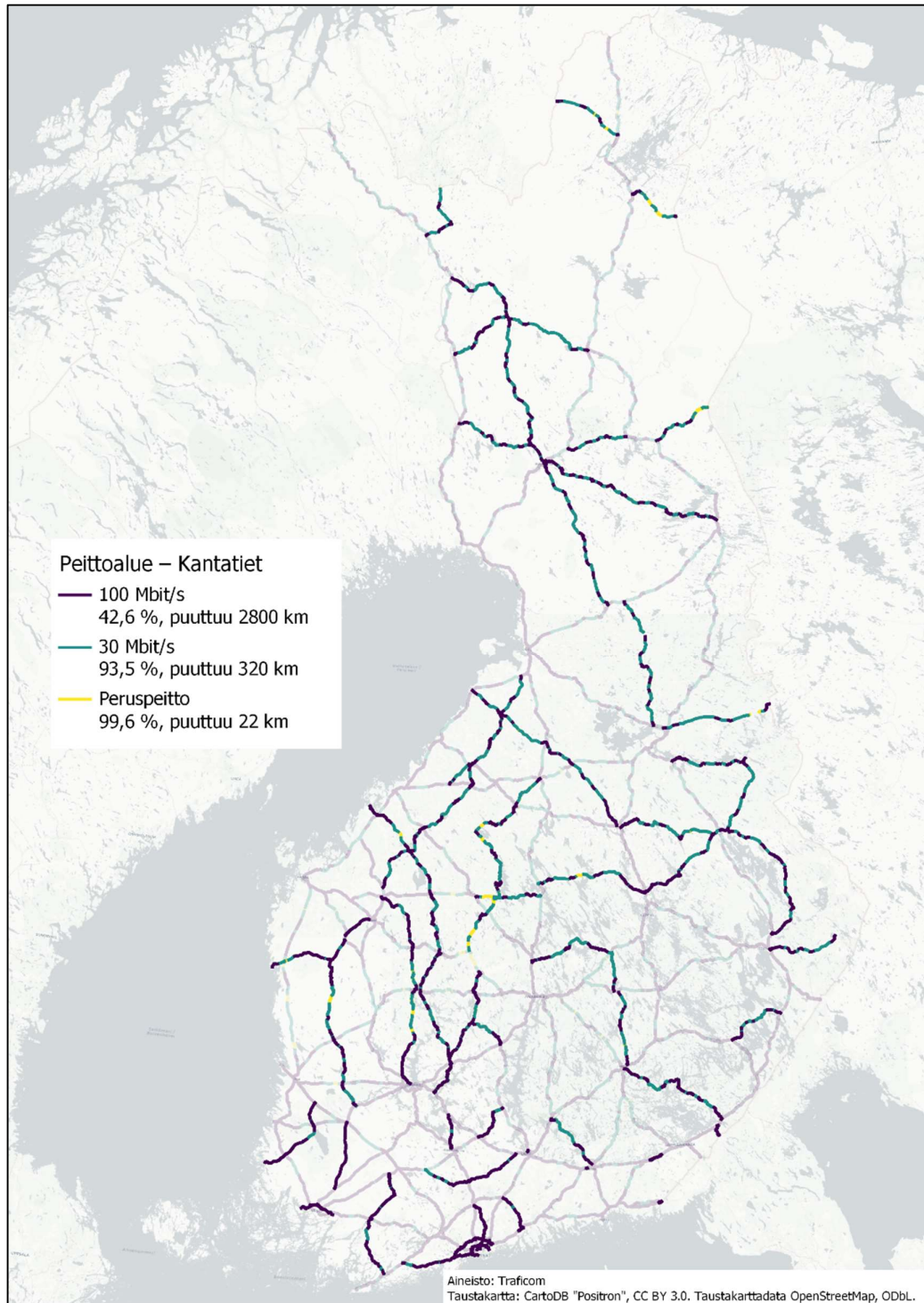
Sanasto

Reunalaskenta	kerätyn datan prosessointia mahdollisimman lähellä datan keräyspaikkaa. Reunalaskennan avulla tiedon välittämiseen kuluva viive ja muun verkon kuormitus saadaan minimoitua. Reunalaskenta voi käytännössä tarkoittaa esimerkiksi risteyksen kameravalvontaa analysoivan palvelimen sijoittamista fyysisesti lähelle risteystä ison datakeskuksen sijaan.
Verkon viipalointi	5G-mobiilikeskusverkon ominaisuus, jonka avulla fyysisen tietoliikenneverkon päälle voidaan määritellä loogisia verkkoja eri tarpeisiin. Viipaloinnin avulla luodulle verkolle voidaan määritellä esimerkiksi oma nopeus ja kapasiteetti.
MaMIMO	antenniteknologia, jonka avulla pystytään lähettämään ja vastaanottamaan useita signaaleja samanaikaisesti. Teknologian avulla solun kapasiteettia ja laitetiheyttä saadaan kasvatettua sekä spektritehokkuus paranee (Massive Multiple Input and Multiple Output).
Säteenmuodostus	antenneissa hyödynnettävä tekniikka, jonka avulla antennin lähetys ja vastaanotto voidaan keskittää haluttuun suuntaan. Mahdollistaa myös antennin säteilykuvion muokkaamisen optimointitarpeen mukaan. Säteenmuodostus toteutetaan antennin sisällä olevien antennielementtien avulla (Beamforming).
Monikantoaalto	tai monikantoaallon yhdistelmätekniikka (Carrier Aggregation) on tekniikka, jonka avulla eri kantoaaltoja voidaan yhdistää yhdeksi tiedonsiirtokanavaksi hyödyntäen joko samaa tai erillisiä taajuusalueita.
Kaistanleveys	taajuusalueella käytössä oleva taajuusväli, jota voidaan käyttää signaalin välittämiseen radioteitse. Käytössä oleva kaistanleveys vaikuttaa saavutettavaan tiedonsiirtokapasiteettiin yhdessä spektritehokkuuden kanssa.
Spektritehokkuus	arvo, jonka avulla kuvataan, kuinka tehokkaasti tietoa voidaan siirtää tietyssä viestintäverkossa. Viestintäverkkoja analysoitaessa yksikkönä käytetään yleisesti bit/s/Hz.
DSS	dynaaminen spektrin jakaminen on teknologia, mikä mahdollistaa 4G- ja 5G-tekniikoiden käyttämisen samalla taajuusalueella jakamalla kaistanleveyden osia resursseiksi kullekin tekniikalle käyttäjien tarpeiden mukaan (Dynamic Spectrum Sharing).
FDD	taajuusjakoon perustuva lähtevien ja saapuvien signaalien erottamiseen käytettävä tekniikka. Lähtevä ja saapuva signaali kuljetehtaan eri taajuuksia käyttävillä kantoaalloilla (Frequency-division duplexing).

TDD	aikajakoon perustuva lähtevien ja saapuvien signaalien erottamiseen käytettävä tekniikka. Lähtevä ja saapuva signaali lähetetään ennalta sovitun aikajaon mukaisesti (Time-division duplexing).
Peruspeitto	peruspeitolla tarkoitetaan peittoaluetta, jonka sisällä olevissa sijaintipaikoissa saavutetaan signaalinvoimakkuuden raja-arvot: GSM-verkossa -90 dBm:n (RxLev), UMTS-verkossa -100 dBm:n (RSCP), LTE-verkossa -110 dBm:n (RSRP) ja 5G-verkossa -120 dBm:n (RSRP) (Traficom TIKU-M määritelmädokumentti).
Nimelliskapasiteetti	radiotien tarjoama teoreettinen tukiasemakohtainen kapasiteetti, radioteitse tietyssä maantieteellisessä sijainnissa teoreettisesti saatavilla oleva kapasiteetti tai yhdelle käyttäjälle tarjottava teoreettinen kapasiteetti.
Alueverkko	maantieteellisesti rajatun alueen, kuten kaupungin tai kaupungin osan, sisällä toimivaa verkkoa, jossa välitetään liityntä- ja asiakasverkkojen liikennettä runkoverkon suuntaan ja toisinpäin.
Runkoverkko	tietoliikenneverkon runko-osuus, jonka avulla kaupunkeja, maakuntia ja maita voidaan yhdistää toisiinsa, operaattoreiden yhteisten verkon solmupisteiden eli nielujen kautta.

Liite 1 – Kantateiden nykykapasiteetti ja peitto

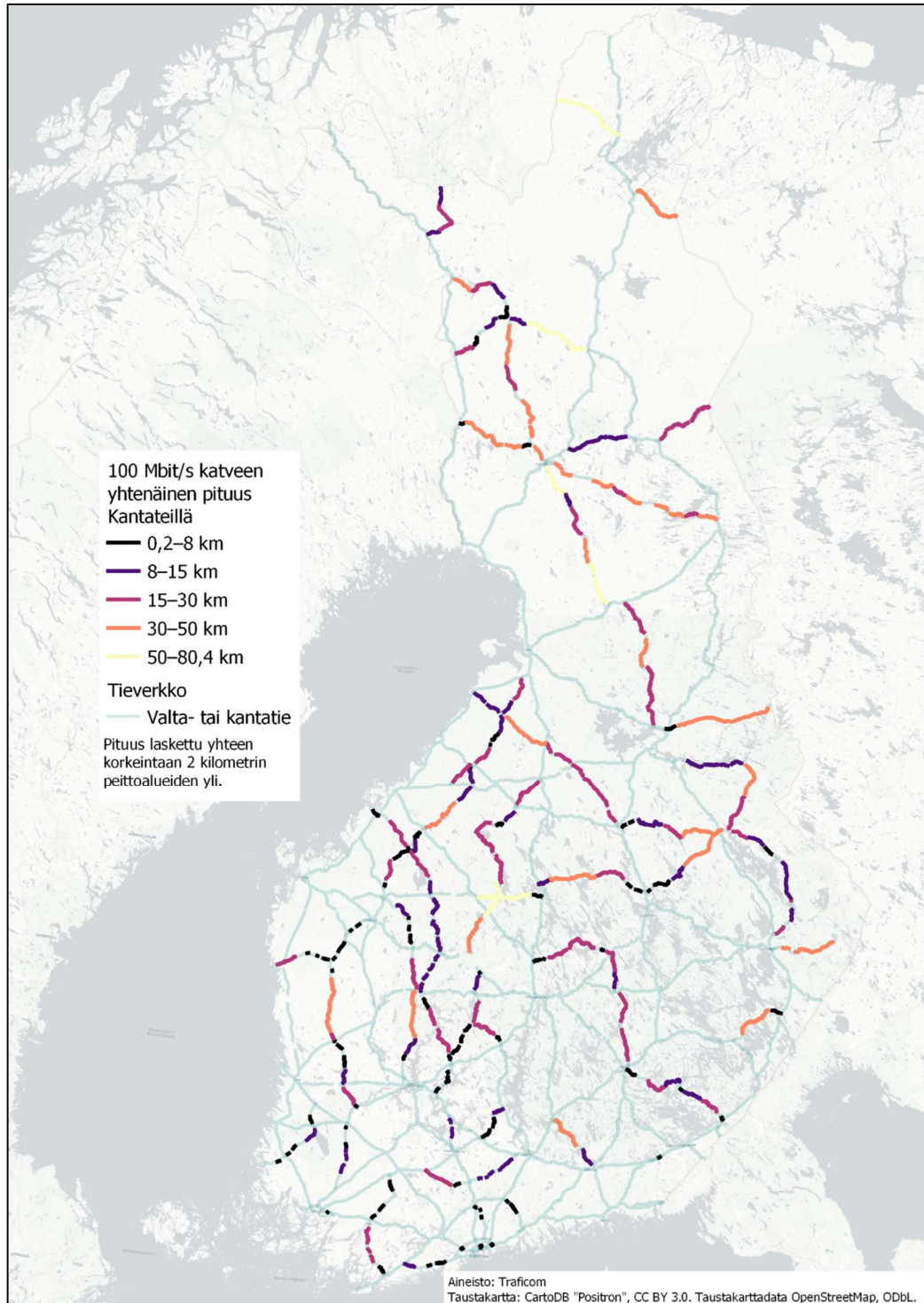
Kantatiet Traficomin aineiston mukaan



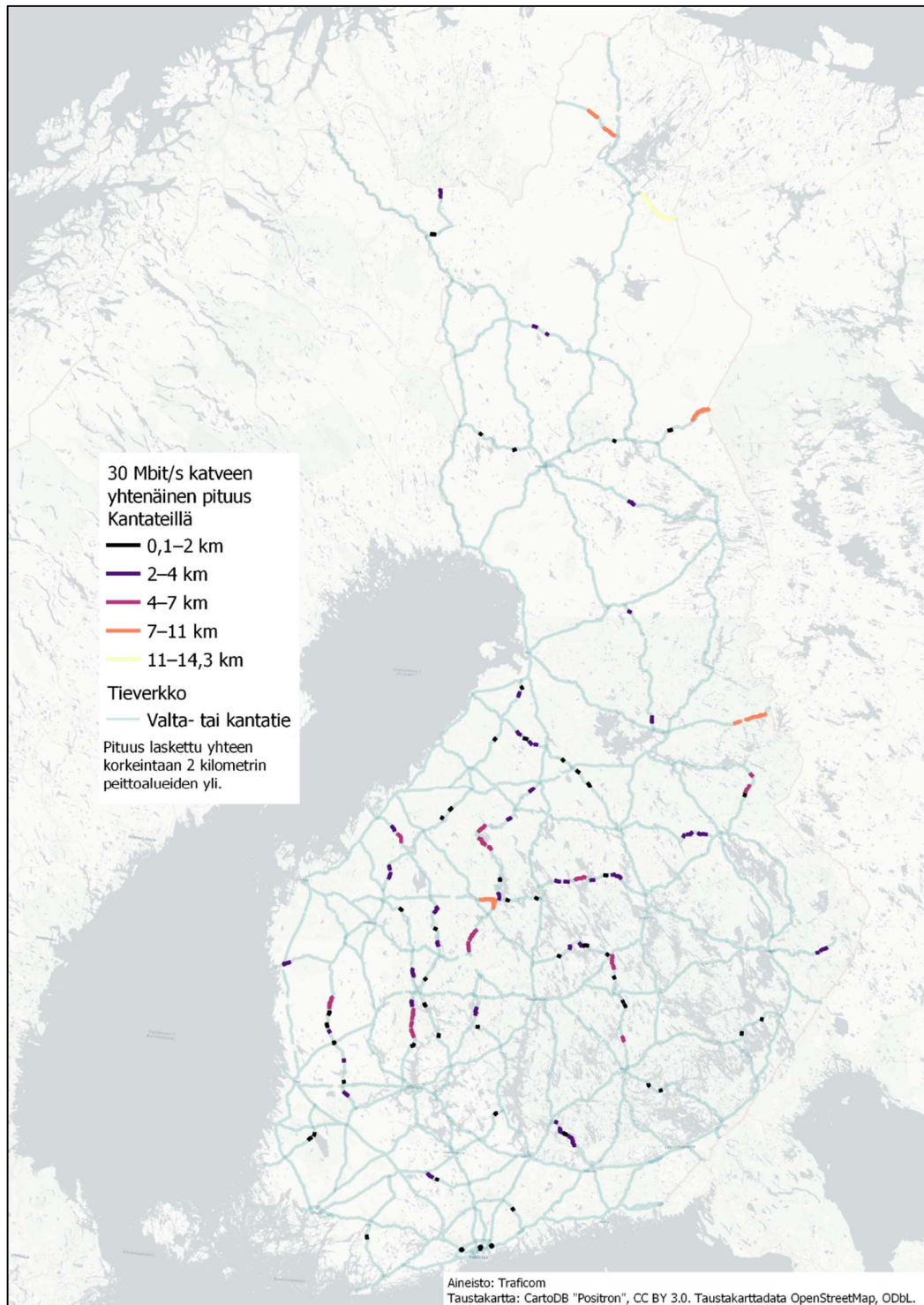
Kantateiden ja valtateiden osalta matkaviestinverkkojen peitto näyttää hyvin paljon samantyyppiseltä. Myös kantateiden osalta peruspeitto ja 30Mbit/s tiedonsiirtonopeus saavutetaan erittäin laajalla alueella peruspeiton ollessa lähes 100 %:a ja 30Mbit/s saatavuuden ollessa

93,5 %. 100Mbit/s teoreettisen tiedonsiirtonopeuden peitto kantateillä on 42,6 %, joka tarkoittaa eri pituisten katvealueiden ilmenemistä yhteensä 2800 kilometrin pituudelta kaikista kantateistä. Myös kantateiden osalta katvealueet sijoittuvat maantieteellisesti eri puolille Suomea ja eniten pitkiä katvealueita esiintyy harvemmin asutuilla alueilla.

Matkaviestinverkkojen 100Mbit/s yhteysnopeuden yhtenäisten katvealueiden osalta lyhyimmät katvealueet sijoittuvat pääosin Etelä-Suomeen. Pisimmät yksittäiset katvealueet ovat Pohjois- ja Keski-Suomessa. Muuten yhtenäiset katvealueet keskittyvät Länsi-Suomeen.



Matkaviestinverkkojen 30Mbit/s yhteysnopeuden yhtenäisten katvealueiden osalta sijoittuvat eri puolille Suomea. Eniten katvealueita esiintyy Keski- ja Länsi-Suomessa. Peittokarttojen perusteella 30Mbit/s yhteysnopeus toteutuu erityisen hyvin Itä-Suomessa.



Liite 2 - Tieliikenteen käyttötapauksia

Liitteessä on esitelty lyhyesti työssä esillä olleita automaattiliikenteen kannalta oleellisiksi tunnistettuja liikenteen palveluita.

- **eCall-hätäviestipalvelu.** Onnettomuustilanteissa palvelu lähettää hätäkeskukseen data-paketin, joka sisältää tietoa muun muassa ajoneuvon kulkusuunnasta, sijainnista, ajoneuvotyypistä sekä myös siitä, onko hälytys tehty manuaalisesti vai automaattisesti.
- **ODD-etäpalvelut** tulevat koskemaan ODD-alueita (Operational Design Domain). ODD-alueilla voidaan geofencingillä eli virtuaalisen valvotun vyöhykkeen määrittelyllä rajata aluetta koskevia sääntöjä, esim. operointialuetta tai nopeusrajoituksia. Ajoneuvovalmistajilla on jatkossa todennäköisesti omat ODD-hallintajärjestelmänsä (ODD management system).
- **Ohjelmistopäivitysten** välittäminen autoihin tulee olemaan tärkeää, myös kyberturvallisuus on hyvin tärkeää.
- **Letka-ajossa** eli platooningissa kaksi tai useampi ajoneuvo on yhteydessä toisiinsa ensimmäisen ajoneuvon toimiessa ns. johtojajoneuvona minkä takia ne voivat esimerkiksi ajaa tavallista lähempänä toisiaan etenee jonossa. Nykyisellään kommunikoinnissa käytetään lyhyen kantaman viestintää, mutta joissain suunnitelmissa on esitetty hyödynnettävän mobiiliverkkoja
- **HD-karttatiedon** välitys ja jakaminen autonomisille autoille (HD map collection and sharing for AVs) on palvelu, jonka suunniteltu ajankohta on vuoden 2024 tietämissä.
- **Infra-avusteinen ympäristönseuranta** (mm. Sensor Sharing) autonomiselle liikenteelle on arvioitu olevan käytettävissä 2020-luvun loppupuolella.
- **Automaattinen pysäköinti** (Automated valet parking ja Emergency valet parking) ovat palveluja, jotka alkavat olla käyttöönottoaiheessa ja joita on testattu myös Suomessa VTT:n toimesta.
- **Yhteydet ajoneuvojen ja ”haavoittuvien” tienkäyttäjien kanssa** (VRU & Complex Interactions) on arvioitu saatavan käyttöön 2020-luvun loppupuolella. Palvelut tulevat pohjautumaan sekä C-V2X:n lyhyen kantaman kommunikointiin, että matkaviestinverkko-kommunikointiin.
- **Dynaamisen risteysalueiden ja liittymien hallinnan** (Dynamic Intersection Management) on arvioitu olevan valmiina 2020-luvun loppupuolella. Se tulee pohjautumaan C-V2X:n lyhyen kantaman kommunikointiin (PC5) sekä matkaviestinverkko-kommunikointiin (Uu).
- **Teiden kunnossapidon** (ml. talvikunnossapito) tarpeissa voidaan hyödyntää esim. videokuvaa väyläosien kunnon seuraamiseksi.

Lähdeluettelo

- Laakso, J., Vesanto, A. ja Ritari, J. 2018. Selvitys automaattiajamisen edellyttämistä tiedoista ja kehittämistarpeista. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/160503>. (Luettu 3.11.2020)
- Jokinen, O., Piuva, J., Mäkipää, M. ja Riihentupa, L. 2019. 5G Väyläviraston toiminnassa. https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vj_2019-52_5g_vaylaviraston_toiminnassa_web.pdf. (Luettu 3.11.2020)
- Linget, T., 2020. A visionary roadmap for advanced driving use cases, connectivity technologies and radio spectrum needs, 5GAA - 5G Automotive Association. <https://5gaa.org/wp-content/uploads/2020/09/A-Visionary-Roadmap-for-Advanced-Driving-Use-Cases-Connectivity-Technologies-and-Radio-Spectrum-Needs.pdf>. (Luettu 3.11.2020)
- Laine, T., Kulmala, R., Lindholm, S., Berg, I. ja Huju, M. 2019. Helsingin seudun pääväylien liikenteen hallinta 2030: Selvitys teknologian kehittymisen tuomista tarpeista ja mahdollisuuksista. <https://www.doria.fi/handle/10024/168626>. (Luettu 3.11.2020)
- Kulmala, R., Ulrich, S., yms. 2020. Road map for developing road operator core business utilising connectivity and automation, MANTRA Deliverable D5.2. https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/MANTRA_Deliverable_D52_for_PEB_review.pdf. (Luettu 3.11.2020)
- Nordic Way 2. Internet -sivu. www.nordicway.net. (Luettu 3.11.2020)
- 5G muuttaa liikennettä, Traficom 5G-podcast 7/2020. www.traficom.fi/fi/ajankoh-taista/podcastit/. (Kuunneltu 3.11.2020)
- Pylvänäinen, J., Lehtola, J., yms. 2020. Kohti digitaalista ja älykästä rautatieliikennettä: Digirata-selvityksen loppuraportti. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162151>. (Luettu 3.11.2020)
- Litman, T., 2020. Autonomous Vehicle Implementation Predictions Implications for Transport Planning. <https://vtpi.org/avip.pdf>. (Luettu 3.11.2020)
- 5G Ultra-Lean Site, Huawei White Paper, 05/2019. https://www.huawei.com/minisite/5g-ultra-lean-site-2019/pdf_v1.0/5G-Ultra-Lean-Site-White-Paper_en.pdf. (Luettu 3.11.2020)
- DNA paljasti missä asiakkaat käyttävät mobiilidataa eniten Suomessa - kärkeen yltänyt kaupunki saattaa yllättää. Uutinen 11.1.2020. <https://teknavi.fi/digi/uutinen-digi/dna-paljastimissa-asiakkaat-kayttavat-mobiilidataa-eniten-suomessa-karkeen-yltanyt-kaupunki-saattaa-yllattaa/>. (Luettu 3.11.2020)
- Lee Armstrong, R., How Much Internet Speed You Need to Work from Home. Artikkel 2.6.2020. <https://www.highspeedinternet.com/resources/how-much-internet-speed-to-work-from-home>. (Luettu 3.11.2020)
- Virtual Reality/Augmented Reality White Paper, China Academy of Information and Communications Technology (CAICT). 2017. <https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/ilab/vr-ar-en.pdf>. (Luettu 3.11.2020)
- 4G-yhteydet ovat hitaampia kuin muutama vuosi sitten ja paikalliset erot ovat valtavia - Katso, kuinka nopea nettiyhteys on kotikunnassasi. Uutinen 27.1.2020. <https://yle.fi/uutiset/3-11174191>. (Luettu 3.11.2020)
- Speedtest Global Index, Ookla. Internet -sivu. <https://www.speedtest.net/global-index/finland#mobile>. (Luettu 3.11.2020)

Working Group Standards and Spectrum Study of spectrum need for safety related intelligent transportation systems - day 1 and advanced use cases. 5GAA. 2020.

https://5gaa.org/wp-content/uploads/2020/06/5GAA_S-200137_Day1_and_adv_Use_Cases_Spectrum-Needs-Study_V2.0-cover.pdf. (Luettu 3.11.2020)

Tabbane, S., CoE Training on Traffic engineering and advanced wireless network planning, ITU. 2019. https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2019/ITU-ASP-CoE-Training-on-/3GPP_4G%20to%205G%20networks%20evolution%20and%20releases.pdf. (Luettu 3.11.2020)

Traficomin tietopyynnöissä ja tilastoissa käytettävät viestintäpalveluja- ja verkkoja koskevat määritelmät, Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. 2017. https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/TIKU-M_Maaritelmadokumentti.pdf. (Luettu 10.11.2020)

Digiroad-aineistojulkaisut, Digiroad-julkaisu 3/2020, Väylävirasto. 2020. <https://vayla.fi/vaylista/aineistot/digiroad/aineisto/aineistojulkaisut#.XWONoegzaUk>. (Luettu 10.11.2020)