Opinnäytetyö (YAMK)

Teknologiaosaamisen johtaminen

2019

Kimmo Janhu

KUITU- JA KOAKSIAALIRATKAISUT TULEVAISUUDEN TIEDONSIIRROSSA PALVELULIIKETOIMINNAN NÄKÖKULMASTA

TURKU AMK
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (YAMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Teknologiaosaamisen johtaminen

Kesäkuu 2019 | 74 sivua

Kimmo Janhu

KUITU- JA KOAKSIAALIRATKAISUT TULEVAISUUDEN TIEDONSIIRROSSA PALVELULIIKETOIMINNAN NÄKÖKULMASTA

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää palveluliiketoiminnan vahvuuksia sekä kehittämiskohteita kuitu- ja koaksiaalikaapelipohjaisten liityntäverkkojen teknologisessa kehityksessä. Opinnäytetyössä tutkittiin mihin suuntaan teknologinen kehitys etenee kuitu- ja koaksiaalipohjaisissa liityntäverkoissa sekä minkälaista osaamista nämä teknologiat vaativat. Opinnäytetyössä tutkittiin myös teknologiaosaamisen vaatimuksia, jotta palveluliiketoiminta kykenee vastaamaan palveluillaan tietoliikenneoperaattoreiden teknologisiin odotuksiin sekä tarpeisiin jatkossakin edellä mainituissa liityntäverkoissa.

Tutkimuksen aikana suoritettiin haastatteluja palveluliiketoiminnan kokeneille asiantuntijoille. Ennen haastatteluja perehdyttiin laaja-alaisesti tutkimusongelman pohjalta kerättyyn teoriaan. Haastattelujen lisäksi toteutettiin kysely laajemmalle asiantuntijaryhmälle kuin mitä haastateltiin. Haastattelujen ja kyselyn tuloksia verrattiin alan julkaisuihin sekä muihin tutkimuksiin.

Tutkimuksen tuloksena tunnistettiin teknologisen osaamisen kehittämiskohteita sekä kohteita, joiden osaaminen on riittävällä pohjalla nykyisten tietojen valossa. Toimeksiantaja voi hyödyntää tutkimuksen tuloksia suunnitellessaan tulevia kehittämistoimenpiteitä palveluliiketoiminnalle.

ASIASANAT:

kaapelitelevisio, palveluliiketoiminta, kehitystutkimus

MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Master's Degree Programme in Technological Competence Management

June 2019 | 74 pages

Kimmo Janhu

FIBER AND COAXIAL SOLUTIONS IN THE FUTURE TELECOMMUNICATION FROM THE SERVICE BUSINESS PERSPECTIVE

The aim of the present Master's thesis was to study the strengths and development areas of the service business in the fiber and coaxial access technologies. The thesis covers the directions of the technological progresses in fiber and coaxial access networks, and what kind of technological competences new fiber and coaxial access technologies require. The thesis also explores technological expectations the operators have for their fiber and coaxial access service partners.

During the study, interviews with experienced service business specialists were carried out. Prior to the interviews, theoretical materials based on the research problem were collected and studied in depth. In addition to the interviews, a survey was conducted among a wider group of specialists than the ones that were interviewed. The results of the interviews and the survey were compared with those presented in the telecommunication industry publications and other studies.

The results of the study helped to identify the technology development areas as well as areas with sufficient knowledge in the light of current information. The service business unit can take advantage of the results when planning the future development measures.

KEYWORDS:

cable television, service business, development research

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO **7**

1 JOHDANTO **9**

1.1 Tausta 9

1.2 Tavoitteet 9

1.3 Tutkimuksen toteutustapa 10

2 KOAKSIAALIVERKKOJEN KEHITYKSEN KULKU **12**

2.1 Kaapelitelevisio 12

2.2 Kaapelitelevision kehitys alusta tähän päivään 13

2.2.1 1948–1973 13

2.2.2 1973–1995 14

2.2.3 1995–tähän päivään 15

2.3 Cablelabs 16

2.3.1 DOCSIS 17

2.3.2 DOCSIS 3.1 17

2.3.3 Full Duplex DOCSIS 3.1 19

2.3.4 DOCSIS 4.0 20

2.4 Teknologiat mahdollistamassa kaapelitelevisioverkkojen tulevaisuutta 21

2.4.1 CMTS 21

2.4.2 CCAP 22

2.4.3 Remote PHY (R-PHY) 22

2.4.4 Remote MACPHY (R-MACPHY) 24

2.4.5 Virtualisointi 25

3 KUITUVERKKOJEN KEHITYKSEN KULKU **27**

3.1 Kuitu 27

3.2 Historia 27

3.3 Lyhenteet ja verkon komponentit 29

3.4 Liityntäverkkojen arkkitehtuurit 30

3.4.1 Point-to-Point 30

3.4.2 Active Optical Network 31

3.4.3 Passive Optical Network 31

3.5 Standardit 32

3.5.1 PON 32
3.5.2 EPON 34
3.5.3 Point-to-Point–sovelluksissa käytettävät Ethernet-tekniikat 34
3.5.4 Radio Frequencies over Glass (RFoG) 35
3.5.5 Cablelabs 36

4 KUITU- JA KOAKSIAALIVERKKOJEN MARKKINATILANNE 37
4.1 Kapasiteetin kasvu tietoliikenneverkoissa 37
4.2 Kaapelitelevision markkinatilanne Euroopassa 38
4.3 Kapasiteettisuunnittelu 38
4.4 Käyttäjät 41
4.5 Kuitu- ja koaksiaalipohjaisten verkkojen evoluutio 42
4.6 Investointinäkymät tulevina vuosina kaapelitelevisioverkoissa 43
4.7 Hajautetun verkkoarkkitehtuurin käyttöönotot 45
4.8 Kuituverkkojen kehitys Euroopan näkökulmasta 46
4.9 Kuituverkkojen markkina-analyysi 47

5 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS 52
5.1 Haastattelu tutkimuskäytössä 53
5.2 Kohderyhmä ja esivalmistelut 53
5.3 Asiantuntijahaastattelut 55
5.4 Asiantuntijahaastatteluiden analysointi 56
5.4.1 Taustatiedot 56
5.4.2 Haasteellisimmat teknologiamurrokset ja niistä selviytyminen 57
5.4.3 Teknologiatrendit kuitu- ja koaksiaalipohjaisissa liityntäverkoissa 57
5.4.4 Markkinavaatimukset liityntäverkkojen kehityksessä 58
5.4.5 Julkisten toimijoiden vaikutus liityntäverkkojen kehitykseen 59
5.4.6 Vahvuudet 59
5.4.7 Kehittämiskohteet 60
5.5 Kyselyn toteutus 61
5.6 Kyselyn tulokset 61
5.7 Laatu, luotettavuus ja eettisyys 62

6 PÄÄTELMÄT, TULOSTEN ARVIOINTI JA HYÖTY 64
6.1 Kehittämiskohteet 64
6.2 Tulosten arviointi 67
6.3 Hyöty toimeksiantajalle 67

KUVAT

Kuva 1. I-CCAP-verkon lohkokaavio (Laufer ym. 2018, 7). 22
Kuva 2. Remote PHY-verkon lohkokaavio (Laufer ym. 2018, 7). 23
Kuva 3. Remote MACPHY-verkon lohkokaavio (Laufer ym. 2018, 8). 24
Kuva 4. Erilaisia liityntäverkkojen kehityspolkuja (Al-Banna ym. 2017, 4). 43

KUVIOT

Kuvio 1. Tiedonsiirtostandardien kehittyminen ja ennustetut kasvut (Knittle 2016). 38
Kuvio 2. Vuosittainen kapasiteetin tarpeen kasvu 50 % (Ulm & Cloonan 2017, 5). 39
Kuvio 3. Vuosittainen kapasiteetin tarpeen kasvu 33 % (Ulm & Cloonan 2017, 5). 39
Kuvio 4. Käyttäjien ennustettuja nopeuksien kasvuja (Ulm & Maricevic 2016, 7). 42
Kuvio 5. Päävahvistinlaitteiden markkinaennuste (Laufer ym. 2018, 6). 44
Kuvio 6. DOCSIS 3.1-liittymien osuudet (Laufer ym. 2018, 9). 45
Kuvio 7. Kaapelitelevisiomarkkinoiden kasvunäkymät (MarketsAndMarkets 2019). 45
Kuvio 8. Kuituverkon kasvu Euroopassa 2010-luvulla (Montagne 2019a, 6). 48
Kuvio 9. Euroopan kuitupenetraatiota valtioittain (Montagne 2019a, 16). 48
Kuvio 10. Kuitupenetraation globaali kärki (Montagne 2019a, 19). 49
Kuvio 11. Eri kuitustandardien markkinaosuuksia (Weissberger 2017). 50
Kuvio 12. EPON-teknologian laitemyynti (Weissberger 2017). 50
Kuvio 13. Ftth-investointien jakautuminen maantieteellisesti (Weissberger 2017). 51
Kuvio 14. PON- ja Ethernet-standardien markkinaosuudet Euroopassa (Montagne 2019b, 13). 51

TAULUKOT

Taulukko 1. ITU-T:n kuitustandardien ominaisuuksia (van der Linden 2018, 18). 33
Taulukko 2. IEEE:n kuitustandardien ominaisuuksia (van der Linden 2018, 18). 34
Taulukko 3. Point-to-Point Ethernet-standardien ominaisuuksia (Nestor Cables Oy, 78–80). 35
Taulukko 4. Erilaisia laajakaistasiirron käyttäjäryhmiä (Ulm & Maricevic 2016, 6). 41
Taulukko 5. Kyselyn tulokset. 62

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

AON	Active Optical Network
bps tai bit/s	Bits per second
CCAP	Converged Cable Access Platform
CMTS	Cable Modem Termination System
DAA	Distributed Access Architecture
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
FSAN	Full Service Access Network
FttX	Fiber to the X
FCC	Federal Communications Commission (USA)
FM	Frequency Modulation
HFC	Hybrid fibre-coaxial
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
LDPC	Low Density Parity Check
MAC	Media Access Control
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OLT	Optical Line Terminal tai Optical Line Termination
PHY	Physical Layer
PON	Passive Optical Network

PtP	Point-to-Point
RFoG	Radio Frequency over Glass
SC-QAM	Single Carrier Quadrature Amplitude Modulation

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Opinnäytetyön toimeksiantaja on tietoliikennetuotteiden valmistaja sekä näihin liittyvien palvelujen tuottaja. Tietoliikenneala on jatkuvassa murroksessa. Muun muassa IoT, suoratoistopalvelut, paremmat kuvanlaadut ja tekoäly luovat operaattoreille paineita kehittää tietoliikenneverkkojaan yhä kehittyneemmiksi, jotta ne pystyvät vastaamaan asiakkaidensa tarpeisiin. Tässä kehityksessä ne tarvitsevat osaavia kumppaneita, jotka voivat toimittaa palveluita sekä tuotteita. Operaattoreiden verkot pohjautuvat kuituun sekä tietyiltä osin liityntäverkoissa vielä myös kupariin. Opinnäytetyön toimeksiantaja on erikoistunut liiketoiminnoissaan kuituverkkoihin sekä kupariverkoissa koaksiaalikaapeliin pohjautuviin ratkaisuihin.

1.2 Tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää mitkä ovat toimeksiantajan Suomen yksikön palveluliiketoiminnan vahvuuksia sekä kehittämiskohteita kuitu- ja koaksiaalikaapelipohjaisten verkkojen teknologisessa kehityksessä. Opinnäytetyössä tutkitaan mihin suuntaan teknologinen kehitys etenee sekä minkälaista teknologiaosaamista tarvitaan, jotta palveluliiketoiminta kykenee vastaamaan teknologiatrendeihin sekä tietoliikenneoperaattoreiden teknologisiin odotuksiin ja tarpeisiin jatkossakin. Opinnäytetyön tutkimuksessa käydään myös läpi markkinatrendejä ja sitä mihin suuntaan ne ajavat toimialaa. Näiden lisäksi opinnäytetyön aikana tunnistetaan kuitu- ja koaksiaaliverkkoihin liittyviä tärkeitä standardeja sekä teknologioiden kehityssuuntia ja niiden erityispiirteitä. Opinnäytetyön tutkimus tulee keskittymään vain liityntäverkko-osuuteen.

Opinnäytetyön tavoitteena on myös tarjota käytännön toimenpiteitä, joita voidaan suorittaa organisaatiossa tunnistetuille teknologiaosaamisen kehittämiskohteille. Opinnäytetyössä pyritään erityisesti löytämään ne kehittämistoimet, jotka eivät vaadi yrityksen ulkopuolista osaamista tai apua. Tällaisia toimenpiteitä voivat olla muun muassa yhtiön tuotekehitykseen syntyneen tietotaidon hyödyntäminen. Havaittujen kehityskohteiden toimeenpanon ja aikataulun päättää yksikön ylempi johto sopivassa ajankohdassa.

Opinnäytetyön alkupuoli muodostuu teoriataustasta, jossa käsitellään muun muassa teknologioita sekä markkinoita liittyen kuitu- ja koaksiaaliverkkoihin. Opinnäytetyön tutkimusosuudessa selvitetään nykyistä teknologiatietoutta sekä näkemyksiä alasta haastattelujen ja kyselyn avulla.

1.3 Tutkimuksen toteutustapa

Opinnäytetyön aikana suoritettiin haastatteluja kokeneille toimeksiantajan palveluliiketoiminnan toimihenkilöille, joilla oli kattava kokemus työskentelystä niin kotimaisten kuin ulkomaisten asiakkaiden kanssa. Haastatteluilla pyrittiin selvittämään näkökulmia sellaisilta ihmisiltä, jotka näkevät jokapäiväisessä työssään sen, miten tietoliikenneala muuttuu ja mitä operaattorit eli asiakkaat odottavat nykyisiltä kuitu- sekä koaksiaalikumppaneiltaan. Haastatteluilla pyrittiin myös selvittämään toimeksiantajan palveluliiketoiminnan vahvuuksia ja kehittämiskohteita sekä vaadittavia toimenpiteitä, joiden avulla yksikkö kykenee vastaamaan tulevaisuuden haasteisiin. Haastattelut suoritettiin puolistrukturoituina haastatteluina henkilökohtaisissa tapaamisissa.

Opinnäytetyön teoriatausta muodostui laajasta kirjallisuustutkimuksesta. Tutkimuksessa perehdyttiin erityisesti kuitu- ja kaapelitelevisioalan johtavien tutkimusyhtiöiden, aikakauslehtien, laitetoimittajien sekä operaattoreiden julkaisuihin, joissa käsiteltiin laajaalaisesti kuitu- ja koaksiaaliteknologiaa. Tutkimuksessa haluttiin erityisesti löytää niitä tietoja teknologiatrendeistä ja standardeista, jotka ohjaavat laajakaistasiirtoa eteenpäin kuitu- ja koaksiaalikaapelipohjaisissa verkoissa, ja mitä näiltä odotetaan. Tutkimus pyrki tuomaan myös esille eri teknologioiden ja standardien erityispiirteet. Tutkimuksen laajuuden taustalla oli se, että operaattorit ovat hyvin avoimia päämääriensä ja toivomustensa suhteen liittyen kuitu- ja koaksiaaliverkkoihin, koska ne toivovat mahdollisimman monen toimittajan tuottavan juuri heille sopivia palveluja ja tuotteita.

Opinnäytetyön aikana toteutettiin kyselytutkimus palveluliiketoiminnan toimihenkilöillä koskien heidän omakohtaista kokemusta osaamisesta eri aihepiireistä, jotka tunnistettiin tärkeiksi opinnäytetyön aikana.

Tutkimustulosten perusteella tunnistettiin kehityskohteita ja näille kohteille luotiin toimenpide-ehdotelmia, joilla voidaan varmistaa palveluliiketoiminnan kilpailukykyisyys myös tulevaisuudessa nykyisessä liiketoimintasegmentissä. Toimenpide-ehdotelmia ei

luotu sellaisille teknologiaosaamisalueille, joiden vahvuudet riittävät myös tulevaisuuden haasteisiin.

2 KOAKSIAALIVERKKOJEN KEHITYKSEN KULKU

Opinnäytetyön tavoitteina oli selvittää palveluliiketoiminnan vahvuuksia koaksiaalipohjaisten liityntäverkkojen teknologisessa kehityksessä ja tunnistaa koaksiaaliverkkoihin liittyviä tärkeitä standardeja. Tavoitteina oli myös tutkia koaksiaaliteknologioiden kehityssuuntia ja niiden erityispiirteitä. Tässä luvussa tunnistettiin tärkeitä koaksiaaliverkkojen standardeja, koaksiaaliteknologioiden kehityssuuntia ja niiden erityispiirteitä.

2.1 Kaapelitelevisio

Kaapelitelevisioverkkojen merkittävänä mahdollistajana on 1800-luvulla patentin saanut koaksiaalikaapeli (Nahin 2002, 16–17). Tämä vuosisatoja vanha keksintö on edelleen tänä päivänäkin merkittävässä asemassa kiinteiden verkkojen internetyhteyksissä. Esimerkiksi vuonna 2017 European Telecommunications Network Operators' Associationin jäseniin kuuluvilla operaattoreilla oli 36 miljoonaa asiakasta, jotka saivat internetyhteytensä koaksiaalikaapelin yli ja on ennustettu, että tämä luku olisi vuonna 2018 jo 42 miljoonaa. (ETNO 2019, 36.)

Kaapelitelevisioverkot pohjautuvat nykypäivänä HFC (Hybrid fibre-coaxial) -teknologiaan merkittäviltä osin (Hybrid fibre-coaxial 2018), vaikka käynnissä on teknologinen murros, jonka myötä ollaan siirtymässä HFC-teknologiasta uusiin ratkaisuihin (Al-Banna ym. 2017, 4). HFC-teknologiassa on kyse siitä, että operaattorin päävahvistintilojen ja operaattorin asiakkaiden välillä käytetään kuitua sekä koaksiaalikaapelia kuljettamaan signaalia. Tässä teknologiassa päävahvistimen ja asiakkaan päätelaitteen välillä ei tapahdu muuta kuin signaalin vahvistamista, signaalin jakamista tai signaalin muuttamista valosta sähköksi tai sähköstä valoksi. (Hybrid fibre-coaxial 2018.)

Edellä mainittu teknologinen murros vaatii investointeja, työtä sekä ymmärrystä menneestä, jotta voidaan siirtyä uusin teknologisiin ratkaisuihin. Kaapelitelevisioverkkojen päivittäminen perustuukin paljolti aiempaan ja ne ohjaavat investointeja sekä yksityiskohtia rakentamisessa. Tämän takia verkkojen päivittäjän on hyvä tuntea kaapelitelevisioverkkojen toiminta pitkältä aikaväliltä, sillä vielä tänäkin päivänä saattaa kaapelitelevisioverkoissa törmätä ratkaisuihin, jotka on tehty monia vuosikymmeniä sitten.

Seuraavissa luvuissa käydään läpi kaapelitelevision historiaa Yhdysvaltojen näkökulmasta, ja sitä miten yhdysvaltalaiset kaapelioperaattorit ovat päätyneet nykyhetkeen. Yhdysvallat on kaapelitelevision alkuajoista asti ollut suunnannäyttäjä kyseissä teknologiassa ja muu maailma on tullut aina askeleen jäljessä. Historiaosuuden jälkeen tekstissä keskitytään tärkeisiin kaapelitelevisioalaan liittyviin teknologisiin asioihin.

2.2 Kaapelitelevision kehitys alusta tähän päivään

Yhdysvaltalaisen Larry Satkowiakin mukaan tällä hetkellä eletään koaksiaaliverkkojen kolmatta aikakautta. Ensimmäisen aikakauden katsotaan olleen välillä 1948–1973 ja sitä kutsuttiin edelläkävijöiden aikakaudeksi, The Age of the Entrepreneurial Pioneers. Toisen aikakauden väliksi Satkowiak määrittelee vuodet 1973–1995 ja tätä kutsuttiin satelliittien ja ohjelmien aikakaudeksi, The Age of Satellite and Cable programming. Kolmas aikakausi, jota edelleen eletään, on nimeltään innovaation aikakausi, The Age of Innovation. (Satkowiak 2015a, 1.)

2.2.1 1948–1973

Vuonna 1948 Yhdysvalloissa lähes 600 000 ihmistä omisti televisiovastaanottimen, mutta suurin osa näistä oli vastaanottimista suurkaupunkialueilla kuten New Yorkissa, Chicagossa, Philadelphiassa tai Los Angelesissa. Syy vastaanotinten keskittymiseen oli se, että televisiosignaalien lähettimet sijaitsivat Yhdysvaltojen suurimmissa kaupungeissa ja mitä kauemmaksi lähettimestä tultiin, sitä mahdottomammaksi kävi tarpeeksi hyvän signaalin vastaanottaminen antenniratkaisuilla, joita yksittäisen normaalin kuluttajan oli järkevää rakentaa. (Satkowiak 2015a, 3–6.)

1948 FCC (Federal Communications Commission) jäädytti Yhdysvalloissa uusien televisiolisenssien myöntämisen neljäksi vuodeksi. Syynä tähän oli se, että olemassa olevat lähetinasemat käyttivät liiaksi samoja taajuuksia sekä olivat välillä liian lähellä toisiaan ja tähän tuli löytää ratkaisu ennen lisälupien myöntämistä. Kun lähetinasemat olivat liian lähellä toisiaan ja ne käyttivät samoja taajuuksia, aiheutui signaalien menoa päällekkäin, joka teki tietyillä alueilla signaalin vastaanottamisesta hyvin häiriöistä. FCC:n politiikka kiihdytti ratkaisujen etsimistä katvealueille sekä investoimista näihin ratkaisuihin. (Satkowiak 2015a, 5–6.)

Eräs ratkaisun kehittäjistä oli oregonilainen radioaseman omistaja Leroy “Ed” Parsons, jota pidetään tänä päivänä yhtenä kaapelitelevision isistä. Parsons asui liian kaukana lähetinasemasta, jotta hän olisi voinut saada tarpeeksi laadukasta signaalia televisiovastaanottimelleen ja hän tarvitsi innovaation ongelmansa ratkaisuun. Hänen innovaationsa oli asentaa antenni Astoria hotellin katolle, joka sijaitsi vastapäätä hänen omaa kotiaan, ja vahvistaa signaalia erillisellä vahvistimella sekä vetää koaksiaalikaapeli televisiovastaanottimelle. (Satkowiak 2015b.)

Vuonna 1952, kun FCC aloitti taas uusien televisiolisenssien myöntämisen, oli Yhdysvalloissa 70 kaapelitelevisioverkkoa, jotka toivat suurilla ja sopiviin paikkoihin asennetuilla antenneilla sekä vahvistimilla televisiosignaalia yhteisöille, jotka muuten olisivat olleet katvealueella. Hetken aikaa pelättiin, että kaapelitelevision aika olisi ollut ohi, mutta markkinat ja kysyntä kuitenkin säilyivät kyseiselle teknologialle. (Satkowiak 2015a, 9–10.) Vuoteen 1973 mennessä Yhdysvalloissa oli 2991 kaapelitelevisioverkkoa (cable system) ja nämä palvelivat 7 300 000 kotitaloutta. Kuitenkin 91 % kotitalouksista sai televisiosignaalinsa terrestriaaliverkosta, joten kaapelitelevisiolla oli vain 9 %:n markkinaosuus. (Satkowiak 2015a, 22–23.)

2.2.2 1973–1995

Vuonna 1973 Scientific Atlanta ja TelePrompTer esittelivät toimivan satelliitteihin perustuvan tiedonsiirtojärjestelmän kaapelitelevisiolle (Satkowiak 2015a, 25). Samoihin aikoihin järjestelmän kanssa otti ensiaskeleitaan myös televisiokanava HBO. Satelliittijärjestelmä löi itsensä lopullisesti läpi 1975, kun sen kautta onnistuttiin välittämään suorana HBO-televisiokanavan nyrkkeilyottelu Filippiineiltä Yhdysvaltoihin. (Koplovitz 2015.) Satelliitit tarjosivat kustannustehokkaan ja toimintavarman signaalireitin jakaa televisiosignaaleja ja ne mahdollistivat sen, että kaapelitelevisioverkoissa kyettiin tarjoamaan laajempaa ohjelmatarjontaa kuin aiemmin. Ennen satelliittiaikakautta kaapelitelevisioverkon kanavat olivat samoja kuin terrestriaaliverkon kanavat. Käytännössä kaapelitelevisioverkot olivat olleet vain suuria antenneja. (Robichaux 2002, 49–53.)

Suomessa kaapelitelevision aikakausi alkoi vasta 1970-luvun alussa, kun alettiin rakentamaan järjestelmiä, joilla voitiin katsoa Ruotsin televisiokanavia (Lindfors 2015). Suomi oli siis vuosikymmeniä jäljessä Yhdysvaltoja mitä tuli kaapelitelevisioon.

Pitkin 1970- ja 1980-lukua perustettiin huomattava määrä erilaisia kaapelitelevisiokanavia Yhdysvalloissa kuten esimerkiksi Showtime 1976, CNN 1980 ja Discovery Channel 1985. Näitä televisiokanavia siirrettiin satelliittien kautta kaapelitelevisioverkkoihin ja kaapelista tuli joka vuosi yhä suositumpi tapa katsoa televisiota yhdysvaltalaisissa kotitalouksissa. Ohjelmatarjonta kasvoi valtavaksi sekä monipuoliseksi verrattuna terrestriaaliverkkoon. Tämä kehitys joudutti siirtymistä satelliittisiirrosta ja pelkästä koaksiaalikaapelin käytöstä uuteen teknologiaan nimeltä HFC. (Satkowiak 2015a, 29–35.)

Kuitua oli käytetty jo vuodesta 1976 kaapelitelevisioverkossa signaaliin siirtoon, mutta 1980-luvun lopussa HFC-teknologiaa ryhdyttiin kehittämään toden teolla. Vuonna 1991 avattiin ensimmäinen pilotti HFC-verkko, joka kykeni välittämään 150 televisiokanavaa sekä 40 erillistä maksukanavaa ja erinäisiä kaksisuuntaisia palveluja. HFC:stä tuli teknologia, johon kaapelitelevisioverkot tulisivat kehittymään seuraavien vuosien aikana. Kaikki tämä teknologinen kehitys oli johtanut siihen, että 1995 Yhdysvalloissa oli 11 218 kaapelitelevisioverkkoa ja nämä palvelivat 61 600 000 kotitaloutta. Kaapelitelevision markkinaosuus oli noussut 63 %:iin. (Satkowiak 2015a, 35–43.)

2.2.3 1995–tähän päivään

1990-luvulla ryhdyttiin pohtimaan kaapelitelevisioverkon ja internetin yhdistämistä. Ensimmäiset tilaajayhteydet perustuivat puhelinkaapeleihin, mutta niiden heikkoutena oli se, että joko puhelinta tai internetyhteyttä pystyi käyttämään, mutta ei molempia samanaikaisesti. Koaksiaalikaapelitekniikka tarjosi kehittyneemmän ratkaisun, koska sen laajakaistaominaisuuksien ansiosta televisio, puhelin ja internetyhteys toimivat samanaikaisesti liittymässä. HFC oli myös ensiarvoisen tärkeä mahdollistaja, jotta kaapelitelevisioverkkojen siirtymistä internetaikaan pystyi edes harkitsemaan. (Satkowiak 2015a, 46.)

Kaapelitelevisioverkkojen siirtymistä internetaikaan hidasti kaapelimodeemiteknologian puuttuminen. Ongelmaa lähdettiin ratkomaan luomalla standardi, johon kaapelitelevisioverkkojen internetyhteydet perustuisivat ja tällainen standardi valmistui vuonna 1997. Standardin pohjalta laitevalmistajat ryhtyivät kehittämään tarpeellista teknologiaa ja standardi mahdollisti laitevalmistajien tuotteiden toimimisen ristiin toistensa kanssa. (Satkowiak 2015a, 46–47.)

Standardin ensimmäisen version jälkeen siitä tehtiin uusia versioita ja teknologia jatkoi kehittymistään eteenpäin. Vuoteen 2015 mennessä Yhdysvalloissa oli 56 560 018 laajakaistatilaajaa sekä 26 932 889 puhelintilaajaa kaapelitelevisioverkoissa. Tavallisia television tilaajia tosin oli vähemmän kuin vuonna 1995. Perinteisen kaapelitelevision tilaajien määrä oli tippunut 52 403 705 kotitalouteen ja kaapelitelevisioverkkoja oli enää 4155. Kaapelitelevision markkina-asema oli myöskin enää vain 44.5 %. (Satkowiak 2015a, 65–66.)

2.3 Cablelabs

Voittoa tavoittelematon organisaatio Cablelabs perustettiin vuonna 1988 Yhdysvalloissa. Organisaation tavoitteena oli auttaa kaapelioperaattoreita tulevan kuitu- ja digitalisaatioajan kanssa, joka tulisi olemaan pian edessä. Cablelabs oli vahvasti mukana HFC:ssä ja ensimmäiset HFC-teknologiaan perustuvat kaupalliset kaapelitelevisioverkot näkivät päivänvalon 1992. Edellisenä vuonna HFC:ta oli testattu vain pilottiverkossa. Tulevina vuosina Cablelabs panosti vahvasti standardien luomiseen kaapelitelevisioalalle, jotka tulisivat vaikuttamaan kaikkiin maapallon kaapelioperaattoreihin. (Cablelabs 2018.)

Vuonna 1996 Cablelabs julkaisi MPEG LA-standardin, joka mahdollisti tehokkaan pakkauksen televisiokanaville ja täten lisäsi spektritehokuutta. Seuraavana vuonna julkaistiin Cablelabsin toimesta ensimmäinen DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification) -standardi. DOCSIS:sta muodostui alan johtava standardi ja teknologia, johon kaapelitelevisioverkkojen kaksisuuntainen tiedonsiirtoliikenne perustuu. (Cablelabs 2018.)

Ennen Cablabsin standardointia oli olemassa jo kaksisuuntaista tiedonsiirtoa kaapelitelevisioverkoissa Yhdysvalloissa 70- ja 80-luvun taitteessa, mutta kyseessä oli yhden kaapelioperaattorin sooloilua ja laitetoimittajiakin oli vain yksi. Tämän kaksisuuntaisen tiedonsiirron ylläpito kävi liian kalliiksi lopulta ja se jouduttiin lopettamaan 80-luvulla. (Tonn 2018.)

2.3.1 DOCSIS

DOCSIS-standardista on muodostunut tärkein ja käytännössä ainoa standardi mitä tulee koaksiaalikaapelin yli tapahtuvaan kaksisuuntaiseen tiedonsiirtoon. Ensimmäisen DOCSIS-standardin tiedonsiirtonopeudet olivat varsin maltilliset nykymittapuun kannalta. Myötäsuunnalla oli kaapelimodeemilla käytössä vain 6 MHz:n SC-QAM-kanava (Single Carrier Quadrature Amplitude Modulation), jossa modulaationa enintään 256-QAM. Paluusuunnalla taas oli enintään 3.2 MHz:n SC-QAM-kanavia, joissa käytössä suurimmillaan 16-QAM modulaatio. (Society for Broadband Professionals 2016.) Vuosituhannen alkupuolella standardista tehtiin myös Euroopan verkkoihin sopiva muunnelma, jossa myötäsuunnan kanavat käyttivät 8 MHz:n kaistaa ja paluusuunnan käytössä oli kaista välillä 5–65 MHz. Yhdysvalloissa tyypillisesti paluusuuntana käytetään 5–42 MHz:n kaistaa. (Sercu 2014.) Standardin 2.0-versio julkaistiin vuonna 2001 (Jump 2017, 4) ja näkyvimpänä uudistuksena oli paluusuunnan kanavien kaistanleveyden korotus 6.4 MHz:iin sekä paluusuunnan suurimman modulaation korotus 64-QAM:iin. Standardissa oli myös laitevalmistajille omavalintaisena 128-QAM tuki paluusuunnalle. (SCTE 2016.)

DOCSIS 3.0 julkaistiin vuonna 2006 (Jump 2017, 5) ja se tarjosi merkittävästi enemmän uudistuksia kuin aiempi hyppy 1.0:sta 2.0:aan. Spektrin käyttöä kasvatettiin 860 MHz:sta 1002 MHz:iin ja paluusuunnalle tuli valinnaisena vaihtoehtona 5–85 MHz:n kaista. Tiedonsiirtonopeudet kasvoivat myös merkittävästi, kun standardi esitteli channel bondingin eli kanavien niputuksen. Kanavien niputus mahdollisti sen, että päätelaitteet kykenivät käyttämään useita myötä- ja paluusuunnan SC-QAM-kanavia samaan aikaan. DOCSIS 3.0 ei myöskään sulkenut pois aiempia standardeja. Vaikka operaattorit päivittivät verkkonsa vastaamaan 3.0-standardia, toimivat aiempien standardien päätelaitteet verkoissa kuten aiemminkin. (SCTE 2016.)

2.3.2 DOCSIS 3.1

DOCSIS 3.1 on merkittävin nykyajan kaapelitekniikan standardi ja se ohjaa kaapelioperaattorien investointeja hyvin merkittävästi. Sen avulla kaapelioperaattorit pystyvät vastaamaan nykyaikakauden trendeihin. (Advanced Television 2018.)

Tällä hetkellä tietoliikennealla on menossa vaihe, jota kutsutaan giga-aikakaudeksi. Giga-aikakaudella tarkoitetaan sitä, että operaattorit siirtyvät tarjoamaan 1 Gbps tai suurempia laajakaistanopeuksia kuluttajille. (Westover 2018.) Cablelabsin vastaus giga-aikakaudelle oli vuonna 2013 julkaistu DOCSIS 3.1-standardi. Aiempi 3.0-standardi mahdollisti myös 1 Gbit/s yhteydet myötäsuunnalla, jos SC-QAM-kanavia niputti tarpeeksi yhteen. DOCSIS 3.1 on kuitenkin merkittävästi tehokkaampi tapa tuottaa moisen nopeusluokan nopeuksia yksittäisille kuluttajille. (SCTE 2016.)

Standardilla oli neljä keskeistä tavoitetta kaapelitelevisioverkoille: saavuttaa myötäsuunnalla 10+ Gbit/s sekä paluusuunnalla 1+ Gbit/s tiedonsiirtokapasiteetti, olla yhteensopiva aiempien standardien kanssa ja olla merkittävästi spektritehokkaampi kuin edeltäjänsä. Käytännössä standardin tuli mahdollistaa koaksiaalikaapelin kilpailukyky kuitua vastaan. (SCTE 2016.)

Merkittävänä näiden tavoitteiden edistäjänä ovat OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) ja OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), jotka korvaavat tai tulevat vanhojen 6:n sekä 8 MHz:n SC-QAM-kanavien rinnalle. Myös spektrin käytön kasvattaminen 1218 MHz:iin ja valinnaisena 1794 MHz:iin, uuden kehittyneemmän virheenkorjauksen LDPC (Low Density Parity Check) käyttöönotto, 4096-QAM modulaatioiden tuominen myötä- ja paluusuunnalle sekä valinnaisena 16384-QAM myötäsuunnalla ovat mahdollistamassa standardin tavoitteita. (SCTE 2016.)

Koska standardissa oli 1+ Gbit/s tavoitteet myös paluusuunnalle on paluusuunnan kaistaa pitänyt kasvattaa. Aiemmin paluusuunnan kaistat olivat Euroopassa ja Yhdysvalloissa hieman erilaiset, mutta 3.1:n johdosta molemmilla mantereilla paluusuunnan kaista toimii välillä 5–204 MHz. (SCTE 2016.) Luonnollinen seuraus tällä on se, että FM (Frequency Modulation)-kanavia tai kansankielellä radiokanavia ei voida enää välittää koaksiaaliverkoissa, koska FM-kanavien taajuusalue jää paluusuunnan alle. Joissakin maissa kuten esimerkiksi Suomessa operaattorit ovat tosin velvoitettuja kuljettamaan FM-kanavia koaksiaaliverkoissa (Liikenne- ja viestintäministeriö 2016, 2), joten Suomessa paluusuunnan kasvattaminen vastaamaan 1+ Gbit/s datamääriä ei ole vielä tätä päivää.

OFDM ja OFDMA ovat koaksiaaliverkossa uusia tiedonsiirtotekniikoita. OFDM on myötäsuunnalla käytetty tekniikka ja OFDMA taas paluusuunnalla käytetty tekniikka. OFDM muodostuu enintään 192 MHz:n ja vähintään 24 MHz:n levyisestä kanavasta myötäsuunnalla ja OFDMA taas muodostuu enintään 96 MHz:n ja vähintään 6,4 MHz levyi-

sestä kanavasta paluusuunnalla. Nämä kanavat ovat täynnä signaaleja, joita kutsutaan apukantoaalloiksi. (SCTE 2016.) Apukantoaaltojen vaihe-erot on määritelty niin, että viereiset kanavat eivät häiritse toisiaan, joten tällöin ne voivat olla vieri vieressä. Tästä syntyy eräs merkittävimmistä elementeistä mikä lisää spektritehokuutta. Vanhojen SC-QAM-kanavien välissä tulee olla guard band eli suojakaista, jonka ansiosta SC-QAM-kanavat eivät häiritse toisiaan. (Colabrese 2016a.) Tietysti OFDM- ja OFDMA-kanavien päissä on myös suojakaistat eli esimerkiksi 192 MHz:n kanavasta 190 MHz on täydellisessä käytössä, mutta spektritehokkuus on silti erittäin merkittävästi korkeampi kuin SC-QAM-kanavilla (SCTE 2016). Apukantoaallot ovat joko 25 kHz:n tai 50 kHz:n levyisiä ja ne ovat QAM-moduloituja. (Colabrese 2016b.) Kantoaalloilla on mahdollista olla erilaisia modulaatiota. Esimerkiksi, jos jossain kohtaa spektriä on häiriö, kantoaallot voivat siirtyä käyttämään huonompaa eli pienemmän signaali-kohinasuhteen vaativaa modulaatiota tässä kohtaa, kunnes häiriö on poistunut tai se on korjattu. (Jump 2017, 18).

OFDM:n ja OFDMA:n käytännön eroina on se, että OFDM:ssa vain kaapelioperaattorin laitteistot ovat signaalien lähettäjänä, kun taas OFDMA:ssa asiakkaiden päätelaitteet ovat signaalien lähettäjiä. Asiakkaiden päätelaitteiden tulee saada lupa lähettää tietoja kaapelioperaattorin laitteistolta. (Colabrese 2016b.) Tällä luvalla vältetään se, että kaapelimodeemit eivät lähetä signaalejaan niin, että ne häiritsisivät toisiaan. Tämä lupa sisältää tietyn ajan ja tietyn taajuusalueen, jolla päätelaitteella on lupa kommunikoida. (Martens 2014.) Kuitenkin, se että päätelaitteet lähettävät oikeaan aikaan signaalinsa on eräs suurimmista haasteista DOCSIS 3.1-verkoissa eikä itsestäänselvyys ja tätä on muun muassa Yayi Xiao tutkinut. Hän on tutkimustensa pohjalta esittänyt erilaisia ajoituksen synkronointialgoritmeja edistämään sitä, että päätelaitteet ja kaapelioperaattorin laitteisto toimisivat oikea-aikaisesti. (Xiao 2016.)

2.3.3 Full Duplex DOCSIS 3.1

Full Duplex DOCSIS 3.1 -standardi on käytännössä jatko-osa aiempaan DOCSIS 3.1-standardiin ja se saatiin valmiiksi loppuvuodesta 2017 (Hamzeh 2017). Full Duplex on vastaus tulevaisuuden vaatimuksiin, joita pilvipalvelut, pienten ja keskisuurten yritysten tarve symmetriselle tiedonsiirrolle, HD-videoiden lähettäminen, realiaikainen pelaaminen sekä virtuaalitodellisuus asettavat tietoverkoille. Käytännössä DOCSIS 3.1 Full Duplex tavoittelee 10 Gbit/s nopeuksia myötä- ja paluusuunnalla koaksiaalikaapelissa.

Jotta kaapelioperaattori voisi ottaa käyttöön Full Duplexin, vaatii tämä merkittäviä investointeja verkkoon, koska toimiakseen standardi tarvitsee N+0 arkkitehtuuria. N+0 tarkoittaa sitä, että vahvistimet poistuvat koaksiaaliverkoista ja noden sekä asiakkaan päätelaitteen välissä on vain passiivinen verkko. (Coomans ym. 2018.)

Full Duplex DOCSIS 3.1:ssä taajuuksien käyttö on täysin erilaista kuin aiemmin. Taajuuskaista 5–108 MHz on varattu paluusuunnan liikenteelle ja taajuuskaista 684 MHz:sta ylöspäin on varattu myötäsuunnan liikenteelle. Tämä mahdollistaa sen, että Full Duplex version on taaksepäin yhteensopiva. Taajuuskaista välillä 108–684 MHz on Full Duplex käytössä eli niin myötä- kuin paluusuunnan liikenne voi käyttää tätä taajuuskaistaa. (Colabrese 2018.) Full Duplexin käyttöönottamista hidastaa uudet haasteet joita edellä mainittu taajuuskaista 108–684 MHz tuo mukanaan. Signaalien kaikujen poistaminen (echo cancellation) tulee kriittisen tärkeäksi, jotta verkko toimii. Myös signaalien toisillensa aiheuttamat häiriöt ovat suurempi päänvaiva kuin aiemmin. Koska 108–684 MHz on molempiin suuntiin liikennöivä kaikille verkon käyttäjille jaettu kaista, on vaarana, että jonkun asiakkaan päätelaitteen lähettämä signaali häiritsee muiden päätelaitteiden vastaanottamaa signaalia, sillä näissä signaaleissa saattaa olla hyvin merkittäviä tasoeroja johtuen RF (radio frequency)-signaalin ominaisuuksista. (Coomans ym. 2018.) Se, että Full Duplex DOCSIS 3.1:sta tulee kaupallinen menestys, on vielä pitkän matkan päässä. Teknologia ei ole vielä valmista tällaiseen ja vain tulevaisuus kertoo varmasti missä vaiheessa ensimmäiset kaapelioperaattorit alkavat myydä kuluttajille Full Duplex -yhteyksiä. (Colabrese 2018.)

2.3.4 DOCSIS 4.0

DOCSIS 4.0-versiota ei ole virallisesti olemassa ja siitä on vain keskusteltu tai tehty alustavia tutkimuksia mitä se voisi olla. Eräs tämän standardin visioijista on yhdysvaltalaisen kaapelioperaattorin COX:n Jeff Finkelstein. Hänen hahmotelmissaan DOCSIS 4.0-standardin tiedonsiirtonopeudet voisivat olla vähintään 30 Gbit/s ja enintään jopa 60 Gbit/s niin myötä- kuin paluusuuntaan. Jotta tämä saavutettaisiin, verkon ylärajataajuutta nostettaisiin vähintään 3 GHz:iin tai jopa 6 GHz:iin asti. Finkelstein on myös tehnyt jo laskelmia hahmotelmiensa ympärille ja hänen mukaansa ne voisivat toimia käytännössä. Finkelstein on aikeissa aloittaa DOCSIS 4.0:n mainostamisen Cablelabsille sekä laitevalmistajille ja tavoitteena hänellä on, että DOCSIS 4.0 olisi oikea standardi ensi vuosikymmenen puolivälissä. (Breznick 2018.)

Huawei on myös antanut jo omaa panostaan siihen mitä DOCSIS 4.0 voisi olla. Huaweilla on maltillisemmat lähtökohdat standardille kuin Finkelsteinillä, sillä heidän tavoitteissaan ylärajataajuus olisi vain 3 GHz ja myötä- sekä paluusuunnan nopeus vain 25 Gbit/s. Tällä hetkellä Huawei on saanut testeissään onnistumaan myötäsuunnalla nopeuden 22,8 Gbit/s ja paluusuunnalla nopeuden 8,9 Gbit/s, kun käytössä on 3 GHz:n kaista. Huawein mukaan heidän teknologiansa olisi valmis 2020 ja tämän jälkeen teknologian askeleet riippuvat standardoinnista. (Sawall 2018.)

2.4 Teknologiat mahdollistamassa kaapelitelevisioverkkojen tulevaisuutta

Tiedonsiirtonopeuksien kasvaessa ja liikkuvien datamäärien lisääntyessä kaapelioperaattoreiden pitää investoida uusiin teknologioihin. Seuraavissa luvuissa on käyty läpi nykyisen kaksisuuntaisen liikenteen perustaa kaapelitelevisioverkoissa sekä laitteita ja teknologioita, jotka mahdollistavat tulevaisuuden kapasiteetin kaapelitelevisioverkoissa.

2.4.1 CMTS

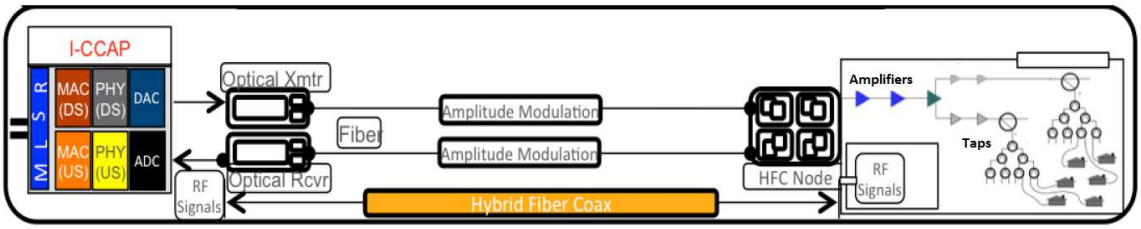
HFC-verkoissa kaksisuuntaisen tiedonsiirron eräänä tärkeimmistä mahdollistajista on CMTS (Cable Modem Termination System), joka sijaitsee kaapelioperaattorien päävahvistimella tai muualla sisätiloissa. CMTS yhdistää IP (Internet Protocol)-verkon ja kaapelitelevisioverkon toisiinsa, sillä pelkillä kaapelimodeemeilla ei ole kykyä kommunikoida Internet-palvelutarjoajien kanssa. (Techopedia 2018.)

CMTS-arkkitehtuureja on kahdenlaisia: I-CMTS ja M-CMTS. I-CMTS eli Integrated-CMTS on arkkitehtuuri, jossa CMTS on yksi kokonaisuus, joka tekee siitä halvemman, toimintavarmemman ja helpommin asennettavan kuin M-CMTS. M-CMTS:llä eli Modular-CMTS:llä on kuitenkin etunsa. (Techopedia 2018.) M-CMTS rakenteessa RF-muunnos tapahtuu erillisellä EdgeQAM-laitteella. Tämä mahdollistaa helpomman skaalautuvuuden mitä tulee myötäsuunnan QAM-kanavien määrään suhteessa paluusuunnan QAM-kanaviin. (Koski 2016, 5.)

2.4.2 CCAP

CCAP (Converged Cable Access Platform) on CMTS:stä seuraava askel eteenpäin. CCAP yhdistää CMTS:n toiminnallisuudet sekä ääni- ja videotoiminnot tavalla, joka mahdollistaa näiden olevan täysin IP-liikennettä ennen RF-muunnosta tai signaalin muunnosta optiseen linkkiin sopivaksi. CCAP säästää merkittävästi tilaa päävahvistimella verrattuna aiempiin ratkaisuihin ja tätä kautta vähentää jäähdytyksen tarvetta. (Koski 2016, 24.)

CCAP:sta on olemassa myös hajautetun verkkoarkkitehtuurin versioita, joissa osa CCAP:n toiminnallisuuksista siirretään lähemmäksi tilaajia. Käytännössä tämä tapahtuu asentamalla kuitulinkin päähän, ennen koaksiaaliverkon alkua, Remote PHY- tai Remote MACPHY-laite. (Koski 2016, 25.) Joissakin tilanteissa puhutaan I-CCAP ja DAA termeistä näiden asioiden yhteydessä. I-CCAP eli Integrated-CCAP tarkoittaa, että kaikki CCAP:n toiminnot ovat samassa paikassa ja DAA (Distributed Access Architecture) taas sitä, että CCAP:n toiminnot on hajautettu. (Al-Banna ym. 2017, 9–11.) Kuvassa 1 on esitetty I-CCAP-arkkitehtuurin lohkokaavio.



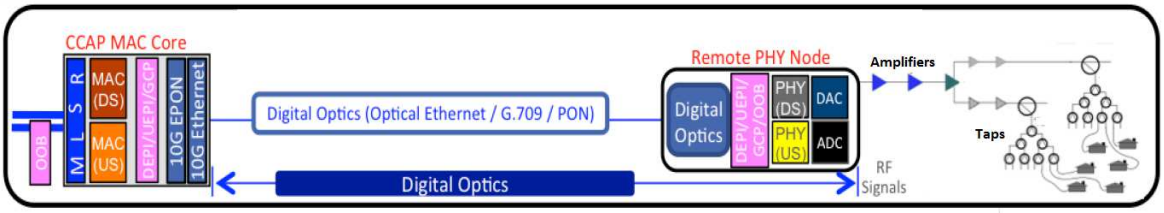
Kuva 1. I-CCAP-verkon lohkokaavio (Laufer ym. 2018, 7).

2.4.3 Remote PHY (R-PHY)

Remote PHY (Remote Physical Layer) teknologia jakaa CCAP:n kahteen osaan. Tässä päävahvistimella aiemmin sijainneet myötä- ja paluusuunnan PHY-kerrokset, sisältäen muun muassa virheenkorjauksen sekä demoduloinnin ja moduloinnin, tuodaan kuitulinkin päähän. (Al-Banna ym. 2017, 9–10.) Tämä lähestymistapa muuttaa analogisen kuitulinkin digitaaliseksi ja täten parantaa kaapelitelevisioverkkojen signaali-kohinasuhteita jopa 8 dB (Viavi 2017, 3), joka on merkittävä hyöty sen lisäksi, että tämä helpottaa haasteita, joita päävahvistimen tilatarpeet ja jäähdytys luovat. (Al-Banna ym. 2017, 10.)

Remote PHY on myös erittäin suositeltavaa, jos halutaan käyttää paluusuunnalla laajo- ja OFDMA-kanavia kuten esimerkiksi 96 MHz:ia. 96 MHz:n kanavan käytössä ongelmaksi analogisessa kuitulinkissä todennäköisesti muodostaa signaalien huippuarvojen suhde keskimääräiseen tehoon (peak-to-average power ratio), koska tämä voi aiheuttaa tilanteen, jossa paluusuunnan laserin tuottama signaali ”leikkaantuu” eli se on liian häiriöistä ilmaistavaksi. (Colabrese 2016b.) DOCSIS 3.1 Full Duplexin näkökulmasta Remote PHY on pakollinen, sillä ilman sitä, kyseistä standardia ei saada toimimaan (Colabrese 2017).

Koska Remote PHY:n käyttö vaatii kompleksisempaa arkkitehtuuria kuin perinteinen HFC, tulee kaapelioperaattoreiden tiedostaa uudet haasteet ja haasteiden ratkaisut, joita teknologia tuo. Teknologia mahdollistaa pidemmät kuitulinkit koaksiaaliverkon ja päävahvistimen välillä kuin HFC-teknologia, mutta tämä asettaa haasteita aikapalvelimelle ja sen ympärillä olevan teknologian pitää kehittyä muun verkon mukana. Myös verkkojen mittaamisen pitää muuttua verrattuna aiempaan siirryttäessä hajautettuun verkkoarkkitehtuurin. HFC-teknologiassa mittaaminen perustuu paljolti siihen, että analoginen signaali saapuu päävahvistimelle tai lähtee sieltä, jossa se moduloidaan tai demoduloidaan. Muun muassa Viavi on tutkinut mittaamisen haasteita ja rakentanut ratkaisuja mittaamiseen Remote PHY-verkkoihin. (VIAVI 2017, 5–11.) Suurten mittakaavojen Remote PHY asennuksissa on myös ehdotonta, että asentuminen on automatisoitu mahdollisimman pitkälle. Automatisointi tarkoittaa sitä, että päävahvistimen CCAP:n tulee löytää Remote PHY-laite automaattisesti ja saattaa se toimintakykyiseksi sen jälkeen, kun asentaja on asentanut laitteen kentällä. (Colabrese 2017.) Kuvassa 2 on esitetty Remote PHY-arkkitehtuurin lohkokaavio.



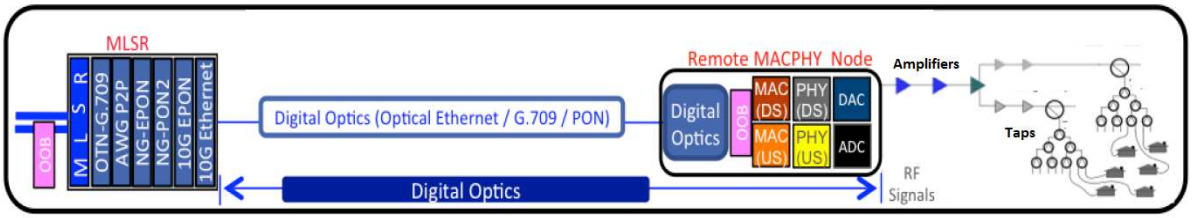
Kuva 2. Remote PHY-verkon lohkokaavio (Laufer ym. 2018, 7).

2.4.4 Remote MACPHY (R-MACPHY)

Remote MACPHY (Remote Media Access Control Physical Layer) vie hajautetun arkkitehtuurin vielä pidemmälle kuin Remote PHY. PHY-kerroksen lisäksi myös myötä- ja paluusuunnan MAC-kerrokset tuodaan kuitulinkin päähän pois päävahvistimelta eli käytännössä EdgeQAM ja CCAP/CMTS toiminallisuudet voidaan siirtää kuitulinkin päähän. (Al-Banna ym. 2017, 11.) Remote EdgeQAM ei kuitenkaan ole Remote MACPHY:ssä pakollinen vaan vaihtoehtona on myös olemassa Split EdgeQAM, jossa videosiirron MAC-toiminnot säilyvät päävahvistimella ja videosiirron PHY-toiminnot ovat kuitulinkin päässä (Koski 2016, 28). Joka tapauksessa Remote MACPHY vähentää entisestään tilan ja jäähdytyksen tarvetta päävahvistimella sekä helpottaa ongelmissa, joita kuitulinkin epälineaariset ilmiöt aiheuttavat. Arkkitehtuuri mahdollistaa sen, että päävahvistimella tarvitaan vain reititin tai kytkin ohjaamaan Remote MACPHY:n liikennettä. Sopivasti muunneltuna olemassa olevia CCAP-laitteita voidaan hyödyntää tässä arkkitehtuurissa käyttämällä niitä aggregointilaitteina. (Al-Banna ym. 2017, 11.)

Remote MACPHY on kompleksisempi ratkaisu kuin pelkkä Remote PHY, ja markkinoilla on tällä hetkellä vähemmän valmistajia Remote MACPHY:llä kuin Remote PHY:llä. Kompleksisuudesta ja vähäisestä valmistajamäärästä johtuen ylläpito, päivitykset ja mahdolliset laitevarkaudet ovat suurempia ongelmia kuin aiemmin tai muissa ratkaisuissa. (Viavi 2017, 4.)

Remote PHY ja Remote MACPHY asettavat kaapelitelevisioverkot alttiiksi myös uudenlaisille turvallisuusuhille. Nämä laitteet asennetaan käytännössä ulos tolppiin tai katujakokaappeihin, joten pääsy laitteiden luo on helppoa. Teoriatasolla hyökkääjä voi käyttää näitä laitteita verkon luvattomaan käyttöön tai hyökkäystarkoituksiin asiakkaita ja operaattoria vastaan. Molemmissa versioissa on sisäänrakennettuja suojausmekanismeja, joiden tulisi estää kaikki väärinkäytökset. (Koski 2016, 27–29.) Kuvassa 3 on esitetty Remote MACPHY-arkkitehtuurin lohkokaavio.



Kuva 3. Remote MACPHY-verkon lohkokaavio (Laufer ym. 2018, 8).

2.4.5 Virtualisointi

Virtualisointi on jo vanha ajatus sekä toimintapa tietotekniikasta. Tietotekniikassa sillä tarkoitetaan sitä, että fyysiset resurssit kuten esimerkiksi palvelimet ovat piilossa niitä käyttäviltä järjestelmiltä, käyttäjiltä sekä sovelluksilta. Tällöin yksi fyysinen resurssi voi palvella useita loogisia resursseja tai päinvastoin Yksi looginen resurssi voi käyttää useita fyysisiä resursseja. (Virtualisointi 2018.)

Kaapelitelevisioympäristössä virtualisointi on uusi asia ja se edustaa päävahvistimien tulevaisuutta. CMTS ja CCAP edustavat virtualisoinnin vastakohtaa. CMTS/CCAP-laitteet ovat omia kokonaisuuksiaan, jotka tuottavat merkittävästi lämpöä ja sisältävät paljon mahdollisia vikaantumispaikkoja. Uusien standardien tai tilaajavaatimusten ilmestyessä on myös mahdollista, että nämä CMTS/CCAP-laitteet tulee uusia ja vanhoista tulee käyttökelvottomia. Laitteiden ohjelmistopäivitykset voivat myös tarkoittaa sitä, että koko laite tulee päivityksen ajaksi ottaa pois käytöstä ja mahdollisissa ongelmatilanteissa päivityksen jälkeen ainoa korjauskeino on palauttaa laite vanhempaan ohjelmistoversioon. CMTS- ja CCAP-laitteiden ohjelmistot sekä laitteisto ovat myös sitoutuneet merkittävällä tavalla toisiinsa. Pienetkin muutokset CMTS/CCAP-laitteistoissa voivat tarkoittaa merkittäviä muutoksia ohjelmistossa. Virtualisointi pyrkii ratkaisemaan kaikki edellä mainitut ongelmat. (Volpe 2017.)

Virtualisoinnin käyttöönotto vaatii teknologiaa, jossa PHY-taso on erotettu omaksi kokonaisuudekseen. Käytännössä tämä tarkoittaa edellä kuvattua Remote PHY-teknologiaa. Tosin PHY-taso voi olla myös oma kokonaisuutensa päävahvistimella, mutta tällöin kuitulinkit ovat analogisia ja tämä syö merkittävällä tavalla hyötyä mitä hajautetulla verkkoarkkitehtuurilla yritetään saavuttaa. PHY-tason erottaminen omaksi kokonaisuudekseen ei ole kuitenkaan ollut ainoa este menneisyydessä virtualisoinnille. Aiemmin mikroprosessorien ja palvelimien suorituskyvyt sekä hinnat eivät ole olleet tarpeeksi hyviä, jotta virtualisointia olisi voinut ajatella. Myöskään aiemmin virtualisointiin ei ole ollut standardinmukaista lähestymistapaa alalla. (Matatyaou 2017, 5.)

Virtualisoinnin lähtökohtana on se, että laitteisto ja ohjelmisto ovat omia kokonaisuuksiaan eikä sidoksissa toisiinsa kuten CMTS/CCAP-ratkaisuissa. Tämä edesauttaa kapasiteetin hallintaa, käyttöönottoa sekä skaalautuvuutta. Käytännössä laitteisto, jota käytetään virtualisointiratkaisussa, on normaalia palvelinrautaa ja ohjelmisto taas erikseen koodattua koodia, joka voi pyöriä millä tahansa nykyaikaisella palvelimella. (Mata-

tyaou 2017, 3–4.) Tämä palvelinrauta vaatii luonnollisesti myös rinnalleen lähettimet ja vastaanottimet, jotta elektronit ja fotonit kulkevat tilaajien ja päävahvistimien välillä (Volpe 2017). Virtualisoinnin heikkoutena voi olla se, että palvelimet vievät enemmän fyysistä tilaa kuin CMTS/CCAP-laite, koska palvelimia ei ole optimoitu kaapelitelevisio-verkkojen vaatimuksia varten (Al-Banna ym. 2017, 10–11).

3 KUITUVERKKOJEN KEHITYKSEN KULKU

Opinnäytetyön tavoitteina oli selvittää palveluliiketoiminnan vahvuuksia kuitupohjaisten liityntäverkkojen teknologisessa kehityksessä sekä tunnistaa kuituverkkoihin liittyviä tärkeitä standardeja. Tavoitteina oli myös tutkia kuituteknologioiden kehityssuuntia ja niiden erityispiirteitä.

3.1 Kuitu

Kuitukaapeli on koaksiaalikaapeliin nähden parempi siirtotie. Kuidun siirtokapasiteetti on suurempi, kuitu on kevyempää kuin kuparista tehdyt kaapelit sekä se myös vaimentaa vähemmän. Kuitu ei myöskään luo ympärilleen sähkömagneettista säteilyä, koska siinä ei kulje elektroneja. Tästä syystä se ei myöskään ole altis ulkoisille häiriölähteille. (Parsons 2008, 370.)

3.2 Historia

Valon kulkeminen lasin läpi on ideana hyvin vanha. Ainakin jo 1840-luvulla tehtiin testejä, joissa valoa ohjattiin veden ja tämän jälkeen lasisauvojen läpi. 1880 taas Thomas Wheeler haki patenttia idealle, jossa rakennus voitiin valaista yhdellä lampulla ja lasiputkilla. Käytännössä idea toimi niin, että rakennuksen kellarissa oli valonlähde ja sieltä lähti lasiputkia huoneistoihin, jotka kuljettivat valonlähteen valoa. 1920-luvulla saksalaiset taas havaitsivat, että ohuet langat lasia, jotka olivat kimpussa, olivat joustavia ja pystyivät kuljettamaan valoa. 1950-luvulla yhdysvaltalaiset jalostivat saksalaisten ideaa eteenpäin mahdollistamalla satojen lasilankojen kimputtamisen sekä pinnoittamalla nämä, jotta lankojen tehokkuus paranisi. Aina 1960-luvulle asti lasikuidun käyttösovellukset rajoittuivat lähinnä lääketieteellisiin tutkimuslaitteisiin. (Parsons 2008, 370.)

1960-luvun alussa kehitettiin ensimmäiset laserit, jotka ovat välttämättömyys, jotta kuitua voidaan käyttää tiedonsiirrossa. Tavallinen hehkulamppu tuottaa suuren määrän erilaisia valon taajuuksia tai toisin sanoen värejä, joista muodostuu valkoinen valo. Hehkulampuissa valo on myös epäkoherenttia. Laser taas tuottaa hyvin kapealla kaistalla koherenttia valoa, jota voidaan moduloida. (Parsons 2008, 371)

Laserien kehittyminen yhä paremmiksi ja halvemmiksi jatkui koko 1960-luvun. Laserien kehittymisen rinnalla kehittyivät myös kuidun tuotantotavat, joka oli tarpeellista, jotta kuidusta kyettiin valmistamaan kyllin puhdasta tiedonsiirtosovelluksiin. 1975 amerikkalainen puhelinyhtiö AT&T rakennutti ensimmäisen testikuituverkon Atlantassa Yhdysvalloissa, joka kytkettiin päälle tammikuussa 1976. Verkkoa seurattiin useita kuukausia, mutta AT&T ei löytänyt siitä mitään ongelmia. Heinäkuussa 1976 asennettiin testimielessä ensimmäinen 243 m pitkä kuitukaapeli Manhattanilla, joka kuljetti HBO:n ohjelmaa. (Parsons 2008, 371.)

TPT Cable TV:n johtaja Bill Bresnan väitti vuonna 1976, että kuitu voi tehdä kaiken saman kuin koaksiaalikaapeli ja vielä halvemmalla (Parsons 2008, 371). Testit osoittivat, että Bresnan oli aikaansa edellä, vaikkakin halpuudessa hän oli väärässä. Narassa Japanissa rakennettiin 1977 ensimmäinen kuituverkko, johon oli kytketty asiakkaita. Seuraavina vuosina asiakastestit jatkuivat Englannissa, Saksassa, Ranskassa, Yhdysvalloissa ja Kanadassa. Teknisesti testit olivat menestys, mutta verkkojen rakennuskustannukset olivat hyvin huomattavat. Optiset komponentit olivat uutta teknologiaa ja niiden volyymit olivat hyvin pienet, joten niistä sai maksaa huomattavasti enemmän kuin koaksiaaliverkon komponenteista. Perinteisten teknologioiden asennuskustannukset asiakasta kohden olivat noin $1000, kun taas kuituverkon kustannukset asiakasta kohden olivat jopa $100 000. Operaattoreiden kiinnostusta kuituun laski myös se, että kupariverkkojen rakentaminen oli ollut kallista asiakkaille asti ja niitä ei haluttu korvata uudella teknologialla. Kupariverkkojen suorituskyky riitti myös asiakkaiden tarpeisiin. Kuituverkkoa ei siis lähdetty rakentamaan vielä vuosikymmeniin suoraan asiakkailla asti vaan sen sijaan runkoverkkoja alettiin päivittää kuituun, koska runkoverkon kustannukset jakautuivat suurelle määrälle asiakkaita. (van der Linden 2018, 10.)

Eräs kuidun edelläkävijöistä oli British Telecom, joka julisti vuonna 1981 asentavansa 1980-luvun aikana 100 000 km kuitukaapeleita verkkoonsa, joilla se korvaisi vanhoja kuparisia runkolinjojaan. 1980-luvun alussa Iso-Britanniassa käytiin myös keskustelua kaapelitelevisioverkkojen rakentamisesta. Margaret Thatcherin johtama hallinto ajoi eteenpäin lakipakettia, jossa British Telecomin monopoli tiedonsiirrossa olisi purettu ja kaapelitelevisioverkkoja rakentaisivat yksityiset toimijat. Lakipaketti herätti merkittävää vastusta tietyissä piireissä, sillä toteutuessaan se tarkoitti sitä, että verkot rakennettaisiin pohjautumaan koaksiaalikaapeliin, koska kuitu ei ollut taloudellisessa mielessä järkevää. Lakipaketin vastustajien mielestä verkot pitäisi rakentaa alun alkaen pohjautumaan täysin kuituun, vaikka hinta olisi kalliimpi, koska se mahdollistaisi verkot, jotka

vastaavat tulevaisuuden vaatimuksiin. Myöskin, koska British Telecomilla oli kuituymmärrystä, olisi sen kannattanut rakentaa verkot lakipaketin vastustajien mielestä. (Stansell ym. 1982, 29–32.) Vastustajien mielipiteet eivät kuitenkaan vaikuttaneet lopputulokseen ja Thatcherin lakipaketti meni läpi. British Telecomin monopoli purettiin sekä yksityiset toimijat rakensivat Iso-Britannian kaapelitelevisioverkot, pohjautuen koaksiaalikaapeliin. (Virgin Media Jobs 2014.)

Koaksiaalikaapelille tapahtui monta innovaatiota 1980-luvun jälkeen ja vielä tänäkin päivänä näistä innovaatiosta johtuen koaksiaalikaapeli pystyy pärjäämään kuituverkoille tiedonsiirrossa (Jump 2017, 4–6). Ajan kuluessa kuitenkin kuituverkkojen rakentamisesta asiakkaille asti on tullut järkevämpää taloudellisesti ja nykypäivänä tällaiset verkot ovat merkittävässä asemassa kilpaileviin teknologioihin nähden. (Montagne 2019a, 14.) Olemassa olevien koaksiaaliverkkojen korvaamista kuidulla tulee miettiä harkiten, koska kaivuu muodostaa merkittävimmän osan verkon rakentamisen kustannuksista (Järvinen 2016, 8).

3.3 Lyhenteet ja verkon komponentit

Puhuttaessa kuituverkoista törmää helposti lyhenteisiin Ftth, Fttc, Fttn jne. Ensimmäiset kolme kirjainta tulevat sanoista Fiber to the ja neljäs kirjain määrittelee paikan, johon kuitu loppuu. Käytännössä tämä viimeinen kirjain voi olla mikä vain, mutta yleisesti on käytössä h eli home, b eli building ja n eli node. Joskus voidaan myös kuulla puhuttavan Fttx-lyhenteestä ja tätä käytetään, kun puhutaan yleisesti kuituverkoista ja kuituverkon loppupiste on asian kannalta toissijaista. X kuvastaa siis tuntematonta. (Järvinen 2016, 24.)

Kuituverkko muodostuu suppeasta määrästä erilaisia komponentteja, jos keskitytään päävahvistimen ja tilaajan väliseen verkko-osuuteen. Aktiivisina eli sähkö kuluttavina laitteita tässä osuudessa ovat lähettimet, vastaanottimet, kytkimet ja optiset vahvistimet (Nestor Cables Oy, 91–95). Passiivisina laitteina taas ovat, kituliittimet, päätepaneelit, kytkentäkaapelit, vaimentimet, isolaattorit, jaottimet, haaroittimet, ja suodattimet. Optisia komponentteja valittaessa tulee huomioida se, että ne tukevat haluttua aallonpituusaletta. (Nestor Cables Oy, 48–67.)

3.4 Liityntäverkkojen arkkitehtuurit

Kuidulla toteutetut liityntäverkot voidaan jakaa karkeasti kolmeen luokkaan. Point-to-Point (PtP), Active Optical Network (AON) ja Passive Optical Network (PON). Point-to-Point arkkitehtuurissa jokainen käyttäjä on kytketty itsenäisesti verkkoon. Active Optical Network arkkitehtuurissa syöttävä kuitu on jaettu käyttäjien kesken ja toimiakseen ratkaisu vaatii aktiivista eli sähköä kuluttavaa laitetta. Passive Optical Network arkkitehtuuri on muuten sama kuin edellä kerrottu AON, mutta siinä ei ole ollenkaan aktiivisia laitteita vaan kaikki ovat sähköä kuluttamattomia eli passiivisia. (van der Linden 2018, 11) Seuraavissa luvuissa on käyty läpi yksityiskohtaisemmin näitä arkkitehtuureja.

3.4.1 Point-to-Point

Point-to-Point eli täysi tähti -verkot ovat arkkitehtuurimielessä yksinkertaisimpia kaikista. Jokaiselle tilaajalle kulkee oma kuitunsa liityntäsolmusta ja kuitu on kytketty tilaajan tiloissa tämän optiseen vastaanottimeen. Tyypillisesti paluusuunta ja myötäsuunta käyttävät omia aallonpituuksia yhdessä kuidussa, mutta tämä ratkaisu voidaan myös toteuttaa kahdella kuidulla, jolloin myötä- ja paluusuunnalla on omat kuitunsa. (van der Linden 2018, 11–12.)

Arkkitehtuurin suurin hyöty tulee kytkentöjen itsenäisyydestä. Jos yhdelle tilaajalle tehdään muutoksia tai irtikytkentä, ei se vaikuta muihin tilaajiin. Päivitykset voidaan myös tehdä käyttäjäkohtaisesti mikä on suuri etu, kun esimerkiksi verkon teknologiaa päivitetään uuteen. Turvallisuusnäkökulmasta Point-to-Point on myös parempi kuin muut vaihtoehdot, koska verkon käyttäjät eivät voi salakuunnella tosiaan. (van der Linden 2018, 12.)

Arkkitehtuurin tarjoamat laajakaistanopeudet ovat teoriatasolla Point-to-Point ratkaisussa vakiot, koska tilaajien välistä kuitukaistaa ei jaeta liityntäverkossa. Käytännöntasolla tämä ei kuitenkaan ole näin, koska ennen päävahvistinta oleva dataverkko saattaa aiheuttaa rajoituksia riippuen siitä, miten palveluntarjoaja on sen rakentanut. (van der Linden 2018, 12.)

Arkkitehtuurin suurin heikkous piilee suuressa määrässä kuituja, joita se tarvitsee. Kuitujen asentaminen ja kaivaminen ovat kallista sekä jokaisella kuidulla tarvitsee olla oma kytkentäpiste palveluntarjoajan tiloissa. Tilatarve sekä tilojen jäähdytystarve saattavat

nousta merkittäväksikin, jos Point-to-Point-verkko on hyvin laaja. Suuri määrä kuituja tarkoittaa myös sitä, että kuituja kulkee hyvin paljon samoja reittejä. Jos jostain syystä tapahtuu vahinko ja joku kuitureitti esimerkiksi kaivetaan poikki, tarkoittaa tämä hyvin hankalaa ja kallista viankorjausta. Suuri määrä kuituja pitää tunnistaa ja hitsata oikein yhteen ja tämä voi kuluttaa merkittäviä määriä aikaa. (van der Linden 2018, 12.)

3.4.2 Active Optical Network

Active Optical Network -ratkaisussa käytetään vähemmän kuituja kuin Point-to-Point-ratkaisussa. Päävahvistimelta tai liityntäsolmulta lähtee ratkaisussa yksi runkokuitu, joka kytkeytyy tilaajien lähellä aktiiviseen laitteeseen esimerkiksi kytkimeen. Kytkimeen taas on kytketty tietty määrä lyhyitä tilaajakuituja, jotka jatkavat matkaansa asiakkaiden huoneistoihin ja kiinnittyvät niissä optiseen vastaanottimeen. (van der Linden 2018, 12.)

Kustannusnäkökulmasta ratkaisu on merkittävästi halvempi kuin edellä mainittu Point-to-Point, koska kuitua tarvitaan vähemmän. Luonnollisesti ratkaisulla ei saavuteta Point-to-Point-verkon hyötyjä ja aktiivinen laite tarvitsee sopivan asennuspaikan sekä sähköä. (van der Linden 2018, 12.)

3.4.3 Passive Optical Network

Passive Optical Network on käytännössä samanlainen verkkoarkkitehtuuri kuin edellä puhuttu Active Optical Network, mutta nimensä mukaisesti se ei sisällä yhtään sähköä kuluttavaa laitetta päävahvistimella tai liityntäsolmussa sijaitsevan OLT:n (Optical Line Termination) ja tilaajan välillä. Toimiakseen arkkitehtuuri tarvitsee protokollan joka jakaa liikennettä asiakkaiden ja OLT:n välillä. Tämä protokolla voi perustua aikajakoon, aallonpituusjakoon tai molempiin näistä. (van der Linden 2018, 12–13.)

Aikajaossa on kyse siitä, että asiakkaan päätelaitteella on tietyt ajat jolloin se voi vastaanottaa ja lähettää. Koska verkko on passiivinen saavat kaikki tilaajat aina OLT:n lähettämän signaalin, mutta asiakkaan päätelaitteen tulee tietää, kelle se on tarkoitettu. Päätelaite voi myös lähettää paluusuunnalle signaalia vain tiettyinä ajan hetkinä. Tähän on syynä se, että jos kaikki laitteet verkossa yrittäisivät lähettää samaan aikaan, ei OLT

saisi selvää kenenkään lähettämästä signaalista, koska ne sekoittuisivat toisiinsa. (van der Linden 2018, 13.)

Aallonpituusjaossa asiakkailla on omat aallonpituutensa, joita heidän päätelaitteet käyttävät. Tätä voidaan kutsua myös virtuaaliseksi PtP-verkoksi, koska tässä asiakkaille syntyy teoriassa omat kanavansa, joihin toiset asiakkaat eivät vaikuta. Tietoturvamielessä tämä ei ole verrattavissa PtP-verkkoon, koska toiset tilaajat vastaanottavat toisten tilaajien aallonpituuksia. (van der Linden 2018, 15.)

3.5 Standardit

Kuituverkkojen tiedonsiirtoon on kehitelty useita erilaisia standardeja toisin kuin kaapeliverkoissa, joissa DOCSIS oli hallitseva ja käytännössä ainoa. Standardit syntyivät luonnollisesti tarpeesta saada eri valmistajien tuotteita kustannustehokkaasti kuituverkkoihin säilyttäen kuitenkin tuotteiden yhteensopivuuden. (van der Linden 2018, 17.) Seuraavissa luvuissa on käyty suppeasti läpi näitä erilaisia kuitustandardeja, joita voidaan käyttää erilaisissa tilaajaverkkoarkkitehtuureissa. Kahdessa ensimmäisessä luvussa mainitut standardit soveltuvat passiivisiin verkkoihin, kun taas viimeisessä luvussa mainitut standardit soveltuvat Point-to-Point- ja AON-verkkoihin.

3.5.1 PON

Vuodesta 1995 lähtien Full Service Access Network (FSAN) oli mainostanut Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network (ATM PON)-teknologiaa. Vuonna 1998 International Telecommunication Unionin tiedonsiirron standardointiin keskittynyt divisioona ITU-T teki kyseisestä teknologiasta virallisen standardin G.983 käyttäen uutta nimeä Broadband PON (B-PON). (van der Linden 2018, 17.)

B-PON-standardi pystyi teoriatasolla myötäsuunnalla 1244 Mbps nopeuteen ja paluusuunnalla 622 Mbps nopeuteen, mutta käytännöntasolla nopeudet jäivät pienemmiksi. Siksi yleensä B-PON-standardin maksinopeuksista käytetään pienempiä arvoja. Standardin seuraava versio G-PON G.984 julkaistiin 2003 ja se mahdollisti tilaajaverkkojen siirtymisen giga-aikakaudelle. Paluusuunnan tyypillinen kapasiteetti standardia toteuttavissa verkoissa oli 1.244 Gbps ja myötäsuunnan 2.488 Gbps. (van der Linden 2018, 17–19.) Taulukkoon 1 on kerätty tarkemmin FSAN:in ja ITU-T:n kehittämien PON-

standardien tiedot eri versioista. Standardeihin on julkaistu erilaisia päivityksiä alkuperäisen julkaisun jälkeen, joten standardit ovat muuttuneet ajansaatossa jonkun verran. Esimerkiksi G-PON oli alun perin vain 20 km yltävä standardi, mutta 2010 siihen julkaistiin lisäosa G.984.7, joka toi standardiin 60 km etäisyydet. Myöskin XGS-PON on päivitys XG-PON:iin. (International Telecommunication Union 2019.)

Taulukko 1. ITU-T:n kuitustandardien ominaisuuksia (van der Linden 2018, 18).

	B-PON (G.983)	G-PON (G.984)	XG-PON1 (G.987)	NG-PON2 (G.989)	XGS-PON (G.9807)
Standardin ensimmäinen versio julkaistu	1998	2003	2010	2015	2016
Maksimietäisyys OLT:n ja ONU:n (km)	20	60	60	60	60
Maksimietäisyys kahden ONU:n välillä (km)	20	20 tai 40	20 tai 40	20 tai 40	20 tai 40
Kykenee vähintään jakoon	32	64	64	64	64
Myötäsuunta					
Kapsiteetti (Gbps)	0.622	2.488	9.953	4x9.953	9.953
Aallonpituusalue (nm)	1480-1580	1480-1500	1575-1580	1596-1603	1575-1580
Paluusuunta					
Kapasiteetti (Gbps)	0.155	1.244	2.488	9.953	9.953
Aallonpituusalue (nm)	1260-1360	1260-1360 (normaali) 1290-1360 (pelkistetty) 1300-1320 (kapea)	1260-1280	1524-1544 (normaali) 1528-1540 (pelkistetty) 1532-1540 (kapea)	1260-1280

Standardeissa on tiettyjä minimivaatimuksia, kuten se miten moneen osaan lähtevää signaalia voidaan jakaa. Standardeja voidaan skaalata myös eri suuntiin tiettyjen ehtojen vallitessa. Esimerkiksi G-PON-standardin jakoa voidaan kasvattaa 128 asti (Calix 2019) ja XG-PON-standardin jakoa 256 asti tietyissä olosuhteissa (Huawei 2019, 8).

Standardisarjan uusin itsenäinen versio on G.989 eli NG-PON2 (ITU 2019). Standardissa on uutena asiana useiden aallonpituuksien käyttö samanaikaisesti siirtämään tietoa. Paluusuunnalla ja myötäsuunnalla voidaan käyttää neljää eri aallonpituutta joka tarkoittaa symmetrisiä 40 Gbps yhteyksiä. Tulevaisuudessa standardin pitäisi pystyä toteuttamaan 80 Gbps symmetrisiä nopeuksia, mutta tämä vaatii vielä kaupallisen teknologian kehitystä sekä kuluttajien tarvetta. (Broadband Forum 2018, 6.)

Vuonna 2016 FSAN määritteli, että seuraavan sukupolven PON-standardi tulisi julkaista 2020-luvulla ja sitä kutsuttiin tällöin Future Optical Access Systemiksi (FSAN 2016). Alkuvuodesta 2018 ITU-T julkaisi suosituksia ja tavoitteita koskien tätä uutta standardia. Tavoitteissa on kasvattaa suorituskykyä muun muassa lisäämällä aallonpituuksien kapasiteettia. Jo olemassa olevissa standardeissa yhden aallonpituuden kapasiteetti on vajaat 10 Gbps. Standardi kulkee tällä hetkellä nimellä G.hsp.X, jossa hsp viittaa nopeuksiin (higher speed PON). (Luo 2018, 9.)

3.5.2 EPON

Marraskuussa 2000 Institute of Electrical and Electronics Engineersin eli IEEE:n työryhmä 802.3 aloitti tehtävän, jonka tavoitteena oli luoda standardi ethernet-tekniikan käytöstä tilaajaverkoissa. 2004 IEEE julkaisi standardin 802.3ah, joka täytti alkuperäiset tavoitteet ja sisälsi muun muassa standardoinnin kuidussa tapahtuvalla siirrolle, joka tultaisiin tuntemaan lyhenteellä EPON. (Effenberger ym. 2007.)

EPON on 1.25 Gbps:n symmetrisiin nopeuksiin kykenevä tekniikka, josta käytetään myös nimeä G-EPON. EPON:in seuraaja oli standardi 802.3av, joka ylsi 10 Gbps:n symmetrisiin nopeuksiin. Standardissa oli myös mahdollisuus käyttää paluusuunnalla vain 1.25 Gbps:n nopeutta. Taulukossa 2 on listattuna tarkemmin näiden kahden standardin yksityiskohtia. Standardeja on mahdollisuus skaalata eli, jos esimerkiksi etäisyyksiä lasketaan, voidaan kasvattaa signaalin jakamisen määrää. (Wang ym. 2011.)

Taulukko 2. IEEE:n kuitustandardien ominaisuuksia (van der Linden 2018, 18).

	G-EPON (802.3ah)	10G-EPON (802.3av)
Standardin ensimmäinen versio julkaistu	2004	2009
Maksimietäisyys (km)	20	20
Kykenee vähintään jakoon	16	16
Myötäsuunta		
Kapsiteetti (Gbps)	1.25	10.31
Aallonpituusalue (nm)	1480-1500	1575-1580
Paluusuunta		
Kapasiteetti (Gbps)	1.25	10.31
Aallonpituusalue (nm)	1260-1360 (normaali) 1290-1330 (pelkistetty) 1300-1320 (kapea)	1260-1280

802.3-standardiperheeseen ollaan rakentamassa uutta 50G-EPON-standardia 802.3ca, jonka tulisi yltää 50 Gbps:n symmetrisiin nopeuksiin. Alun perin standardoinnin alussa oli tavoitteena 100 Gbps:n symmetriset yhteydet, mutta tästä luovuttiin teknisten haasteiden ja tarpeettomuuden takia. Kuluttajat eivät tarvitse vielä pitkään aikaan 100 Gbps:n yhteyksiä koteihinsa. Standardin oletetaan valmistuvan vuoden 2020 alkupuoliskolla. (Knittle 2018, 5–8.)

3.5.3 Point-to-Point–sovelluksissa käytettävät Ethernet-tekniikat

IEEE:n julkaisemiin 802.3ah ja 802.3av on myös määritelty Ethernetin käyttö Point-to-Point-ratkaisuissa optisissa verkoissa. ITU-T on myös luonut Ethernet-tekniikkaan pe-

rustuvia standardeja, joita voidaan hyödyntää tilaajaverkoissa. Näitä ovat G.985 joka yltää 0,1 Gbps nopeuksiin ja G.986 joka taas yltää 1 Gbps nopeuksiin. IEEE on panostanut standardoinnissaan enemmän kustannustehokkuuteen kuin ITU-T. (Nestor Cables Oy, 79.) Taulukossa 3 on eritelty tarkemmin näiden standardien ominaisuuksia.

Taulukko 3. Point-to-Point Ethernet-standardien ominaisuuksia (Nestor Cables Oy, 78–80).

	G.985	G.986	802.3ah	802.3av
Standardin ensimmäinen versio julkaistu	2003	2010	2004	2009
Maksimietäisyys (km)	10	30	10	10
Myötäsuunta				
Kapsiteetti (Gbps)	0.1	1	0.1	1
Aallonpituusalue (nm)	1480-1580	1480-1580	1550	1490
Paluusuunta				
Kapasiteetti (Gbps)	0.1	1	0.1	1
Aallonpituusalue (nm)	1260-1360	1260-1360	1310	1310

3.5.4 Radio Frequencies over Glass (RFoG)

RFoG-standardi perustuu Society of Cable Telecommunications Engineersin julkaisemaan standardiin SCTE 174 2010 (SCTE 2018). Standardi mahdollistaa Ftth-ratkaisut hyödyntäen DOCSIS-standardin ratkaisuja. RFoG-standardiin pohjautuvissa verkoissa päävahvistimen ja asiakkaan kaapelimodeemin välillä on kuitulinkki, mutta muuten asiat ovat samalla lailla kuin normaalissa kaksisuuntaisessa kaapelitelevisioverkossa. Tämän ansiosta palveluntarjoajan ei tarvitse vaihtaa CMTS-laitteita, provisiointityökaluja, päätelaitteita tai videosignaalin luomiseen tarkoitettuja laitteita. Kotitalouksissa voidaan myös hyödyntää olemassa olevaa koaksiaaliverkkoa tiedonsiirrossa. Myöskään käytännössä uutta tietotaitoa ei vaadita työntekijöiltä, jotka ovat tottuneet operoimaan jo olemassa olevien kaapelitelevisioverkkojen kanssa. (McWilliams 2014, 4–7.)

RFoG-verkon hyödyt eivät jää vain jo edellä mainittuihin. Standardin mukaan rakennetuissa verkoissa paluusuunnan signaalikohinasuhteeseen vaikuttuvat häiriöt tulevat enää vain päätelaitteista tai asiakkaiden verkoista, koska aktiiviset kupariverkonlaitteet sekä kupariverkko päävahvistimen ja asiakkaiden välillä on poissa. Tämä parantaa signaalikohinasuhdetta paluusuunnalla ja vähentää vikaantumispaikkojen määrää. Standardi on myös avoin, joka tarkoittaa sitä, että kaikkien valmistajien RFoG-ratkaisut toimivat toistensa kanssa ristiin. Enimmäisetäisyys päävahvistimen asiakkaan välillä on noin 20 km, ellei verkkoon tuoda optisia vahvistimia tai toistimia. (McWilliams 2014, 8–15.)

Riippuen palveluntarjoajan strategiasta RFoG voi olla erinomainen välivaihe ennen seuraavaa ja parempaa teknologista ratkaisua. Standardin mukaan rakennetuissa verkoissa on jo kuitu rakennettu päävahvistimen asiakkaan väliin, joten tätä verkkoa voidaan käyttää muihinkin standardeihin pelkillä laitevaihdoilla käyttäen olemassa olevia kuitukaapeleita. (McWilliams 2014, 4.)

3.5.5 Cablelabs

Cablelabs on tehnyt omia tutkimuksia kuitustandardeista liittyen tilaajaverkkoihin. Heidän tutkimuksen perustuvat digitaalisen koherentin optisen tiedonsiirron tuomiseen tilaajaverkkoihin. Teknologia, jota he ovat tutkineet, ei ole millään tavalla uutta sitä on käytetty tähän asti vain kuituverkoissa, jotka siirtävät signaalia hyvin pitkiä matkoja. Laboratorio-olosuhteissa Cablelabs on saavuttanut 700 Gbps:n nopeuksia yhdellä aallonpituudella ja heidän mukaansa kuidussa voitaisiin kerralla käyttää jopa 80 aallonpituutta. He kuitenkin itsekin myöntävät, että todellisuudessa nopeudet jäisivät pienemmiksi kuin laboratorio-olosuhteissa. (Cablelabs 2018.)

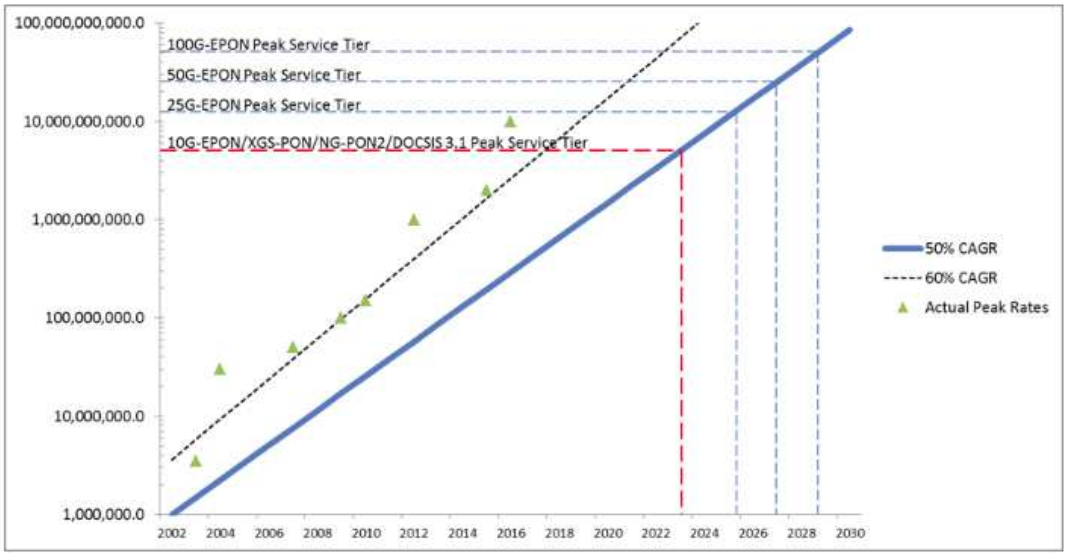
4 KUITU- JA KOAKSIAALIVERKKOJEN MARKKINATILANNE

Aiemmissa luvuissa käsiteltiin kuitu- ja koaksiaaliverkkojen teknologioiden historiaa ja kehityspolkuja. Tässä luvussa käsitellään tarkemmin markkinatilanteita, teknologiatrendejä ja miltä teknologioiden tulevaisuus näyttää kuitu- ja koaksiaalipohjaisissa liityntäverkoissa.

4.1 Kapasiteetin kasvu tietoliikenneverkoissa

Jakob Nielsen esitti vuonna 1998 lain, jonka mukaan myötäsuunnan kapasiteetin tarve kasvaa vuosittain 50 % tietoliikenneverkoissa tai toisien sanoen kaksinkertaistuu 21 kuukauden välein. Lakinsa taustalla hänellä oli tieto, siitä miten myötäsuunnan kapasiteetit olivat kasvaneet vuosien 1983 ja 1998 välillä. (Nielsen 2018.) Laki on julkaisustaan lähtien ollut peruspilarina operaattoreille, siinä miten ne suunnittelevat verkkojensa kehittämistä eteenpäin. (Ulm & Maricevic 2016, 3.)

Tämä laki on pitänyt hyvin paikkaansa, jos asiaa tarkastelee teknologioiden tarjoamien maksiminopeuksien näkökulmasta kuitu- ja koaksiaaliverkoissa. Cablelabsin tekemästä kuvaajasta, joka on kuvio 1, pystyy näkemään, että standardien maksimaaliset nopeudet ovat noudattaneet 60 %:n kasvua tällä vuosikymmenellä. Jos kapasiteetin tarve olisi kasvanut samassa suhteessa, olisi esimerkiksi DOCSIS 3.1:n kapasiteetti loppunut vuonna 2018. Nyt kuvaaja antaa elinikää DOCSIS 3.1-teknologialle vuoteen 2023 asti, joka perustaa ennustuksensa Nielsenin lakiin. (Knittle 2016.)



Kuvio 1. Tiedonsiirtostandardien kehittyminen ja ennustetut kasvut (Knittle 2016).

4.2 Kaapelitelevision markkinatilanne Euroopassa

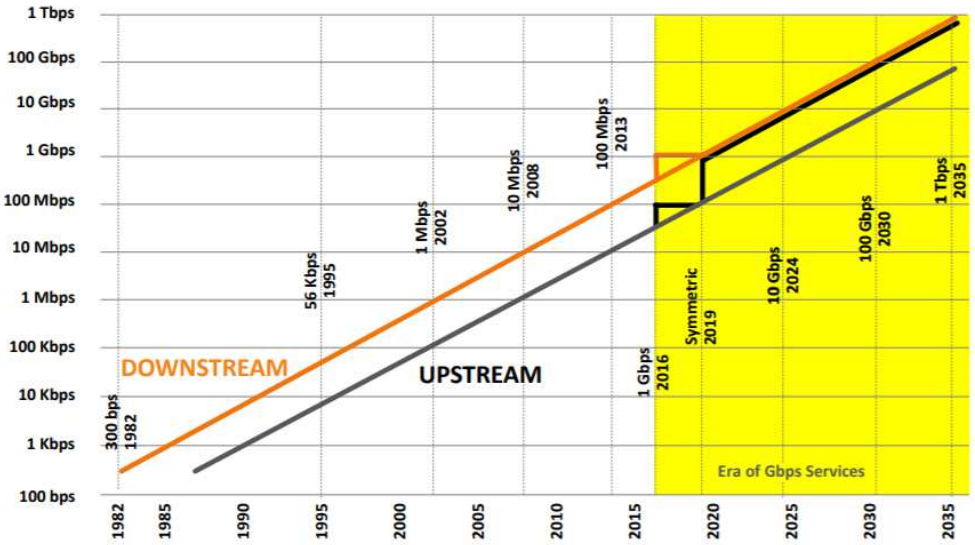
Koska toimeksiantajan palveluliiketoiminnan pääasialliset markkinat ovat Euroopassa, on Euroopan markkinatilannetta syytä tutkia vielä tarkemmin. Yhdysvaltojen markkinoita tarkasteltiin jo historiaosuudessa ja siitä saadaan vertailukohta Eurooppaan.

Euroopassa oli vuonna 2017 55.7 miljoonaa kaapelitelevisioasiakasta ja 37.4 miljoonaa kaapelilaajakaista-asiakasta. Yhteensä Euroopassa oli 214.6 miljoonaa televisiotaloutta ja 172 miljoonaa laajakaistataloutta. Kaiken kaikkiaan Euroopassa oli 65.8 miljoonaa taloutta kiinni kaapelitelevisioverkossa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että osalla on vain laajakaistayhteys, osalla vain televisiopalvelut ja osalla molemmat. Euroopan suurimmat markkinat televisio- kuin laajakaistapuolella ovat Saksassa. Liikevaihto Euroopassa, jos otetaan mukaan televisio, puhelin ja laajakaista kaapelitelevisioverkoissa, oli vuonna 2017 noin 23.3 miljardia euroa. (Cable Europe 2018, 2.)

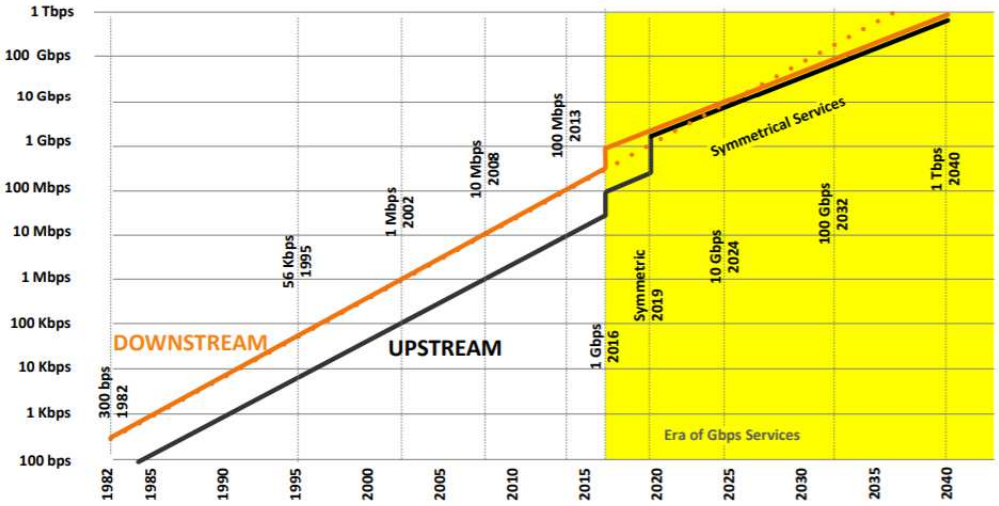
4.3 Kapasiteettisuunnittelu

Jos Nielsenin lakia tarkastelee vuodesta 1982 tähän päivään, on se pitänyt hyvin paikkaansa aina 2010-luvulle asti. Kuitenkin 2010-luvulla kapasiteetin tarpeen vuosittainen kasvu myötäsuunnalla on laskenut ja ollut noin 36 % sekä paluusuunnalla noin 17 %. (Ulm & Cloonan 2017, 7.) Asian yksinkertainen tarkastelu tarkoittaa sitä, että tiedonsiir-

toteknologiat ovat kehittyneet paljon nopeammin kuin todelliset tarpeet ja jo olemassa olevat teknologiat riittävät pidemmälle tulevaisuuteen kuin on uskottu. Eräs esiin nostettu syy kapasiteetin kasvun hidastumiselle on Mooren lain hidastuminen. Mooren lain hidastuminen tarkoittaa tietoliikenneverkkoihin kytkettyjen laitteiden kehittymisen hidastumista. (Ulm & Cloonan 2017, 6.) Kuvioissa 2 ja 3 on hahmoteltu sitä mitä tarkoittaa, jos kapasiteetin tarpeen vuotuinen kasvu olisi 50 % ja mitä jos vuotuinen kasvu olisi 33 %.



Kuvio 2. Vuosittainen kapasiteetin tarpeen kasvu 50 % (Ulm & Cloonan 2017, 5).



Kuvio 3. Vuosittainen kapasiteetin tarpeen kasvu 33 % (Ulm & Cloonan 2017, 5).

Yksinkertaisuus karisee pois, kun otetaan huomioon, se miten kuluttajat käyttävät tiedonsiirtoverkkoja. Tiedonsiirtoverkkojen kiireisimmät ajat ovat iltakuuden ja keskiyön välillä sekä kapasiteetin tarve saattaa vaihdella vielä päiväkohtaisesti. Verkkojen kapasiteetti tulee mitoittaa niin, että ne kestävät vuorokauden ajat, jolloin käyttö on suurinta. (Holonbinko ym., 9–11.) Huhtikuussa 2019 nähtiin kapasiteettisuunnittelun näkökulmasta hankala asia, kun Game of Thronesin viimeisen tuotantokauden ensimmäinen jakso julkaistiin. Sarja on hyvin suosittu ja esimerkiksi Ruotsissa 3 Scandinavia operaattorin liikenne kasvoi 300 %, normaalin nähden, kun jakso oli katsottavissa. (Telecompaper 2019.)

Kun operaattorit mitoittavat verkkojaan kiireisimpien aikojen mukaan, tarkoittaa se käytännössä sitä, että merkittävä osa kapasiteetista on turhan panttina suurimman osan päivää. Tämä on ohjannut laitevalmistajia kehittämään ratkaisuja, miten kapasiteettia voidaan sulkea helposti tarvittaessa ja tätä kautta vähentää sähkönkulutusta. Tällaisia ratkaisuja ovat muun muassa DOCSIS-kanavien ottaminen pois käytöstä väliaikaisesti eli käytännössä taajuusalueen pienentäminen sekä heikompien modulaatioiden ottaminen käyttöön. Näitä ratkaisuja tulee käyttää kuitenkin harkiten, koska kaapelimodeemit saattavat mennä sekaisin verkon muutoksista ja välillä voi tapahtua ilta-ajan ulkopuolellakin tilanteita, kun kapasiteettia tarvitaan huomattavasti. (Holonbinko ym. 2018, 8–13.)

Kapasiteettisuunnittelussa pitää myös huomioida se minkälaista liikennettä tietoliikenneverkoissa tapahtuu. Ennen suoratoistopalveluja tietoliikenne oli hyvin purskeista eli nopeaa ja hetkellistä, koska Internet-sivujen avaaminen sekä viestien lähettäminen olivat Internetin pääsääntöistä käyttöä. Tämä mahdollisti sen, että käytännössä tietoliikenneverkkojen omistajat pystyivät niin sanotusti ylimyymään verkkojaan. Verkoissa saattoi esimerkiksi olla 500 tilaajaa, kellä oli 10 Mbps:n liittymä, vaikka verkon maksimikapasiteetti oli 100 Mbps. 500 käyttäjän maksimaalinen kapasiteetin tarve olisi ollut tällöin 5 Gbps, jos kaikki olisivat käyttäneet samaan aikaan maksimikapasiteettia. (Holonbinko ym. 2018, 3–4.)

Erilaiset videopalvelut kuten YouTube ja Netflix ovat murtaneet tätä Internetin alkuaikojen tapaa, jossa liikenne oli hyvin purskeista. Videoiden katselu saattaa kestää pitkäänkin ja kapasiteetin käyttö on tasaista, joten ylimyynti ei ole enää yhtä normaali asia kuin aiemmin. On arvioitu, että vuoteen 2021 mennessä videoiden osuus Internetliikenteestä on 82 %. (Holonbinko ym. 2018, 4.)

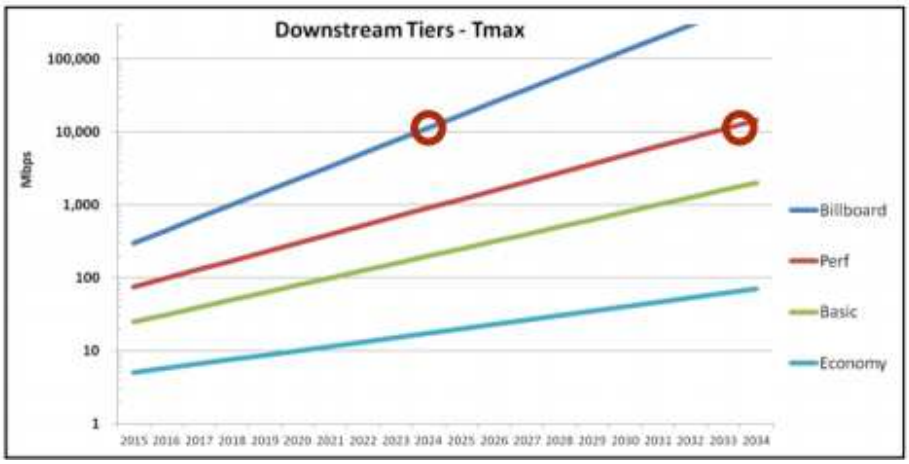
4.4 Käyttäjät

Erilaisten käyttäjätyyppien tunnistaminen on tärkeää, kun pohditaan verkkojen kapasiteettia. Keskimääräinen kasvu kapasiteetin tarpeessa on ollut hitaampaa mitä Nielsenin laki ennustaa. Kuitenkin osa käyttäjistä on luonnollisesti tämän keskiarvon alapuolella ja osa yläpuolella. John Ulmin ja Zoran Maricevicin tutkimuksen mukaan vain <1 % kaikista käyttäjistä noudattaa Nielsenin lakia eli heidän kapasiteetin tarpeensa kasvaa vuosittain 50 %. Käytännössä siis 99 % käyttäjistä jää lain alapuolelle, Operaattoreille tulee luonnollisesti tulevaisuudessa vastaan se tosiasia, että verkkoja ei välttämättä kannata enää rakentaa ja päivittää ajatellen Nielsenin lain kohdistuvan koko asiakaskuntaan. Kuitenkin operaattorien pitää pystyä jatkossakin tarjoamaan tarpeeksi kapasiteettia datan suurkuluttajille. Taulukossa 4 Ulm ja Maricevic ovat asettaneet erilaiset käyttäjät neljään ryhmään ja hahmotellut heidän osuuksiaan käyttäjistä. Taulukko on vuodelta 2014, mutta sitä voi tänäkin päivänä käyttää suuntaa antavana esimerkkinä käyttäjistä ja heidän tarpeistaan tiedonsiirtoverkoissa. (Ulm & Maricevic 2016, 5–7.)

Taulukko 4. Erilaisia laajakaistasiirron käyttäjäryhmiä (Ulm & Maricevic 2016, 6).

MSO Case Study DS Service Tiers	% of Subs	Tmax CAGR	2014	2016	2021	2026
Top Billboard Tier	<1%	50%	300	675	5G	40G
Performance Tier	14%	32%	75	125	500	2G
Basic Tier	65%	26%	25	40	150	400
Economy Tier	20%	15%	5	10	20	50

Kuviossa 4 on esitetty ennuste siitä miten eri käyttäjäryhmät tulevat tarvitsemaan nopeuksien vuoteen 2034 mennessä. Billboard eli mainittu 1 % saavuttaa DOCSIS 3.1:n maksiminopeudet, jos käytössä 1,2 GHz:n kaista, vuoteen 2024 mennessä, kun taas edistyneemmälle käyttäjäryhmälle tämä riittää 2030-luvulle asti. Muille käyttäjällä, jotka edustavat 85 % kaikista käyttäjistä kuviossa, 10 Gbps riittää niin pitkälle, että muiden teknologioiden miettiminen tässä vaiheessa ei olisi tarpeellista. (Ulm & Maricevic 2016, 6–7.)



Kuvio 4. Käyttäjien ennustettuja nopeuksien kasvuja (Ulm & Maricevic 2016, 7).

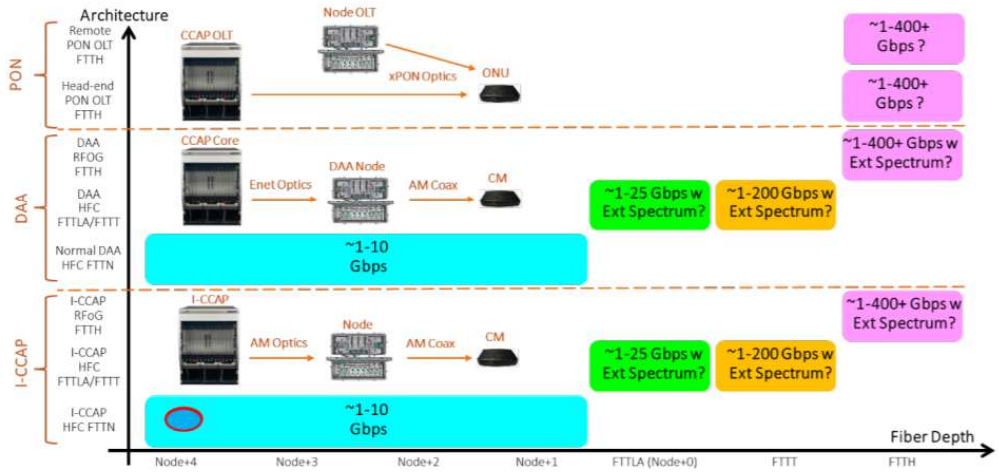
Operaattorien näkökulmasta tämä kaikki tarkoittaa sitä, että tulevaisuudessa kapasiteettipäivitykset saattavat olla hyvin selektiivisiä. Kun verkot on tuotu 10 Gbps:n aikaan, ei välttämättä ole enää järkevää kasvattaa kapasiteettia kaikille käyttäjille samanaikaisesti. Selektiivisyys tarkoittaa siis sitä, että operaattorit tulevat tarjoamaan tälle 1 %:n käyttäjäryhmälle erilaisempia palveluja ja ratkaisuja kuin muille, jotta heidän kapasiteetin tarpeensa saadaan tyydytettyä. (Ulm & Maricevic 2016, 8.) Seuraavassa luvussa on käsitelty kaapelitelevisioverkkojen evoluutiota vielä tarkemmin.

4.5 Kuitu- ja koaksiaalipohjaisten verkkojen evoluutio

Ei ole olemassa yksiselitteistä oikeaa ratkaisua siihen, miten kaapelioperaattorien tulee kehittää verkkojaan lähivuosina, jotta ne pystyvät vastaamaan kasvavan kapasiteetin tarpeisiin myös tulevaisuudessa. Aiemmassa luvussa mainittu selektiivisyyskin voi olla käytännössä huono idea.

On mahdollista, että perinteisen kaapelioperaattorin ei tarvitse tehdä verkkoihinsa mitään teknologisia päivityksiä ennen vuotta 2025 eli pelkillä HFC-verkkojen jakamisilla tai toisin ilmaistuna segmentoinnilla saavutetaan tarpeellinen määrä kapasiteettia. Kuitenkin pidemmällä aikajänteellä asiaa tarkasteltuna kaapelioperaattorien tulee mennä täysin kuitu kotiin -ratkaisuihin, jotta operaattorien verkot kykenevät vastaamaan kysyntään. On olettavaa tällä hetkellä, että 20 vuoden päästä kuitu on syrjäyttänyt kuparin melkein täysin operaattorien tiedonsiirtoverkoissa, vaikka aiemmassa kappaleessa todettiin, että DOCSIS 3.1 riittää vielä hyvin pitkään. (Al-Banna ym. 2017, 4.) Alla ole-

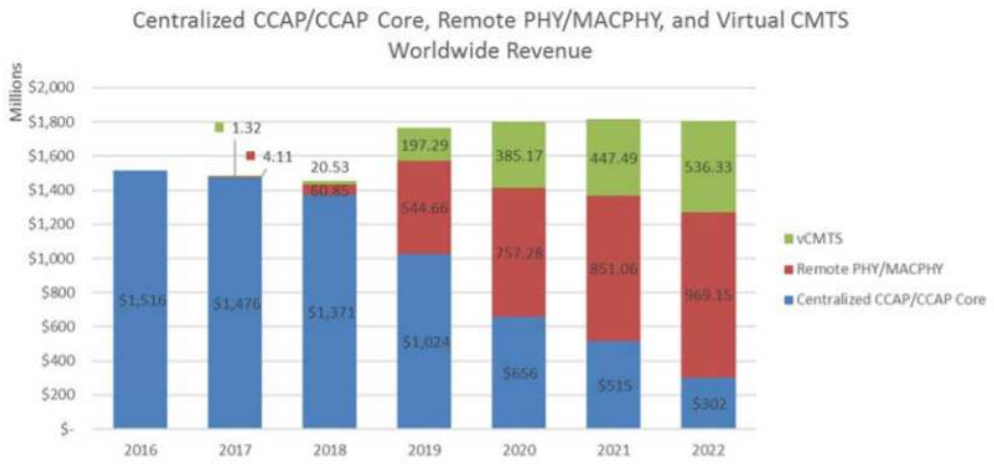
vassa kuvassa 4 on esitelty tarkemmin erilaisia polkuja, joita kaapelioperaattorit voivat seurata siirtyessään täydelliseen kuituverkkoon. Ylin vaihtoehto on yksinkertaisin eli unohdetaan kupari kokonaan ja siirrytään heti täydelliseen kuituverkkoon.



Kuva 4. Erilaisia liityntäverkkojen kehityspolkuja (Al-Banna ym. 2017, 4).

4.6 Investointinäkymät tulevina vuosina kaapelitelevisioverkoissa

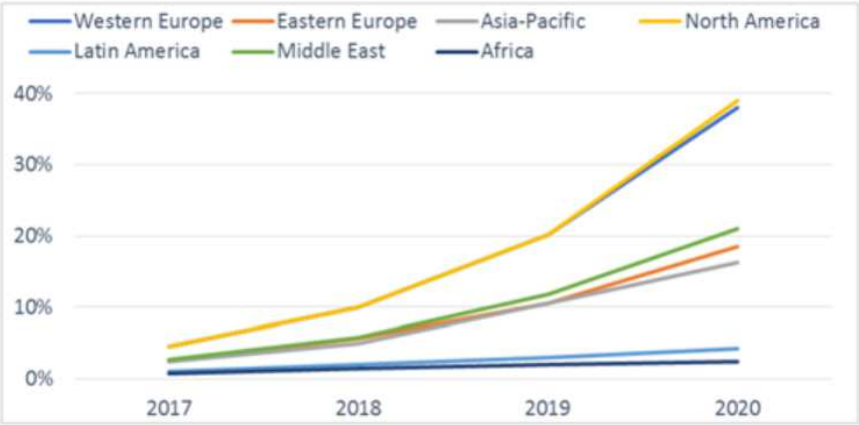
Teknologinen murros on käynnissä kaapelitelevisioverkoissa. Teknologisessa murroksessa kaapelitelevisioverkot siirtyvät hajautettuun verkkoarkkitehtuuriin. Investoinnit ovat kasvamassa jyrkästi tähän suuntaan, kuten voi nähdä kuviosta 5. Kuvio 5 on markkinaennuste koskien päävahvistin- ja node-laitteita. Markkinat eivät juurikaan ennustuksen mukaan kasva vaan vanhat perinteiset HFC-teknologiat sulavat pois. Tämä on suuri haaste kaikille yhtiöille, jotka ovat aiemmin toimittaneet kaapelioperaattoreille edellisen sukupolven teknologiaa, sillä elleivät nämä yritykset pysty kasvattamaan liiketoimintaansa hajautetussa verkkoarkkitehtuurissa, voivat vaikutukset olla hyvinkin dramaattisia yritykselle.



Kuvio 5. Päävahvistinlaitteiden markkinaennuste (Laufer ym. 2018, 6).

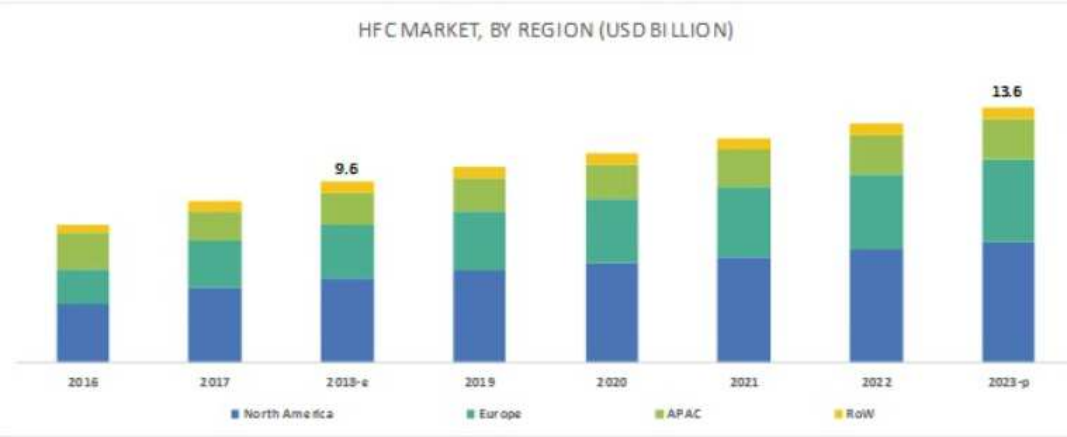
Dell'Oro Groupin blogipostissaan analyytikko Jeff Heynen käsittelee tulevaa investointibuumia hajautettuun verkkoarkkitehtuuriin. Hänen mukaansa vuosi 2019 tulee olemaan se vuosi jolloin suuret Yhdysvaltalaiset kaapelioperaattorit kuten esimerkiksi Comcast, Mediacom, Cox ja Spectrum siirtyvät laboratorio- ja kenttätesteistä suuren mittaluokan asennuksiin ja päivityksiin. Heynen mainitsee myös, että operaattorit tuskin tyytyvät vain päivityksiin vaan ne myös investoivat verkkojen segmentointeihin. (Heynen 2019.)

Jos hajautetun verkkoarkkitehtuurin investoinnit ovat kasvussa, jatkuvat investoinnit myös DOCSIS 3.1-teknologiaan sekä yleensäkin kaapelitelevisioverkkoihin. Kuviosta 6 nähdään, että DOCSIS 3.1-liittymien määrä tulee kasvamaan melko jyrkästi tänä ja ensi vuonna kaikilla perinteisillä markkina-alueilla.



Kuvio 6. DOCSIS 3.1-liittymien osuudet (Laufer ym. 2018, 9).

Kaapelitelevisiomarkkinoiden oletetaan kasvavan vuoden 2018 tasosta 4 miljardia dollari vuoteen 2023 mennessä ja tätä kasvua on kuvattu kuviossa 7. Markkinat muodostuvat muun muassa päävahvistinlaitteista, nodeista, passiiveista, vahvistimista, kaapeleista ja asiakkaiden päätelaitteista. Pohjois-Amerikka on ollut ja tulee olemaan suurin markkina-alue ennustuksen mukaan. (MarketsAndMarkets 2019.)



Kuvio 7. Kaapelitelevisiomarkkinoiden kasvunäkymät (MarketsAndMarkets 2019).

4.7 Hajautetun verkkoarkkitehtuurin käyttöönotot

Remote PHY-teknologia on ottanut jo jalansijaa Euroopassa erityisesti Tanskassa, jossa Tanskan toiseksi suurin kaapelioperaattori Stofa aloitti 2017 verkkojen päivitysprojektinsa, jossa se siirtyy käyttämään Remote PHY-tuotteita sekä päivittää verkkonsa DOCSIS 3.1-teknologiaan. Stofaa voidaan pitää tämän teknologian pioneerina, sillä

heidän verkkonsa oli Euroopan ensimmäinen laajan mittakaavan Remote PHY-verkko. (LightReading 2018.) Remote PHY-tuotteet ovat saaneet myös jalansijaa Luxemburgissa jossa Eltrona on siirtynyt käyttämään niitä (Frankel 2018).

Remote MACPHY-teknologia on Huawein ratkaisuista johtuen saanut merkittävää jalansijaa maailmassa tähän päivään mennessä. Muun muassa Tanskan suurin operaattori TDC on siirtynyt käyttämään Huawein teknologiaa. (Huawei 2016a). Myös Espanjalainen ONO (TeleGeography 2017) ja Perulainen Telefonica Del Peru ovat valinneet tämän teknologian (Huawei 2016b).

Cablelabs haluaa ylläpitää yhteensopivuuden (Interoperability) kulttuuria myös hajautetun verkkoarkkitehtuurin teknologiassa, jotta käyttöönotot olisivat yksinkertaisempia, ja tästä syystä se järjestää tapahtumia, joissa eri laitevalmistajilla on mahdollisuus testata laitteiden yhteensopivuutta muiden laitevalmistajien tuotteita vastaan. (Schnoor 2019.). Laitevalmistajista erityisesti Teleste ja Cisco ovat sitoutuneet luomaan tuotteita, jotka ovat yhteensopivia muiden laitevalmistajien tuotteiden kanssa (Teleste 2017).

Tällä hetkellä markkinoilla on jo joidenkin valmistajien ratkaisuja virtualisointiin ja näitä on myös jo asennettua. Puolassa Netia on siirtynyt käyttämään Nokia ratkaisua (CSI 2018) sekä Yhdysvaltalainen WOO on myös valinnut Nokia ratkaisun (Baumgartner 2018). Ruotsissa taas ComHem on ottanut käyttöönsä Harmonicin virtualisointiratkaisun (BTR Staff 2018).

4.8 Kuituverkkojen kehitys Euroopan näkökulmasta

Nykypäivänä, kun lähdetään täysin uudelle alueella rakentamaan tietoliikenneverkkoa, on se käytännössä aina täysin kuitupohjainen verkko. Vain tällä pystytään varmasti varmistamaan, että verkon kapasiteetti riittää hyvin pitkälle tulevaisuuteen. Joissakin tapauksissa, voi olla järkevää myös korvata vanhaa koaksiaaliverkkoa kuidulla, mutta tällainen on aina tapauskohtaista ja liittyy oikeanlaiseen kapasiteetin hallintaan. (Ulm & Maricevic 2016, 3.)

Positiivisen kuituverkkokehityksen taustalla Euroopassa on ollut monta asiaa. Viime vuosina julkisen tason toimijat ovat ryhtyneet kannustimilla, tuilla ja lainsäädännöllisillä toimilla edistämään sekä helpottamaan kuituverkkojen rakentamista monissa maissa. Tuet ovat mahdollistaneet sen, että alueille, joille ei markkinamielessä ole järkevää rakentaa verkkoa, on kyetty asentamaan kuituverkkoja. Valtiot ovat myös päivittäneet

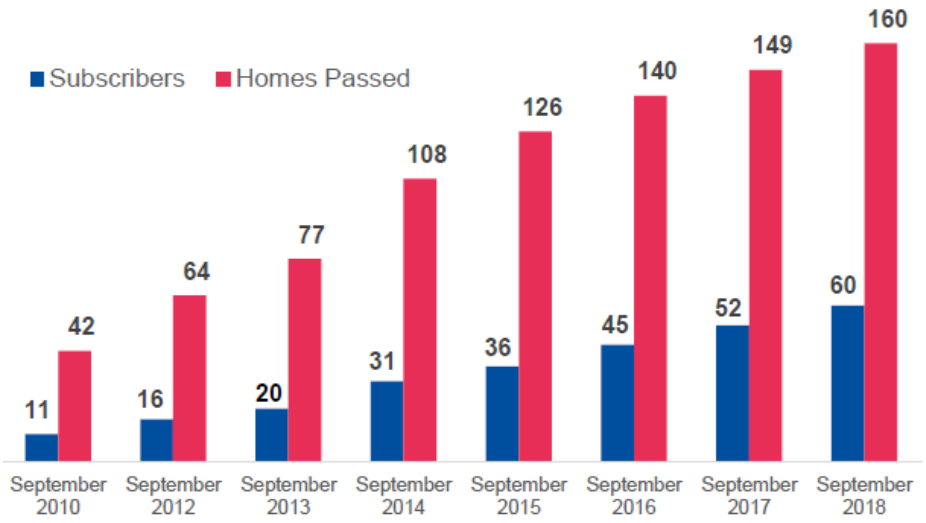
digitaalisia infrastruktuuristrategioitaan ja asettaneet kuitu- sekä 5G-verkot näiden strategioiden keskiöön. 5G-verkot tulevat tarvitsemaan huomattavasti enemmän kuituverkkoa toimiakseen kuin edeltäjänsä, joten on luonnollista, että nämä kaksi asiaa yhdistetään strategisessa suunnittelussa. (Montagne 2019a, 23.)

Positiivisen kehityksen taustalla on myös ollut teleoperaattorien asenteet kuitua kohtaan, jossa se on nostettu yhä enemmissä määrin kuparin yläpuolelle johtuen jo aiemmin mainituista eduista. Asennemuutoksista johtuen investoinnit siirtyvät merkittävimmissä määrin kuituverkkoihin pois perinteisistä kupariverkoista. (Montagne 2019a, 23.)

Kuituverkkojen kehityksellä on myös hidasteensa ja esteensä. Verkkojen rakentamista hidastavat asiat ovat luonnollisesti uudet innovaatiot ja standardit, joita kehitellään kupariverkkoihin. Myös kuidun asennuskustannukset ovat merkittävät ja erityisen suuria, kun kuitua asennetaan maan alle. Mahdollinen 5G-teknologian suuren mittakaavan asennuksien siirtyminen tulevaisuuteen voi myös hidastaa operaattorien kiinnostusta investoida kuituverkkoihin, koska kapasiteettia ei haluta asentaa tyhjän pantiksi. Joissakin tapauksissa myös saattaa olla, että kuituasennuksien tiellä on hallinnollisia esteitä. Kuituverkkojen rakentaminen vaatii lupia maanomistajilta, joten byrokratia on merkittävässä asemassa, kun verkkoja suunnitellaan ja rakennetaan. (Montagne 2019a, 24.)

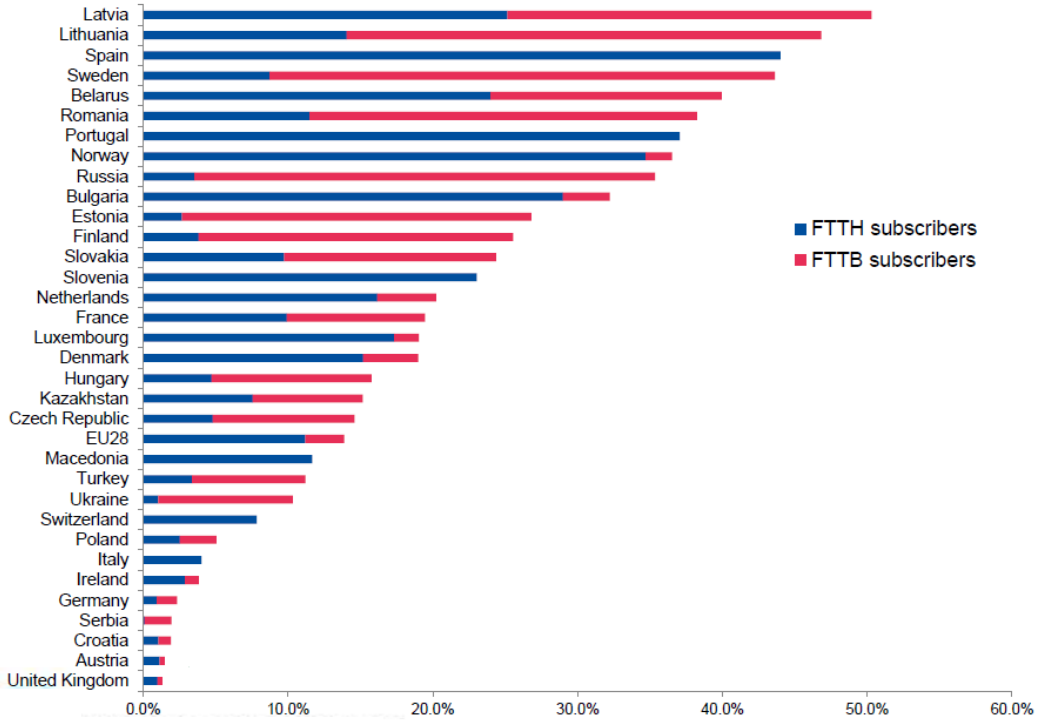
4.9 Kuituverkkojen markkina-analyysi

IDATE:n tekemän markkinatutkimuksen mukaan Euroopassa oli syyskuussa 2018 noin 160 miljoona rakennusta, jotka olivat kuidutettu. Näistä 160 miljoonasta 59.6 miljoonaa oli kytketty kuituverkkoon. Tämä voidaan nähdä merkittävän kasvuna, jos tilannetta verrataan vuoden 2010 syyskuuhun. Vuonna 2010 Euroopassa oli 42 miljoona rakennusta, jotka oli kuidutettu, ja 11 miljoonaa rakennusta, jotka oli kytketty kuituverkkoon. Rakennukset, jotka ovat kuituverkkojen piirissä, ovat siis moninkertaistuneet jo tähän mennessä tällä vuosikymmenellä. (Montagne 2019a, 6.) Kuviossa 8 on esitetty tämä kasvu vuosikohtaisesti. Kuvio 8 on ottanut huomioon Venäjän, Valko-Venäjän, Ukrainan, Kazakstanin, Andorran, Islannin, Israelin, Makedonian, Norjan, Serbian, Sveitsin ja Turkin sekä EU-maat pois lukien Kyproksen eli yhteensä 39 maan.



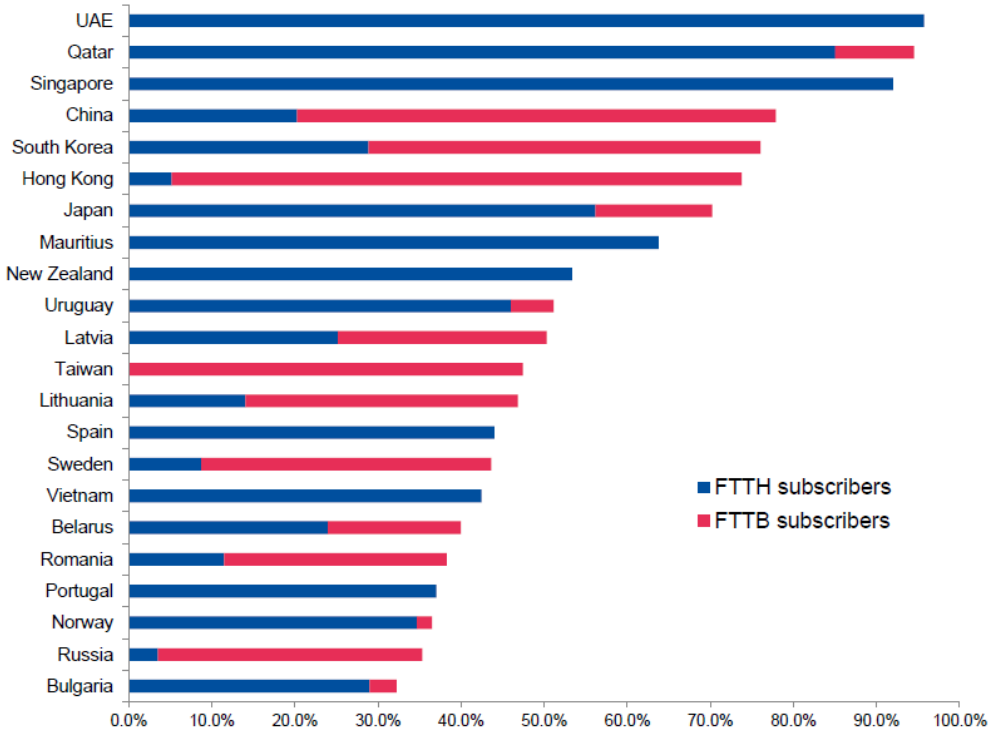
Kuvio 8. Kuituverkon kasvu Euroopassa 2010-luvulla (Montagne 2019a, 6).

Euroopan kuitupenetraation tarkastelu valtioittain antaa käsityksen siitä missä nämä kuidutukset ovat tapahtuneet. Kuviossa 9 on listattuna Euroopan valtiot, josta nähdään, että Latviassa on suurin kuitupenetraatio.



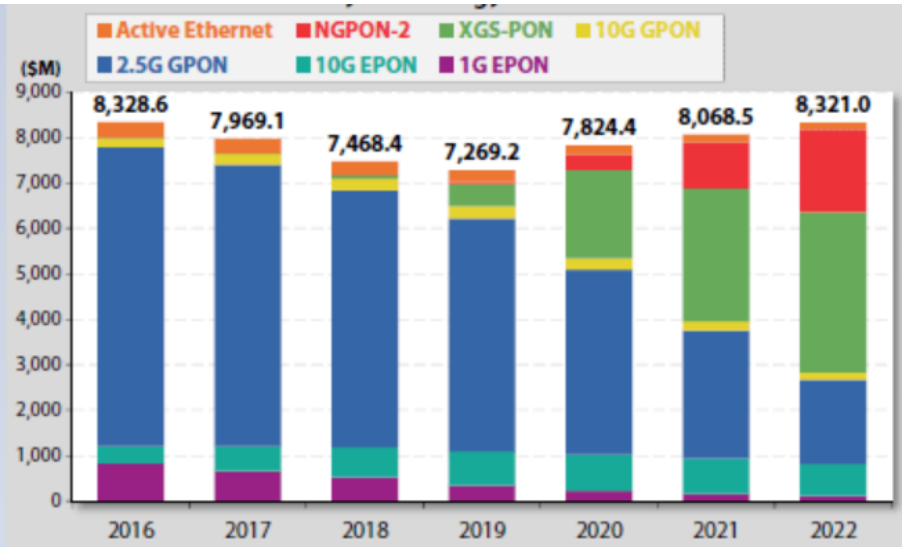
Kuvio 9. Euroopan kuitupenetraatiota valtioittain (Montagne 2019a, 16).

Jos kuitupenetraatiota tarkastelee globaalista näkökulmasta, ei yksikään Euroopan maa yllä kärkeen. Euroopan johtaja Latvia on vasta sijalla 11. kuten on esitetty kuviossa 10. Euroopassa on siis paljon kuiturakentamista edessä tulevina vuosikymmeninä.



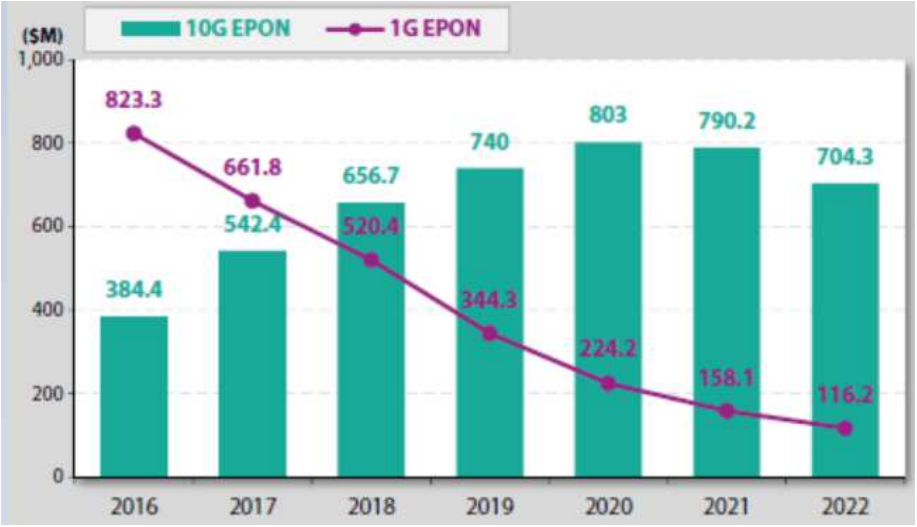
Kuvio 10. Kuitupenetraation globaali kärki (Montagne 2019a, 19).

Pelkät kuituverkot eivät yksinään riitä tiedonsiirtoon vaan täytyy olla myös joku teknologia, johon datan siirto perustuu. Kuviosta 11 nähdään eri standardien markkinaosuudet maailmassa Ftth-laitemyynnin liikevaihdon näkökulmasta. ITU-T:n standardeihin pohjautuva 2.5 GPON eli G.984 on markkinajohtaja, mutta tulevina vuosina se tulee menettämään asemiaan ITU-T:n uudemmille standardeille ennustuksen mukaan.



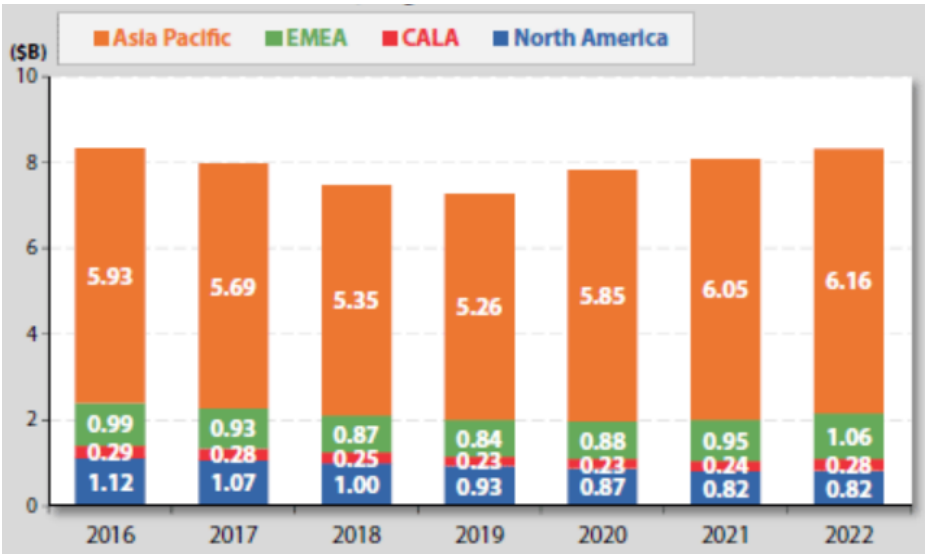
Kuvio 11. Eri kuitustandardien markkinaosuuksia (Weissberger 2017).

Kuvio 12 antaa tarkemman analyysin EPON-teknologian ennustetusta liikevaihdollisesta kehityksestä. Tänä vuonna 2019 10G EPON laitemyynnin ennustetaan tuottavan jo yli kaksi kertaa enemmän liikevaihtoa kuin edeltäjänsä teknologiavalmistajille.



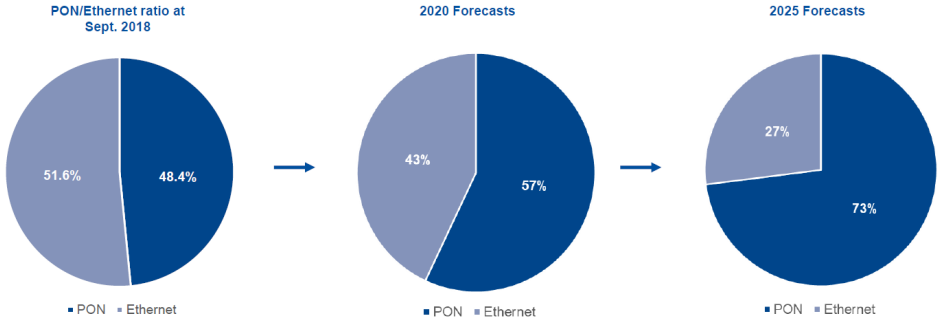
Kuvio 12. EPON-teknologian laitemyynti (Weissberger 2017).

Merkittävä osa kaikesta liityntäverkkojen kuituteknologian liikevaihdosta syntyy Aasiassa. Tätä liikevaihdon jakautumista maantieteellisesti on esitetty kuviossa 13.



Kuvio 13. Ftth-investointien jakautuminen maantieteellisesti (Weissberger 2017).

Suurin osa tulevien vuosien laitemyynnin liikevaihdosta muodostuu siis PON-teknologioista ja erityisesti ITU-T:n standardeihin perustuvista ratkaisuisista. IDETA ennustaa, että seuraavien vuosien aikana Euroopassa PON-teknologia ohittaa Ethernet-ratkaisut ja vuoteen 2025 PON-teknologia on selkeä markkinajohtaja, kuten nähdään kuviossa 14.



Kuvio 14. PON- ja Ethernet-standardien markkinaosuudet Euroopassa (Montagne 2019b, 13).

5 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

Tutkimuksen tarkoituksena oli etsiä vastauksia tutkimusongelmaan, joka oli toimeksiantajan Suomen palveluliiketoiminnan vahvuudet sekä kehittämiskohteet kuitu- ja koaksiaalikaapelipohjaisten verkkojen teknologisessa kehityksessä. Tutkimuksen pääpaino oli haastatteluissa, mutta myös sähköpostikyselyä käytettiin tutkimusaineiston keräämiseen.

Haastattelutilanne oli puolistrukturoituhaastattelu eli haastateltavat saivat vastata kysymyksiin omin sanoin. Puolistrukturoidussa haastattelutilanteessa kysymykset ovat kaikille haastateltaville samat, mutta järjestys saattaa vaihdella. Puolistrukturoituihin haastatteluihin kuuluu myös, että tutkija tutkii tutkittavan ilmiön rakenteita, prosesseja ja kokonaisuutta ennen kuin luodaan haastattelurunko (Hirsjärvi & Hurme 2015, 47). Ennen haastattelutilannetta tutkittiin tutkimusaihetta erilaisten materiaalien avulla, joiden pohjalta saatiin luotua tutkimuksen kannalta sopiva haastattelurunko.

Tutkimusongelmasta muodostettu tutkimuskysymys oli mihin suuntaan liityntäverkkojen teknologinen kehitys etenee sekä minkälaista teknologiaosaamista tarvitaan, jotta palveluliiketoiminta kykenee palveluillaan vastaamaan liityntäverkkojen teknologiatrendeihin sekä tietoliikenneoperaattoreiden teknologisiin odotuksiin ja tarpeisiin jatkossakin. Tutkimuksessa haettiin sitä tietoa kokeneilta asiantuntijoilta mihin liityntäverkkoteknologioihin operaattorit ovat siirtämässä investointejaan tai investoivat jo ja minkälainen on palveluliiketoiminnan koettu osaamistaso näissä teknologioissa. Tutkimuksessa pyrittiin myös löytämään taustoja näille investoinneille sekä mahdollista kokemusta asiantuntijoiden menneisyydestä, jossa he ovat olleet osallisena jossain teknologisessa murroksessa. Tutkimuksessa pyrittiin myös saamaan asiantuntijoilta vastauksia siihen mitkä he kokevat palveluliiketoiminnan vahvuuksiksi ja kehittämiskohteiksi.

Tutkimuskysymyksen pohjalta johdettiin seuraavat haastattelukysymykset:

1) Kerro urastasi ja kokemuksestasi tietoliikennealalla.
2) Mitkä ovat olleet haasteellisimmat kokemasi teknologiamurrokset tietoliikennealla ja miten niistä selvittiin vai selvittiinkö ollenkaan?
3) Mitkä ovat oman näkemyksesi mukaan ne teknologiatrendit, jotka ohjaavat tiedonsiirtoa eteenpäin kuitu- ja koaksiaalipohjaisissa liityntäverkoissa?

4) Mihin suuntaan näkemyksesi mukaan markkinavaatimukset ohjaavat liityntäverkkojen kehitystä?
5) Onko näkemyksesi mukaan julkisilla toimijoilla vaikutusta teknologiatrendeihin tai markkinavaatimuksiin?
6) Jos ajatellaan toimeksiantajan Suomen yksikön palveluliiketoiminnan vahvuuksia liityntäverkkojen teknologiaosaamisessa, mitkä ne mielestäsi ovat?
7) Mitkä ovat mielestäsi toimeksiantajan Suomen yksikön palveluliiketoiminnan kehittämiskohteet liityntäverkkojen teknologiaosaamisessa?

5.1 Haastattelu tutkimuskäytössä

Haastattelu on keskustelu, jolla on tarkoitus ja sitä pidetään tiedonhankinnan perusmuotona. Haastattelu on hyvin joustava tiedonhankinnan menetelmä, sitä voidaan käyttää lähes kaikkialla ja sen avulla tutkija voi saada halutessaan jopa syvällistäkin tietoa. (Hirsjärvi & Hurme 2015, 11.)

Haastattelulla on paljon etuja tutkimuskäytössä. Koska haastattelutilanteessa ollaan välittömässä vuorovaikutuksessa tutkittavan kanssa, on mahdollista suunnata tiedonhankintaa itse haastattelutilanteessa. Haastattelutilanteessa on myös mahdollista ymmärtää paremmin motiiveja sille miksi vastaukset ovat tietynlaisia. Haastattelutilanne korostaa myös sitä, että ihminen nähdään subjektina. (Hirsjärvi & Hurme 2015, 34–35.)

Haastattelulla on myös ongelmansa tutkimuskäytössä. Haastattelu vaatii haastattelijalta tietoa ja kokemusta, jotta tiedon keruu voidaan suorittaa tilanteeseen sopivalla tavalla. Teoriassa haastattelijan pitäisi hankkia tämä tieto kouluttautumalla. Haastattelu on myös hyvin aikaa kuluttava tutkimustapa, koska haastateltavat pitää löytää, haastatteluaika sopia, itse haastattelu täytyy suorittaa ja vielä haastattelumateriaali pitää analysoida läpi. Haastattelu sisältää myös monia virhelähteitä. Haastateltava voi esimerkiksi vastauksissaan painottaa sosiaalisesti hyväksyttäviä vastauksia ja pitää todelliset ajatuksensa sisällään. (Hirsjärvi & Hurme 2015, 35.)

5.2 Kohderyhmä ja esivalmistelut

Kohderyhmä haastateltaville oli toimeksiantajan palveluliiketoiminnan asiantuntijat, jotka olivat työskennelleet vähintään kolme vuotta tietoliikennealalla ja joilla oli koke-

musta kuitu- ja koaksiaaliteknologiasta niin kansalliselta- kuin kansainväliseltä tasolta työssään. Kohderyhmän asiantuntijat työskentelivät organisaatiossa verkonvalvonnassa, kuitu- ja koaksiaalisuunnittelussa, projektihallinnassa, verkon laitteiden konfiguroinnissa tai kenttäasennuksissa. Yhdelläkään asiantuntijalla ei ollut täysin identtistä työtä toisten asiantuntijoiden kanssa. Nämä reunaehdot valittiin haastateltaville, jotta voitiin varmistua, että heillä on objektiivista näkemystä asioihin.

Ennen yhteydenoton lähettämistä koko kohderyhmälle, suoritettiin esihaastattelu yhdelle asiantuntijalle, jotta voitaisiin tunnistaa haastattelukysymysten toimivuus ja se mikä olisi tarpeeksi haastatteluaikaa. Esihaastateltu tiesi jo ennen haastattelua tutkimusongelmasta, joten hän oli voinut orientoitua haastatteluun etukäteen. Esihaastattelu tai jossain kirjoituksissa koehaastattelu on myös suositeltava toimenpide, kun haastatteluja käytetään tutkimuskäytössä. (Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006.) Joidenkin näkemysten mukaan esihaastattelu on käytännössä välttämätön ja hyvin tärkeä osa koko haastattelututkimusta (Hirsjärvi & Hurme 2015, 73) eli enemmän kuin pelkkä suositeltava asia. Ennen haastattelututkimuksen aloittamista sekä esihaastattelua tiedettiin, että haastatteluaikaa ei ollut vaivatonta löytää, koska asiantuntijat olivat kaikki kiireisiä töissään.

Esihaastattelussa paljastui, että haastattelukysymykset olivat sopivasti muotoiltuja. Esihaastattelutilanteessa esitettiin myös tarkentavia kysymyksiä, sen mukaan miten esihaastateltava vastasi. Esihaastattelun perusteella ei päätetty muuttaa haastattelukysymyksiä, koska kysymykset toivat halutun tiedon. Haastattelutilanne toi esille myös jonkun verran epärelevanttia tietoa, mutta tämä oli oletettavaa jo ennen koehaastattelutilannetta puolistrukturoidun haastattelun luonteesta johtuen. (Hirsjärvi & Hurme 2015, 36.) Esihaastattelun perusteella selvisi, että tutkimushaastatteluille tulisi varata vähintään kaksi tuntia aikaa. Esihaastattelua hyödynnettiin myös tutkimuksessa.

Esihaastattelun jälkeen kaikille kohderyhmän asiantuntijoille lähettiin sähköposti, jossa kerrottiin tutkimuksesta ja tiedusteltiin halukuutta osallistua tutkimukseen. Asiantuntijoiden kanssa, jotka olivat valmiita osallistumaan tutkimukseen, käytiin vielä keskustelua tutkimuksesta, luottamuksellisuudesta ja käytännön toimista sekä sopivista ajankohdista ennen haastattelutilannetta.

Kokemuksia esihaastattelusta hyödynnettiin, kun käytiin keskusteluja asiantuntijoiden kanssa sähköpostin lähettämisen jälkeen. Asiantuntijoiden, jotka olivat valmiita osallistumaan tutkimukseen, aikatauluista pyrittiin löytämään 2.5 h aikaikkuna, jona haastatte-

lu olisi voitu suorittaa. Valitettavasti kaikkien kanssa tämä ei ollut mahdollista ja osassa tapauksista haastatteluaikaa varattiin vain 1.5 h.

Haastattelujen luottamuksellisuus oli eräs kynnyskysymyksistä asiantuntijoille. Monet asiantuntijoista olivat kirjoittaneet erillisiä salassapitosopimuksia työsopimuksensa päälle, koska työtehtävien puolesta heillä oli pääsy operaattorien salaiseen materiaalin. Nauhoitus- ja videolaitteidenkäyttö käyttö haastattelutilanteiden taltioimiseen oli ehkä tästä syystä hankala asia monelle asiantuntijoista, kun asiasta keskusteltiin ennen haastattelua. Haastattelujen tallentaminen ainoastaan muistiinpanoin on harvoin suositeltavaa (Opintokeskus Sivis 2019), mutta tässä tapauksessa päädyttiin siihen, jotta asiantuntijat varmasti puhuisivat vapautuneesti koko haastattelun ajan. Kun haastattelujen taltioimiseen käytetään vain muistiinpanoja, on äärimmäisen tärkeää, että muistiinpanot puretaan mahdollisimman nopeasti haastattelutilanteen jälkeen, jotta tehdyistä muistiinpanoista saa selvää. (Eskola 2010, 28) Tästä syystä haastattelut purettiin, joko heti haastattelun jälkeen tai viimeistään haastatteluajankohtaa seuranneena iltana.

Muistiinpanojen hyvä puoli on siinä, että kirjaamisvaiheessa voi tehdä jo karsintaa siitä mikä on olennaista ja mikä epäolennaista ja tämä nopeuttaa tiedon purkamista sekä analysointia (Eskola 2010, 27). Video- ja nauhoitustallenteissa karsiminen tapahtuu vasta purkamisvaiheessa tai sen jälkeen (Hirsjärvi & Hurme 2015, 138).

5.3 Asiantuntijahaastattelut

Asiantuntijahaastattelut tapahtuivat avoimessa ja vapautuneessa ilmapiirissä ja ne suoritettiin puolistrukturoituna haastatteluina. Kaikille haastateltaville esitettiin samat kysymykset samassa järjestyksessä. Ennen haastattelua asiantuntijat tiesivät jo tutkimusongelmasta. Haastattelun aikana esitettiin myös tarkentavia kysymyksiä riippuen siitä, miten haastattelu eteni ja miten keskusteltiin. Koska haastattelun aikana strukturoitu ja vapaamuotoinen keskustelu vaihtelevat vaatii puolistrukturoitu haastattelu haastattelijalta joustavuutta sekä pelisilmää. (Opintokeskus Sivis 2019.)

Haastatteluihin osallistui kahdeksan asiantuntijaa. Haastattelut sujuivat pääsääntöisesti ilman häiriötä, mutta yhdessä tapauksessa haastateltava sai tärkeän puhelun, johon hänen oli vastattava ja toisessa tapauksessa haastattelutilaan tuli eräs haastateltavan kollega, joka tarvitsi vastauksen erääseen hyvin kiireelliseen kysymykseen. Nämä häi-

riöt eivät kuitenkaan vaikuttaneet juurikaan haastatteluun ja haastattelut jatkuivat normaalisti häiriöiden jälkeen.

5.4 Asiantuntijahaastatteluiden analysointi

Haastateltavien pieni määrä ei aina tarkoita sitä, että aineistoa olisi vähän. Jos henkilöitä on haastateltu useasti tai haastattelut ovat kestäneet pitkään, kertyy aineistoa runsaasti. Materiaaliin runsauteen vaikuttaa myös dialogin rikkaus, jota on käyty haastateltavan ja haastattelijan välillä. Dialogin rikkaudella on myös ongelmansa, koska se saattaa tehdä myös aineistosta varsin elämänläheistä ja tästä syystä analysointi voi muuttua haasteelliseksi. (Hirsjärvi & Hurme 2015, 135.)

Tutkimusaineiston analysointi suoritettiin muutama päivä sen purkamisen jälkeen. Analysointi kannattaakin suorittaa mahdollisimman nopeasti haastattelutilanteen jälkeen, koska silloin tutkija on vielä innostunut aiheesta ja hänellä on haastattelutilanne vielä tarkassa muistissa. Analysointitilanteessa saattaa myös paljastua, että joku tieto on puutteellinen ja tällaisten asioiden korjaaminen kannattaa tehdä mahdollisimman nopeasti haastattelutilanteen jälkeen. (Hirsjärvi & Hurme 2015, 135.) Haastattelujen analysoinnin apuna käytettiin Sirkka Hirsjärven ja Helena Hurmeen kirjoittamaa Tutkimushaastattelu: Teemahaastattelun teoria ja käytäntö -kirjaa.

5.4.1 Taustatiedot

Haastatelluista asiantuntijoista vain yksi oli aloittanut uransa toimeksiantajalla. Kaikki muut olivat työskennelleet ennen siirtymistään toimeksiantajalle jossain muussa tietoliikennealan yrityksessä. Nämä muut tietoliikennealan yritykset olivat operaattoreita tai matkapuhelinalan yrityksiä, jotka olivat joko keskittyneet itse puhelimiin tai puhelimissa käytettyihin modeemeihin. Kaikkein kokemattomimmalla haastateltavalla oli vain noin neljältä vuodelta kokemusta tietoliikennealalta ja kaikkein kokeneimmalla noin kaksikymmentä vuotta. Kuudella haastateltavista oli koulutustausta elektroniikassa tai sähkötekniikassa. Kaksi haastateltavista taas oli opiskellut tietotekniikkaa ennen työuransa alkua.

5.4.2 Haasteellisimmat teknologiamurrokset ja niistä selviytyminen

Haastatellut asiantuntijat nostivat esille muutamia erilaisia teknologiamurroksia, joita he olivat kohdanneet urallaan. Remote MACPHY oli kuitenkin toistuvin teema asiantuntijoiden vastauksissa. Hajautetun verkkoarkkitehtuurin Remote MACPHY-versio on ollut asiantuntijoiden työelämässä mukana jo vuodesta 2016, kun ensimmäisiä tämän teknologian tuotteita alettiin asentaa Pohjoismaissa. Kuvassa 3 on esitetty tämän teknologian lohkokaaviokuvaus.

Asiantuntijoiden mukaan Remote MACPHY-murroksesta on selvitty tähän asti hyvin, mutta itsestäänselvyys se ei ole ollut. Erityisiksi ongelmiksi nostettiin esille laitteiden epäkypsyydet, jotka ovat aiheuttaneet päänvaivaa muun muassa erilaisten yhteensopivuusongelmien muodossa. Asiantuntijat painottivat sitä, että tämä hajautetun arkkitehtuurin eri versioiden aiheuttama murrostila on edelleen päällä koaksiaaliverkoissa ja täyttä varmuutta ei voida sanoa, koska se loppuu. Asiantuntijat kuitenkin suhtautuivat optimistisesti tähän murrokseen ja uskoivat, että siitä selvitään, vaikka se vaatii paljon työtä ja uusien asioiden opiskelua. He pitivät etuna kilpailijoihin nähden sitä, että he pääsivät jo hyvin aikaisessa vaiheessa mukaan hajautettuun verkkoarkkitehtuuriin käytännön työssään Remote MACPHY-teknologian kautta ja tämä on ollut heidän mukaansa se syy miksi asiat ovat menneet hyvin tähän asti murrostilassa selviytymisessä. Haastattelujen perusteella ei saa kuitenkaan tuudittautua sellaiseen olotilaan, että menneisyydestä voi ennustaa tulevaisuutta. Vaikka asiat ovat menneet hyvin, täytyy tehdä paljon työtä ja olla utelias, jotta tulevatkin vuodet menevät hyvin.

DOCSIS 3.1 nostettiin myös haasteelliseksi murrokseksi, koska sen takia paluusuuntia ja myötäsuuntia on jouduttu suunnittelemaan uudella tavalla. Tästäkin on selvitty hyvin, koska ongelmatilanteissa on saatu apua toimeksiantajan tuotekehitysosastolta, joka on erikoistunut DOCSIS 3.1-verkkotuotteisiin.

5.4.3 Teknologiatrendit kuitu- ja koaksiaalipohjaisissa liityntäverkoissa

Moni haastatelluista asiantuntijoista nosti esille hajautetun verkkoarkkitehtuurin koaksiaaliverkoissa eli saman aihealueen kuin aiemmassa kysymyksessä. Remote PHY- ja Remote MACPHY-teknologiat ohjaavat asiantuntijoiden mukaan tiedonsiirtoa eteenpäin koaksiaaliverkoissa. Hajautetulla arkkitehtuurilla vastataan erityisesti taloyhtiöiden

tarpeisiin giga-nopeuksissa. Haastattelujen perusteella hajautetun verkkoarkkitehtuurin laitteilla tämä on hyvin helppoa, koska digitaalinen kuitulinkki parantaa suorituskykyä ja päävahvistimen tiloja ei tarvitse laajentaa yleensä.

Asiantuntijat puhuivat myös DOCSIS 3.1-teknologiasta. Monet operaattorit ovat päivittäneet jo verkkonsa vastaamaan tätä standardia, mutta Euroopassa on vielä alueita, joissa operaattorit suunnittelevat vasta muutosta vanhasta 3.0-teknologiasta kohti 3.1-teknologiaa.

Kuidun lisääntyminen on myös trendi, josta asiantuntijat puhuivat paljon. Perinteiset kupariverkot korvautuvat pala palalta kuidulla ja tätä kehitystä tukee muun muassa uudet kaivuuteknologiat kuten esimerkiksi mikrosahaus. Tämä ei kuitenkaan tarkoittanut sitä, että kuitu korvaisi täysin verkon joka menee tilaajalle asti vaan kuitu saatetaan tuoda lähimmälle vahvistimelle, joka korvataan optisella laitteella ja tästä asti liityntäverkko olisi vielä kuparia.

Uudet kuitustandardit, erityisesti ITU-T:n, ovat erään asiantuntijan mukaan ohjaava voima kuitupohjaisissa liityntäverkoissa. Hänen mukaansa erityisesti Yhdistyneessä Kuningaskunnassa kuituverkkojen ratkaisut pohjautuvat PON-standardeihin ja sen ympärille rakennettuun teknologiaan. Asiantuntija kertoi oppineensa tästä toimeksiantajan tytäryhtiön kautta, jonka pääkonttori sijaitsee Englannissa.

5.4.4 Markkinavaatimukset liityntäverkkojen kehityksessä

Haastattelujen perusteella asiantuntijat ovat melko yhtenäinen ryhmä, kun kysyttiin markkinavaatimuksista. Toistuvimmat vastukset olivat suoratoistopalveluiden, parempien kuvanlaatujen ja perinteisten lineaarikanavien katsomisen siirtyminen yhä enemmissä määrin Internettiin aiheuttama kapasiteetin tarpeen kasvu tietoliikenneverkoissa. Myös kuluttajien yhä lisääntyvä streemaaminen ja pilvipalveluiden käyttö asettavat operaattoreille painetta kehittää erityisesti paluusuuntien nopeuksia liityntäverkoissa asiantuntijoiden mukaan.

Pelaajat ja erityisesti e-urheilijat ovat haastattelujen perusteella myös oma ryhmänsä, jolla on omat vaatimuksensa liityntäverkkojen kehitystä silmällä pitäen. Pelaajat ja e-urheilijat odottavat verkoilta stabiiliutta sekä pientä latenssia ja ei niinkään suuria tiedonsiirtonopeuksia.

Tulevaisuuden IoT- ja 5G-ratkaisut voivat myös jossain vaiheessa nousta asemaan, jotka määrittelevät markkinoiden asettamia vaatimuksia liityntäverkoille, arvioivat haastatellut. 5G- ja IoT-ratkaisuja ollaan jo rakentamassa, mutta asiantuntijoiden mukaan he eivät ole olleet tämänkaltaisissa projekteissa mukana.

5.4.5 Julkisten toimijoiden vaikutus liityntäverkkojen kehitykseen

Haastattelujen perusteella julkisilla toimijoilla on negatiivisia ja positiivisia vaikutuksia liityntäverkkojen kehitykseen. Positiiviset vaikutukset ovat olleet nähtävissä kuiturakentamisessa, kun julkiset toimijat ovat taloudellisesti tukeneet kuiturakentamista erityisesti haja-asutusseuduilla. Asiantuntijat muistelevat, että tällaisten rahoitusten takana on ollut julkisten toimijoiden asettamat laajakaistastrategiat, joissa on tavoiteltu tiettyjä miniminopeuksia kaikille kansalaisille tiettyyn aikamääreeseen mennessä. Haastatteluissa selvisi myös, että positiivista kehitystä on myös sattunut puolivahingossa, kun esimerkiksi Suomen valtio on määrännyt sähköyhtiöitä tekemään verkoistaan säävarmempia. Käytännössä tämä on tarkoittanut sitä, että ilmassa olleet sähkökaapelit on asennettu maahan. Sähköyhtiöt ovat tässä tilanteessa tehneet yhteistyötä operaattorien kanssa ja asentaneet kuitua maahan, kun maa on ollut kaivettuna auki. Kaivuu on kuiturakentamisessa se suurin kuluerä.

Negatiivisista asioista erityisesti nousi esille FM-kanavien siirtovelvoite kaapelitelevisioverkoissa ja uusien kaivuumenetelmien kieltäminen joissakin kunnissa. Kun operaattorit ovat velvoitettuja kuljettamaan FM-kanavia koaksiaaliverkoissa, ei voida käytä DOCSIS 3.1-standardin 204 MHz:n paluusuuntaa, joka parantaisi perinteisten kaapelitelevisioverkkojen suorituskykyä. Myöskin jotkut kunnat eivät suostu antamaan lupaa mikrokaivuutekniikoilla, koska ne pelkäävät liiaksi, että tämä aiheuttaa ongelmia pyöräteiden ja maanteiden asfalttiin. Asiantuntijat pitivät tätä vähän turhana pelkona ja epäilivät, että kunnat haluaisivat, että operaattorit päällystäisivät teitä, jotka kuuluvat kunnan vastuulle.

5.4.6 Vahvuudet

Asiantuntijat nostivat selkeästi DOCSIS-osaamisen suurimmaksi vahvuudeksi. Tätä he perustelivat sillä, että palveluliiketoiminta on ollut jo pitkään mukana niin DOCSIS 3.0- ja DOCSIS 3.1-verkkojen rakentamis- kuin päivitysprojekteissa. Näitä projekteja on

ollut kansallisella ja kansainvälisellä tasolla ja kaikki on aina mennyt hyvin haastattelujen mukaan. Muutama asiantuntija nosti myös esille sen, että välillä asiakkaat siirtävät DOCSIS-suunnittelua niin sanotuista halvoista maista Suomeen. Tämä on haastattelujen perusteella ollut välillä ainoa mahdollisuus asiakkaiden projekteissa. Eräs asiantuntija sanoi: ”Palveluliiketoiminnan osaaminen on niin hyvää, että se selviytyy mistä vain mitä tulee DOCSIS 3.1-suunnitteluun”.

Asiantuntijat puhuivat myös kokemuksesta. Yksikössä työskentelee esimerkiksi yksi työntekijä, joka on aloittanut työuransa 1980-luvulla ja hänen ymmärryksensä kaapelitelevisioalasta on erittäin merkittävää. Haastattelujen mukaan tällainen yksilöiden kokemus tekee palveluliiketoiminnasta vahvan. Erään haastateltavan mukaan: ”He tietävät aina vastauksen joka ongelmaan ja kysymykseen”. Myöskään kilpailijat eivät voi tällaista kokemusta hankkia, koska se on syntynyt vuosikymmenien varrella, elleivät sitten he onnistu rekrytoimaan kokeneimpia henkilöitä. Asiantuntijat eivät pitäneet tällaista kuitenkaan ongelmana, koska he pitävät kaikista kokeneimpia työntekijöitä erittäin sitoutuneina työhönsä.

5.4.7 Kehittämiskohteet

Monet haastateltavat kertoivat, että kuituasioihin pitäisi panostaa enemmän, koska kuituverkot syrjäyttävät kuparin. Kuituosaamista ei pidetty huonona, mutta se nähtiin asiana, jonka tärkeyttä ei voi liiaksi painottaa. Haastateltavat näkivät sen parhaimpana tilanteena, että kaikilla olisi kaikki tarvittavat kuituteknologian tiedot mitä tarvitaan, jotta kuitupohjaisia liityntäverkkoja voidaan suunnitella, rakentaa ja operoida.

Hajautetun verkkoarkkitehtuurin Remote PHY ja Remote MACPHY-teknologiat nousivat myös tässä kohdassa esille. Haastateltavien mukaan kaikkiin tähän liittyviin asioihin pitää panostaa, koska näiden teknologioiden murrosvaihe on menossa. Se miten murrosvaihe etenee ja miten asiat menevät tarkasti tulevaisuudessa ei voi ennustaa ja tästä syystä tähän liittyvää teknologiaosaamista pitää kehittää laaja-alaisesti asiantuntijoiden mukaan.

5.5 Kyselyn toteutus

Haastattelujen rinnalla suoritettiin sähköpostikysely yksikössä, jotta voitiin selvittää yleisesti ja suuntaa-antavasti käsitys omasta osaamisesta. Kysely lähettiin kaikille yli kaksi vuotta toimeksiantajan Suomen yksikön palveluliiketoiminnassa työskenneille työntekijöille. Kaksi vuotta valittiin rajaksi, koska tänä aikana työntekijällä on todennäköisesti muodostunut jo realistinen käsitys oman osaamisen vahvuuksista ja heikkouksista. Osaamisalueet, joita työntekijöiden piti arvioida, oli tunnistettu toimeksiantajalle tärkeiksi tutkimuksen aikana.

5.6 Kyselyn tulokset

Taulukossa 5 nähdään valitut osaamisalueet ja näiden arvioiden keskiarvo. Kysely lähetettiin 14 työntekijälle, joista yhdeksän vastasi kyselyyn. Oman osaamisen arvioinnin asteikko oli 0–10, jossa nolla oli huonoin ja 10 paras. Erilaisia muitakin asteikkoja oltaisiin voitu käyttää, mutta 0–10 asteikkoa käytettiin tutkimuksessa, koska ihmiset pääsääntöisesti mieltävät nollan huonoimmaksi, vaikka eivät lukisi ohjeita kunnolla. Tällä 0–10 asteikolla saadaan myös paljon laajemmalta alueelta vastauksia kuin esimerkiksi 1–5, jossa vastauksilla on tapana olla kolmen ja neljän kohdilla. (Waypoint Group 2019.) Vastausaikaa sähköpostikyselyyn annettiin kaksi viikkoa ja ensimmäisen viikon jälkeen lähettiin muistutusviesti niille, jotka eivät vielä siihen mennessä olleet vastanneet.

Taulukko 5. Kyselyn tulokset.

Osaamisalue	Keskimääräinen oman osaamisen arvio
Kaapelitelevisio- ja kuituverkkojen historia	5.33
HFC	8.00
DOCSIS 3.1 & Full Duplex DOCSIS 3.1	7.50
CMTS-arkkitehtuuri(t)	4.20
CCAP-arkkitehtuuri(t)	4.00
Remote PHY	5.00
Remote MACPHY	3.40
Virtualisointi DOCSIS-sovelluksissa	0.67
Kuituverkkojen arkkitehtuurit (PtP, PON, AON)	3.00
Optiset tiedonsiirtostandardit liityntäverkoille. Erityisesti SCTE:n ITU:n ja IEEE:n luomat	2.00
HFC-, DAA, ja Fttx-teknologioiden markkinatilanne	3.00
Ennustetut ja toteutuneet kapasiteetin kasvut liityntäverkoissa sekä Nielsenin laki	3.00

5.7 Laatu, luotettavuus ja eettisyys

Tutkimuksen laatu, luotettavuus ja eettisyys pitää huomioida tutkimusta tehdessä. Tieteellinen tutkimus on luotettavaa ja eettisesti hyväksyttävää, jos se tehdään hyvän tieteellisen käytännön tavalla (Tutkimuseettinen neuvottelukunta 2012).

Sähköpostikysely on yksinkertainen tapa kerätä dataa, mutta tässä tutkimustavassa ei luonnollisesti pystytä varmistumaan, miten vastaajat vastaavat kyselyyn. On mahdollista, että jotkut pohtivat erittäin paljon vastauksiaan ja toiset pohtivat nopeasti asiat läpi, jotta kysely tulisi valmiiksi. Tämän työn tutkimuksessa voidaan olettaa, että kyselyyn vastaajat vastasit huolella, koska kysymyksessä oli heille tärkeiden asioiden kehittäminen.

Haastattelututkimuksen laatua voidaan yrittää parantaa monilla eri tavoilla. Hyvällä haastattelurungolla ja etukäteispohdinnalla siitä, minkälaisilla lisäkysymyksillä tutkimusta voidaan syventää ovat esimerkiksi keinoja saavuttaa hyvää laatua. Myös se, että haastattelut puretaan mahdollisimman nopeasti parantavat tutkimuksen laatua. (Hirsjärvi & Hurme 2015, 184–185.)

Haastattelututkimuksen luotettavuus riippuu paljolti tutkimuksen laadusta. Haastattelututkimusten laadusta puhuttaessa nostetaan myös esille käsitteitä reliaabelius ja vali-

dius ja nämä käsitteet perustuvat siihen, että tutkijalla on pääsy objektiiviseen tietoon tutkimuksessaan. (Hirsjärvi & Hurme 2015, 185.)

Tutkimuksen reliabeliteettia voidaan arvioida eri tavoilla. Eräs tapa määritellä reliabiliteetti on se, että jos henkilö haastatellaan kahdella eri kerralla, saadaan sama tulos. Ihmisillä on kuitenkin tapana kasvaa ja muuttua ajansaatossa henkisesti, joten ihmisten vastaukset haastelututkimuksiin saattavat vaihdella riippuen haastatteluajankohdasta. Toisenlainen tapa arvioida reliabeliteettia on se, että kaksi tutkijaa päätyy samaan tulokseen. Tämäkin arviointitapa on ongelmallinen, koska jokainen yksikö tekee tulkintojaan oman kokemuksensa pohjalta. Kolmas esiin nostettu tapa arvioida on se, että kahdella eri tutkimusmenetelmällä saadaan sama tulos. Ihmisen käyttäytyminen tosin saattaa vaihdella kontekstista, joten on epätodennäköistä, että kaksi tutkimusmenetelmää antaisi täysin saman tuloksen. Reliaabeliudesta puhuttaessa täytyy pitää mielessä sen ongelmallisuus. (Hirsjärvi & Hurme 2015, 186.)

Validiudella määritelmällä on erilaisia tyyppejä. Ennustusvalidius tarkoittaa sitä, että yhdestä tutkimuksesta voidaan ennustaa seuraavien tuloksia. Tutkimusasemavalidius taas erottelee neljä eri asiaa: tilastollinen validius, rakennevalidius, sisäinen validius ja ulkoinen validius. Rakennevalidiudesta puhuttaessa tarkoitetaan sitä, että käsitteleekö tutkimus sitä mitä sen pitäisi käsitellä. (Hirsjärvi & Hurme 2015, 186–187.)

Haastattelututkimuksen luotettavuuden ja laadun määrittäminen ei siis ole yksiselitteinen asia. Tässä tutkimuksessa pyrittiin maksimoimaan laatu panostamalla etukäteispohdintaan sekä etukäteistutkimukseen, jotta haastatteluista voitaisiin saada mahdollisimman laadukasta dataa.

Haastattelututkimuksessa pitää myös muistaa eettisyys, koska siinä eettiset ongelmat ovat monimutkaisia. Erityisen tärkeitä asioita eettisyydessä, kun tutkitaan ihmisiä, ovat oikeaan informaatioon perustunut suostumus, luottamus, ymmärrys seuraamuksista ja yksityisyys. (Hirsjärvi & Hurme 2015, 19–20.) Näitä asioita pohdittiin ja pidettiin mielessä koko haastattelututkimuksen ajan.

6 PÄÄTELMÄT, TULOSTEN ARVIOINTI JA HYÖTY

Haastattelututkimukset sekä kysely toivat paljon uutta tietoa tutkimuksen aihepiiristä. Haastattelututkimuksesta voidaan selkeästi nostaa esille se, että perinteiset DOCSIS- ja HFC-teknologiat koetaan vahvuuksiksi ja asiantuntijoiden suhtautumista näihin voi pitää jopa itsevarmana. Tähän viittaavat myös viimeaikaiset toimeksiantajan lehdistötiedotteet, joissa kerrotaan monista merkittävistä uusista koaksiaaliverkkojen päivitys- ja suunnitteluprojekteista.

Kyselyssä HFC ja DOCSIS 3.1 saivat korkeimmat keskiarvot ja tämä on saman suuntainen tulos haastattelujen kanssa. Muut kyselyn osa-alueet saivat selkeästi heikompia tuloksia. Virtualisointi sai tosin jopa huolestuttavan pienen keskiarvon eli vastaajilla on selkeästi puutteita tämän alueen piirissä. HFC- ja DOCSIS 3.1-aihealueiden arvioita voi pitää referensseinä muille siitä missä niiden arvioiden pitäisi olla.

Tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että HFC ja DOCSIS osa-alueiden teknologiaosaaminen toimeksiantajan palveluliiketoiminnassa on nykyisellä tasollaan riittävää ja on hankala nähdä, että miksi tämä nykyinen taso ei riittäisi myös tulevaisuudessa. DOCSIS- ja HFC-teknologiaosaamista ei voi siis pitää tämän tutkimuksen näkökulmasta kehittämiskohteena ja mahdollisia kehittämisresursseja ei näihin kannata käyttää.

Yleisellä tasolla ilmaistuna hajautettu verkkoarkkitehtuuri koaksiaaliverkoissa ja kuituteknologia tunnistettiin selkeiksi kehittämiskohteiksi työn aikana. Erityisen suuria puutteita hajautetun verkkoarkkitehtuurin osaamisessa tunnistettiin virtualisoinnissa. Tämän taustalla on todennäköisesti se, että kyseessä on uusi teknologia kaapelitelevisioverkoissa ja toimeksiantajalla ei ole vielä omia tuotteitta markkinoilla tästä teknologiasta. Aihealueiden kehittämisessä täytyy pitää mielessä se, että toimeksiantajan ei tarvitse kaikkea osata.

6.1 Kehittämiskohteet

Haastattelututkimuksessa nostettiin esille Remote MACPHY-teknologia, kun tutkimustilanteessa kysyttiin teknologiamurroksesta ja kehittämiskohteista. Tätä teknologiaa oli päästy käyttämään yksikössä hyvin aikaisessa vaiheessa, sillä 2016 teknologian tuottama liikevaihto oli ollut olematonta verrattuna perinteisiin koaksiaaliverkon teknologioi-

hin, kuten kuviossa 5 on esitetty. Remote PHY nousi myös esille haastattelututkimuksessa, kun puhuttiin kehittämiskohteista. Kyselytutkimuksessa arvioitiin osaaminen huonommaksi Remote MACPHY- kuin Remote PHY-teknologiassa. Kuvissa 2 sekä 3 on kuvattu nämä teknologiat lohkokaaviotasolla. Remote MACPHY on kompleksisempi ratkaisu kuin pelkkä Remote PHY, koska se siirtää MAC-tason pois päävahvistimelta. Asiantuntijoiden koulutustaustat olivat pääsääntöisesti elektroniikassa sekä sähkötekniikassa ja ei niinkään tietotekniikassa, johon MAC-taso liittyy. (Osi model 2019.) Tutkimus viittaa siihen, että asiantuntijoiden MAC-tason osaamista tulisi kehittää koulutuksilla tai vastaavilla toimenpiteillä, jotta Remote MACPHY:n ja Remote PHY:n osaaminen koettaisiin yhtä hyviksi. Molempien teknologioiden osaamista tulisi myös kehittää eteenpäin, sillä perinteiset HFC- ja DOCSIS 3.1-teknologiat koettiin sekä kyselyssä, että haastattelutilanteessa merkittävästi paremmaksi. Kuvio 5 viittaa siihen, että Remote PHY ja Remote MACPHY-teknologiat ohittavat liikevaihdossa perinteiset koaksiaaliverkon päävahvistinteknologiat vuonna 2020 ja vuonna 2022 ne tuottavat yli kolme kertaa enemmän liikevaihtoa laitevalmistajille kuin perinteiset teknologiat.

Markkinatutkimuksen mukaan virtualisointi tulee kasvattamaan markkinaosuuttaan koaksiaaliverkoissa merkittävästi tulevina vuosina (Laufer ym. 2018, 6), joten sitä ei voi jättää huomiotta. Tutkimus viittaa siihen, että toimeksiantajan on syytä lähteä liikkeelle virtualisoinnin perusteiden kouluttamisesta kehitystoimissaan. Virtualisointi kaapelitelevisioverkoissa on uusi asia, mutta siinä ei ole mitään mullistavaa tietotekniikan näkökulmasta, jota käsiteltiin luvussa 2.4.5.

Haastattelututkimus viittaa kuidun lisääntymisen trendiksi, joka ohjaa liityntäverkkojen kehitystä eteenpäin. Trendistä johtuen muun muassa vanhoja kupariverkkoja korvataan tietyissä tapauksissa kuidulla. Tutkimus viittaakin siihen, että kuituasioihin pitäisi panostaa enemmän, koska kuituverkot ovat tiedonsiirron tulevaisuus. Kuituosaamista ei pidetty huonona, mutta se nähtiin asiana, jonka tärkeyttä ei voi liiaksi painottaa. Kuvion 8 perusteella kuituverkot ovat kasvaneet Euroopassa tällä vuosikymmenellä merkittävästi, mutta Euroopassa on vielä hyvinkin paljon rakennettavaa, joka on nähtävissä kuviossa 9. Tutkimus viittaa siihen, että asiantuntijoiden näkemykset kuituteknologiasta ovat perusteltuja ja tämän osaamisen kehittämiseen tulee käyttää resursseja varsinkin, koska kuituteknologioihin liittyvät kohdat saivat kyselytutkimuksessa alhaisia arvoja verrattuna HFC- ja DOCSIS-osaamiseen.

Haastateltavan mukaan erityisesti Yhdistyneessä Kuningaskunnassa kuituverkkojen ratkaisut pohjautuvat PON-standardeihin ja niiden ympärille rakennettuun teknologiaan.

Kuviossa 14 on esitetty sitä, miten PON-standardit tulevat saavuttamaan hallitsevan markkina-aseman tulevina vuosina. Hallitsevan markkina-aseman saavuttamista tukevat myös ennustetut liikevaihdot jaoteltuna tekniikoittain, joka on esitetty kuviossa 11. Toimeksiantajan tytäryhtiöllä on tutkimuksen mukaan tietoa kuituteknologiasta, jota ei ole laajasti tunnettua yrityksen sisällä, mutta on tärkeää tulevaisuuden kannalta. Tämän tiedon laajempi hyödyntäminen yrityksen sisällä kehittäisi kuituteknologian osaamista. Kyselytutkimuksessa kuituverkkojen arkkitehtuurit ja standardit saivat alhaisia arvioita, joten vaikka haastattelussa eivät asiantuntijat juurikaan nostaneet näitä yksityiskohtia esille, on kyseessä kehittämiskohde kuituteknologiassa.

Asiantuntijat arvioivat haastattelututkimuksessa, että 5G ja IoT voivat myös jossain vaiheessa nousta asemaan, jotka määrittelevät markkinoiden asettamia vaatimuksia liityntäverkoille ja samalla kertoivat, etteivät ole olleet mukana projekteissa näihin liittyen. Toimeksiantajan lehdistötiedotteiden mukaan yrityksen tuottamaa teknologiaa on käytetty 5G-mastoissa, joten yritys on mukana tässä teknologiassa, vaikka tutkimus viittaa siihen, että tämä ei ole yrityksen sisällä yleisesti tiedossa. 5G-verkot tarvitsevat myös paljon enemmän kiinteää kuituverkkoa kuin edeltäjänsä ja eurooppalaiset valtiot olivat monissa tapauksissa päivittäneet digitaalisia infrastruktuuristrategioitaan ja asettaneet kuitu- sekä 5G-verkot näiden strategioiden keskiöön. Yrityksen sisäisen 5G-teknologiaosaamisen hyödyntäminen 5G-verkkojen tarvitseman kuituverkon osaaminen ovat tutkimuksen mukaan kehittämiskohteita.

Haastattelututkimus viittaa vahvuudeksi eräiden yksilöiden pitkällisen kokemuksen ja heidän sitoutumisensa toimeksiantajaan. Tämä asia on hieman monitahoinen ja tarkemmin tutkittuna ehkä kehittämiskohde. Se, että eräillä yksilöillä on merkittävät tiedot ja taidot kuitu- ja koaksiaaliteknologiasta on luonnollisesti vahvuus. Näiden osaavimpien yksilöiden kokemusperäistä tietoa tulisi organisaatiossa hyödyntää tehokkaammin, jotta osaaminen siirtyisi enemmän ja sitä kautta teknologiaosaaminen kehittyisi yleisesti yhä vahvemmaksi.

Haastattelututkimuksen perusteella asiantuntijoilla oli tietoa markkinavaatimuksista, jotka ohjaavat tietoliikenneverkkojen kehitystä eteenpäin. Kyselytutkimuksen mukaan taas tietoliikenteen kapasiteetin kasvun teoreettinen pohja ja eri teknologioiden markkinatilanteiden tietämys ovat parannuskohteita. Teoreettisen pohjan ymmärtäminen kapasiteetin kasvussa on kehittämiskohde, koska ei ole olemassa yhtä oikeaa ratkaisua, miten verkkoja tulisi kehittää. Kuvassa 4 on esitetty erilaisia polkuja operaattoreille ke-

hittää verkkojaan. Operaattorille oikeaan polkuun vaikuttavat muun muassa historia, käyttäjät ja markkinatilanne.

6.2 Tulosten arviointi

Haastattelutilanteissa kaikki haastateltavat ymmärsivät kysymykset ja tarkentavilla kysymyksillä pyrittiin varmistamaan, että tutkimuksen kannalta kaikki relevantti data saadaan kerättyä. Yleisestä näkökulmasta tarkasteltuna haastattelutilanteissa ei voi olla koskaan varma vastaako haastateltava niin kattavasti, kun hän pystyy vastaamaan. Haastateltavat ovat myös jokainen yksilöitä ja he näkevät maailman oman kokemuksensa kautta.

Tässä tutkimuksessa ei tunnistettu mitään syitä miksi haastatteluissa ei olisi vastattu niin kattavasti kuin mahdollista. Haastattelututkimuksien tarkoituksena oli juuri tutkia haastateltaville tärkeitä kehittämiskohteita ja sitä kautta hyödyttää heidän arkipäiväänsä. Koska haastattelujen taltiointiin ei käytetty nauhoituslaitteita, voidaan olettaa, että haastateltavat puhuivat vapautuneemmin kaikista asioista kuin muunlaisessa tilanteessa.

Kyselystä voidaan olettaa, että vastaajat vastasit parhaan kykynsä mukaan, koska kyselyssä tutkittiin myös vastaajille tärkeitä asioita. Se, että kysely oli samansuuntainen kuin haastattelu monilta osin on rohkaiseva asia ja lisää kyselyn sekä haastattelujenkin sisällön oikeellisuuden todennäköisyyttä.

6.3 Hyöty toimeksiantajalle

Tämän tutkimuksen hyöty toimeksiantajalle on todennäköisesti merkittävä, mutta ei kuitenkaan mullistava. Tutkimuksen historia- ja teoriaosuus tarjoaa toimeksiantajalla koulutusmateriaalia, jota se voi hyödyntää vanhojen sekä uusien työntekijöiden kouluttamisessa. Tutkimus antaa myös todennäköisesti itsevarmuutta toimeksiantajan ylemmälle johdolle lähteä viemään eteenpäin kehittämistoimenpiteitä, koska kehittämiskohteet eivät pohjaudu enää niin sanotusti tuntumaan.

Toimeksiantaja hyötyi myös tutkimuksesta siinä, että asiantuntijat joutuivat itse pohtimaan ja miettimään heidän työnsä kannalta merkittäviä asioita haastatteluissa. Pääsääntöisesti asiantuntijat vain tekevät omia töitään ja tässä on vaarana se, että men-

nään vain eteenpäin välittämättä kokonaisuudesta. Pelkillä asiantuntijahaastatteluilla on todennäköisesti merkittävä positiivinen vaikutus lyhyellä aikavälillä. Asiantuntijat tulevat todennäköisesti käymään toistensa kanssa samanlaisia keskusteluja kuin haastattelutilanteessa ja sitä kautta osaaminen kehittyy kuin vahingossa, kun jaetaan tietoa ja pohditaan erilaisia työntekemisen näkökulmasta tärkeitä asioita. Pitkällä aikavälillä toimeksiantajan on tärkeää jatkuvasti panostaa kehittämiseen, koska tuotteet ja palvelut perustuvat teknologioihin, jotka kehittyvät nopeasti.

LÄHTEET

Advanced Television 2018. Survey: Cablecos ramp up DOCSIS 3.1 investment. Julkaistu 8.8.2018. Viitattu 23.9.2018 https://advanced-television.com/2018/08/08/survey-cablecos-ramp-up-docsis-3-1-investment

Al-Banna, A.; Cloonan, T. & Howe, J. 2017. Network Migration Strategies for the Era of DAA, DOCSIS 3.1, and New Kid on the Block… Full Duplex DOCSIS. SCTE-ISBE, NCTA and Cablelabs Technical Forum 17–20.10.2017, Denver, Colorado, USA. Saatavilla sähköisesti osoitteessa https://www.nctatechnicalpapers.com/Paper/2017/2017-network-migration-strategies

Baumgartner, J. 2018. WOW Rolls With Nokia's Distributed Access Platform. Julkaistu 29.3.2018. Viitattu 1.6.2019 https://www.multichannel.com/news/wow-rolls-nokia-s-distributed-access-platform-415814

Breznick, A. 2018. Here Comes DOCSIS 4.0. LightReading 22.5.2018. Viitattu 23.9.2018 https://www.lightreading.com/cable/docsis/here-comes-docsis-40/d/d-id/743285

Broadband Forum 2018. The Future of Passive Optical Networking is Here MARKETING REPORT NG-PON2 Viitattu 18.5.2019 https://www.broadband-forum.org/wp-content/uploads/2018/11/BBF-112-NG-PON2-Marketing-Report-FINAL.pdf

BTR Staff 2018. Com Hem deploys Harmonic virtual CCAP. Broadband Technology Report 14.2.2018. Viitattu 28.4.2019 https://www.broadbandtechreport.com/articles/2018/02/com-hem-deploys-harmonic-virtual-ccap.html

Cable Europe 2018. Cable Facts & Figures. Viitattu 28.4.2019 http://www.cable-europe.eu/wp-content/uploads/2010/09/FF-YE-2017-LR.pdf

Cablelabs 2018a. 30 years Cablelabs. Viitattu 19.8.2018 https://www.cablelabs.com/30years/

Cablelabs 2018b. Driving Gigabit Speeds from Lab to Consumer. Viitattu 31.3.2019 https://www.cablelabs.com/gigabit-internet-speeds

Colabrese, M. 2016a. OFDM, Completely New in DOCSIS 3.1. The Volpe Firm 3.4.2016. Viitattu 10.9.2018 https://volpefirm.com/ofdm/

Colabrese, M. 2016b. DOCSIS 3.1 In Your Plant Now. The Volpe Firm 27.7.2016. Viitattu 10.9.2018 https://volpefirm.com/docsis-3-1-plant/

Colabrese, M. 2017. Remote PHY – What is All the Hype? The Volpe Firm 17.5.2017. Viitattu 7.10.2018 https://volpefirm.com/remote-phy-what-is-hype/

Colabrese, M. 2018. Full Duplex DOCSIS. The Volpe Firm 20.2.2018. Viitattu 23.9.2018 https://volpefirm.com/full-duplex-docsis/

Calix 2019. How do I know that GPON is right for my network? Viitattu 31.3.2019 https://www.calix.com/solutions/technologies/gpon.html

Coomans, W.; Chow, H. & Maes, J. Introducing Full Duplex in Hybrid Fiber Coaxial Networks. IEEE Communications Standards Magazine 3/2018

CSI 2018. Netia and Nokia claim Euro vDAA cable first. Julkaistu 28.10.2018. Viitattu 28.4.2019 http://www.csimagazine.com/csi/Netia-and-Nokia-claim-Euro-vDAA-cable-first.php

Effenberger, F.; Cleary, D.; Haran, O.;Kramer, G.; Ding Li, R.; Oron, M.; & Pfeiffer. T. 2007. An Introduction to PON Technologies. IEEE Communications Magazine March 2007. Viitattu 31.3.2019 http://www.pitt.edu/~dtipper/2011/PON_Tutorial.pdf

Eskola, L. 2010. Henkilöhaastattelun toteuttaminen, Ohjeistus aloittavalle toimittajalle. Opinnäytetyö. Viestinnän koulutus. Helsinki: Metropolian ammattikorkeakoulu. Viitattu 6.5.2019 https://www.theseus.fi/handle/10024/17009

European Telecommunications Network Operators' Association (ETNO) 2019. Annual economic Report 2019. Saatavilla sähköisesti osoitteessa https://etno.eu/datas/publications/annual-reports/ETNO%20Annual%20Economic%20Report%202019%20final%20web.pdf

Frankel, D. 2018. Arris R-PHY DAA Tech Deployed By Eltrona in Luxembourg. Multichannel 18.9.2019. Viitattu 28.4.2019 https://www.multichannel.com/news/arris-r-phy-daa-tech-deployed-by-eltrona-in-luxembourg

FSAN 2016. FSAN roadmap. Julkaistu marraskuussa 2016. Viitattu 31.3.2019 https://www.fsan.org/roadmap

Hamzeh, B. 2017. CableLabs Completes Full Duplex DOCSIS Specification. Cablelabs 11.10.2017. Viitattu 23.9.2018 https://www.cablelabs.com/cablelabs-completes-full-duplex-docsis-specification/

Heynen, J. 2019. CABLE OPERATORS USE DISTRIBUTED ACCESS AS THEIR PLATFORM FOR EDGE COMPUTING AND VIRTUALIZATION. Dell'Oro Group 18.2.2019. Viitattu 28.4.2019 http://www.delloro.com/jeff-heynen/2019-broadband-access-market-outlook-part-2

Hirsjärvi, S. & Hurme, H. 2015. Tutkimushaastattelu: teemahaastattelun teoria ja käytäntö. Toinen painos. Helsinki: Gaudeamus

Holonbinko, J.; McGilvray, G. & Ritchie, J. 2018. Analysis And Prediction Of Peak Data Rates Through DOCSIS Cores. SCTE-ISBE, NCTA and Cablelabs Technical Forum 22–25.10.2018, Atlanta, Georgia, USA. Saatavilla sähköisesti osoitteessa https://www.nctatechnicalpapers.com/Paper/2018/2018-analysis-and-prediction-of-peak-data-rates-through-docsis-cores

Huawei 2016a. Huawei and TDC Group, Denmark's largest telecoms operator, announce breakthrough deal to upgrade the broadband network to deliver speeds of 1 gigabyte per second. Julkaistu 28.1.2016. Viitattu 28.4.2019 https://www.huawei.com/en/press-events/news/2016/1/Huawei-and-TDC-Group

Huawei 2016b. Huawei Works with Telefonica de Peru to Build Latin America's First DOCSIS 3.1-compliant Converged UBB Network. Julkaistu 28.9.2016. Viitattu 28.4.2019 https://www.huawei.com/en/press-events/news/2016/9/Huawei-Telefonica-Peru-First-DOCSIS-UBB

Huawei 2019. Next-Generation PON Evolution. Viitattu 31.3.2019 https://www.huawei.com/ilink/en/download/HW_077443

Hybrid fibre-coaxial 2018. Wikipedia. Viitattu 18.5.2019 https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_fibre-coaxial

International Telecommunication Union (ITU) 2019. Transmission systems and media, digital systems and networks. Viitattu 31.3.2019 https://www.itu.int/rec/T-REC-G/en

Jump, L. 2017. Introduction to DOCSIS 3.1. Viitattu 4.9.2018 http://www.gcscte.org/presentations/2017/DOCSIS%203.1.pdf

Järvinen, P. 2016 Valokuidun ABC. Hotelli Presidentti 20.9.2016. Saatavilla sähköisesti https://www.finnet.fi/app/uploads/2016/06/Kuitukoulutus_Petteri-J%C3%A4rvinen.pdf

Knittle, C. 2016. Keeping Pace with Nielsen's Law. Cablelabs 15.9.2016. Viitattu 28.4.2019 https://www.cablelabs.com/keeping-pace-nielsens-law/

Knittle, C. 2018 Next Generation PON. Joint IEEE 802 and ITU-T Study Group 15 workshop "Building Tomorrow's Networks" Geneva, Switzerland, 27.1.2018. Viitattu 31.3.2019. https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/20180127/Documents/2.%20Curtis%20Knittle.pdf

Koplovitz, K. 2015. How Muhammed Ali, Joe Frazier and Satellites Changed TV History. MediaVillage 30.9.2015. Viitattu 13.8.2018 https://www.mediavillage.com/article/how-muhammed-ali-joe-frazier-and-satellites-changed-the-course-of-television-history/

Koski, M. 2016. Hajautettu CCAP ja hallintatyökalun vaatimusmäärittely. Diplomityö. Talouden- ja rakentamisen tiedekunta. Tampere:Tampereen teknillinen yliopisto

Laufer, T.; Putzeys, J. & Callesen, U. 2018. It's ALIVE! Getting to Successful R-PHY Deployment: Do's And Don'ts. SCTE-ISBE, NCTA and Cablelabs Technical Forum 22–25.10.2018, Atlanta, Georgia, USA. Saatavilla sähköisesti osoitteessa https://www.nctatechnicalpapers.com/Paper/2018/2018-it-s-alive-getting-to-successful-r-phy-deployment-do-s-and-don-ts

LightReading 2018. Denmark's Stofa Launches First Remote-PHY Network in Europe. Julkaistu 28.3.2018. Viitattu 28.4.2019 https://www.lightreading.com/cable/ccap-next-gen-nets/denmarks-stofa-launches-first-remote-phy-network-in-europe/d/d-id/741827

Liikenne- ja viestintäministeriö 2016. Televisio- ja radio-ohjelmien siirtovelvoite. Julkaistu 18.3.2016. Viitattu 31.5.2019 https://www.lvm.fi/lvm-site62-mahti-portlet/download?did=197743

Lindfors, J. 2006. Kaapeli-tv tuli Pietarsaareen. Yle 23.4.2015. Viitattu 18.5.2019 https://yle.fi/aihe/artikkeli/2006/09/08/kaapeli-tv-tuli-pietarsaareen

Luo, Y. 2018. ITU-T PON standards - progress and recent activities. ITU-T/SG15 San Diego 15.3.2018. Viitattu 31.3.2019 https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2017-2020/15/Documents/OFC2018-2-Q2_v5.pdf

MarketsAndMarkets 2019. Hybrid Fiber Coaxial Market by Technology (DOCSIS 3.0 & Below and DOCSIS 3.1), Component (CMTS/CCAP, Fiber Optic Cable, Amplifier, Optical Node, Optical Transceiver, Splitter, and CPE), and Geography - Global Forecast to 2023. Julkaistu tammikuussa 2019. Viitattu 28.4.2019 https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hybrid-fiber-coaxial-market-190042659.html

Matatyaou, A. 2017. What is Remote PHY?. Virtualization of the Core. Harmonic. Viitattu 19.11.2018. https://www.scte.org/SCTEDocs/Expo/PHY/SCTE%20-%20RPHY%20Seminar%20-%20Harmonic.pdf

Martens, L. 2014. OFDM(A) in DOCSIS 3.1: multiplexing, modulation and multiple access? Excentis 27.10.2014. Viitattu 12.9.2018 https://www.excentis.com/blog/ofdma-docsis-31-multiplexing-modulation-and-multiple-access

Montagne, R. 2019a. FTTH Council Europe Panorama & Forecast. Market at September 2018 & Forecast by 2020 & 2025. FTTH Council Europe Conference 12.-14.3.2019 Netherlands, Amsterdam.

Montagne, R. 2019b. FTTH Forecast for Europe. Europe Broadband Status. Market Forecast by 2020 and 2025. FTTH Council Europe Conference 12.-14.3.2019 Netherlands, Amsterdam. Saatavilla sähköisesti osoitteessa https://www.ftthcouncil.eu/documents/Reports/2019/FTTH%20Council%20Europe%20-%20Forecast%20for%20EUROPE%202020-2025.pdf

McWilliams, M. 2014. RFoG Introduction, Maintenance and Troubleshooting. Aurora Networks 11.12.2014 Viitattu 31.3.2019 https://www.sctegoldengate.com/RFoG_Introduction__SOCAL_SCTE%20Dec2014%20rev%20a.pdf

Nahin, P. 2002. Oliver Heaviside: The Life, Work, and Times of an Electrical Genius of the Victorian Age. Paperbacks Edition. Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University. Saatavilla sähköisesti osoitteessa https://books.google.fi/books/about/Oliver_Heaviside.html?id=e9wEntQmA0IC&redir_esc=y

Nestor Cables Oy 2015. FTTX optiset liityntäverkot. Ensimmäinen suomenkielinen painos. Saatavilla sähköisesti osoitteessa https://www.nestorcables.fi/nestor-cables-oy/aineistopankki/fttx-kirja-optisista-liityntaverkoista

Nielsen, J. 2018. Nielsen's Law of Internet Bandwidth. Nielsen Norman Group 1.6.2018. Viitattu 28.4.2019 https://www.nngroup.com/articles/law-of-bandwidth/

Opintokeskus Sivis 2019. Haastattelu. Viitattu 6.5.2019 https://www.ok-sivis.fi/jarjestoarvioinnin-ilmansuuntia/arvioinnin-tiedonkeruun-menetelmia/haastattelu.html

Osi model 2019. Wikipedia. Viitattu 1.6.2019 https://en.wikipedia.org/wiki/OSI_model

Parsons, P. 2008. Blue Skies a History of Cable Television. Philadelphia: Temple University

Robichaux, M. 2002. Cable Cowboy: John Malone and the Rise of the Modern Cable Business. First Edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc.

Saaranen-Kauppinen, A. & Puusniekka, A. 2006. Teemahaastattelu. Viitattu 6.5.2019 https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/kvali/pohdittavaa.html

Satkowiak, L. 2015a. The Cable Industry – A Short History Through Three Generation. Denver, Colorado: The Cable Center

Satkowiak, L. 2015b. Ed Parsons Brings Cable to Astoria. Cablefax 29.1.2015. Viitattu 12.8.2018 http://www.cablefax.com/cablefax_viewpoint/ed-parsons-brings-cable-astoria

Sawall, A. 2018. Huawei arbeitet an Docsis 4.0 mit 25 GBit/s Full Duplex. Golem 14.6.2018. Viitattu 23.9.2018 https://www.golem.de/news/kabelnetz-huawei-arbeitet-an-docsis-4-0-mit-25-gbit-s-full-duplex-1806-134966.html

Schnoor, J. 2019. Be a Part of the Next Generation – Join the Next Remote PHY Interoperability Event. Cablelabs 25.4.2019. Viitattu 28.4.2019 https://www.cablelabs.com/join-next-remote-phy-interoperability-event

Sercu, K. 2014. The differences between US DOCSIS and EuroDOCSIS, and will DOCSIS 3.1 eliminate them? Excentis 27.10.2014. Viitattu 4.9.2018. https://www.excentis.com/blog/differences-between-us-docsis-and-eurodocsis-and-will-docsis-31-eliminate-them

Society for Broadband Professionals (SCTE) 2016. DOCSIS® 3.1 – An Overview. Youtube-videopalvelu, julkaistu 7.11.2016, Viitattu 4.9.2018. https://www.youtube.com/watch?v=ZwKuPZVh19Y

Society for Broadband Professionals (SCTE) 2018. Radio Frequency over Glass Fiber-to-the-Home Specification. Viitattu 31.3.2019 https://www.scte.org/SCTEDocs/Standards/SCTE%20174%202018.pdf

Spangler, T. 2019. Cord-Cutting Sped Up in 2018: Biggest Pay-TV Ops Shed 3.2 Million Subscribers Last Year. Variety 13.2.2019. Viitattu 28.4.2019

https://variety.com/2019/biz/news/cord-cutting-2018-accelerate-us-pay-tv-subscribers-1203138404/

Stansell, J; Fox, B; & Lamb, J. 1982. Britain hung up on cable TV. Newscientist. Vol 94, No 1299 1.4.1982. Viitattu 10.2.2019 https://books.google.fi/books?id=FCfWxhHWAZMC&pg=PA29&lpg=PA29&dq=britain+hung+up+on+cable+tv&source=bl&ots=Ez4BuzxZSi&sig=ACfU3U08oWH0dRs51Ayvr8ouXRYHqoDa8g&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwjducGlibLgAhVl5aYKHbQHBoEQ6AEwCnoECAsQAQ#v=onepage&q=britain%20hung%20up%20on%20cable%20tv&f=false

Techopedia 2018. Techopedia explains Cable Modem Termination System (CMTS). Viitattu 30.9.2018 https://www.techopedia.com/definition/14790/cable-modem-termination-system-cmts

Telecompaper 2019. 3 Denmark, Sweden customers use 400 GB to watch 'Game of Thrones', up 300% on previous week. Julkaistu 15.4.2019. Viitattu 28.4.2019 https://www.telecompaper.com/news/3-denmark-customers-use-400-gb-to-watch-game-of-thrones-up-300-on-previous-week--1288950

TeleGeography 2017. Vodafone Spain calls on Huawei for fixed broadband network upgrade. Julkaistu 10.1.2017. Viitattu 28.4.2019 https://www.telegeography.com/products/commsupdate/articles/2017/01/10/vodafone-spain-calls-on-huawei-for-fixed-broadband-network-upgrade/

Teleste 2017. Teleste and Cisco making great strides in Remote PHY interoperability. Julkaistu 17.10.2017. Viitattu 28.4.2019 https://www.teleste.com/news/2017/teleste-and-cisco-making-great-strides-remote-phy-interoperability

Tonn, C. 2018. That ’70s Interactive TV. Tedium 26.1.2018. Viitattu 19.8.2018 https://tedium.co/2018/06/26/qube-cable-television-history/

Tutkimuseettinen neuvottelukunta 2012. Hyvä tieteellinen käytäntö (HTK). Viitattu 1.6.2019 https://www.tenk.fi/fi/hyva-tieteellinen-kaytanto

Ulm, J. & Maricevic, Z. 2016. FUTURE DIRECTIONS FOR FIBER DEEP HFC DEPLOYMENTS. Arris 2016. Viitattu 28.4.2019 https://www.arris.com/globalassets/resources/white-papers/scte-future-directions-for-fiber-deep-hfc-deployments.pdf

Ulm. J, & Cloonan, T. 2017. Traffic Engineering in a Fiber Deep Gigabit World. SCTE-ISBE, NCTA and Cablelabs Technical Forum 17–20.10.2017, Denver, Colorado, USA. Saatavilla sähköisesti osoitteessa https://www.nctatechnicalpapers.com/Paper/2017/2017-traffic-engineering-in-a-fiber-deep-gigabit-world

van der Linden, R. 2018. Adaptive Modulation Techniques for Passive Optical Networks. Doctoral thesis Netherlands, Eindhoven: Eindhoven University of Technology Viitattu 10.2.2019 https://pure.tue.nl/ws/files/93929754/20180417_van_der_Linden.pdf

Viavi 2017. Remote PHY Architectures: Operational Challenges and Opportunities. Viitattu 7.10.2018 https://www.viavisolutions.com/ru-ru/literature/remote-phy-architectures-operational-challenges-and-opportunities-white-paper-en.pdf

Virgin Media Jobs 2014. Virgin Media History. Youtube-videopalvelu, julkaistu 16.6.2016. Viitattu 10.2.2019 https://www.youtube.com/watch?v=L228pGpphe4

Virtualisointi 2018. Wikipedia. Viitattu 19.5.2019 https://fi.wikipedia.org/wiki/Virtualisointi

Volpe, B. 2017. To Boldly Go Where Cable Has Not Gone Before – Virtual CMTS/CCAP. Broadband Library 25.8.2017. Viitattu 19.11.2018 https://broadbandlibrary.com/virtual-cmts-ccap/

Waypoint Group 2019. Stop Debating the Survey Question Scale: Why a 0-10 Scale is Your Best Option. Viitattu 31.5.2019 https://waypointgroup.org/why-a-0-10-scale-is-your-best-option/

Weissberger, A. 2017. Combined FTTH and DSL spending set to slow until 10 Gbps PON and G.fast deployments. IEEE ComSoc Technology Blog 27.5.2017. Viitattu 12.5.2019 http://techblog.comsoc.org/2017/05/27/combined-ftth-and-dsl-spending-set-to-slow-until-10-gbps-and-g-fast-deployment/

Walker, M. 2018. Enabling Smart Communities. Cablelabs. Viitattu 12.5.2019 http://www.ncsl.org/Portals/1/Documents/energy/Smart_Comm_M_Walker_present_32335.pdf

Wang, B.; Xu, J. & Fu, Z. 2011. Proposal for Extended EPON PMD. Extended EPON Study Group. November 2011. Atlanta, GA, USA. Viitattu 31.3.2019. http://www.ieee802.org/3/EXTND_EPON/public/1111/ExEPON_1111_xu_1.pdf

Westover, B. 2018. What Is Gig-Speed Internet? Tom's Guide 13.2.2018. Viitattu 19.5.2019 https://www.tomsguide.com/us/gig-speed-internet,review-5134.html

Xiao, Y. 2016. Timing Recovery for DOCSIS 3.1 Upstream OFDMA Signals. Master thesis. Department of Electrical and Computer Engineering. Canada, Saskatchewan, Saskatoon: University of Saskatchewan. Viitattu 13.9.2018 https://ecommons.usask.ca/bitstream/handle/10388/7308/XIAO-THESIS-2016.pdf;jsessionid=F0C9E5DB1176D4CEE233C9251F99D933?sequence=1