

Opinnäytetyö (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

2020

Jousia Piha

VALOKUITUVERKKOJEN RAKENTAMINEN SUOMEN HAJA-ASUTUSALUEILLA

Jousia Piha

VALOKUITUVERKKOJEN RAKENTAMINEN SUOMEN HAJA-ASUTUSALUEILLA

Luotettavasti toimivat ja kehittyvän tietoyhteiskunnan tarpeisiin vastaavat valokuituverkot ovat välttämättömyys nykyaikaisessa liike-elämässä, tavallisessa arjessa ja vihteessä. Suomen kaupunkialueilla valokuituyhteyksiä on pääsääntöisesti saatavilla, sillä valtaosa tietoliikenneinfrastruktuurista rakennetaan markkinaehtoisesti. Valokuituverkkojen rakentamisen markkinaehtoisuus tuo kuitenkin ongelman Suomen harvaan asutuille alueille, joille teleoperaattorit eivät ole halukkaita rakentamaan yhteyksiä, vaikka asukkaat niitä tarvitsisivat. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli yleisellä tasolla perehtyä nykyaikaisten valokuituverkkojen ei-markkinaehtoiseen rakentamiseen Suomen haja-asutusalueilla.

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin valokuituverkon rakentamiseksi vaaditun tekniikan perusteisiin ja niihin keinoihin, joilla harvaan asutuille alueille voidaan saada tehokkaat valokuitutekniikkaan perustuvat tietoliikenneyhteydet. Työssä käytetty lähdemateriaali koostettiin akateemisesta kirjallisuudesta ja seutuverkkoja rakentaneiden organisaatioiden julkaisuista. Kirjallisuuteen nojaten tarkasteltiin vaihe vaiheelta seutuverkkojen rakentamisen prosessia. Työn menetelmä on siten kirjallisuuskatsauksen ja seutuverkkohankkeen prosessikuvauksen yhdistelmä.

Huomattiin, että tietoliikenneverkkoja rakennetaan haja-asutusalueille runsaasti asukasyhteisöjen voimin. Seutuverkkojen perustaminen ja rakentaminen on usein lähtöisin asukasyhteisön omasta halusta saada alueelleen paremmat verkkoyhteydet. Tämä havainto johti siihen, että tarkastelun keskiöön nousi asukkaiden aktiivisuudesta lähtevän valokuituverkon rakennushankkeen työvaiheet ja prosessiin liittyvä vastuunjako esimerkiksi asukkaiden, kunnan, kaupallisten toimijoiden sekä muiden sidosryhmien välillä. Näin toteutui opinnäytetyön tarkoitus luoda yleistajuinen kokonaiskäsitys valokuituverkon rakentamisen prosessista haja-asutusalueelle Suomessa.

ASIASANAT:

tietoliikenneverkko, seutuverkko, kuituoptiikka, valokuitu

BACHELOR'S / MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Information and Communication Technology

2020 | 52 pages

Author(s)

BUILDING FIBER OPTIC NETWORKS IN THE RURAL AREAS OF FINLAND

Contemporary business and everyday life and entertainment demand reliably functioning fiber-optic communication networks that satisfy the requirements of constantly developing information society. In the urban Finland, fiber-optic broadband subscriptions are generally available, because telecommunications infrastructure is mainly built on market terms. However, the market-based approach in building fiber-optic networks is problematic in the rural Finland, where telecommunication companies are not willing to build new infrastructure even if it is needed by the residents. The purpose of this thesis was to gain general knowledge of the construction process of a non-commercial fiber-optic network in rural Finland.

This thesis explores the fundamentals of the technology required to build a fiber-optic network. Furthermore, the thesis discusses the means and factors that make a fiber-optic network a possibility in rural areas. The sources used in the thesis is gathered from academic literature and publications of organizations that have built rural fiber-optic networks. Therefore, the methodology of this thesis is a combination of literature review and a general process description of a rural fiber-optic network construction project.

It is observed that telecommunications networks are built abundantly in rural areas by the residents themselves. These rural fiber-optic networks are commonly established and built purely because the residents want to have a powerful fiber-optic broadband connection. The thesis explores the general stages of a construction project of a rural fiber-optic network build by the residents. The thesis examines the sharing of responsibilities between the residents, the municipality, the commercial operators, and other interest groups. As a result, it provides an overall concept of the process of building fiber-optic networks in the rural areas of Finland.

KEYWORDS:

Telecommunications network, fiber optics, wide area network, optical fiber

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	6
1 JOHDANTO	1
2 OPTISEN TIEDONSIIRRON HISTORIA SUOMESSA JA MAAILMALLA	3
2.1 Kaupallistuminen maailmalla	4
2.2 Valokuidun kehitys Suomessa	5
3 VALOKUITU TIEDONSIIRTOMENETELMÄNÄ	6
3.1 Fysikaalinen peruseriaate	6
3.2 Valokuidun rakenne ja kaapelit	8
3.2.1 Valokuidun perusrakenne	8
3.2.2 Valokuidun materiaalit	10
3.2.3 Kestävyys ja vetolujuus	12
3.2.4 Valokuitukaapelin rakenne	12
3.2.5 Kaapelien ja valokuitujen standardit	17
3.3 Valokuituverkon laitteet	19
3.4 Valokuituverkon rakenteet	21
4 KUITUVERKON NYKYTILA JA TOIMIJAT SUOMESSA	24
4.1 Runkoverkko ja teleoperaattorit	24
4.2 Kunnat	25
4.3 Yksityiset yhtiöt ja osuuskunnat	25
4.4 Urakoitsijoiden rooli	26
5 ASUKASYHTEISÖLÄHTÖISET SEUTUVERKOT	28
5.1 Idea paremmista tietoliikenneyhteyksistä	28
5.2 Hankkeen valmisteluvaihe	29
5.2.1 Liiketoimintamalli ja rahoitus	29
5.2.2 Sidosryhmät, markkinointi ja tiedotus	31
5.2.3 Päätökset	31
5.3 Rakennusvaihe	35
5.3.1 Rakennustyöt ja vastuiden jakautuminen	35
5.3.2 Dokumentaatio, luvat ja hakemukset	38
5.4 Käyttöönottovaihe, ylläpito ja valvonta	39

5.5 valokuituverkko ja kehittyvä yhteiskunta	40
--	----

6 LOPUKSI	42
------------------	-----------

LÄHTEET	44
----------------	-----------

KUVAT

Kuva 1. Valon taittumislakia havainnollistava kuvio.	6
Kuva 2. Kokonaisheijastuminen valokuidussa.	7
Kuva 3. Kuusi valokuitua yhden vaipan sisällä.	9
Kuva 4. Erityyppisiä valokuituja oikeissa mittasuhteissa keskenään.	10
Kuva 5. Esimerkki valokuitukaapelin rakenteesta. Kuvassa kerrattu rakenne.	14
Kuva 6. Valokuitukaapelin urarunkorakenne ja ontelorakenne.	15
Kuva 7. Erikoisvahvistettu kaapeli sisäkäyttöön.	16
Kuva 8. Valokuituja kytkettynä verkkolaitteeseen.	20
Kuva 9. Verkon kolme topologiaa: väylä, tähti ja rengas.	22
Kuva 10. Suuren alueen rengastopologia ja siihen liittyvä pienempi tähti- ja rengastopologia.	22

TAULUKOT

Taulukko 1. Eri paksuisissa ytimissä käytettävien kuorten standardipaksuudet.	9
Taulukko 2. Tavallisimmat valokuitustandardit.	17
Taulukko 3. Kolme esimerkkiä erilaisista hallinta- ja ylläpitomalleista.	34

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

ANSI	Yhdysvaltalainen standardien kehittämistä valvova organisaatio. American National Standards Institute
DWDM	Tiheä aallonpituuskanavointi (dense wavelength division multiplexing)
FTTB	Kuitu rakennukseen (fiber to the building)
FTTC	Kuitu katujakamoon (fiber to the curb)
FTTC/N/Z	Kuitu, joka ei tule loppukäyttäjälle asti. FTTC:n, FTTN:n ja FTTZ:n yläkäsite.
FTTH	Kuitu kotiin (fiber to the home)
FTTN	Kuitu liityntäsolmuun (fiber to the node)
FTTZ	Kuitu alueelle (fiber to the zone)
GGP	Lasi-lasi-polymeerikuitu (glass, glass, polymer)
HCS	Kovakuori-piidioksidikuitu (hard-clad silica)
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio. International Electrotechnical Commission
ISO	Kansainvälinen standardointiorganisaatio. International Organization for Standardization
ISP	Palveluntarjoaja (Internet service provider)
ITU	Kansainvälinen televiestintäliitto (International Telecommunication Union)
OSI	OSI-malli (open systems interconnection reference model)
PCS	Muovikuori-piidioksidikuitu (plastic-clad silica)
PON	Passiivinen valokuituverkko (passive optical network)
RX	Vastaanottaa, vastaanotin (receive)
TDMA	Aikajakokanavointi (time-division multiple access)
TIA	Tietoliikenneteollisuuden liitto. Telecommunications Industry Association
TX	Lähettää, lähetin (transmit)
WDM	Aallonpituuskanavointi (wavelength division multiplexing)

1 JOHDANTO

Tietoliikennetekniikka on jatkuvassa kehityksessä, ja jo Bellin ensimmäisten puhelinten ajalta siltä on vaadittu koko ajan eksponentiaalisella tavalla lisää kantokykyä. Valokuitutekniikka on pystynyt vastaamaan tähän tarpeeseen jo 1980-luvulta alkaen, ja tekniikka kehittyi edelleen: International Electrotechnical Commission (IEC), Kansainvälinen televiestintäliitto (ITU) ja American National Standards Institute (ANSI) antavat muutaman vuoden välein uudistettuja versioita valokuitutekniikkaan liittyvistä standardeista. [1]

1980-luvun aikana valokuitu yhdisti lähinnä mantereita, maita ja suuria väestö- ja teollisuuskeskittymiä ja oli runkoverkon roolissa. Vuosikymmenen lopulla alettiin valokuitu nähdä kuparikaapelin seuraajana lähitulevaisuuden liityntäverkkotekniikkana. Valokuidun käyttöä liityntäverkkona alettiin tutkia maailmanlaajuisesti 1990-luvun aikana. Suomi oli tällöin muiden Fennoskandian maiden kanssa edelläkävijöiden joukossa: Helsingin Puhelinyhdistys rakensi kokeellisen kuuden kerrostalon FTTB-rengasverkon Helsinkiin vuonna 1992. Tämä testaus osoitti, että suotuisten olosuhteiden vallitessa olisi realistista toteuttaa esimerkiksi lähiöalueille tulevia (FTTC/N/Z) liityntäverkkoja, joista yhteys jatkettaisiin olemassa olevilla puhelinjohdoilla loppukäyttäjälle. Vielä 90-luvun tekniikalla loppukäyttäjälle asti tulevia valokuituyhteyksiä pidettiin liian kalliina. [1]

Valokuitutekniikalla toteutetut liityntäverkot olivatkin tilaajien lähelle tulevia ratkaisuja paljolti 2000-luvun ensikymmenen lopulle asti, joskin jonkin verran rakennettiin asuin- ja toimistorakennuksiin päättyviä valokuituyhteyksiä. Vasta 2010-luvulla alettiin nähdä selkeää kehitystä, jossa puhelinyhtiöt sekä erilaiset yksityiset yhtiöt ja osuuskunnat alkoivat rakentaa rakennuksiin ja koteihin asti ulottuvia liityntäverkkoja.

Luotettavasti toimivat ja kehittyvän tietoyhteiskunnan tarpeisiin vastaavat valokuituverkot ovat välttämättömyys nykyaikaisessa liike-elämässä, tavallisessa arjessa ja viihteessä. Suomen kaupunkialueilla valokuituyhteyksiä on pääsääntöisesti saatavilla, sillä valtaosa tietoliikenneinfrastruktuurista rakennetaan markkinaehtoisesti. Valokuituverkkojen rakentamisen markkinaehtoisuus tuo kuitenkin ongelman Suomen harvaan asutuille alueille, joille teleoperaattorit eivät ole halukkaita rakentamaan yhteyksiä, vaikka niille olisi tarvetta.

Kun väestön harvuuden vuoksi kaupallinen investointi syrjäseutujen tietoliikenneinfrastruktuuriin ei ole kannattavaa, asukasyhteisöjen oma aktiivisuus verkkojen itsenäiseen

rakentamiseen tulee oleelliseksi. Lukuisille Suomen haja-asutusalueille onkin perustettu yksityisiä yhtiöitä ja osuuskuntia rakentamaan valokuituliityntäverkkoa, sillä myös syrjäseutujen kuluttajia ja yrityksiä kiinnostaa nykyajan ja tulevaisuuden tarpeisiin vastaava tietoliikennepalvelu. Pelkästään Suomen Seutuverkot ry:llä on 49 valokuituverkkoja rakentavaa jäsentä [2]. Tällaisia yksityis-, EU-, ELY-keskus- ja kuntarahoitteisia projekteja on jo saatu runsaasti valmiiksi, ja uusia verkkoja on jatkuvasti rakenteilla ja suunnitteilla [3].

Tiedonsiirto valokuitua käyttäen on jo teknisiltä ominaisuuksiltaan monimutkainen, ja siksi verkon suunnittelu ja rakentaminen vaatii runsaasti teknisten erikoisalojen ammattitaitoa. Teknisten haasteiden lisäksi valokuituverkon toteuttamiseen liittyy monenlaisten ongelmien ratkaisua. Rahoitus on ilmeinen ongelma, ja siihen pyrkivät mainitut seutuverkot löytämään tilanteen mukaisia ratkaisuja. Rakennushankkeisiin liittyy kuitenkin paljon muitakin toimijoita, kuten suuria operaattoreita runkoverkkoineen, valtiollisia ja kunnallisia instituutioita, maanomistajia ja urakoitsijoita.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kuvata kuituverkkojen ja erityisesti alueellisten liityntäverkkojen nykytilaa Suomessa ja eritellä sen rakentamiseen ja kehittymiseen liittyviä haasteita. Aihetta pohjustetaan lyhyellä katsauksella optisen tiedonsiirron historiaan sekä valokuidun fysikaalisiin ja teknisiin perusperiaatteisiin, minkä jälkeen perehdytään verkon toteuttamiseen liittyviin toimijoihin. Samalla eritellään haja-asutusalueiden valokuituverkkototeutuksien keskeisimpiä vaatimuksia ja pohditaan, mitä haasteita ja toisaalta mahdollisuuksia tulevaisuus uusine palvelumalleineen ja tekniikoineen tuo tullessaan.

Opinnäytetyön lähteinä on käytetty Suomen Seutuverkot ry:n, Lapin liiton ja Pohjois-Karjalan maakuntaliiton valokuiturakentamista käsitteleviä julkaisuja. Ne ovat luonteeltaan käytännön oppaita ja esitteitä ja perustuvat tekijöidensä kokemuksiin. Tässä opinnäytetyössä on huomioitu, että lähteet eivät ole tieteellisiä julkaisuja eivätkä siten pyri osoittamaan yleispäteviä ehdottomia totuuksia. Ne kuitenkin ovat aiheen käytännön läheisyyden kannalta relevantteja esimerkkejä siitä, miten seutuverkon rakennusprosessi voi edetä.

Lähteinä on myös muutamia teknisiä standardeja, tutkimusartikkeleita ja lainkohtia. Teknisten osioiden kirjoittamisessa on nojattu valokuituja ja televiestinnän historiaa käsitteleviin yleisteoksiin tai oppikirjoihin maineikkailta akateemisten tekstien kustantajilta. Tarvittaessa viitataan myös yritysten tai organisaatioiden verkkosivuihin.

2 OPTISEN TIEDONSIIRRON HISTORIA SUOMESSA JA MAAILMALLA

Näkyvän valon käyttäminen viestintäteknikassa ei konseptina ole erityisen uusi. Muinaisista valomerkeistä ja varoitustulista voidaan toki puhua tiedonsiirtomenetelminä, mutta tässä tarkastellaan järjestelmällisen laitteistoperusteisen optisen tiedonsiirron kehitystä. Sen voidaan katsoa alkaneen 1790-luvulla, jolloin ranskalainen Claude Chappe kehitti ensimmäisen käytännöllisen optisen lennätinjärjestelmän, jossa 4–15 km:n välein asetetut viestiasemat lennätintorneineen kantoivat viestin yli 200 km:n matkan kahdessa minuutissa. Vastaavanlaiset järjestelmät yleistyivät nopeasti. [1]

Optisilla lennättimillä ei kuitenkaan ollut mitään tekemistä valokuidun kanssa. Valokuidun kehitys alkoi vasta myöhemmin, paljon sen jälkeen kun sähköjohtavuuteen perustuvat tiedonsiirtojärjestelmät olivat syrjäyttäneet optiset lennätinratkaisut. Sähköjohtoja pitkin tapahtuvan tiedonsiirron kehityksen ohella optisia menetelmiä tutkittiin 1800-luvun aikana. Brittiläinen fyysikko John Tyndall esitti 1870-luvulla, kuinka valoa voidaan kaartaa ja kuljettaa läpinäkyvässä johtimessa, mutta se oli vain optiikan kuriositeetti eikä saanut käytännön sovelluksia ennen kuin 1900-luvulla. [1]

Theodore Maimanin vuonna 1959 keksimä laser innosti tutkijat kehittämään käytäntöön sovellettavia optisia aaltojohtoja. Jo vuonna 1966 keksittiin käyttää äärimmäisen puhtaasta lasista vedettyä kuitua aaltojohtona laservalolle, joka kuidun toisessa päässä saatiin takaisin sähköiseen muotoon valokennon avulla. Konseptin kehittämisen aikaan valokuidun 1 000 dB:n vaimennus kilometrillä ei kuitenkaan ollut käytäntöön sopiva. Tekniikkaa kehittäneet Charles Kao ja George Hockham kuitenkin ennustivat, että vaimennus alle 20 dB/km on mahdollinen. [1]

Tavoite saavutettiin jo vuonna 1970, jolloin päästiin vaimennukseen 17 dB/km. Koko 1970-luku olikin valokuidun teollisen kehityksen aikaa, joka johti nopeasti erinomaisiin tuloksiin: jo vuonna 1980 pystyttiin valmistamaan valokuitua, jonka vaimennus 1 500 nm aallonpituudella oli vain 0,2 dB/km, joka on samaa luokkaa kuin valokuidut vielä nykyäänkin. 1980-luvulla valokuidun kaupallinen käyttö alkoi yleistyä, ja ITU julkaisi ensimmäiset standardinsa moni- ja yksimuotokuiduista. [1]

2.1 Kaupallistuminen maailmalla

Vaikka valokuitutekniikka jatkoi huimasti kehittymistään koko 1970-luvun ajan, jo vuonna 1973 Saksassa avattiin kaupalliseen käyttöön maailman ensimmäinen valokuitukaapeli. Tämä Frankfurtin ja Oberurselin välinen 24 km pitkä monimuotolinkki pystyi siirtämään kaksi megabittiä sekunnissa. Vuosikymmenen aikana eri puolille maailmaa alettiin avata kaupunkien sisäisiä tai välisiä valokuitulinkkejä, ja siirtonopeudet pysyivät kymmenien megabittien sekuntinopeusluokassa. [1]

Vaikka vielä 1980-luvun alussa valokuitu yhdisti lähinnä urbaaneja alueita lyhyen kantanman monimuotokuidun avulla, vuosikymmen aikana alkoi tapahtua rajua kehitystä: puolessa välissä vuosikymmentä kaupalliseen käyttöön esiteltiin sellaisia yksimuotokuituja, jotka pidensivät kaapelien kantamaa kymmeneen tuhansiin kilometreihin ja nostivat tiedonsiirtokapasiteettia satoihin megabitteihin sekunnissa. [1]

TAT-8 oli ensimmäinen Atlantin pohjitse viety optinen kaapeli. Vuonna 1988 se rakennettiin yhdistämään Ranskaa, Yhdysvaltoja ja Yhdistynyttä kuningaskuntaa. Tätä ennen vähäisempiä merikaapeleita oli rakennettu mutta vain kansallisesti Euroopassa. Optiset merenalaiskaapelit osoittautuivat kaupallisesti kannattavaksi, eikä enää 90-luvulla rakennettukaan koaksiaalisia merikaapeleita. [1]

Valokuitutekniikka alkoi muotoutua nykyiseen malliinsa 1990-luvun aikana, kun valovahvistimet ja aallonpituuskanavointitekniikat kehittyivät (WDM). Tämä aiheutti käytännössä sen, että koko vuosikymmenen ajan optisen tiedonsiirron kapasiteetti kaksinkertaistui puolivuositain [4]. Aivan vuosikymmenen alussa aallonpituuskanavoilla yhdistettiin vain kaksi saman kapasiteetin kanavaa (normaalit 1 310 ja 1 550 nm aallonpituuskannat), jolloin saavutettiin tuhansienkin kilometrien matkoille viiden gigabitin sekuntikapasiteetti [1]. 90-luvun alkupuoliskolla alettiin puhua tiheästä aallonpituuskanavoinnista (DWDM), kun samaan kuituun onnistuttiin kanavoimaan yhä useampia aallonpituuksia. Uusien tekniikoiden käytön ansiosta vuosituhannen vaihteen jälkeen pystyttiin rakentamaan jo kapasiteettiin 10 Tb/s kykenevä optinen kaapelilinkki [4].

2000-luvun aikana optisten linkkien kapasiteetit ovat kasvaneet nopeammin kuin on ollut välitöntä tarvetta. Tämä on ollut suunnittelun lähtökohta: kaapelin asentaminen on kallista, joten kun kaapeli suunnitellaan, varataan siihen ylimääräisiä kuituja tulevaa käyttöä ja kapasiteetin kasvattamista varten. Lisäksi alati kehittyvät aallonpituuskanavointi- ja modulaatiotekniikat sekä uudenaikaiset aktiivilaitteet lisäävät jo asennettujen kaapelien

kapasiteettia. Esimerkiksi vuonna 2018 käyttöön otettu Yhdysvaltain ja Espanjan välinen MAREA-merikaapeli ylittää kapasiteettiin, joka on yli 200Tb/s, vaikka se alun perin suunniteltiin 160 Tb:iin/s [5]. Vaikka valokuitutekniikka tarjoaa enemmän kuin nykytietoliikenne vaatii, uusia valokuitutekniikoita tutkitaan silti edelleen: esimerkiksi aivan viime vuosien tutkimuskohteena olleet ontoyttimiset valokuidut näyttävät kehittyvän kilpailukykyisiksi täyslasisten kuitujen kanssa [6].

2.2 Valokuidun kehitys Suomessa

Ensimmäiset kokeelliset valokuitukaapelit otettiin Suomessa käyttöön jo vuonna 1979, ja seuraavalla vuosikymmenellä alettiin hiljalleen rakentaa kuitupohjaisia runkoyhteyksiä [7]. Kansainvälinen valokuitu rantautui Suomeen vuonna 1992, kun nykyinen Telia avasi Helsingin ja Tallinnan välille ensimmäisen optisen merikaapelin [8]. Samaan aikaan Helsingin puhelinyhdistys alkoi kokeilla ensimmäisiä FTTB-toteutuksia. Pääasiassa 1990-luku Suomessa kuitenkin oli operaattorien rakentamien runkoyhteyksien ja merikaapelien tuleminen aikaa, joskin valokuitupohjaisia tilaajaverkkojakin alkoi ilmetä [7].

Vasta vuosikymmenen lopulla operaattoreista riippumattomien valokuituverkkojen rakentaminen alkoi kiinnostaa, kun kunnat alkoivat rakentaa välilleen omia valokuituyhteyksiään. 2000-luvun ensikymmenen aikana kunnissa alettiin pohtia kuituverkon laajentamista myös kuntalaisien käyttöön. Näin alkoi hiljalleen kehittyä valtakunnallisista operaattoreista riippumaton kuntia ja kuntalaisia yhdistävä valokuituinfrastrukturi, joka edelleen jatkaa kasvamistaan kaikkialla Suomessa. [9]

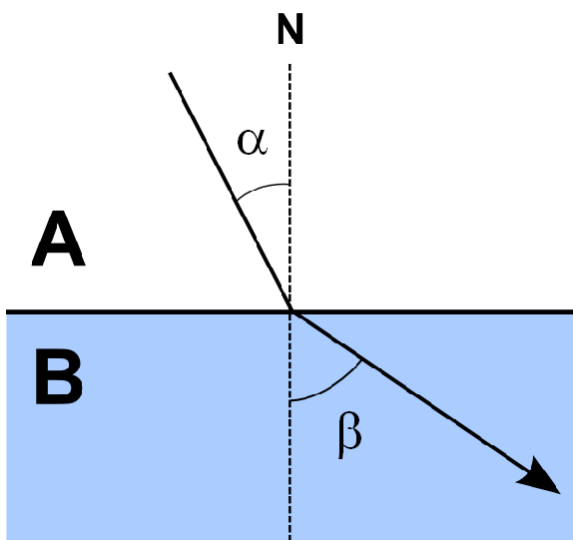
3 VALOKUITU TIEDONSIIRTOMENETELMÄNÄ

Valokuitu tiedonsiirtomenetelmänä on verrattain uusi, vaikka siihen liittyvät optisen fysiikan periaatteet ja lainalaisuudet on tunnettu tiettävästi jo yli tuhat vuotta. Myös nykyisiä valokuitujärjestelmiä muistuttavia kokeellisia valoa kuljettavia aaltoputkia kehitettiin jo paljon ennen kuin ilmiötä alettiin soveltaa tietotekniisiin ratkaisuihin. Tässä luvussa kuvataan modernien valokuitujärjestelmien perustana olevat fysikaaliset periaatteet sekä tyyppillisiä käytännön ratkaisuja järjestelmien toteuttamiseksi.

3.1 Fysikaalinen peruseriaate

Kun valo kulkee aineessa, jonka heijastuskertoimen on vakio, valon eteneminen on suoraviivaista. Aineesta toiseen siirtyessään valo taittuu tai heijastuu riippuen aineiden optisista ominaisuuksista. Kun valo tulee optisesti tiheämmästä aineesta harvempaan, se taittuu pois päin rajapinnan kohtisuorasta, kuten kuvassa 1, jossa α on valon tulokulma ja β taitteikulma. Snellin taittumislaki ilmaisee kulmien sinifunktioiden suhteen yhteyden aineiden taitekerrointen suhteeseen:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_B}{n_A} = n_{BA}$$



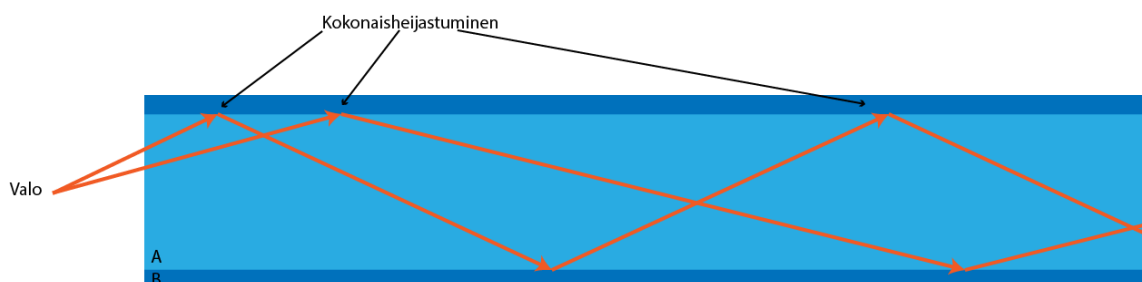
Kuva 1. Valon taittumislakia havainnollistava kuvio [10]

Kun taitekulma β lähestyy 90° :ta, $\sin \beta$ lähestyy yhtä. Tätä kutsutaan kokonaisheijastukseksi: valo ei taitu lainkaan aineeseen B vaan kulkee rajapintaa pitkin tai heijastuu takaisin aineeseen A . Tämän tiedon avulla voidaan ratkaista kokonaisheijastuksen rajakulma, joka on sellainen kulma α , että kulma β on 90° . Sijoittamalla taitekertoimien suhteen n_{BA} kokonaisheijastuksen rajakulman kaavaan voidaan ratkaista tämä kulma: [11]

$$\sin \alpha = n_{BA}$$

Valokuidun toiminta perustuu kokonaisheijastukseen. Valokuitu on aaltoputki, jossa on ydin ja kuori. Valon karkaaminen valokuidun ytimestä estetään kuorella, joka ympäröi ydintä. Sen valontaitekerroin on alhaisempi, mikä aiheuttaa ytimestä pois pyrkivän valon kokonaisheijastuksen ja siten mahdollistaa valon kulun pitkin ydintä. Tavallisesti myös valokuidun kuori on valmistettu samasta lasista samassa valmistusprosessissa kuin ydin. Tällöin ydin ja kuori ovat kiinteästi toistensa osia, ja niiden ero on saostusaineiden suhteessa. Ydin ja kuori seostetaan niin, että niillä on noin prosentilla toisistaan eroava valontaitekerroin. Tyypillisen ytimen taitekerroin 1 300 nm valolle on 1,49. Silloin kuoren taitekerroin voi olla esimerkiksi 1,47. Taitekerroin kuitenkin riippuu aina valon aallonpituudesta, joten seostuksessa on otettava huomioon se, minkä aallonpituuden valoa kuitussa on tarkoitus kuljettaa. [12]

Kuvassa kaksi havainnollistetaan valon kulkemista monimuotoisessa valokuidussa. Valonsäteet tulevat kuidun ytimeen (A) sellaisessa kulmassa, että ytimen ja kuoren (B) rajapinnassa tapahtuu kokonaisheijastuminen. Kuten geometrisen optiikan perusteista tiedetään, valon heijastuskulma on aina yhtä suuri kuin tulokulma. Näin yksinkertaistettuna voidaan sanoa, että valonsäde kimpoilee valokuidun ytimen seinämältä toiselle heijastuen aina siinä kulmassa, missä se alun perin tuli kuituun. [12]



Kuva 2. Kokonaisheijastuminen valokuidussa.

Valokuitu voi olla myös yksimuotoinen. Tällöin kuidun ydin on tehty niin kapeaksi, ettei määrätyn aallonpituuden valolla ole muuta mahdollisuutta kuin edetä suorinta tietä [12].

Tällaista valon etenemistä ei voida kuvata geometrisella optiikalla, vaan valokuitu nähdään sähkömagneettisena aaltoputkena ja valon kulku mallinnetaan sähkömagneettisen aaltoyhtälön avulla.

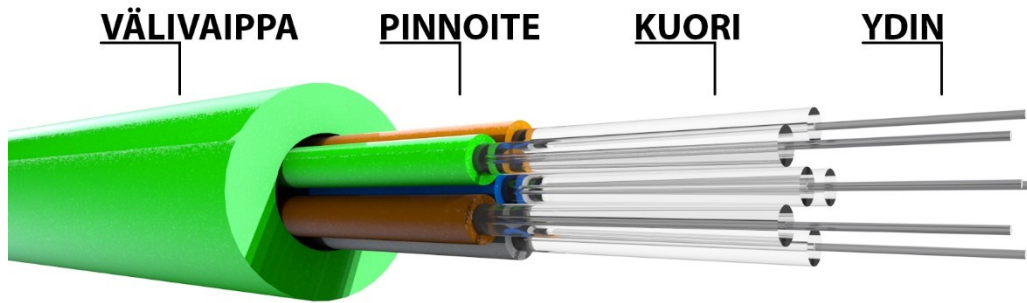
3.2 Valokuidun rakenne ja kaapelit

Vaikka valokuidun fysikaalinen toimintaperiaate on verrattain yksinkertainen, on olemassa valtava määrä erityyppisiä kuitukaapeleita. Kaikki ohjaavat valon kulkua samalla periaatteella, ja kaapelien moninaisuus johtuukin eri käyttösovellusten erilaisista tarpeista. Valokuidun ydin ja kuori itsessään ovat haurasta ohutta lasia tai muovia. Siksi niitä täytyy eri tavoin suojata, kun valmistetaan varsinaista valokuitukaapelia.

3.2.1 Valokuidun perusrakenne

Valokuidussa toiminnallisen osan muodostavat ydin (core) ja kuori (cladding). Ydin on pienin osa valokuitua, ja se on tavallisimmin valmistettu lasista mutta joskus myös muovista. Lasinen kuituydin on erityisen puhdasta piidioksidia, johon on seostettu esimerkiksi germaniumoksidia, fosforipentoksidia tai alumiinioksidia halutun taitekertoimen aikaansaamiseksi. Eri tarpeita varten valmistetaan eri paksuisia valokuituja: ytimen paksuus vaihtelee $3,7 \mu\text{m}$:n ja $200 \mu\text{m}$:n välillä. Tietoliikennetekniikassa tavallisesti käytettyjä ytimen paksuuksia ovat 9 , 50 ja $62,5 \mu\text{m}$. Esimerkiksi audiotekniikassa käytettävien muovisten valokuitujen ytimen paksuus voi olla huomattavastikin suurempi, jopa millimetrin luokkaa. [12]

Kuvassa 3 esitetään 3D-mallinteen avulla valokuidun rakenne. Kuvassa nähdään valokuidun toiminnallinen rakenne (ydin ja kuori) sekä tyypillinen tapa pakata useita kuituja yhdeksi kaapeliksi. Valokuidun pinnoite ja valokuitukaapelin perusrakenne käsitellään edempänä tässä luvussa.

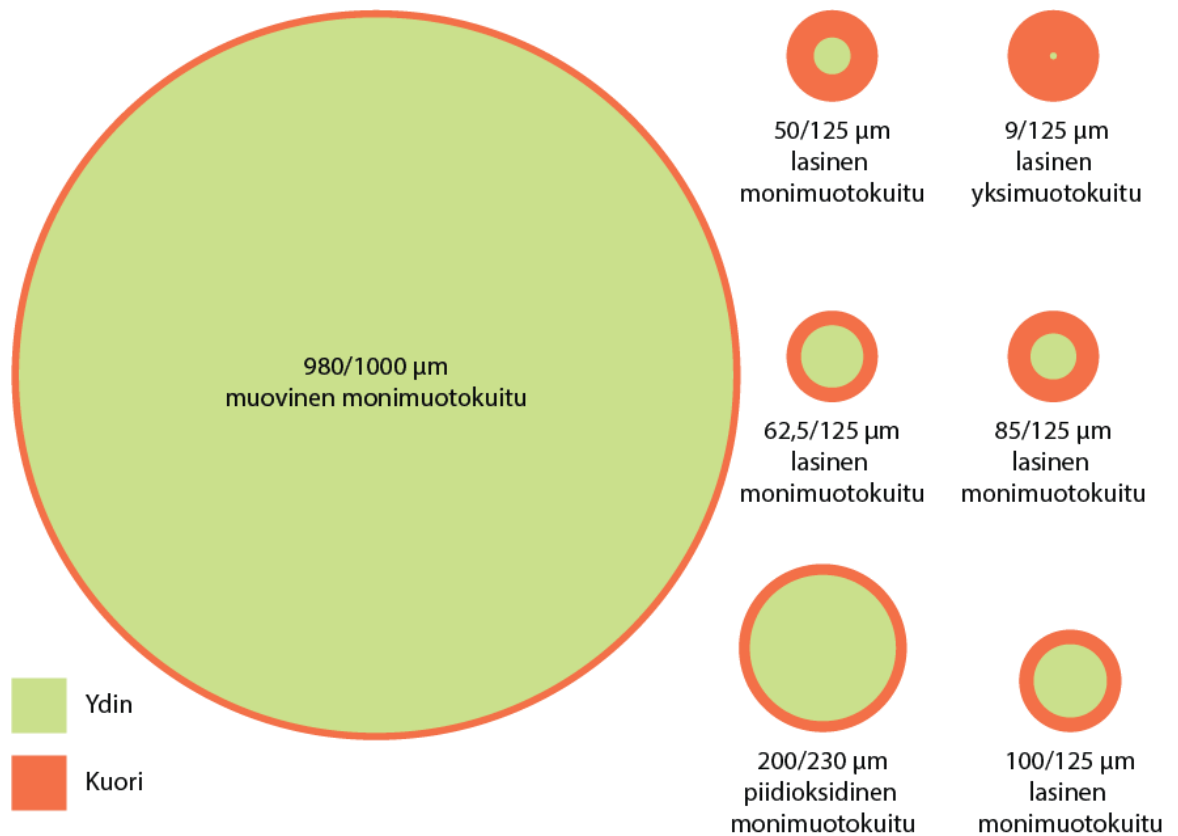


Kuva 3. Kuusi valokuitua yhden vaipan sisällä.

Kuoren paksuudelle on ytimen tavoin muodostunut standardeja läpimittoja. Taulukosta 1 nähdään eri kuituytimissä tavallisesti käytettävien kuorten läpimitat. Samat ydin-kuori-parit havainnollistetaan kuvassa 4, jossa kuidut ovat kooltaan toisiinsa nähden oikein suhteutettuna. Suurimpana on esimerkiksi kuluttaja-audiotekniikassa käytetty muovinen monimuotokuitu, joka kuljettaa tavallista näkyvää led-valoa. Pieniytimisin kuitu on pitkiin matkoihin kykenevä tietoliikennetekniikan yksimuotokuitu, joka kuljettaa signaalia laser-valolla.

Taulukko 1. Eri paksuisissa ytimissä käytettävien kuorten standardipaksuudet. [12]

Kuori [μm]	Ydin [μm]
125	9
	50
	62,5
	85
140	100
230	200
1000	980



Kuva 4. Erityyppisiä valokuituja oikeissa mittasuhteissa keskenään. [12]

3.2.2 Valokuidun materiaalit

Tavallisimmin valokuitu on sekä ytimen että kuoren osalta valmistettu lasista, mutta käyttöaiheen, kustannusten ja kestävyysvaatimusten mukaan muiden materiaalien käyttö voi olla tarkoituksenmukaista. Kokonaan lasista valmistettua valokuitua käytetään, kun vaaditaan suurta kaistaa tai pitkiä kaapeleita. Niiden haittapuolena on kuitenkin hauraus ja valmistuksessa vaadittu ehdoton tarkkuus. [12] Tyypilliset käyttöaiheet kokolasiselle valokuidulle ovatkin pitkän matkan kaapelivedot ja rakennusten väliset yhteydet.

Lasi-lasi-polymeerikuitu (glass, glass, polymer, GGP) on valmistettu lasisesta ytimestä ja lasin ja polymeerin yhdistelmäkuoresta. Tällainen valokuitu on ominaisuuksiltaan muuten samanlainen kokolasisen kuidun kanssa mutta lasi-polymeeriyhdistelmä kestää huomattavasti paremmin mekaanista vahinkoa ja siten vaativampia asennusolosuhteita. Muutoin käyttöaiheet ovat samat kuin kokolasisella kuidulla. [12]

Muovikuori-piidioksidikuidussa (plastic-clad silica, PCS) on nimensä mukaisesti muovinen kuori ja lasinen ydin. Sen ydin on suurempi kuin kokolasisen kuidun. Muovikuoren

kestävyyden takia tässä kuitutyypissä ei tavallisesti käytetä erillistä pinnoitetta. PCS-kuitua käytetään teollisissa sensoreissa ja lääketieteellisissä laitteissa. [12]

Kovakuori-piidioksidikuitu (hard-clad silica, HCS) on kuten PCS mutta sen kuori on valmistettu erikoisvahvasta polymeerimateriaalista. Sitä käytetään, kun tarvitaan ensisijaisesti mekaanista kestävyyttä. Tällaisia voivat olla esimerkiksi teolliset ympäristöt, joissa kaapeloinnin on kestettävä iskuja ja tärinää. [12]

Muovikuitu on kuluttajille itsenäiseen käyttöön tutuin valokuitutyyppi. Se on nimensä mukaisesti valmistettu kokonaisuudessaan muovista ja on lasista kuitua paljon suurempi rakenteeltaan. Se ei sovellu pitkille etäisyyksille, mutta lyhyillä, alle sadan metrin etäisyyksillä se kykenee suuriin datanopeuksiin. Muovisen valokuidun kanssa voidaan käyttää laseria tai led-valoa. Tyypillisiä käyttöaiheita ovat esimerkiksi kotiteatterit ja autoteollisuus. [12]

Valokuidun kuoren päälle tulee pinnoite (coating), joka on kuidun suojaava kerros. Pinnoite suojaa ympäristön rasitukselta, kuten iskuilta, naarmuilta ja kosteudelta, mikä on erityisen tärkeää hauralle lasille. Mikroskooppinenkin lovi kuoressa voi aiheuttaa kuidun särkymisen, kun kuitua taivutetaan. Pinnoituksen tärkeydestä kertoo se, ettei valokuitua edes myydä ilman pinnoitetta vaan pinnoittaminen on kiinteä osa valokuidun valmistusprosessia. [12]

Pinnoite ei osallistu valon kuljettamiseen kuidussa, ja pinnoitteen laatu valitaankin aina käyttökohteena olevan ympäristön mukaan. Tavallinen normaalioloissa käytettävä pinnoite on akrylaatti, jolla valokuitu pinnoitetaan kahdella kerroksella. Ensimmäinen kerros on pehmeä, ja sen tarkoituskin on olla pehmikkeenä suojaamassa valokuitua taivutukselta. Toinen kerros on kova ja suojaa ulkoa tulevalta rasitukselta.

Akrylaattia ei voida käyttää pinnoitteena, jos lämpötilat ovat paljon normaalioloja korkeammat tai ympäristö muuten vaatii erityistä kestävyyttä. Tällöin käyttöaiheen mukaan voidaan valita silikoni-, hiili- tai polyamidipinnoite. Silikonia voidaan käyttää vielä noin 200 °C:n lämpötilassa, mutta pehmeytensä vuoksi se vaatii suojakseen vahvan ja niin ikään lämpöä kestävä vaipan. Äärimmäisissä olosuhteissa käytetään polyamidipinnoitetta, sillä se kestää lämpöä 350 °C:seen asti ja sietään hyvin kulutusta ja kemikaaleja. Silikonilla tai polyamideilla pinnoitettujen kaapeleiden päättäminen vaatii kuitenkin erityistoimia, sillä pinnoitteet on poistettava ennen liittimien asennusta. Muiden pinnoitteiden alle tulevalla erityisellä hiilipinnoitteella voidaan entisestään vahvistaa kaapelin ominaisuuksia, erityisesti kosteudenkestävyyttä. [12]

3.2.3 Kestävyys ja vetolujuus

Hauraudestaan huolimatta valokuitukaapelin vetolujuus on suhteellisen suuri. Kuten kaikki lasi, se kestää kovaakin rasitusta, kunhan sen rakenne on vahingoittumaton. Pie-nikin särö tai naarmu valokuidussa vähentää vedonkestävyyttä merkittävästi. Tästä syystä valokuitua on syytä suojata pinnoitteiden lisäksi aina tarpeen mukaan erilaisilla vahvikkeilla ja vaipoilla. [12]

Tyypillinen vedonkestävyys vahingoittumattomalle valokuitukaapelille on noin 700 MPa. Näin ollen 125 µm paksu kuitu kestää noin 900 g:n painoa vastaavan vedon. Hyvänä käytäntönä pidetään kuitenkin, ettei kuitua rasitaisi kuin puolella sen kestävästä maksimivetolujuudesta silloinkaan, kun sen puskuria tai pinnoitetta poistetaan liitäntää varten. [12]

Vedonkestävyyden säilyminen edellyttää lasikuidun eheyttä. Kun kuituun tulee murtuma, se ei enää kestä vetoa vaan käsiteltäessä murtuu edelleen käyttökelvottomaksi. Murtumat syntyvät tyypillisesti terävistä iskuista, joilta pinnoite, vahvikkeet ja vaipat suojaavat. Murtumien aiheuttaja voi olla myös vääränlainen käsittely, kuten taivuttaminen yli pienimmän taivutussäteen, joka on määritelty kaapelin teknisissä tiedoissa. Sellaiset murtumat voi estää valitsemalla käyttökohteen taivutusvaatimusten mukaisen kuidun ja käsittelemällä sitä ohjeistusten mukaan. [12]

3.2.4 Valokuitukaapelin rakenne

Valokuitu ei itsessään kestä käytännön asennusta ja käyttöä, vaan se tarvitsee suojakseen kaapelin muut osat. Kaapeliin niputetaan tavallisesti lukuisia valokuituja, ja sillä on useita asennusta ja kestävyyttä parantavia ominaisuuksia. Samalla tavalla kuin valokuituihin, kaapeleihin on kehitetty erilaisia standardeja eri käyttöyhteyksiä varten.

Oikeanlaisen kaapelin valintaan vaikuttaa moni seikka. Ensimmäisenä on huomioitava tarvittavien valokuitujen määrä. Useimmissa käyttöyhteyksissä pidetään hyvänä tapana asentaa joutilaita kuituja kapasiteetin kasvattamisen varalle tulevaisuutta ajatellen. Siksi on syytä valita kaapeli, jossa on varmasti riittävästi kuituja.

Asennuskohde, asennustekniikka ja olosuhteet vaikuttavat myös merkittävästi oikeanlaisen kaapelin valintaan. Tietyt asennustekniikat voivat vaatia kaapelilta yllättävän

paljon vedonkestävyyttä, jolloin on valittava varmasti vahva kaapeli. Kaapelien vedonkestävyyttä voidaan parantaa ulkovaipan alla olevalla vahvikkeella ja kaapelin ytimessä kulkevalla vetovahvikkeella [4]. Joskus kaapelia täytyy myös taivuttaa asennuksen yhteydessä. Tietyt kaapelit ja kuidut kestävät erityisen hyvin taivutusta, mitä on syytä hyödyntää, kun tiedetään asennuskohteessa vaadittavan kaapelin taivuttamista jyrkkiin käännöksiin. PVC on suosittu valinta ulkovaipan materiaaliksi sisätila-asennuksiin, joissa kaapelilta vaaditaan notkeutta. [12]

Olosuhteiden kestävyiden kannalta merkityksellisin kaapelin osa on ulkovaippa. Samalla tavalla kuin kappaleessa 3.2.2 kuvattiin valokuidun pinnoitteille käyttölämpötilat, myös kokonaisille kaapeleille on omat lämpötilamäärittämisensä. Esimerkiksi raskaan teollisuuden tai avaruusilmailun olosuhteissa kaapeli voi joutua suuriin lämpötiloihin. Tällöin käyttöön voidaan valita polytetrafluorieteeni (PTFE), joka kestää lämpötiloja jopa 260 °C asti. [12]

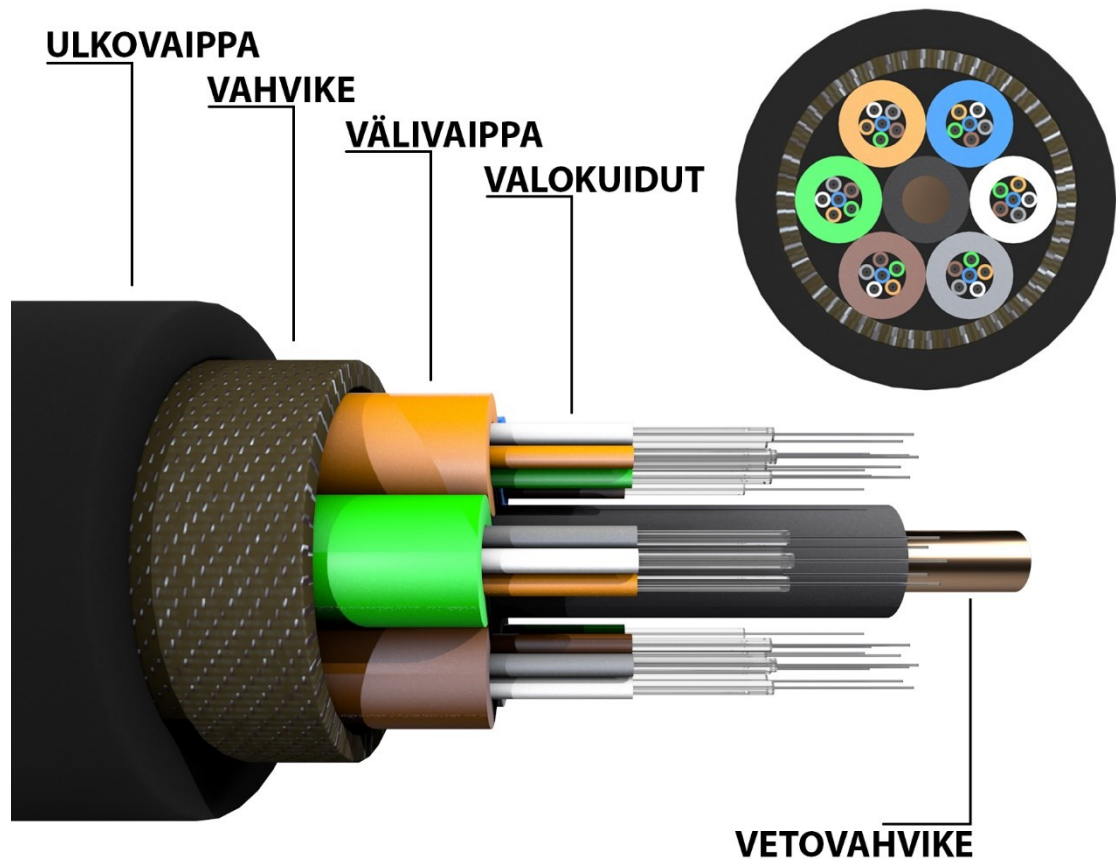
Monissa sisätila-asennuksissa paloturvallisuus on kaikkein tärkein materiaalin valintaan liittyvä seikka. Silloin materiaalivalintana on polyvinyyliidifluoridi (PVDF), joka on erittäin huonosti palavaa ja tuottaa vain vähän savua. Sen huonona puolena on kuitenkin jäykkyyden vuoksi vaikea asennettavuus. Kun paloturvallisuus ei ole tärkein asia, sisätiloihin yleinen valinta on edullinen, kestävä ja joustava polyvinyylikloridipäällysteinen (PVC) kaapeli. [12]

Tavanomaisen suoraan maahan aurattavan kaapelin vaipan on kestävä erityisen hyvin kosteutta. Pylväisiin ripustettavan kaapelin on siedettävä jatkuvaa auringonvaloa. Eri-laisiin ulkokäyttökohteisiin polyeteenivaippainen kaapeli soveltuukin erityisen hyvin. [12]

Valokuitukaapelissa on aina vähintään yksi kuitu, jonka ensimmäinen suojaava kerros on sen pinnoite. Kuitu tai kuidut suojataan vaipalla, joka voi olla tiivis tai väljä. Väljä vaippa voi kuitujen lisäksi sisältää vedeltä suojaavaa täytegeeliä. Kaapelissa voi olla useita vaipalla suojattuja kuituryppäitä, jolloin vaippaa kutsutaan välivaipaksi. Tällöin välivaipat usein ympäröidään vahvikekerroksella, joka vielä päällystetään ulkovaipalla. Useista valokuituryppäistä koostuvat kaapelit sisältävät tavallisesti myös keskiputkena olevan vetovahvikkeen, jonka tarkoituksena on parantaa vedon- ja taivutuksenkestävyyttä.

Kuvassa 5 esitetään 3D-mallinne valokuitukaapelin tyypillisestä rakenteesta. Ulkovaipan ja vahvikkeen sisällä on 6 välivaipalla suojattua kuituryppästä, jossa kussakin on 6

valokuitua. Kuvan kaapelissa on siis 36 valokuitua. Suurimmissa kaapeleissa voi olla jopa 144 valokuitua.

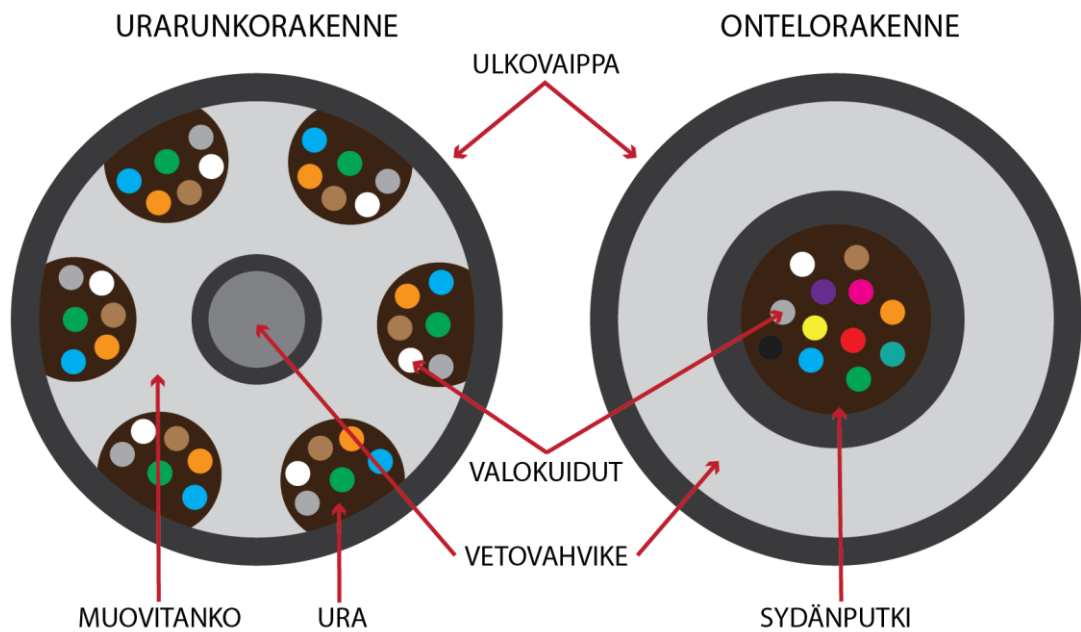


Kuva 5. Esimerkki valokuitukaapelin rakenteesta. Kuvassa esitetään kerrattu rakenne.

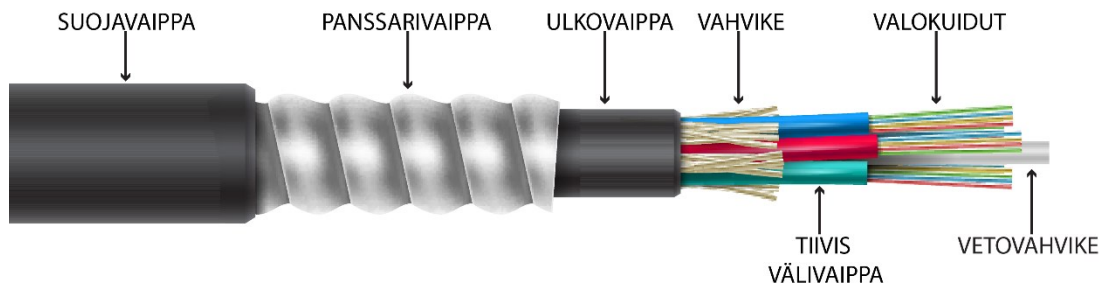
Kaapelirakennetta voidaan myös kerrata edelleen niin, että uloin vaippa ja lujitekerros sisältää useita edellä kuvattuja kaapeleita. Uloin vaippa voidaan myös suojata erityisellä panssarivaipalla vaativia olosuhteita varten. Tällöin ulkovaipan päälle tulee tavallisesti aallotetusta alumiinista valmistettu putki, joka päällystetään vielä esimerkiksi polyeteeni-vaipalla, kuten kuvassa 7 nähdään.

Kerratun rakenteen lisäksi tavallisia kaapelirakenteita ovat ontelorakenne ja urarunkorakenne. Onteloraakenteisen kaapelin kerrokset ovat ulkovaippa, vahvike ja sydänputki, jonka sisässä kuidut kulkevat väljästi, kuten kuvan 6 oikeanpuoleisen kaapelin poikkileikkauksesta nähdään. [9] Se on siis samankaltainen kuin kerratun rakenteen kaapeli, mutta usean tiiviin välivaipan sijaan valokuitujen sydänputkena on vain yksi väljä vaippa.

Urarunkorakenteisen kaapelin poikkileikkauskuva nähdään kuvassa 6 vasemmalla puolella. Urarunkorakenteessa suoraan ulkovaipan alla sydämenä on umpimuovinen tanko, jonka ulkoreunoilla on samankeskiset urat. Valokuidut on järjestelty eri uriin verkon suunnittelulogiikan mukaan, mikä helpottaa kuitujen löytämistä ja käsittelyä. Muovitangon keskiössä kulkee kaapelin vetovahvike. [9] Urarunkoinen kaapeli on siis kuten kerratun rakenteen kaapeli, mutta väliwaippojen sijaan valokuidut sijaitsevat muovitangon urissa väljästi, ja muovitanko on myös kaapelin vahvike.



Kuva 6. Valokuitukaapelin urarunkorakenne ja ontelorakenne.



Kuva 7. Erikoisvahvistettu kaapeli sisäkäyttöön. [13]

Kaapeleita on monen muunkin tyyppisiä erilaisiin asennuskohteisiin. Pylväisiin asennettavissa ilma-kaapeleissa on lisäksi erillinen teräksinen kannatinköysi. Merenalaiskaapeleiden on oltava erikoisvahvoja, mutta niidenkin perusrakenne vastaa edellä kuvattua. Erikoisvahvistettuja kaapeleita on saatavilla myös muihin haastaviin asennusolosuhteisiin. Erityistarpeita varten on saatavilla esimerkiksi lattakaapeleita ja yhdistelmäkaapeleita.

Kuitukaapelin termistöstä

Kuten erikoistuneissa tekniikan ja tieteen aloissa on tyypillistä, valokuitutekniikankaan termistön suomenkieliset käännökset eivät ole aina yhdenmukaisia. Esimerkiksi kuvissa 3 ja 5 käytetyt termit pinnoite ja välivaippa esiintyvät myös nimillä ensiöpäällyste ja toisiopäällyste. Termi suojavaippa tarkoittaa joskus ulkovaippaa (engl. sheath) ja joskus panssarivaippaa (engl. armor), jotka nähdään kuvassa 7, ja joskus näitä kollektiivisesti. Termillä vetoelementti voidaan viitata joskus vahvikkeeseen ja joskus vetovahvikkeeseen. Vahviketta nimitetään toisinaan lujitekerrokseksi [4]. Valokuitutekniikan suomenkielinen termistö ei siis ole vakiintunut, eikä sitä tarkkaan määritä mikään auktoriteettitaho. Tässä työssä kuitenkin käytetään aina loogista ja yhdenmukaista termistöä, joka tarpeen vaatiessa selitetään havainnollistavin kuvin.

3.2.5 Kaapelien ja valokuitujen standardit

Standardit eivät ole fyysikaalisessa mielessä välttämättömiä, mutta ilman niitä valokuituverkon toteuttaminen käytännössä olisi tarpeettoman hankalaa tai mahdotonta. Standardien täsmällisyys on erityisen tärkeää valokuituun liittyvien komponenttien pienuuden takia.

Vähäisetkin epämääräisyydet saattavat estää kaapeloinnin toiminnan. Standardeja ovat määrittäneet seuraavat tahot:

- Telecommunications Industry Association (TIA)
- International Telecommunications Union (ITU)
- International Organization for Standardization (ISO)
- American National Standards Institute (ANSI)
- International Electrotechnical Commission (IEC).

Standardeja on lukuisia, mutta vain kourallinen olisi tietoliikennetekniikan ammattilaisen tunnettava [12]. Seuraavia standardeja voitaneen pitää merkittävimpinä:

Taulukko 2. Tavallisimmat valokuitustandardit. [12]

International Telecommunications Unionilla ja International Electrotechnical Commissionilla on niin tavanomaisia standardeja, että ISO ja ANSI tunnustavat ne myös:

**ANSI/TIA-568-C
ISO/IEC 11801**

Pätevät tyypillisesti kaapelointiin asiakkaan tai loppukäyttäjän tontilla ja tiloissa. Näiden standardien mukainen kaapelointi soveltuu parhaiten alle kahden kilometrin matkoille. Standardit voivat määrittää moni- tai yksimuotokuidun.

International Telecommunications Unionin antamat standardit voivat kuvata moni- tai yksimuotokuidun:

ITU-T G.651.1

50/125 µm:n monimuotoinen asteittaiskuitu. Käytetään Liityntäverkoissa, esim. kerrostaloissa jakamaan verkko asuntoihin. Edullinen 1 Gb/s -yhteystoteutuksiin.
[14]

ITU-T G.652	Maailmalla laajimmin käytetyn yksimuotokuidun ja kaapelin standardi. Kuidun nol-ladispersioaallonpituus on noin 1 310 na-nometriä, mutta sitä voi käyttää myös aal-lonpituudella 1 550 nm. Käytetään paikal-lisverkoissa (LAN), kaupunkiverkoissa (MAN), liityntäverkoissa ja aallonpituus-kanavoinnissa (CWDM).
ITU-T G.655	Ei-nolladispersiisierretty yksimuotokuitu ja kaapeli, (non-zero dispersion-shifted fi-ber, NZDSF). Taajuuden 1 550 nm dis-persio ei ole nolaa mutta lähellä sitä. Kuitu määritellään aallonpituudella 1 550–1 625 nanometriä, ja sillä on hyvin pieni kromaattinen dispersio vahvistimien suosimalla C-kaistalla.
ITU-T G.657	Taivutettaessakin vähähäviöinen yksi-muotokuitu ja kaapeli. Yhteensopiva G.652-standardin mukaisen kuidun kanssa (kategorioiden A1 ja A1 osalta). Käytetään paikallis- ja liityntäverkoissa. [15]
International Electrotechnical Commissionin IEC 60793-2 -standardisarja kos-kee valokuidun tuotemäärittämisestä:	
IEC 60793-2-10	A1-kategorian monimuotokuitu. Standardi määrittelee neljä neljän alakategorian (A1a, A1b, A1c ja A1d) kuitujen fysikaali-set tuoteominaisuudet.
IEC 60793-2-50	B-kategorian yksimuotokuitu. [16] IEC:n vastine ITU:n standardeille ITU-T G.652 [15]

Standardeissa määritellään myös esimerkiksi aallonpituudet, joilla valokuitu on suunniteltu käytettäväksi, enimmäisvaimennus (dB/km), monimuotokuidun kaistanleveys (MHz·km), numeerinen aukko ja monia muita, esimerkiksi kestävyyyteen liittyviä,

ominaisuuksia, jotka ovat suunnittelussa aina oltava selvillä. Toimivan kaapeloinnin saavuttamiseksi on pystyttävä sovittamaan yhteen eri standardien määrittämiä valokuituja.

3.3 Valokuituverkon laitteet

Valokuitukaapeloinnin lisäksi valokuituverkko tarvitsee toimiakseen erilaisia reitittäjiä, kytkimiä ja päätelaitteita kuten mikä tahansa tietoverkko. Verkon laitteita, jotka tarvitsevat signaalin kuljettamiseen sähkövirtaa, kutsutaan aktiivilaitteiksi. Loogiselta toiminnaltaan valokuituverkon aktiivilaitteilla on verrokkinsa kuparikaapelointiin perustuvassa verkossa: kummassakin reitittimen ja päätelaitteen tehtävä on saattaa digitaalinen informaatio siirtotielle sopivaan muotoon ja edentää sitä informaatiota reitittimeltä toiselle kohti määränpäättään.

Aktiiviset valokuitulaitteet kuitenkin tarvitsevat erikoistunutta tekniikkaa kuituliityntöjen rajapinnoille. Valosignaalin lähettämiseen tarvitaan LED- tai laservalonlähde, ja signaalin vastaanottamiseen käytetään valotehoa sähkötehoksi muuttavia valodiodeja [12]. Tällaisia aktiivilaitteita on esimerkiksi verkon laitetiloissa reitittiminä ja tilaajan kiinteistössä kuitupäätelaitteina. Kuvassa 8 nähdään kahdeksan kuituparia kytkettynä laitetilassa. Kuvan kuitupareissa valkotuppinen kuitu kuljettaa dataa laitteesta poispäin (Tx) ja valkoinen laitteeseen päin (Rx). Näin voidaan toteuttaa varsin suurikaistainen kaksisuuntainen duplexi, eli dataa samanaikaisesti kahteen suuntaan kuljettava tietoliikenneyhteys.



Kuva 8. Valokuituja kytkettynä verkkolaitteeseen. [17]

Aktiivilaitteiden voidaan ajatella operoivan OSI-mallin mukaisessa siirtoyhteys- tai verkkokerroksessa, sillä ne muuttavat tulevan valosignaalin sähköiseen muotoon, analysoivat sen digitaalisena tietoliikennepakettina ja reitittävät sen eteenpäin paketin otsikkotiejien mukaan. Passiivilaitteet sitä vastoin toimivat fyysisen kerroksen tasolla.

Valokuituverkon passiivisia osia ovat kaapelin ja liittimien lisäksi optiset kytkimet, vaihtimet, optoerottimet, aallonpituuskanavoijat ja optiset haaroittimet. Passiiviset laitteet kuljettavat signaalia ilman sähkövirtaakin, vaikka esimerkiksi optomekaaninen kytkin saattaa vaatia sähkövirtaa mekaanisen kytkimen kääntämiseksi toiseen asentoon sähkömoottorin avulla [12]. Optisilla kytkimillä on valokuituverkoissa monia tehtäviä. On huomattava, että optisesta kytkimestä puhuttaessa tarkoitetaan OSI-mallin ensimmäisessä eli fyysisessä kerroksessa operoivaa kytkintä eikä siirtoyhteyskerroksen kytkintä. Optisella kytkimellä vain määrätään, mikä tuleva valosignaali lähetetään mihinkin lähtöporttiin [18]. Esimerkiksi kaapelirikon sattuessa signaali voidaan nopeasti ohjata kulkemaan toista reittiä pitkin. Siten optinen kytkin toimii osana varajärjestelmää, millä voidaan parantaa verkon vikasietoisuutta [9].

Aallonpituuskanavoinnissa (WDM) kahdesta tai useammasta eri kuidusta tulevat eritaajuiset valosignaalit yhdistetään yhteen kuituun tai puretaan yhdestä kuidusta takaisin useampaan. Kanavointilaite eli multiplekseri on sellainen passiivinen optinen laite, joka yhdistää signaalit mainitulla tavalla. Kanavaerotin eli demultiplekseri puolestaan erottaa signaalit jälleen omiin kuituihinsa. Aallonpituuskanavoijia käytetään siten aina pareissa. Aallonpituuskanavointi on käyttökelpoinen tapa lisätä valokuituverkon tiedonsiirtokapasiteettia lisäämättä kuituja esimerkiksi runkoyhteyksiin. [12]

Optinen haaroitin on laite, joka jakaa tulosignaalin useaksi datasisällöltään identtiseksi lähtösignaaliksi tai yhdistää useamman tulosignaalin yhdeksi lähtösignaaliksi – usein optiset haaroittimet toimivat kumpaankin suuntaan. Tavalliset optiset haaroittimet ovat Y- ja T-haaroitin sekä tähtihaaroitin. Y-haaroittimessa tulosignaali jaetaan kahdeksi saman sisältöiseksi ja saman vahvuuiseksi lähtösignaaliksi. T-haaroittimessa jako on vahvuudeltaan epäsymmetrinen siten että yleensä suurin osa tulosignaalin optisesta tehosta jatkaa toiseen lähtöön. [12] Siten voidaan toteuttaa esimerkiksi väylätyyppinen ketjutettujen jäsenien verkko, joka havainnollistetaan kuvassa 9 vihreällä piirroksella.

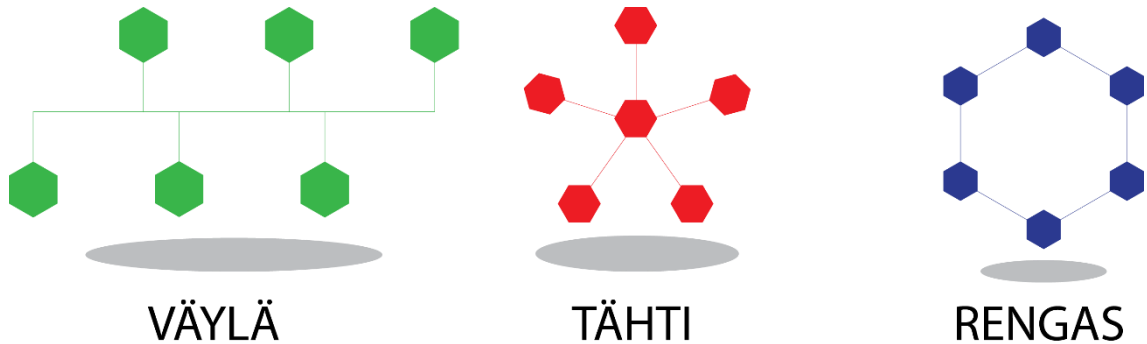
Seutuverkkojen tapauksessa oleellisin haaroitin on kuitenkin tähtihaaroittimen erikoistapaus puuhaaroitin (engl. tree coupler), jota käytetään passiivisten verkkorakenteiden toteutuksissa lähellä tilaajia. Puuhaaroitin jakaa yhden tulosignaalin tilaajille jopa 64 yhtä suureksi lähtösignaaliksi ja vastavuoroisesti kokoaa enimmillään 64 tilaajilta tulevaa signaalia yhdeksi lähtösignaaliksi kohti palveluntarjoajaa.

3.4 Valokuituverkon rakenteet

Valokuitutekniikkaa käyttävillä seutuverkoilla on kolme yleisesti käytettyä fyysistä perusrakennetta eli verkkotopologiaa: väylä, tähti ja rengas. Yksinkertaisin näistä on ketjutukseen perustuva väylätopologia. Väylätopologiassa alueella kulkee runkokaapeli (väylä), johon kaikki verkon jäsenet liittyvät, kuten kuvassa 9 havainnollistetaan vihreällä piirroksella. Tämän topologian heikkous on huono vikasietoisuus: kun runkokaapeli katkeaa, kaikki vikakohdan jälkeiset verkon jäsenet menettävät verkkoyhteytensä. Viestintävirasto suosittelee väylätopologian välttämistä [9].

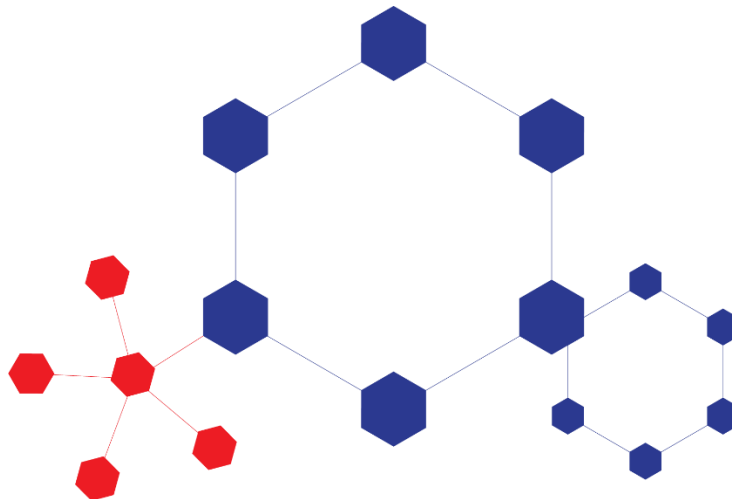
Verkkoja suunniteltaessa suositaan tähti- ja rengastopologioita. Tähtitopologiassa jokainen verkon jäsen liittyy yhteiseen pisteeseen, joten jos esimerkiksi kaapelirikko sattuu liityntäpisteeseen ja jäsenen välillä, verkkoyhteys katkeaa vain yhdeltä. Tähtitopologia on

kuvassa 9 punaisella. Rengastopologia (sininen piirros kuvassa 9) on kaikkein vikasietoisin: jos rengas katkeaa yhdestä kohdasta, liikenne voidaan ohjata kulkemaan renkaassa päinvastaiseen suuntaan. Laitte- tai kaapelirikon sattuessa parhaassa tapauksessa yksikään verkon jäsen ei menetä verkkoyhteyttään. [9]



Kuva 9. Verkon kolme topologiaa: väylä, tähti ja rengas. [19]

Rengas- ja tähtitopologioita voidaan yhdistellä. On mahdollista, että esimerkiksi useita asutuskeskittymiä yhdistetään aktiivisella satojenkin kilometrien mittaisella rengasrunkolla. Sellaiseen rengasrunkoon voi asutuskeskittymien tarpeiden mukaan yhdistää pienempiä rengas- ja tähtirakenteita, kuten kuvassa 10 havainnollistetaan.



Kuva 10. Suuren alueen rengastopologia ja siihen liittyvä pienempi tähti- ja rengastopologia. [19]

Valokuituverkolla voi olla aktiivisia ja passiivisia rakenteita. Nimensä mukaisesti aktiivisissa rakenteissa dataa kuljetetaan aktiivilaitteiden avulla. Passiivisissa rakenteissa (passive optical network, PON) yhden signaalin kaista jaetaan optisen haaroittimen

avulla usealle käyttäjälle. Kuvassa 10 oleva punainen tähtirakenne voisi esittää passiivista valokuituverkon rakennetta, joka haarautuu aktiivisesta rengastopologiasta. Tulo-suunnan signaali on monipisteysteys eli se lähetetään jokaiselle verkon käyttäjälle, ja kultakin käyttäjältä tuleva paluusuunnan signaali on aikajakokanavoitu (time-division multiple access, TDMA) [22]. Aikajakokanavoinnissa jokainen käyttäjä saa vuorollaan koko paluukaistan käyttöönsä. Lähetysvuoron vaihto on tietysti niin nopea, että käyttäjälle se näyttäytyy katkeamattomana yhteytenä.

4 KUITUVERKON NYKYTILA JA TOIMIJAT SUOMESSA

4.1 Runkoverkko ja teleoperaattorit

Tietoliikenteen runkoverkolla tarkoitetaan solmupisteiden yhdistämiä runkolinjoista koostuvaa tietoliikenteen pääväylää. Runkoverkko yhdistää esimerkiksi mantereita, maita ja suuria väestö- ja teollisuuskeskittymiä. Suomessa valtakunnallinen runkoverkko koostuu tyypillisesti kaupunkien välisistä runkolinjoista, ja niitä on rakentamassa useita toimijoita.

Alun perin tietoliikenteen runkoverkkoja rakensi lähinnä teleoperaattorit, jotka samalla myös toimivat tiedonkantajana (engl. carrier) ja palveluntarjoajana (ISP). Nykyään runkoverkkoja on rakentamassa monenlaiset tahot erilaisilla liiketoimintamalleilla, eikä verkon rakentajalla välttämättä ole lainkaan palveluntarjoajan roolia [22]. Esimerkkinä tällaisesta on pelkkää ”mustaa kuitua” rakentava Teknomeria Oy. Mustalla kuidulla tarkoitetaan kuituverkkoa, jota rakennetaan vuokrattavaksi palveluntarjoajille tai muille kaupallisille toimijoille. FNE Finland Oy on Teknomeria Oy:n kanssa toinen merkittävä mustan kuidun rakentaja Suomessa. FNE Finland Oy yhdistää kaikki Suomen suurimmat kaupungit Oulusta etelään [20]. Teknomeria Oy:llä puolestaan on tiheä kaupunkien välinen verkko Suomen eteläisemmissä osissa sekä omat runkoyhteydet Ruotsiin ja Venäjälle [21].

Toisaalta runkoverkon ylläpitäjän roolissa voi olla instituutio, jolla ei lainkaan ole omaa infrastruktuuria ja jonka fyysinen verkko vuokrataan juuri mustaa kuitua rakentavalta toimijalta. Suomessa tunnettu tällainen verkko on Funet, CSC – Tieteen tietotekniikan keskus Oy:n tietoverkko, jonka infrastruktuurin toimittaa Teknomeria sekä suomalaiset ja kansainväliset puhelinoperaattorit. [23]

Suomen kolme suurinta teleoperaattoria, Telia Finland Oyj, DNA Oyj ja Elisa Oyj rakentavat runkoverkkojaan kaikkialle Suomeen. Tiheimmillään teleoperaattorien runkoverkot ovat maan eteläisemmässä puoliskossa, mutta esimerkiksi DNA:n pohjoisin solmupiste on Inarissa, ja Elisa puolestaan ulottuu Utsjoelle ja Kilpisjärvelle asti. Kaikilla kolmella on myös runkoyhteyksiä Suomen ulkopuolelle.

4.2 Kunnat

Kunnat ovat rakentaneet valokuituverkkoja 90-luvun lopulta asti ja ovat edelleen tärkeässä roolissa. Kunnilla tai kuntayhtymillä voi olla halukkuutta alkaa rakentaa omaa julkista verkkoa alueelleen silloin kun muut toimijat eivät siihen ryhdy. Tätä varten tyypillisesti perustetaan verkkoyhtiö, joka tavallisimmin tulee kunnan tai kuntien omistamaksi osakeyhtiöksi. Esimerkkinä mainittakoon Sunet eli Suupohjan Seutuverkko Oy, joka on Kauhajoen, Teuvan, Karvian, Isojoen, Karijoen, Kurikan ja Siikaisten omistama verkkoyhtiö. Monissa kunnissa on myös ymmärretty, että kun rakennetaan kunnallistekniikkaa, kuten sähkö- ja vesijohtoja, on taloudellisesti järkevää samalla myös asentaa valokuitukaapelia riippumatta siitä, tuleeko se heti käyttöön.

On tavallista, että kuntien ylläpitämät verkkoyhtiöt eivät itsessään tarjoa lainkaan palveluja. Usein niiden rooli on vain kunnallistekninen, kuten Sunetilla, joka vain rakentaa, ylläpitää ja operoi verkkoinfrastruktuuriaan. Loppukäyttäjille tarkoitetut palvelut, kuten internet ja televisio, tulevat teleoperaattoreilta. [24] Tällaista toimintamallia voidaan pitää kuluttajien kannalta edullisena, sillä kuluttaja voi yleensä valita palveluntarjoajansa useiden joukosta käyttäen vain kunnan tarjoamaa infrastruktuuria. Sama voi päteä myös seuraavassa käsiteltäviin yksityisiin yhtiöihin ja osuuskuntiin.

4.3 Yksityiset yhtiöt ja osuuskunnat

Suuret operaattorit, kuten Telia Carrier ja Elisa Oyj ovat rakentaneet jo pitkään markkinaehtoisesti valokuituverkkoja. Hyvänä esimerkkinä tästä on Telian 2010-luvun lopulla aloittama Avoin kuitu -liittymien rakentamishanke. Vuonna 2019 se siirtyi Valokuitunen Oy:lle, joka on Telian ja Capman Infran yhteinen hanke. Markkinaehtoisuutensa vuoksi hanke on voimissaan vain kaupunki- ja asutuskeskusalueilla. Siten eri puolilla Suomea etäiset ja harvaan asutut alueet eivät saa laadukasta valokuituverkkoa teleoperaattorilta tai kunnalta. Siitä syntyneeseen nykyaikaisen tietoliikenteen tarpeeseen vastaamaan on alettu perustaa erilaisia osuuskuntia, yhtiöitä ja yhdistyksiä. [9] Tässä käsitellään niitä toimintamuotoja, jotka ovat tyypillisiä asukkaiden omaan aktiivisuuteen perustuville verkko-hankkeille.

Yleisin tällainen toimintamuoto on osuuskunta. Osuuskunta on yhtiömuoto, jossa omistajia ovat sen jäsenet. Osuuskunnassa jäsenet käyttävät päätösvaltaa tasa-arvoisesti ja

demokraattisesti, ja sen tarkoituksena on tyydyttää jäsentensä tarpeet [25]. Usein asukkaat haluavat vahvasti vaikuttaa alueelleen rakennettavaan infrastruktuuriin ja pitää sen omistuksessa. Tästä syystä osuuskunta toimintamuotona on viehättänyt valokuituverkkojen rakentamisesta kiinnostuneita asukasyhteisöjä. Merkittävänä etuna osuuskunnassa saattaa olla myös joustava pääoma: osuuskunnan pääoma määräytyy ensisijaisesti jäsenmäärän mukaan, jolloin infrastruktuurin rakentamiseen käytettävät resurssit konkretisoituvat selkeästi. Jäsenet eivät myöskään tyypillisesti ole vastuussa osuuskunnan toiminnasta osuuspääomaansa suuremmalla summalla. [9]

Rekisteröidyt yhdistykset voivat myös harjoittaa yritystoimintaa, vaikkei se olekaan niiden keskeinen tarkoitus. Tiedetään kuitenkin tapauksia, joissa rekisteröity yhdistys on pannut alulle kaupallisia valokuituverkkohankkeita ja ollut osana niiden toimintaa. Näin teki esimerkiksi Kaustisen seutukunnan tietotekniikkayhdistys ry, joka oli aikanaan seutukunnan internetpalveluntarjoaja ja josta sittemmin tuli KaseNet Oy:n asioita hoitava lautakunta. [9]

Ulkopuolisten rahoitusmahdollisuuksien paranemisen myötä asukasyhteisölähtöisiä seutuverkkoja suunnittelevat kunta-aktiivit ovat alkaneet suosia myös osakeyhtiötä toimintamallinaan [26, 27]. Ennen ELY-keskus- ja EU-rahoituksia osakeyhtiöt ovat olleet kuntalaisille riskialtis toimintamalli. Osakeyhtiö ei osuuskunnan tavoin kestä sellaista tappiota, joka syntyy esimerkiksi verkon rakentamsvaiheen kustannuksista, joita ei vielä voida kattaa osallisten kuukausimaksuillakaan [9].

Kuitenkin suurin osa esimerkiksi Suomen Seutuverkot ry:n yksityisistä kuntalaisaktiivisuuteen perustuvista verkkorakentajajäsenestä on osuuskuntia. Osuuskuntajäseniä on 19. Loput 30 ovat osakeyhtiöitä, joista valtaosa on kuntien tai kuntayhtymien omistuksessa. [2]

4.4 Urakoitsijoiden rooli

Tuskin juuri millään instituutiolla on niin paljon sisäistä asiantuntemusta ja omia resursseja, että kokonainen verkkohanke voitaisiin toteuttaa ilman yhtäkään ulkopuolista urakoitsijaa. Siksi urakoitsijoiden rooli valokuituverkkojen rakentajana on merkittävä. Tavallisia ulkoistettavia rakennusvaiheen tehtäviä ovat esimerkiksi verkkosuunnittelu, maanrakentaminen ja teletyöt. Näihin ei verkkoyhtiöillä ja -osuuskunnilla ole yleensä kylliksi pätevää henkilöstöä ja riittävää kalustoa. Rakennusvaiheen palveluja, kuten

maanrakennusta ja teletöitä, voidaan ulkoistaa usealle pienelle paikalliselle asiantuntijayritykselle tai palkata esimerkiksi Empower Oyj:n kaltainen monialainen suuryritys hoitamaan kaikki ulkoistettavat tehtävät.

Verkkoyhtiöt ja -osuuskunnat ulkoistavat kuitenkin monenlaisia verkkohankkeen tehtäviä, jotka eivät kaikki välttämättä edes suoraan liity verkon rakentamiseen. Sellaisia voi olla erilaiset verkon käyttövaiheen tehtävät, kuten laskutus, ylläpito- ja huoltotyöt ja kaapelinäytöt. Luvun 5 taulukossa 3 on eritelty tavallisia verkkohankkeen vaiheita, joista useimmat voidaan tarvittaessa toimittaa urakoitsijoiden avustuksella. Urakoitsijoiden roolia seutuverkkorakentamisessa käsitelläänkin tarkemmin seuraavan luvun eri vaiheissa.

5 ASUKASYHTEISÖLÄHTÖISET SEUTUVERKOT

Asukasyhteisölähtöisellä seutuverkolla tarkoitetaan tässä sellaista valokuituverkkoa, jonka asukasyhteisö on omasta halustaan ja suurilta osin itse toteuttanut. Käytännössä osa toteutuksesta on saatettu hankkia ulkopuolelta, mutta keskeistä on, että kyläyhteisö on alun perin itse pannut hankkeen alulle ja koordinoi sen myös loppuun asti. Siksi tällaiset hankkeet tunnetaan myös nimellä ”kyläverkko”. Kun puhutaan kyläverkkohankkeesta, tarkoitetaan juuri sellaista toteutusta, johon ulkopuoliset tahot, kuten rahoittajat ja teleoperaattorit, eivät itsestään osallistu. [26]

Kyläverkko voidaan kuitenkin toteuttaa monin tavoin, eikä siksi voida kuvata yhtä yksiselitteistä toimintamallia. Toteutustapa riippuu monista seikoista: Asiaan vaikuttavat esimerkiksi osallisten asukkaiden taloudelliset, tiedolliset ja ammatilliset resurssit, ulkopuolinen rahoitus ja yhteistyö teleoperaattorien kanssa. Asukkaiden resurssit määräävät, mitkä hankkeen osat voidaan toteuttaa sisäisesti ja talkootyönä. Toisaalta ulkopuolinen rahoitus helpottaa asukkaiden taakkaa, kun liittymä asukasta kohden tulee edullisemmaksi ja hankkeen tehtäviä voidaan suuremmissa määrin ulkoistaa.

Tässä luvussa kuvataan asukasyhteisölähtöisen seutuverkon rakentamisen vaiheet ideasta käyttöönottoon. Prosessia tarkastellaan vaihe vaiheelta yleisellä tasolla. Tarkastelussa ovat ensisijaisesti osuuskunnat tai yksityiset osakeyhtiöt. Samat vaiheet kuitenkin pätevät monilta osin silloin, kun kunnat tai kuntayhtymät rakentavat valokuituverkkoja alueelleen.

5.1 Idea paremmista tietoliikenneyhteyksistä

Asukasyhteisölähtöiset seutuverkkohankkeet lähtevät tavallisesti liikkeelle asukkaiden omasta aktiivisuudesta. Kyseessä voi olla yksittäinen kunta-aktiivi tai jokin aktiivinen ryhmä, joka haluaisi asuinalueelleen paremmat tietoliikenneyhteydet. Tällaisilla toimijoilla saattaa olla ainakin jonkin verran tietämystä, kuinka idean toteuttamiseksi pitäisi edetä. Tietoa ruvetaan myös hankkimaan aktiivisesti, esimerkiksi lukemalla oppaita ja kysymällä neuvoa vastaavanlaisia verkkoja rakentaneilta. Niin alkaa hankkeen konkreettinen valmistelu.

Ensimmäisenä aletaan organisoida ensimmäistä hankekokousta. Ensisijainen tehtävä on tiedottaa hankekokouksesta mahdollisimman laajasti alueen asukkaille, sillä on oleellista, että mahdollisimman moni saadaan kiinnostumaan nykyaikaisen tietoliikenneverkon rakentamisesta. Toinen tärkeä tehtävä on hankkia paikalle ulkopuolisia asiantuntijoita kertomaan mahdollisesti edessä olevasta rakennushankkeesta, sen haasteista ja lopputuloksen tuomista eduista. [26]

5.2 Hankkeen valmisteluvaihe

Ensimmäinen hankekokous voi olla luonteeltaan avoin tiedotustilaisuus, jossa syvennetään asukkaiden tietämystä modernien tietoliikenneyhteyksien tarpeellisuudesta sekä valokuitutekniikasta. Tilaisuuksia on kutsuttu myös kyläilloiksi. Tarkoituksena on tunnistella paikallisten innostuneisuutta kehittää asuinalueitaan valokuituverkolla. Samalla voidaan saada myös alustavia tietoja asukkaiden omista resursseista ja halukkuudesta osallistua projektiin esimerkiksi talkoohengessä. [26]

Ensimmäisen hankekokouksen rinnalla voidaan tehdä myös selvityksiä ja tiedostusta puhelimitse tai postitse. Tärkeintä on selvittää, että hanke on realistinen. Samaan aikaan hankkeen aloittaneet aktiivit saattavat alkaa kunnolla organisoitua. Selkeä projektinjohto on järkevää muodostaa mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, jotta tulevia päätöksiä on helpompi tehdä. Myös markkinoinnille ja tiedotukselle on syytä nimetä vastuuhenkilö. [27]

5.2.1 Liiketoimintamalli ja rahoitus

Pian ensimmäisen hankekokouksen jälkeen on päätettävä liiketoimintamalli. Käytännössä se tarkoittaa aktiivisten kuntalaisten perustamaa osuuskuntaa tai osakeyhtiötä, joka voi toimia itsenäisesti, julkishallinnon alaisuudessa tai sen kanssa yhteistyössä. Ensimmäinen merkittävä syy liiketoimintamallin määrittämisen tärkeydelle ovat rahoitusmahdollisuudet. Toiminnan on oltava määrämuotoista ja vastuunjaon selkeää, jotta julkista rahoitusta voidaan hakea. Rahoituksen kannalta vastuunjaossa on olennaista päättää, mitä kuntalaiset tekevät itse ja mitkä osat rakennusprosessia ulkoistetaan. Kaikkien kerättyjen tietojen perusteella laaditaan alustavia kustannuslaskelmia, joiden avulla rahoituksen haku on mahdollista. [27]

Taajamien ulkopuolelle rakennettaessa asukkaita ei ole kyllin tiheästi, jotta yksityiset rahoittajat olisivat kiinnostuneita, eivätkä harvat asukkaat kykene itse kustantamaan verkon rakentamista kokonaisuudessaan. Tästä syystä tarvitaan julkista tukea, jota on saatavilla kolmelta taholta: Liikenne- ja viestintävirastolta, ELY-keskuksilta ja kunnilta.

Liikenne- ja viestintävirasto on myöntänyt tukea valokuituyhteyksien rakentamiseen hankkeillaan ”Laajakaista 2015” ja ”Nopea laajakaista”. Tukea on myönnetty eri suuruisina osuuskunnille ja yksityisille sekä julkisille osakeyhtiöille. Vuonna 2020 tuen suuruus on ollut 33, 44 tai 58 prosenttia kokonaiskustannuksista. Tukea myönnetään suotuisimmin harvaan asutuille alueille. [27, 28]

ELY-keskukset myöntävät maaseudun kehittämiseen erilaisia tukia, ja valokuituverkkoihin on saatavilla maaseutuohjelman kyläverkkotukea, joka on 50 % tai 70 % kokonaiskustannuksista. Tukea voidaan myöntää kunnille, yhdistyksille, osuuskunnille tai osakeyhtiöille. Rahoittaja on EU:n maaseuturahasto. [29]

Kolmas mahdollinen julkisen rahoituksen myöntäjä on kunta, johon verkkoa rakennetaan. Merkittävimmillään kunnan tuki on silloin, kun verkkoa rakentaa kunnan alaisuudessa toimiva yhtiö. Kunnan myöntämä tuki ei ole samalla tavalla määrämuotoista kuin Liikenne- ja viestintäviraston tai ELY-keskusten rahoitus. Rahoitus riippuu esimerkiksi kunnan varallisuudesta ja päättäjien halukkuudesta tukea hanketta. Rahoituksen kannalta kunnalla on myös oleellinen rooli rakentamiseen otettavien lainojen takaajana. [27]

Lainoilla rahoitetaan tavallisesti hankkeen rakennusvaihe. Julkiset tuet maksetaan lähes aina takautuvasti tai tukihakemusten käsittelyssä kestää niin kauan, ettei verkon rakentamista kannata sen vuoksi viivästyttää. Tällöin verkkoa rakentava taho ottaa lainaa esimerkiksi pankilta tai muulta rahoitusyhtiöltä. Lainan takaajaksi tulee useimmiten kunta, jossa verkkoa rakennetaan, mikäli kunnallispoliittinen ilmasto on hankkeelle suotuisa.

Myös rakennusvaiheen jälkeinen pitkäaikainen käyttövaiheen rahoitus täytyy suunnitella valmisteluvaiheessa. Valmistuneesta verkosta on yleensä jäljellä suuri velka, kun se saadaan käyttöön. Toiminnan käynnistäminen ja ylläpito on kallista, eivätkä käyttäjien kuukausimaksut riitä kattamaan kustannuksia ja jo olemassa olevien lainojen lyhennyksiä. Siksi vielä verkon valmistumisen jälkeen otetaan usein uusi, edullisempi pitkäaikaislaina, jonka takaisinmaksuaika osuuskunnilla voi olla 10–30 vuotta. [27]

5.2.2 Sidosryhmät, markkinointi ja tiedotus

Viimeistään kun aletaan ottaa yhteyttä sidosryhmiin ja välittää enenevässä määrin tietoa myös asukkaille, hankeryhmällä on yleensä selkeä käsitys viestintästrategiasta. Käytännössä se tarkoittaa hankeryhmän tiedottamiseen ja viestintään nimettyä vastuuhenkilöä ja tarvittaessa työryhmää, joilla on määritellyt vastuut. [27] Viestintästrategian tärkeä elementti on verkon markkinointi alueen asukkaille, mutta hankkeen etenemiseksi on otettava yhteyttä moniin muihinkin sidosryhmiin.

Kun hankeryhmä tietää, että halukkuutta on, ja rahoitusmahdollisuuksiin on perehdytty, aloitetaan yhteydenotot sidosryhmiin. Merkittävät sidosryhmät ovat kunta, rahoittajat, teleoperaattorit ja urakoitsijat. Kunnan ja rahoittajien kanssa keskustellaan lähinnä taloudellisesta tuesta ja lainojen mahdollisuuksista. Kunnalta saatava tuki ja laina ovat usein tärkeitä juuri projektin alkuvaiheessa, kun suunnitelmia vasta tehdään, eikä muita rahoittajia vielä ole hankittu. [26]

Julkisten teleoperaattorien kanssa käydään alkuvaiheen neuvotteluja runkoverkkoon liittymisestä. On selvittettävä runkoverkkojen liityntäpisteet sekä keskusteltava verkon palvelumallista. Ulkopuolinen operaattori voi ottaa hallinnoitavakseen asukkaiden rakentaman verkon kokonaan tai osittain. On myös mahdollista, että asukas yhteisö tai kunnan yhtiö omistaa verkon kokonaisuudessaan ja hallinnoi sitä itse. Silloin yksi tai useampi teleoperaattori voi tarjota palvelujaan verkossa. Näihin liittyvät seikat on selvittävä ja operaattorien kanssa sovittava toimintatavoista, ennen kuin hankkeessa voidaan edetä.

Lähes koskaan asukas yhteisö ei voi täysin itse hoitaa kaikkia verkon rakennusvaiheita. Hankeryhmän on syytä käydä läpi, mikä voidaan tehdä itse ja mikä on ostettava urakoitsijoilta. Kun urakoitsijoiden tarve on huolellisesti selvitetty, hankeryhmä ottaa yhteyttä yleensä paikallisiin tarvittuihin palveluihin tuottaviin yrityksiin ja aloittaa kilpailutuksen.

5.2.3 Päätökset

Kun hankeryhmä alkaa olla selvillä hankkeeseen liittyvistä toimijoista ja riittävä määrä asukkaita on alustavasti sitoutunut valokuituliittymän hankkimiseen arvioon perustuvalla hintatasolla, aletaan tehdä sitovia päätöksiä. Näihin kuuluu esimerkiksi rahoitusmallin sekä hallinta- ja ylläpitomallin päättäminen. Rakennusvaiheen suunnitelmien

tilaamisesta päätetään. Suunnitelmien valmistuttua on myös tehtävä sopimukset kilpailutuksien voittaneiden urakoitsijoiden kanssa.

Vaikka rahoitus on syrjäseutujen valokuiturakentamisen kriittisin tekijä, siitä päättäminen ei ole vaikeaa. Yksinkertaisesti otetaan kaikki mitä on saatavilla, ja hankkeen seuraavat päätökset etenevät odotetun budjetin mukaan.

Hallinta- ja ylläpitomalli jaetaan aktiiviseen ja passiiviseen malliin [26]. Täysin passiivisessa mallissa asukasyhteisö rakentaa verkon itse ja luovuttaa valmiin verkon esimerkiksi valtakunnalliselle teleoperaattorille. Tällainen malli tulee kyseeseen, kun paikallinen operaattori on valmis tarjoamaan palveluja muttei ole halukas investoimaan infrastruktuurin rakentamiseen. Passiivisen mallin verkon rakentaminen perustuu kokonaisuudessaan asukasyhteisön talkootyöhön ja mahdollisesti operaattorin avustukseen, eikä siihen voi operaattorinomistuksen vuoksi hakea julkista rahoitusta. [27]

Aktiivisessa mallissa asukasyhteisö tai kunnan yhtiö omistaa ja hallinnoi verkkoa itse. Se on yleensä edullisinta asukkaana näkökulmasta. Täysin aktiivinen verkko on tyypillisimmin avoin verkko, mikä tarkoittaa sitä, että eri operaattorit saavat toimia verkossa, ja asukkaat voivat halunsa mukaan kilpailuttaa palveluntarjoajansa. Tämä voi merkittävästikin alentaa liittymän käytön kuukausimaksuja. Julkisen tuen vaatimukseen kuuluu, että verkko jää määrätyn ajaksi asukasyhteisön omistukseen, ja siksi aktiivisen mallin verkon rakentamiseen voi saada tukea. Siten alenee asukaskohtainen liittymän hankintahinta. Toisaalta aktiivimallinen verkko tuottaa työtä tai kustannuksia asukasyhteisölle: Verkon ylläpidosta ja huollosta vastaa luonnollisesti asukasyhteisö itse. Vaihtoehtoisesti ylläpito on ulkoistettava, mistä aiheutuvat maksut tulevat verkon käyttäjien maksettavaksi yleensä kuukausimaksun yhteydessä [26]. Aktiivisessa mallissa kaikki palvelut voidaan tuottaa myös kokonaan itse, jolloin yksi yhteinen yhteys valtakunnan verkkoon jaetaan asukkaiden kesken. Tämä on mahdollista vain hyvin pienissä asukasyhteisöissä, joissa on runsaasti omaa osaamista.

Hallinta- ja ylläpitomallista on päätettävä ennen kuin rakennusvaiheen suunnitelmia voidaan tilata. Käytännössä asukasyhteisöjen rakentamien seutuverkkojen hallinta- ja ylläpitomalli sijoittuu johonkin passiivisen ja aktiivisen mallin välimaastoon. Päätökseen ei ole olemassa yksiselitteistä ohjenuoraa, vaan siihen vaikuttaa asukasyhteisön ja alueen koko, osaaminen ja varallisuus sekä operaattorien suhtautuminen.

Osaltaan hallinta- ja ylläpitomallin päättämiseen vaikuttaa se, mitä osataan tehdä itse ja mitä ulkoistetaan. Siksi päätökset ulkoistuksista tehdään usein rinnakkain hallinta- ja

ylläpitomallia koskevien päätöksiä kanssa. Verkon rakentamiseen tarvitaan monenlaisia osaamista, ja koska asukasyhteisö on kokonaan itse vastuussa suunnitelmien toteutumisesta, luonnollisesti on ulkoistettava kaikki, mitä ei kyetä asukasyhteisön voimin tekemään. Tyypillisiä rakennusvaiheen ulkoistuksen kohteita ovat verkkosuunnittelu, telyt ja kartoitus ja dokumentointi [27]. Itse voidaan tehdä monia osuuksia, kuten rakentamisen projektinjohto tai maanrakentaminen. Tyypillisiä vastuunjakoja eritellään luvussa 5.3.1.

Taulukossa 3 annetaan esimerkiksi kolme erilaista hallinta- ja ylläpitomallia seutuverkon rakentamiseksi. Vihreällä värillä kuvataan sitä projektin vaiheita, jotka asukasyhteisö tekee itse. Oranssi väri tarkoittaa ulkoistusta. Ulkopuolinen teleoperaattori on merkitty sinisellä. Kuvasta nähdään, että asukasyhteisölähtöinen seutuverkko voidaan toteuttaa monella tavalla: hyvinkin omaehtoisesti tai lähes täysin ulkopuolisen teleoperaattorin alaisuudessa. Jälkimmäisestä esimerkkinä mainittakoon Kittilässä Siitosen kyläverkko, jonka Telia rahoitti ja asukasyhteisö rakensi talkoovoimin. Verkko jäi operaattorin omistukseen. [30]

Taulukko 3. Kolme esimerkkiä erilaisista hallinta- ja ylläpitomalleista.

	Täysin aktiivinen	Hybridi	Täysin passiivinen
Rahoitus	Asukasyhteisö, julkinen raha	Julkinen raha, sijoittajat	Operaattori
Projektijohto	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö
Markkinointi ja tiedotus	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö
Verkkosuunnittelu	Ulkoistettu urakoitsija	Ulkoistettu urakoitsija	Operaattorin urakoitsija
Rakentamisen johto	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö
Kaapelinsijoitusluvat	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö
Rakentamisen valvonta	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö
Maanrakentaminen	Asukasyhteisö	Ulkoistettu urakoitsija	Asukasyhteisö
Teletyöt	Ulkoistettu urakoitsija	Ulkoistettu urakoitsija	Operaattorin urakoitsija
Passiiviverkon materiaalit	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö	Operaattori
Aktiivilaitteet	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö	Operaattori
Kartoitus ja dokumentointi	Ulkoistettu urakoitsija	Ulkoistettu urakoitsija	Operaattorin urakoitsija
Kuluttajapalvelut	Asukasyhteisö	Useat operaattorit	Operaattori
Asiakaspalvelu	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö	Operaattori
Myynti	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö	Operaattori
Laskutus	Asukasyhteisö	Ulkoistettu urakoitsija	Operaattori
Ylläpito ja valvonta	Asukasyhteisö	Ulkoistettu urakoitsija	Operaattori
Aktiivilaitteiden huolto	Asukasyhteisö	Sopimusoperaattori	Operaattorin urakoitsija
Passiiviverkon huolto	Asukasyhteisö	Ulkoistettu urakoitsija	Operaattorin urakoitsija
Kaapelinäytöt	Ulkoistettu urakoitsija	Ulkoistettu urakoitsija	Operaattorin urakoitsija
Verkon omistus	Asukasyhteisö	Asukasyhteisö	Operaattori

Rakennusvaiheen suunnitelmien tilaaminen on viimeinen rakentamisvaihetta edeltävä päätös. Se tehdään, kun kaikki edellä mainitut rakentamiseen liittyvät seikat on käsitelty, sillä tilattaviin suunnitelmiin vaikuttaa moni asia, kuten hallinta- ja ylläpitomalli ja ulkoistuksen tarve. On tärkeää myös huomata, että rakennussuunnitelmat ja rakentaminen on lain mukaan kilpailutettava, jos hankkeessa käytetään julkista rahaa. Kilpailutusta ei kuitenkaan tässä opinnäytetyössä enempää käsitellä.

5.3 Rakennusvaihe

Rakennusvaihetta ruvetaan toteuttamaan tilatun suunnitelman mukaan. Rakennusvaiheen suunnitelmaan kuuluvat ainakin verkkosuunnitelma ja laitesuunnitelma. Rakentamisen käytännön toimet, kuten kaapelinauraus ja maanrakennus, voivat sisältyä ulkoa tilattuun rakennusvaiheen suunnitelmaan tai hankeryhmä voi itse organisoida ne.

5.3.1 Rakennustyöt ja vastuiden jakautuminen

Verkkosuunnittelu tilataan tyypillisesti alan asiantuntijayritykseltä, sillä se vaatii sellaista hyvin erikoistunutta osaamista, jota pienten kuntien asukasyhteisöissä harvoin on. Yleensä verkkosuunnitelmatilaukseen kuuluu ensin alustava suunnitelma verkon rungosta. Tätä suunnitelmaa käytetään rakennusvaiheen muiden osien suunnittelussa ja esimerkiksi materiaalihankintojen ja urakoinnin kilpailutuksen lähtökohtana. Koska verkkosuunnitelmassa piirretään kaapelien reitit kartalle, se on samalla rakennusohje maanrakentajalle. Verkkosuunnitelmaan kuuluu lisäksi kuitujen kytkentöjen suunnittelemineen, joten se ohjeistaa myös teletöitä. Siten verkkosuunnitelmaa voidaan pitää verkon dokumentoinnin ensimmäisenä vaiheena ja pohjana. [27]

Rakentamisen projektinjohto panee täytäntöön verkkosuunnitelman toteuttamisen ja on oleellisimmassa roolissa onnistuneessa rakennusurakassa. Projektinjohto voi olla ulkoistettu tai itse huolehdittu. Usein asukasyhteisössä on projektinjohtoon pätevää henkilöstöä, mutta on syytä huomioida, että suuren projektin johtaminen voi olla täyspäiväistä työtä. Kun yhteisössä ei ole tehtävään päteviä, halukkaita ja ehtiviä, projektinjohto on onneksi helppo ulkoistaa. [27]

Kaapelinsijoituslupien hakeminen voi olla työläs prosessi, sillä eri teitä ja kiinteistöjä hallinnoivat eri tahot. Valtion teiden alueelle luvan myöntää ELY-keskus, ja kuntien ja kaupunkien teille lupa haetaan kunnalta. Yksityisteistä huolehtii tavallisesti tiekunnat, jotka yleensä voivat myöntää kaapelinsijoitusluvan kaikkien tieosakkaiden puolesta [26]. On kuitenkin huomattava, että kiinteistönomistajalla on aina lopullinen päätäntävalta kaapelien asennuksesta maille. [27]

Lupien hakeminen vaatii aina käyntiä niillä alueilla, joille kaapelia aiotaan asentaa. Asennuskohteet on dokumentoitava huolellisesti GPS-koordinaatein ja valokuvin. Lisäksi valtion teille vaaditaan siltainsinöörin lausunto, jos kaapelin reitillä on siltoja [26]. Kaikkien olemassa olevien kaapelien ja putkien sijainnit on myös selvitettävä ja liitettävä hakemukseen, sillä kaikki kaapelit ja putket on huolellisesti huomioitava kaivuutöissä. Lupa-hakemukseen on myös liitettävä liikenteenohjaussuunnitelma varsinaista kaivu- ja asennustyötä varten. Lupaprosessin monitahoisuuden vuoksi joskus on syytä harkita lupamenettelyn ulkoistamista asiantuntijalle, mutta se on täysin mahdollista tehdä asukasyhteisönkin voimin.

Kun verkko on suunniteltu, lupa-asiat hoidettu ja rahoitus saatu, voidaan aloittaa varsinaisen rakentaminen. Rakentaminen vaatii aina valvontaa, jotta voidaan varmistua siitä, että kaikki tulee tehdyksi siinä määrässä ja siihen hintaan kuin on sovittu. Rakennuksen laatua ja säädöstenmukaisuutta rakennuttajan on myös velvollisuus valvoa. Valvonnan ulkoistuksen tarve riippuu yleensä projektin johdosta. Jos asukasyhteisö itse johtaa projektia, omatoiminen valvonta on yleensä myös mahdollista ja riittävää. Mitä suuremmissa määrin rakennushanke tilataan, sitä oleellisempaa tilaajan on järjestää asiantunteva valvonta. Vähintään laatu- ja säädösvalvontaan suositellaan ostettavaksi edes ulkoista konsulttiapua, jos rakennushanke tilataan kolmannelta osapuolelta. [27]

Maanrakennuksella tarkoitetaan sitä konkreettista työtä, jossa kaapeli asennetaan maahan. Maanrakennuksesta puhuttaessa tarkoitetaan yleensä sekä erilaisia kaivu-, auraus- ja tienalustustyötä että kaapelien, putkien, kaivojen ja jakokaappien asennustyötä. Urakkaan voi sisältyä esimerkiksi myös louhintaa, asfaltointia ja muita pinnoitustyötä ja kaapelien asennuksia putkiin tai pylväisiin. Maanrakennustyöt hyvin tavallisesti tehdään asukasyhteisössä sisäisesti, sillä hyvinkin pienissä kylissä on yleisesti maanrakennustaitoja ja kalustoa. Tarvittaessa kuitenkin työtä voidaan ulkoistaa, ja useat maanrakennusyhtiöt myyvät hyvinkin tarkkaan määriteltyjä maanrakennustuotteita, kuten louhintaa. [27]

Kaapeli voidaan asentaa maahan suoraan auraamalla tai kaivamalla oja kaapeliputkea varten. Aurauksessa erityinen kaapeliaura tekee maahan noin 70 cm syvän viillon ja samanaikaisesti syöttää kaapelia viillon pohjalle. Erityisesti hankalissa maastoissa kaapelin reitti joudutaan esiauraamaan, jotta voidaan varmistua, ettei reitillä ole esimerkiksi suuria kiviä tai kalliota. Kaapeli aurataan tavallisesti tien reunaan, ja se onkin vaivattomin ja edullisin asennusmenetelmä. Kun auraus ei onnistu, voidaan turvautua perinteiseen ojankaivuun, jolloin maahan asennetaan putki. Kaapeliputken kaivaminen voi olla myös tarkoituksenmukaista sellaisilla alueilla, joille on odotettavissa verkon laajennuksia.

Putkiin on verrattain helppo asentaa uusia kaapeleita. Putken asennus on kuitenkin kalliimpaa, sillä ojan kaivaminen on auraamista hitaampaa, putkista tulee lisäkustannuksia ja kuitujen puhallus putkeen vaatii lisää asennustyötä. [9, 27]

Kaikkialle kaapelia tai putkea ei voida aurata tai kaivaa. Teiden alituksissa suosituin menetelmä on tunkkaus. Tunkkauksessa tien alle tehdään putken mentävä käytävä paineil-makäyttöisellä hydraulisella tunkkausmyyrällä. Erityisen kovissa maaperissä voidaan käyttää erilaisia poraustekniikoita. Jos kaivaminen ei ole kannattavaa tai mahdollista, voidaan turvautua pylväsasennuksiin. Lopuksi auki kaivetun ja myllätyn maan ja pinnoitusten uusiminen kuuluu maanrakennukseen. Käytännössä se tarkoittaa yleisimmin oijen täyttämistä, asfaltointia ja nurmettamista.

Kaapelia asennettaessa, eli maanrakennuksen yhteydessä, voidaan asentaa myös tele-töitä edeltävästi muita passiiviverkon osia, kuten jakokaappeja ja kaapelikaivoja. Jako-kaappeihin ja kaapelikaivoihin tehdään kuitujatkoksien kytkennät. Kuitujatkoksella tarkoi-tetaan kohtaa, jossa kuitu vaihtuu toiseksi tai haarautuu. Jakokaapit ovat yleisimpiä si-jainneissa, joissa on odotettavissa kytkentöjä myös myöhemmin, kuten kasvavan asu-tusalueen reunamilla. Kaapelikaivo on helpompi vaihtoehto, sillä se ei vaadi erillistä be-toniperustusta. Kaapelikaivo on betoninen tai muovinen ontto ympyrälieriö, joka hauda-taan maahan ja jonka sisään sijoitetaan muovinen jatkoskotelo. Uusien kytkentöjen te-keminen kaapelikaivoon on kohtalaisen helppoa, kun maa ei ole roudassa. Se on hyvä ja siisti valinta silloin, kun tiedetään, ettei sijaintiin tehdä usein uusia kytkentöjä.

Passiiviverkon materiaaleilla tarkoitetaan niitä verkon osia, jotka osallistuvat datan kul-jettamiseen verkossa tai suojaavat dataa kuljettavia osia. Näitä ovat esimerkiksi kaapelit, jatkokset, putket, kaapelipäätteet tilaajien kiinteistöissä sekä laitetilojen materiaalit, kuten kaapit ja kytkentäpaneelit. Materiaalihankinnoissa on erityisen tärkeää kiinnittää huomiota hinnan lisäksi laatuun ja saatavuuteen. Huonolaatuisista materiaaleista aiheutuvat korjauskulut ylittävät nopeasti hinnan, joka niitä hankittaessa on säästetty. Saatavuus on rakennusvaiheessa oleellinen siksi, että työ ei luonnollisestikaan voi edetä, ellei tarvitta-via materiaaleja ole käytettävissä. Varsinkin jos urakoitsijalta tilataan työ, tällainen töiden seisominen voi aiheuttaa suuriakin kustannuksia. [27] Hankinta tapahtuu yleensä osittain rinnakkain maanrakennusvaiheen kanssa, mutta keskeiset materiaalit, kuten kaapelit, on tärkeää olla hankittuna hyvissä ajoin ennen rakentamisen alkamista. Passiiviverkon materiaalien hankinnoista voi vastata asukasyhteisön työryhmä tai ulkoistettu palvelun-tuottaja. Joskus myös teleoperaattori voi toimittaa materiaalit, varsinkin jos asukasyhtei-sön rakentama verkko jää teleoperaattorin omistukseen. [26]

Aktiivilaitteita ovat ne verkon laitteet, jotka tarvitsevat sähkövirtaa toimiakseen. Käytännössä ne ovat laitetiloihin tai tilaajien kiinteistöihin asennettavia reitittämiä ja kytkimiä. Aktiivilaitteet erotetaan tässä passiivilaitteista siksi, että verkon passiivinen osa taipuu moneen, kunhan vain noudatetaan tunnettuja kaapelointistandardeja. Aktiivilaitteisiin sitä vastoin liittyy usein tiukkoja vaatimuksia erityisesti silloin, kun palvelut ulkoistetaan tai verkko on tarkoitus jättää puhelinoperaattorin hallinnoitavaksi [27]. Jos verkko on pieni ja helposti hallittava, aktiivilaitteiden valinnat ja hankinnat voidaan kuitenkin hyvin tehdä asukasyhteisön voimin. Tällöin ei ole erityisiä rajoituksia esimerkiksi sen suhteen, minkä valmistajan laitteilla verkko voidaan rakentaa.

Varsinaiset teletyöt tarkoittavat kaapeleiden ja niissä olevien valokuitujen kytkemistä. Teletöiden kohteita ovat siis laitetilat, jakokaapit, kaapelikaivot sekä yhteyden tilaajan kiinteistö. Tavallisia toimia teletöissä on kaapelijatkosten liittäminen ja siihen kuuluva valokuitujen hitsaaminen yhteen, kaapelien päiden käsittely ja kylkiotto, jossa haluttu kuitujatkos otetaan runkokaapelin kyljestä jostain kaapelin kuidusta katkaisematta runkokaapelia. Teletöihin kuuluvat myös kaikkien passiivi-, aktiivi- ja päätelaitteiden kytkentä käyttövalmiiksi sekä toimivuuden varmistaminen mittaamalla. Teletyöt vaativat erityistä ammattitaitoa, ja siksi ne on lähes aina ulkoistettu kaikenlaisissa verkonrakennusmaaleissa.

5.3.2 Dokumentaatio, luvat ja hakemukset

Verkon rakennusvaiheen viimeinen suuri työvaihe on verkon dokumentointi. Toisaalta dokumentointi aloitetaan jo suunnitteluvaiheessa, sillä alkuperäiset suunnitelmat tehdään yleensä samalla järjestelmällä kuin loppuvaiheen dokumentointi. Varsinaisen reitin dokumentointi ja kartoitus on yleensä käynnissä jo samalla kun kaapelia aurataan. Loppuvaiheessa kuitenkin on koostettava kaikki dokumentoiva aineisto yhteen, mieluiten keskitettyyn järjestelmään, jota voidaan hyödyntää verkon muutoksissa, palvelujen tarjonnassa, vikojen selvityksessä ja kaapelinäytöissä.

Kaapelien reitit, tienalitukset sekä jakokaappien ja kaapelikaivojen paikat merkitään dokumentaatioon GPS-koordinaatein erittäin tarkkoilla laitteilla [9]. Kaapelien osalta on suotavaa merkitä myös reitillä olevat huomion arvoiset seikat maastossa, kuten suuret kivet, jotka ehkä aiheuttavat pieniä poikkeuksia alkuperäiseen reittisuunnitelmaan.

Tilaajien kiinteistöissä olevat laitteet liitetään dokumentointiin, jotta palvelut voidaan tarjota oikeaan osoitteeseen. Dokumentoinnissa on esimerkiksi siis oltava tieto, mikä kuitumuunnin kytketään mihinkin keskuksen kytkimen porttiin ja missä kiinteistössä kyseinen kuitumuunnin on. Selkeä ja ajantasainen dokumentaatio on myös arvokas ja suuressa verkossa ehdoton työkalu vikatilanteiden selvittämiseen. Dokumentaation perusteella verkon ylläpitäjän on mahdollista paikantaa vika nopeasti ja lähettää korjaajien mukana oikeat työkalut ja vaihtolaitteet.

Dokumentaatiota tarvitaan myös kaapelinäyttöihin. Kaapelinäyttö tarkoittaa nimensä mukaisesti sitä, että verkon ylläpitäjä näyttää verkkonsa alueella toimiville muille urakoitsijoille, missä kaapeleita on. Teleyritysten kaapelinäyttövelvollisuudesta säädetään laissa sähköisen viestinnän palveluista. Lain mukaan teleyritysten on maksutta annettava tietoja kaapeleidensa sijainnista. Lisäksi tieto kaapelien sijainnista on saatettava tarjottavaksi digitaalisessa muodossa keskitettyyn palveluun. [31, 32] Näin ollen kaapelien sijaintien huolellinen dokumentointi on kaapelinäyttöjen kannalta välttämättömyys. Kaapelinäytöt usein ulkoistetaan keskitetylle palvelulle, jolle teleyritys maksaa yleensä vuosimaksua sekä kertamaksua näyttöä kohti. Teleyritys voi hoitaa kaapelinäytöt itsekin, mutta se sitoo yleensä kohtuuttomasti resursseja. [27]

Sen lisäksi, että dokumentaatio on laillinen vaatimus verkon luvallisuudelle, sitä tarvitaan myös kaikkien rahoitushakemusten toimittamiseen. Rahoittajille ja sijoittajille on voitava osoittaa, että rakennettu verkko vastaa sitä suunnitelmaa, jolle rahoitus on haettu. Yleensä vasta rakennusurakan ja dokumentaation valmistuttua haettu rahoitus maksetaan.

5.4 Käyttöönottovaihe, ylläpito ja valvonta

Fyysisesti valmistunut ja tiedonsiirtokäyttöön konfiguroitu verkko otetaan lopulta käyttöön suunnitelmien mukaisella vastuunjakomallilla. Tähän liittyvät verkon kautta tarjottavat operaattoripalvelut sekä verkon huolto, eikä tähänkään olemassa ole mitään yksiselitteistä mallia, jolla voitaisiin jokainen verkko suositella hallinnoitavaksi. Kuluttaja- ja operaattoripalveluiden tuottamista kuvataan jo luvussa 5.2.3.

Jos verkko jää asukasyhteisön tai kunnan omistukseen, on mahdollista, että operaattoripalvelumallista riippumatta verkolla on omat asiakaspalvelun sekä myynnin ja laskutuksen yksiköt. Asiakaspalvelun tyypillinen vähimmäistehtävä on toimia tukikeskuksena,

josta vikailmoitukset annetaan eteenpäin joko verkon omalle it-osastolle tai ulkoistetulle palveluntuottajalle. Tukikeskuksesta voidaan myös tarjota tukea asiakkaiden omatoimiseen vian ratkaisuun. [27]

Pienemmissä verkoissa myynnille tarvitaan oma yksikkö lähinnä rakennusvaiheessa ja sitä ennen, kun alueen asukkaille myydään liittymiä. Jos verkko ei enää sen jälkeen merkittävästi laajene, myynnin voi sulauttaa asiakaspalveluun. Toisaalta moni verkko jatkaa kasvamistaan, jolloin myyntiä voidaan joutua jopa alueellistamaan.

Myös laskutus riippuu operaattoripalvelumallista. Jos verkossa toimii ulkopuolinen operaattori, se voi laskuttaa liittymän kuukausimaksun operaattoripalvelulaskutuksen yhteydessä. Tällöin verkon omistajan laskutustehtäväksi jää yleensä vain liittymien avausmaksut. Siinä tapauksessa laskutus ei tuota suurta työmäärää, ja sen voi hoitaa asiakaspalveluyksikkö. Tämä on suosittu malli pienillä ja keskisuurilla toimijoilla. [27]

Käytössä olevaa verkkoa myös valvotaan aktiivisesti. Valvontaan kuuluu aktiivilaitteiden toiminnan tarkkailu, passiiviverkon vikakohtien selvittäminen, tietoturvan varmistaminen fyysisen verkon osalta, teletietojen tallennus sekä viranomaisten yhteydenottoihin vastaaminen. Verkkoa voidaan valvoa itse tai sen voi tehdä kuluttajapalveluja tarjoava operaattori.

5.5 valokuituverkko ja kehittyvä yhteiskunta

Kun verkko on valmis ja käytössä, verkon omistaja voi joko vain jäädä paikoilleen ylläpitämään verkkoaan tai aktiivisesti pyrkiä kehittymään ajan ja uusien teknologioiden mukana. Tulevaisuuteen suuntautuminen olisi tietysti järkevää, jotta kaikki verkon rakentamisen vaatima työ ja raha tuottaisivat suurimman mahdollisen hyödyn. Ajan oloon verkon jatkuva kehittyminen lienee myös välttämätöntä alueen ihmisten normaalin elämän ja liiketoiminnan kannalta.

Seutuverkkoja alkoi ilmaantua Suomen taajamiin 2000-luvun ensikymmenen loppua kohden [9]. Viestintäviraston tukirahoitukset valokuidun rakentamiseksi alkoivat vuonna 2011 [28]. Vuonna 2015 pelkästään Itä- ja Pohjois-Suomessa seutuverkot palvelivat 20 000 käyttäjää [30]. Verkkoja rakennetaan yhtä: rakennushankkeita on meneillään, ja Viestintävirasto on antanut vuoden 2019 lopulla lukuisia uusia tukipäätöksiä [28]. Seutuverkkojen tuomat valokuituyhteydet palvelevat siis jo merkittävää joukkoa suomalaisia,

joiden tulevaisuuden tietoliikenneyhteydetkin riippunevat verkon omistajan halusta kehittyä.

Tietoliikenteen tarve ei ole mihinkään vähenemässä vaan päinvastoin. Sen lisäksi, että verkoilta vaadittava kapasiteetti kasvaa eksponentiaalisesti koko ajan [33], voidaan yllättäen joutua tilanteeseen, jossa yhtäkkiä tarvitaan uusia ratkaisuja. Vuoden 2020 keväällä alkaneen COVID-19-pandemian aiheuttama laajamittainen etätyöhön ja -opiskeluun siirtyminen koetteli tietoliikenneinfrastruktuuria. Voidaan arvella, että sellaisissa tilanteissa suhteellisen hyvässä asemassa ovat ne haja-asutusalueen ihmiset, jotka ovat saaneet seudulle luotettavan valokuituverkon. Tulevaisuus voi asettaa yllättäviä haasteita, ja niihin on varauduttava hyvällä infrastruktuurilla.

Vahvaa ja vakaata tietoliikennetekniikkaa vaaditaan myös muiden kehittyvien tekniikoiden tueksi. Yksi esimerkki siitä on langattomat tekniikat. 2010–2020-luvun uutisointi ja jopa operaattorien mainoskampanjat luovat mielikuvaa siitä, että langattoman tekniikat olisivat vaihtoehto valokuidulle. On kuitenkin tärkeä ymmärtää, että mobiiliverkkoja ei ole olemassa ilman laadukasta valokuituinfrastruktuuria. Jokaisen radiomaston on kuitenkin liityttävä runkoverkkoon kiinteällä kaapelilla. Erityisesti viidennen sukupolven matkapuhelintekniikkaa tukevat radiomastot vaativat valtavan suuren tiedonsiirtokapasiteetin, ja siksi ne on poikkeuksetta kytketty runkoverkkoon valokuitukaapelilla.

Lisäksi lyhyen kantamansa vuoksi 5G-mastot on rakennettava hyvin lähelle loppukäyttäjiä. Tämä aiheuttaa sen, että matkapuhelinoperaattorit ovat olleet kiinnostuneita vuokraamaan seutuverkkojen valokuituinfrastruktuuria rakentaakseen radiomastojaan syrjäseuduille. Se voi olla tärkeäkin taloudellinen etu voittoa tavoittelemattomalle seutuverkolle ja osaltaan kannustaa verkon omistajia laajentamaan verkkoaan entisestään.

6 LOPUKSI

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä nykyaikaisten valokuituverkkojen ei-markkinaehtoiseen rakentamiseen Suomen haja-asutusalueilla. Koska työssä käsitellään nimenomaista tekniikkaa verkkojen toteuttamiseksi, oli sopivaa alustaa tarkastelemalla, mitä valokuitu teknisessä mielessä on ja miten se on kehittynyt mahdollistamaan nykyisenlaiset tietoverkkoyhteydet. Asianmukaista oli myös selvittää valokuiturakentamiseen liittyviä muita toimijoita, jotta seutuverkkojen rakentajien rooli kirkastuisi.

Asukasyhteisöistä lähtevien seutuverkkojen rakentamisesta harvaan asutuille alueille on verrattain vähän tietoa saatavilla, vaikka rakennushankkeet ovat pitkään jatkuneet, tulevaisuuteen jatkuvat ja lukuisat ympäri Suomen. Opinnäytetyöllä haluttiin toisaalta kartuttaa tietoa valokuituverkkorakentamisen prosessista ja toisaalta luoda yleistajuinen ja helposti ymmärrettävä kuvaus niistä vaiheista ja seikoista, joita rakentamiseen käytännössä voi sisältyä. Siten työ osaltaan lisää yleistä tietoutta tietoliikennetkaisuuden mahdollisuuksista.

Menetelmä opinnäytetyössä oli kirjallisuuskatsauksen ja prosessikuvauksen yhdistelmä. Kirjallisuuden osalta teoreettisena pohjana oli tietoliikennetekniikkaa ja erityisesti valokuitutekniikkaa käsitteleviä tietokirjoja, ja varsinaisena konkreettisena sisältönä tarkasteltiin seutuverkkojen rakentamiseen liittyvien organisaatioiden julkaisuja. Julkaisuista saatiin tietoa siitä, minkälaisia käytännön ratkaisuja seutuverkkoja rakentamassa olleet kirjoittajat suosittelivat ja mitä tosiasiallisesti rakentamiseen on vaadittu.

Työssä syntyi selkeä käsitys siitä, että seutuverkkojen rakennusprosessille ei ole olemassa selkeää yleistä mallia. Ymmärrettiin ja kuvattiin, että jokaisen seutuverkkohankkeen edellytykset, työvaiheet ja vastuunjako riippuvat esimerkiksi alueesta, rahoituksesta ja asukasyhteisön resursseista, operaattoriyhteistyöstä ja kunnallispoliittisesta ilmastosta. Työssä tulee kuvatuksi yleisimmät huomioon otettavat seikat, jotka useimmille kuituhankkeille ovat ainakin joissain määrin yhteisiä. Selväksi kuitenkin kävi, että kaikille hankkeille yhteistä on hankealueen asukkaiden vahva tahto rakentaa itse itselleen hyvä tietoliikenneinfrastruktuuri.

Edelleen tietoa seutuverkkojen rakentamisesta Suomessa voitaisiin lisätä jatkotutkimuksilla. Tämä työ oli luonteeltaan deskriptiivinen yleiskatsaus, jossa on laadullisen tutkimuksen piirteitä, mutta lisäksi aiheeseen sopisi täsmällisemmän tutkimuksen

menetelmät. Seutuverkkohankkeita on Suomessa jo niin paljon, että niiden vertailuun voisi käyttää määrällisiä menetelmiä. Kiinnostavia, tulevia hankkeita hyödyttäviä, tilastollisesti selvitettäviä asioita voisivat olla esimerkiksi ne seikat, jotka oleellisesti näyttävät vaikuttavan hankkeen keston ja liittymäkohtaiseen hintaan. Sellaisilla ja kenties monilla muillakin jo toteutuneista hankkeista saaduilla tiedoilla voitaisiin edistää seutuverkko-hankkeiden leviämistä uusille alueille ja monin tavoin tehostaa hankkeiden etenemistä.

Koska tässä työssä vain kuvataan prosessi ja analysoidaan sitä, kysymyksiä ehkä nousee enemmän kuin vastauksia syntyy. Työn ansio kuitenkin voisi olla se, että aihe herättelee ammatillista mielenkiintoa ja tutkivaa asennetta seutuverkkorakentamista kohtaan. Se on tärkeää, sillä verkkoja joka tapauksessa rakennetaan, ja silti selvitettävää on vielä paljon.

LÄHTEET

- [1] Huurdeman, A. *The worldwide history of telecommunications*. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley-Interscience, 2003. 638 s. ISBN 0-471-20505-2.
- [2] Suomen Seutuverkot ry. *Varsinaiset jäsenet*. [Internet]. Suomen Seutuverkot ry. [Viitattu 17.2.2020]. Saatavissa: <https://www.seutuverkot.fi/toiminta/j%C3%A4senet/varsinaiset-j%C3%A4senet>.
- [3] Suomen Seutuverkot ry. *Tietoyhteys kuuluu kaikille*. [Internet]. Suomen Seutuverkot ry. [Viitattu 17.2.2020]. Saatavissa: <https://www.seutuverkot.fi/>.
- [4] Agrawal, G. P. *Fiber-optic communication systems*. 3rd ed. New York, USA: John Wiley & Sons Inc. 2002. 546 s. ISBN 0-471-22114-7.
- [5] Grubb, S. & Mertz, P. & Kumpera, A. & Dardis, L. & Rahn, J. & O'Connor, J. & Mitchell, M. Real-Time 16QAM Transatlantic Record Spectral Efficiency of 6.21 b/s/Hz Enabling 26.2 Tbps Capacity. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) 2019*. San Diego, California, USA. USA: OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper M2E.6. 2019. Doi: 10.1364/OFC.2019.M2E.6.
- [6] Jasion, G. T. & Bradley, T. D. & Harrington, K. & Sakr, H. & Chen, Y. & Fokoua, E. N. & Davidson, I. A. & Taranta, A. & Hayes, J. R. & Richardson, D. J. & Poletti, F. Hollow Core NANF with 0.28 dB/km Attenuation in the C and L Bands. *Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers 2020*. USA: Optical Society of America, paper Th4B.4. 2020. Doi: 10.1364/OFC.2020.Th4B.4.
- [7] Helkama Bica Oy. *Valokaapelit tele- ja tietoverkoissa*. 4th ed. Tampere, Finland: Tammerpaino Oy. 2004. 114 s.
- [8] PriMetrica Inc. *Submarine Cable Map*. [Internet]. 2020. [Viitattu 8.4.2020]. Saatavissa: <https://www.submarinemap.com>.
- [9] Riukulehto, T. *Verkonkutojan käsikirja nro 2*. [Internet]. Suomen Seutuverkot ry. 2007. 42 s. [Viitattu 13.3.2020]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/18286-Verkonkutojan-kasikirja-nro-2-miten-toteuttaa-kylan-seutukunnan-tai-maakunnan-kattava-valokuituverkko.html>.
- [10] Vainio, U. *Snells law simple schematic*. [Internet]. https://fi.wikipedia.org/wiki/Snellin_laki. 2007. [Viitattu 6.7.2020]. Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/Snells_law_simple_schematic.png.
- [11] Deen, M. J. & Kumar, S. *Fiber Optic Communications*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Inc. 2014. 553 s. ISBN 978-0-470-51867-0.
- [12] Oliviero, A. & Woodward, B. *Cabling: The Complete Guide to Copper and Fiber-optic Networking*. Indianapolis, Indiana, USA: John Wiley & Sons Inc. 2014. 1 284 s. ISBN 978-1-118-80732-3.
- [13] Vinap. *Fiber optic jacketed cable with interlocking armor structure. Vector realistic illustration*. [Internet]. 2018. [Viitattu 18.8.2020]. Saatavissa: <https://stock.adobe.com/fi/images/fiber-optic-jacketed-cable-with-interlocking-armor-structure-vector-realistic-illustration/178981766>.
- [14] ITU-T G.651.1. *Characteristics of a 50/125 μm multimode graded index optical fibre cable for the optical access network*. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland. Julk. 29.11.2018.

- [15] Gilmore, M. *An Overview of Singlemode Optical Fibre Specifications*. [Internet]. Buntingford, UK: The Fiberoptic Industry Association. [Viitattu 6.8.2020]. Saatavissa: <https://www.teldor.com/files.php?actions=show&id=5340>.
- [16] IEC 60793-2-50. *Optical fibres – Part 2-50: Product specifications – Sectional specification for class B single-mode fibres*. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland. Julk. 1.11.2015.
- [17] Robert. *Fibre cables plugged in to a network switch*. [Internet]. 2018. [Viitattu 18.8.2020]. Saatavissa: <https://stock.adobe.com/fi/images/fibre-cables-plugged-in-to-a-network-switch/290004310>.
- [18] Microsoft. *Windows Network Architecture and the OSI Model*. [Internet]. 2017. [Viitattu 19.8.2020]. Saatavissa: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/network/windows-network-architecture-and-the-osi-model>.
- [19] Milosdzajn. *Network Icons Set - Isolated On White Background - Vector Illustration, Graphic Design. For Web, Website, Print Materials*. [Internet]. [Viitattu 20.8.2020]. Saatavilla: <https://stock.adobe.com/fi/images/network-icons-set-isolated-on-white-background-vector-illustration-graphic-design-for-web-website-print-materials/114807798>.
- [20] FNE Finland Oy. *Runkoverkon peittoalue 2017/6*. [Internet]. FNE Finland Oy. 2017 [Viitattu 20.8.2020]. Saatavissa: <http://www.fne.fi/content/uploads/2017/06/FNE-Finland-Runkoverkon-peittoalue-2017-06.pdf>
- [21] Teknomeria Oy. *Teknomeria Network Map*. [Internet]. Teknomeria Oy. [Viitattu 20.8.2020]. Saatavilla: https://static1.squarespace.com/static/56e2b91f356fb0c2d9531adb/t/57dbb00537c5814295717a9d/1474015240680/teknomeria_backbone_network_map.jpg.
- [22] Ramaswami, R. & Kumar, S. & Galen, S. *Optical Networks*. Burlington, USA: Elsevier. 2009. 893 s. ISBN 978-0-12-374092-2.
- [23] CSC. *Funet-runkoverkko - Funet - Eduuni-wiki*. [Internet]. CSC-Tieteen tietotekniikan keskus Oy. [Viitattu 19.2.2020]. Saatavissa: <https://wiki.eduuni.fi/display/funet/Funet-runkoverkko>.
- [24] SUNET. *Mikä on Sunet?* [Internet]. Suupohjan Seutuverkko Oy. 2020. [Viitattu 8.4.2020]. Saatavissa: <https://sunet.fi/yritysesittely/>.
- [25] Suomen Yrittäjät ry. *Osuuskunta*. [Internet]. Suomen Yrittäjät ry 2014. [Viitattu 13.3.2020]. Saatavissa: <https://www.yrittajat.fi/yrittajan-abc/perustietoa-yrittajyydesta/yritysmuodot-ja-vasuut/osuuskunta-318169>.
- [26] Alatörmänen, S. & Honkavuori, A. & Isola, A. & Rantamo, J. & Rinne, J. *Kyläverkkohankkeiden toteuttaminen*. [Internet]. Lapin liitto. 2014. 13 s. [Viitattu 26.2.2020]. Saatavissa: http://www.lappi.fi/c/document_library/get_file?folderId=1424608&name=DLFE-24852.pdf.
- [27] Laaksonen, P. *Kuiturakentajan käsikirja: Opas valokuiturakentamisen aloittamiseen*. [Internet]. Suomen Seutuverkot ry. 2014. 52 s. [Viitattu 13.3.2020]. Saatavissa: <https://www.seutuverkot.fi/assets/files/kuiturakentajan-kasikirja.pdf>.
- [28] Traficom. *Verkkojen rakentaminen*. [Internet]. Liikenne- ja viestintävirasto. [Viitattu 29.6.2020]. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/verkkojen-rakentaminen>.
- [29] Pahkasalo, M. *Laajakaista herättää kylän eloon*. [Internet]. Maa- ja metsätalousministeriö. 2020. [Viitattu 29.6.2020]. Saatavissa: <https://www.maaseutu.fi/laajakaistainfo/miksi-valokuitu/laajakaista-herattaa-kylan-eloon>.

[30] Pohjois-Karjalan maakuntaliitto. *Valokuitua! Verkkorakentamisen ratkaisuja*. [Internet] Pohjois-Karjalan maakuntaliitto. 2015. 62 s. [Viitattu 13.8.2020]. Saatavissa: <https://www.pohjois-pohjanmaa.fi/file.php?fid=3470>.

[31] Laki sähköisen viestinnän palveluista 917/7.11.2014. 241 §: *Telekaapeleita vaarantava työ*. [Viitattu 11.8.2020] Saatavissa: <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140917#O9L28P241>.

[32] Laki sähköisen viestinnän palveluista 1003/23.11.2018. 242 §: *Telekaapeleiden sijaintia koskevien tietojen saatavuus ja tietoturva*. [Viitattu 11.8.2020] Saatavissa: <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140917#O9L28P242>.

[33] Nielsen, J. *Nielsen's Law of Internet Bandwidth*. [Internet]. 2019. [Viitattu 26.8.2020]. Saatavilla: <https://www.nngroup.com/articles/law-of-bandwidth/>.