MAANRAKENNUSKUSTANNUSTEN ARVIOINTI VALOKUITUVERKKOJEN RAKENTAMISESSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Tietotekniikan diplomityö

2024

Janne Pennanen

Tarkastajat: Associate professor, TkT Jouni Ikonen

DI Jarmo Ruohola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin insinööritieteiden tiedekunta

Tietotekniikan koulutusohjelma

Janne Pennanen

Maanrakennuskustannusten arviointi valokuituverkkojen rakentamisessa

Tietotekniikan diplomityö

2024

66 sivua, 25 kuvaa, 5 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Associate professor, TkT Jouni Ikonen ja DI Jarmo Ruohola

Avainsanat: Valokuitu, kustannusarviointi, maanrakennus, maaperä, maalaji, suunnittelututkimus

Digitalisoituvassa maailmassa laadukkaiden tietoliikenneyhteyksien merkitys korostuu, ja valokuituverkkojen kattavuuden laajentamiselle on asetettu kunnianhimoisia tavoitteita sekä Suomessa että kansainvälisesti. Harvaan asutussa Suomessa valokuiturakentamiselle on ominaista se, että markkinaehtoinen rakentaminen ei usein ole kannattavaa, vaan valokuiturakentamista rahoitetaan erilaisilla tuilla, joita haetaan valokuituhankkeille tehtyjen kustannusarvioiden perusteella.

Valokuituhankkeiden kustannusarviointi ei kuitenkaan ole yksinkertainen tehtävä. Valtaosan kokonaiskustannuksista muodostavat maanrakennuskustannukset, jotka ovat alttiita huomattavalle vaihtelulle riippuen siitä, mitä maanrakennusmenetelmiä käytetään. Käytetyt maanrakennusmenetelmät riippuvat monista tekijöistä, joista yksi merkittävimmistä on verkkoreitin maaperä. Kallioisessa maaperässä maanrakennuksen metrikustannukset voivat nousta kymmeniä kertoja korkeammiksi kuin otollisemmassa maaperässä.

Tässä diplomityössä tutkittiin sitä, miten maanrakennuskustannusten arviointia voitaisiin parantaa. Työssä kehitettiin Python-ohjelma, joka käyttää dataa Suomen maaperästä annetun verkkoreitin kalliomaaprosentin laskemiseen, ja muodostaa kalliomaaprosentin sekä aiempien verkkohankkeiden kustannusdatan avulla maanrakennuskustannusarvion kyseiselle reitille.

Työn tulokset näyttävät osoittavan, että maaperädatan hyödyntämisestä kehitetyn kaltaista ohjelmaa käyttämällä voi olla hyötyä maanrakennuskustannusten arvioinnissa, mutta tarkkojen kustannusarvioiden muodostaminen ainoastaan verkkoreitin kalliomaaprosentin perusteella on haastavaa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Engineering Science

Software Engineering

Janne Pennanen

Estimating the costs of civil engineering in fiber optic network deployment

Master's thesis

2024

66 pages, 25 figures, 5 tables and 3 appendices

Examiners: Associate professor Jouni Ikonen, D.Sc. and Jarmo Ruohola, M.Sc.

Keywords: Fiber optic, cost estimation, civil engineering, soil, soil type, design science

In the digitalizing world of today, the importance of high-quality internet connections is highlighted, and ambitious targets for expanding fiber optic networks have been set both in Finland and internationally. In sparsely populated Finland, it is often the case that building fiber optic networks is not economically feasible, and deployment projects are financed with various subsidies. These subsidies are applied for based on cost estimates that have been made for the deployment projects.

Cost estimation for deploying fiber optic networks is no simple task, however. The majority of the total costs for these projects is made up by civil engineering costs, which are prone to considerable fluctuation depending on the civil engineering methods used. The methods that can be used, on the other hand, are largely defined by the terrain along the route of the network to be built. In rocky terrain, the costs per meter of civil engineering can be tens of times higher than in more suitable terrain.

The objective of this thesis was to investigate how estimating the costs of civil engineering could be made easier. As a result, a Python program was developed that uses data of the terrain and soil types of Finland to calculate the percentage of rocky terrain along a given route. Afterwards, the program uses this information in combination with the cost data from previous fiber optic deployment projects to give an estimate of the civil engineering costs for the given route.

The results of this thesis seem to show that the usage of terrain data by applying a program, like the one developed, can help with estimating the civil engineering costs, but forming accurate cost estimates based solely on the percentage of rocky terrain along a given route is challenging.

KIITOKSET

Kiitos Saimaan Kuitu Oy:lle ja Jari Käyhdylle mielenkiintoisesta aiheesta, yhteistyöstä ja avusta valokuitutekniikan ja verkonrakennuksen periaatteiden ymmärtämisessä. Kiitos myös muille valokuiturakentamisen asiantuntijoille, joita haastattelin diplomityötä varten.

Suurkiitos kuuluu myös Jouni Ikoselle diplomityön ohjaamisesta, neuvoista sekä tuesta työn aikana.

Ennen kaikkea haluan kuitenkin kiittää sukulaisiani ja ystäviäni, jotka ovat sekä välillisesti että suoraan tukeneet ja auttaneet jaksamaan diplomityörutistuksessa.

Lopuksi kiitos itselleni, viisivuotinen opiskelutaival on nyt takana päin.

LYHENTEET JA TERMIT

AON	Aktiivinen optinen verkko (Active Optical Network)
ArcGis	Paikkatieto-ohjelmisto
CO	Verkko-operaattorin keskus tai liityntäsolmu (Central Office)
EU	Euroopan Unioni
ESRI	Environmental Systems Research Institute
Fiona	Python-kirjasto shapefile-tiedostojen käsittelyyn
FTTH	Valokuitu kotiin (Fiber to the Home)
GeoPandas	Python-kirjasto paikkatietojen käsittelyyn
GIS	Paikkatietojärjestelmä (Geographical Information System)
GTK	Geologian Tutkimuskeskus
Keycom	Ohjelmisto valokuituverkkojen suunnitteluun ja ylläpitoon
LineString	Shapefile-tiedostossa viivaa kuvaava tietotyyppi
Mobilenote	Ohjelmisto rakennussuoritteiden kirjaamiseen
ONT	Tilaajapäätelaite optisessa verkossa (Optical Network Termination)
ONU	Tilaajapäätelaite optisessa verkossa (Optical Network Unit)
OLT	Optisen verkon päätelaite operaattorin päädyssä (Optical Line Termination)
PE	Polyeteeni
Polygon	Shapefile-tiedostossa monikulmiota kuvaava tietotyyppi
PON	Passiivinen optinen verkko (Passive Optical Network)
Python	Ohjelmointikieli
QGIS	Paikkatieto-ohjelmisto
Shapefile	Tiedostotyyppi paikkatietojen käsittelyyn, tiedostopääte .shp
Shapely	Python-kirjasto paikkatietojen käsittelyyn
XGS-PON	Kymmenen gigabitin symmetrinen passiivinen optinen verkko (Ten Gigabit Symmetrical Passive Optical Network)
XLSX	Microsoft Excel -ohjelman käyttämä tiedostotyyppi

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto 1
1.1 Tausta 3
1.2 Työn tavoitteet, tutkimuskysymykset ja rajaukset 4
1.3 Työn rakenne 5
2 Tutkimusmenetelmä 6
3 Valokuituverkkojen rakentaminen 10
3.1 Verkkorakenteet 10
3.1.1 Passiivinen optinen verkko 10
3.1.2 Aktiivinen optinen verkko 11
3.2 Maanrakennusmenetelmät 13
3.2.1 Auraaminen 13
3.2.2 Kaivaminen 14
3.2.3 Mikro-ojitus ja mikroputkitus 15
3.2.4 Menetelmät kallioisessa maastossa 17
3.2.5 Teiden alitukset 17
3.2.6 Yhteenveto maanrakennuksesta ja sen kustannuksista 18
4 Aiempi tutkimus ja prosessit verkkoyhtiöissä 19
4.1 Verkonrakennuksen optimointi 19
4.2 Maanrakennuksen kustannusarviointi 22
4.3 Yhteenveto aiemmasta tutkimuksesta ja tutkimusaukko 23
4.4 Kustannusarviointiprosessi: Saimaan Kuitu Oy 24
4.5 Kustannusarviointiprosessi: Tähtikuitu Oy 26

4.6 Ratkaisun tavoitteet ... 27
5 Ratkaisun kehitys ... 30
5.1 Ratkaisuvaihtoehtojen ideointi ... 30
5.1.1 Asukkaiden ja toimijoiden tietojen hyödyntäminen ... 31
5.1.2 Satelliittidatan käyttö maatyyppien arvioinnissa ... 32
5.1.3 Kustannusdatan ja maaperädatan yhdistäminen ... 33
5.2 Ratkaisuartefaktin kehitysprosessi ... 38
5.2.1 Aineistojen tiedostomuodot ... 38
5.2.2 Kalliomaaprosentin laskenta ... 42
5.2.3 Kustannusarviointi kalliomaaprosentin perusteella ... 46
5.3 Artefaktin testaus ... 49
6 Ratkaisun arviointi ... 52
6.1 Arviointistrategia ... 52
6.2 Vertailu ratkaisun tavoitteisiin ... 53
7 Keskustelu ... 56
7.1 Tulokset ... 56
7.2 Rajoitteet ja yleistettävyys ... 58
7.3 Jatkotutkimus ... 58
8 Johtopäätökset ... 60
Lähteet ... 62

Liitteet

Liite 1. Excel-taulukko tarkastelluista verkko-osuuksista

Liite 2. Excel-taulukko hintakertoimien optimointiin

Liite 3. Excel-taulukko testaustuloksille

1 Johdanto

Tässä diplomityössä tutkitaan sitä, miksi maanrakennuskustannusten arviointi valokuituverkkojen rakennushankkeissa on vaikeaa ja ennen kaikkea sitä, miten maanrakennuskustannusten arviointia voitaisiin parantaa. Työssä keskitytään erityisesti siihen, voitaisiinko dataa verkkoreittien maalajeista – etenkin kalliomaa-alueista – käyttää hyödyksi kustannusarvioita tehdessä. Tutustutaan aluksi siihen, miksi valokuituverkkojen rakentaminen on tärkeää.

Digitalisaatio, eli tietotekniikan ja teknologian kasvava merkitys ihmisten, yhteisöjen ja yritysten toiminnoissa, on 2020-luvulla yksi suurimmista maailmaamme muokkaavista trendeistä. Digitalisaatiolla on vaikutuksensa kaikkiin yhteiskunnan osa-alueisiin; yritysten tuotantoprosesseista [1], liiketoimintamallien muutoksesta [2], sekä uusien palvelumallien syntymisestä [3], aina opiskelijoiden työllistymiseen asti [4]. Yhteiskunnan digitalisoituessa nopeasta ja vakaasta verkkoyhteydestä on muodostunut sekä yksittäisten ihmisten ja kotitalouksien, että myös yhtiöiden digitaalisen suorituskyvyn ja yhdenvertaisuuden kannalta välttämätön osa infrastruktuuria, jonka puuttuminen voi luoda epätasa-arvoa esimerkiksi kaupunkien ja maaseudun välillä [5].

Laadukkaat tietoliikenneyhteydet ovat digitalisoituneessa yhteiskunnassa edellytys muun muassa digitaalisten palvelujen käytölle, opiskelulle sekä työnteolle, sijainnista riippumatta. Näiden yhteyksien merkitys korostuu maaseudulla, jossa fyysisten palveluiden tarjonta on huomattavasti kaupunkeja vähäisempää. Luotettavat tietoliikenneyhteydet voivat myös tuottaa elinvoimaa maaseudulle, sillä ne ovat tekijä, jota sekä yritykset että yksittäiset ihmiset ja perheet pitävät tärkeänä tehdessään sijainti- ja muuttopäätöksiä, tai pohtiessaan mahdollisuuksia etätyölle tai monipaikkaiselle työnteolle esimerkiksi vapaa-ajan asunnolta käsin. Tietoliikenneyhteydet ovat siis tärkeä tekijä sekä nykyaikaiselle yhteiskunnalle ylipäänsä että muun muassa eriarvoisuuden ja kaupunki-maaseutu-vastakkainasettelun välttämisessä. [6], [7]

Kasvava tarve korkeatasoisille verkkoyhteyksille on tiedostettu sekä Suomessa että ylikansallisella tasolla, ja yhteiskuntien saattamiselle nopeiden tietoliikenneyhteyksien piiriin onkin asetettu monia tavoitteita. Euroopan Komission julkaisemassa *2030 digitaalinen*

kompassi -tiedonannossa [8] käsitellään digitalisaatioon liittyviä tavoitteita kuluvalle vuosikymmenelle. Digitaali-infrastruktuureihin liittyen tiedonannossa linjataan tavoitteeksi muun muassa se, että vuonna 2030 jokaisella EU-kotitaloudella olisi mahdollisuus gigabittitason yhteyteen. Samaan tapaan Suomessa Liikenne- ja viestintäministeriö määritteli digi-infrastruktuuristrategiansa 2020-luvulle vuonna 2018 [9]. Strategia mukailee EU-tason linjoja ja sen tavoitteena on, että vuoteen 2025 mennessä kaikilla kotitalouksilla, sijainnista riippumatta, olisi mahdollisuus sellaiseen verkkoyhteyteen, jonka latausnopeus on vähintään 100 Mbit/s, ja joka olisi mahdollista kasvattaa 1 Gbit/s -tasolle jälkikäteen. Julkisten palveluntarjoajien, kuten terveydenhuollon ja hallinnollisten toimijoiden, taas tulisi olla mahdollista käyttää gigabittitason yhteyksiä jo aiemmin. Näitä EU:n ja Suomen tavoitteekseen asettamiaan mahdollisuuksia ei voida taata yksin langattomilla 5G-yhteyksillä, muun muassa niiden häirintäherkkyyden ja kaistanleveysrajoitteiden takia, vaan ne tarvitsevat taustalleen kattavan valokuituverkon [6], [7].

Valokuituverkkojen rakentaminen markkinaehtoisesti ei pääsääntöisesti kuitenkaan ole kannattavaa kaupunki- tai taajama-alueiden ulkopuolella pienempien tilaajamäärien vuoksi. Tästä syystä rakentamista tuetaan julkisella rahoituksella, sillä valokuituyhteys halutaan luonnollisesti taata myös näiden alueiden ulkopuolella. Suomessa ensimmäinen lainsäädäntö laajakaistayhteyksien rakentamisen tukemisesta astui voimaan vuonna 2010, ja lainsäädäntöä on sittemmin muutettu useaan otteeseen. Nykyinen laajakaistatukilaki astui voimaan 3.2.2022, käynnistäen samalla uusimman laajakaistatukiohjelman [10]. Laajakaistatukiohjelman puitteissa Traficomilta haettavissa olevan tuen lisäksi rahoitusta valokuituyhteyksien rakentamiseen voi saada myös Maaseuturahaston laajakaistatuen, eli nk. kyläverkkotuen avulla [11]. Tukijärjestelmät ovat laajoilta osin samankaltaisia, mutta ne eroavat toisistaan esimerkiksi siinä, että Traficomin laajakaistatukihankkeen kautta saadussa tuessa osa rahoitusvastuusta (8, 22 tai 33 prosenttia) on kunnalla, jonka alueelle verkkoa rakennetaan. Lisäksi eroavaisuuksia on muun muassa siinä, mitkä osat verkosta luokitellaan tukikelpoisiksi, eli mitkä osat rakennuskustannuksista voidaan ottaa huomioon tukia haettaessa. Molempia tukijärjestelmiä yhdistää kuitenkin se, että verkkoyhtiöiden tulee hakea tukea hankkeilleen etukäteen, niille tehtyjen kustannusarvioiden perusteella.

Valokuituverkon rakennushankkeen kustannusarviointi ei kuitenkaan ole yksinkertainen tehtävä. Verkonrakennuksen kustannukset muodostuvat monista tekijöistä, joihin kuuluvat varsinaisen valokuituteknologian lisäksi muun muassa lupa-asiat, teletyöt (esimerkiksi

kuitujatkokset ja liitännät) sekä maanrakennus. Näistä tekijöistä maanrakennus muodostaa valtaosan verkonrakennuksen kokonaiskustannuksista, ja sen kustannukset ovat alttiita merkittävälle vaihtelulle. Tämä johtuu siitä, että eri maanrakennusmenetelmien kustannuksissa on suuria eroja, ja käytettävä maanrakennusmenetelmä riippuu siitä, minkälaisessa maastossa maanrakennusta tehdään. Kustannusarvioinnin parantaminen tai helpottaminen olisi siis arvokasta.

1.1 Tausta

Diplomityö tehdään yhteistyössä Saimaan Kuitu Oy:n kanssa. Saimaan Kuitu on vuonna 2015 perustettu Savitaipaleen, Taipalsaaren ja Lemin kuntien yhteisomistuksessa toimiva valokuituverkkoyhtiö, joka toteuttaa valokuituverkkoja Kaakkois-Suomessa, Etelä-Saimaan alueella. Tällä hetkellä Saimaan kuidun rakentamia valokuituverkkoja on Savitaipaleella, Taipalsaaressa, Lemillä, Lappeenrannassa sekä Mikkelin Suomenniemellä [12].

Valokuituverkkojen rakentamista Suomessa rahoitetaan julkisilla tuilla, joita haetaan hankekohtaisesti. Tämä tekee hankkeiden kustannusarvioinnista tärkeää, sillä tukia haetaan ennen hankkeen aloittamista sen perusteella, kuinka paljon hankkeen on arvioitu maksavan. Kustannusarviointi tulee tehdä mahdollisimman tarkasti, jotta tukia voidaan hakea hankkeelle oikea määrä ja jotta tukia hakiessa voidaan esittää, mihin haettu summa perustuu. Maan alaisen infrastruktuurin rakentamiselle ominaista on se, että maanrakennus muodostaa valtaosan kokonaiskustannuksista, ja tästä syystä juuri maanrakennuskustannusten arviointia Saimaan Kuitu haluaa parantaa.

Saimaan Kuitua haastatellessa [13] selvisi, että tämänhetkinen maanrakennuskustannusten arviointiprosessi vaatii paljon manuaalista työtä ja toimii käytännössä niin, että mitä enemmän aikaa kustannusarviointiin käytetään, sitä tarkemmaksi arvio tulee. Kuituverkot suunnitellaan käyttäen selainpohjaista, tietoliikenneverkkojen suunnitteluun, ylläpitoon ja hallintaan tarkoitettua työkalua, jonka karttamateriaaleista ja ilmakuvista saadaan alustavaa tietoa siitä, minkälainen maasto reitillä tulee olemaan. Se, mitä maanrakennusmenetelmää kussakin kohtaa reittiä tosiasiassa voidaan käyttää, selviää kuitenkin ainoastaan paikan päällä joko rakentamisen alettua tai tekemällä kenttäkäyntejä suunnitteluvaiheessa. Resurssien ollessa rajalliset, ei suunnitteluvaiheessa kuitenkaan voida tehdä kovinkaan montaa kenttäkäyntiä ja samanaikaisesti kustannusarviointiin kuluvaa aikaa halutaan minimoida. Näistä syistä

Saimaan Kuitu toivoo kustannusarviointiprosessiin parannusta, esimerkiksi jonkinlaista automaatiota tai pohjadataa, joka helpottaisi kustannusarvioiden tekemistä.

1.2 Työn tavoitteet, tutkimuskysymykset ja rajaukset

Diplomityön tavoitteena on selvittää, kuinka valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arviointia voitaisiin parantaa tai tehdä helpommaksi. Tätä varten tarvitaan tietoa siitä, kuinka valokuituverkkojen rakennushankkeiden maanrakennuskustannuksia arvioidaan tällä hetkellä ja mitkä tekijät kustannuksiin vaikuttavat. Lisäksi selvitetään, onko aiheesta tehty aiempaa tutkimusta. Työn päätutkimuskysymys ja siihen liittyvät alikysymykset ovat esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Diplomityön tutkimuskysymykset.

Päätutkimuskysymys	Alikysymykset
Kuinka valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arviointia voitaisiin parantaa tai tehdä helpommaksi?	Mitkä tekijät vaikuttavat valokuituverkkojen maanrakennuskustannuksiin?
	Onko valokuitu- tai muiden verkkojen maanrakennuskustannusten arvioinnista aiempaa tutkimusta?
	Miten valokuituverkkojen maanrakennuskustannuksia arvioidaan nykyisin?

Työn ulkopuolelle rajataan laajempi perehtyminen valokuituteknologioihin ja niiden toimintaan. Työn kannalta ei ole oleellista ymmärtää esimerkiksi sitä, kuinka valo heijastuu valokuitukaapelien sisällä mahdollistaen tiedonsiirron, kun taas muun muassa erilaisilla verkkotopologioilla on vaikutus valokuituverkkojen fyysiseen rakenteeseen, joka puolestaan vaikuttaa rakennuskustannuksiin, joten niihin perehdytään tarvittavilta osin. Katsaus verkkotopologioihin auttaa lisäksi ymmärtämään valokuituverkkojen rakenneperiaatteita.

1.3 Työn rakenne

Työn ensimmäisessä luvussa johdateltiin lukija työn viitekehykseen eli digitalisoituvaan maailmaan, jossa luotettavien ja tehokkaiden verkkoyhteyksien merkitys sekä yrityksille ja julkisille toimijoille että kotitalouksille korostuu jatkuvasti. Tämä kehitys taas luo tarpeen valokuituverkkojen rakentamiselle, jolle onkin asetettu sekä kansallisella että ylikansallisella EU-tasolla kunnianhimoisia tavoitteita. Toisessa luvussa esitellään työn tutkimusmenetelmä, joka on suunnittelututkimus. Kolmannessa luvussa tehdään katsaus eri maanrakennusmenetelmiin, joita valokuituverkkojen rakentamisessa käytetään, sekä varsinaisiin valokuituverkkoihin ja niiden peruskäsitteisiin ja -rakenteisiin. Neljäs luku käsittelee aiempaa tutkimusta valokuituverkkojen kustannusarvioinnista, esittelee tämänhetkiset kustannusarviointiprosessit kahdessa valokuituyhtiössä ja asettaa tavoitteet kustannusarviointiprosessien parantamiselle, eli suunnittelututkimuksen ratkaisun tavoitteet. Viidennessä luvussa siirrytään käytäntöön, eli ratkaisuvaihtoehtojen käsittelyyn ja prosessia parantamaan pyrkivän ratkaisuartefaktin kehittämiseen ja testaamiseen. Kuudes luku arvioi kehitettyä ratkaisuartefaktia ja sitä soveltamalla saatuja tuloksia vertaamalla sitä ratkaisulle asetettuihin tavoitteisiin. Luvussa seitsemän keskustellaan diplomityön tuloksista ja pohditaan työn rajoitteita sekä mahdollisia kohteita jatkotutkimukselle. Luvussa kahdeksan esitetään työn johtopäätökset ja loppusanat.

2 Tutkimusmenetelmä

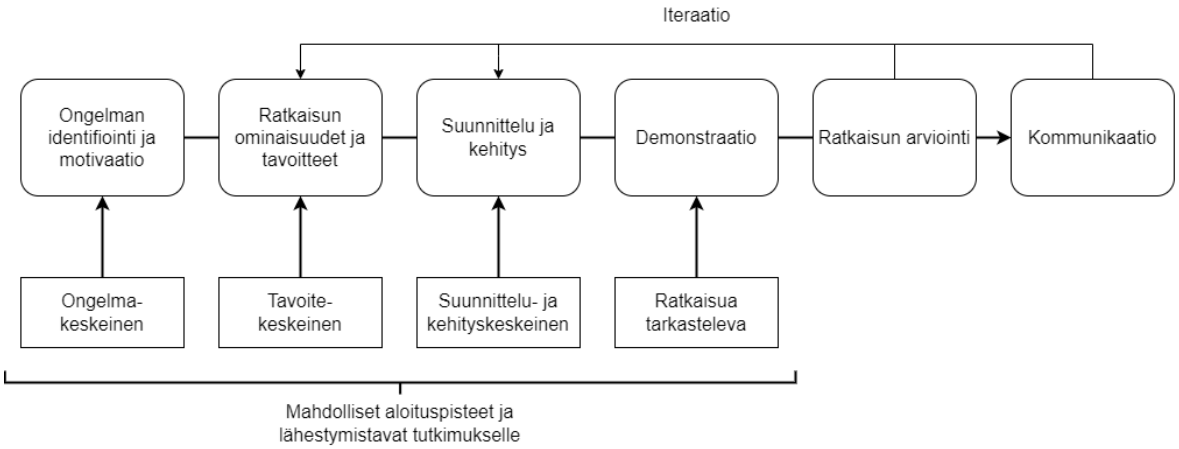
Diplomityön ensisijaisena tutkimusmenetelmänä käytetään suunnittelututkimusta (engl. design science), jota tuetaan kirjallisuuskatsauksella sekä haastatteluilla ongelmakehykseen tutustuttaessa. Suunnittelututkimus valittiin käytettäväksi tutkimusmenetelmäksi, koska se keskittyy ihmisiä ja organisaatioita koskevien käytännön ongelmien ratkaisuun artefakteja kehittämällä [14], [15], ja sopii täten hyvin vastaamaan haasteisiin valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arvioinnissa.

Suunnittelututkimusprosessi alkaa tunnistamalla, määrittelemällä ja ymmärtämällä valittu ongelma sekä ongelmakehys ja esittämällä motivaatio sille, miksi ongelma tulisi ratkaista. Tutkimusprosessi jatkuu kuvailemalla, kuinka kyseinen ongelma voitaisiin ratkaista, asettamalla tavoitteet nk. *hyvälle ratkaisulle* ja edelleen kehittämällä artefakti, joka ratkaisee tunnistetun ongelman tai jonkin osan siitä, eli saavuttaa yhden tai useamman ratkaisulle asetetuista tavoitteista. Tämän jälkeen demonstroidaan eli todistetaan, kuinka artefakti ratkaisee ongelman sekä arvioidaan, kuinka hyvin se saavutti sille asetetut tavoitteet, eli toisin sanoen tarkastellaan kehitetyn ratkaisuartefaktin hyvyyttä.

Peffers et al. [16] mainitsevat suunnittelututkimusta tietojärjestelmien kontekstiin sovittavassa artikkelissaan lisäksi sen, ettei suunnittelututkimusprosessin tarvitse välttämättä edetä aiemmin kuvaillussa järjestyksessä, vaan tutkimus voi alkaa lähes mistä tahansa prosessin vaiheesta, ja edetä siitä. Tutkimus voisi esimerkiksi alkaa jonkin muun tahon jo kehittämää ratkaisua tarkastelemalla, ja etenemällä siitä ”taaksepäin”, kehitysprosessin ja hyvän ratkaisun ominaisuuksien kuvailuun. Myös prosessin iteroiminen on mahdollista, ja ideaalisessa tilanteessa iteraatiota tehtäisiinkin mahdollisimman paljon, parantaen aiemmissa iteraatioissa kehitettyä ratkaisuartefaktia tai lähestymällä ongelmaa eri tavoilla. Suunnittelututkimuksen vaiheet kuvaillaan taulukossa 2 ja esitetään yhdessä tutkimuksen mahdollisten lähtöpisteiden kanssa kuvassa 1.

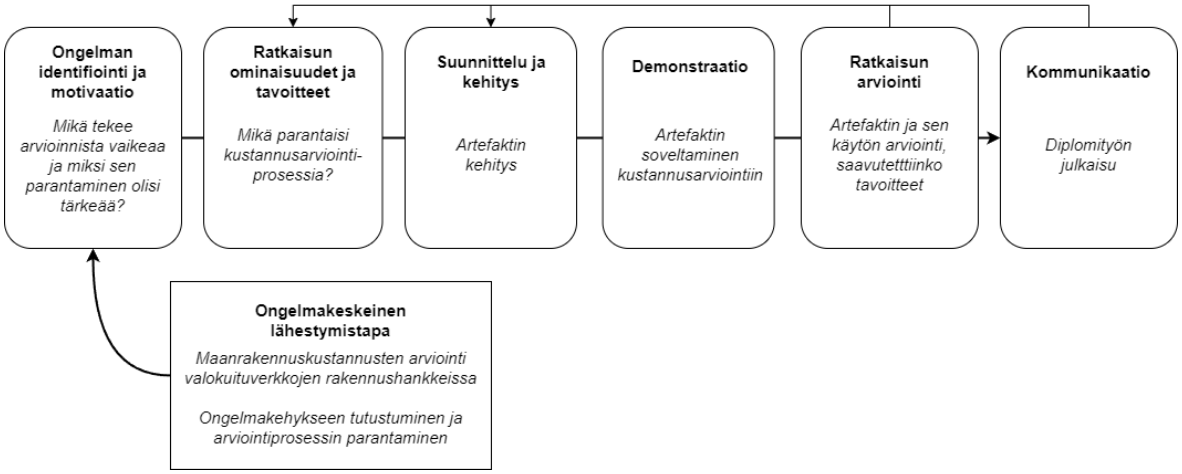
Taulukko 2. Suunnittelututkimuksen vaiheet, mukaillen [16].

Vaihe	Kuvaus	Tarvittavat resurssit
1. Ongelman identifiointi ja motivaatio	Tunnistetaan ja määritetään ratkaistava ongelma ja esitetään motivaatio ratkaisulle, eli miksi ongelmaan tulisi etsiä ratkaisua.	Tieto ongelmakehyksen tilanteesta ja ratkaisun tärkeydestä.
2. Ratkaisun ominaisuudet ja tavoitteet	Kuvaillaan hyvän ratkaisun ominaisuuksia ja tavoitteita. Tavoitteet voivat olla sekä kvantitatiivisia että kvalitatiivisia, eli hyvä ratkaisu voi tehdä samat asiat paremmin kuin aiemmat ratkaisut, tai vastata sellaisiin haasteisiin, joihin aiemmat ratkaisut eivät ole vastanneet.	Tieto ongelmasta ja olemassa olevista ratkaisuista, jos sellaisia on.
3. Suunnittelu ja kehitys	Suunnitellaan, määritetään ja kehitetään ratkaisuartefakti.	Teoreettinen tieto, joka voidaan tuoda esille ratkaisun muodossa.
4. Demonstraatio	Demonstroidaan, kuinka kehitetty ratkaisuartefakti ratkaisee ongelman tai osan siitä. Tämä voidaan tehdä kokeilla, simulaatioilla, tapaustutkimuksella tai muulla tavalla, joka todistaa ratkaisun toimivuuden.	Tieto ratkaisuartefaktin toiminnasta sekä ongelmasta, jotta voidaan esittää, kuinka artefakti ratkaisee ongelman.
5. Ratkaisun arviointi	Tarkastellaan, kuinka hyvin ratkaisu vastaa määritettyyn ongelmaan. Tämä tehdään vertaamalla ratkaisulle määritettyjä tavoitteita demonstraatiossa esitettyihin tuloksiin. Vertailutapa riippuu ratkaistavan ongelman ja kehitetyn ratkaisun luonteesta sekä esimerkiksi siitä, olivatko ratkaisulle asetetut tavoitteet kvantitatiivisia vai kvalitatiivisia.	Sopivat analyysimenetelmät ja mittarit.
6. Kommunikaatio	Ongelman ja sen tärkeyden, kehitetyn ratkaisuartefaktin ja sen toiminnan kommunikointi relevanteille yleisöille. Tämä tarkoittaa usein tieteellistä julkaisua.	Tietämys tieteellisten julkaisujen käytännöistä.



Kuva 1. Suunnittelututkimuksen vaiheet, mukaillen [16].

Suunnittelututkimus soveltuu tähän diplomityöhön, sillä Saimaan Kuidulla on helposti tunnistettavissa ja määritettävissä oleva ongelma; valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arvioinnin kompleksisuus. Tässä diplomityössä tutkimusta lähestytään siis *ongelmakeskeisesti* (kuva 2). Ongelmakehykseen perehdytään hankkimalla tietoa maanrakennusmenetelmistä ja verkkotekniikasta tarvittavilta osin, sekä selvittämällä, onko maanrakennuskustannusten arvioinnista tehty aiempaa tutkimusta. Lisäksi tietoa ongelmakehyksestä kerätään suoraan valokuituyhtiöiltä, joihin saadaan yhteys Suomen Seutuverkot Ry:n kautta. Suomen Seutuverkot Ry on voittoa tavoittelematon valokuituyhtiöiden yhdistys, johon myös Saimaan Kuitu kuuluu [17]. Suomen Seutuverkkojen jäsenistä valtaosa on juuri valokuitua rakentavia yhtiöitä, joilta voidaan saada arvokasta tietoa siitä, miten maanrakennuskustannusten arvioinnin haasteet näyttäytyvät käytännössä ja mitä parannuskohteita nykytilanteesta löytyy.



Kuva 2. Diplomityössä käytettävä suunnittelututkimusprosessi.

Tässä työssä ratkaisun tavoitteet määritetään kerätyn tiedon pohjalta ja niiden tarkoituksenmukaisuus vahvistetaan Saimaan Kuidun avulla. Yhteistyötä jatketaan myös kehitysvaiheessa, sillä erikoistuneita ohjelmistoratkaisuja kehitettäessä asiakaskontaktilla on tärkeä rooli kehityksen ohjauksessa haluttuun suuntaan [18], muun muassa siksi, että niille ominaista on vaatimusten tarkentuminen vasta kehityksen edetessä [19]. Edelleen myös tutkimuksen demonstraatio- ja arviointivaiheissa yhteistyöllä on luonnollinen paikkansa, sillä ratkaisuartefaktia tullaan demonstroimaan ja arvioimaan Saimaan Kuidun kustannusdataan perustuen. Tutkimuksen kommunikaatiovaihe käsittää diplomityön julkaisun.

3 Valokuituverkkojen rakentaminen

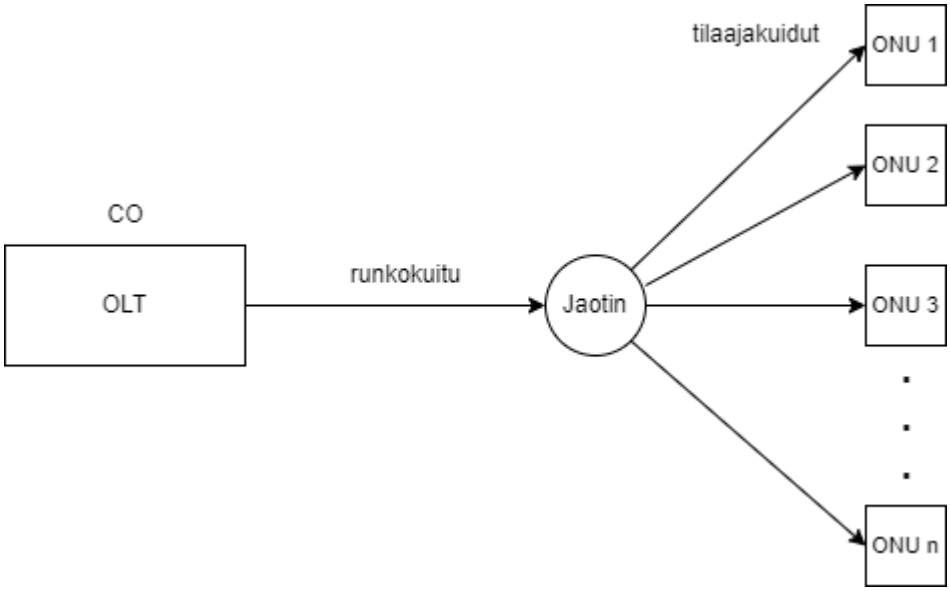
Tässä luvussa aloitetaan suunnittelututkimuksen ensimmäinen vaihe – ongelman identifiointi ja ongelmakehykseen tutustuminen. Luvussa käsitellään ongelmakehyksen teknistä puolta tutustumalla työn kannalta oleellisiin konsepteihin ja käsitteisiin liittyen ensin valokuituverkkojen rakennetyyppeihin ja sen jälkeen yleisimpiin maanrakennusmenetelmiin, joita verkonrakennuksessa käytetään, sekä niiden välisiin kustannuseroihin. Lopuksi tehdään yhteenveto syistä, jotka tekevät valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arvioinnista vaikeaa.

3.1 Verkkorakenteet

Tässä aliluvussa tutustutaan lyhyesti valokuituverkkojen kahteen päärakennetyyppiin ja niiden peruskäsitteisiin, eli aktiiviseen ja passiiviseen optiseen verkkoon. Varsinaisten verkkoteknologioiden toimintaperiaatteisiin ei syvennytä, eikä eri verkkorakenteiden hyviä tai huonoja puolia arvioida, vaan niiden pääpiirteet esitellään niiltä osin, jotka ovat tämän työn kannalta aiheellisia ja jotka helpottavat työn ymmärtämistä.

3.1.1 Passiivinen optinen verkko

Passiivisella optisella verkolla eli PON:lla (engl. passive optical network) tarkoitetaan verkkorakennetta, jossa yhdestä syöttöyhteydestä jaetaan verkkoyhteys usealle tilaajalle (Point-to-Multipoint-konsepti). Passiivisessa optisessa verkossa kunkin tilaajan tilaajapäätelaite eli kuituteknologiasta riippuen joko ONU tai ONT (engl. optical network unit, optical network termination) on yhdistetty tilaajakuidulla yleensä noin 20 kilometrin päässä sijaitsevaan passiiviseen optiseen jaottimeen tai suodattimeen. Jaottimelta tai suodattimelta taas kulkee runkokuitu viestikeskuksessa (engl. central office, CO) sijaitsevaan OLT:hen (engl. optical line termination). [20] Passiivisen optisen verkon periaatteellista rakennetta on selvennetty kuvassa 3.

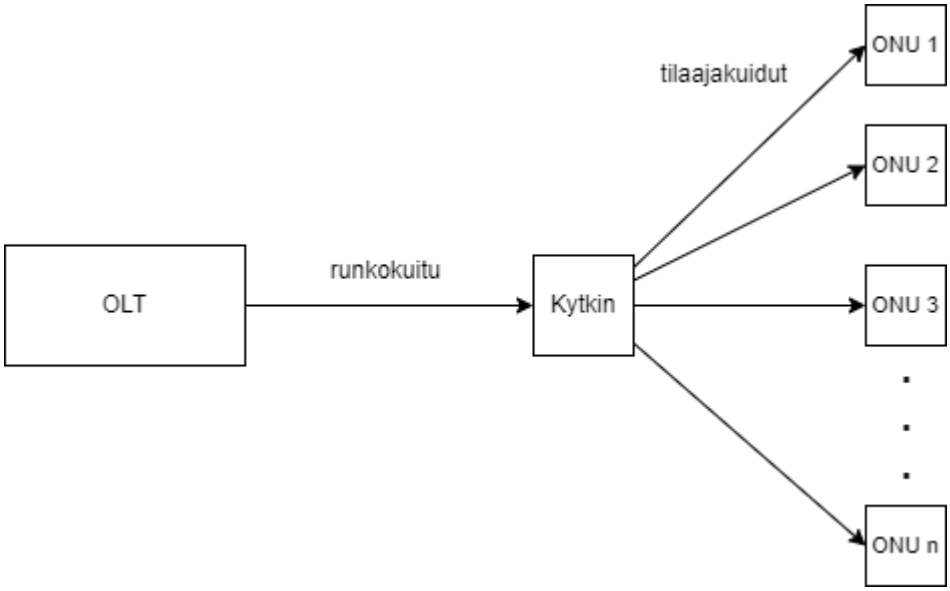


Kuva 3. PON-verkon rakenne, mukaillen [20].

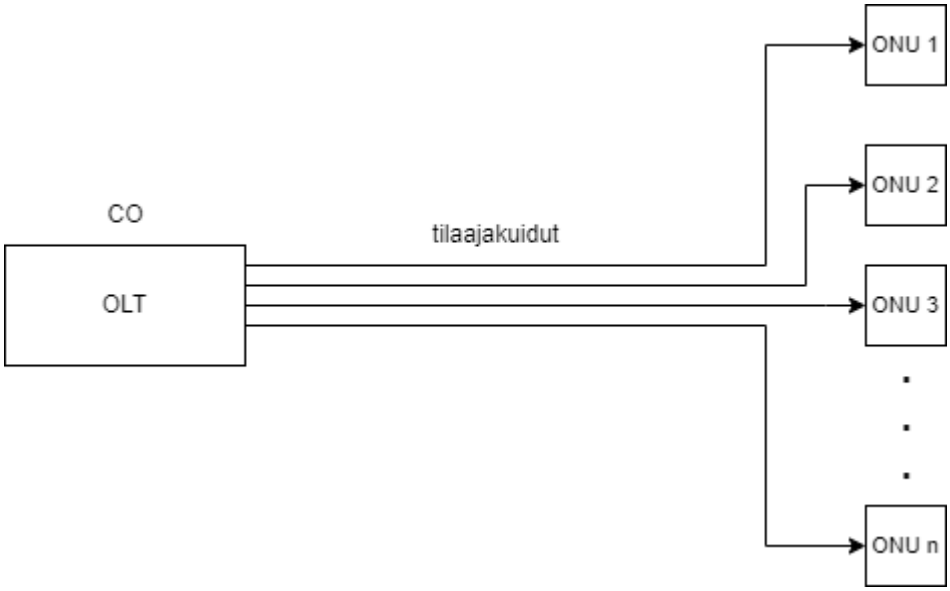
3.1.2 Aktiivinen optinen verkko

Aktiivinen optinen verkko eli AON (engl. active optical network) eroaa PON:sta siten, että aktiivisessa verkossa kullekin tilaajalle on oma, omistettu kuitunsa. Verkon aktiivisuudella viitataan siihen, että aktiivisessa optisessa verkossa signaalin jakamiseen käytetään komponentteja, jotka tarvitsevat sähköä toimiakseen, kuten optisia kytkimiä. Passiivisessa optisessa verkossa taas ainoat aktiiviset komponentit ovat viestikeskuksessa sijaitseva OLT ja tilaajakiinteistöjen päätelaitteet, niiden välillä olevat komponentit eivät tarvitse sähköä [20], [21].

Aktiivisen optisen verkon kaksi yleisintä toteutusmallia ovat tähtitopologia ja niin kutsuttu Home Run- tai Point to Point -topologia [22]. Tähtitopologia tarkoittaa verkkorakennetta, jossa viestikeskuksen OLT:ltä lähtee runkokuitu lähempänä tilaajia sijaitsevalle optiselle kytkimelle, josta taas lähtee vähintään yksi tilaajakuitu kunkin tilaajan ONU:lle. Home Run- tai Point to Point -topologialla sen sijaan tarkoitetaan verkkorakennetta, jossa optinen kytkin sijaitsee CO:ssa ja kullekin tilaajalle omistettu tilaajakuitu kulkee sieltä aina tilaajan ONU:lle asti. Kuvassa 4 havainnollistetaan AON-verkon tähtitopologiaa, ja kuvassa 5 Point to Point -topologiaa.



Kuva 4. AON-verkko tähtitopologialla, mukaillen [22].



Kuva 5. AON-verkko Point to Point -topologialla, mukaillen [22].

Saimaan Kuitu rakentaa käytännössä katsoen ainoastaan Point to Point -topologisia aktiivisia optisia verkkoja, mutta tapauskohtaisesti voidaan harkita XGS-PON-verkon (10 gigabit symmetrical passive optical network [23]) rakentamista, mikäli se olisi ko. tapauksessa aktiiviverkkoa järkevämpi ratkaisu. Saimaan Kuidun rakentamissa verkoissa valokuitukaapeli kulkee siis CO:lta suoraan kullekin tilaajalle, ja verkossa ei ole laitteita kentällä CO:n ja

tilaajien välillä. Syitä sille, miksi Saimaan Kuitu rakentaa ensisijaisesti Point to Point -aktiiviverkkoja, on useita. Ensimmäiseksi, Saimaan Kuidun aloittaessa toimintaansa passiiviverkkojen rakentaminen oli Suomessa vielä melko harvinaista, joten yhtiö on alusta alkaen rakentanut aktiiviverkkoja, ja koska sille on kertynyt niiden rakentamisesta runsaasti kokemusta, ei lähestymistavan vaihtamista ole koettu kannattavaksi. Toinen syy nimenomaan Point to Point -aktiiviverkkojen suosimiselle on se, että PON-verkoissa sekä tähtitopologisissa aktiiviverkoissa tarvittava runkokuitu ja sen korjaaminen on kallista. Point to Point -verkoissa runkokuitua ei tarvita, sillä tilaajakuidut kulkevat koko matkan CO:lta tilaajille. Viimeinen, Suomelle ominaisilla haja-asutusalueilla merkittävä syy on se, että Point to Point -verkkoja rakentaessa välimatkat tilaajilta toisille tai tilaajalta CO:lle eivät ole rajoittava tekijä samalla tavalla kuin tähtitopologisissa aktiiviverkoissa tai PON-verkoissa. Koska Suomi pyrkii mahdollistamaan laadukkaat tietoliikenneyhteydet kaikille kansalaisille sijainnista riippumatta, ja koska kuntaomisteinen Saimaan Kuitu haluaa tarjota valokuidun omistajakuntien kaikille asukkaille, verkonrakennuksen kannalta tärkeää on se, etteivät matkat asiakkaiden välillä ole rajoite [13], [24].

3.2 Maanrakennusmenetelmät

Tässä aliluvussa esitellään yleisimmät maanrakennusmenetelmät, joita valokuituverkkojen rakentamisessa käytetään. Lisäksi tutustutaan menetelmien eroavaisuuksiin ja siihen, missä tilanteessa mitäkin menetelmää voi ja kannattaa käyttää. Ensisijaisena lähteenä menetelmille ja niiden metrihinnoille käytetään Liikenne- ja viestintäministeriön (nykyinen Traficom) tekemää selvitystä kuituverkkojen rakentamisesta vuodelta 2014 [25], josta saatua tietoa täydennetään haastattelemalla Saimaan Kuitua.

3.2.1 Auraaminen

Auraaminen on menetelmä, jota verkonrakentajat pyrkivät käyttämään hankkeissaan mahdollisimman paljon, sillä se on rakennusmenetelmistä kustannustehokkain – auraamisen metrihinta on kaikkine kustannuksineen muutaman euron luokkaa. Yleisesti ottaen verkkohankkeissa pyritään 70/30 suhteeseen auraamisen ja muiden rakennusmenetelmien välillä, tarkoittaen sitä että auraamaan pyritään vähintään 70 % reitin kokonaispituudesta [26], [13].

Auraamisessa maahan tehdään kaivinkoneeseen liitetyllä aurauslaitteella ohut viilto, johon valokuitukaapeli merkkinauhoineen syötetään. Aurausviillolle on valokuitukaapelin suojaamiseksi asetettu minimisyvyys, joka on tonttien ulkopuolella on vähintään 70 cm ja tonteilla n. 20-40 cm, olosuhteista riippuen [27]. Auraamista voidaan käyttää myös päällystämättömien teiden keskilinjalla, jos se on tien viereen sijoittamista järkevämpää ja jos siihen on tienomistajan lupa. Kaapelin laskemisen jälkeen aurausviilto peitetään kaivinkoneen kauhalla tasoittaen.

Auraamismenetelmän käyttöä kuitenkin rajoittavat useat tekijät. Louhikkoisessa, kivisessä tai kallioisessa maastossa auraamista ei voida käyttää, sillä auraamisviiltoa ei tällöin joko saada tehtyä lainkaan, tai sitä ei saada riittävän syväksi. Auraamista ei myöskään voida käyttää päällystettyjen teiden alitukseen, sillä sitä varten tien päällyste tulisi ensin poistaa, jolloin kustannustehokkuus kärsii. Auraamista käytetään pääasiassa taajamien ulkopuolella kaapeleiden laskemiseen tienvieruksiin, joskin tällöinkin tulee ottaa huomioon jo olemassa oleva infrastruktuuri. Jos parhaalla asennuspaikalla tien pientareella kulkee jo jokin kaapeli, joudutaan aurausviilto tekemään kauemmaksi tiestä, joka voi joko nostaa kustannuksia tai estää auraamismenetelmän käytön. On esimerkiksi mahdollista, että tien viereen on rakennettu jo niin paljon muuta infrastruktuuria, että valokuitu joudutaan sijoittamaan useiden metrien päähän tieojan vastapuolelle. Joka tapauksessa auraaminen on maanrakennusmenetelmistä kustannustehokkain, ja sitä pyritään käyttämään mahdollisimman paljon. [26]

3.2.2 Kaivaminen

Kaivaminen on maanrakennusmenetelmä, jota käytetään pääasiassa silloin kun kustannustehokkaampaa auraamista ei voida käyttää, eli pääasiassa taajama-alueilla, joissa pinnoitetut tiet ja mahdollisesti tilan ahtaus muodostuvat esteeksi auraamismenetelmän käytölle. Pinnoitetuilta teiltä leikataan ensin tarvittavalta alueelta asfaltti pois, jonka jälkeen oja voidaan kaivaa. Luonnollisesti tämä tarkoittaa myös sitä, että tien pinnoite tulee paikata työn lopussa. Kaivamista voidaan käyttää myös louhikkoisessa maastossa, mutta ei kuitenkaan täysin kallioisiin paikkoihin, joihin soveltuu ainoastaan kallion louhinta tai metallikourutus. Kaivamisessa maahan tehdään kaivinkoneella ja tarvittaessa myös käsin lapioita käyttäen noin 40 cm leveä tasapohjainen oja, jonne kaapeli, kaapeliputki tai kaapelikouru sijoitetaan. Putkia tai kouruja voidaan käyttää suojaamaan valokuitukaapeleita. Kaapeli, kouru tai putki peitetään

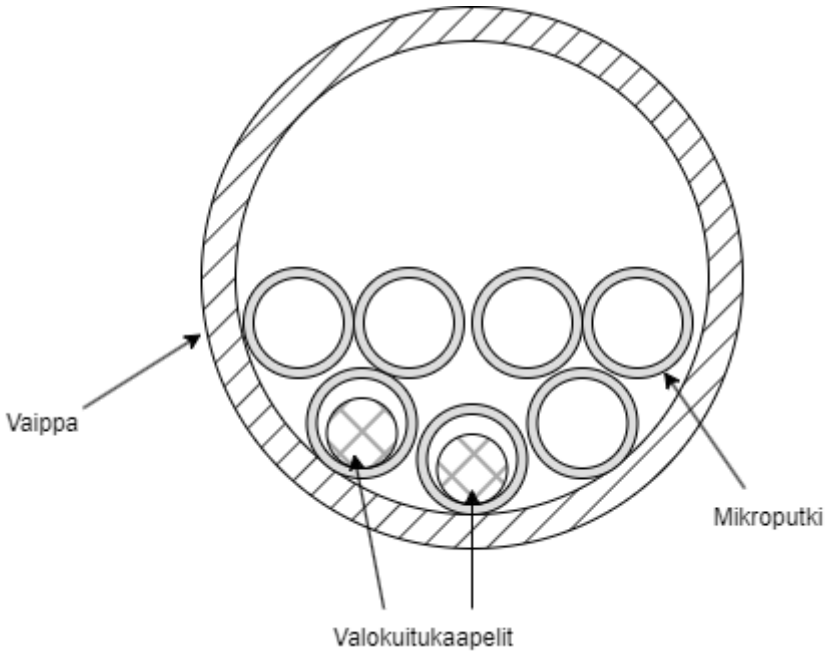
noin 20 cm kerroksella maata, jonka jälkeen ojaan lasketaan merkkinauha ennen ojan täyttämistä loppuun.

Kaivaminen on auraamista hitaampi ja kalliimpi rakennusmenetelmä. Kun auraamisen hinta on kaikkine kustannuksineen vain joitain euroja metriltä, niin kaivamisen metrihinta puolestaan nousee kymmenen euron tietämille, etenkin jos joudutaan leikkaamaan ja paikkaamaan tienpintaa tai jos urakointia tehdään talvella, jolloin kaivaminen on hitaampaa ja metrihinta siten korkeampi. Lisäksi myös maanvaihdosta voi aiheutua lisäkustannuksia tilanteissa, joissa työmaalle joudutaan tuomaan kivetöntä maata kaivettujen ojien peittämistä varten.

3.2.3 Mikro-ojitus ja mikroputkitus

Mikro-ojitus ja mikroputkitus (engl. micro-trenching ja micro-ducting) ovat uudempia maanrakennusmenetelmiä. Mikro-ojitusta käytetään päällystetyillä teillä tekemällä asfalttiin erittäin ohut ja matala ura, johon valokuitukaapeli asennetaan. Ura voi olla mitoiltaan esimerkiksi 20 mm leveä ja 120 – 300 mm syvä [28]. Mikro-ojituksessa on kolme päävaihetta: ensiksi asfalttiin leikataan ura, joka puhdistetaan ja kuivataan vettä ja paineilmaa käyttäen. Tässä vaiheessa tärkeää on ottaa huomioon, ettei uraa tehdä ajoneuvojen ajourien kohdalle sillä se voi vaarantaa yhteyden toimivuuden tien pinnoitteen kuluessa – teiden reunoja tulisi suosia. Toinen vaihe on kaapelin tai kaapeliputken asennus uraan, sekä sen suojaaminen kuormitukselta ja lämpötilanvaihteluilta. Tämä tapahtuu käyttämällä erilaisia päällystemateriaaleja, kuten polyeteeniä (PE) tai kumia. Viimeinen vaihe mikro-ojituksessa on uran uudelleenpäällystäminen, johon käytetään bitumia. [29]

Mikroputkituksella taas ei viitata niinkään maanrakennukseen, vaan menetelmään, jossa valokuitukaapelit sijoitetaan suojaavan ulkovaipan sisällä oleviin mikroputkiin (kuva 6). Vaippa mikroputkineen asetetaan kaivettuun ojaan tai aurattuun uraan, ja varsinaiset valokuitukaapelit syötetään mikroputkiin paineilmalla työntäen (engl. jetting). Mikroputkituksen etuihin kuuluu muun muassa se, että uusia kuituyhteyksiä rakentaessa voidaan teoriassa käyttää jo asennettuja mikroputkia, joihin uudet kaapelit puhalletaan, jolloin vältytään maanrakennustöiden tekemiseltä. [30]



Kuva 6. Mikroputkitus, mukaillen [30].

Hyödyistään huolimatta mikro-ojitus ja mikroputkitus ovat kuitenkin yhä suhteellisen vähän käytettyjä menetelmiä Suomessa. Mikroputkituksessa syynä tähän on esimerkiksi se, että vaikka mikroputket olisivat maassa valmiiksi, ei niihin välttämättä pystytä puhaltamaan kaapelia esimerkiksi n. 100 m pidemmälle. Tämä johtuu siitä, että kitkavoimat kaapelin ja mikroputken välillä kasvavat niin suuriksi, että paineilman voima ei riitä liikuttamaan kaapelia, edes jos sitä vedetään putken toisesta päästä. Toinen mikroputkien käyttöä rajoittava tekijä on nk. lommahtaminen, joka tarkoittaa sitä että maahan lasketun mikroputken muoto muuttuu esimerkiksi lämpötilanvaihtelujen seurauksena liikkuvien kivien painautuessa putkia vasten [31]. Jos muoto muuttuu liikaa, ei kaapelia pystytä puhaltamaan putkeen. Tämä tarkoittaa sitä, että usein maanrakennustöitä joudutaan tekemään, vaikka mikroputket olisivat olemassa jo valmiiksi [32]. Mikro-ojituksen osalta taas muun muassa kunnalliset toimijat ovat olleet epävarmoja matalalle asennettujen kuituyhteyksien toimintavarmuudesta ja siitä, minkälainen vaikutus mikro-ojituksella on tienpintojen kestävyyteen talvisin [33], [34].

3.2.4 Menetelmät kallioisessa maastossa

Kallioisilla tai kivisillä alueilla voidaan valokuitukaapelin asentamiseen käyttää louhintaa, kallion leikkausta tai metalli- tai muovikourutusta. Louhinnassa kallioon räjäytetään kanava valokuidulle, ja se on metrihinnaltaan maanrakennusmenetelmistä kallein (pois lukien teiden alitukset), noin 80–100 €/m. Joissain tilanteissa voidaan käyttää iskuvasaraa kallion louhimiseen, jolloin metrikohtaiset kustannukset ovat hieman matalammat. Saimaan Kuidulla käytetään pintakallioisilla alueilla leikkaamista, joka tapahtuu esimerkiksi timanttiporalla tai -laikalla. Leikkaamisessa pintakallioon tehdään ura, johon valokuitukaapeli mahdollisine suojaavine kouruineen asetetaan. Kallion leikkaamisen hintaluokka on sama kuin louhinnassa. [31]

Koska leikkaaminen ja louhinta ovat menetelminä hyvin kalliita, pääasiallisena menetelmänä kallioisilla alueilla pyritään käyttämään metallikourutusta, joka on edullisempaa; sen metrihinta on moninkertaisesti matalampi kuin leikkaamisessa tai louhinnassa. Metallikourutuksen käyttö vaatii kuitenkin sen, että kallion päällä on vähintään noin 40 cm kerros maa-ainesta, eli sitä ei voida käyttää pintakallioalueilla. Metallikourutuksessa kallion päällä olevaan maakerrokseen tehdään ura, johon sijoitetaan suojaava metallikouru, jonka sisään varsinaiset valokuitukaapelit tulevat. Sen edullisuus suhteessa muihin menetelmiin johtuu siitä, että varsinaista kalliota ei metallikourutuksessa tarvitse käsitellä. Jos maa-ainesta on kallion päällä tarpeeksi paljon, ettei metallikourutusta tarvitse käyttää, mutta valokuitukaapelia koetaan silti tarvittavan suojata esimerkiksi maa-aineksen karkeuden takia, voidaan siihen käyttää metallikourun sijasta edullisempaa muovikourua.

3.2.5 Teiden alitukset

Tien pinnoitteen purkamisen ja kaapelin tien läpi vetämisen sijaan on mahdollista myös tien alitus. Näin voidaan tehdä esimerkiksi tilanteissa, jossa tie on vilkkaasti liikennöity, tai jokin muu syy tekee tien alituksesta järkevämmän vaihtoehdon. Tien alittamiseen käytettyjä menetelmiä ovat tunkkaus sekä suunta- ja vaakaporaus. Tunkkaus on menetelmistä halvin yleisyytensä ja kaluston saatavuuden takia, mutta sitä ei voida käyttää kallioisessa tai kivikkoisessa maastossa. Sama koskee myös suuntaporausta, joka on tunkkausta hallitumpi menetelmä, mutta ei myöskään sovellu kivikkoiseen tai kallioiseen maastoon. Jos tien alitus

halutaan tehdä tällaisessa maastossa, joudutaan käyttämään vaakaporausta, joka on tienalitusmenetelmistä huomattavasti kallein. Liikenne- ja viestintäministeriön selvityksen mukaan hinta vaakaporaukselle on n. 250 €/m, suuntaporaukselle n. 100 €/m, ja tunkkaukselle 40–80 €/m.

3.2.6 Yhteenveto maanrakennuksesta ja sen kustannuksista

Valokuituverkkoja rakentaessa käytettävissä on useita maanrakennusmenetelmiä, joista yleisimmät esiteltiin edellä. Esitellyistä menetelmistä tärkeimmät ovat auraaminen ja kaivaminen, joista auraamista pyritään käyttämään mahdollisimman paljon kustannustehokkuutensa takia, ja kaivamisella työstetään ne paikat, joissa auraamista ei voida käyttää. Jos verkkoa ei voida suunnitella välttämään kallioisia alueita kokonaan, joudutaan käyttämään myös kalliimpia kallioisen maaston menetelmiä. Näin voidaan joutua tekemään myös, jos aiemmin helposti työstettäväksi oletettu maasto osoittautuukin kallioiseksi tai kivikkoiseksi. Mahdollisimman korkean kustannustehokkuuden saavuttamiseksi verkkoreitit pyritään suunnittelemaan niin, että auraamista voitaisiin käyttää mahdollisimman paljon, ja loput tehtäisiin kaivamalla. Käytännön rakennushankkeissa joudutaan lisäksi tekemään tien alituksia ja ajoittain esimerkiksi vesistökaapelin asennuksia, mutta niiden kustannusten arviointi ei ole vaikeaa – verkkoa suunniteltaessa on yksinkertaista todeta tietyssä paikassa tarvittavan tehdä tien alitus tai vesistön ylitys, ja metrihinta näille saadaan suoraan urakoitsijalta kilpailutuksen yhteydessä.

Epävarmuus maanrakennuskustannusten arviointiin tulee siitä, ettei verkkoa suunniteltaessa voida olla täysin varmoja, mitä maanrakennusmenetelmää kussakin kohtaa verkkoreittiä voidaan käyttää. Voi olla esimerkiksi niin, että maasto vaikuttaa karttamateriaalien perusteella olevan helposti työstettävää, ja näin ollen auraamiselle suotuisaa, mutta todellisuudessa joudutaankin turvautumaan kaivamiseen. Pieni määrä kallioista maastoakaan ei ole itsessään huono asia, jos siitä tiedetään etukäteen. Huonoin tilanne on se, että maanrakennus on jo alkanut, ja selviää että aiemmin esimerkiksi kaivettavaksi suunniteltu reitin osuus onkin kallioista maastoa, jossa joudutaan osittain leikkaamaan kalliota. Tällöin ko. osion toteutuneet kustannukset ylittävät arvioidut kustannukset, ja koska valokuituhankkeille haetaan rahoitus useimmiten ennen varsinaisen rakentamisen aloittamista, syntyy valokuituyhtiölle riski budjetin ylityksestä ja tappion tekemisestä.

4 Aiempi tutkimus ja prosessit verkkoyhtiöissä

Tässä luvussa tutustutaan aiempaan tutkimustietoon valokuituverkkojen rakentamisesta, maanrakennuskustannusten osuudesta rakennushankkeiden kokonaiskustannuksissa, sekä niiden arvioinnista valokuituyhteyksien rakentamisen yhteydessä. Lisäksi luvussa perehdytään tämänhetkisiin kustannusarviointiprosesseihin kahdessa valokuituverkkoyhtiössä ja esitetään ongelmat, joihin diplomityössä kehitettävällä ratkaisuartefaktilla pyritään vastaamaan, eli asetetaan tavoitteet ratkaisulle.

4.1 Verkonrakennuksen optimointi

Aiempaan tutkimukseen perehtyminen aloitettiin etsimällä tutkimustietoa nimenomaan valokuituverkkojen rakentamiseen liittyvän maanrakennuksen kustannuksista, Google Scholar -työkalua käyttäen. Aiempaan tutkimukseen perehdyttäessä havaittiin, että valokuituverkkoihin liittyvissä julkaisuissa esitetään pääasiassa algoritmeja verkkojen reittien optimointiin ja potentiaalisten tilaajien klusterointiin kustannusten laskemiseksi. Esitetyissä optimointialgoritmeissa oletetaan kuitenkin usein, että verkonrakennukseen liittyvät yksikköhinnat tiedetään, eli niissä ei keskitytä maanrakennuskustannuksiin tai niiden arviointiin. Esimerkiksi Biswas & Podder esittävät artikkelissaan [35] matemaattisen optimointialgoritmin PON-verkkojen suunnittelulle, joka toimii yksinkertaistettuna niin, että etsitään lyhin reitti CO:lta kullekin ONU:lle, verkon kokonaispituutta minimoiden. Algoritmi ottaa huomioon myös esteet, jotka täytyy kiertää tai läpäistä, ja niiden vaikutuksen kustannuksiin ja reitin pituuteen. Algoritmin viimeisessä vaiheessa lasketaan kustannusarvio suunnitellulle reitille. Kustannusarvion laskemiseen käytetty yhtälö on yhtälö (1), ja luonnos algoritmia käyttäen suunnitellusta verkkorakenteesta esitetään kuvassa 7.

$$
\begin{aligned}
K(R_i) = \quad & H_1 * \mathrm{Pituus}(R_i) + H_1 * \mathrm{Pituus_O}(R_i) \\
& +(H_2 + H_3) * \mathrm{Pituus_U}(R_i) \\
& +H_4 * \mathrm{Jatkokset}(R_i) \\
& +(H_2 + H_3 + H_5) * \mathrm{Pituus_{este}}(R_i)
\end{aligned} \tag{1}
$$

jossa R_i on tarkasteltava reitti,

$K(R_i)$ ovat reitin R_i kustannukset,

$\mathrm{Pituus}(R_i)$ on reitin R_i kokonaispituus,

$\mathrm{Pituus_O}(R_i)$ on se osa reitin R_i pituudesta, jolla voidaan käyttää olemassa olevaa valokuituputkea,

$\mathrm{Pituus_U}(R_i)$ on se osa reitin R_i pituudesta, jolla ei voida käyttää olemassa olevaa valokuituputkea,

$\mathrm{Pituus_{este}}(R_i)$ on se osa reitin R_i pituudesta, jolla kuljetaan esteen lävitse,

H_1 on valokuitukaapelin metrihinta,

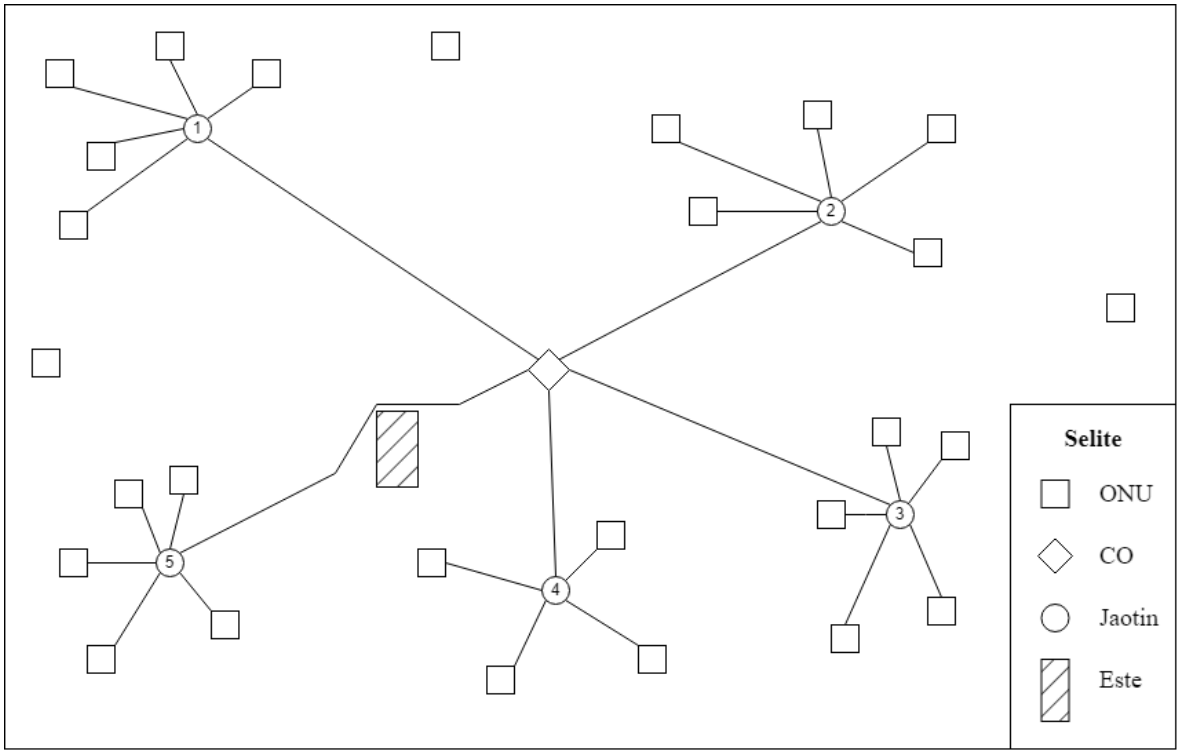
H_2 on metrihinta valokuidun syöttämiselle olemassa olevaan kuituputkeen,

H_3 on metrihinta uuden kuituputken rakentamiselle,

H_4 on yhden kuitujatkoksen tekemisen hinta,

H_5 on metrihinta valokuidun rakentamiselle esteen lävitse,

$\mathrm{Jatkokset}(R_i)$ on reitillä R_i tarvittavien jatkoksien lukumäärä.



Kuva 7. Hahmotelma Biswas:n & Podder:n algoritmilla suunnitellusta verkkorakenteesta, mukaillen [35].

Algoritmia ja kustannuslaskentayhtälöä tarkastellessa huomataan, että Biswas & Podder keskittyvät pääasiassa suunniteltavan reitin optimointiin pyrkimällä minimoimaan sen kokonaispituutta. Heidän algoritminsa ottaa kyllä huomioon myös sen, että rakennuskustannukset vaihtelevat esimerkiksi sen mukaan, voidaanko olemassa olevaa infrastruktuuria käyttää vai joudutaanko rakentamaan täysin uutta reittiä, tai joudutaanko kulkemaan jonkin esteen lävitse, mutta siinä oletetaan näiden kustannusten olevan tiedossa ennalta. Algoritmi vaikuttaa olettavan, että olemassa olevien kuituputkien – viitaten siis luvussa 3 esitettyyn mikroputkitusmenetelmään – käyttäminen olisi automaattisesti kustannustehokas ratkaisu, eikä tiedosta mikroputkituksen käyttöön liittyviä ongelmia. Lisäksi algoritmi ei huomioi lainkaan sitä, että verkkoa rakennettaessa mahdollisia maanrakennusmenetelmiä on useita ja että maasto määrittää käytettävän menetelmän ja sitä kautta maanrakennuskustannukset. Esitetty algoritmi onkin pitkälti teoreettinen; käytännössä ensisijainen kehityskohde ainakin Saimaan Kuidulla olisi juuri maanrakennuskustannusten arviointi etukäteen, jotta reitin suunnittelu sekä valokuituhankkeiden kokonaiskustannusten arviointi helpottuisi.

Agata & Nishimura [36] lähestyvät verkonrakennuksen suunnittelua niin ikään rakennettavan verkon kokonaispituuden minimoimisen kannalta. He tiedostavat artikkelissaan sen, että minimoitavan tekijän tulisi olla maanrakennusta vaativa kokonaismatka, sillä maanrakentamisen metrihinta on moninkertainen suhteessa kaapelin metrihintaan. He käsittelevät kuitenkin verkkoa, joka rakennetaan käyttäen tienvarsipylväisiin sijoitettavia ilmakaapeleita, joten heidän esittämänsä algoritmi ei ota huomioon maanrakennuskustannuksia vaan käsittelee ainoastaan ilmakaapelien asennuskustannuksia. Heidän esittelemässään algoritmissa potentiaaliset tilaajat klusteroidaan ja optisten jaottimien sijainnit määritetään tilaajaklusterien avulla. Reitit CO:lta kullekin jaottimelle taas määritetään matemaattisesti tulkitsemalla mahdollisten tienvarsireittien ja niiden kustannusten joukko painotettuna verkkona, jossa CO ja jaottimet ovat solmuja ja mahdolliset reitit niiden välillä kaaria, joiden painona ovat kunkin reitin kustannukset. Käsiteltävälle verkolle voidaan siten etsiä minimaalinen Steiner-puu [37], joka on matalimmat kokonaiskustannukset omaava reitti, joka yhdistää CO:n kuhunkin jaottimeen. Steiner-puuta käytettäessä kunkin verkon osan kustannusten, tai arvion niistä, oletetaan kuitenkin olevan tiedossa jo etukäteen, joten myöskään Agata & Nishimura eivät paneudu maanrakennuksen kustannusarviointiin.

4.2 Maanrakennuksen kustannusarviointi

Tutkimusta, jossa käsitellään juuri maanrakennuskustannusten arviointia, ei vaikuttaisi olevan tehty kovinkaan paljoa. Julkaisuja joissa keskustellaan maanrakennuskustannuksista löytyy kyllä, mutta niissä ei keskitytä maanrakennuskustannusten arviointiin itsessään, vaan esitetään ratkaisuja maanrakennuskustannusten minimoimiseksi. Esimerkiksi Casier et al. [38] toteavat maanrakennuksen muodostavan jopa 70 % verkonrakennushankkeiden kustannuksista, mutta he keskittyvät ehdottamaan keinoja, joilla maanrakennuskustannuksia voitaisiin minimoida verkon suunnitteluvaiheessa, esimerkiksi optimoimalla verkon kokonaispituuden mahdollisimman lyhyeksi tai käyttämällä ilmakaapelointia maanrakennustarpeen pienentämiseksi. Ilmakaapeloinnin heikkoutena on kuitenkin korkeampi alttius rikkoutumiselle esimerkiksi sääolosuhteiden takia ja siksi sitä ei käytännössä käytetä kovinkaan paljoa [13] – se on menetelmänä jokseenkin vanhanaikainen.

4.3 Yhteenveto aiemmasta tutkimuksesta ja tutkimusaukko

Valokuituverkkojen rakentamiseen ja niiden rakennuskustannusten optimointiin liittyen on tehty runsaasti tutkimusta. Suuressa osassa aihetta käsittelevistä tutkimuksista tiedostetaan, että maanrakennus muodostaa valtaosan verkkohankkeiden kustannuksesta, mutta usein ratkaisuna maanrakennuskustannusten minimoimiseksi esitetään varsinaisen verkkorakenteen optimointia ja verkon kokonaispituuden minimoimista, jotta maanrakennusta tarvitsisi tehdä mahdollisimman vähän. Kirjallisuudessa ei siis keskitytä maanrakennuskustannusten arviointiin, vaan pyritään minimoimaan täysien verkkokokonaisuuksien kustannuksia. Taulukossa 3 esitetään esimerkkejä hakusanoista, joita tiedonhaussa käytettiin ja kuvaillaan, minkälaisia tuloksia kuillakin hakusanoilla saatiin.

Taulukko 3. Tiedonhakuun käytettyjä hakusanoja ja niitä vastaavat hakutulokset.

Käytettyjä hakusanoja	Tulokset
”Optical fiber network construction costs” ”Cost estimation fiber network deployment” ”Cost estimation for fiber network construction” ”Techno-economic estimation of FTTH networks” ”Cost estimation of building FTTH connections” “FTTH cost estimation”	Pääosin optimointialgoritmeja verkkoreittien suunnitteluun, kuten [35] sekä [36], joissa mainitaan kyllä maanrakennuksen olevan suurin tekijä kokonaiskustannuksissa, mutta keskitytään kuitenkin vain kokonaiskustannusten minimoimiseen, usein olettaen maanrakennuskustannusten olevan tiedossa ennalta.
“Fiber network construction cost terrain” “Fiber network construction civil engineering cost” “Fiber network trenching cost estimation” ”Fiber network cost "terrain type"”	Maanrakennuskustannusten arviontiin suoraan keskittyvää tutkimusta ei löytynyt. Aihetta sivuaa mm. [38].
”Valokuitu maanrakennus kustannusarviointi” ”Valokuitu maanrakennus” ”Valokuitu rakennuskustannukset” “Valokuitu maanrakennusmenetelmät” “Valokuitu kustannusarviointi” “FTTH kustannusarviointi”	Suomenkielisillä hakutuloksilla saatiin suppea määrä tuloksia, joista valtaosa keskittyi verkonrakennushankkeen vaiheiden ja toteutustapojen kuvailuun tai valokuituteknologian esittelyyn. Näissä julkaisuissa ainoastaan sivutaan maanrakennusta, esimerkkejä ovat [39] sekä [40].

Vaikuttaa siltä, että aiemmassa tutkimustiedossa ei tiedosteta, että vaikka varsinaisen verkkoreitin optimointi ja suunnittelu on toki tärkeää, kokonaispituutensa kannalta optimaalinen verkko ei välttämättä ole kustannustehokkain. Osassa julkaisuista tiedostetaan maanrakennuskustannusten olevan merkittävin osa verkkohankkeiden kokonaiskustannuksista sekä tunnistetaan maanrakennuskustannusten voivan vaihdella paljonkin, mutta ei kuitenkaan oteta kantaa siihen, kuinka maanrakennuskustannuksia voitaisiin arvioida. Koska maanrakennus muodostaa suurimman osan toteutuskustannuksista, on maanrakennuskustannusten arviointi pääosassa. Maanrakennuskustannukset määrittyvät edelleen sen perusteella, mitä maanrakennusmenetelmiä käytetään minkäkin verran, ja se taas riippuu maastosta suunnitellun reitin varrella.

Suomenkielistä tutkimustietoa etsittäessä havaittiin, että valtaosa suomenkielisistä julkaisuista keskittyy verkonrakennuksen tai valokuitutekniikan esittelyyn yleisesti, ainoastaan sivuten maanrakennusta ja kustannusarviointia. Näin ollen, etenkin suomenkielisen tutkimuksen osalta maanrakennuskustannusten arvioinnista voidaan todeta löytyvän tutkimusaukko. Tutkimusta siitä, kuinka maanrakennuskustannusten arviointiprosesseja voitaisiin parantaa, ei löydetty. Tässä diplomityössä keskitytään täyttämään todettua tutkimusaukkoa ja etsimään konkreettisia keinoja, joilla voitaisiin vastata haasteisiin valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arvioinnissa.

4.4 Kustannusarviointiprosessi: Saimaan Kuitu Oy

Tässä aliluvussa esitellään sitä, miten Saimaan Kuidulla arvioidaan verkonrakennushankkeiden maanrakennuskustannuksia. Saimaan Kuidun rakentamat verkot suunnitellaan käyttäen Keycom-työkalua [41], joka on tarkoitettu tietoliikenneyhteyksien suunnitteluun. Karkeasti yksinkertaistettuna Keycomia voidaan kuvailla karttana, johon suunnitellut reitit merkataan. Keycomiin merkataan myös reittien tukikelpoisuus, käytettävät kaapelityypit pituuksineen, jakokaivojen sekä kuitujatkosten tyypit ja lukumäärä, sekä arviot käytettävistä maanrakennusmenetelmistä kussakin osassa reittiä.

Keycomissa on paljon muitakin ominaisuuksia, jotka liittyvät muun muassa olemassa olevien verkkoyhteyksien hallintaan, mutta ne eivät ole maanrakennuksen kustannusarvioinnin kannalta oleellisia. Kuvassa 8 esitetään Keycom-työkalulla tehtyä reittisuunnitelmaa satunnaiselta alueelta Lappeenrannasta. Saimaan Kuidun tämänhetkinen

kustannusarviointiprosessi perustuu Keycomin ominaisuuteen luoda materiaaliraportteja alueittain, niille tehtyjen reittisuunnitelmien pohjalta. Keycom:sta valitaan alue, jonka materiaaliraportti halutaan muodostaa, ja tämän jälkeen raportti voidaan viedä xlsx-tiedostoon (kuva 9). Materiaaliraportista nähdään metrikohtaisesti esimerkiksi se, kuinka paljon mitäkin valokuitukaapelityyppiä alueelle tulee, ja minkä verran kutakin maanrakennustyyppiä on suunniteltu käytettävän.

Kuva 8. Osa Keycom-työkalulla tehdystä verkkosuunnitelmasta. Punainen väri tarkoittaa suunniteltua reittiä, ja musta väri tukikelvotonta osaa reitistä.

Kaapelit							
Tyyppi	**Käyttötila**	**Asennustapa**	**Omistaja**	**Kaapelityyppi**	**Parilkm**	**Vaippapituus**	**Lkm**
6k	Suunniteltu	Maa	Lappeenrannan kaupunki	Kuitu	6	30556,1	104
24k	Suunniteltu	Maa	Lappeenrannan kaupunki	Kuitu	24	1342,9	2
192k	Suunniteltu	Maa	Lappeenrannan kaupunki	Kuitu	192	36704,2	2
432k	Suunniteltu	Maa	Lappeenrannan kaupunki	Kuitu	432	43311,5	2
384k	Suunniteltu	Maa	Lappeenrannan kaupunki	Kuitu	384	48250,6	3
12k	Suunniteltu	Maa	Lappeenrannan kaupunki	Kuitu	12	1195,4	2
48k	Suunniteltu	Maa	Lappeenrannan kaupunki	Kuitu	48	260,7	1
288k	Suunniteltu	Maa	Lappeenrannan kaupunki	Kuitu	288	8218,1	1
96k	Suunniteltu	Maa	Lappeenrannan kaupunki	Kuitu	96	2682,6	1
Yhteenveto:							

Kanavat			
Tyyppi	**Käyttötila**	**Pituus**	**Lkm**
Oja auraus	Ei rakenneta	3919,4	6
Oja kaivuu	Suunniteltu	5666,4	38
Oja auraus	Suunniteltu	3562,9	13
Kanava suuntaporaus	Suunniteltu	38,9	1
Oja	Ei rakenneta	100	1
Kanava tunkkaus	Suunniteltu	173	12
Oja kaivuu kourutus	Suunniteltu	310,7	2
Oja kaivuu putkitus	Suunniteltu	10,8	1
Oja	Tukikelvoton	3955,8	90
Oja kaivuu	Ei rakenneta	2986,8	5
Yhteenveto:			

Putket				
Tyyppi	**Aliputki**	**Käyttötila**	**Pituus**	**Lkm**
M110	Ei	Suunniteltu	68,4	5
M100	Ei	Suunniteltu	113,8	6
Yhteenveto:				

Kuva 9. Osa Keycom-työkalusta xlsx-muotoon viedystä materiaaliraportista satunnaiselta alueelta Lappeenrannasta.

Kuten nähdään, materiaaliraportista selviää korkealla tarkkuudella muun muassa käytettäväksi suunnitellut maanrakennustyypit – raportissa niihin viitataan kanavatyyppeinä. Koska reittejä suunniteltaessa kullekin reitin osalle merkataan myös sen tukikelpoisuus, myös tämä tieto nähdään materiaaliraportissa ja niitä hyväksi käyttämällä voidaan kokonaiskustannusarviosta nähdä myös esimerkiksi se osa, jolle tukea ei voida hakea.

Kustannusarviointiprosessi jatkuu asettamalla kullekin kanavatyypille metrihinta, jotka saadaan urakoitsijoilta kilpailutuksen tuloksena. Tämän jälkeen voidaan muodostaa arvio maanrakennuksen kokonaiskustannuksista, kunkin maanrakennusmenetelmän käytön ja metrihinnan ollessa tiedossa. Tämä arviointiprosessi on kuitenkin käytännössä täysin riippuvainen Keycomiin tehdyn suunnitelman tarkkuudesta eli siitä, kuinka hyvin arviot kussakin kohtaa reittiä käytettävästä maanrakennusmenetelmästä vastaavat todellisuutta. Jos suunnitteluvaiheessa arvioidaan esimerkiksi, että 70 % annetusta reitistä voidaan rakentaa auraamalla, mutta todellisuudessa aurata voidaankin vain 60 %, ovat todelliset kustannukset huomattavasti arvioitua korkeammat, sillä muut maanrakennusmenetelmät ovat metrihinnaltaan auraamista moninkertaisesti kalliimpia. Nykyisellään tätä epävarmuutta saadaan vähennettyä tekemällä kenttäkäyntejä eli nk. maastokatselmuksia reitin suunnitteluvaiheessa, mutta tämä vie aikaa ja laajempien verkkojen tapauksessa ei ole realistista, että koko reitti voitaisiin käydä läpi etukäteen. Apuna on käytetty myös muun muassa Google Street View -palvelua [42], jonka avulla voidaan tehdä katsaus siihen, miltä maasto teiden vieruksille suunnitelluilla reiteillä näyttää. Street Viewiä käyttämällä on muun muassa voitu tunnistaa kivikkoisia alueita, jotka karttatietojen perusteella olivat vaikuttaneet olevan auraamiselle otollisia [31]. Jos Street View -kuvamateriaalista voidaan nähdä maan pinnalla olevan suurehkoja kivilohkareita, voidaan niitä olettaa löytyvän myös maan alta. Auraamismenetelmää ei voida käyttää jos maasto on liian kivikkoista, joten tällainen tieto suunnitteluvaiheessa on arvokasta. [24]

4.5 Kustannusarviointiprosessi: Tähtikuitu Oy

Tähtikuitu Oy on Sodankylän kunnan omistama, Suomen pohjoisosissa toimiva valokuituverkkoyhtiö, jolla on noin kymmenen vuoden kokemus valokuituverkkojen rakentamisesta, heidän rakentamansa verkon kokonaispituuden ollessa yli 1500 km [26]. Tässä aliluvussa

avataan kustannusarviointiprosessia Tähtikuidulla, johon tutustuttiin haastattelemalla yhtiön toimitusjohtajaa.

Tähtikuidun kustannusarviointiprosessi on laajoilta osin samanlainen kuin Saimaan Kuidulla. Myös Tähtikuitu käyttää verkkosuunnittelussaan Keycomia, ja hankkeiden kustannusarviointiprosessi perustuu Keycom:sta vietyihin materiaaliraportteihin. Kun verkko on suunniteltu Keycomiin, materiaaliraporttiin saadaan vietyä tiedot tarvittavista kaapelityypeistä, tarvittavien jatkosten sijainneista, tyypeistä ja lukumäärästä sekä siitä, kuinka paljon kutakin maanrakennusmenetelmää on arvioitu käytettävän. Näiden tietojen perusteella materiaalihankinnat sekä maanrakennustyöt voidaan kilpailuttaa, jonka tuloksena saadaan suoritehinnat materiaaleille, teletöille ja maanrakennukselle eri menetelmineen. Saatujen suoritehintojen avulla voidaan muodostaa kustannusarvio suunnitellulle verkolle. Tässäkin prosessissa nojataan Keycomiin tehtyjen suunnitelmien tarkkuuteen ja oikeellisuuteen.

Haastattelussa Tähtikuidun kanssa [43] nousi esille myös, että Keycomiin ei voida syöttää tietoja aivan kaikesta verkonrakennuksessa tarvittavasta materiaalista. Keycomiin ei syötetä tietoa reitillä käytettävien merkkinauhojen pituuksista ja tyypeistä, valokuitukaapeleiden päihin jätettävistä työstövaroista, jatkokaivojen merkkaamiseen käytettävistä sondipalloista eikä kaikista suojakouruista, joita voidaan tarvita reitin kaivetulla osilla maastosta riippuen. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikki verkonrakennuksessa tarvittava materiaali ei selviä Keycom:sta viedystä materiaaliraportista, joten kustannusarviointia tehdessä tulee tehtyyn arvioon lisätä pieni puskuri, joka kattaa nämä kulut. Puskurin lisääminen on järkevää myös siksi, että huolimatta Keycomiin tehtyjen reittisuunnitelmien tarkkuudesta, kannattaa rakentamiseen varata varmuuden vuoksi esimerkiksi valokuitukaapelia joitain satoja metrejä enemmän kuin mitä on suunniteltu. Nämä ”piilokustannukset” eivät kuitenkaan liity suoranaisesti maanrakentamiseen, vaan ne ovat materiaalikustannuksia.

4.6 Ratkaisun tavoitteet

Ongelmakehykseen perehtymisen jälkeen, sekä kerätyn tutkimus- ja asiantuntijatiedon perusteella voidaan tunnistaa tekijöitä, joihin tulisi keskittyä maanrakennuskustannusten arvioinnin helpottamiseksi tai parantamiseksi. Näiden tekijöiden pohjalta voidaan muodostaa suunnittelututkimukselle asetettavat ratkaisun tavoitteet, joista yhden tai useamman

saavuttaminen ratkaisisi käsiteltävän ongelman tai osan siitä. Ratkaisun tavoitteista keskusteltiin ja niiden oikeellisuus vahvistettiin Saimaan Kuidun kanssa, ja ne ovat esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Ratkaisun tavoitteet.

ID	Kuvaus
T-1	Manuaalisen työn vähentäminen maanrakennuskustannusten arvioinnissa
T-2	Maanrakennuskustannusten arvioinnin nopeuttaminen
T-3	Aiempien hankkeiden toteutuneiden kustannusten hyväksikäyttö uusien hankkeiden kustannusarvioiden tekemisessä
T-4	Verkkoreitin maaston kartoittamisen yksinkertaistaminen
T-5	Maastotyyppien huomioon ottaminen entistä paremmin maanrakennuskustannusten arvioinnissa

Asetettuja tavoitteita Saimaan Kuidun kanssa läpi käydessä selvisi, että heidän näkökulmastaan etenkin kahden ensimmäisen tavoitteen (T-1 ja T-2, korostettu taulukossa 4) koettiin olevan erityisen arvokkaita, niiden saavuttaminen parantaisi maanrakennuskustannusten arviointiprosessia heidän mukaansa merkittävästi. Kun tavoitteita tarkastellaan tarkemmin, huomataankin että kolme jälkimmäistä tavoitetta (T-3 … T-5) ovat itse asiassa mahdollistajia kahden ensimmäisen saavuttamiselle; jos esimerkiksi aiempien hankkeiden toteutuneita kustannuksia voidaan hyväksikäyttää, tai verkkoreitin maaston kartoittamista yksinkertaistaa, voidaan olettaa manuaalisen työn määrän maanrakennuskustannusten arvioinnissa vähenevän ja prosessin nopeutuvan. Saimaan Kuidun puolelta tarkennettiin myös, että artefaktin kehityksessä riittää että keskitytään taajamien ulkopuolisiin alueisiin, sillä verkonrakennus on taajamissa luonteeltaan erilaista. Maatyypit näyttelevät taajamissa pienempää roolia kokonaiskustannusten muodostamisessa, kun muun muassa tien alituksia joudutaan tekemään enemmän, ja auraamista voidaan käyttää vähemmän.

Työssä on tähän asti käyty läpi suunnittelututkimusprosessin kaksi ensimmäistä vaihetta, eli ongelman tunnistaminen ja ymmärtäminen sekä ratkaisun ominaisuuksien kuvailu ja tavoitteiden asettaminen. Samalla on vastattu työn alitutkimuskysymyksiin, eli selvitetty mitkä tekijät vaikuttavat valokuituverkkojen maanrakennuskustannuksiin, perehdytty aiempaan tutkimustietoon aiheesta, sekä tutustuttu tällä hetkellä käytössä oleviin kustannusarviointiprosesseihin. Seuraavassa luvussa siirrytään suunnittelututkimusprosessin kolmanteen

vaiheeseen, eli ratkaisuartefaktin kehittämiseen. Täten ryhdytään etsimään vastausta diplomityön päätutkimuskysymykseen, eli tutkimaan sitä, miten valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arviointia voitaisiin parantaa.

5 Ratkaisun kehitys

Tässä luvussa keskitytään valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arviointiprosessin parantamiseen kehittämällä ratkaisuartefakti, joka saavuttaa yhden tai useamman taulukossa 4 esitetyistä ratkaisulle asetetuista tavoitteista. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että ensin ideoitaan ratkaisumahdollisuuksia ja esitetään ratkaisuvaihtoehtoja, joiden realistisuutta, toteuttamismahdollisuuksia ja soveltuvuutta kustannusarviointiprosessin parantamiseen arvioidaan. Tämän jälkeen esitetyistä ratkaisuvaihtoehdoista valitaan yksi, jota kehitetään edelleen ratkaisuartefaktiksi asti ja sovelletaan sitten kustannusarviointiin. Luvussa käydään siis läpi suunnittelututkimuksen kehitys- ja demonstraatiovaiheet.

5.1 Ratkaisuvaihtoehtojen ideointi

Tässä aliluvussa avataan ratkaisun ideointiprosessia ja sen poikimia kolmea ratkaisuvaihtoehtoa maanrakennuskustannusten arviointiprosessin parantamiseksi, joista valitaan yksi jatkokehitystä varten. Kaksi esitetyistä ratkaisuvaihtoehdoista on luonteeltaan sellaisia, että niitä ei joko voi tai kannata toteuttaa tämän diplomityön puitteissa, mutta niistä voi olla hyötyä mahdollisessa jatkotutkimuksessa aiheeseen liittyen. Tässä diplomityössä syvennytään kuitenkin ainoastaan yhteen esitetyistä vaihtoehdoista, toiset esitetään vain pintapuolin.

Ratkaisun tavoitteita Saimaan Kuidun kanssa läpi käydessä tunnistettiin tavoitteiden T-1 ja T-2, eli manuaalisen työn vähentämisen maanrakennuskustannusten arvioinnissa sekä prosessin nopeuttamisen, olevan tavoitteista tärkeimmät, muiden tavoitteiden toimiessa mahdollistajina niiden saavuttamiselle. Täten, ratkaisuvaihtoehtojen tulisi pyrkiä saavuttamaan yksi tai useampi tavoitteista T-3 … T-5, ja sitä kautta saavuttamaan jompikumpi tai kummatkin päätavoitteista T-1 ja T-2.

5.1.1 Asukkaiden ja toimijoiden tietojen hyödyntäminen

Ratkaisun ideointiprosessi aloitettiin etnografisen tutkimuksen – jonka yhdistämistä suunnitteluttutkimukseen tietojärjestelmiä koskevassa tutkimuksessa Baskerville & Myers [44] suosittelevat – menetelmiä lainaten; tiedustelemalla mahdollisia ratkaisuideoita ja -ajatuksia valokuituteknologiasta ja -yhteyksistä kiinnostuneilta ihmisiltä. Käytännössä tämä toteutettiin internetissä toimivia valokuituun keskittyviä keskustelualustoja hyödyntäen, tekemällä ko. alustoille julkaisuja, joissa esitetään tiivistetysti diplomityön konteksti, eli maanrakennuskustannusten suuri merkitys valokuituyhteyksien rakentamisessa, syyt sille miksi maanrakennuskustannuksia tulee arvioida etukäteen, ja mikä tekee arvioinnista hankalaa. Työn kontekstin esittelyn jälkeen kehotettiin julkaisun lukijoita esittämään mahdollisia ideoita tai ajatuksia tavoista, joilla kustannusarviointiprosessia voitaisiin tehdä helpommaksi, nimenomaan verkkoreitillä vallitsevien maatyyppien tunnistamisen osalta. Julkaisut tehtiin Facebookin suomenkieliseen Valokuitu-ryhmään [45] sekä suomalaisen, tietotekniikka-aiheisen verkkosivu io-tech:n alaiselle TechBBS-keskustelufoorumille [46], valokuituaiheisiin keskittyvään viestiketjuun. Valittuihin ryhmiin kuuluu sekä valokuituasiakkaita että valokuituyhteyksiä rakentavia ja suunnittelevia tahoja.

Kumpikin keskustelualustoille tehdyistä julkaisuista keräsi noin kymmenen kommenttia, joista useissa ehdotettiin varsin suoraviivaista ratkaisua – tietojen keräämistä verkkoreitin varren alueilla asuvilta, maata omistavilta, tai maanrakennustöitä aiemmin tehneiltä ihmisiltä tai toimijoilta, sillä heillä on todennäköisimmin tietoa maaperän tyypistä ja yksityiskohdista ko. alueilla. Kommentoijat viittasivat omiin kokemuksiinsa muun muassa tilanteista, joissa heidän pihoihinsa suunniteltuja kuitureittejä muutettiin asukkaan tietojen pohjalta siten, että pihojen kallioiset alueet vältettiin ja kuitukaapeli saatiin asennettua ”pehmeämpään” maahan helposti.

Ehdotettuun lähestymistapaan liittyy kuitenkin ongelmia. Vaikka tietoa maatyypeistä ja vaikeakulkuisista maa-alueista voitaisiinkin todennäköisesti tällä tavoin saada ainakin jossain määrin, ei ehdotetun kaltainen tiedonkeräys paikallisilta asukkailta ja toimijoilta ole ratkaisuna halutunlainen. Syynä tälle on se, että ratkaisulle asetettuihin tavoitteisiin kuuluvat manuaalisen työn vähentäminen maanrakennuskustannusten arvioinnissa (T-1), sekä arviointiprosessin nopeuttaminen (T-2). On mahdollista, että käymällä läpi verkkoreitin varren alueiden asukkaita ja maanrakennustyötä tekeviä toimijoita, etenkin sellaisilla alueilla, joilla

käytettävän maanrakennusmenetelmän suunnittelu on tunnistettu vaikeaksi, voitaisiin saada kerättyä ”hiljaista” tietoa alueiden maaperästä, mutta tällaisen työvaiheen lisäys maanrakennuskustannusten arviointiprosessiin sekä hidastaisi prosessia että lisäisi manuaalista työtä, eli olisi vastoin ratkaisun tavoitteita. Tästä syystä ratkaisuvaihtoehtoa ei valittu jatkokehitettäväksi.

5.1.2 Satelliittidatan käyttö maatyyppien arvioinnissa

Maata kiertää nykypäivänä valtava määrä satelliitteja, jotka keräävät erilaista tietoa sekä avaruudesta ja muista planeetoista että maapallosta. Maan havainnointia ilmasta tai avaruudesta käsin kutsutaan kaukokartoitukseksi (engl. remote sensing). Kaukokartoitusdataa on saatavilla runsaita määriä, ja avaruudesta käsin sitä tuottavat esimerkiksi Euroopan avaruusjärjestö ESA:n Copernicus-ohjelman [47] alaiset Sentinel-satelliitit sekä Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintovirasto NASA:n Landsat-ohjelman [48] satelliitit. Kaukokartoitusdatalla on käytännössä lukemattomia käyttökohteita; sitä on käytetty ja sen käyttämismahdollisuuksia selvitetty muun muassa karttamateriaalien ajantasaistukseen [49], vieraiden kasvilajien levinneisyyden kartoittamiseen [50], kuivien kausien ennustamiseen [51], sekä maankäytön muutosten tutkimiseen [52] liittyen. Saatavilla olevaa kaukokartoitusdataa voidaan käyttää joko sellaisenaan, tai hyödyntämällä esimerkiksi Microsoftin tai Googlen kehittämiä alustoja [53], [54].

Tavoitteiden T-4 ja T-5 saavuttamiseksi, eli suunnitellun verkkoreitin maatyyppien kartoittamisen helpottamiseksi sekä kartoitettujen maastotyyppien entistä paremman huomioon ottamisen mahdollistamiseksi voitaisiin tutkia kaukokartoitusdatan käyttömahdollisuuksia maatyyppien tunnistamisessa, maapeitteen paksuuden tai peruskallion syvyyden arvioinnissa ja esimerkiksi maa-aineksen karkeuden tai kivikkoisuuden selvittämisessä. Kaukokartoitusdatan käyttömahdollisuuksien tutkintaa ei kuitenkaan valittu tässä työssä ratkaisuartefaktin kehitysprosessissa käytettäväksi, sillä työn resurssit ovat rajalliset ja kaukokartoitusdatan tehokas soveltaminen vaatisi aiempaa kokemusta kaukokartoitusdatan käytöstä, jota työn tekijällä ei ole. Kaukokartoitusdata vaikuttaisi kuitenkin potentiaaliselta vaihtoehdolta valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arvioinnin parantamiseksi, ja sen käyttömahdollisuuksien selvittäminen mielenkiintoiselta aiheelta jatkotutkimukselle.

5.1.3 Kustannusdatan ja maaperädatan yhdistäminen

Saimaan Kuidun toteuttamien valokuituhankkeiden toteutuneet työsuoritteet ja -kustannukset syötetään osana rakennusprosessia metrikohtaisesti Geometrix-yhtiön [55] tarjoamaan Mobilenote-kirjausjärjestelmään, jossa ne ovat jälkikäteen tarkasteltavissa. Järjestelmästä voidaan jälkikäteen nähdä, kuinka monta metriä kutakin maanrakennusmenetelmää tietyn kaapelityön puitteissa, eli tietyllä kuituverkon osuudella, on käytetty, paljon kunkin menetelmän yksikköhinta on ollut, ja sitä kautta voidaan laskea kuinka paljon kyseisen verkko-osuuden toteutuneet maanrakennuskustannukset ovat olleet. Kuvassa 10 esitetään kuvankaappaus Mobilenote-järjestelmästä, josta nähdään erään toteutetun verkon osan käytetyt maanrakennusmenetelmät metreittäin. Kyseisellä 796 metriä pitkällä verkko-osuudella on käytetty kaivuuta 105 metriä, aurausta 691 metriä, ja muovikuorrutusta 15 metriä. Jokaiselle menetelmälle on myös nähtävissä yksikköhinta sekä kokonaiskustannus, jotka ovat kuitenkin piilotettu kuvasta tietojen luottamuksellisuuden vuoksi. Kuvasta selviää myös, että verkko-osuudelle on jätetty kaksi 30 metrin kaapelinippua, mutta niiden kustannukset eivät ole maanrakennuskustannuksia, joten ne eivät ole tämän diplomityön kannalta merkityksellisiä.

Työsuorite (4)

Kohteet 1-4 / 4 << 1 >>

☐	Urakoitsija	Urakka	Kaapelityö	Työlaji	Määrä	Yksikkö	Yksikköhinta (€)	Arvo (€)
☐			2920	Kaivu	105	m		
☐			2920	Auraus	691	m		
☐			2920	Kaapelinippu 30m	2	kpl		
☐			2920	Muovikuorrutus	15	m		

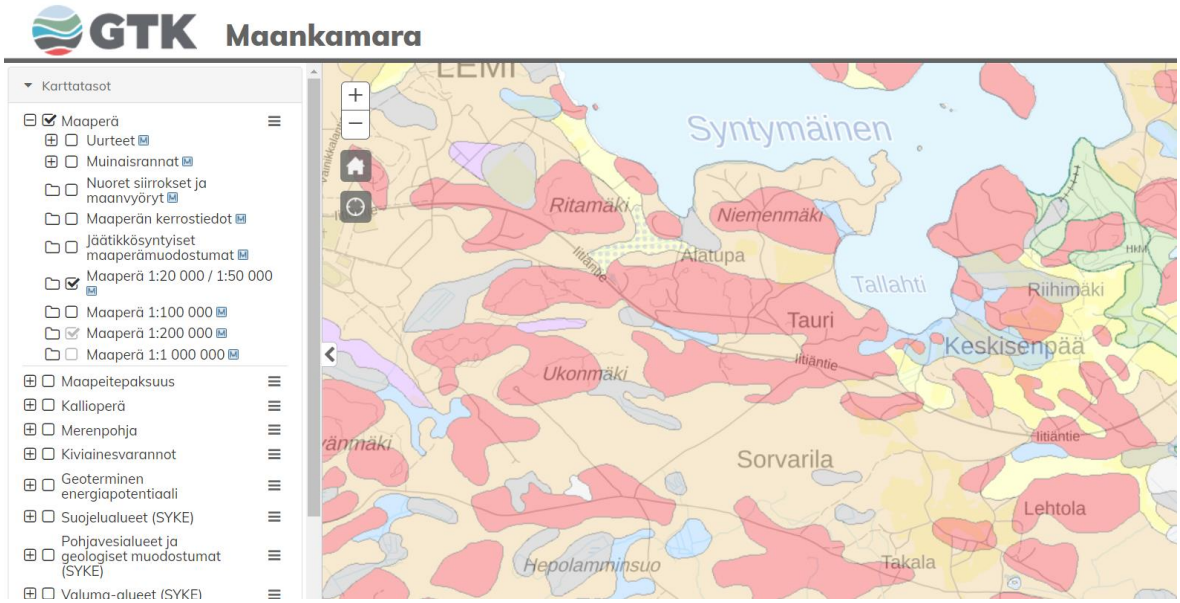
Kuva 10. Eräällä verkko-osuudella käytetyt menetelmät, kuvankaappaus Mobilenotesta. Tiedot urakoitsijan ja urakan nimestä sekä menetelmien yksikköhinnoista ja kokonaiskustannuksista on piilotettu.

Kolmas ratkaisuvaihtoehto maanrakennuskustannusten arviointiprosessin parantamiseen on Mobilenote-järjestelmästä saatavilla olevan kustannusdatan hyödyntäminen uusien valokuituhankkeiden maanrakennuskustannusten arvioinnissa siten, että uusille verkkohankkeille voitaisiin tehdä kustannusarvio nopeammin ko. dataa apuna käyttäen (tavoitteet T-2 ja T-3). Vaihtoehtoisesti, aiempien hankkeiden dataa voitaisiin käyttää uusille hankkeille tehtyjen kustannusarvioiden vahvistamiseen – jos uudelle hankkeelle tehty kustannusarvio eroaa merkittävästi samankaltaisten aiemmin toteutettujen hankkeiden kustannuksia käyttämällä tehdystä arviosta, on uuden hankkeen arvio todennäköisesti syytä tarkastaa virheiden varalta.

Jotta aiempien rakennushankkeiden kustannusdataa voitaisiin hyödyntää maanrakennuskustannusten arviointiin, tulee aiempi kustannusdata voida tavalla tai toisella yhdistää tietoon maaperän tyypeistä. Suomessa Geologian Tutkimuskeskus (GTK) [56] tarjoaa monenlaista geologista tietoa Suomesta, josta tämän diplomityön kannalta kiinnostavia ovat Maaperäaineistot [57], [58], [59]. Maaperä-aineistoista selviää yhden metrin syvyydessä vallitseva maalaji, ja Maaperä 1:20 000/1:50 000-aineiston tapauksessa myös pohjamaan päällä oleva 0,4–0,9 metrin paksuinen nk. pintamaalajikerros . Aineistot ovat vektorimuotoisia, eli maalajit ovat ilmaistu karttaa peittävinä kuvioina, ja niitä on saatavilla eri mittakaavoissa. Edellä mainitun 1:20 00/1:50 000-mittakaavan lisäksi olemassa ovat myös aineistot mittakaavoissa 1:100 000 sekä 1:200 000. Aineistoista uusin on Maaperä 1:200 000, joka on tuotettu vuosien 2002 ja 2009 välillä, ja mittakaavaltaan tarkin aineisto taas on Maaperä 1:20 000/1:50 000, joka sisältää tietoa vuosilta 1972–2007. Tässä diplomityössä käytettäväksi soveltuu parhaiten Maaperä 1:20 000/1:50 000, tarkkuutensa takia sekä siksi, että siinä ilmoitetaan maalajit matalammalla syvyydellä. Maaperä 1:20 000/1:50 000 kattaa Suomen pinta-alasta noin 37 %, eli kattavuudeltaan muut maaperäaineistot ovat sitä laadukkaampia, mutta niiden 1:100 000- tai 1:200 000-mittakaavat eivät ole riittävän tarkkoja käytettäväksi tämän diplomityön kaltaisissa sovelluskohteissa. Maaperä 1:20 000/1:50 000-aineistosta suurin osa taas on saatavilla mittakaavassa 1:20 000 ja se kattaa valtaosan alueista, joilla Saimaan Kuitu rakentaa valokuituverkkoja. Maaperä 1:20 000/1:50 000-aineiston kattavuutta on esitetty kuvassa 11.

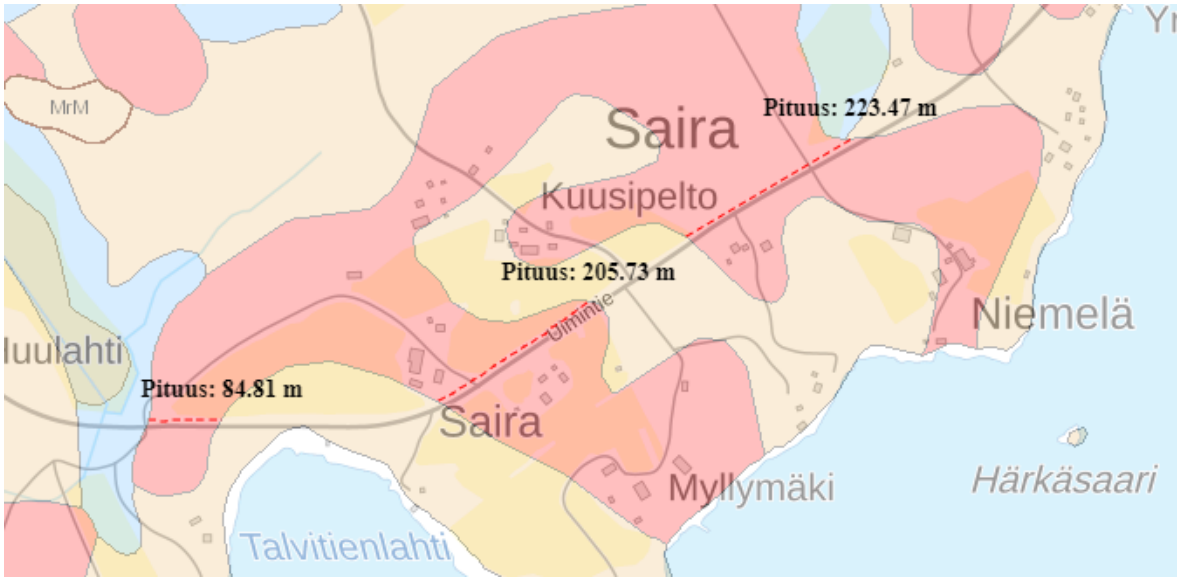
Kuva 11. Kuvankaappaus GTK:n Hakku-palvelusta, jossa esitetään Maaperä 1:20 000/1:50 000-aineiston kattavuutta eteläisessä Suomessa harmain neliöin.

Maaperä-aineistojen tietosisältöä, kuten monia muitakin GTK:n tarjoamia geologisia tietoja, havainnollistetaan GTK:n ylläpitämässä Maankamara-palvelussa. Maankamara on kartta-palvelu, jossa käyttäjä voi valita haluamansa aineiston esitettäväksi peittokuviona kartalla. Kuva 13 on kuvankaappaus Maankamara-palvelusta, joka havainnollistaa sitä, minkälaista tietoa Maaperä-aineistoista voidaan saada. Kuvassa aineistoksi on valittu Maaperä 1:20 000/1:50 000, eli karttaa peittävät eriväriset kuviot kuvaavat kyseisten alueiden maalajeja. Maaperä-aineistojen maalajeista tämän diplomityön kannalta kiinnostava maalaji on kallio-maa ja kivikot tai louhikot, sillä kallioisella tai kivisellä maaperällä voi olla suuri vaikutus valokuituhankkeiden maanrakennuskustannuksiin. Kalliomaa-alueet ovat merkattu kuvassa 12 esitettyyn Maankamara-karttaan punaisella.



Kuva 12. Kuvankaappaus Maankamara-palvelusta. Kartan peittokuvioksi on valittu Maaperä 1:20 000/1:50 000-aineisto, jossa punaiset kuviot kuvaavat kalliomaa-alueita.

Maaperädatan ja aiempien valokuituhankkeiden toteutuneiden kustannusten välistä yhteyttä tutkittiin tarkastelemalla Mobilenote-palvelusta saatavilla olevia tietoja verkko-osuuksien toteutuneista kustannuksista ja vertaamalla niitä kyseisten verkko-osuuksien maaperädataan. Käytännössä tämä tapahtui laskemalla verkko-osuuksille kalliomaaprosentti sekä keskimääräinen metrihinta ja vertailemalla niitä keskenään. Osuuksien kalliomaaprosentti laskettiin manuaalisesti: ensin selvitettiin, kuinka monta metriä kullakin verkko-osuudella oli maaperädatan mukaan kalliomaata, Maankamara-palvelun mittaustyökalua hyödyntäen (kuva 13). Tämän jälkeen kalliomaametrit jaettiin kyseisen verkko-osuuden kokonaispituudella, jolloin tuloksena saatiin osuuden arvioitu kalliomaaprosentti. Kunkin verkko-osuuden keskimääräinen metrihinta taas selvitettiin yksinkertaisesti laskemalla yhteen osuudelle Mobilenotesta saatavilla olevat kustannukset ja jakamalla tulos osuuden pituudella. Metrihintojen laskennassa otettiin huomioon vain osuuksien maanrakennuskustannukset, eli esimerkiksi verkko-osuudelle jätettyjen kaapelinippujen kustannuksia ei huomioitu. Tarkasteluun valittiin ainoastaan taajamien ulkopuolisia alueita, sillä taajama-alueilla maanrakennus on luonteeltaan erilaista, kun esimerkiksi kaivamista ja tien alituksia joudutaan tekemään enemmän. Teiden alitusten kustannuksia ei myöskään otettu huomioon valituilla osuuksilla, sillä teiden alitukset eivät riipu maaperän kallioisuudesta.



Kuva 13. Esimerkki kalliomaametrien laskemisesta Maankamara-palvelusta.

Kuvaillulla tavalla laskettiin kalliomaaprosentti ja keskimääräinen metrihinta yhteensä 48 verkko-osuudelle, joiden pituudet olivat 504 ja 4074 metrin välillä. Saadut tulokset kerättiin Excel-taulukkoon (liite 1), josta osa on esitetty kuvassa 14. Tämän jälkeen käytettiin Excelin KORRELAATIO-funktiota verkko-osuuksien kalliomaaprosentin ja keskimääräisen metrihinnan välisen korrelaatiokertoimen laskemiseksi. Korrelaatiokertoimeksi saatiin 0,63, joka tarkoittaa että korrelaatiota, joskin melko heikkoa sellaista, on kalliomaaprosentin ja keskimääräisen metrihinnan välillä havaittavissa.

Osuuden pituus (m)	Kalliomaa (m)	kalliomaa-%	metrihinta (€/m)
504	504	100	9,45
590	520	88,14	8,54
1882	1270	67,48	18,16
1033	650	62,92	4,52
897	541	60,31	9,18
2014	1205	59,83	9,32
665	338	50,83	4,89
1161	505	43,50	3,49

Kuva 14. Ote Excel-tiedostosta, johon tiedot verkko-osuuksien kalliomaaprosentista ja toteutuneesta metrihinnasta kerättiin.

Koska aiempien valokuituhankkeiden toteutuneiden kustannusten ja maaperädatan välillä vaikuttaisi olevan korrelaatiota, voitaisiin maanrakennuskustannusten arviointia pyrkiä parantamaan yhdistämällä kustannus- ja maaperädata jonkinlaisessa työkalussa, jolla voitaisiin tehdä kustannusarvio tietylle verkko-osuudelle. Ideaalisesti tällaista työkalua voitaisiin käyttää siten, että Keycom-työkalulla piirretty reitti voitaisiin viedä työkaluun, joka antaisi sitten arvion ko. reitin maanrakennuskustannuksista. Tästä ratkaisuvaihtoehdosta ja kuvaillun työkalun kehittämismahdollisuuksien selvittämisestä keskusteltiin Saimaan Kuidun kanssa ja keskustelun perusteella todettiin, että juuri tämänkaltaiselle työkalulle heillä voisi olla käyttöä. Näin ollen tämä ratkaisuvaihtoehto valittiin jatkokehitettäväksi. Tavoitteena on siis kehittää työkalu, jolla voitaisiin laskea kalliomaaprosentteja ja maanrakennuskustannusarvioita Keycom-työkalulla suunnitelluille verkko-osuuksille, hyödyntäen aiempien valokuituhankkeiden toteutuneita kustannuksia ja GTK:n tarjoamaa maaperädataa. Kehitettävä työkalu on diplomityön suunnittelututkimusprosessin ratkaisuartefakti.

5.2 Ratkaisuartefaktin kehitysprosessi

Tässä aliluvussa paneudutaan ratkaisuartefaktin kehitysprosessiin ja sen päävaiheisiin soveltuvien tiedostomuotojen ja paikkatieto-ohjelmistojen valinnasta tietojen varsinaiseen käsittelyyn; verkon kalliomaaosuuden laskentaan sekä kustannusarvioiden muodostamiseen.

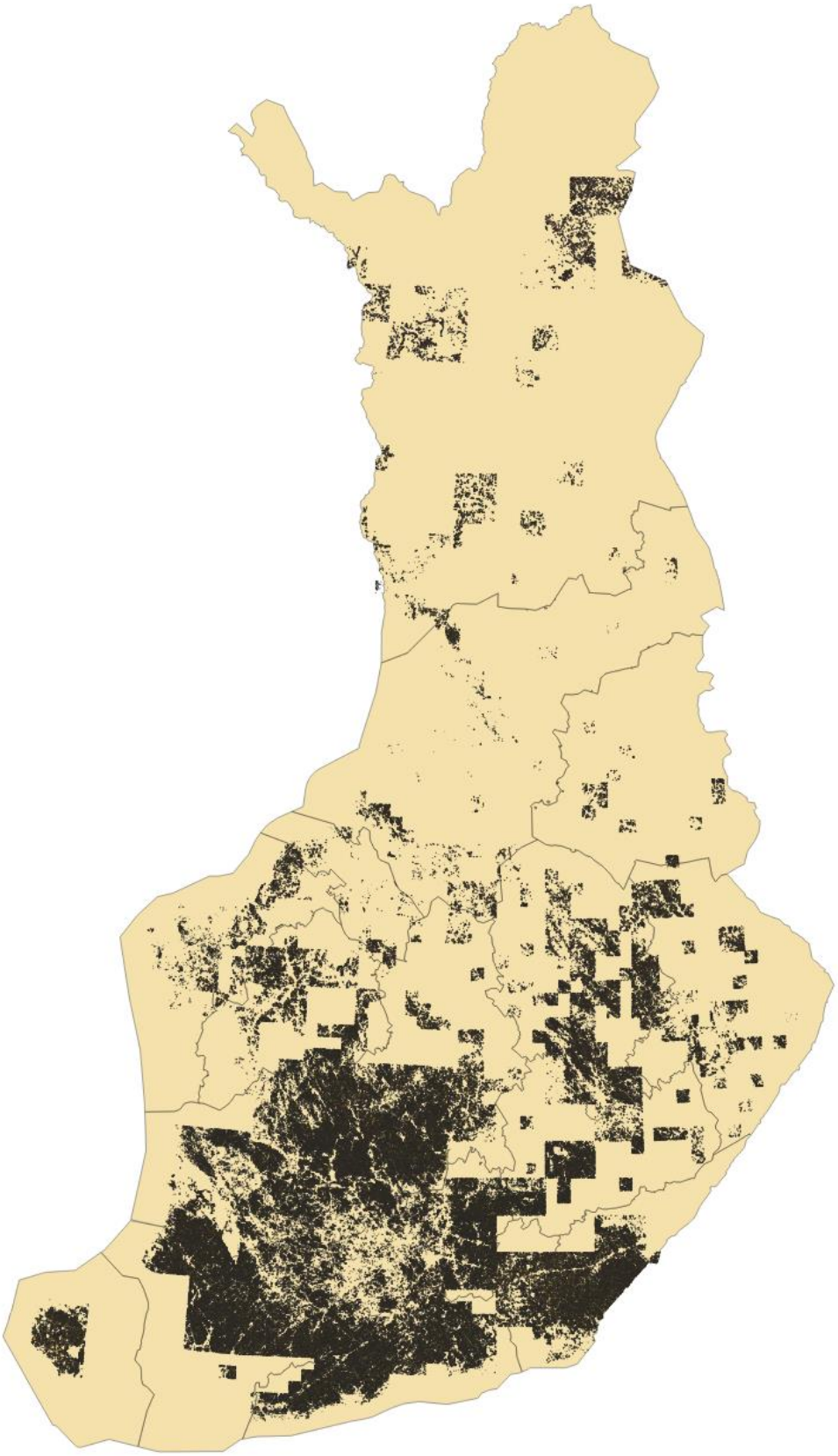
5.2.1 Aineistojen tiedostomuodot

Kehitysprosessi alkoi selvittämällä, missä muodossa maaperädataa on saatavilla GTK:lta, ja niin ikään missä muodossa suunniteltuja verkkoreittejä voidaan viedä ulos Keycom-työkalusta. Jotta maaperädataa sekä verkkoreittejä voitaisiin käsitellä yhdessä, tuli löytää sellainen tiedostomuoto, jossa molemmat tiedot ovat saatavilla tai johon ne voidaan muuntaa. GTK:n tarjoamista maaperäaineistoista ratkaisuartefaktin kehittämiseen valittiin Maaperä 1:20 000/1:50 000, sillä se on niistä mittakaavaltaan tarkin. Kyseinen aineisto on vektorimuotoinen, ja ladattavissa GTK:n Hakku-palvelusta tiedostomuodoissa filegeodatabase sekä MapInfo tab [57], ja se käyttää koordinaattijärjestelmää EPSG:3067 [60].

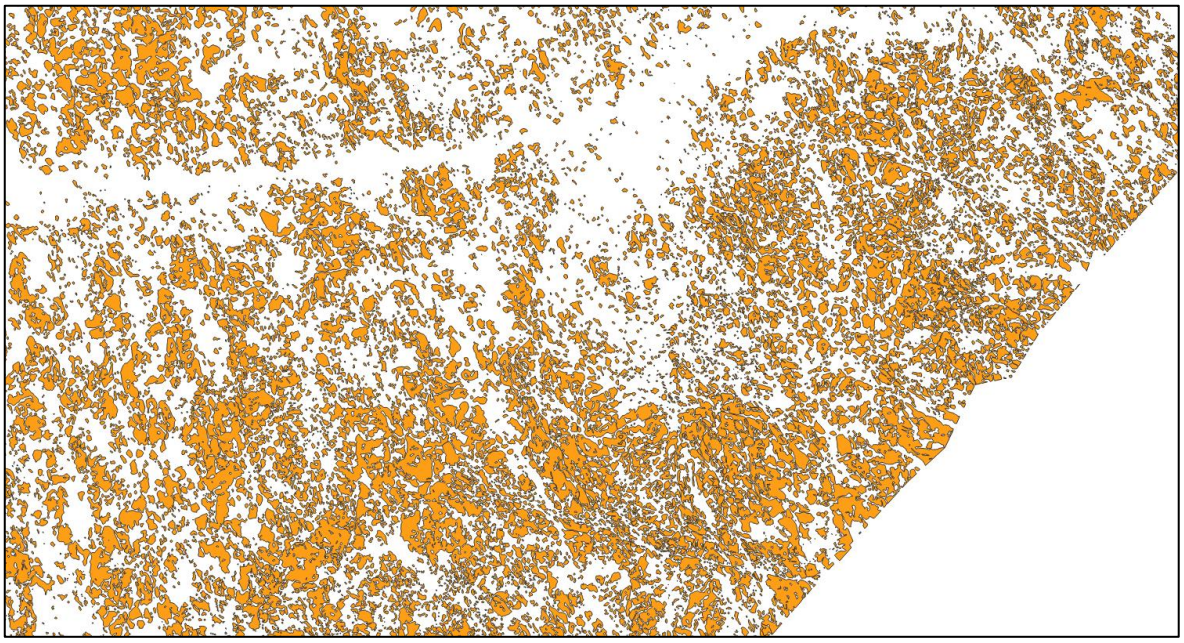
Keycom-työkalusta suunniteltuja verkkoreittejä voidaan viedä useissa koordinaattijärjestelmissä, joista yksi on EPSG:3067, eli koordinaattijärjestelmiensä puolesta tiedot ovat

saatavilla halutussa muodossa. Vaihtoehdot varsinaiselle tiedostomuodolle Keycom:sta vietäessä ovat joko shapefile, KML, tai AutoCAD, joista KML on suunniteltu datan näyttämiseen Google Earthin kaltaisissa maapalloselaimissa (engl. earth browser) [61] ja AutoCAD taas on tarkoitettu tietokoneavusteisen suunnittelun sovelluksiin Autodesk-tuoteperheellä [62]. Koska kaksi jälkimmäistä vaihtoehtoa eivät ole soveltuvia sellaiseen tiedonkäsittelyyn, jota tässä työssä kehitettävältä ratkaisuartefaktilta vaaditaan i.e., tiedon yhdistämiseen maaperädatan kanssa, jäi Keycom-työkalun tarjoamista tiedostomuodoista jäljelle shapefile eli .shp, joka on yhdysvaltalaisen Environmental Systems Research Instituten eli ESRI:n paikkatietojen käsittelyä varten kehittämä tiedostomuoto [63]. Näin ollen, seuraavaksi tuli selvittää onko maaperädataa mahdollista muuntaa jommastakummasta GTK:n tarjoamista tiedostomuodoista .shp-tiedostomuotoon tai toisinpäin. Tätä varten, sekä paikkatietojen tarkastelun mahdollistamiseksi ylipäänsä, tuli etsiä tarpeeseen soveltuva paikkatieto-ohjelmisto eli GIS-ohjelmisto.

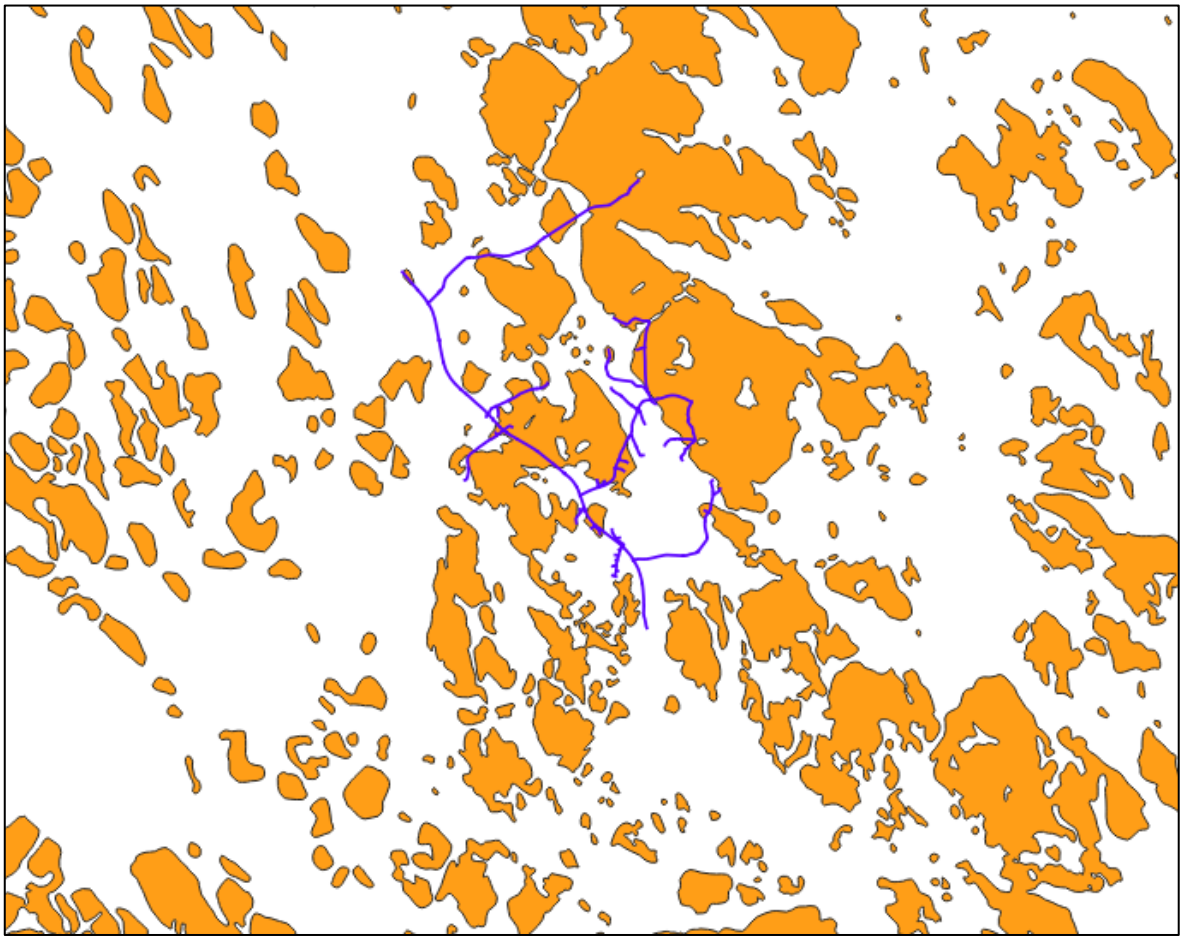
Paikkatietojen käsittelyyn on tarjolla lukuisia ohjelmistoja, joista monet ovat maksullisia, kuten esimerkiksi ArcGIS [64]. Suosituimpiin paikkatieto-ohjelmistoihin lukeutuu kuitenkin myös ilmaisesti käytettävissä oleva, avoimeen lähdekoodiin perustuva QGIS [65], joka tarjoaa laajan valikoiman ominaisuuksia paikkatietojen käsittelyyn, mukaan lukien shapefile-tiedostojen luonnin muiden tiedostojen pohjalta. Koska QGIS perustuu avoimeen lähdekoodiin ja on ilmainen, on sillä paljon käyttäjiä, joka tarkoittaa että myös tukea sen käyttämiseen on saatavilla paljon, esimerkiksi GIS Stack Exchange -sivustolla, jolla käyttäjät voivat kysyä kysymyksiä ja vastata muiden käyttäjien kysymyksiin GIS-aihealueeseen liittyen [66]. QGIS-ohjelmistoon voidaan tuoda paikkatietoja esimerkiksi filegeodatabase-muodossa, ja viedä ne shapefileiksi, joka on juuri se mitä ohjelmistolta vaadittiin. GTK:n maaperäaineistot voitiin siis muuntaa shapefile-tiedostomuotoon QGIS:n avulla. Käytännössä tämä tapahtui niin, että Maaperä 1:20 000/1:50 000 tuotiin kokonaisuudessaan QGIS:iin filegeodatabase-muodossa, jolloin se sisälsi tiedot kalliomaan lisäksi myös maaperän muista maalajeista. Koska valokuituhankkeiden maanrakennuskustannuksia nostavat erityisesti kivikkoiset ja kallioiset alueet joilla ei voida välttämättä käyttää aurausmenetelmää, poistettiin maaperäaineistosta QGIS:n avulla kaikki muut kuviot paitsi ne, joiden pintamaalajiksi oli määritelty joko ”kalliomaa”, ”rakka”, ”rapakallio”, ”lohkareita” tai ”kiviä”. Tämän jälkeen jäljelle jäänyt kalliomaadata vietiin .shp-tiedostoon. Kuvissa 15 ja 16 esitellään kalliomaadataa QGIS:ssä, ja kuvassa 17 on satunnainen Keycom-työkalusta viety verkkoalue kalliomaadata päällä QGIS:ssä esitettynä.



Kuva 15. Kalliomaadata koko Suomen alueelta. Tummat kuviot ovat kalliomaa-alueita.



Kuva 16. Kalliomaadata eräältä alueelta Kaakkois-Suomessa. Oranssit kuviot ovat kalliomaa-alueita.



Kuva 17. Keycom-työkalusta viety verkko kalliomaadatan päällä esitettynä.

5.2.2 Kalliomaaprosentin laskenta

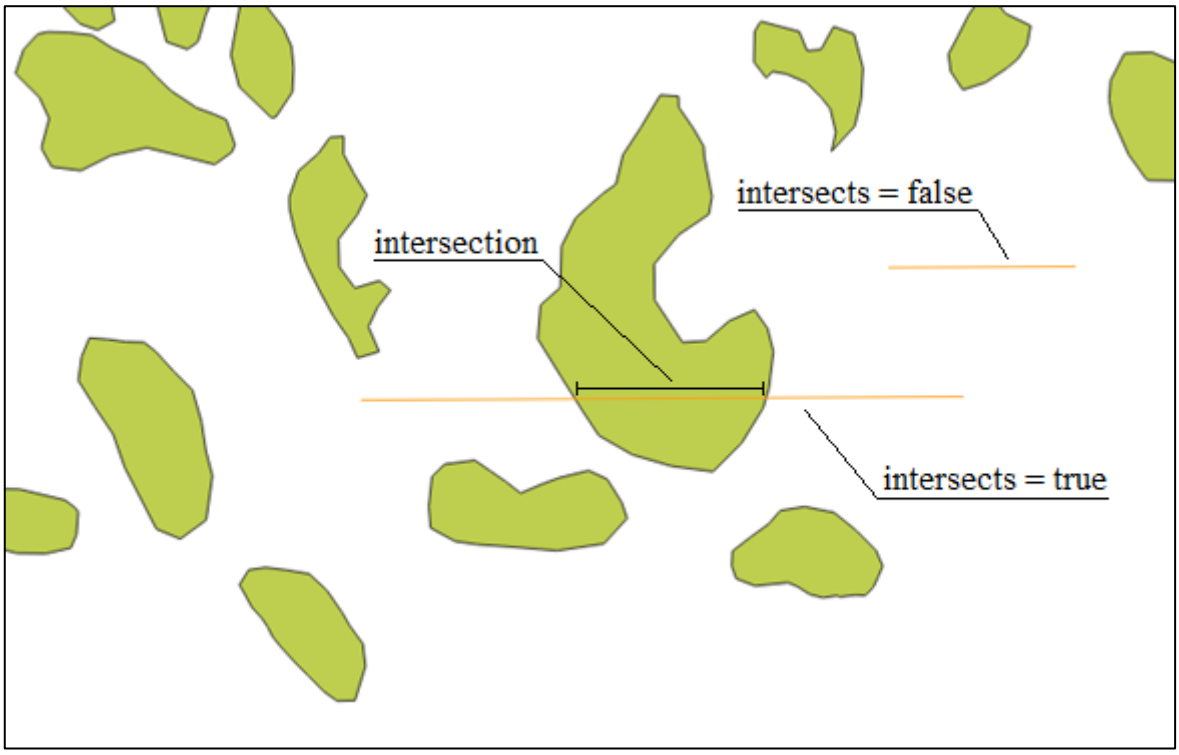
Kun molemmat aineistot oltiin saatu samaan tiedostomuotoon ja koordinaattijärjestelmään, voitiin siirtyä aineistojen varsinaiseen käsittelyyn. Tietojen käsittelyyn päätettiin käyttää Python-koodikieltä sen yksinkertaisuuden, tehokkuuden, ja laajan kirjastojen valikoiman takia. Pythonille on tarjolla monia paikkatietojen käsittelyyn sopivia kirjastoa, ja Python-ohjelman kehittäminen sekä käyttö ei vaadi paljoa erityisvalmisteluja, ainoastaan Pythonin sekä ohjelman käyttämien kirjastojen asennuksen.

Päätettiin, että ensimmäinen vaihe aineistojen käsittelyssä tulisi olla kalliomaametrien laskeminen annetulle verkko-osuudelle, eli toisin sanoen sen, kuinka monta metriä annetun verkko-osuuden kokonaispituudesta on maaperäaineiston perusteella kalliomaata. Aineistoja käsittelevän ohjelman toteuttaminen aloitettiin etsimällä Python-kirjasto, jolla paikkatietoja voidaan käsitellä. GIS Stack Exchange -sivuston julkaisujen tutkimisen perusteella suosituimmat kirjastot paikkatietojen käsittelyyn ovat Shapely [67], sekä siihen osittain pohjautuva GeoPandas [68], joka tarjoaa myös edistyneempiä ominaisuuksia kuten kuvaajien piirron. Koska tämän vaiheen tavoitteena oli kuitenkin ainoastaan laskea kalliomaametrit annetulle verkko-osuudelle, ei edistyneempiä ominaisuuksia tarvittu. Näin ollen, paikkatietojen käsittelyyn valittiin Shapely-kirjasto, ja lisäksi .shp-tiedostojen avaamista varten Fiona [69].

Maaperädata on tallennettu shapefile-tiedostoihin monikulmioina (Polygon-tietotyyppi), ja Keycom:sta saatavat kanavat eli verkko-osuudet taas yhtenä tai useampana viivana (LineString-tietotyyppi). Polygon-tietotyypissä kullakin monikulmiolla on piiri sekä pinta-ala, ja LineString-tietotyypissä kullakin viivalla pituus. Näiden arvojen yksikkö riippuu käytetystä koordinaattijärjestelmästä – ESPG:3067-järjestelmässä pituuden yksikkö on metri, jolloin pinta-alan yksikkö on luonnollisesti neliömetri. Näitä tietoja hyväksi käyttämällä Shapely-kirjasto tarjoaa funktiot *intersects* sekä *intersection*, joista ensimmäinen kertoo, leikkaavatko kaksi muotoa toisensa, ja jälkimmäinen palauttaa leikkauksen muodon. Leikkauksen muoto voi olla joko monikulmio (kahden monikulmion leikatessa), viiva (monikulmion ja viivan leikatessa), tai piste (kahden viivan leikatessa).

Koska tässä diplomityössä käsiteltävä data on monikulmioita (kalliomaadata) ja viivoja (verkkoreitit), voidaan siis ensin käyttää *intersects*-funktiota tarkastamaan, leikkaako annettu verkko-osuus kalliomaakuvion, ja sitten *intersection*-funktiota kertomaan leikkaavan

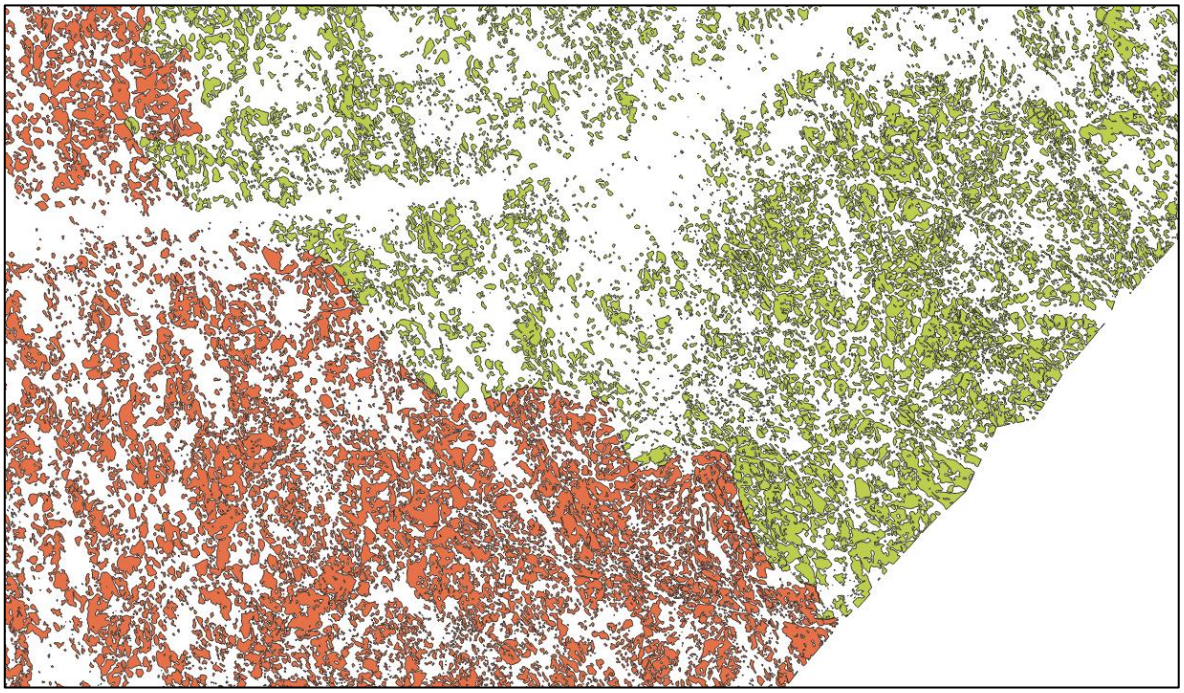
osan, josta edelleen saadaan leikkaavan osan pituus (havainnollistettu kuvassa 18). Kun tämä prosessi tehdään jokaiselle kalliomaakuviolle ja ohjelmalle annetun verkon osalle, saadaan tuloksena kokonaismatka, joka annetusta verkko-osuudesta on kalliomaata. Vertaamalla tulosta ohjelmalle annetun verkko-osuuden kokonaispituuteen, voidaan tulos esittää esimerkiksi prosentteina.



Kuva 18. Yksinkertainen esimerkki leikkaavista monikulmioista ja viivoista.

Kun kuvailtu kalliomaametrien laskentaprosessi toteutettiin Python-ohjelmalla ja kehitettyä ohjelmaa testattiin, huomattiin ohjelman suoritusajan venyvän useiden minuuttien mittaiseksi. Tämän pääteltiin johtuvan kalliomaadatan laajuudesta ja siitä, että kalliomaametrien laskemiseksi ohjelma käy läpi jokaisen kalliomaadatan sisältämän kuvion, joita on yli 300 000. Suoritusajan optimoimiseksi tuli siis käsitellä kalliomaadataa pienemmissä osissa. Tämä päätettiin toteuttaa jakamalla kalliomaadata yksittäisiin shapefile-tiedostoihin maakunnittain, jolloin ohjelmaa käyttäessä voitaisiin valita käsiteltävä maakunta, eikä ohjelman tarvitsisi läpikäydä koko Suomen kattavaa dataa. Käytännössä kalliomaadatan jako maakuntiin tapahtui käyttämällä avoimena datana saatavilla olevaa shapefile-aineistoa Suomen maakunnista [70], tuomalla se QGIS:iin maaperädatan kanssa, ja käyttämällä QGIS:n *intersection*-toimintoa, jolla voidaan valita kaikki kuviot, jotka leikkaavat toisen valitun kuvion.

Tällä tavalla voitiin valita maakunta-aineistosta esimerkiksi Etelä-Karjalaa kuvaava kuvio, jolloin *intersection*-toiminnolla saatiin valittua kaikki ne maaperäaineiston kuviot, jotka kuuluvat Etelä-Karjalaan. Tämän jälkeen valitut kuviot voitiin viedä omaan, ainoastaan Etelä-Karjalaa kuvaavaan shapefile-tiedostoonsa. Kuvassa 19 esitetään maakunnittain jaettua kalliomaadataa. Python-ohjelman suoritusaika maakuntiin jaetulla kalliomaadatalla esimerkiksi Etelä-Karjalassa sijaitsevalle verkko-osuudelle oli enää 8 sekuntia.

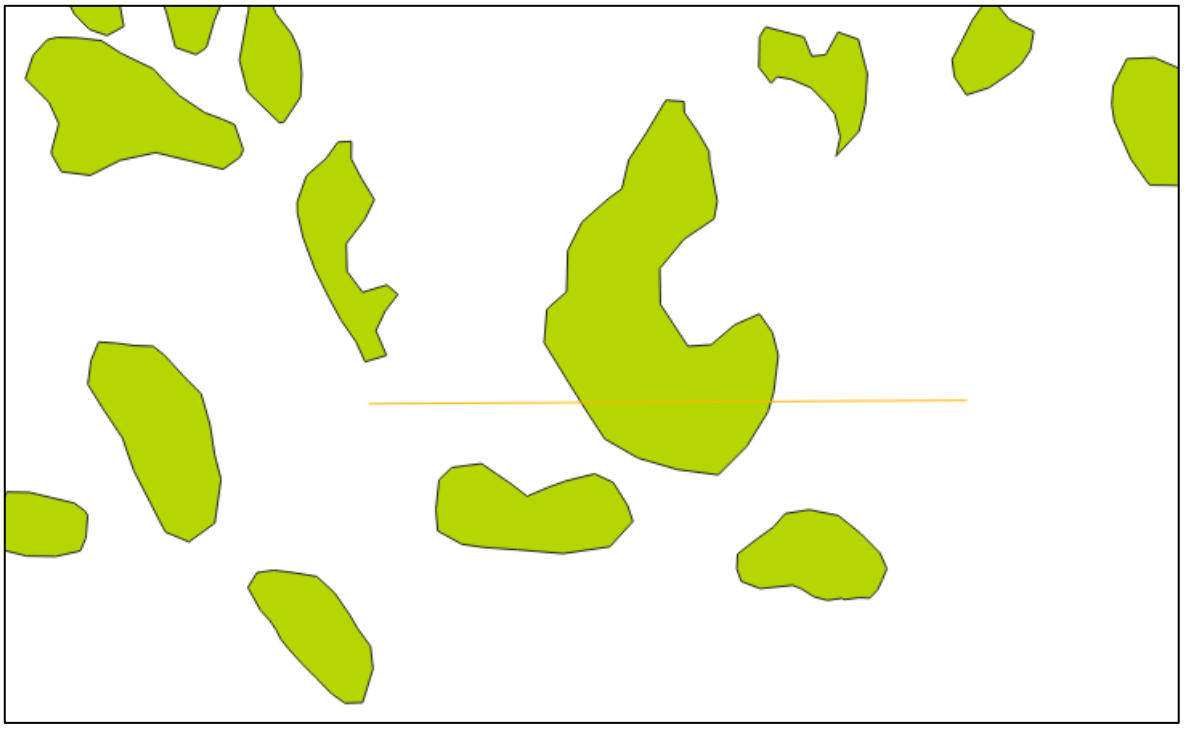


Kuva 19. Kalliomaadata jaettuna maakunnittain. Vihreät kalliomaa-alueet ovat Etelä-Karjalassa, ja punaiset Kymenlaaksossa.

Kun kalliomaadata oli jaettu ja ohjelman suoritusaika saatu lyhyemmäksi, testattiin kalliomaametrien laskennan tuloksia käyttämällä QGIS:n avulla luotuja määrätyn pituisia viivoja, jotka asetettiin kulkemaan kalliomaakuvioiden läpi. Vertaamalla ohjelman laskemia tuloksia ennalta tiedossa oleviin arvoihin, voitiin todeta että ohjelma laskee kalliomaametrit ja -prosentin oikein. Kuva 20 on kuvankaappaus Python-ohjelman tulosteesta eräälle Etelä-karjalassa sijaitsevalle verkko-osuudelle, jossa ilmoitetaan kyseisen verkko-osuuden kokonaispituus sekä kalliomaan osuus kokonaispituudesta. Kuvassa 21 esitetään yksi ohjelman testaamiseen käytetyistä kilometrin pituisista viivoista.

```
Tämä ohjelma laskee kalliomaan osuuden annetun kuvion pituudesta.

Maaperädata: Maaperä 1:20 000/1:50 000 © Geologian Tutkimuskeskus

Suoritusajan optimoimiseksi maaperädata on jaettu maakunnittain.
Valitse maakunta syöttämällä sen nimi pienellä yhteen, ilman väliviivoja. Syötä 0 sulkeaksesi ohjelman.

Maakunta: eteläkarjala

Avataan tiedostoja ...
Avattu.
Luetaan geometrioita ...
Geometriat luettu.
Analysoidaan geometrioita  ...
Valmis!

——— TULOS ———

Annetun kuvion pituus on noin 13479.39 metriä, ja sen pituudesta on GTK:n maaperädatan perusteella 4869.99 metriä kalliomaata.
Kalliomaan osuus kuvion pituudesta on 36.13 %.
Suorituksessa kesti: 8 sekuntia.
```

Kuva 20. Python-ohjelman tuloste.



Kuva 21. Esimerkki kalliomaametrien laskennan testaamisessa käytetystä tilanteesta. Oranssi viiva on kartalla tasan kilometrin mittainen, ja vihreät kuviot ovat kalliomaa-alueita.

Tässä vaiheessa kehitetty Python-ohjelma kykeni siis laskemaan annetun verkko-osuuden kalliomaametrit ja niiden avulla osuuden kalliomaaprosentin. Seuraavaksi tuli yhdistää tämä tieto aiempien valokuituhankkeiden kustannusdataan, jotta ohjelmalle annetulle verkko-osuudelle voitaisiin muodostaa kustannusarvio. Seuraavassa aliluvussa perehdytään siihen, miten kustannusarvioita voitaisiin kalliomaaprosentin perusteella tehdä.

5.2.3 Kustannusarviointi kalliomaaprosentin perusteella

Jotta verkko-osuuden kalliomaaprosentin perusteella voitiin tehdä kustannusarvio ko. verkko-osuudelle, tuli kehittää yhtälö kustannusarvion laskemiseen. Yhtälön kehityksessä päädyttiin yksinkertaiseen ratkaisuun; kertomaan verkon kalliomaaosuus kalliomaata kuvaavalla hintakertoimella, ja verkon loppuosa ei-kallioista maastoa kuvaavalla hintakertoimella. Lisäksi yhtälöön lisättiin reunaehto, jonka mukaan välille [0, 1] normalisoidun kalliomaaprosentin tulee olla yli 0,1 eli yli 10 %, jotta kalliomaa otetaan huomioon. Tämä tehtiin siksi, että tarkasteltujen verkko-osuuksien perusteella kalliomaaprosentin ollessa alle kymmenen, ei maanrakennuksen metrihinta nouse juurikaan. Kustannusarvioiden laskemiseen käytetty yhtälö on yhtälö (2), josta nähdään että kalliomaaprosentin ollessa yli kymmenen, lasketaan kustannusarvio kertomalla kalliomaaosuuden pituus kalliomaan hintakertoimella, muu osuus ei-kallioisen maan hintakertoimella ja lisäämällä tulokset yhteen. Kun kalliomaaprosentti on enintään kymmenen, kerrotaan verkko-osuuden koko pituus ei-kallioisen maan hintakertoimella. Huomattakoon, että yhtälö ja kehitettävä ohjelma eivät ota huomioon mahdollisia teiden alituksia, sillä niiden kustannukset eivät riipu maaperästä.

$$K = \begin{cases} m_k * k * l + m_e * (1-k) * l \,, k > 0{,}1 \\ m_e * l \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad , k \leq 0{,}1 \end{cases} \tag{2}$$

jossa K on verkko-osuuden kustannusarvio,

m_k on kalliomaan hintakerroin,

m_e on ei-kallioisen maan hintakerroin,

k on verkko-osuuden kalliomaaprosentti normalisoituna välille [0, 1],

l on verkko-osuuden pituus.

Seuraava vaihe kustannuslaskennassa oli hintakertoimien määrittäminen; mitkä kertoimien tulisi olla, jotta saadut tulokset olisivat mahdollisimman tarkkoja? Kertoimien määrittämiseen käytettiin samojen verkko-osuuksien tietoja, joita oltiin aiemmin tarkasteltu kalliomaaprosentin ja verkko-osuuden metrihinnan välistä yhteyttä etsittäessä (kuva 16 & liite 1), joista valittiin 30. Näiden verkko-osuuksien pituudet, toteutuneet kokonaiskustannukset sekä kalliomaaprosentit olivat tiedossa, joskin manuaalisesti lasketut kalliomaaprosentit laskettiin uudelleen, kehitetyllä Python-ohjelmalla, niiden tarkkuuden parantamiseksi. Näitä tietoja käyttämällä voitiin alkaa etsimään optimaalisia hintakertoimia, joka tehtiin Exceliä apuna käyttäen.

Käytännössä optimaalisten hintakertoimien etsintä tapahtui seuraavanlaisesti:

1) Exceliin kerättiin tarkasteltavien verkko-osuuksien pituus, kalliomaaprosentti ja toteutunut hinta.

2) Luotiin sarake kustannusarviolle, jonka arvot laskettiin syöttämällä yhtälö (2) Exceliin siten että hintakertoimet m_k ja m_e tallennettiin omiin soluihinsa, ja niiden arvoiksi asetettiin arvaukset 10 ja 2. Tällöin Excel laski kullekin osuudelle kustannusarvion ko. rivin tietoja sekä hintakertoimia käyttämällä.

3) Luotiin sarake virheille, jonka arvot saatiin kullekin osuudelle yksinkertaisesti saadun kustannusarvion ja toteutuneen hinnan solujen arvojen erotuksena. Virhe esitettiin myös prosenttiosuutena verkko-osuuden toteutuneesta hinnasta.

4) Laskettiin virheprosenttien keskiarvo omaan soluunsa.

5) Käytettiin Excelin *ratkaisin*-apuohjelmaa, jolla voidaan ratkaista numeerisia ongelmia. Käytännössä ratkaisin toimii siten, että sille annetaan solu, jonka arvo halutaan joko maksimoida, minimoida, tai saattaa mahdollisimman lähelle jotain muuta arvoa, sekä solut, joiden arvoja muuttamalla ratkaisua tulisi hakea. Koska kustannusarviot, virheet, virheprosentit ja niiden kautta myös keskimääräinen virheprosentti riippuvat hintakertoimien arvoista, ovat hintakertoimet optimaaliset keskimääräisen virheprosentin ollessa mahdollisimman pieni. Tässä tapauksessa haluttiin siis minimoida keskimääräisen virheprosentin arvo muuttamalla niiden solujen arvoja, joihin hintakertoimet m_k ja m_e oli tallennettu.

Excel-tiedosto, jossa hintakertoimien optimointi tehtiin, on liitteessä 2, ja ote siitä esitetty kuvassa 22. Kuvasta nähdään että ratkaisimella saatiin optimaalisiksi hintakertoimiksi $m_k \approx 9{,}18$ ja $m_e \approx 3{,}18$, jolloin keskimääräinen virheprosentti oli 20,27 %, maksimivirheen ollessa 70,29 %. Yleisesti virheprosentit olivat korkeimmillaan 25–30 % luokkaa, mutta käytetyssä aineistossa oli neljä verkko-osuutta, joiden toteutuneet hinnat olivat joko huomattavan korkeita tai huomattavan matalia kalliomaaprosenttiinsa nähden; virheprosentit näillä osuuksilla olivat 44,20 %, 43,69 %, 70,29 % ja 62,98 %.

Nämä poikkeukset johtunevat siitä, että Maaperä 1:20 000/1:50:000-aineistossa esitetään 1 metrin syvyydessä sijaitseva pohjamaalaji ja sen päällä oleva 0,4–0,9 metrin paksuinen pintamaakerros, joista jälkimmäistä Python-ohjelmassa käytetään kalliomaaprosentin laskemiseksi. Maaperädatassa esiintyy siis vaihtelua eivätkä kaikki aineiston kalliomaa-alueet ole maanrakentamisen kannalta samanlaisia. Yhdessä kohtaa kalliomaa voi sijaita esimerkiksi 55 cm syvyydessä ja toisessa vain 20 cm syvyydessä. Tämän vaihtelun lisäksi maaperädata perustuu kenttäkäyntien perusteella tehtyihin arvioihin, eikä siis voida olla varmoja siitä, vastaako maaperädata joka kohdassa todellisuutta täysin. Mikäli poikkeustilanteita ei olisi otettu huomioon, olisi keskimääräinen virheprosentti ollut 14,88 %.

			m_k	m_e	keskim. virhe-%
			9,180063806	3,179667364	**20,27**

pituus (m)	kalliomaaprosentti (0...1)	toteutunut hinta	kustannusarvio	virhe	virhe %
1192	0,0000	3 522,97 €	3 790,2 €	267,19 €	7,58
1738	0,0000	5 899,63 €	5 526,3 €	-373,37 €	6,33
1621,02	0,0000	5 287,20 €	5 154,3 €	-132,90 €	2,51
4074,45	0,0000	16 188,80 €	12 955,4 €	-3 233,40 €	19,97
1663,81	0,0000	7 754,50 €	5 290,4 €	-2 464,14 €	31,78
805,48	0,0000	2 237,45 €	2 561,2 €	323,71 €	14,47
956,39	0,0000	4 150,00 €	3 041,0 €	-1 109,00 €	26,72
443,18	0,0000	1 899,22 €	1 409,2 €	-490,06 €	25,80
805,19	0,0503	3191,86	2 560,2 €	-631,62 €	19,79
3113,39	0,0580	9 135,30 €	9 899,5 €	764,24 €	8,37
1029,36	0,0846	4 180,53 €	3 273,0 €	-907,51 €	21,71
1025	0,0980	2 818,22 €	3 259,2 €	440,94 €	15,65

Kuva 22. Ote Excel-tiedostosta, jossa hintakertoimia optimoitiin.

Excel-tarkastelun lisäksi maanrakennuksen metrihinnan ja verkko-osuuden kalliomaaprosentin välistä yhteyttä pyrittiin esittämään myös kuvaajan avulla siten, että vaaka-akseli kertoisi kalliomaaprosentin ja pystyakseli sitä vastaavan metrihinnan, mutta yhteyttä tarpeeksi

hyvin kuvaavaa funktiota ei löydetty. Parhaimmillaan päästiin n. 20 prosentin keskivirheeseen, mutta ei kuitenkaan hintakertoimien käyttöä tarkempiin tuloksiin. Koska hintakertoimien käyttö on huomattavasti yksinkertaisempaa ja tuotti yhtä tarkkoja tuloksia, päätettiin sitä suosia kuvaajan käytön sijaan. Kun hintakertoimet oltiin määritelty, toteutettiin kustannusarviointiyhtälö samassa Python-ohjelmassa jolla kalliomaaprosenttien laskenta oli aiemmin toteutettu (kuva 23). Hintakertoimet määritettiin omassa tekstitiedostossaan sitä varten, että niitä voidaan tarvittaessa helposti muokata tulevaisuudessa. Tällöin ratkaisuartefakti oli valmis ja voitiin siirtyä sen testaamiseen. Siirrytään siis suunnittelututkimuksen suunnittelu- ja kehitysvaiheesta demonstraatiovaiheeseen, jossa kehitettyä artefaktia sovelletaan kustannusarviointiin aiemmin käsittelemättömille verkko-osuuksille.

```
Tämä ohjelma laskee kalliomaan osuuden annetun kuvion pituudesta.

Maaperädata: Maaperä 1:20 000/1:50 000 © Geologian Tutkimuskeskus

Suoritusajan optimoimiseksi maaperädata on jaettu maakunnittain.
Valitse maakunta syöttämällä sen nimi pienellä yhteen, ilman väliviivoja. Syötä 0 sulkeaksesi ohjelman.

Maakunta: eteläkarjala

Avataan tiedostoja ...
Avattu.
Luetaan geometrioita ...
Geometriat luettu.
Analysoidaan geometrioita  ...
Valmis!

——— TULOS ———

Annetun kuvion pituus on noin 13479.39 metriä, ja sen pituudesta on GTK:n maaperädatan perusteella 4869.99 metriä kalliomaata.
Kalliomaan osuus kuvion pituudesta on 36.13 %.
Suorituksessa kesti: 8 sekuntia.

Kustannusarvio annetuilla arvoilla: 72081.84 €
```

Kuva 23. Python-ohjelman tuloste, sisältäen kustannusarvion.

5.3 Artefaktin testaus

Tässä aliluvussa demonstroidaan työssä kehitetyn ratkaisuartefaktin toimintaa, joka tehdään Python-ohjelmaa testaamalla. Ohjelman testaus suoritettiin tarkastelemalla sellaisia verkko-osuuksia, joita ei oltu käytetty hintakertoimien optimoinnissa. Testidataksi valittiin tällaisia osuuksia 30, jonka jälkeen niille laskettiin kustannusarvio Python-ohjelmaa käyttäen, ja verrattiin tuloksia osuuksien todellisiin kustannuksiin. Tämän jälkeen kullekin kustannusarviolle laskettiin euromääräinen virhe sekä virheprosentti. Lopulta voitiin laskea osuuksien keskimääräinen virheprosentti, samaan tapaan kuin hintakertoimien optimoinnissa tehtiin. Keskimääräinen virheprosentti testatuille verkko-osuuksille oli 35,58 %, ja maksimivirhe 87,45 %. Ote Excel-tiedostosta, johon testauksen tuloksia kerättiin, esitetään kuvassa 24.

						Keskimääräinen virhe-%
						35,58
pituus (m)	kalliomaaprosentti (0...1)	toteutunut hinta		kustannusarvio	virhe	virhe %
1422,2	0,0000	3 901,60 €		4 522,13 €	620,53 €	15,90
2834,62	0,0000	5 995,90 €		9 013,16 €	3 017,26 €	50,32
3224,99	0,0000	11 400,00 €		10 254,40 €	-1 145,60 €	10,05
718,89	0,0000	3 299,60 €		2 285,83 €	-1 013,77 €	30,72
881,97	0,0000	4 930,20 €		2 804,36 €	-2 125,84 €	43,12
712,39	0,0000	5 985,60 €		2 265,15 €	-3 720,45 €	62,16
1553	0,0000	14 799,40 €		4 938,65 €	-9 860,75 €	66,63
1018	0,0000	8 041,93 €		3 239,52 €	-4 802,41 €	59,72
1600	0,0012	5 146,10 €		5 088,58 €	-57,52 €	1,12
1271,78	0,0122	4 430,40 €		4 043,84 €	-386,56 €	8,73
1877,05	0,0665	4 773,90 €		5 968,40 €	1 194,50 €	25,02
820,44	0,0897	3 268,35 €		2 608,73 €	-659,62 €	20,18
1638	0,1002	13 071,60 €		6 195,63 €	-6 875,97 €	52,60

Kuva 24. Ote Excel-tiedostosta, johon testaustuloksia kerättiin.

Testaustuloksista huomataan, että kustannusarviot ovat varsin epätarkkoja. Matalalle tarkkuudelle ja arvioiden tarkkuuden vaihtelulle voi olla monia syitä, joista todennäköisimpiä lienevät seuraavat:

1) Aiemmin kuvailtu maaperädatalle ominainen vaihtelevuus, joka aiheuttaa sen etteivät kaikki kalliomaa-alueet vaikuta maanrakennuskustannuksiin samalla tavalla; joillakin alueilla kallio on melko syvällä, toisilla lähempänä maanpintaa.

2) Kehitetty kustannusarviointiyhtälö sekä käytetyt hintakertoimet ovat mahdollisesti ylisovitettu niiden optimoinnissa käytettyyn dataan, eivätkä näin ollen ole yleistettävissä mihin tahansa verkko-osuuteen.

3) Kehitys- ja testausvaiheissa käytetyt verkko-osuudet ovat vuosilta 2018–2024, ja ko. aikavälillä metrihinnat eri maanrakennusmenetelmille ovat nousseet inflaation myötä, esimerkiksi auraamisen metrihinta on noussut jopa 50 senttiä, joka on prosentuaalisesti suuri määrä, sillä auraamisen metrihinta on muutaman euron luokkaa. Jos sama hanke tehtäisiin vuonna 2018 ja 2024, olisi jälkimmäinen kokonaishinnaltaan kalliimpi. Tämä lisää kustannusarvioinnin kompleksisuutta.

4) Kalliomaaprosentin ja metrihinnan välinen korrelaatiokerroin oli 0,63, joten oli odotettavissa, että kustannusarvioiden teko kalliomaaprosentin avulla olisi vaikeaa. Verkko-osuudella voidaan esimerkiksi joutua käyttämään paljon kaivamista mm. tienpientareessa jo olemassa olevan infrastruktuurin takia, joka voi estää auraamisen käytön mutta kalliomaaprosentti ei vaikuta siihen lainkaan.

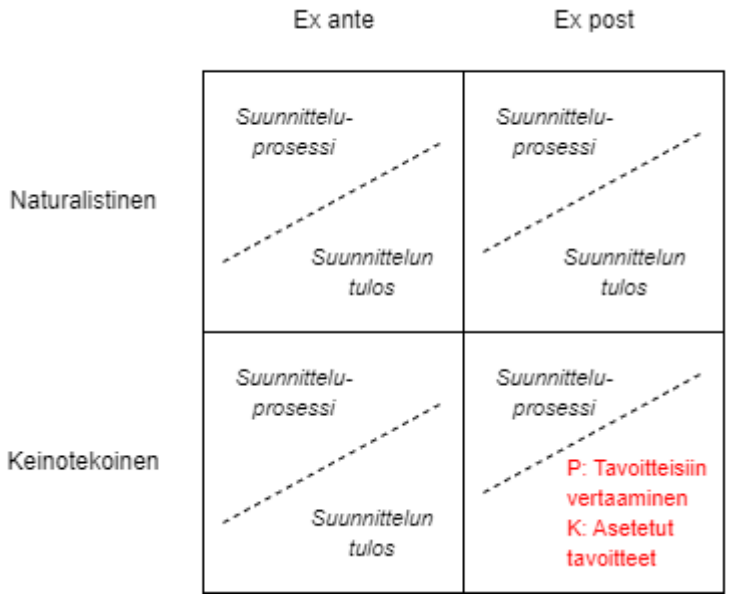
Esitettyjen tekijöiden perusteella ei ole syytä epäillä virheitä kustannuslaskennan toteutuksessa, vaan maanrakennuksen kustannusarvioiden muodostaminen ainoastaan maaperädatan avulla lasketun kalliomaaprosentin perusteella yksinkertaisesti on vaikeaa, ja epätarkkuuksia oli odotettavissa. Epätarkkuuksista tulee ilmoittaa Python-ohjelman käyttäjälle, jolloin on tämän vastuulla päättää, kuinka paljon painoarvoa ohjelman laskemille kustannusarvioille valokuituverkkojen suunnitteluvaiheessa annetaan. Ohjelman laskema kalliomaan osuus annetusta verkko-osuudesta on sen sijaan tarkka tieto – se voi itse asiassa jopa olla valokuituhankkeen suunnitteluvaiheessa ohjelman laskemaa kustannusarviota hyödyllisempi tieto. Ohjelman avulla saadaan nopeasti tieto siitä, kuinka suuri osuus annetusta verkkoreitistä on GTK:n maaperädata perusteella kalliomaata, ja vaikka kustannusarvion muodostaminen yksin sen perusteella on vaikeaa, voidaan tietoa käyttää alustavan kuvan saamiseen verkkoreitin maastosta. Jos verkkoreitin kalliomaaprosentti on korkea, esimerkiksi yli 60 %, voidaan varautua siihen, että esimerkiksi auraamismenetelmää ei välttämättä voida käyttää yhtä paljon kuin haluttaisiin. Jos laskettu kalliomaaprosentti on lähempänä nollaa, voidaan melko turvallisin mielin olettaa, että reitillä ei tule olemaan esimerkiksi timanttisahausta vaativia kallioita. Kustannusarvioiden epätarkkuus johtuukin osin siitä, että verkkoreitin kallioisuus ei ole ainoa kustannuksiin vaikuttava tekijä, mutta tiedolla reitin kalliomaaprosentista on silti arvoa.

6 Ratkaisun arviointi

Tässä luvussa arvioidaan luvussa 5 kehitettyä ratkaisuartefaktia ja sitä, mitkä ratkaisulle asetetuista tavoitteista se saavutti. Luku käsittää siis suunnittelututkimuksen viidennen vaiheen, ratkaisun arvioinnin. Ratkaisun arvioinnin apuna käytetään Pries-Hejen et al. [71] kehittämää menetelmää suunnittelututkimuksen arvioimisstrategioiden valitsemiseen. Menetelmää soveltamalla valitaan sopiva arviointimenetelmä ratkaisuartefaktin ja sen testaustulosten arvioimiseen, jonka jälkeen arvioinnin tulokset esitetään.

6.1 Arviointistrategia

Pries-Hejen et al. kehittämässä menetelmässä arviointistrategia valitaan kolmen tekijän perusteella: milloin arviointi tapahtuu, mikä arvioinnin kohteena on, ja kuinka arviointi toteutetaan. Arvioinnin kohde voi Pries-Hejen et al. mukaan olla joko suunnitteluprosessi (engl. design process) tai suunnittelun tulos (engl. design product). Tässä diplomityössä arvioinnin kohteena on kalliomaaprosentin ja kustannusarvion laskemiseen kehitetty Python-ohjelma, eli suunnittelututkimuksen ratkaisuartefakti, joten arvioinnin kohteena on suunnittelun tulos. Sille, milloin arviointi tapahtuu, on niin ikään kaksi vaihtoehtoa – ennen kehitysprosessia (ex ante) tai sen jälkeen (ex post). Artefaktia arvioidaan kehitysprosessin jälkeen, joten kyseessä on ex post -arviointi. Arvioinnin toteuttaminen taas voi tapahtua joko naturalistisesti (engl. naturalistic) tai keinotekoisesti (engl. artificial), jossa naturalistinen arviointi tarkoittaa arvioinnin toteuttamista todellisessa, kompleksisessa ja luonnollisessa ympäristössä, ja keinotekoinen arviointi tarkoittaa arviointia hallitummassa ja yksinkertaisemmassa ympäristössä. Tässä diplomityössä arviointi tapahtuu keinotekoisesti, sillä kehitetty ratkaisuartefakti ei ainakaan vielä ole verkkoyhtiöiden käytössä, vaan sen toimivuutta ja tarkkuutta testattiin aiempaa kustannusdataa hyväksi käyttäen. Vaikka käytetty data onkin todenmukaista siinä mielessä, että se on saatu todellisista toteutuneista verkkohankkeista, on arviointiympäristö keinotekoinen. Lopuksi menetelmässä valitaan arviointiprosessi sekä arviointikriteerit. Tässä työssä arviointi toteutetaan vertaamalla artefaktia ja sen testaustuloksia luvun 4 lopussa asetettuihin ratkaisun tavoitteisiin, jotka toimivat samalla arviointikriteereinä. Kuvassa 25 havainnollistetaan Pries-Hejen et al. menetelmän avulla valittua arviointistrategiaa.



Kuva 25. Valittu arviointistrategia, mukaillen Pries-Heje et al. [71].

Kuvasta 25 havainnollistetaan, että diplomityössä arvioidaan suunnittelun tulosta ja valittu arviointistrategia on ex post-arviointi, joka tapahtuu keinotekoisessa ympäristössä. Arviointiprosessina (kuvassa P) toimii vertailu ratkaisulle asetettuihin tavoitteisiin, ja arviointikriteereinä (kuvassa K) toimivat varsinaiset tavoitteet. Seuraavassa aliluvussa siirrytään itse arviointiin.

6.2 Vertailu ratkaisun tavoitteisiin

Tässä aliluvussa arvioidaan ratkaisua vertailemalla työn ratkaisuartefaktia eli kehitettyä Python-ohjelmaa sekä sillä saatuja tuloksia luvussa 4 asetettuihin ratkaisun tavoitteisiin. Taulukossa 5 esitetään kukin tavoitteista ja perustellaan saavutettiinko ne vai jäivätkö ne saavuttamatta, nojaten kehitettyyn Python-ohjelmaan ja sillä saatuihin tuloksiin.

Taulukko 5. Ratkaisun tavoitteet ja niiden saavuttaminen.

ID	Kuvaus	Saavutettiin	Perusteet
T-1	Manuaalisen työn vähentäminen maanrakennuskustannusten arvioinnissa	Osittain	Kehitetty Python-ohjelma laskee kalliomaaprosentin ja siihen perustuvan kustannusarvion, vähentäen manuaalisen työn määrää. Ohjelman laskema maaperädataan perustuvan kalliomaaprosentti on tarkka, mutta kustannusarvion tarkkuus vaihtelee huomattavasti.
T-2	Maanrakennuskustannusten arvioinnin nopeuttaminen	Osittain	Python-ohjelman suoritusaika testauksen aikana pysyi alle minuutissa, joka on huomattavasti nopeampaa kuin manuaalinen kustannuslaskenta. Tulokset ovat kuitenkin luotettavia ainoastaan kalliomaaprosentin osalta.
T-3	Aiempien hankkeiden toteutuneiden kustannusten hyödyntäminen uusien hankkeiden kustannusarvioiden tekemisessä	Osittain	Kehitetty ohjelma käyttää hyväkseen aiempien hankkeiden toteutuneita kustannuksia ja muodostaa niiden perusteella kustannusarvion annetulle verkko-osuudelle. Arvion tarkkuus kuitenkin vaihtelee.
T-4	Verkkoreitin maaston kartoittamisen yksinkertaistaminen	Kyllä	Kehitetty ohjelma laskee nopeasti kuinka monta prosenttia tai metriä annetusta verkko-osuudesta kulkee kalliomaan yli GTK:n maaperädatan mukaan.
T-5	Maastotyyppien huomioon ottaminen entistä paremmin maanrakennuskustannusten arvioinnissa	Kyllä	Kehitetty ohjelma laskee GTK:n maaperädataan perustuvan tarkan arvion annetun verkko-osuuden kalliomaaprosentista, ja tekee kustannusarvion tämän tiedon perusteella. Kalliomaaprosenttia voidaan myös käyttää sellaisenaan ohjaamaan kustannusarviointia.

Kuten taulukosta nähdään, jokainen ratkaisulle asetetuista tavoitteista saavutettiin ainakin joiltain osin. Ohjelman tekemien kustannusarvioiden epätarkkuus johti siihen, että tavoitteet T-1, T-2 ja T-3 saavutettiin ainoastaan osittain – ohjelma käyttää hyväkseen aiempien hankkeiden kustannustietoja kustannusarvioiden muodostamiseksi ja sitä käyttämällä manuaalinen työ kustannusarvioinnissa vähenee ja kustannusarviointiprosessi nopeutuu, mutta

saatujen kustannusarvioiden tarkkuus vaihtelee. Kalliomaaprosentin osalta ohjelman tekemät arviot ovat kuitenkin tarkkoja, joka on jo itsessään hyödyllistä, eli tavoitteet T-1 ja T-2 saavutettiin tältä osin. Tavoite T-3 saavutettiin myös osittain siksi, että ohjelma käyttää kyllä aiempien valokuituhankkeiden kustannustietoja hyväksi kustannusarvioinnissa, mutta arviointi pelkästään kalliomaaprosentin perusteella on haastavaa ja tehdyt arviot melko epätarkkoja.

Koska kehitetty ohjelma kykenee laskemaan sille annetun verkkoreitin kalliomaaprosentin nopeasti ja tarkasti, tavoitteet T-4 ja T-5 saavutettiin täysin. Ohjelmaa käyttämällä saadaan nopeasti alustava kuva verkkoreitin maaston kallioisuudesta. Jos ohjelman laskema kalliomaaprosentti on korkea, voidaan jo suunnitteluvaiheesta lähtien varautua siihen, että maasto tulee paikoin olemaan haastavaa maanrakentamiselle, kun taas lasketun kalliomaaprosentin ollessa matala voidaan olettaa että ainakaan timanttiporausta tai kallion leikkausta ei kyseisellä verkkoreitillä todennäköisesti jouduta käyttämään. Kehitetyn ohjelman käyttö helpottaa näin ollen maaston kartoittamista ja maastotyyppien huomioon ottamista maanrakennuskustannusten arvioinnissa.

7 Keskustelu

Tässä luvussa keskustellaan diplomityön tuloksista. Tulokset esitellään, ja niiden perustella muodostetaan vastaus työn päätutkimuskysymykseen. Lisäksi luvussa tunnistetaan työn rajoitteet sekä esitetään mahdollisuuksia jatkotutkimukselle työn tulosten pohjalta.

7.1 Tulokset

Tämän diplomityön tavoitteena oli etsiä keinoja, joilla valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arviointia voitaisiin parantaa. Tutkimusta tehtiin yhteistyössä valokuituverkkoyhtiö Saimaan Kuitu Oy:n kanssa, ja se toteutettiin ongelmalähtöisenä suunnittelututkimuksena. Ongelmalähtöisyys tarkoittaa sitä, että ensin perehdyttiin valokuituverkkojen maanrakentamiseen yleisesti, jotta voitiin paremmin ymmärtää, mitkä tekijät maanrakennuskustannuksiin vaikuttavat ja mikä tekee niiden arvioinnista haastavaa. Tämän jälkeen tutustuttiin aiempaan tutkimukseen valokuituverkkojen maanrakentamisen ympärillä, sekä valokuituyhtiöissä käytössä oleviin kustannusarviointiprosesseihin.

Tehdyn kirjallisuuskatsauksen pääasiallinen tulos oli se, että nimenomaan maanrakennuskustannusten arviointiin liittyen ei ole juurikaan tehty aiempaa tutkimusta, vaan aiemmat tutkimukset keskittyvät valokuituverkkojen kustannusarviointiin varsinaisten verkkoreittien ja -topologioiden suunnittelun kautta, esimerkiksi pyrkimällä minimoimaan verkkoreitin kokonaispituutta. Kokonaispituuden minimoiminen ei kuitenkaan tarkoita kokonaiskustannusten minimointia, sillä valtaosa verkonrakentamisen kustannuksista muodostuu nimenomaan maanrakennuksesta, joiden arviointi on haastavaa. Voitiin siis todeta tutkimusaukon löytyneen. Kirjallisuuskatsauksen ja valokuituyhtiöiden kustannusarviointiprosesseihin tutustumisen pohjalta voitiin asettaa tavoitteet suunnittelututkimuksen ratkaisuartefaktille, ja siirtyä sen kehittämiseen. Asetetut tavoitteet olivat manuaalisen työn vähentäminen maanrakennuskustannusten arvioinnissa, prosessin nopeuttaminen, aiempien hankkeiden kustannustietojen hyödyntäminen, verkkoreitin maaston kartoittamisen yksinkertaistaminen ja maastotyyppien parempi huomioon ottaminen.

Työssä kehitettäväksi ratkaisuartefaktiksi valittiin Python-ohjelma, joka pyrkii vastaamaan haasteisiin maanrakennuskustannusten arvioinnissa helpottamalla suunnitellun verkkoreitin maaston kallioisuuden kartoittamista ja käyttämällä aiempien hankkeiden kustannustietoja hyväksi maanrakennuskustannusten arvioinnissa. Erityisesti kallioinen maasto voi nostaa maanrakennuskustannuksia huomattavasti, joten Python-ohjelma laskee sille annetulle verkkoreitille GTK:n avoimen maaperädatan avulla kalliomaaprosentin, jonka perusteella se muodostaa reitille kustannusarvion, työssä kehitettyä kustannusarviointiyhtälöä käyttäen.

Kehitetty ratkaisuartefakti saavutti kaikki sille asetetuista viidestä tavoitteesta; kaksi täysin (T-4 & T-5) ja kolme osittain (T-1 … T-3). Kun kehitetyn Python-ohjelman tekemien kustannusarvioiden tarkkuutta testattiin aiempaa kustannusdataa vasten, todettiin arvioiden tarkkuuden vaihtelevan paljonkin, arvioiden keskivirhe suhteessa toteutuneisiin kustannuksiin oli noin 36 %. Koska kehitetyn ohjelman oltiin testattu laskevan reittien kalliomaaprosentit oikein, ei ollut syytä olettaa ohjelmointivirheen olleen syynä matalalle tarkkuudelle kustannusarvioissa, vaan vaikuttaisi siltä, että maanrakennuskustannusten arviointi yksin GTK:n maaperädatan avulla lasketun kalliomaaprosentin perusteella on haastavaa. Tämä johtuu todennäköisesti useista tekijöistä, joihin kuuluvat mm. tarkan syvyystiedon puuttuminen kalliomaadatasta, joka vaikeuttaa kustannusarvioiden tekemistä kalliomaaprosentin pohjalta, sekä se, että vaikka kallioisella maaperällä on merkittävä vaikutus maanrakennuskustannuksiin, se ei ole ainoa niihin vaikuttava tekijä. Maanrakennuskustannuksia voi nostaa myös esimerkiksi maassa jo oleva infrastruktuuri. Ohjelman reiteille laskemat kalliomaaprosentit ovat kuitenkin tarkkoja ja ohjelma laskee ne nopeasti. Suunnitellun reitin kalliomaaprosentti voi jo itsessään olla arvokas tieto maanrakennuskustannuksia arvioidessa, sillä se auttaa hahmottamaan reitin maastoa ja sitä kautta reitillä tarvittavia maanrakennusmenetelmiä.

Ratkaisuartefaktin arvioinnin perusteella voidaan todeta että diplomityö onnistui antamaan vastauksen päätutkimuskysymykseen siitä, miten valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arviointia voitaisiin parantaa ja osaltaan täyttämään löydettyä tutkimusaukkoa. Maaperädatan avulla verkkoreitin kalliomaaprosentin laskevaa ohjelmaa voidaan käyttää reittien maaston kartoittamisen nopeuttamiseen ja manuaalisen työn vähentämiseen, mutta tarkkojen kustannusarvioiden teko pelkän reiteille lasketun kalliomaaprosentin perusteella vaikuttaisi olevan vaikeaa. Kalliomaaprosentti on merkittävä tekijä maanrakennuskustannuksissa, mutta kustannukset muodostuvat monien asioiden summana.

7.2 Rajoitteet ja yleistettävyys

Vaikka tämä diplomityö tuotti vastauksen päätutkimuskysymykseen valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arvioinnin parantamisesta, on työllä myös selkeitä rajoitteita. Työn puitteissa voitiin rajallisten resurssien takia lähestyä kustannusarvioinnin parantamista ainoastaan yhdellä lähestymistavalla, joka tarkoittaa sitä että työn tulos on vain yksi monista mahdollisista tavoista parantaa maanrakennuskustannusten arviointia.

Rajoitteita löytyy myös työn ratkaisuartefaktin kehityksestä. Kehitysprosessissa jouduttiin aikarajoitteiden takia käyttämään melko suppeita määriä kustannusdataa, sekä ohjelman kehitys- että testausvaiheissa. Mikäli kustannusdataa oltaisiin voitu käyttää enemmän etenkin kehitysvaiheessa, saatettaisiin kehitetyllä ohjelmalla pystyä tekemään tarkempia kustannusarvioita. Lisäksi tapa, jolla ohjelma laskee verkkoreitin kustannusarvion, on hyvin yksinkertainen, ja on täysin mahdollista, että kalliomaaprosentin perusteella tehtyjen kustannusarvioiden tarkkuutta voitaisiin parantaa kehittämällä edistyneempi tapa kustannusarvion laskemiseen.

Vaikka diplomityö tehtiin yhteistyössä Saimaan Kuidun kanssa ja käsitelty data on Etelä-Karjalan alueelta, ovat työn tulokset yleistettävissä ja kehitetty artefakti käytettävissä kaupunkien ulkopuolella tapahtuvaan valokuiturakentamiseen muuallakin Suomessa, maaperädatan kattavuus huomioon ottaen. Maanrakennuskustannukset muodostavat sijainnista riippumatta lähes aina suurimman osan valokuituhankkeiden kokonaiskustannuksista, joten työn tulokset pätevät valtaosalle valokuituhankkeista. Sen sijaan kaupungeissa tapahtuvan valokuiturakentamisen hinta koostuu laajoilta osin teiden alituksista ja muista kaupunkiympäristölle ominaisista tekijöistä, joihin maaperällä ei ole suurta vaikutusta.

7.3 Jatkotutkimus

Peffers et al. [16] suosittelevat suunnittelututkimusprosessin iteroimista mahdollisuuksien mukaan siten, että iteraatioissa parannettaisiin kehitettyä artefaktia tai lähestyttäisiin tarkasteltavaa ongelmaa eri tavoin. Tämän diplomityön puitteissa iteraatiota ei aikarajoitteiden takia ollut mahdollista tehdä, mutta työn tuloksista on kuitenkin tunnistettavissa selkeitä iteraatiomahdollisuuksia ja kohteita jatkotutkimukselle. Työssä kehitetty Python-ohjelma arvioi maanrakennuskustannuksia ainoastaan kalliomaadatan perusteella – jatkotutkimuksessa

voitaisiin laajentaa tarkastelua myös muihin GTK:n tai muiden tahojen maaperädatasta saatavilla oleviin maalajeihin ja tutkia niiden vaikutusta maanrakennuskustannuksiin. Lisäksi voitaisiin tutkia edistyneemmän kustannusarviointiyhtälön tai -algoritmin kehittämistä kustannusarvioiden tarkkuuden parantamiseksi, esimerkiksi koneoppimisen keinoin.

Kustannusarviointia voitaisiin myös lähestyä täysin eri tavalla – ratkaisuartefaktin kehitysprosessin alussa ideoitiin mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja, joilla maanrakennuskustannusten arviointia voitaisiin parantaa, ja niistä etenkin satelliittidatan hyödyntäminen vaikuttaisi mielenkiintoiselta aiheelta jatkotutkimukselle. Jatkotutkimuksessa voitaisiin selvittää, onko satelliittidatan avulla mahdollista selvittää maalajien lisäksi myös niiden syvyys, joka olisi etenkin kalliomaan kohdalla erittäin arvokas tieto maanrakennuskustannusten arviointia tehdessä. Jos pystyttäisiin kehittämään GTK:n Maaperä-aineistoja vastaavaa aineisto, josta selviää myös syvyys, jolla kukin maalaji sijaitsee, voitaisiin maanrakennuskustannusten arviointia tarkentaa huomattavasti, sillä etenkin kallion syvyys vaikuttaa oleellisesti maanrakennuksen haastavuuteen, ja sitä kautta maanrakennuskustannuksiin.

8 Johtopäätökset

Valokuituverkkojen rakentamisessa maanrakennus muodostaa merkittävän osan hankkeiden kokonaiskustannuksista. Maanrakennuskustannuksille on lisäksi ominaista alttius huomattavalle vaihtelulle riippuen siitä, mitä maanrakennusmenetelmiä rakentamisessa voidaan käyttää, ja kuinka paljon. Samanaikaisesti valokuituhankkeille on tärkeää pystyä arvioimaan kustannuksia etukäteen, muun muassa siksi että Suomessa valokuiturakentaminen rahoitetaan valtaosin eri tahoilta saatavilla tuilla, joita haetaan hankkeille etukäteen, niille tehtyjen kustannusarvioiden pohjalta. Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, miten valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arviointia voitaisiin parantaa tai tehdä helpommaksi, ja se tehtiin yhteistyössä valokuituyhtiö Saimaan Kuitu Oy:n kanssa.

Maanrakennuskustannusten arvioinnin parantamista tutkittiin suunnittelututkimuksen keinoin, ongelmalähtöisellä lähestymistavalla. Ensin tutustuttiin työn ongelmakehykseen, eli kustannusarvioinnin tärkeyteen valokuituverkkojen arvioinnissa, valokuituhankkeiden maanrakennuskustannusten muodostumiseen ja niihin vaikuttaviin tekijöihin, sekä siihen, miksi maanrakennuskustannusten arviointi on usein vaikeaa. Lisäksi selvitettiin, onko aiheen ympärillä tehty aiempaa tutkimusta, ja tutustuttiin kahdessa valokuituyhtiössä käytettäviin kustannusarviointiprosesseihin. Aihealueeseen tutustumisen pohjalta tunnistettiin verkkoreitin maaperällä olevan merkittävä vaikutus verkkohankkeen maanrakennus- ja sitä kautta kokonaiskustannuksiin. Tämän jälkeen ideoitiin ratkaisuvaihtoehtoja maanrakennuskustannusten arvioinnin parantamiseksi, joista yksi jatkokehitettiin suunnittelututkimuksen ratkaisuartefaktiksi.

Työssä kehitetty ratkaisuartefakti on Python-ohjelma, joka käyttää Geologian Tutkimuskeskuksen tarjoamaa vektorimuotoista dataa Suomen maaperästä ja kunkin alueen maalajeista laskeakseen annetulle verkkoreitille kalliomaaprosentin, ja sitten kalliomaaprosentin avulla kustannusarvion. Saimaan Kuitu Oy:n aikaisempien verkkohankkeiden kustannustietojen perusteella todettiin verkkoreitin kalliomaaprosentin ja keskimääräisen metrihinnan välillä olevan korrelaatiota, joten työssä tutkittiin voisiko kalliomaaprosentin perusteella muodostaa suuntaa antavia kustannusarvioita uusille verkkoreiteille.

Ohjelman testaustulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että kalliomaaprosentti yksinään ei ole riittävä tieto kustannusarvion tekemiseksi verkkoreiteille. Ohjelmaa testatessa keskimääräinen virhe kustannusarvioissa oli noin 36 %, maksimivirheen ollessa 80 % tienoilla. Virheiden suuruudelle on monia mahdollisia syitä, mutta ne johtunevat ainakin osin siitä, että käytetty maaperädata ei kerro tarkalleen, millä syvyydellä kallio kussakin kohtaa on. Joka tapauksessa kehitetty ohjelma kertoo nopeasti ja tarkasti sille annetun verkkoreitin kalliomaaprosentin ja -metrit maaperädatan perusteella, ja jo tämä tieto voi olla hyödyllistä verkkoreittejä suunniteltaessa ja kustannusarvioita tehdessä.

Työn tulos on, että maaperädataa, tarkemmin verkkoreitin kalliomaaprosenttia, voidaan käyttää parantamaan valokuituverkkojen maanrakennuskustannusten arviointiprosessia, mutta varsinaisten kustannusarvioiden muodostaminen pelkän kalliomaaprosentin perusteella vaikuttaisi olevan haastavaa. Kalliomaaprosentin laskennan toteutus oli kuitenkin melko yksinkertaista, ja kalliomaaprosentti itsessään voi olla hyödyllinen tieto maanrakennuskustannusten arvioinnissa, sillä se auttaa hahmottamaan verkkoreitillä vallitsevaa maastoa.

Prosessi jatkuu diplomityön ulkopuolelle jäävillä vaiheilla: kehitetty Python-ohjelma tulee ensin saattaa helposti jaettavaan muotoon, jonka jälkeen ohjelman toimintaa ja käyttöä sekä diplomityön tuloksia tullaan esittelemään Suomen Seutuverkkojen jäsenille. Tämän jälkeen ohjelma voidaan viedä Saimaan Kuidun sekä muiden verkkoyhtiöiden käyttöön.

Lähteet

[1] T. Widmaier *ym.*, ”Digital design and manufacturing process comparison for new custom made product family – a case study of a bathroom faucet”, *Estonian Journal of Engineering*, vsk. 19, nro 1, ss. 76–89, 2013, doi: 10.3176/eng.2013.1.07.

[2] H. Kortelainen, A. Happonen, ja J. Hanski, ”From Asset Provider to Knowledge Company—Transformation in the Digital Era”, teoksessa *Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies*, J. Mathew, C. W. Lim, L. Ma, D. Sands, M. E. Cholette, ja P. Borghesani, Toim., Cham: Springer International Publishing, 2019, ss. 333–341.

[3] L. Metso, A. Happonen, V. Ojanen, M. Rissanen, ja T. Kärri, ”Business model design elements for electric car service based on digital data enabled sharing platform”, esitetty tilaisuudessa Cambridge International Manufacturing Symposium, Cambridge, Iso-Britannia: Centre for International Manufacturing, Institute for Manufacturing, University of Cambridge, syys 2019, s. 6. doi: 10.17863/CAM.45886.

[4] A. Happonen, L. Manninen, M. Hirvimäki, ja A. Nolte, ”Expectations for young job applicants’ digital identity related to company’s social media brand development strategies”, *Small Enterprise Research*, vsk. 10, nro 2, ss. 170–180, 2021, doi: 10.1080/13215906.2021.2000482.

[5] K. Salemink, D. Strijker, ja G. Bosworth, ”Rural development in the digital age: A systematic literature review on unequal ICT availability, adoption, and use in rural areas”, *Journal of Rural Studies*, vsk. 54, ss. 360–371, elo 2017, doi: 10.1016/j.jrurstud.2015.09.001.

[6] J. Antikainen *ym.*, ”Smart Countryside : Maaseudun palveluiden kehittäminen ja monipuolistaminen digitalisaatiota ja kokeiluja hyödyntämällä”. Viitattu: 14. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/80892

[7] ”Enhanced broadband access as a solution to the social and economic problems of the rural digital divide - Leanne Townsend, Arjuna Sathiaseelan, Gorry Fairhurst, Claire Wallace, 2013”. Viitattu: 14. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://journals-sagepub-com.ezproxy.cc.lut.fi/doi/full/10.1177/0269094213496974

[8] *KOMISSION TIEDONANTO EUROOPAN PARLAMENTILLE, NEUVOSTOLLE, EUROOPAN TALOUS- JA SOSIAALIKOMITEALLE JA ALUEIDEN KOMITEALLE 2030 digitaalinen kompassi: eurooppalainen lähestymistapa digitaalista vuosikymmentä varten*. 2021. Viitattu: 14. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX:52021DC0118

[9] S. Wirén, K. Vuorela, T. Müller, ja K. Laitinen, ”Suomi tietoliikenneverkkojen kärkimaaksi : – Digitaalisen infrastruktuurin strategia 2025”. Viitattu: 14. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161066

[10] E. P. Oy, ”FINLEX ® - Ajantasainen lainsäädäntö: Laki kiinteän laajakaistan rakentamisen tuesta 1262/2020”. Viitattu: 15. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2020/20201262

[11] ”Laajakaistahankkeet”, Ruokavirasto. Viitattu: 15. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.ruokavirasto.fi/tuet/maaseudun-palvelut-ja-elinkeinojen-kehittaminen/investoinnit/laajakaistahankkeet/

[12] ”Rakentaminen – Saimaan kuitu”. Viitattu: 11. lokakuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://saimaankuitu.fi/rakentaminen/

[13] J. Käyhty, ”Haastattelu: Saimaan Kuitu Oy”, 11. lokakuuta 2023.
[14] A. R. Hevner, S. T. March, J. Park, ja S. Ram, ”DESIGN SCIENCE IN INFORMATION SYSTEMS RESEARCH.”, *MIS Quarterly*, vsk. 28, nro 1, ss. 75–105, maalis 2004, doi: 10.2307/25148625.
[15] P. Johannesson ja E. Perjons, *An Introduction to Design Science*. Cham: Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-78132-3.
[16] K. Peffers *ym.*, ”Design Science Research Process: A Model for Producing and Presenting Information Systems Research”, *arXiv.org*, kesä 2020, Viitattu: 31. lokakuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.proquest.com/docview/2409768829
[17] ”Suomen Seutuverkot ry – Aktiivinen jäsenistö on yhdistyksen voimavara.” Viitattu: 3. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://seutuverkot.fi/
[18] J. Pennanen, ”Kompleksisuudesta käytettävyyteen : erikoisohjelmistojen kehitys”, *Converting complexity to usability : developing specialized software*, 2022, Viitattu: 1. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/handle/10024/164115
[19] J. C. Carver, R. P. Kendall, S. E. Squires, ja D. E. Post, ”Software Development Environments for Scientific and Engineering Software: A Series of Case Studies”, teoksessa *29th International Conference on Software Engineering (ICSE'07)*, touko 2007, ss. 550–559. doi: 10.1109/ICSE.2007.77.
[20] N. Helander, ”Passiiviset kuituverkkoratkaisut”, Turun ammattikorkeakoulu, 2011. Viitattu: 17. lokakuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: http://www.theseus.fi/handle/10024/28117
[21] P. W. Shumate, ”Fiber-to-the-Home: 1977–2007”, *Journal of Lightwave Technology*, vsk. 26, nro 9, ss. 1093–1103, touko 2008, doi: 10.1109/JLT.2008.923601.
[22] L. Wosinska, J. Chen, ja C. Larsen, ”Fiber Access Networks: Reliability Analysis and Swedish Broadband Market”, *IEICE Transactions*, vsk. 92-B, ss. 3006–3014, loka 2009, doi: 10.1587/transcom.E92.B.3006.
[23] ”XGS-PON Standard & Tools to Measure XGS PON Wavelengths”. Viitattu: 7. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.viavisolutions.com/en-us/what-xgs-pon
[24] J. Käyhty, ”Toinen haastattelu: Saimaan Kuitu Oy”, 7. marraskuuta 2023.
[25] ”Kuituverkon rakentamismenetelmät”. Viitattu: 27. lokakuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/77925
[26] J. Rantamo, ”Haastattelu: Tähtikuitu Oy”, 15. marraskuuta 2023.
[27] ”Saimaan Kuidun valoliittymän tietopaketti ja asennusohjeet”. 2020. Viitattu: 21. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://saimaankuitu.fi/wp-content/uploads/2022/04/SaimaanKuitu_asennusohje_2020_aukema_netti.pdf
[28] ”Microtrenching and Street Works: An advice note for Local Authorities and Communications Providers”, GOV.UK. Viitattu: 25. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.gov.uk/government/publications/microtrenching-and-street-works-an-advice-note-for-local-authorities-and-communications-providers
[29] H. Vaseli, L. Hashemian, A. Bayat, L. Gay, I. Williams, ja J. Melzer, ”Evaluation of fiber optic installation methods, a case study on micro-trenching in Alberta, Canada”, *FACETS*, vsk. 2, ss. 642–659, tammi 2017, doi: 10.1139/facets-2016-0043.
[30] W. Griffioen, A. Wingerden, C. Hul, M. Hul, ja M. Keijzer, *Microduct Cabling: Fiber to the Home*. 2003. doi: 10.13140/2.1.4047.2325.
[31] J. Käyhty, ”Kolmas haastattelu: Saimaan Kuitu Oy”, 31. tammikuuta 2024.
[32] ”Haastattelu: Armatus Oy”, 15. marraskuuta 2023.

[33] ”Nettiyhteys pikavauhtia ja katuja repimättä – Vaihtoehtoinen asennustapa nopeuttaisi töitä, mutta kestääkö lähelle maanpintaa jäävä valokuitu talvea?”, Yle Uutiset. Viitattu: 30. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://yle.fi/a/3-10402500
[34] ”Mikro-ojitus on houkutteleva ratkaisu taajamien kuitukaapelointeihin”, Nestor Cables. Viitattu: 30. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.nestor-cables.fi/ajankohtaista/blogi/mikro-ojitus-on-houkutteleva-ratkaisu-taajamien-kuitukaapelointeihin.html?p1494=8
[35] S. K. Biswas ja A. Podder, ”Path Minimization Planning and Cost Estimation of Passive Optical Network Using Algorithm for Sub-optimal Deployment of Optical Fiber Cable”, teoksessa *Computational Advancement in Communication, Circuits and Systems*, M. Mitra, M. Nasipuri, ja M. R. Kanjilal, Toim., teoksessa Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer, 2022, ss. 63–75. doi: 10.1007/978-981-16-4035-3_7.
[36] A. Agata ja K. Nishimura, ”Suboptimal PON network designing algorithm for minimizing deployment cost of optical fiber cables”, teoksessa *2012 16th International Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM)*, huhti 2012, ss. 1–6. doi: 10.1109/ONDM.2012.6210195.
[37] M. R. Garey, R. L. Graham, ja D. S. Johnson, ”The Complexity of Computing Steiner Minimal Trees”, *SIAM journal on applied mathematics*, vsk. 32, nro 4, ss. 835–859, 1977.
[38] K. Casier, S. Verbrugge, R. Meersman, D. Colle, M. Pickavet, ja P. Demeester, *A clear and balanced view on FTTH deployment costs*. 2008, s. 112.
[39] V. Slätis, ”Kustannustehokkaan FTTH-verkon rakentaminen haja-asutusalueilla : Case Espoon kaupunki”. Viitattu: 22. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: http://www.theseus.fi/handle/10024/70391
[40] N. Ahlstedt, ”Optisen liityntäverkon rakennusvaiheet FTTB-ratkaisussa”. Viitattu: 22. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: http://www.theseus.fi/handle/10024/2974
[41] ”KeyCom”. Viitattu: 24. lokakuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.keypro.fi/keycom
[42] ”Explore Street View and add your own 360 images to Google Maps.”, Google Maps Street View. Viitattu: 5. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.google.com/streetview/
[43] J. Rantamo, ”Toinen haastattelu: Tähtikuitu Oy”, 1. joulukuuta 2023.
[44] R. L. Baskerville ja M. D. Myers, ”Design ethnography in information systems”, *Information Systems Journal*, vsk. 25, nro 1, ss. 23–46, 2015, doi: 10.1111/isj.12055.
[45] ”Valokuitu | Facebook”. Viitattu: 14. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.facebook.com/groups/Valokuitu
[46] ”TechBBS”, TechBBS. Viitattu: 14. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://bbs.io-tech.fi/
[47] ”Copernicus Programme”. Viitattu: 28. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://sentiwiki.copernicus.eu/web/copernicus-programme
[48] ”Landsat Science”. Viitattu: 28. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://landsat.gsfc.nasa.gov/
[49] ”Kaukokartoituksen muutostulkintamenetelmät | Maanmittauslaitos”. Viitattu: 28. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/kaukokartoituksen-muutostulkintamenetelmat
[50] A. Valero-Jorge, R. González-De Zayas, F. Matos-Pupo, A. L. Becerra-González, ja F. Álvarez-Taboada, ”Mapping and Monitoring of the Invasive Species Dichrostachys

cinerea (Marabú) in Central Cuba Using Landsat Imagery and Machine Learning (1994–2022)", *Remote Sensing*, vsk. 16, nro 5, Art. nro 5, tammi 2024, doi: 10.3390/rs16050798.

[51] H. Zhang, H. A. Loaiciga, ja T. Sauter, "A Novel Fusion-Based Methodology for Drought Forecasting", *Remote Sensing*, vsk. 16, nro 5, Art. nro 5, tammi 2024, doi: 10.3390/rs16050828.

[52] J. Rogan ja D. Chen, "Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change", *Progress in Planning*, vsk. 61, nro 4, ss. 301–325, touko 2004, doi: 10.1016/S0305-9006(03)00066-7.

[53] "Microsoft Planetary Computer". Viitattu: 25. lokakuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://planetarycomputer.microsoft.com/catalog

[54] "Google Earth Engine". Viitattu: 28. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://earthengine.google.com

[55] "Työnohjaus", Geometrix. Viitattu: 26. lokakuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.geometrix.fi/ratkaisumme_3/tyonohjaus/

[56] "Geologian tutkimuskeskus GTK - Ratkaisuja vauhdittamaan siirtymää kestävään, hiilineutraaliin maailmaan | —", GTK. Viitattu: 6. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.gtk.fi/

[57] "Maaperä 1:20 000/1:50 000/Superficial deposits 1:20 000/1:50 000". Viitattu: 6. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/paikkatieto/meta/maapera_20_50k.html

[58] "Maaperä 1:200 000 (maalajit)/Superficial deposits of Finland 1:200 000 (sediment polygons)". Viitattu: 6. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/paikkatieto/meta/maapera_200k.html

[59] "Maaperä 1:100 000/Superficial deposits 1:100 000". Viitattu: 6. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/paikkatieto/meta/maapera_100k.html

[60] K. T. GmbH (https://www.klokantech.com/), "ETRS89 / TM35FIN(E,N) - Finland - EPSG:3067". Viitattu: 19. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://epsg.io

[61] "KML Tutorial | Keyhole Markup Language", Google for Developers. Viitattu: 16. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://developers.google.com/kml/documentation/kml_tut

[62] "Autodesk empowers innovators everywhere to make the new possible". Viitattu: 17. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.autodesk.fi

[63] "ESRI Shapefile Technical Description", kesä 1998, Viitattu: 16. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.esri.com/content/dam/esrisites/sitecore-archive/Files/Pdfs/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf

[64] "About ArcGIS | Mapping & Analytics Software and Services". Viitattu: 17. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview

[65] "Tervetuloa QGIS-ohjelmiston pariin!" Viitattu: 16. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://qgis.org/fi/site/

[66] "Geographic Information Systems Stack Exchange", Geographic Information Systems Stack Exchange. Viitattu: 19. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://gis.stackexchange.com/

[67] "shapely: Manipulation and analysis of geometric objects". [Verkossa]. Saatavissa: https://pypi.org/project/shapely/

[68] "GeoPandas 0.dev+untagged — GeoPandas 0+untagged.50.g5558c35.dirty documentation". Viitattu: 20. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://geopandas.org/en/stable/

[69] ”fiona: Fiona reads and writes spatial data files”, PyPi. Viitattu: 20. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://pypi.org/project/fiona/

[70] ”Suomen maakunnat 2021 vuoden 2018 maakuntakoodeilla - ESRI Shapefile - Avoindata.fi”. Viitattu: 16. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.avoindata.fi/data/fi/dataset/suomen-maakunnat-2021-vuoden-2018-maakuntakoodeilla/resource/3c2a8036-e774-458a-810a-2c1fc0f80d5f

[71] J. Pries-Heje, R. Baskerville, ja J. R. Venable, ”Strategies for Design Science Research Evaluation”, teoksessa *ECIS 2008 Proceedings*, 2008. Viitattu: 8. toukokuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: http://aisel.aisnet.org/ecis2008/87

Liite 1. Excel-taulukko, johon työssä tarkasteltujen verkko-osuuksien kalliomaametrit, kalliomaaprosentti, sekä keskimääräinen metrihinta kerättiin

Osuuden pituus (m)	Kalliomaa (m)	kalliomaa-%	metrihinta (€/m)
504	504	100	9,45
590	520	88,14	8,54
1882	1270	67,48	18,16
1033	650	62,92	4,52
897	541	60,31	9,18
2014	1205	59,83	9,32
665	338	50,83	4,89
1161	505	43,50	3,49
928	390	42,03	5,25
1938	713	36,79	9,65
1164	413	35,48	9,65
1669	527,1	31,58	6,59
3113	801	25,73	2,76
2142	518	24,18	2,73
1210	277	22,89	4,76
1050	226	21,52	3,89
1828	389,2	21,29	3,73
1202	220	18,30	9,33
1324	220	16,62	2,91
763	123	16,12	4,38
791	123	15,55	4,35
1833	285	15,55	3,05
1392	150	10,78	4,5
1492	152	10,19	3,79
1025	96	9,37	2,75
1029	87	8,45	4,06
1760	139	7,90	9,52
805	39	4,84	3,97
443	0	0	4,29
1069	0	0	2,27
1075	0	0	2,2
1192	0	0	2,96
565	0	0	2,9
805	0	0	2,78
803	0	0	1,98
1663	0	0	4,66

1738	0	0	3,39
1057	0	0	2,74
729	0	0	2,53
2317	0	0	2,51
3253	0	0	1,99
956	0	0	4,34
658	0	0	3,5
990	0	0	7,88
4074	0	0	4,12
1621	0	0	3,26
1432	0	0	3,25
1513	0	0	4,55

Liite 2. Excel-taulukko, jota käytettiin hintakertoimien optimoinnissa. Yli 25 % virheet ovat merkattu keltaisella, ja yli 50 % virheet punaisella.

			m_k	m_e	keskim. virhe-%
			9,180063806	3,179667364	**20,27**

pituus (m)	kalliomaaprosentti (0...1)	toteutunut hinta	kustannusarvio	virhe	virhe %
1192	0,0000	3 522,97 €	3 790,2 €	267,19 €	7,58
1738	0,0000	5 899,63 €	5 526,3 €	-373,37 €	6,33
1621,02	0,0000	5 287,20 €	5 154,3 €	-132,90 €	2,51
4074,45	0,0000	16 188,80 €	12 955,4 €	-3 233,40 €	19,97
1663,81	0,0000	7 754,50 €	5 290,4 €	-2 464,14 €	31,78
805,48	0,0000	2 237,45 €	2 561,2 €	323,71 €	14,47
956,39	0,0000	4 150,00 €	3 041,0 €	-1 109,00 €	26,72
443,18	0,0000	1 899,22 €	1 409,2 €	-490,06 €	25,80
805,19	0,0503	3191,86	2 560,2 €	-631,62 €	19,79
3113,39	0,0580	9 135,30 €	9 899,5 €	764,24 €	8,37
1029,36	0,0846	4 180,53 €	3 273,0 €	-907,51 €	21,71
1025	0,0980	2 818,22 €	3 259,2 €	440,94 €	15,65
791,83	0,1096	3 443,26 €	3 038,5 €	-404,76 €	11,76
1492,42	0,1103	5 655,89 €	5 733,1 €	77,26 €	1,37
1392,65	0,1223	6 261,55 €	5 450,2 €	-811,39 €	12,96
763,52	0,1505	3 341 €	3 117,2 €	-223,76 €	6,70
1833,33	0,1543	5 584,86 €	7 526,8 €	1 941,93 €	34,77
1828	0,1825	6 820,74 €	7 814,2 €	993,48 €	14,57
1050,17	0,2047	4 088,60 €	4 629,1 €	540,50 €	13,22
2142,04	0,2443	5 843,67 €	9 951,0 €	4 107,31 €	70,29
1669,03	0,3355	11 000,10 €	8 666,9 €	-2 333,16 €	21,21
1210	0,3400	5 765,60 €	6 316,0 €	550,36 €	9,55
1164,59	0,3670	11 231,84 €	6 267,6 €	-4 964,23 €	44,20
1938,07	0,3761	18 709,98 €	10 536,2 €	-8 173,82 €	43,69
1161	0,4177	4 050,53 €	6 601,5 €	2 550,95 €	62,98
928	0,4759	4 871,00 €	5 600,7 €	729,72 €	14,98
2014,44	0,5899	18 775,54 €	13 535,6 €	-5 239,91 €	27,91
1033	0,6050	8 237,73 €	7 034,6 €	-1 203,10 €	14,60
590,75	0,8908	5 036,04 €	5 036,0 €	-0,00 €	0,00
504,5	1,0000	4 760,75 €	4 631,3 €	-129,41 €	2,72

Liite 3. Excel-taulukko, johon testaustuloksia kerättiin. Yli 25 % virheet ovat merkattu keltaisella, ja yli 50 % virheet punaisella.

						Keskimääräinen virhe-%
						35,58
pituus (m)	kalliomaaprosentti (0...1)	toteutunut hinta		kustannusarvio	virhe	virhe %
1422,2	0,0000	3 901,60 €		4 522,13 €	620,53 €	15,90
2834,62	0,0000	5 995,90 €		9 013,16 €	3 017,26 €	50,32
3224,99	0,0000	11 400,00 €		10 254,40 €	-1 145,60 €	10,05
718,89	0,0000	3 299,60 €		2 285,83 €	-1 013,77 €	30,72
881,97	0,0000	4 930,20 €		2 804,36 €	-2 125,84 €	43,12
712,39	0,0000	5 985,60 €		2 265,15 €	-3 720,45 €	62,16
1553	0,0000	14 799,40 €		4 938,65 €	-9 860,75 €	66,63
1018	0,0000	8 041,93 €		3 239,52 €	-4 802,41 €	59,72
1600	0,0012	5 146,10 €		5 088,58 €	-57,52 €	1,12
1271,78	0,0122	4 430,40 €		4 043,84 €	-386,56 €	8,73
1877,05	0,0665	4 773,90 €		5 968,40 €	1 194,50 €	25,02
820,44	0,0897	3 268,35 €		2 608,73 €	-659,62 €	20,18
1638	0,1002	13 071,60 €		6 195,63 €	-6 875,97 €	52,60
1233,98	0,1568	10 364,70 €		5 085,28 €	-5 279,42 €	50,94
3180,61	0,1903	31 970,55 €		13 744,32 €	-18 226,23 €	57,01
1270,21	0,1908	4 377,00 €		5 492,71 €	1 115,71 €	25,49
962	0,2321	6 333,93 €		4 398,69 €	-1 935,24 €	30,55
1280,91	0,2497	7 818,80 €		5 992,23 €	-1 826,57 €	23,36
1688,93	0,2589	6 153,10 €		7 994,46 €	1 841,36 €	29,93
937	0,2927	4 547,10 €		4 628,51 €	81,41 €	1,79
1272,62	0,3341	3 519,75 €		6 597,62 €	3 077,87 €	87,45
1239	0,3708	5 248,30 €		6 701,37 €	1 453,07 €	27,69
1137	0,4462	12 228,06 €		6 664,35 €	-5 563,71 €	45,50
1910	0,4515	7 334,45 €		11 253,32 €	3 918,87 €	53,43
878,73	0,4599	6 295,65 €		5 219,18 €	-1 076,47 €	17,10
1204	0,5425	10 962,65 €		7 751,05 €	-3 211,60 €	29,30
868,32	0,6133	8 378,81 €		5 956,51 €	-2 422,30 €	28,91
1976,45	0,6348	11 275,50 €		13 813,04 €	2 537,54 €	22,50
991	0,7359	8 927,95 €		7 534,72 €	-1 393,23 €	15,61
848,05	0,8444	4 007,90 €		6 993,54 €	2 985,64 €	74,49