



Biokaasun hyödyntämismahdollisuudet Pohjanmaalla
Biokaasuputki Pohjanmaalle – toteutettavuus ja kustannusten arviointi

Simo Välimäki

31.8.2021



Österbottens förbund
Pohjanmaan liitto

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Tiivistelmä

Tämän työn tarkoitus oli luoda kustannusarvio Pohjanmaan alueella biometaanin siirtoon rakennettavalle kaasuputkelle sekä vertailla tätä biometaanin kuljettamiseen maanteitse. Työn tavoitteena oli selvittää putkelle soveltuva materiaali, halkaisija sekä siirtopaine alueelle kaavaillun biometaanin nesteytyslaitoksen kapasiteetin pohjalta ja pohtia putken reittiä sekä hankkeen toteutettavuutta.

Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksen avulla painottuen vastaavista tutkimusaiheista suoritettuihin kustannus selvityksiin Suomessa. Työssä nostettiin esiin siirtomenetelmien periaatteita sekä putkiston rakentamisedellytyksiä, ja varsinaista kustannusarviota varten työssä mitoitettiin putkelle soveltuva reitti sekä tälle eri kaasun siirtomäärien pohjalta parhaiten soveltuvat ominaisuudet. Näitä hyödyntäen työssä luotiin kustannusarvio putken rakentamiselle ja käytölle sekä vertailtiin saatuja tuloksia maantiesiirrolle vastavasti luotuun kustannusarvioon. Työssä tehtiin katsaus lisäksi mahdollisuuteen sekoittaa vetyä biometaaniverkostoon.

Työn tuloksena todettiin PE-muovista valmistetun, sisähalkaisijaltaan noin 160 millimetrin kaasuputken soveltuvan kaasun siirtoon 4–8 bar käyttöpaineella noin 50–100 GWh vuosittaisella kaasumäärällä. Kustannusarviota suoritettaessa havaittiin kuitenkin työn tarkastelun olevan riittämätön tarkkaan kustannusarvioon johtuen muun muassa maaston olosuhteiden tuntemisen puutteesta, jonka vuoksi työssä esitettiin useita kustannuskenaarioita putkelle. Luotujen kustannusarvioiden tulokset olivat putkiesiirrolle vuosittain noin 0,90–1,92 miljoonaa euroa ja maantiesiirrolle 0,76–0,94 miljoonaa.

Työn tulokset osoittavat, että kaasuputken rakentamiskustannukset voivat olla kilpailukykyiset maantiesiirtoon nähden, ja lopulliselle reitille suoritettavat maanmittaustoimet ovat ehdottomat kustannusten tarkentamiseksi. Putkiesiirron valintaa tukevat tämän käyttöikä, halvat käytön kustannukset, mahdollisuus lisätä merkittävästi kapasiteettia hyvin pienin kustannuksin sekä toiminnan luotettavuus.

Tutkimus laadittiin osana Biokaasun hyödyntämismahdollisuudet Pohjanmaalla –hanketta. Hankkeen yhteyshenkilönä toimii

kirsi.spoof-tuomi@uwasa.fi

Sisällys

1	Johdanto	4
2	Biokaasun kuljettamisen perusteet ja edellytykset	6
	2.1 Putkisiirto	6
	2.2 Konttisiirto	8
3	Biometaanin kuljettamisen kustannusrakenteet	10
	3.1 Putkisiirto	10
	3.2 Konttisiirto	11
4	Biokaasuputki Pohjanmaalle	12
	4.1 Biokaasun nesteytyslaitos Pohjanmaalle	12
	4.2 Putken reitti	13
	4.3 Putken ominaisuudet	16
5	Kustannusten arviointi	23
	5.1 Kaasuputken kustannusten arviointi	24
	5.2 Maantiesiirron kustannusten arviointi	28
	5.3 Kuljetusvaihtoehtojen vertailua	33
6	Vedyn sekoittaminen biokaasuverkkoon	37
7	Yhteenveto ja johtopäätökset	39
	Lähteet	41
	Liitteet	43
	Liite 1. Kompressorin investointikustannus putkisiirrossa	43
	Liite 2. Paineistukseen energiatarve ja vuosittaiset kustannukset putkisiirrossa	43
	Liite 3. Kaasuputken kustannusten laskentataulukko	45
	Liite 4. Maantiesiirron kustannusten laskentataulukko	46

1 Johdanto

Tarve ympäristöystävällisille ja kotimaisille polttoaineille on ympäristö- sekä hiilineutraalisuustavoitteiden kannalta entistä suuremmissa roolissa. Suomalaisen biokaasun ja tästä jalostetun biometaanin asema on viime vuosina parantunut, kun uusia biokaasulaitoksia on käynnistetty ja biokaasua ollaan liittämässä osaksi jakeluverkoja. Niin ikään kiinnostus nesteytetyn biometaanin valmistamiseen ja hyödyntämiseen on kasvanut samalla, kun nesteytetyllä kaasulla toimivat ajoneuvot ovat hiljalleen kasvattamassa suosiotaan. Pohjanmaalla toimivat yritykset ovatkin suunnitelleet alueelle sijoitettavaa yhteisomistuksessa olevaa biokaasun nesteytyslaitosta.

Tämän työn taustalla on joukko pohjanmaalaisia yrityksiä, joiden mielessä on yhteisomistuksessa olevan biokaasun nesteytyslaitoksen valjastaminen Pohjanmaan alueelle. Monilta eri tuottajilta hankittavan biokaasun kuljettaminen tälle yhteiskäyttölaitokselle on kuitenkin aiheuttanut epävarmuutta sen suhteen, mikä olisi kustannuksiltaan paras ratkaisu. Tutkittavat kuljetusvaihtoehdot ovat siirto maanteitse tai biometaania varten rakennettava erillinen kaasuputki.

Tämän selvityksen pohjimmaisena tavoitteena on arvioida biometaania kuljettavan kaasuputken rakentamisen kustannuksia ja toteutettavuutta Pohjanmaan alueella ja vertailla näitä biometaanin maantiesiirtoon. Kustannusarvion luomiseksi työssä arvioidaan kaasuputken mahdollista reittiä sekä potentiaalista siirtokapasiteettia, joita hyödyntämällä työssä ehdotetaan putkelle soveltuva materiaali, halkaisija ja käytettävä siirtopaine. Myös nesteytyslaitoksen sijoituskohde on yhä avoin kysymys, jota työssä pohditaan putken reittiehdotuksen ohella. Lisäksi työssä tehdään katsaus vedyn sekoittamisen mahdollisuuteen putkiverkostossa.

Työssä suoritetaan valitulle reitille biometaanin kuljettamisen kustannusarvio sekä kaasuputken rakentamisen että maantiesiirron tapauksessa. Näiden kuljetusvaihtoehtojen kustannusrakenteet jakautuvat hyvin eri tavalla, sillä siinä missä kaasuputken rakentaminen vaatii hyvin korkeat investointisummat, kaasun maantiesiirron käyttökulut ovat korkeat. Kaasuputken käyttökulut taas ovat lähes olemattomat erityisesti pienemmillä paineilla. Tämä asetelma luokki työn ensisijaisen tutkimuskysymyksen, jonka pohjalta tavoitteena on selvittää, onko käsitellyssä tapauksessa kannattavaa rakentaa biometaanin kuljetusta varten erillinen kaasuputki vertaillen tuloksia maantiesiirtoon. Kuljetusmenetelmien kustannuksia arvioidaan annuiteettimenetelmää hyödyntäen, jolloin yhteisen annuiteettitekijän avulla voidaan verrata menetelmien kokonaiskustannuksia ottaen huomioon korko- ja pitoaikatekijöiden vaikutukset.

Työssä käytetään tutkimusmenetelmänä kirjallisuuskatsausta, ja merkittävässä roolissa ovat aikaisemmin Suomessa suoritettavat, vastaavanlaisiin tutkimuskysymyksiin perustuvat

biometaanin kuljetuskustannusten selvitystyöt. Työ jakautuu siirtomenetelmien perusperiaatteiden ja kustannusrakenteiden teoriaosuuksien jälkeen kolmeen tutkimuskysymyksiä vastaavaan vaiheeseen, jotka ovat kaasuputken reitin sekä ominaisuuksien määrittely, kaasuputken ja maantiesiirron kustannusten arviointi ja vertailu sekä vedyn biometaaniverkoston sekoittamisen mahdollisuudet.

Työn eri vaiheet käsitellään pääpiirteittäin itsenäisinä osioina, mutta näiden tuloksia heijastetaan paikoin myös toisiinsa. Tämä menettely johtuu siitä, että varsinainen kaasuputken suunnittelutyö on erittäin herkkä monen eri tekijän summa, joita tämän työn puitteissa ei kyetä tarkasti arvioimaan. Esimerkiksi reitillä yhden kilometrin lisäys voi johtaa satojen tuhansien eurojen lisäkustannuksiin. Reitin muutoksen taas saattaa aiheuttaa ympäristövaikutusten selvittämisessä saadut tulokset. Varsinaiset putken rakentamiskustannukset ovat niin ikään alttiita vaihteluille, ja vasta putken reitin tarkan suunnittelun vaatiman maanmittauksen sekä maaston tutkimusten esiin tuomat maaperän ja olosuhteiden haasteet saattavat lisätä putken ominaiskustannuksia. Myös maantiesiirron kustannusarvioissa käytetyt tekijät ovat alttiita vaihtelulle, joten työssä pyritään esittämään siirtomenetelmille eri kustannusskenaarioita ja kuvaamaan eri tekijöiden vaikutuksia lopulliseen kustannusarvioon.

2 Biokaasun kuljettamisen perusteet ja edellytykset

Jalostettua biokaasua eli biometaania voidaan kuljettaa monin eri keinoin. Yleisimmät kuljetusmenetelmät kuitenkin pohjautuvat kaasun paineistamiseen, jolloin tätä voidaan kuljettaa suurempia määriä pienemmässä tilassa. Yleisimmät keinot kaasun kuljetukseen ovatkin paineistettuna joko erillisissä putkistoissa tai painepulloissa, joiden lisäksi myös biometaanin nesteyttäminen on mahdollista.

Tässä työssä keskitytään biometaanin putkisiirron sekä maanteitse tapahtuvan konttisiirron tarkasteluun. Tässä luvussa esitellään yleisellä tasolla näiden biometaanin kuljettamisen menetelmien yleiset perusteet ja edellytykset, joita huomioiden työssä suoritetaan menetelmien toteutettavuuden ja kustannusten arviointia Pohjanmaan alueella.

2.1 Putkisiirto

Kaasua siirrettäessä putkistossa puhutaan yleisimmin maan alle, noin metrin syvyyteen kaivetuista kaasun siirtoputkista, joissa kaasua siirretään valmistajilta käyttäjille. Kaasun painetta nostetaan tuotantolaitoksella kompressorin avulla, jolloin kaasuseos virtaa paine-eron avustuksella putkessa kohti alemmaa painetta. Tämänkaltaisesta paineen laskun aiheuttamasta virtauksesta käytetään termiä paisuntavirtaus (Hyvönen, 2013, s. 19).

Kaasuputket luokitellaan Suomessa kolmeen ryhmään niiden käyttötavan sekä siirtopaineen pohjalta. Siirtoputkistolla tarkoitetaan kaasuputkistoa, jolla kaasua siirretään korkeapaineisena eli yli 16 bar paineessa käyttöön jaettavaksi. Siirtoputkisto muodostaa kaasuverkon rungon, jossa valmistajalta kyetään siirtämään kaasua monien eri käyttäjien saataville laajalla vaikutusalueella. Jakeluputkisto taas on matalapaineinen, alle 16 bar paineessa kaasua siirtävä osuus, jolla kaasua jaetaan usein siirtoputkiosuudelta alueelliseen käyttöön. Käyttöputkistoja taas ovat esimerkiksi tankkausaseman sisäiset putkistot tai muut kaasua varsinaiseen käyttöön esittelevät putkiosuudet. Suomessa toimivat siirtoputkistot on valmistettu teräksestä, jakelu- ja käyttöputket voivat olla myös muovisia. Muovisten kaasuputkien suurin sallittu käyttöpaine on 8 bar. (Suomen Kaasuyhdistys ry, 2014, s. 24, 25.)

Etelä- ja Kaakkois-Suomessa toimii 1970-luvulla rakennettu korkeapaineinen kaasun siirtoverkosto, jolla on alun perin tuotu maakaasua Venäjältä Suomeen. Kaasuverkosto on kuitenkin vuonna 2020 liitetty myös osaksi eurooppalaista kaasuverkkoa Baltic Connector -kaasuputken avulla, joka yhdistää Suomenlahden kautta Suomen ja Viron kaasuverkot. Baltic Connectorin yhteydessä myös Suomen kaasumarkkinat avattiin, ja putki mahdollistaa maakaasun ohella myös biometaanin viennin ja tuonnin Suomen ja Euroopan välillä. Suomen kansallinen kaasuverkko on noin 1150 kilometriä pitkä, ja koostuu lähes

täysin 54 barin korkeapaineisesta teräsputkistosta. Kaasuverkon putkien halkaisijat vaihtelevat kokoluokassa DN100–DN1000. (Gasgrid Finland Oy, 2021.)

Kaasuputken laitteisto

Varsinaisen putken lisäksi tämän käyttö edellyttää monien laitteiden sekä järjestelmien hyödyntämisen. Tarvittavia laitteita ovat muun muassa putkeen paineen luova kompressori, paineenvähennysasemat jakelu- ja käyttöosuksille, kromatografit kaasun määrän, laadun ja energiasisällön mittaamiseen sekä alueesta riippuvien tiettyjen etäisyyksien välein olevat venttiiliasemat. Puhdistamatonta raakakaasua siirrettäessä putkisto vaatii lisäksi kondenssikaivoja, joihin kaasun sisältämä vesi tiivistyy.

Kaasuverkko vaatii myös monenlaisia turva- sekä etäseurantajärjestelmiä, joiden avulla voidaan valvoa verkon tilaa. Suomen kansallisessa kaasuverkossa venttiiliasemia on 8–32 kilometrin välein, ja näiden avulla voidaan kaasun siirto katkaista ja tietty putkiosuus hallitusti tyhjentää esimerkiksi vuoto- tai huoltotilanteessa (Gasgrid Finland Oy, 2021).

Kaasuputken rakentamisen edellytykset

Biokaasu rinnastetaan Suomen lainsäädännössä maakaasuun, joten maakaasua ja sen kuljettamista koskevat määräykset pätevät sellaisenaan myös biokaasuun. Nämä määräykset on annettu Valtioneuvoston asetuksessa maakaasun käsittelyn turvallisuudesta (551/2009). Maakaasun siirtoputkiston rakennusalue jaetaan alueluokkiin, jotka määrittellään asukastiheyden tai alueella olevien erillisten kohteiden laadun perusteella. Putkiston mitoituksessa käytettävät varmuuskertoimet määräytyvät alueluokan mukaan. Alueluokat määräävät muun muassa venttiiliasemien välisen minimietäisyyden, jotka ovat välillä 8–32 kilometriä riippuen alueen asutuksesta (Suomen Kaasuyhdistys ry, 2014, s. 26).

Maakaasulainsäädännön mukaisesti kaasuputken suunnittelupaine tulee valita vähintään yhtä suureksi kuin paine, jonka alaiseksi putki käyttöolosuhteissa joutuu. Niin ikään putkiston varusteiden ja käyttölaitteiden suunnittelupaineen tulee olla vähintään yhtä suuri kuin putkiston suurin sallittu käyttöpaine. Myös putkiolosuhteiden lämpötilat tulee ottaa huomioon, ja suunnittelulämpötilana tulee käyttää korkeinta tai alinta lämpötilaa, johon putkisto voi käytön aikana joutua. Maahan asennettavalle sekä veteen upotettavalle putkelle suunnittelulämpötila on -10 °C . (Suomen Kaasuyhdistys ry, 2014, s. 26)

Maahan upotettaville putkille on lisäksi säädetty tietyt vähimmäispeitesyvyudet riippuen putken asennuskohteen ympäristöstä. Esimerkiksi yli 4 bar jakelu- ja käyttöputkistojen vähimmäispeitesyvyys on 1 metri, mutta kallioon louhitun kaivannon vähimmäispeitesyvyys on 0,6 metriä putken yläpinnan yläpuolelle. Myös tiettyjen muiden kohteiden

alitukselle on maastossa määritelty erikseen erilaisia peitesyvyyksiä, esimerkiksi rauta-
teiden, moottoriteiden tai viljelysmaiden kohdalla. (Suomen Kaasuyhdistys ry, 2014, s.
37)

Kaasuputkille on lisäksi suositeltuja turvaetäisyyksiä niin rakennuksille kuin tiestöillekin.
Yli 4 bar kaasuputken etäisyydeksi rakennuksiin, joihin kaasua ei putkella johdeta, vähim-
mäisetäisyys on 2 metriä ja suositus 4 metriä. Lisäksi putkiston etäisyys liikenneväylään
tai raskaasti liikennöityyn alueeseen on valittava siten, ettei putkisto vaurioidu näistä ai-
heuttavien kuormitusten ja rasiutusten vuoksi. Mahdollisia kuormituksia putkistolle ai-
heuttavien rasitteiden läheisyydessä lisäkuormitukset on huomioitava esimerkiksi lisää-
mällä putken seinämäpaksuutta tai peitesyvyyttä, tai varustamalla kaasuputki erillisellä
suojaputkella tai muilla -rakenteilla. Maanalaiset teräksestä valmistetut putket on lisäksi
suojattava korroosiolta, joka tehdään ensisijaisesti polyeteenipinnoitteella. (Suomen
Kaasuyhdistys ry, 2014, s. 40, 41.)

Kaasuputkihankkeessa olennaisessa asemassa on lisäksi ympäristövaikutusten arviointi
sekä kartoittaminen. Kaasuputken reittiä suunniteltaessa putkelle tulisi löytää sekä ylei-
sesti hyväksyttävä että maanomistajia mahdollisimman tasapuolisesti kohteleva sijoitus.
Myös maaperä sekä tämän oletettavissa oleva jatkokäyttö on pyrittävä huomioimaan.
Kaasuputken kulkureitti jättää noin viiden metrin levyisen käytävän maastoon, jonka joh-
dosta putken linjaus on suunniteltava suurmaisemaa säilyttäväksi siten, ettei esimerkiksi
metsien reunoihin jää maisemaa rikkovia aukkoja. Rakentamiseen tarvittava maa-alueen
käyttöoikeus hankitaan maanomistajilta lunastuslain perusteella. (Kuningas & Kärki,
2011, s. 18–20.)

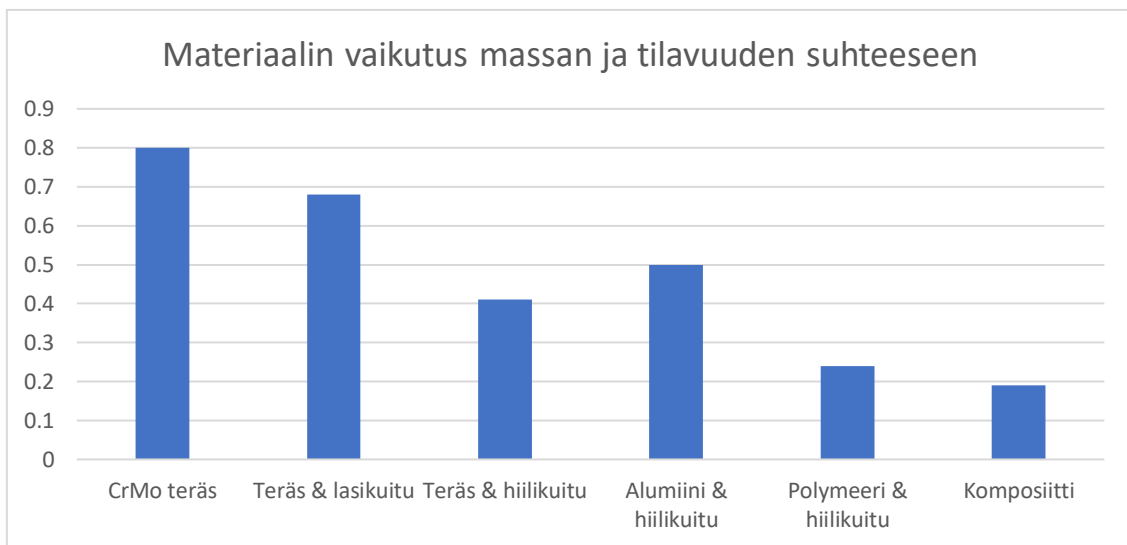
2.2 Konttisiirto

Biometaania voidaan kuljettaa maanteitse paineistettuna kaasupulloista koostuvissa
pullopattereissa. Pullopattereita voidaan käyttää vaihtolavojen tavoin, jolloin tyhjä kaa-
supullokontti voidaan vaihtaa täyteen ja kuljettaa tyhjentyneenä takaisin laitokselle täytet-
täväksi. Kaasua siirrettäessä maanteitä pitkin oleellista on maksimoida kerralla kuljetet-
tavan kaasun määrä, sillä konttien kapasiteetti on rajoittunutta. Tästä johtuen kaasun pai-
neistetaan noin 200–250 bar paineeseen. Paine on moninkertainen verrattuna putkisiir-
ron paineeseen, ja siirtomenetelmä vaatii täten myös suuremman kompressointiener-
gian.

Biometaanin konttisiirtoon tarvittava laitteisto on suuresta siirtopaineesta johtuen hie-
man putkisiirtoa moninaisempaa. Pullopattereissa tapahtuva kaasun siirto vaatii tehol-
taan suuremman kompressorin, varsinaiset siirtokontit, siirtoajoneuvot sekä kaasun
käyttöpäässä paineenalennusjärjestelmän hallittuun paineen alentamiseen.

Konttisiirron etuna on reittivalintojen muunneltavuus, jolloin reittimuutokset tai uusien reittien valjastaminen eivät vaadi uusia investointeja. Konttisiirron juoksevat kustannukset kuitenkin saattavat muuttua merkittävästi vuosien saatossa, esimerkiksi ajoneuvojen CO₂-verotuksen tiukentuessa. Kaasun siirtomäärän lisääminen on lisäksi putkisiirtoon nähden rajallisempaa, sillä siirtopainetta ei voida kasvattaa. Kaasumäärän lisäys voi johtaa siirtokonttien ja ajosuoritteiden tarpeen kasvuun, jolloin sekä investointi- että käyttökustannukset kasvaisivat. Kaasun tarjonnan kasvuvara on tulisi olla valmiina konttisiirron kohdalla jo hankintavaiheessa.

Pullopattereita on saatavilla eri kapasiteeteilla ja eri materiaaleista valmistettuina, joista yleisimmät ovat teräs- tai komposiittivalmisteisia. Siirtokonttien hinnat vaihtelevat materiaalin perusteella suuresti, mutta materiaalilla on oleellinen vaikutus myös konttien siirtokapasiteettiin ja kuljetuksen kokonaispainoon. Halvimmat siirtokontit on valmistettu teräksestä, mutta nämä ovat myös siirtokapasiteetiltaan pienempiä ja massaltaan huomattavasti suurempia kuin komposiitista valmistetut. Pullopatterien kapasiteetit vaihtelevat materiaalista riippuen välillä 2000–12500 Nm³ (Haimila, 2015, s. 18, 19; Suomen Biovoima, 2021). Yksittäisten kaasupullojen materiaalin vaikutus tämän massa on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Paineistetun metaanin säiliötyypit ja näiden suhteellinen massa (Söderena ja muut, 2019, s. 35).

Kuva osoittaa, että halvimman teräksestä valmistetun kaasupullon massa tilavuuteen nähden on nelinkertainen verrattuna komposiittipulloon. Pullopatteriston massalla on oleellinen vaikutus kuljetusten kustannuksiin, sillä kuljetusten kokonaismassasta varsinaisen kaasun osuus on pieni.

3 Biometaanin kuljettamisen kustannusrakenteet

Tässä luvussa esitellään työssä käsiteltävien biometaanin kuljettamisvaihtoehtojen yleiset kustannusrakenteet. Sekä kaasuputkiston että maantiekuljetuksen valjastaminen voidaan jakaa investointi- ja käyttökuluihin, mutta näiden kustannusrakenteet eroavat toisistaan merkittävästi.

Kuljetusmenetelmien kokonaiskustannuserot tulevat käyttö- ja investointikulujen osuudesta, sillä esimerkiksi huolto- ja kunnossapitokulut voidaan arvioida tiettyinä prosenttiosuutena kokonaisinvestointikuluista. Kaasuputken tapauksessa investointikulut ovat merkittävät johtuen suurista putken materiaalihankinnoista sekä laajoista rakennustöistä, kun taas putken käyttökulut ovat hyvin pienet. Maanteitä pitkin tapahtuvan konttisiirron kulut taas painottuvat ensisijaisesti käyttökustannuksiin, vaikkakin tarvittavat hankinnat voivat nostaa myös investointikuluja suuriksi.

3.1 Putkisiirto

Kaasuputkiverkon rakentamisen edellytyksenä on kaasun vakaa kulutus, sillä tämän investointikulut ovat suuret ja maksu- sekä käyttöajat pitkiä, kun taas käyttövaiheen kulut ovat hyvin pienet. Kaasuverkko tarjoaa lähes rajattoman varastointi- ja jakelujärjestelmän (Ahonen, 2010, s. 35, 36). Pienten kaasumäärien siirtäminen putkistolla on merkittävästi kalliimpaa kaasukiloa kohti isompiin määriin verrattuna johtuen putken korkeasta investointikustannuksesta suhteessa käyttökuluihin (Haimila, 2015, s. 25).

Kaasuputken investointikustannukset koostuvat muun muassa materiaaleista, raivaustöistä, putken asennus- ja pinnoitustöistä, töiden hallinnasta ja valvomisesta, suunnittelusta sekä kompressori- ja muista laitehankinnoista. Lisäksi esimerkiksi maanviljelijöille rakentamisen aikaiset haitat on korvattava. Putkiverkoston käyttökustannukset koostuvat kompressorin energiankulutuksesta, huoltotöistä, kaasuverkon valvonnasta ja teleyhteyksistä, ympäristöluvista sekä hallinnollisista kuluista. Maanomistajille voidaan joutua lisäksi maksamaan vuokraa putken kulkureitiltä. (Ulvestad & Overland, 2012, s. 410, 413.)

Putken rakennuskustannukset voivat vaihdella suuresti riippuen eri alueista. Muun muassa maasto, ilmasto, työn kustannukset ja asukastiheys tekevät putkistojen rakennusprojektien talousasioista hyvin projektikohtaisia niin investointi- kuin käyttökustannustenkin kohdilla. Tiheästi asutun kaupunkialueen läpi vedettävän kaasuputken kustannukset saattavat olla viisinkertaiset verrattuna vastaavaan, harvemmin asutun alueen kaasuputkeen. Tästä johtuen putkistojen suunnittelijat ovat usein vastahakoisia yleistämään putkirakentamisen kuluja. (Ulvestad & Overland, 2012, s. 410)

Kaasuputken kuljetuskapasiteettia voidaan kasvattaa merkittävästi hyvinkin pienten kustannusten avulla, mikäli suunnitteluvaiheessa kaasuputkiston kapasiteettiin on jätetty laajennusvaraa esimerkiksi paineenkestävyyden nojalla. Kaasumäärän lisääminen näkyisi lähinnä kompressoinnin käyttökuluissa.

3.2 Konttisiirto

Konttisiirrossa investointikustannukset ovat putkihankkeeseen nähden pienemmät, kun taas käytön kustannukset ovat suuremmat ja voivat kuljetusmäärien kasvaessa lisääntyä merkittävästi (Ahonen, 2010, s. 36). Maantiesiirron tapauksessa investointikulut koostuvat putkisiirtoon nähden tehokkaamman kompressorin, siirtokonttien, paineenalennusjärjestelmän sekä mahdollisesti myös kuljetuskaluston hankinnasta. Käyttökulut taas nousevat suuriksi johtuen kuljetuskaluston polttoaine- ja käyttökustannuksista sekä kaasun paineistamisen energiantarpeesta.

Kuljettamisen kustannuksissa huomattava seikka on, että kuljetusmatka on etäisyyteen nähden kaksinkertainen, sillä kaluston on palattava tyhjänä takaisin tuotantolaitokselle. Käyttökustannuksissa merkittävä tekijä ovat myös kuljetusten massat, sillä kuljetuskaluston sekä konttien painon vuoksi suurin osa kuljetettavasta massasta koostuu muusta kuin varsinaisesta biokaasusta. Kuljetuksen kokonaismassaan voidaan vaikuttaa käyttämällä painavien terässäiliöiden sijaan esimerkiksi hinnaltaan kalliimpia komposiittisäiliöitä.

Konttisiirron kustannuksiin voidaan vaikuttaa keskittymällä ajoneuvon energiankulutuksen optimointiin esimerkiksi taloudellisen ajotavan, tehokkaan kuormaamisen sekä kuljetusten tehokkaalla kokonaissuunnittelulla. Taloudellisella ajotavalla voidaan vähentää polttoaineenkulutusta 8–12 % eli vuosittain yhdenkin ajoneuvon kohdalla tuhansia euroja. Taloudellinen ajotapa voi vähentää myös ajoneuvon jarrujen, renkaiden sekä muiden osien kulumista ja huollon tarvetta ja pidentää käyttöikä. (Kuningas & Kärki, 2011, s. 13.)

Maantiesiirron kohdalla kuljetettavan kaasun määrä vaikuttaa oleellisesti kaikkiin kustannuksiin. Koska yhdellä siirtoajolla kuljetettavan kaasun maksimimäärä on rajallinen, kaasumäärän lisääminen saattaisi johtaa jopa useiden siirtoajojen päivittäiseen tarpeeseen, jonka lisäksi myös siirtokontteja voitaisiin joutua hankkimaan lisää. Kuljettamisen kustannusten ohella myös kaasun paineistuksen energiantarve kasvaa lisäen käyttökuluja entisestään. Myös maantiesiirron kohdalla jo investointivaiheessa tulisi varautua kaasun siirtomäärän kasvuun valitsemalla sen hetkistä tarvetta enemmän siirtokapasiteettia valitsemalla suurempia kaasukontteja.

4 Biokaasuputki Pohjanmaalle

Pohjanmaan alueelle suunniteltu biometaaniputki johdetaan biokaasun nesteytyslaitokselle, jonka vuosittaiseksi kapasiteetiksi on esitetty 50 GWh. Laitokselle biokaasua nesteytykseen tuottavat ensisijaisesti Jepuan Biokaasu sekä Stormossen, mutta lisäksi muun muassa kaasuputken varrella toimivilta maatioilta voidaan odottaa tulevaisuudessa saatavan putkeen syötettävää biokaasua.

Kaasuputken kapasiteettina tutkitaan eri vaihtoehtoja vuosittaisten siirtomäärien pohjalta, joilla tuodaan esiin näiden vaikutusta putken vaadittuihin ominaisuuksiin. Nesteytyslaitoksen kapasiteetiksi on asetettu 50 GWh, mutta alueen toimijat ovat ehdottaneet jopa yli 100 GWh biometaanin vuosittain nesteyttävää laitosta. Tässä selvitystyössä mukana olevat biokaasun tuottajat ovat Stormossen sekä Jepuan Biokaasu, ja ensisijaiset nesteytetyn kaasun kuluttajat ovat Vaasan alueella sijaitsevia yrityksiä. Näillä perustein työssä määritettävän kaasuputken suunnittelureitti sijoitetaan kulkemaan Jepualta Vaasaan. Varsinainen putken reitti ei kuitenkaan pituuden lisäksi vaikuta työssä tehtävään kustannusarvioon, sillä ilman tarkkaa reitin maastonmuotojen sekä maaperän tuntemista tämän kustannusten arviointi on hyvin vaikeaa.

Jepuan biokaasun nykyinen tuotanto on noin 30 GWh vuodessa, ja laitoksen oletetaan toimittavan suurimman osan putkeen johdettavasta biometaanista. Pohjanmaan alueella on kuitenkin paljon biokaasun raaka-ainepotentiaalia erityisesti maatilojen sivutuotteina, ja myös maatioilla tuotettua biokaasua voidaan jalostettuna syöttää liityntäputkien avulla suoraan putkistoon. Tässä työssä arvioidaan kaasuputken ominaisuuksia eri siirrettävän kaasun vuosimäärillä, välillä 25–100 GWh/a.

4.1 Biokaasun nesteytyslaitos Pohjanmaalle

Työ pohjautuu Pohjanmaalla toimivien biokaasua valmistavien tai sitä kuluttavien yritysten kiinnostukseen investoida alueelle yhteisomistuksessa oleva biokaasun nesteytyslaitos. Nesteytyslaitosta sijoitettaessa on huomioitava niin biokaasun tuotantopaikat kuin loppukäyttäjätkin, ja sijoittamalla nesteytyslaitos lähelle käyttäjiä lopputuotteen jakelukustannuksia saadaan tehostettua etenkin, kun yhteiskäytössä olevalle laitokselle kerätään jo biokaasua sekä tämän raaka-aineita eri puolilta Pohjanmaata.

Nesteytetylle biokaasulle on kysyntää muun muassa laivaliikenteessä, raskaan kaluston maantiiliikenteessä sekä teollisuuden prosesseissa. Vielä nykyisin raskaan liikenteen nesteytetyn kaasun kulutus on kuitenkin alhaista, jonka lisäksi myös laivaliikenteessä biokaasun osuus voi jäädä alhaiseksi johtuen tämän korkeasta hinnasta verrattuna

nesteytettyyn maakaasuun. Sen sijaan Vaasan seudulla toimivat yritykset ovat todenneet, että voisivat kuluttaa jopa kaiken laitoksella nesteytetyn biokaasun omissa prosesseissaan. Näiden näkökulmien pohjalta työssä tehtävää putken reittitarkastelua tehdään siltä pohjalta, että nesteytyslaitos sijoitetaan Vaasan alueelle, Mustasaassa sijaitsevan Stormossenin biokaasulaitoksen yhteyteen.

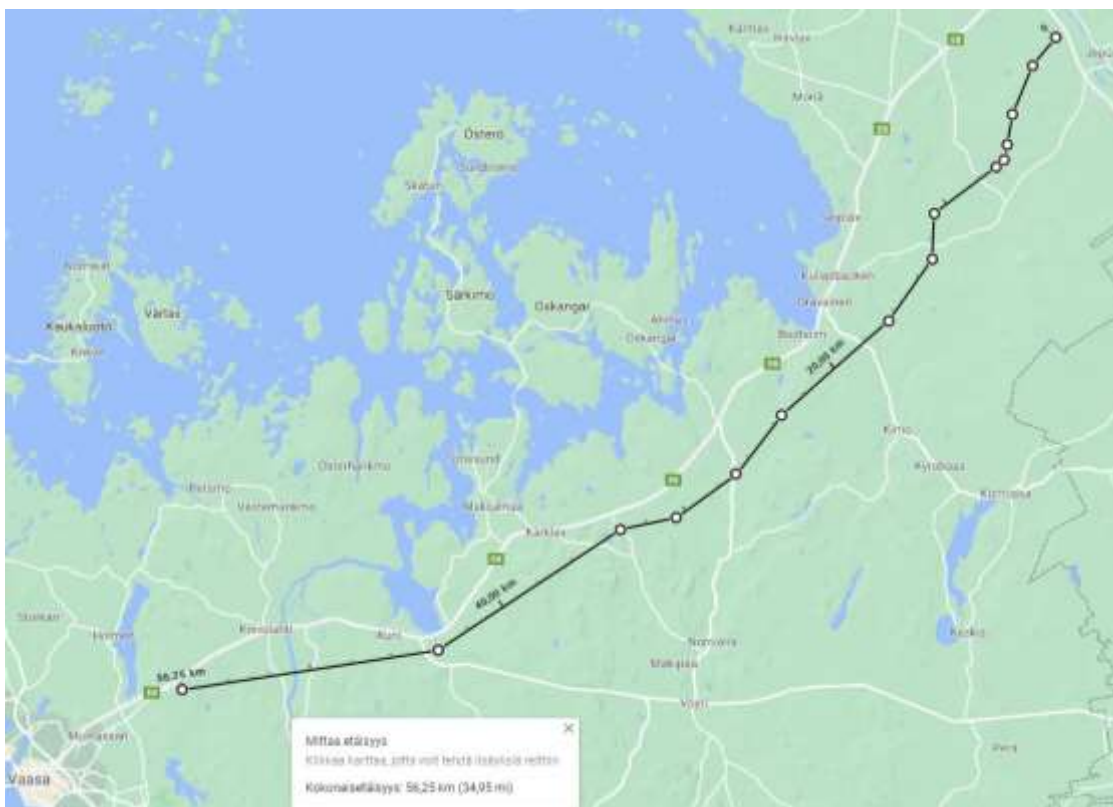
Eräänä vaihtoehtona laitoksen sijoituskohteeksi tarkasteltiin myös Seinäjokea, jolloin nesteytetyn kaasun oleellinen käyttökohde olisi raskas maantieliikenne ja mahdollisesti alueen yritykset. Seinäjoen Nurmoon on kuitenkin suunnitteilla Suomen suurin biokaasulaitos, jonka lopputuotteena nesteytettäisiin vuosittain jopa 100 GWh biokaasua (Paavola, 2019, s. 15). Näin ollen nesteytyslaitoksen sijainniksi valitaan työn tarkastelussa Vaasan seutukunta alueella sijaitsevan teollisuustoiminnan, sataman sekä raskaan liikenteen solmukohdan vuoksi.

Työssä tehtävä kaasuputken kustannusarvio perustuu kuitenkin lähinnä vain putken pituuteen sekä kuljetettavan kaasun määrään. Tästä johtuen varsinaisella putken reitillä ei ole merkitystä, sillä työn kustannustarkastelussa ei huomioida esimerkiksi maaston tai ympäristön rakennusolosuhteita, jotka voivat vaikuttaa loppukustannuksiin huomattavasti. Työssä tehtävät kustannusarviot ovatkin suoraan johdettavissa myös muille reittivaihtoehdoille.

4.2 Putken reitti

Putken lähtöpisteeksi valitaan Jepuan biokaasulaitos Uusikaarlepyyssä ja päätepisteeksi Mustasaassa sijaitseva Stormossenin biokaasulaitos. Näiden toimipisteiden välinen etäisyys linnuntietä on noin 53 kilometriä, mutta rannikonmuotojen ja valtatie E8:n vuoksi todellinen reittivalinta on hieman tätä pidempi.

Työssä esitetään kaasuputkelle yksi reittiehdotus näiden pisteiden välillä. Reitti on läpikäyty Google Maps -satelliittikuvien pohjalta siten, että reitti kulkisi mahdollisimman vähän esimerkiksi viljelysmaiden ja asutuskeskittymien läpi. Kaasuputken reittiehdotus on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Kaasuputken reittiehdotus Jepuan sekä Stormossenin biokaasulaitosten välillä.

Kaasuputken pituus esitetyllä reitillä on noin 56 kilometriä. Työssä putken suunnittelupituudeksi valitaan tältä pohjalta 60 kilometriä, sillä lopullinen putkireitti saattaa erota tästä ehdotuksesta ja olla pidempi, esimerkiksi ympäristö- ja lupa-asioiden selvityksessä tulevien seikkojen vuoksi. Myös esimerkiksi putken rakentamista edellyttävän maanmittauksen tulokset saattavat paikoin lisätä rakentamiskustannuksia esimerkiksi haasteellisten maastonkohtien vuoksi, joten pidemmällä suunnittelupituudella pyritään kattamaan mahdollisten haasteiden tuomia lisäkuluja.

Google Maps -käyttöliittymän tarjoamien satelliittikuvien perusteella reitin maasto on pitkälti tasaista ja koostuu pääosin metsästä ja viljelysmaista. Lähempänä Vaasan seutukuntaa asutuksen määrä lisääntyy, ja reittiehdotus kiertää muutaman pienen asutuskeskittymän. Kokonaisuudessaan reitistä noin 15 kilometriä on peltoa ja loput pääosin metsää, joiden lisäksi reitille osuu viisi ylitettävää vesistöä. Vesistöt ovat pääosin pieniä jokia, ja ovat yhtä nimeämätöntä lukuun ottamatta Kyrönjoki, Kimonjoki, Vöyrinjoki sekä Lotlaxbäcken. Kaasuputket voidaan laskea vesistöjen kohdalla näiden pohjaan sellaisenaan.

Ehdotettu kaasuputken reitti kulkee pitkälti valtatie E8 mukaisesti toisiaan kohtamatta. Reitille osuu kaksi seututietä sekä seitsemän yhdysteiksi luokiteltavaa tieosuutta. Seututiet ovat seutukuntien liikennettä palvelevia tieyhteyksiä, jotka liittävätkä näitä kanta-

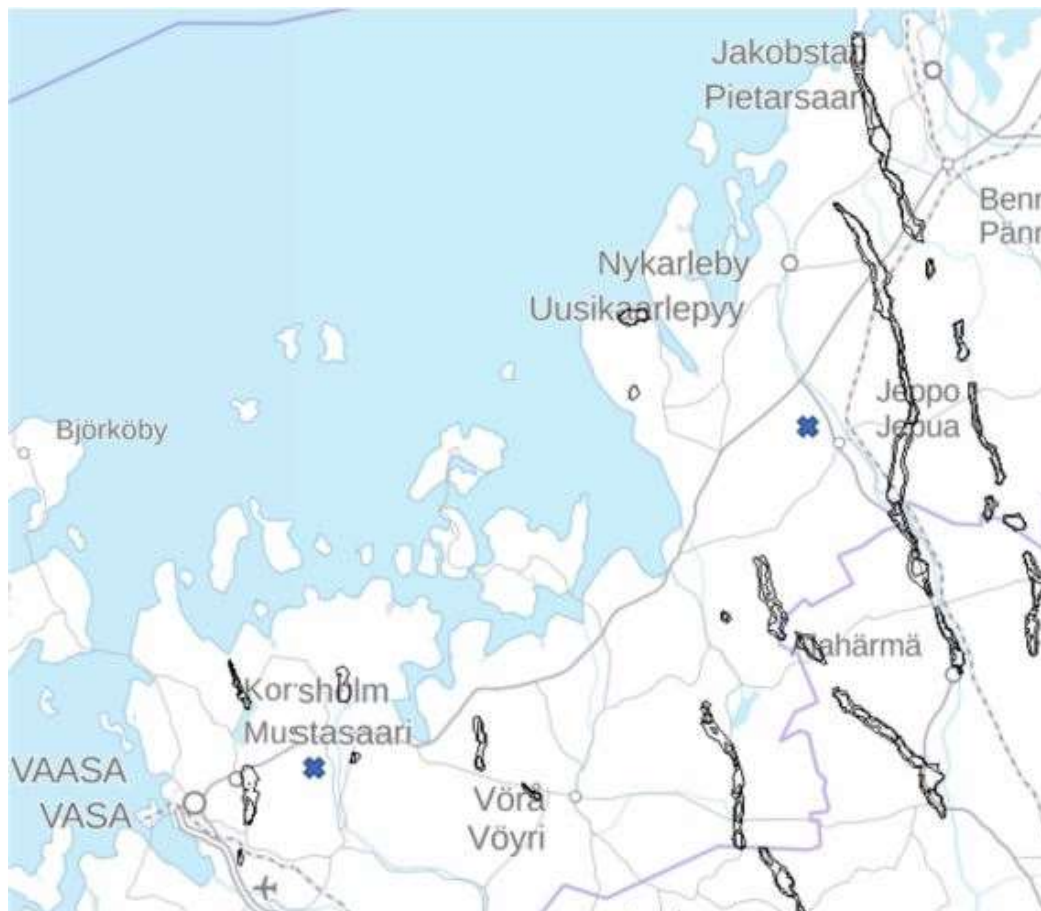
sekä valtateihin (Väylävirasto, 2021). Yhdystiet taas ovat seututeitä yhdistäviä pienempiä maanteitä, joiden lisäksi reitille osuu lukuisia pienempiä päällystämättömiä teitä. Teitä alitettaessa näiden asennussyvyydelle on asetettu tiettyjä ehtoja. Taulukossa 1 on esitetty putkiston vähimmäispeitesyvyksiä eri tapauksissa.

Taulukko 1. Kaasuputkiston vähimmäispeitesyvyksiä eri kohteissa (Suomen Kaasuyhdistys ry, 2014, s. 38).

Asennuskohde	Minimipeitesyvyys [m]
Viljelysmaat	<u>1,20</u>
Rautatien alitus maanpinnasta mitattuna	1,35
Rautatien alitus ojan pohjasta mitattuna	0,80
Raskaasti liikennöityjen teiden alitus	1,35
<u>Muiden teiden ja katujen alitus</u>	<u>1,00</u>
<u>Purojen ja oijen alitus pohjasta mitattuna</u>	<u>0,60</u>

Taulukosta on alleviivattu reitillä olevien kohteiden alitusten vaatimia asennussyvyksiä. Yli 4 bar paineessa toimivan kaasuputken minimiasennussyvyys on yksi metri, ja pääosin metsästä koostuvalle reitille tämä on pääosin tarvittava kaivannon syvyys. Peltojen kohdalla syvyyden on oltava 1,20 metriä ja oijen sekä purojen kohdalla 0,60 metriä. Reitille ei osu raskaasti liikennöityjä teitä, vaan putken kohtaamien teiden alitussyvydeksi riittää yksi metri.

Työssä tehtiin katsaus myös mahdollisiin pohjavesialueisiin, joiden kohdalla kaasuputken rakentaminen vaatii erityishuomioita. Kuvassa 3 on esitetty Pohjanmaan alueen pohjavesialueet, ja kuvaan on lisätty siirtoputkiston päätepisteet selkeyttämään kuvan asetelmaa. Ainoa reitille osuva pohjavesialue sijaitsee Vöyrissä.



Kuva 3. Pohjanmaan seudun pohjavesialueita (Maanmittauslaitos, 2021).

Muodostetulla reittiehdotuksella ei ole tehdyn tarkastelun perusteella esteitä tai haasteita kaasuputken rakentamisen kannalta, vaan kuljettava maasto on pääosin pelloista sekä metsistä koostuvaa tasamaata sekä muutama kapea joki. Kaasuputken suunnitteluvaiheessa on kuitenkin toteutettava reitille tarkempi maanmittaus, joilla voidaan selvittää maaperän koostumus ja merkitys rakentamiselle. Esimerkiksi maastossa olevien kallioiden tai kivikoiden esiintymisestä ei työn tarkastelussa arvioitu, ja näiden mahdollista kustannusvaikutusta ei kyetä arvioimaan.

4.3 Putken ominaisuudet

Putkelta vaaditut ominaisuudet määräytyvät ensisijaisesti siirrettävän kaasun määrän pohjalta. Suuremmat kaasumäärät vaativat joko suuremmat putket, korkeamman siirtopaineen tai osaltaan molemmat. Tässä työssä tarkastellaan erilaisia putkivaihtoehtoja erilaisilla kaasun vuosimäärillä, ja tarkoituksena on selvittää Pohjanmaan kaasuputkelle soveltuva putkimateriaali, putken halkaisija sekä siirtopaine. Työn tarkastelussa oletetaan kaasuputken olevan toiminnassa tasaisesti ympäri vuoden, eli kaasua siirretään

8760 tuntia vuodessa. Tämän pohjalta lasketaan suoraan eri kaasumäärillä toteutuvat virtausmäärät.

Kaasun käyttäytymisen selvittämiseksi putkistossa on tunnettava kolmesta perussuureesta muodostuva kaasun fysikaalinen olotila. Nämä suureet ovat paine, lämpötila sekä kaasuseoksen tiheys. Virtausominaisuuksien selvittämiseksi on tunnettava muun muassa tilavuus- ja massavirta sekä kaasun virtausnopeus, mutta näiden lisäksi muun muassa putkiston pituus, rakenne, materiaalit sekä mahdolliset paineen muutokset voivat tarkentaa suunnittelun tuloksia. (Hyvönen, 2013, s. 19, 20; Suomen Kaasuyhdistys, 2014, s. 26.)

Suomen Kaasuyhdistyksen julkaiseman Maakaasukäsikirjan mukaan putkessa tapahtuvaa tarkkaa painehäviötä ei ole tarpeen laskea, johtuen maa- ja biokaasun puristuvuuden aiheuttamasta monimutkaisuudesta. (Suomen Kaasuyhdistys, 2014, s. 26.)

Biometaanin tiheys paineen ja lämpötilan funktiona

Biometaanin kaasuseoksen tiheys vaihtelee paineen sekä lämpötilan funktiona. Taulukossa 2 on esitettyä biometaanin ominaisuuksia eri paineissa sekä lämpötiloissa. Taulukon arvot on noudettu Unitrove-verkkopalvelusta kaasuseoksen ominaisuuksilla 97 % metaania sekä 3 % hiilidioksidia. Taulukossa on korostettuna tiheyden arvot paineessa 8 bar, joka on paineen yläraja muoviputkilla, sekä 16 bar, jota korkeampipaineiset kaasu-putket luokitellaan siirtoputkiksi. Maa- ja biokaasun lämpötila laskee noin 0,4 °C/bar paineen laskiessa (Hyvönen, 2013, s. 17).

Taulukko 2. Biometaanin tiheyksiä lämpötilan sekä paineen funktiona (Unitrove, 2021).

		Tiheys [kg/m ³]			
		Lämpötila [°C]			
		0	5	10	15
Paine [bar]	1	0,745	0,732	0,719	0,706
	2	1,494	1,467	1,44	1,415
	4	3,002	2,947	2,893	2,841
	6	4,526	4,44	4,358	4,279
	8	6,064	5,948	5,863	5,729
	10	7,618	7,47	7,327	7,191
	16	12,374	12,121	11,879	11,647
	25	19,785	19,349	18,935	18,541
	30	24,052	23,5	22,977	22,481
	50	42,266	41,123	40,056	39,057

Taulukosta havaitaan, että lämpötilan vaikutukset kaasun tiheyteen eivät ole varsinkaan pienemmällä paineilla suuria. Näin ollen tämän aiheuttamia muutoksia ei tämän työn tarkastelussa oteta huomioon, ja työssä kaasun ominaisuuksien tarkasteluun valitaan lämpötilan arvoa 5 °C vastaavat tiheyden arvot.

Kaasun massavirta

Kaasun massavirta on laskettu vuosittaisen kaasumäärän pohjalta olettaen, että kaasua siirretään jatkuvasti tasainen määrä. Kaasun vuosittainen määrä kuutiolina sekä kilogrammoina on laskettu eri energiamäärien pohjalta metaanipitoisuudella 97 %, metaanin tiheyden arvolla 0,72 kg/m³ ja metaanin lämpöarvolla 10 kWh/m³. Taulukossa 3 on esitettyä eri vuosittaisilla kaasumäärillä siirrettävän kaasun määrä kilogrammoina sekä kuutiometreinä vuodessa, jonka pohjalta on suoraan laskettu kaasun massavirta sekunnissa vuoden sekuntimäärän mukaan. Tätä arvoa hyödynnetään työssä käytettävänä kaasun massavirtana.

Taulukko 3. Siirrettävän metaanin vuosittaiset määrät (a) sekä massavirat (b) eri kaasumäärillä.

(a) Kaasumäärä vuodessa		
Määrä [GWh/a]	Määrä [m ³ /a]	Määrä [kg/a]
25	2577320	1855670
50	5154639	3711340
75	7731959	5567010
100	10309278	7422680
(b) Massavirta		
Määrä [GWh/a]	Massavirta [kg/s]	
25	0,0588	
50	0,1177	
75	0,1765	
100	0,2354	

Kaasun tilavuusvirta ja putken suositushalkaisija

Kaasuseoksen tiheys määrittelee kaasun tilavuusvirran, ja on niin ikään riippuvainen paineesta sekä lämpötilasta. Kaasun tilavuusvirta voidaan laskea kaavan 1 avulla:

$$qV = \frac{m}{\rho(T,p)*t} = \frac{\dot{m}}{\rho(T,p)} \quad (1)$$

, jossa qV on kaasun tilavuusvirta, m siirrettävän kaasun määrä kilogrammoina, ρ kaasun tiheys ja t kulunut aika.

Siirretyn kaasun massa ajan funktiona on yhtä kuin massavirta \dot{m} , ja tilavuusvirtojen laskussa hyödynnetään taulukon 3 arvoja. Taulukossa 4 on esitettyä eri kaasumäärillä määritetyt tilavuusvirrat paineen funktiona. Taulukon arvot on määritelty lämpötilan arvolla 5 °C.

Taulukko 4. Biometaanin tilavuusvirtoja erilaisilla vuosittaisilla siirtomäärillä.

Kaasun tilavuusvirta [m ³ /s]					
T = 5 °C		Kaasumäärä vuodessa [GWh]			
		25	50	75	100
Paine [bar]	1	0,0804	0,1608	0,2412	0,3215
	2	0,0401	0,0802	0,1203	0,1604
	4	0,0200	0,0399	0,0599	0,0799
	6	0,0133	0,0265	0,0398	0,0530
	8	0,0099	0,0198	0,0297	0,0396
	10	0,0079	0,0158	0,0236	0,0315
	16	0,0049	0,0097	0,0146	0,0194
	25	0,0030	0,0061	0,0091	0,0122
	30	0,0025	0,0050	0,0075	0,0100
	50	0,0014	0,0029	0,0043	0,0057

Taulukosta nähdään, että paineen kasvaessa siirrettävän kaasun tilavuusvirta pienenee johtuen kaasun tiheyden kasvusta suuremmissa paineissa. Kaasun vuosimäärän kasvattaminen sen sijaan suurentaa tilavuusvirtaa, sillä suurempi kaasumassa samassa siirtoajassa nostaa tämän arvoa. Sekä paineen että kaasumäärän kasvattaminen samassa suhteessa pitää kuitenkin tilavuusvirran lähes vakiona, esimerkiksi sekä painetta että kaasumäärää kaksinkertaistaessa. Taulukossa on korostettuna tilavuusvirran lasketut arvot paineissa 8 bar sekä 16 bar, jotka ovat yläraja muovisille kaasuputkille sekä alaraja siirto-putkiston luokitukselle.

Kaasuputken suositushalkaisija D voidaan laskea tilavuusvirran qV sekä kaasuvirran virtausnopeuden v pohjalta kaavan 2 avulla. Muovisille kaasuputkille virtausnopeuden suositus on alle 10 m/s (Suomen Kaasuyhdistys ry, 2014, s. 26).

$$D = \sqrt{\frac{4qV}{\pi v}} \quad (2)$$

Esimerkkitapaus – Riihimäen biokaasuputki

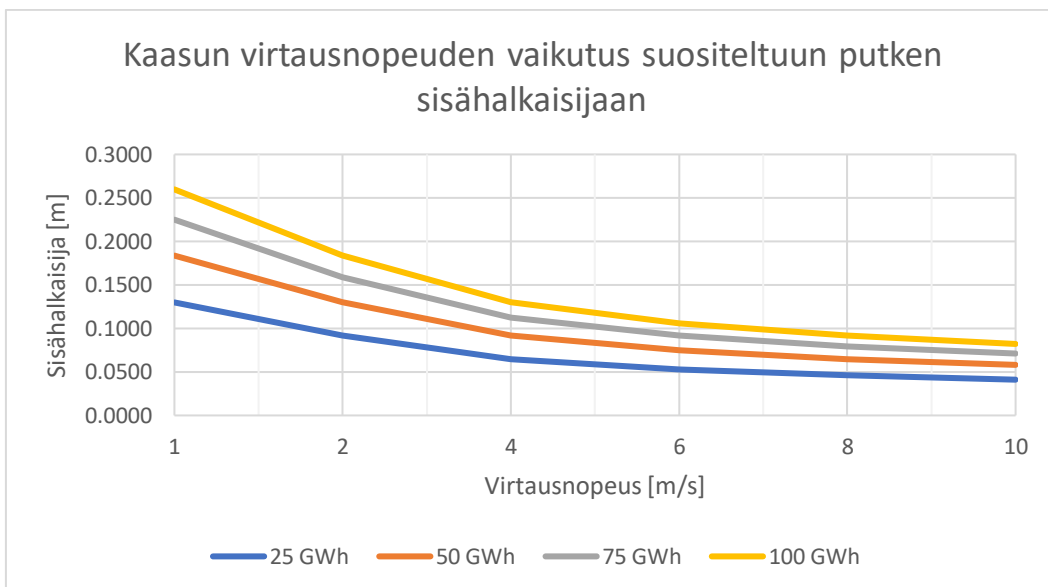
Vuonna 2016 Riihimäellä toimivalta biokaasulaitokselta johdettiin kaasuputki, jolla laitos kytkettiin valtakunnalliseen kaasuverkkoon. Riihimäen biokaasulaitoksen vuosituotanto on 45 GWh, joka on määrältään samaa luokkaa kuin tässä työssä käsiteltävä kaasuputkella siirrettävän biometaanin vuosimäärä. Riihimäen biokaasulaitoksen biometaanille rakennettu kaasuputki on noin 9 kilometriä pitkä, ja siirrettävälle biometaanille valittiin muovinen PE100-kaasuputki, jonka ulkohalkaisija on 160 mm. PE100-muoviputken maksimikäyttöpaine on 8 bar. (Gasum, 2021; Kuusisto, 2017, s. 10.)

Tässä työssä edellä esitettyjen laskukaavojen pohjalta kyseisen Riihimäen biokaasulaitoksen sekä kansallisen kaasuverkon yhdistävän putken virtausnopeudeksi laskettiin 6 bar siirtopaineella 1,44 m/s. Pienemmällä, 2 bar siirtopaineella siirtonopeus olisi 4,37 m/s, eli kaasun virtausnopeus putkistossa on ylärajaan 10 m/s nähden alhainen. Laskussa oletettiin koko tuotannon vuodessa kuljetettavan putkistoa pitkin lämpötilassa 5 °C. Putken sisähalkaisijana laskussa käytettiin oli 145 mm. (Suomen Kaasuyhdistys ry, 2014, s. 27; Kuusisto, 2017, s. 11).

Riihimäen biokaasuputken saatavissa olevien tietojen sekä käytettyjen laskukaavojen pohjalta saatuja arvoja hyödynnetään työssä näiden viitoittaessa valittavia kaasuputken ominaisuuksia.

Kaasuputken suositushalkaisijat eri kaasumäärillä

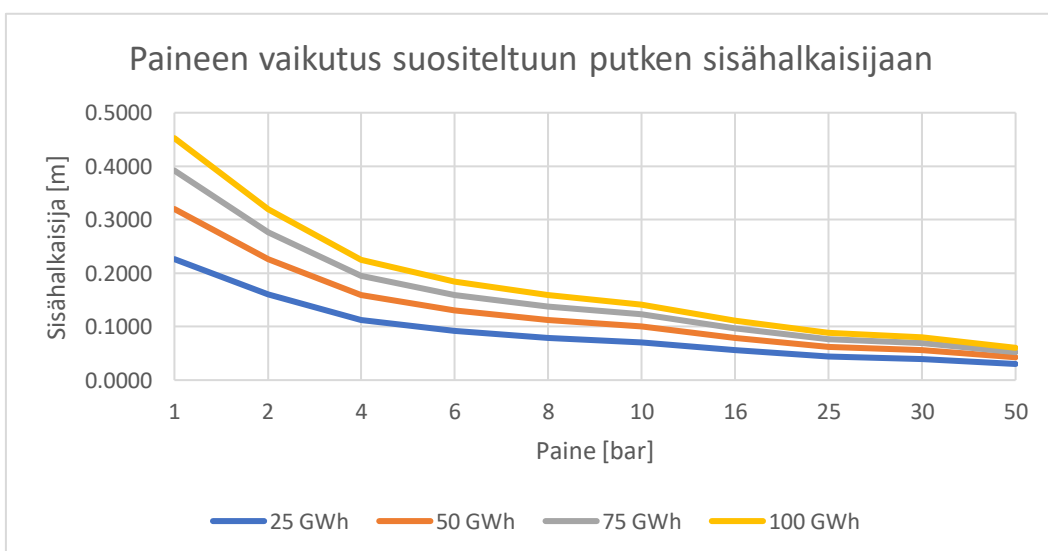
Kuvassa 4 on esitettyjen laskukaavojen ja tilavuusvirtojen avulla määritettyjä kaasuputken sisähalkaisijoita eri kaasun vuosimäärillä virtausnopeuden funktiona. Kuvaajat on määritetty paineen arvolla 6 bar ja pohjautuvat lämpötilan 5 °C mukaiseen kaasun tiheyteen.



Kuva 4. Kaasun virtausnopeuden vaikutus putken sisähalkaisijaan.

Kuvasta nähdään, että virtausnopeuden kasvattaminen pienentää putken suositeltua sisähalkaisijaa, sillä kaasua siirtyy aikayksikköä kohden enemmän. Kaasuputkistoissa kaasun virtausnopeus on usein pieni, ja esimerkiksi tässä työssä hyödynnetyjä laskukaavoja sovellettaessa Riihimäelle rakennetun biokaasuputken ominaisuuksiin, siirtopaineilla 2–6 bar kaasun virtausnopeudeksi laskettiin 4,37–1,44 m/s.

Kuvassa 5 on esitetty vastaavaan tapaan paineen vaikutus putken sisähalkaisijaan eri kaasun vuosimäärillä. Kuvion arvot on määritetty kaasun virtausnopeudella 2 m/s sekä kaasun lämpötilan arvolla 5 °C.



Kuva 5. Kaasun siirtopaineen vaikutus putken suositushalkaisijaan.

Kuvasta havaitaan putken suositushalkaisijan pieneneminen siirtopaineen kasvaessa. Suomen kansallisen kaasuverkon halkaisija vaihtelee välillä DN100–DN1000, ja aikaisemmin esimerkkinä mainittu Riihimäen biokaasuputken ulkohalkaisijaksi on määritelty 160 mm. Muovisten kaasuputkien seinämän minimipaksuuden asetetulla arvolla 14,6 mm on tämän putken sisähalkaisija oletetusti noin 145 mm. Näitä mittoja hyödyntäen tässä työssä tarkastellaan laskettuja suositushalkaisijoiden arvoja, jotka ovat suurempia kuin 100 mm.

Suomessa kaasun siirtoputkeksi määritellään putki, jonka siirtopaine on vähintään 16 bar. Kuvasta 5 nähdään, että siirretyn kaasun määrän on oltava yli 75 GWh vuodessa, jotta putken suositushalkaisija ylittäisi mainitun 100 mm rajan. Esimerkiksi kaasun vuosimäärällä 50 GWh ja virtausnopeudella 2 m/s, 30 bar painetta käyttävän siirtoputkiston suositeltu halkaisija olisi vain noin 57 mm.

Vaihtoehtoisesti myös pienempi kaasun virtausnopeus hieman kasvattaisi suositushalkaisijaa, mutta työssä keskitytään käsiteltävien kaasumäärien pohjalta matalampipaineisten muoviputkien tarkasteluun. Muovisten putkien käyttöä tukevat myös kustannuseikat, sillä teräksiset putkistot ovat kalliimpia, jonka lisäksi suuremmat siirtopaineet lisäävät kompressorin energiankulua ja näin putkiston juoksevia käyttökuluja.

Suomessa voidaan käyttää muovisia putkia kaasun siirrossa, mutta näiden ehtona on paineen ylärajaksi määritelty 8 bar. Muovisten kaasuputkien yleisimmin käytettäviä nimellishalkaisijoita on esimerkiksi DN125, DN160, DN200 ja DN250 (Suomen Kaasuyhdistys ry, 2014, s. 27). Siirtopaineilla 4–6 bar, kaikki käsitellyt kaasun vuosittaiset siirtomäärät 25–100 GWh sopivat virtausnopeudella 2 m/s näihin putkikokoihin.

Kaasuputkistojen pitkän käyttöiän ja kalliin rakennusvaiheen tiimoilta putkikoko mitoitetaan usein sen hetkistä tarvetta suuremmaksi. Tässä tapauksessa esimerkiksi valittaessa putkikooksi DN160 kaasun siirtomäärällä 50 GWh ja siirtopaineella 4 bar, voidaan siirrettävää kaasun määrää lisätä painetta 2 bar kasvattamalla yli 75 GWh vuosimäärään. Muovisen putken painerajan 8 bar siirtopaineella kaasun määrää voisi näillä ominaisuuksilla nostaa 100 GWh asti. Teräksisen putken valinnalla painerajoja ei näissä mittakaavoissa ole, mutta työn mittaluokissa muovisten kaasuputkien rajoitukset eivät tule vastaan.

Pienemmän siirtopaineen mahdollistaman alemman kompressorien energian sekä pienempien materiaalikustannusten vuoksi työn tarkastelua jatketaan muovisten, PE100-luokituksen kaasuputkien myötä. Varsinaisen kaasuputkiurakan kokonaiskustannukset koostuvat merkittävässä osin materiaalikustannusten lisäksi muun muassa työstä, suunnittelusta sekä lupa-asioista, joten putken kokonaiskustannuksia arvioidessa tässä osiossa valittuja ominaisuuksia ei käsitellä yksityiskohtaisesti.

5 Kustannusten arviointi

Kustannusten todellisia määriä voidaan arvioida annuiteettimenetelmällä, joka kuvaa vuosittaisten lainan lyhennysten määrää sekä todellisten kokonaiskustannusten muodostumista. Kustannuksia arvioidaan tässä työssä sekä kirjallisuudessa että vastaavissa selvitystöissä esitettyjen kustannustietojen pohjalta. Kustannustarkastelua varten luodaan eri siirtomenetelmille omat Excel-laskentataulukot, joihin kustannustekijät voidaan sijoittaa ja eri tekijöiden vaikutuksia voidaan verrata.

Kustannusten annuiteetti kuvastaa kokonaisinvestoinnin vuosierän todellisia kustannuksia, jotka saadaan määritettyä pitoajan sekä korkokannan pohjalta laskettavan annuiteettitekijän avulla. Todellisten kustannusten vuosierä saadaan laskettua kaavan 3 avulla kertomalla investointikustannusten kokonaismäärä annuiteettitekijällä I .

$$I = \frac{(1+i)^t * i}{(1+i)^t - 1} \quad (3)$$

, jossa i on laskentakorko ja t pitoaika.

Jotta sekä kaasuputken että maantiesiirron vuosittaisia kuluja voidaan suoraan verrata toisiinsa, valitaan näille yhteinen korkokanta sekä pitoaika. Vastaavissa selvitystöissä on käytetty melko yhtäläisiä arvoja näille tekijöille, ja näiden pohjalta korkokannaksi valitaan 6 % ja pitoajaksi 10 vuotta. Valitut arvot pohjautuvat paremmin konttisiirron todellisiin takaisinmaksuaikoihin laitteiston käyttöiän pohjalta, sillä kaasuputkistojen käyttöikä on useita kymmeniä vuosia. Kustannuksia voidaan kuitenkin eri siirtovaihtoehtojen välillä verrata suoraan käyttämällä samoja korko- ja pitoaika-arvoja.

Eri siirtomenetelmien kustannusarvioita yhdistää lisäksi valittu laitteiston huolto- ja kunnossapitokustannusten osuus. Näitä vuosittaisia kustannuksia arvioidaan tietyllä prosenttiosuudella laitteiston kokonaisinvestoinnista, joka asetetaan työssä arvoon 2 %. Prosenttiosuudella kyetään arvioimaan esimerkiksi kompressorien tai muiden laitteistojen huoltoon ja kunnossapitoon liittyviä käyttökustannuksia.

Kustannusarviot sekä käytetyt kustannustekijät esitellään molemmille vaihtoehdoille erikseen, jonka jälkeen saatuja tuloksia vertaillaan. Kustannusten muodostuminen esitetään kokonaisuudessaan ja investointi-, käyttö- sekä huolto- ja kunnossapitokustannukset eritellään kustannusten jakautumisen selkeyttämiseksi.

5.1 Kaasuputken kustannusten arviointi

Työssä käsiteltäväksi putkeksi ehdotettiin aiemmin sisähalkaisijaltaan 160 millimetrin PE100-muoviputki, jonka maksimikäyttöpaine on 8 bar. Putki kykenee siirtopaineella 4 bar kuljettamaan vuosittain 50 GWh biometaania, ja siirtopainetta lisäämällä kapasiteetti voidaan painerajoitusten mitoissa kaksinkertaistaa.

Kaasuputken rakentamisen kustannukset koostuvat pääosin putken materiaalista, pituudesta ja halkaisijasta, kompressoriasemien kapasiteetista sekä työn kustannuksista. Työhön liittyviä kustannuksia muodostuu myös muun muassa maanmittauksesta, suunnittelusta, valvonnasta, hallinnosta, koroista sekä ennalta arvaamattomista kuluista. (Ulvestad & Overland, 2012, s. 410)

Kaasuputken kustannuksia on erittäin vaikea arvioida tarkasti ennakkoon muun muassa ilman tarkkaa reittisuunnitelmaa, lupa-asioiden selvitystä ja kauttaaltaan tehtyä maanmittausta ja maasto-olosuhteiden selvitystä. Kirjallisuudessa on kuitenkin esitetty erilaisia ominaiskustannuksia kaasuputken rakennuttamiselle, ja näitä hyödyntämällä työssä voidaan arvioida putken kustannuksia Pohjanmaan alueella. Esimerkiksi Gasumin vuonna 2011 toimeksiantamassa kaasuputkiston sekä nesteytetyn kaasun maantiesiirron kustannusvertailussa Gasumin ilmoittama indeksihinta siirtoputkelle on yli 10 kilometrin matkoilla olosuhteista riippuen 350–450 €/m. Kyseinen indeksihinta on DN100-teräsputkelle ja pitää sisällään suunnittelun, työmaavalvonnan, laitteistot, materiaalit, urakoinnin sekä maanhankintakulut. (Kuningas & Kärki, 2011, s. 59.)

Vastaavanlaisen biokaasun siirtokustannusten vertailun diplomityönään vuonna 2015 tehnyt Haimila vertaili biometaanin siirtoa maanteitse eri skenaarioissa sekä näiden ohella myös lyhyehkön biometaaniputken mahdollisuutta. Haimila selvitti työssään laajasti eri kirjallisuuden pohjalta sekä kaasuputkien että konttisiirron investointi- ja käyttökustannuksia, muun muassa markkinoilla olevien kaasun siirtokonttien ominaishintoja ja kaasuputken rakentamiskustannuksia. (Haimila, 2015, s. 2)

Haimila nostaa esiin työssään esimerkin Ruotsista, jossa eräessä biokaasuputkihankkeessa lopullinen PE100 160 mm -muoviputken rakentamisen ominaiskustannus on ollut 83,6 €/m. Haimilan selvityksen mukaan PE100-muoviputkelle materiaalin, kaivuun ja asennuksen kustannukset osuvatkin välillä 75–200 €/m, josta valmiiseen kaivantoon asennetun pelkän putken kustannukseksi mainitaan 20 €/m. Haimila ei omassa selvitystyössään tarkenna valitsemaansa kaasuputken ominaisuuksia, mutta siirtopaineeksi mainitaan suoraan jalostuslaitokselta tuleva noin 7–8 bar. Haimilan työssä kaasuputki kytetään asentamaan niin ikään valmiiseen kaivantoon, joten kaasuputken investointikustannuksena on käytetty pelkkää putken hintaa 20 €/m. (Haimila, 2015, s. 24, 52, 74–76).

Tässä työssä kustannuksia arvioidaan edellä mainituilla muoviputken kustannushaaroilla. Koska varsinaisen kaasuputken materiaalien osuus on vain osa kokonaiskustannuksista ja esimerkiksi harvennuksen, raivauksen, kaivannon ja muiden töiden kustannuksia ei voida tarkasti arvioida, ei työn kustannustarkastelu sisällä tietyn putkikoon tarkkaa kustannusvaikutusta. Putken kustannuksiin katsotaan sisältyvän kaikkien työvaiheiden lisäksi putkiston käytön vaatimat laitteet ja järjestelmät, kuten kromatografit, venttiiliasemat sekä seuranta- ja valvontalaitteistot.

Taulukossa 5 on kirjallisuudessa esitetty kooste kaasuputken kustannuksista eri halkaisijoilla ja eri asennuskohteissa vaativuustason mukaisesti sisältäen putken asennuskulut. Taulukon taustatiedoista ei ilmennyt putken materiaalia tai kustannusten tarkkaa sisältöä, mutta hintatasot vastaavat edellä esitettyjä muovisten kaasuputkien ominaiskustannuksia sisältäen kaikki kustannukset aina materiaaleista kaivuutöihin ja putken asennukseen.

Taulukko 5. Kaasuputken asennuskustannukset eri putkikoille asennuskohteesta riipuen (Hengeveld ja muut, 2014, s. 366).

Ulkohalkaisija [mm]	Sisähalkaisija [mm]	Helppo [€/m]	Normaali [€/m]	Vaikea [€/m]
110	90	40	100	160
160	130,8	80	120	170
200	163,6	98	134	210
250	204,6	123	198	258
315	257,8	135	215	300

Tässä työssä käsitellyn Pohjanmaan kaasuputken sisähalkaisijaksi esitettiin 160 mm, jolloin kaasua voitaisiin siirtää PE100-muoviputken 8 bar maksimipaineella jopa 100 GWh vuodessa. Tämän perusteella taulukosta valitaan ulkohalkaisijaltaan 200 mm putkea vastaava kustannusarvo. Tässä selvitystyössä käytettäväksi Pohjanmaan kaasuputken ominaiskustannukseksi valitaan taulukkoa mukaillen tasaluku 130 €/m. Ominaiskustannuksen oletetaan sisältävän kaikki kustannukset aina suunnittelutöistä valmiiseen ja toimintakykyiseen kaasuputkeen. Putken suunnittelupituudeksi noin 55 kilometrin matkalle valittiin 60 kilometriä. Kaasuputken rakentamisen ja käytön kustannusarviossa käytettävät lähtötiedot on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Kaasuputken rakentamisen kustannusarvion lähtötiedot.

Putken pituus	km	60
Putken ominaiskustannus	€/m	130
Putken kokonaisinvestointikustannus	€	7 800 000
Kompressorin investointikustannus	€	200 000
Huolto- ja kunnossapito (kokonaisinvestoinnista)	%	2

Kaasuputken rakentamisen ja käytön todelliset vuosikustannukset laskettuna edellä esitettyjen lähtöarvojen pohjalta on esitetty taulukossa 7. Kompressorin investointikustannus sekä biometaanin paineistukseen kuluva energiamäärä ja tämän kustannukset on laskettu käyttäen lähteen (Hengeveld ja muut, 2014, s. 366, 370) tarjoamia lähtöarvoja sekä laskentakaavoja. Oletuksena näille laskelmille on käytetty kompressorin kapasiteettia 600 m³/h vastaamaan vuosittaista 50 GWh biometaanin siirtoa, ja paineistuksen lähtötietoina on käytetty paineen nostoa arvosta 2 bar arvoon 6 bar. Kompressorin investointi- ja käyttökulujen laskenta on esitetty liitteissä 1 ja 2.

Taulukko 7. Kaasuputken vuosittaiset kustannukset eriteltynä. Pitoaika 10 vuotta.

Investointikustannukset		
Putki ja laitteistot	€	1 059 770
Kompressori	€	27 174
Yhteensä	€	1 086 944
Käyttökustannukset		
Paineistus	€	21 511
Huolto- ja kunnossapitokustannukset		
Putki ja laitteistot	€	156 000
Kompressori	€	4 000
Yhteensä	€	160 000
Kustannukset eriteltynä		
Investointikulut	€	1 086 944
Käyttökustannukset	€	181 511
Yhteensä	€	1 268 455

Taulukon kustannuserittelystä havaitaan putki-investoinnille tyypillinen pääomakulujen suuri osuus käytön kustannuksiin nähden. Käyttökustannukset erityisesti pienellä siirtopaineella toimivissa kaasuputkissa ovat pienet, sillä kaasun puristukseen kuluu vain vähän energiaa. Tämän lisäksi on myös mahdollista, että alle 8 bar siirtopainetta käyttävät biometaaniputkistot selviävät täysin ilman kompressoria, sillä jalostuslaitoksen ulostulopaine voi olla riittävän suuri putkisiirtoon. Kompressorin ja tämän käytön kulut ovat kuitenkin tässä kustannusarviossa ainoastaan noin 2 % kokonaiskustannuksista, ja tätä merkittävämmät kustannussäästöt voidaan saavuttaa esimerkiksi töitä ja putkimateriaaleja kilpailuttamalla.

Kustannusarvioiden dominoiva tekijä näissä arvioissa on kaasuputken ominaiskustannus, joka määrittää käytännössä täysin putken kustannukset. Ominaiskustannus on hyvin vaikea arvioida ilman tarkkaa suunnittelua, ja arvion sisältämät työt ja laitteistot voivat muuttaa hintaa merkittävästi. Taulukossa 8 on esitetty kaasuputken investoinnin vuosikustannuksia eri putken ominaiskustannuksilla.

Taulukko 8. Kaasuputken ominaiskustannuksen merkitys kokonaiskustannuksiin.

	90 €/m	130 €/m	200 €/m	350 €/m
Investointikustannukset	0,761 milj. €	1,087 milj. €	1,657 milj. €	2,880 milj. €
Käyttökustannukset	0,021 milj. €	0,021 milj. €	0,021 milj. €	0,021 milj. €
Huolto ja kunnossapito	0,112 milj. €	0,160 milj. €	0,244 milj. €	0,424 milj. €
Yhteensä	0,894 milj. €	1,268 milj. €	1,922 milj. €	3,326 milj. €

Taulukkoon valitut ominaiskustannukset on valittu kirjallisuudessa esitettyjen tietojen pohjalta. Arvo 350 €/m on Gasumin indeksihinta DN100-teräsputkelle ja ominaishinta 200 €/m on eräs muovisten kaasuputkien kirjallisuudessa mainittu yläraja. 90 €/m kuvastaa alhaisimman hintaluokan kustannuksia, ja arvo on valittu erään Ruotsissa asennetun biometaaniputken ominaiskulujen nojalla, jotka olivat noin 85 €/m. Ominaiskustannus heijastuu myös suoraan huolto- ja kunnossapitokuluihin, sillä näiden suuruus on laskettu prosenttiosuutena investointikustannuksista.

Taulukossa esitetyt vuosikustannukset eroavat ominaiskustannuksen vaikutuksesta toisistaan merkittävästi. 60 kilometrin matkalla jo yhdenkin euron muutos aiheuttaa vuosittaisiin kustannuksiin noin 9 500 euron muutoksen. Esitetyt kustannusarviot eri kaasuputken ominaiskustannuksilla kuvaavatkin lähinnä putken asentamiskohteen sekä -maaperän haastavuutta. Taulukossa 5 esitettyjen putken asentamiskustannusten vaihtelusta nähtiin, että asentamiskohteen haastavuus saattaa pienillä putkikoilla jopa

nelinkertaistaan tämän kustannukset. Helppokulkuisemman ja esimerkiksi hiekkaisen maaperän asennuskustannukset ovat halvemmat kuin esimerkiksi kallioisen tai kivikkaisen maaperän tapauksessa.

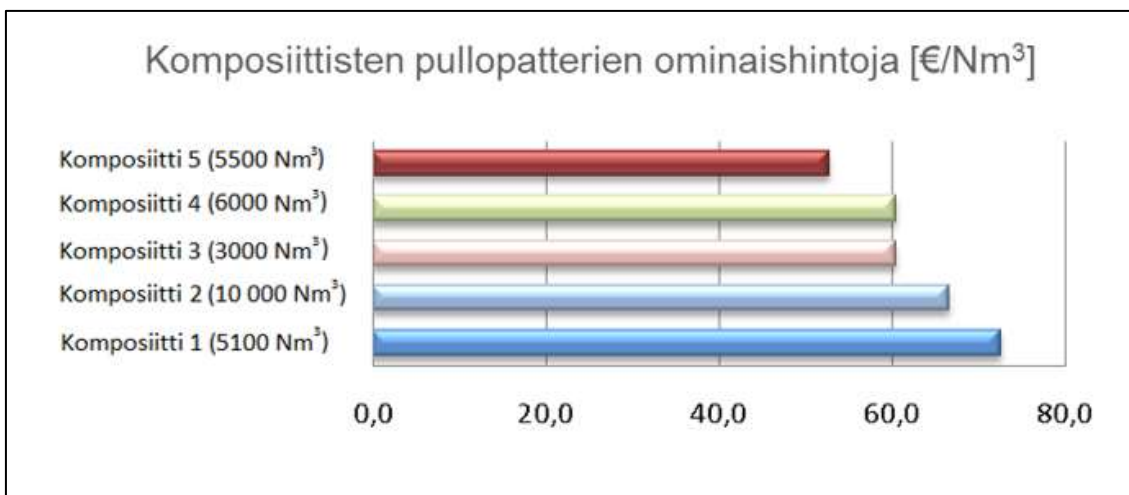
Tämän työn suunnitteluun koostuu pitkälti viljelysmaista sekä metsästä, jonka johdosta esimerkiksi tarvittavat harvennustyöt saattavat nostaa asennuskuluja. Näiden mahdollisten lisäkulojen suuruudesta ei kuitenkaan työssä kyetty tekemään arviota, vaan tarkemman putken rakentamiskustannuksen arvio tarkentuisikin merkittävästi putken reitiltä tehdyn maanmittauksen ja maaston tutkimisen jälkeen.

5.2 Maantiesiirron kustannusten arviointi

Maanteitä ja pullopatteristoja käytettäessä kaasun siirtomäärillä on olennainen merkitys, sillä tämä määrää tarvittavien siirtokonttien kapasiteetin, lukumäärän sekä vuodessa tehtävien ajosuoritteiden lukumäärän. Konttisiirron kustannusarvion pohjana käytetään vuosittaista kaasun siirtomäärää 50 GWh, joka tasaisesti vuoden jokaiselle päivälle jaetuna vastaa noin 14,1 tuhatta normaalikuutiometriä biometaania.

Maanteitä pitkin tapahtuvassa biometaanin konttisiirrossa olennaisessa roolissa on valittu pullopatterien materiaali, joka vaikuttaa sekä kuljetusten massaan että kerralla siirrettävän kaasun määrään. Norjalaisessa Baltic Biogas Bus -projektissa tehdyssä selvityksessä vuonna 2012 todettiin komposiittipullojen tulevan teräspulloja edullisemmaksi suuremmilla kaasumäärillä sekä pidemmällä etäisyyksillä. Selvityksen tarkastelussa tämä toteutui kuljetusetäisyyden kasvaessa yli 40 kilometriin vuosittaisella kaasumäärällä 2 400 000 Nm³. (Hetland & Bjørlykke, 2012, s. 16.)

Komposiitista valmistetut pullopatterit ovatkin tämän työn mittareilla ehdottomat sekä kaasun määrän että siirtomatkan näkökulmasta. Etäisyys maanteitse Jepuan biokaasulaitokselta Stormossenille on noin 65 kilometriä, jonka lisäksi siirrettävä kaasumäärä on tutkimukseen verrattuna yli kaksinkertainen siirrettäessä 50 GWh vuodessa. Näillä etäisyyksillä kuljetuskustannukset ovat merkittävät, ja jokaisen kuljetuksen kaasumäärä tulisi maksimoida. Kuvassa 6 on esitetty komposiittipulloista koottujen pullopatterien ominaiskustannuksia, joka muodostuu siirtokontin myyntihinnan ja tilavuuden suhteesta. Kuvan ominaiskustannukset asettuvat noin välillä 50–75 €/Nm³.



Kuva 6. Komposiittipullojen ominaishintoja hinnan ja tilavuuden mukaan. Muokattu alkuperäisestä lähteestä (Hetland & Bjørlykke, 2012, s. 7).

Työn tarkastelussa suurin kapasiteetti yksittäisellä siirtokontilla oli valmistajan tarjoamien tietojen mukaan 8981 kilogrammaa, joka vastaa noin 12 500 normaalikuutiometriä biometaania. Tämän siirtokapasiteetin omaavaa konttia käyttämällä voitaisiin yhden siirron vuorokausitahdilla kuljettaa noin 44,2 GWh biometaania vuodessa. Kyseisen kontin kustannustietoja ei kuitenkaan ollut julkisesti tarjolla. (Suomen Biovoima Oy, 2021.) Lisäksi kyseinen 45 jalan kontti voi osoittautua logistiikan kannalta haastavaksi.

Tämän vuosittaisen kaasun siirtomäärän ylittävät vuosimäärät vaativat siis keskimäärin vähintään kahden kontin siirron vuorokaudessa. Optimaalinen yhden kontin koko 50 GWh vuosimäärällä olisi kahdella kontilla noin 7050 Nm³, mutta kaasumäärän kasvuun ja ajoittaisten suurempien siirtomäärien kannalta kokoluokka tulisi valita tätä suuremmaksi. Tässä työssä siirtokontin kapasiteetiksi valitaan 7100 Nm³ ja ominaiskustannukseksi kuvaa 6 mukailleen arvo 60 €/Nm³.

Kontin kapasiteetin sekä siirrettävän kaasun vuosimäärän johdosta kaasua on kuljetettava keskimäärin kaksi kertaa vuorokaudessa, jonka vuoksi kontteja valitaan viisi. Tällöin kontteja olisi aina biokaasulaitoksella täyttymässä ja nesteytyslaitoksella tyhjennettävänä kaksi kappaletta, ja viides kontti varmistaisi kaasun tarjonnan jatkuvuuden esimerkiksi häiriötilanteissa. Kuljetusten lukumääräksi valittiin kaksi kertaa vuorokaudessa ympäri vuoden, mutta lisäksi työssä tarkastellaan kustannusvaikutusta tapauksessa, jossa molemmat päivittäiset kontit siirrettäisiin yhdellä ajolla.

Putkisiirtoon nähden konttisiirto vaatii lisäksi tehokkaamman ja näin ollen kalliimman kompressorin, sillä puristusaine on konttisiirrossa vähintään 200 bar. Korkeasta siirtopaineesta johtuen myös kaasun käyttöpäässä eli nesteytyslaitoksella tarvitaan erillinen paineenalennusjärjestelmä kaasun paineen hallittuun alentamiseen. Näiden

investointikustannukset on valittu Haimilan tekemän selvityksen pohjalta, jossa paineenalennusjärjestelmän esimerkkihinnaksi on esitetty 200 000 € ja kompressorin ominaisinnan hintahaarukaksi 500–1580 €/Nm³h-1. Kompressorin kapasiteetilla 600 Nm³/h investointiarvioksi tulee 300 000–948 000 €, josta investointihinnaksi on tässä työssä valittu 500 000 €. Investointikulujen lisäksi myös näiden käyttö maksaa, ja käyttökulujen ominaiskustannuksiksi on asetettu paineistuksen tapauksessa 0,049 €/Nm³ ja paineenalennuksen kohdalla 0,015 €/Nm³. (Haimila, 2015, s. 35, 46.)

Edellä kuvatut biometaanin maantiesiirron kustannusarvion lähtökohdat on koottu taulukoon 9.

Taulukko 9. Kaasun maantiesiirron kustannusarvion lähtökohtia.

Siirtokontin kapasiteetti	Nm ³	7100
Siirtokontin ominaishinta	€/Nm ³	60
Konttien lukumäärä	kpl	5
Kuljetuksen hinta	€/kpl	185
Kuljetusten lukumäärä vuodessa	kpl	730
Kompressorin investointikustannus	€	500 000
Siirtokonttien investointikustannus	€	2 130 000
Paineenalennusjärjestelmän investointikustannus	€	200 000
Paineistamisen ominaiskustannus	€/Nm ³	0,049
Paineenalentamisen ominaiskustannus	€/Nm ³	0,015
Laitteiston huolto- ja kunnossapito (kokonaisinvestoinnista)	%	2

Biometaanin maantiesiirron vuosittaiset kustannusarviot on esitetty seuraavalla sivulla taulukossa 10.

Taulukko 10. Biometaanin maantiesiirron vuosittaiset kustannukset eriteltynä. Pitoaika 10 vuotta.

Investointikustannukset		
Siirtokontit	€	289 399
Kompressori	€	67 934
Paineenalennusjärjestelmä	€	27 174
Yhteensä	€	384 506
Huolto- ja kunnossapitokustannukset		
Siirtokontit	€	42 600
Kompressori	€	10 000
Paineenalennusjärjestelmä	€	4000
Yhteensä	€	56 600
Käyttökustannukset		
Kuljetus	€	135 050
Paineistus	€	245 000
Paineenalennus	€	75 000
Yhteensä	€	455 050
Kustannukset eriteltynä		
Investointikustannukset	€	384 506
Käyttökustannukset	€	511 650
Yhteensä	€	896 156

Taulukon tuloksista havaitaan, että biometaanin maantiesiirron kustannukset painottuvat käyttökulujen puolelle siinä missä putkisiirron kustannukset koostuivat lähinnä investointikuluista. Merkittävin yksittäinen kustannustekijä on kuitenkin tässäkin tapauksessa investoinnit, joita nostaa tarve useaan siirtokonttiin. Tämän jälkeen merkittävimmät ovat kaasun paineistuksen kustannukset sekä varsinaiset kuljettamisen kulut.

Kustannusarviossa ei lasketa erillistä hintaa kuljetuskaluston hankintaan, vaan nämä oletetaan hankittavan erilliseltä kuljetusyritykseltä. Kuljetuksille määritetään oma hintansa, jonka puitteissa kuljetusyrityksen katsotaan vastaavan kaasun kuljetuksesta sekä kalustonsa ylläpidosta. Yhden kuljetuksen hinnaksi valittu 185 € pohjautuu Haimilan vuonna

2015 tekemään vastaavaan selvitykseen, jossa vertailtiin biometaanin putki- ja maantiesiirron kustannuksia. Haimilan työssä etäisyys oli noin 37 kilometriä ja tälle asetettu kuljetuksen hinta 150 € (Haimila, 2015, s. 55). Tässä selvitystyössä hieman pidempi kuljetusetäisyys huomioiden tähän arvioon lisättiin 35 € kattamaan pidemmän matkan tuomat lisäkulut. Lisäkustannus määritettiin karkeasti polttoainekuluihin nojaten, joiden lisäykseksi arvioitiin noin 60 kilometriä kasvavalla ajosuoritteella olevan vajaa 30 €.

Myös maantiesiirron kustannustekijät voivat todellisuudessa erota suuresti tässä työssä esitetyistä arvioista. Esimerkiksi siirtokonttien sekä kompressorin investointikustannukset tai paineistamisen kustannukset voivat erota huomattavasti. Lisäksi työn tapauksessa on mahdollista hyödyntää olemassa olevia laitteistoja, esimerkiksi jo käytössä olevia kompressoreja tai siirtokontteja. Tässä työssä tehtyyn kustannusarvioon kuitenkin sisällytettiin kaikkien eri tekijöiden kustannukset kokonaiskuvan esittämiseksi. Todellisia investointipäätöksiä tehdessä kuitenkin hyödynnettävissä olevien laitteistojen käyttömahdollisuuksia kartoittamalla voidaan saavuttaa merkittäviä kustannushyötyjä ja muuttaa siirtovaihtoehtojen keskinäistä asemaa.

Taulukossa esitetyistä kustannusarvioista on huomattava, että kaasun kuljettamisen kustannukset laskettiin olettaen, että kuljettamiseen tarvitaan kaksi erillistä ajoa. Lisäksi varteenotettava vaihtoehto on pienentää kuljettamisen kustannuksia hyödyntämällä tilavuusluokan yläpäästä olevaa kaasun siirtokonttia, jolloin yhdellä kontilla kuljetettavaa kaasun määrää voitaisiin merkittävästi kasvattaa.

Taulukossa 11 on esitetty näitä skenaarioita kuvaavia kustannusarvioita perustilanteen eli taulukossa 10 esitetyn kustannuserittelyn rinnalla. Taulukon ensimmäinen sarake kuvaa kahden kontin kuljettamista yhdellä kustannukseltaan 225 € olevalla siirtoajolla, kun taas viimeinen sarake kuvaa yhden suuren siirtokontin käyttämistä, jolloin voidaan hankkia vain kolme konttia. Viimeisen sarakkeen kustannusarviot laskettiin kaasukontin tilavuudella 12500 Nm³ ja olettamalla ominaiskustannukseksi 75 €/Nm³.

Taulukko 11. Biometaanin maantiesiirron eri skenaarioiden vuosikustannusten arvioita.

	Yhdistelmäajo	Perustilanne	Yksi suuri kontti
Investointikustannukset	0,385 milj. €	0,385 milj. €	0,477 milj. €
Käyttökustannukset	0,402 milj. €	0,455 milj. €	0,388 milj. €
Huolto- ja kunnossapito	0,057 milj. €	0,057 milj. €	0,070 milj. €
Yhteensä	0,844 milj. €	0,897 milj. €	0,935 milj. €

Mikäli kaksi konttia saataisiin kerralla kuljetettua esimerkiksi yhdistelmäajoneuvon avulla, olisivat kustannukset kymmeniä tuhansia euroja halvemmat vuosittain. Mikäli kustannukset yhdistelmäsiirron kohdalla olisivat raskaammasta kuljetuksesta johtuen kalliimmat, esimerkiksi 250 €/matka, olisivat kuljetuskustannukset vuosittain yhä yli 50 000 € alhaisemmat. Esitetyt vaihtoehtoiset siirtoajojen kustannukset ovat kuitenkin tässä tapauksessa mielivaltaiset. Jotta maantiesiirron kustannukset nousisivat kokonaisuudessaan putkisiirron perustilanteen tasolle, tulisi yhden kuljetuksen hinnan olla noin 700 €, eli yli kolminkertaiset perustilanteeseen nähden. Arviot kuvaavatkin mahdollisia säästöjä kuljetussuoritteiden vähentyessä matkakulujen noususta huolimatta.

Yhden tilavan eli tässä tapauksessa 12500 Nm³ siirtokontin käyttäminen kuitenkin nostaa kokonaiskustannuksia perustilanteeseen nähden. Tilavuuteen sidonnainen kontin korkea ominaiskustannus, joka tässä tapauksessa asetettiin kustannushaarukan yläpään arvoon 75 €/Nm³, nostaa investointikustannuksia huomattavasti. Huolimatta halvemmista kuljetuskustannuksista, perustilanteeseen nähden yhden suuritulavuuksisen kontin kustannukset olisivat noin 40 000 € kalliimmat kuljetusten yksikkökustannusten pysyessä samana. Mikäli suuren tilavuuden siirtokontin ominaiskustannus olisi peruskonttien tasolla arvossa 60 €/Nm³, vuosittaiset kokonaiskulut olisivat kolmelle kontille samaa luokkaa kuin perustilanteessa, eli viidellä tilavuudeltaan 7100 Nm³ kontilla ja kahden siirron vuorokausitahdilla.

Taulukossa esitetyt arviot eri kuljetusskenaarioissa pysyvät kuitenkin suhteellisen lähellä toisiaan, siinä missä putkistoinvestoinnin vuosikustannusarviot muoviputkien luokassa vaihtelivat noin miljoonalla eurolla.

5.3 Kuljetusvaihtoehtojen vertailua

Tässä alaluvussa käydään läpi molempien kuljetusvaihtoehtojen kustannusarvioihin liittyvien muuttujien vaihteluita ja tarkastellaan eri skenaarioiden asemia kuljetusvaihtoehtojen välillä. Taulukossa 12 on esitetty putki- ja konttisiirron kustannusarvioiden perustilanteiden erittelyt. Kustannusarvioiden perustilanteella tarkoitetaan alaluvuissa 5.1 ja 5.2 esitettyjä kustannusarvioita.

Taulukko 12. Kaasuputken sekä maantiesiirron kustannusarvioiden perustilanteet.

	Putkisiirto	Konttisiirto
Investointikustannukset	1,087 milj. €	0,385 milj. €
Käyttökustannukset	0,021 milj. €	0,455 milj. €
Huolto ja kunnossapito	0,160 milj. €	0,057 milj. €
Yhteensä	1,268 milj. €	0,897 milj. €

Taulukosta on selkeästi nähtävillä eri siirtomenetelmien kustannusten muodostuminen. Putkisiirron kustannuksista selkeä enemmistö koostuu investointikulujen lyhennyksistä sekä laitteiston ylläpidosta, kun taas pullopattereihin tapahtuva maantiesiirto jakautuu tasaisemmin käyttö- ja investointikuluihin.

Putkisiirto

Putkisiirtoon liittyvät tarkastelut ulottuvat lähinnä putkiston metrihinnan tarkasteluun, sillä käyttökustannukset ovat erittäin pienet. Ominaiskustannukset kuitenkin muodostuvat hyvin monesta eri tekijästä, joten valmistuneen putkiston lopullinen ominaiskustannus voi olla erilainen. Putkisiirron kustannusten eri skenaarioita sekä maantiesiirron perustilanne on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Kaasuputken vuosikustannusten eri skenaarioiden vertailua maantiesiirron perustilanteen kustannuksiin.

	Konttisiirto	Putkisiirto, 90 €/m	Putkisiirto, ei kompressoria
Investointikustannukset	0,385 milj. €	0,761 milj. €	1,06 milj. €
Käyttökustannukset	0,455 milj. €	0,021 milj. €	0
Huolto- ja kunnossapito	0,057 milj. €	0,112 milj. €	0,156 milj. €
Yhteensä	0,897 milj. €	0,894 milj. €	1,216 milj. €

Taulukossa on esitetty konttisiirron perustilanteen rinnalla kaksi eri putkisiirron skenaariota. Taulukon keskimmaisessä sarakkeessa on esitetty putken ominaiskustannukselle arvo, jolla putkisiirrosta tulee kokonaiskustannuksiltaan halvempi. Putken perustilanne laskettiin ominaiskustannuksen arvolla 130 €/m, mutta arvolla 90 €/m tämän kokonaiskustannukset laskevat aina biometaanin maantiesiirron tasolle. Ominaiskustannus on teoriassa mahdollinen saavuttaa, ja esimerkiksi Ruotsissa vastaavaan suuruusluokkaan on ylletty. Näin matalaan kustannusarvoon pääsy vaatii kuitenkin muun muassa helppokulkuisen asennusympäristön ja hyvin soveltuvan maaperän koko suunnittelualueelle. Kustannusarvion tarkentaminen vaatiikin maaston ja maaperän tutkimusta.

Taulukon viimeisessä sarakkeessa on skenaario, jossa kompressorin investoinnilla ja käytöltä vältytään. Tämä on mahdollista, mikäli jalostuslaitokselta tulevan biometaanin paine on valmiiksi suuri. Matalapaineisen kaasuputken tapauksessa tämä on mahdollista saavuttaa, ja työn tapauksessa saavutettavat kustannusvähennykset olisivat noin 50 000 € vuodessa. Kompressorin poisjättämisellä yhdessä putkisiirron ominaishinnan arvolla 95,5 €/m saavutettaisiin konttisiirron perustilanteen kustannustaso.

Työn kustannusarviossa putkisiirron tulokset ovat suuruudeltaan hyvin vaihtelevat. Tulokset muodostuvat käytännössä täysin ominaiskustannuksen perusteella, jonka arviointi ilman maaston ja maaperän tuntemusta on liki mahdotonta. Pienetkin haasteet suunnitteluympäristössä saattavat aiheuttaa merkittäviä muutoksia ominaiskustannuksiin, joissa jo yhdenkin euron muutos näkyy vuosittaisissa kustannuksissa lähes kymmenen tuhannen euron heittona.

Maantiesiirto

Maantiesiirron kustannusarviot ovat putkisiirtoon nähden joustavammalla, sillä tämän kustannusrakenne koostuu useammasta tekijästä. Koska edellisessä osiossa tarkasteltiin, millä tekijöillä putkisiirron kustannukset laskisivat maantiesiirron tasolle, tässä osiossa tehdään lyhyt katsaus siihen, millä keinoin konttisiirron kustannukset nousisivat putkisiirron perustilanteen tasolle. Muulloin konttisiirron kustannusarviosta saadut tulokset puoltavat ensisijaisesti siirtovaihtoehdon kustannustehokkuutta putki-investointiin nähden.

Tämän työn kustannusarvioissa biometaanin maantiesiirto nousee putki-investoinnin tasolle vain epätodennäköisten muuttujien myötä. Esimerkiksi investointikulujen tulisi nousta nykyisestä alle kolmesta miljoonasta eurosta yli viiteen miljoonaan, joka tarkoittaisi esimerkiksi siirtokonttien ominaiskustannusten nousua yli kaksinkertaiseksi. Käyttökustannusten nousu taas vaatisi esimerkiksi yhden kuljetuksen hinnan nousua yli kolminkertaiseksi tai paineistuksen energiankulutuksen nousua yli kaksinkertaiseksi.

Vaikka työssä käytetyt kustannusarvot muuttuisivatkin lopulta merkittävästi, ovat putkisiirron asettamat hintakatot maantiesiirrolle hyvin kaukana. Olennaista on siis investointipäätöstä ja siirtovaihtoehdon valintaa tehdessä selvittää tarkasti putken asennusympäristön aiheuttamat kustannukset, koska putki-investoinnin kohdalla on käytännössä mahdollista päästä lähelle konttisiirron kustannuksia.

Kompromissiasetelma

Työssä koottiin lisäksi yksittäinen skenaario kuvaamaan lopputulosta, jossa kustannusarviot asettuvat lähelle toisiaan. Valitussa tapauksessa molempien kustannusten vuosisummat kohtaavat noin miljoonan euron kohdalla. Seuraavalla sivulla esitetyn taulukon 14 tulokset toteutuvat, kun putken ominaiskustannus on 110 €/m ilman kompressoria ja konttisiirron tapauksessa yhden ajosuorituksen hinta nousee arvoon 250 € ja viiden 7100 Nm³ kontin ominaishinta asettuu arvoon 70 €/Nm³.

Taulukko 14. Kompromissivaihtoehdon kustannuserittely.

	Putkisiirto	Konttisiirto
Investointikustannukset	0,897 milj. €	0,433 milj. €
Käyttökustannukset	-	0,503 milj. €
Huolto- ja kunnossapito	0,132 milj. €	0,064 milj. €
Yhteensä	1,029 milj. €	1,00 milj. €

Kustannusarvioiden kompromissitapaus voitaisiin saavuttaa myös muita kustannustekijöitä säätelemällä, mutta tässä tapauksessa esiin nostettiin herkimmin muuttuvien kustannustekijöiden vaihtelua. Esimerkiksi konttisiirron kuluja voi nostaa suoraan pelkät suurempikapasiteettiset siirtokontit ominaiskustannuksen pysyessä ennallaan. Kompromissiskenaario osoittaa, että molempien siirtovaihtoehtojen kustannusarviot ovat herkkiä muutoksille, ja kuljetusmenetelmän lopullinen valinta saattaa vaatia myös muiden näkökulmien, esimerkiksi ympäristövaikutusten, kuljetusmenetelmän luotettavuuden ja tulevaisuuden näkymien huomiointia.

20 vuoden pitoaika

Kaasuputken todellinen pitoaika on kymmeniä vuosia, ja komposiittipulloilla voidaan saavuttaa jopa 20 vuoden pitoaika. Tarkastusväli komposiittipulloille on 10 vuotta ja tarkastuksen läpäisseet pullot saavat taas olla toiminnassa seuraavan tarkastusvälin. Tämän vuoksi lopuksi laskettiin vielä kustannuserittelyt perustilanteille tilanteessa, jossa pitoaikana sovelletaan 10 vuoden sijasta 20 vuotta. Tulokset esitetään taulukossa 15. Pitoajan pidentyessä vuosikustannusten ero kaventuu merkittävästi vaihtoehtojen erilaisen kustannusrakenteen vuoksi.

Taulukko 15. Kustannuserittely perustilanteille 20 vuoden pitoajalla.

	Putkisiirto	Konttisiirto
Investointikustannukset	0,697 milj. €	0,247 milj. €
Käyttökustannukset	0,021 milj. €	0,455 milj. €
Huolto ja kunnossapito	0,160 milj. €	0,057 milj. €
Yhteensä	0,878 milj. €	0,759 milj. €

Kaasuputken valintaa mahdollisesti suuremmista kustannuksista huolimatta tukevat muun muassa tämän vähäiset käyttökulut, siirron luotettavuus, mahdollisuus kapasiteetin huomattavaan lisäykseen vain pienillä lisäkustannuksilla sekä pitkä käyttöikä. Kaasuputken investoitaessa kaasun tuotannon sekä kysynnän pysyvyys on kuitenkin pitkistä takaisinmaksuajoista johtuen hyvin tärkeää.

6 Vedyn sekoittaminen biokaasuverkkoon

Tämän työn tutkimustavoitteisiin sisältyi myös vedyn ja biometaanin sekoittamisen mahdollisuuksien kartoittaminen kaasuputkiverkostossa. Muun muassa Euroopassa uskotaan vedyn tuotannon ja kysynnän kasvavan tulevien vuosikymmenten aikana merkittävästi, ja vetyinfrastruktuurin kehittymisen uskotaan nojaavan vahvasti olemassa olevaan maakaasuinfrastruktuuriin tämän kysynnän laskiessa ja vapautuvan kapasiteetin nousussa. Vedyn kuljettaminen putkistoissa on turvallinen ja toimivaksi todettu keino, ja Euroopassa toimii nykyisin jo noin 1 600 kilometriä pääosin teollisuuslaitosten välisiä vedyn siirtoputkia. (Wang ja muut, 2020, s. 1, 5, 9.)

Myös Suomessa vetyinfrastruktuurin uskotaan kehittyvän samoihin aikoihin kuin Euroopassakin. Koska kaasuputkien käyttöikä on useita kymmeniä vuosia, Pohjanmaan alueelle potentiaalisesti rakennettava kaasuputki tulisi todennäköisesti todistamaan tätä siirtymää. Tämän valossa työssä tehdään katsaus suunnitellun Pohjanmaan kaasuputken mahdollisuuksiin vedyn kuljettajana tulevaisuudessa.

Vedyn tuotanto- ja kysyntämäärien ollessa vielä alhaiset, on vetytulevaisuuden siirtymävaiheen alussa järkevää pyrkiä lisäämään tämän tarjontaa sekoittamalla sitä maa- tai biokaasuverkostoihin. Vaikka perinteiset vedyn tuotanto- ja kuljetusmenetelmät ovat suhteellisen hyvin tunnettuja, tämän sekoittaminen säilytys- ja kuljetustarkoituksessa on erittäin riippuvainen maakaasuputkistojen olosuhteista ja vaatii yhä lisätutkimuksia. (Melaina ja muut, 2013, s. 6.)

Yleisesti ottaen vedyn ja biometaanin kaasuseosta voidaan käyttää sellaisenaan useimmissa sovelluksissa ja käyttölaitteissa vedyn osuuden ollessa alle 15 til-% ilman, että siitä aiheutuu haittaa laitteille, putkistoille tai turvallisuudelle. Vedyn maksimisekoitussuhteen kuitenkin määrittelevät vallitsevat olosuhteet, jotka voivat tapauskohtaisesti vaihdella huomattavasti. Maksimisekoitussuhde riippuu muun muassa kaasun koostumuksesta, käyttösovelluksesta ja käyttölaitteiden iästä. (Melaina ja muut, 2013, s. 5, 7.)

Yksi vedyn putkisiirtoon liittyvä huomio on vetymolekyylin pienempi koko verrattuna metaanimolekyyliin, joka lisää huomion tarvetta putkiston ja käyttölaitteiden tiiveydelle. Eri kaasuille määritetyt läpäisevyyskertoimet ovat useimmissa tiivisteaineissa vedylle suuremmat kuin metaanille, mutta tästä huolimatta kaasujen läpäisevyysmäärät niin metaanille kuin vedyllekin ovat korkeammat varsinaisessa PE-putkessa kuin putkien välisissä tiivistekohdissa. Suurimmat kaasuhäviöt aiheutuvatkin ensisijaisesti putken seinämien läpi johtuen näiden suuresta pinta-alasta putken kokonaismatkalla. Varsinaiset häviöiden määrät sekoitettaessa metaania ja vetyä vaativat kuitenkin tarkempia tutkimuksia, mutta erään hollantilaisen tutkimuksen tulokset ovat ennustaneet kaasuvuodon olevan 0,00005 % vetytippoisuuden ollessa 17 %. (Melaina ja muut, 2013, s. 10.)

Yksi olennaisimmista huomioista liittyen vedyn kuljettamiseen putkistoissa on tämän aiheuttama terästä haurastuttava vaikutus. Varsinaiset vedylle suunnitellut putkistot on suojattu tältä vaikutukselta, ja alun perin maa- tai biokaasullekin määritetyt putkistot voidaan suojata jälkikäteen asennettavalla putken sisäpinnan pinnoitteella. Vedyn terästä haurastuttava vaikutus ilmenee kuitenkin lähinnä suurilla, yli 50 %:n vetytitoisuuksilla sekä korkeilla siirtopaineilla pitkän aikavälin kuluessa. Maa- tai biokaasun siirtoverkoissa tyypillisesti käytettävät paineet ja putkistojen kuormitustasot eivät luo erityisiä huolenaiheita metallisilla tai PE-muovisille putkistoille vedyn aiheuttamien vikojen tai kuluttavan vaikutuksen valossa. Varsinainen sekoittaminen ei siis luo merkittäviä huolenaiheita, vaikkakin olosuhteiden valossa tämän vaikutukset on aina tapauskohtaisesti selvitettävä. (Melaina ja muut, 2013, s. 7, 9.)

Vedyn lisääminen metaanikaasun joukkoon voi kuitenkin ensisijaisesti vaikuttaa käytettävien kaasumittarien toimintaan. Kaasumittarien tarkkuuteen liittyvät poikkeamat kuitenkin vaihtelevat käytettävän mittarin tyyppin mukaan, ja paikoin vanhoja mittareita voidaan hyödyntää pelkän uudelleenkalibroinnin myötä. Edellytyksenä on kuitenkin vedyn puhtaus, sillä mahdollisten epäpuhtauksien vaikutusta ei ole tarkasti vielä tutkittu. (Melaina ja muut, 2013, s. 9.)

Kaiken kaikkiaan aiheesta tehdyt tutkimukset ja selvitykset osoittavat, että vetyä voidaan kuljettaa suuriakin määriä maakaasuun sekoitettuna ilman merkittäviä laite- tai materiaali muutoksia. Eri kaasuputkiosuuksien olosuhteet sekä käytetyt laitteistot ja materiaalit yhdistettynä vedyn sekoitussuhteeseen kuitenkin tekevät jokaisesta tapauksesta uniikin, ja nämä on tarkasteltava aina tapauskohtaisesti.

Työssä tarkastellun Pohjanmaan kaasuputken suunnitelman mukaan vetyä voitaisiin putkeen syöttää suuriakin määriä ilman merkittäviä muutoksia. Samassa paineessa ollessaan vedyn energiasisältö kuutiometriä kohden on noin kolmasosa maakaasuun verrattuna (Wang ja muut, 2020, s. 10). Työssä luodulle ehdotukselle Pohjanmaan kaasuputkeksi arvioitu suurin biometaanin siirtomäärä energiayksikössä oli noin 100 GWh, joka normaaliolosuhteissa vastaa noin 10 miljoonaa kuutiometriä. Mikäli vetyä siirrettäisiin näissä oloissa esimerkiksi sekoitussuhteessa 25 %, olisi siirrettävät energiamäärät karkeasti arvioituna 75 GWh biometaanina ja 8 GWh vetyä.

Putken suunnitteluvaiheessa vedyn sekoittamisen mahdollisuus olisi hyvä ottaa huomioon ja tarkastella esimerkiksi valittavan kompressorin, kaasukromatografien sekä käytettävän putkiliitosmateriaalien tiiveysominaisuuksia ja soveltuvuutta vetykäyttöön. Tämän lisäksi työn tapauksessa vedyn sekoittaminen vaatii lisäksi biometaanin käyttöpäässä kaasujen erottelujärjestelmän, jotta biometaani voidaan nesteyttää. Kaiken kaikkiaan vedyn sekoittaminen myös Pohjanmaalle mahdollisesti rakennettavaan kaasuputkeen on täysin mahdollista riippumatta valitusta siirtopaineesta tai putkimateriaalista.

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän työn tavoitteena oli luoda kustannusarvio Pohjanmaalle sijoitettavalle biometaanin siirtoputkelle sekä verrata tämän kokonaiskustannuksia biometaanin kuljettamiseen maanteitse. Tämä pyrittiin saavuttamaan mitoittamalla kahden Pohjanmaalla toimivan biokaasulaitoksen välille kaasuputki sekä määrittämällä tälle eri kaasun siirtomäärien pohjalta parhaiten soveltuva materiaali, halkaisija sekä siirtopaine. Näihin ominaisuuksiin nojaten työssä luotiin kokonaiskustannuksia kuvaava arvio putken rakentamiselle ja käytölle, jota vertailtiin vastaavasti luotuun arvioon maantiesiirron kustannuksista. Työssä tarkasteltiin lisäksi vedyn biometaanin sekoittamisen mahdollisuutta putkiverkostossa.

Työn tarkastelussa nesteytyslaitoksen sijainniksi ehdotettiin Vaasan seudulla toimivan Stormossenin biokaasulaitoksen tonttia muun muassa kaupunkiseudulla jo olemassa olevan nesteytetyn biometaanin kysynnän vuoksi. Laitoksen sijainti määritettiin myös tutkittavan kaasuputken päätepisteeksi, ja reitin lähtöpaikaksi valittiin Uusikaarlepyyssä toimiva Jepuan Biokaasun tontti. Valittu reitti on pituudeltaan noin 56 kilometriä ja koostuu pääosin metsästä ja viljelysmaista, jonka lisäksi vesistöjä ja maanteitä osuu reitille vain muutama. Reitillä varrella olevasta yksittäisestä pienehköstä pohjavesialueesta huolimatta ehdotetulla reitillä ei havaittu esteitä tai merkittäviä haasteita putken rakentamiselle, mutta tarkempi maasto-olosuhteiden selvittäminen on ehdotonta kustannusarvioiden tarkentamiseksi.

Biometaaniputken ominaisuuksia tarkasteltiin vuosittaisilla kaasun siirtomäärillä 25–100 GWh perustuen nesteytyslaitoksen suunniteltuun vuosikapasiteettiin. Työssä todettiin 50 GWh:n siirtomäärälle soveltuvan sisähalkaisijaltaan 160 millimetrin putki siirtopaineella 4 bar, jolloin kapasiteetti voidaan tuplata vain siirtopainetta korottamalla. Tämän perusteella putkimateriaaliksi valittiin muovi, joka materiaalina sekä alhaisen siirtopaineen myötä on kustannuksiltaan huomattavasti edullisempi kuin teräksestä valmistetut korkeapaineiset kaasuverkostot.

Molempien siirtomenetelmien kustannuksia arvioitiin annuiteettimenetelmällä 10 vuoden pitoajalla sekä 6 % korkokannalla. Kustannusarvioita esitettäessä todettiin erityisesti putkisiirrossa käytettyjen kustannusarvojen herkyys, sillä suunnitteluprosessi ja tämän myötä myös lopulliset kustannukset ovat hyvin alttiita muutoksille. Kaasuputken omien kokonaiskustannusta muuntamalla muovisen kaasuputken kustannushaarukaksi saatiin noin 0,90–1,92 miljoonaa euroa vuosittain. Vaihteluväli kuvaa työn tarkastelussa pääasiassa reitin rakentamisolosuhteiden haastavuutta. Maantiesiirron kustannusvaihtelua tarkasteltiin varioimalla kuljetusajojen ja käytettävien siirtokonttien määrää, kuljetuskustan-

nuksia sekä laskenta-aikaa, ja vuosittaisiksi kokonaiskustannuksiksi saatiin 0,76–0,94 miljoonaa euroa.

Siirtomenetelmien kokonaiskustannusten todettiin olevan hyvin herkkiä yksittäisten tekijöiden muutoksille, ja todellisuudessa vaihtoehtojen loppukustannukset tarkkojen olosuhteiden selvitysten jälkeen saattavat olla hyvinkin lähellä toisiaan. Kuljetusmenetelmän lopullinen valinta edellyttääkin kustannustarkastelun lisäksi myös muiden näkökulmien, kuten ympäristövaikutusten ja tulevaisuuden näkymien huomioon ottamisen. Kaasuputken rakentamista tukevat muun muassa joustavuus siirtokapasiteetin merkittävään lisäykseen, pitkä käyttöikä, luotettavuus sekä edulliset ja vakaat käyttökulut, kun taas maantiesiirron etuna on tämän joustavuus sekä pienemmät investointikulut. Työssä saadut tulokset osoittavat ennen kaikkea putkihankkeen olevan Pohjanmaan alueelle täysin realistinen vaihtoehto, joka sekä toteutettavuudeltaan että kustannuksiltaan on toteutettavissa.

Työssä tehtiin katsaus myös mahdollisuuksiin kuljettaa kaasuputkessa vetyä biometaanin sekoitettuna. Aiheesta on tehty erityisesti Euroopassa tutkimuksia, sillä maakaasun kysynnän laskiessa tämän infrastruktuurista vapautuu aikanaan paljon kapasiteettia, jonka uudelleenkäyttö vedyn siirtoon on houkutteleva näkökulma. Yleisesti ottaen vetyä voidaan sekoittaa maa- tai jalostettuun biokaasuun suuriakin määriä ilman merkittäviä kaasuhäviöitä, käyttölaitteiden ongelmia tai putkiosuuksien haurastumisia. Pohjanmaan biokaasuputken kohdalla vedyn sekoittamisen vaihtoehto olisi hyvä ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa, jolloin esimerkiksi käytettyjen tiivisteiden, kaasumittarien ja kompressorien hankinnassa voitaisiin ottaa huomioon soveltuvuus vetypitoisuuksille. Loppukäytöstä riippuen kaasujen erottelujärjestelmä on tarpeen erityisesti biometaanin nesteytettäessä.

Lähteet

- Ahonen, S. (2010). Alueellinen liikennebiokaasun tuotanto, siirto ja jakelu – esimerkkitapauksena Keski-Suomen maakunta. Jyväskylän yliopisto. Pro Gradu -tutkielma. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ju-201008122457>
- Gasgrid Finland (2021). *Kaasun siirtoverkosto*. Gasgrid Finland. Haettu 27.7.2021 osoitteesta <https://gasgrid.fi/kaasuverkosto/kaasun-siirtoverkosto/>
- Gasum (2021). *Riihimäen biokaasulaitos*. Haettu 29.7.2021 osoitteesta <https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasulaitokset/riihimaen-biokaasulaitos/>
- Haimila, P. (2015). Liikennebiokaasun jakelu Mikkelin seudulla: teknologia-, kustannus- ja kannattavuustarkastelu. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201501231245>
- Hengeveld, E.J., van Gemert, W. J. T., Bekkering, J. & Broekhuis, A. A (2014). When does decentralized production of biogas and centralized upgrading and injection into the natural gas grid make sense? Elsevier. Biomass and Bioenergy. 67. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.05.017>
- Hetland T. I. & Bjørlykke S. (2012). Biogas Transport and Distribution Evaluating Alternatives and Cost Efficiency. Baltic Biogas Bus.
- Hyvönen, O. (2013). Maakaasun paineenvähennysaseman paineenvähennyslaitteen mitoitus. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201312117618>
- Kuningas, E. & Kärki, S. (2011). Biokaasun kuljetus maakaasuverkostoon: kaasumaisen biokaasun putkisiirron ja nesteytetyn biokaasun autokuljetuksen vertailu. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201103223476>
- Kuusisto, L. (2017). Biokaasujakeluputken rakentaminen. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201702052009>
- Maanmittauslaitos (2021). *Pohjavesialueet*. Paikkatietoikkuna. Haettu 27.7.2021 osoitteesta https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/?lang=fi&ver=1.17&zoomLevel=6&coord=371858_7117827&mapLayers=base_35+100+default,base_36+100+,166+100+default&&showMarker=true

- Melaina, M. W., Antonia, O. & Penev, O. (2013). *Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues*. Executive Summary. NREL National Renewable Energy Laboratory.
- Paavola, T. (2019). Keskitetty biokaasulaitos alueellisten ravinnehaasteiden ratkaisijana. *Biokaasu-lehti*, 14–15. Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. Haettu 17.8.2021 osoitteesta https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2019/11/Biokaasulehti-2019_light.pdf
- Suomen Biovoima Oy (2021). *Kaasunsiirtokonttien kokoluokat*. Haettu 6.8.2021 osoitteesta <https://biovoima.com/ratkaisut/kaasunsiirtokontit>.
- Suomen Kaasuyhdistys ry (2014). Maakaasukäsikirja. <https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/maakaasun-kasikirja/>
- Söderena, P., Suomalainen, M., Kajolinna, T., & Melin, K. (2019). *Biometaanin välivarastointi ja varastointi ajoneuvossa: Tulevaisuuden mahdollisuudet*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Tutkimusraportti, No. VTT-R-06978-18
- Ulvestad, M. & Overland, I. (2012). Natural gas and CO2 price variation: Impact on the relative cost-efficiency of LNG and pipelines. Researchgate. International Journal of Environmental Studies. 69:3. <https://doi.org/10.1080/00207233.2012.677581>
- Unitrove (2021). Natural Gas Density Calculator. Verkkosovellus. Haettu 23.6.2021 osoitteesta <https://www.unitrove.com/engineering/tools/gas/natural-gas-density>
- Väylävirasto (2021). *Tienumerointi ja tiekartat*. Haettu 27.7.2021 osoitteesta <https://vayla.fi/vaylista/aineistot/kartat/tiekartat>
- Wang, S., van der Leun, K., Peters, D. & Buseman, M. (2020). *European Hydrogen Backbone - How a dedicated hydrogen infrastructure can be created*. Gas for Climate -projekti. Guidehouse.

Liitteet

Liite 1. Kompressorin investointikustannus putkisiirrossa

Kompressorin investointikustannus / saadaan laskettua kaavalla L1.

$$I = 111,257 + 0,1469C \quad (\text{L1})$$

, jossa C on kompressorin kapasiteetti yksikössä kuutiometriä tunnissa ja investointikustannus I yksikössä tuhatta euroa (Hengeveld ja muut, 2014, s. 366). Vuosittaista kaasumäärää 50 GWh vastaava kompressorin kapasiteetti on noin 588 m³/h, jota mukailleen laskussa käytettiin arvoa 600 m³/h. Näillä arvoilla kaava antaa tuloksen 199,4 tuhatta euroa, jonka pohjalta työssä käytettävän kompressorin investointikustannukseksi valittiin 200 000 €.

Liite 2. Paineistukseen energiatarve ja vuosittaiset kustannukset putkisiirrossa

Paineistamiseen kustannuksia arvioitiin kaavojen L2 ja L3 avulla lähteen (Hengeveld ja muut, 2014, s. 370) lähtötietoja hyödyntäen.

$$W = \frac{ZRT_1}{M} \frac{Nk}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{Nk}} - 1 \right] \quad (\text{L2})$$

$$E = \frac{W}{\eta_{is}\eta_m 3600} \quad (\text{L3})$$

Kompressorin käyttökustannus on laskettu paineistuksen energiantarpeen pohjalta paineistettaessa kaasua paineesta 2 bar paineeseen 6 bar. Käytetyt arvot ja saadut tulokset on esitettyinä taulukossa L1.

Taulukko L1. Biometaanin paineistamisen kulut putkisiirrossa.

Muuttuja	Tunnus	Arvo	Yksikkö
Puristuserroin	Z	0,9977	-
Kaasuvakio	R	8,3145	J/molK
Imulämpö	T1	288,15	K
Ominaislämpösuhde	k	1,304	-
Moolimassa	M	28,97	g/mol
Kompressorivaiheet	N	1	-
Isentrooppinen hyötysuhde	η_{is}	0,6	-
Mekaaninen hyötysuhde	η_m	0,99	-
Imupaine kompressoriin	p_1	0,2	Mpa
Poistopaine kompressorista	p_2	0,6	MPa
Puristukseen vaadittu työ	W	103,31	kJ/kg
Puristuksen vaatima sähköenergia	E	0,0483	kWh/kg

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
Puristuksen vaatima sähköenergia	0,0483	kWh/kg
Sähkön hinta	0,12	€/kWh
Puristuksen hinta	0,00580	€/kg
Kaasua vuodessa (50 GWh)	3711340	kg
Puristuksen hinta (50 GWh/a)	21517	€

Liite 3. Kaasuputken kustannusten laskentataulukko

Korkokanta	6 %	
Pitoaika, vuotta	10	
Annuiteettitekijä	0,135867958	
Putki (sisältää rakentamisen, laitteet, järjestelmät)		
Pituus	m	60 000
Ominaiskustannus	€/m	130
Kokonaisinvestointi	€	7 800 000
Vuosittaiset kulut (annuiteetti)	€	1 059 770
Kokonaiskustannus	€	10 597 701
Kompressori		
Kokonaisinvestointi	€	200 000
Vuosittaiset kulut (annuiteetti)	€	27 174
Kokonaiskustannus	€	271 736
Käyttökulut		
Sähkön hinta	€/kWh	0,12
Kompressorin sähköenergian tarve (2 -> 6 bar)	kWh/kg	0,0483
Kaasun määrä vuodessa (50 GWh)	kg	3 711 340
Kompressorin käyttökustannukset vuodessa	€	21 511
Huolto- ja kunnossapitokulut		
Osuus kokonaisinvestoinnista		2 %
Putki (sisältää laitteet ja järjestelmät)	€	156 000
Kompressori	€	4 000
Vuosittaiset huolto- ja kunnossapitokulut	€	160 000
KULUT YHTEENSÄ		
Putki	€	1 059 770
Kompressori	€	27 174
Paineistus	€	21 511
Huolto- ja kunnossapito	€	160 000
Vuosittaiset kulut	€	1 268 455
Kokonaiskustannus	€	12 684 546

Liite 4. Maantiesiirron kustannusten laskentataulukko

Korkokanta	6 %	
Pitoaika, vuotta	10	
Annuiteettitekijä	0,135867958	
Kompressori		
Kompressori		500 000 €
Vuosittaiset kulut (annuiteetti)	€	67 934 €
Kokonaiskustannus	€	679 340 €
Siirtokontit		
Yhden kontin kapasiteetti	Nm3	7100
Ominaishinta	€/Nm3	60
Yhden kontin hinta	€/kpl	426 000 €
Konttien lukumäärä	kpl	5
Kokonaisinvestointi	€	2 130 000 €
Vuosittaiset kulut (annuiteetti)	€	289 399 €
Kokonaiskustannus	€	2 893 988 €
Paineenalennusjärjestelmä		
Paineenalennuskontti	€	200 000 €
Vuosittaiset kulut (annuiteetti)	€	27 174 €
Kokonaiskustannus	€	271 736 €
Huolto- ja kunnossapitokulut		
Osuus kokonaisinvestoinnista	2 %	
Kompressori	€	10 000 €
Siirtokontit	€	42 600 €
Paineenalennusjärjestelmä		4 000 €
Huolto- ja kunnossapitokulut vuodessa	€	56 600 €
Siirtokulut		
Siirtoajat	kpl	730
Yhden ajon hinta	€/kpl	185
Siirtokulut vuodessa	€	135 050 €
Kompressointi- ja paineenalennuskulut		
Kuljetetun kaasun määrä	Nm3	5 000 000
Kompressoinnin ominaiskustannus	€/Nm3	0,049
Paineenalennuksen ominaiskustannus	€/Nm3	0,015
Kompressoitokulut vuodessa	€	245 000 €
Paineenalentamiskulut vuodessa	€	75 000 €
KULUT YHTEENSÄ		
Kompressori	€	67 934 €
Siirtokontit	€	289 399 €
Paineenalennuskontti	€	27 174 €
Siirtokulut	€	135 050 €
Kompressoitokulut	€	245 000 €
Paineenalennuskulut	€	75 000 €
Huolto- ja kunnossapitokulut	€	56 600 €
Vuosittaiset kulut	€	896 156 €
Kokonaiskustannus	€	8 961 563