



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JESSE JOKINEN
MAAKAASUN KILPAILUKYKY JA KÄYTTÖ TULEVAISUUDESSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Jukka Konttinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
9. elokuuta 2017

TIIVISTELMÄ

JESSE JOKINEN: Maakaasun kilpailukyky ja käyttö tulevaisuudessa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 110 sivua, 4 liitesivua

Syyskuu 2017

Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Energia- ja biojalostustekniikka

Tarkastaja: professori Jukka Konttinen

Avainsanat: maakaasu, skenaariotutkimus, energiatalous, CHP, teollisuuden prosessit, polttoaineet

Maakaasun käyttö on vähentynyt Suomessa koko 2010-luvun ajan sen heikentyneen kilpailukykyyn vuoksi. Tässä työssä oli tarkoituksena arvioida, miten maakaasun käyttö kehittyy lähitulevaisuudessa. Tarkasteluvuodeksi valikoitui vuosi 2025. Tutkimusmenetelmänä käytettiin skenaariomenetelmää, jonka etuna on mahdollisuus tarkastella monia erilaisia kehityskulkuja ja tulevaisuuksia.

Tutkimuksen aluksi tutkittiin maakaasun historiaa sekä kilpailukykyyn vaikuttavia tekijöitä sen merkittävimmissä käyttökohteissa. Näiksi valittiin perinteisesti käsiteltävien yhdyskuntien sekä teollisuuden sähkön ja lämmön yhteis- ja erillistuotantojen lisäksi suurimmat teollisuuden prosessit, joita ovat meesauunit, paperinkuivaimet, metalliteollisuuden uunit ja vedyn valmistus. Tämän jälkeen tutkittiin toimintaympäristöä ja sen tulevia muutoksia. Sähkömarkkinat vaikuttavat erityisesti maakaasun suurimman yksittäisen käyttökohteen eli CHP:n kilpailukykyyn eniten suhteessa muihin polttoaineisiin. Sähkön merkittävä halpeneminen voi myös sähköistää muita käyttökohteita. Sähkön hinta on kytköksissä moniin asioihin, minkä vuoksi sen tulevan suunnan arviointi osoittautui hankalaksi. Tämän vuoksi se valittiinkin toiseksi skenaarioiden luomisessa käytetyksi päämuuttujaksi. Suomessa maakaasun asema riippuu myös biomassan asemasta energiantuotannossa, mistä tulikin toinen päämuuttuja.

Työskentelyn tuloksena saatiin neljä skenaariota. ”Sipilän biotalous” -skenaariossa Sipilän hallituksen energia- ja ilmastostrategian tavoitteet toteutuvat. Skenaariossa metsäbiomassan ja turpeen käyttö lisääntyy entisestään, mutta myös maakaasun asema on kohtuullinen öljyn ja hiilen käytölle asetettujen rajoitusten vuoksi. ”Tiukat tavoitteet, korkeat hinnat” -skenaariossa kiristyvät ilmasto- ja ympäristörajoitukset lisäävät puhtaan ja tehokkaan maakaasun käyttöä muiden polttoaineiden kustannuksella. Energiatehokkuusvaatimukset kuitenkin vähentävät esimerkiksi prosessikäyttöä. ”Sähköistetty yhteiskunta” -skenaariossa lisääntyvä päästötön ydin- ja tuulivoima sekä sähkömarkkinaintegraatio laskevat sähkön hinnan pysyvästi todella edulliselle tasolle, mikä vähentää kaikkien polttoaineiden käyttöä ratkaisevasti. ”Menetetty biomassa” -skenaariossa metsäbiomassan käyttöä rajoitetaan EU-tasolla, mikä vie pohjan Suomen energiastrategialta ja taloudelta. Energiaratkaisut siirtyvät lähemmäs eurooppalaista hiilen ja kaasun käyttöä.

Yhteenvedon mukaan maakaasun kulutuksen arvioidaan pysyvän nykyisellä tasollaan tai hieman nousevan. Maakaasun valttina tulevaisuudessa on sen asema puhtaimpana ja vähäpäästöisimpänä fossiilisena polttoaineena sekä sen useat hyödylliset ominaisuudet erilaisissa sovelluksissa.

ABSTRACT

JESSE JOKINEN: The competitiveness and use of natural gas in the future

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 110 pages, 4 Appendix pages

September 2017

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Engineering

Major: Energy and Biorefining Engineering

Examiner: Professor Jukka Konttinen

Keywords: Natural gas, scenario analysis, energy economy, CHP, Industrial processes, fuels

The use of natural gas has decreased in Finland for the whole 2010s because of its weakened competitiveness. The purpose of this thesis was to estimate how the use of natural gas develops in the near future. The year 2025 was selected as a target year. Scenario analysis was chosen as a research method. The advantage of this method is that it allows to examine different pathways to different futures.

At first the history of natural gas and its technical competitive properties in its most significant uses were studied. These include heat and power production and some industrial processes, which are the lime kilns, paper dryers, metal industry furnaces and production of hydrogen. After this the operating environment and its possible future changes were analyzed. The electricity market affects most the greatest individual application of natural gas CHP. Significant cheapening of electricity can also reduce other uses through electrification. The price of the electricity is linked to many factors which is why the evaluation of its future was difficult. Especially in Finland the use of natural gas also depends on the status of biomass in the energy sector. These two were chosen to be the main variables in scenario analysis.

Four scenarios were obtained as a result of the scenario work. In the "Sipilä's bioeconomy" scenario the objectives of the energy and climate strategy of the government of Sipilä come true. The use of forest biomass and peat continues to increase but the position of natural gas is also fair as there are restrictions set for the use of oil and coal. "Strict objectives, high prices" is a scenario where carbon dioxide and environmental restrictions tighten a lot. This leads to a large increase in the use of clean and efficient natural gas with the cost of other fuels. However, the energy efficiency improvements reduce process use. "Electrified society" is a scenario where climate neutral nuclear power and wind power with the integration of electricity markets have made electricity permanently very cheap. This reduces the use of fuels in every use. "The lost biomass" is a scenario where EU has set restrictions to the use of forest biomass as it is seen as an unsustainable fuel. This leads Finnish energy system and economy to a regression. Finnish energy use moves closer to European use of coal and gas.

As a summary it can be estimated that the natural gas consumption will stay at its present level or rise a little in the future. The main advantage of natural gas will be its status as the least polluting and least carbon dioxide emitting fossil fuel. It also has some advantageous technical properties in different uses.

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin Gasum Oy:lle kevään ja kesän 2017 aikana. Olen hyvin kiitollinen mahdollisuudestani tehdä tämä diplomityö yritykselle. Työ oli aiheeltaan mielenkiintoinen ja opetti paljon suomalaisesta energiakentästä kasvattaen minua kohti energia-alan asiantuntijuutta.

Kiitokset yrityksen puolelta tätä työtä ohjanneelle Ville Pesoselle määrätietoista ja kannustavasta ohjauksesta, Anna Paroselle ponnistuksista diplomityön mahdollistamiseksi sekä professori Jukka Konttiselle joustavasta yhteistyöstä yliopiston puolelta. Kiitoksen ansaitsee myös Gasumin Tampereen huoltokeskuksen väki diplomityömaailmasta irrottaneesta kahvitteluseurasta.

Eriytinen kiitos kuuluu kihlatulleni Maijulle tärkeimmästä tuesta koko opintojen ajalta.

Tampereella, 18.8.2017

Jesse Jokinen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Työn tavoitteet ja rajaus	1
1.2	Tutkimusmenetelmän kuvaus.....	2
1.2.1	Tulevaisuudentutkimus	2
1.2.2	Skenaariotutkimus.....	4
1.2.3	Tutkimusmenetelmän kritiikki.....	6
1.3	Työn kulku	7
2.	TAUSTATIETOA	9
2.1	Maakaasu Suomessa.....	9
2.2	Polttoaineiden käyttöön vaikuttavia tekijöitä.....	14
2.2.1	Maakaasun ominaisuudet	14
2.2.2	Polttoaineiden hinnat.....	16
2.2.3	Polttoaineiden verotus.....	17
2.2.4	Polttamisen päästöt	19
2.2.5	Biomassan kaasutus	22
3.	MAAKAASUN SUURIMMAT KÄYTTÖKOHTEET	23
3.1	Sähkön ja lämmön tuotanto.....	23
3.1.1	Voimalaitostekniikka	24
3.1.2	Yhdyskuntien ja teollisuuden erityispiirteitä	29
3.1.3	Kustannukset	30
3.2	Meesauuni	35
3.2.1	Prosessi.....	36
3.2.2	Perinteiset polttoaineet.....	38
3.2.3	Vaihtoehtoiset polttoaineet	40
3.2.4	Kilpailevat teknologiat.....	42
3.2.5	Tulevaisuus	43
3.3	Paperinkuivaimet.....	44
3.3.1	Prosessi.....	45
3.3.2	Polttoaineet.....	47
3.3.3	Tulevaisuus	49
3.4	Vedyn valmistus.....	50
3.4.1	Prosessi.....	50
3.4.2	Vaihtoehtoiset teknologiat	52
3.4.3	Vedyn käyttökohteet ja tulevaisuus	54
3.5	Terästeollisuuden uunit	56
3.5.1	Unityypit	57
3.5.2	Vaihtoehtoiset teknologiat ja polttoaineet.....	58
3.5.3	Tulevaisuus	60
4.	TOIMINTAYMPÄRISTÖ JA SEN MUUTOKSET	61
4.1	Energia- ja ilmastopolitiikka	61

4.1.1	Tuet ja verot	64
4.1.2	Päästökauppa.....	66
4.1.3	Liikennepolttoaineet.....	68
4.1.4	Biomassan kestävyden määrittely.....	72
4.2	Energiamarkkinat	73
4.2.1	Sähkömarkkinat	74
4.2.2	Kaukolämpö	82
4.2.3	Kaasumarkkinat	84
4.2.4	Muiden polttoaineiden markkinat.....	86
4.3	Talous ja teollisuustuotanto.....	87
5.	SKENAARIOTYÖSKENTELYN TULOKSET	89
5.1	”Tiukat tavoitteet, korkeat hinnat”	91
5.2	”Sipilän biotalous”	92
5.3	”Sähköistetty yhteiskunta”	93
5.4	”Hävitty biomassa”	95
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	97
	LÄHTEET.....	101

LIITE A: SUOMEN JA BALTIAN KAASUVERKOSTOT

LIITE B: VOIMALAITOSLASKELMIEN LÄHTÖTIEDOT

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BAT	Best Available Technology, paras saatavilla oleva tekniikka johon esimerkiksi EU:n päästörajat perustuvat
EU	Euroopan Unioni
CHP	Combined Heat and Power, yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto
GIPL	Gas Interconnector Poland-Lithuania, Puolan ja Liettuan kaasuverkot yhdistävä kaasuputki
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil, vetykäsitelty kasviöljy
LNG	Liquified Natural Gas, nesteytetty maakaasu
NO _x	Nitrous Oxides, typen oksidit
PSA	Pressure Swing Adsorption, kaasujen erotusmenetelmä
SCR	Selective Catalytic Reduction, typenoksidien vähennystekniikka
SNCR	Selective Non-Catalytic Reduction, typenoksidien vähennystekniikka
toe	Tonnes of oil equivalent, yksikkö joka vastaa raakaöljytonnin energiamäärää

1. JOHDANTO

Maakaasun käyttö on vähentynyt koko 2010-luvun ajan. Syynä tähän on ollut esimerkiksi kilpailukyvyyn heikentyminen veromuutosten vuoksi mutta myös yleinen teollisuustuotannon väheneminen ja siirtyminen metsäbiomassaan yleispolttoaineena. Maakaasulla on kuitenkin monia ominaisuuksia, joiden vuoksi sen voisi ajatella nousevan merkittävämpään asemaan alati tiukkenevien ympäristövaatimusten aikana. Se on fossiilisista polttoaineista puhtain ja vähiten hiilidioksidia tuottava. Tässä työssä tutkitaan maakaasun tulevaisuutta Suomessa. Tarkasteluvuodeksi valikoitui vuosi 2025, sillä se on riittävän kaukana jotta muutoksia todennäköisesti tapahtuu, mutta riittävän lähellä jotta tulevaisuutta voidaan arvioida realistisesti.

Maakaasun tulevan kulutuksen arviointi trendiennusteen kautta olisi suhteellisen yksinkertaista, mutta toisaalta myös hyvin lohdutonta luettavaa. Vuosina 2010–2016 maakaasun kulutus on laskenut tasolta 41 TWh tasolle 21 TWh. Kulutuksen lasku on ollut vuositasolla hyvin tasaista ollen keskimäärin 10 % vuodessa. Samaan aikaan maakaasun osuus käytetystä primäärienergiasta on laskenut 10,1 %:sta 5,6 %:iin, keskimäärin 0,75 prosenttiyksikköä vuodessa. [1] Mikäli kehityksen arvioitaisiin jatkuvan samanlaisena, tarkoittaisi se, että maakaasun kulutus olisi vuonna 2025 enää vain 8 TWh. Se vaikuttaa liian pieneltä polttoaineelle, jonka ominaisuudet tekevät siitä muita fossiilisia polttoaineita ympäristöystävällisemmän.

Trendiennusteen sijaan tässä tutkimuksessa menetelmänä käytetään skenaariomenetelmää, jonka etuna on mahdollisuus tarkastella monenlaisia erilaisia kehityskulkuja ja tulevaisuuksia erilaisten epäjatkuvuuskohtien kautta. Menetelmä on kehitetty nykyajalle tyypillisen useita epäjatkuvuuskohtia sisältävän kiihtyvän muutoksen arviointiin. Se sopii erityisesti strategiatyöskentelyyn, sillä sen avulla voidaan varautua myös muihin vaihtoehtoihin kuin yksinkertaisimpaan menneeseen kehitykseen perustuvaan ennusteeseen.

Suomen energiantuotantoa tutkitaan aika ajoin eri intressiryhmien selvityksissä. Usein näissä käsitellään vain yhdyskuntien ja harvemmin myös teollisuuden sähkön ja lämmön tuotantoa. Teollisuuden prosesseja ei yleensä sisällytetä tarkasteluihin. Tässä työssä myös ne otetaan huomioon, sillä ne muodostavat merkittävän osan varsin monipuolisesta maakaasun käytöstä.

1.1 Työn tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena on

- Selvittää maakaasun kilpailukytekijät sen tärkeimmissä käyttökohteissa Suomessa kiinnittäen huomiota myös vähemmän tutkittuihin teollisuuden prosesseihin
- Selvittää toimintaympäristön ja sen mahdollisten muutosten vaikutus maakaasun käyttöön ja kilpailukykyyn
- Muodostaa edellisten avulla näkemys maakaasun asemasta Suomessa vuonna 2025

Työn kohteena on nimenomaan maakaasuverkostosta saatavan maakaasun käyttö. Täten LNG (*Liquified Natural Gas*) eli nesteytetty maakaasu, biokaasu ja synteettinen maakaasu jäävät rajauksen ulkopuolelle joskin osaa työn tuloksista voi soveltaa myös niihin, erityisesti LNG:hen.

1.2 Tutkimusmenetelmän kuvaus

Koska työn lopputuloksena pyritään muodostamaan näkemys maakaasun asemasta lähitulevaisuudessa, on kyse tulevaisuudentutkimuksesta. Menetelmänä käytetään skenaariomenetelmää, jolla pyritään luomaan vaihtoehtoisia tulevaisuuksia yhden ehdottoman ennusteen sijaan. Näin voidaan kattaa suurempi mahdollisten tulevaisuuksien joukko joihin varautua. Tässä luvussa kerrotaan tulevaisuudentutkimuksen ja sen menetelmäksi valitun skenaariotutkimuksen taustateoriasta.

1.2.1 Tulevaisuudentutkimus

Tulevaisuudentutkimuksessa ei nykyisin ole kysymys ennustamisesta, vaan arvojen ja tosiasioiden tiedostamisesta ja perustellusta huomioonottamisesta erilaisia tulevaisuuden kehittämismahdollisuuksia arvioitaessa. Tärkeää on tutkimuksen välineellisyys, eli sillä ja sen tuloksilla pyritään vaikuttamaan myös tulevaisuuden muodostumiseen. Erityisesti on huomattava toivottavat ja ei-toivottavat kehityskulut ja pyrkiä vaikuttamaan näiden toteutumiseen. [2]

Pitkään tulevaisuuden ennustuksia tehtiin vain menneeseen tietoon perustuen. Modernin ajan piirteinä ovat kuitenkin muutoksen kiihtyvä nopeus ja epävarmuus sen suunnasta. Lisääntyvän kompleksisuuden ja epäjatkuvuuskohtien vuoksi ennustuksia ei voida tehdä enää aikasarjoihin ja pitkän aikavälin trendeihin perustuen, sillä nämä perustuvat vain menneisiin tapahtumiin. Tärkeää on myös vakiintuneiden perususkomusten kyseenalaistaminen ja muutoksesta viestittävien signaalien etsiminen. [3] Lisäksi tarkastelukohteet, kuten teknologia, talous ja yhteiskunta, ovat liian monimutkaisia, jotta voitaisiin olettaa vain yhden tulevaisuuskuvan olevan mahdollinen. Ihmisen toiminta on silti rationaalista ja tulevaisuuden muutokset perustuvat hyvin pitkälle ihmisten toimintaan, minkä vuoksi tulevaisuuden mahdollisia kehityskulkuja voidaan kuitenkin arvioida. [2]

Evolutionaarisessa tulevaisuudentutkimuksessa oletetaan, että yhteiskunnallisten systeemien kehitys koostuu vakaan kehityksen vaiheista ja murroksista tai epäjatkuvuuskohdista. Murreksia voidaan ennakoida esimerkiksi heikkojen signaalien perusteella. Seurausten tarkka ennustaminen onkin vaikeaa, sillä murreksen jälkeisellä kehityksen suunnalla on usein monta toisistaan poikkeavaa vaihtoehtoa. Myös yhteiskuntaa pienemmät yksiköt, kuten yritykset tai jopa yksilöt, voivat havainnoida aikajanaansa murresten ja tasaisempien jaksojen kautta. [2] Yksilön elämässä perinteisiä ja helposti ennakoitavia murreksia ovat esimerkiksi peruskouluun, jatko-opintoihin ja työelämään siirtyminen. Näiden välissä oleva aika taas on usein tasaisempaa kehitystä. Vaikeammin ennakoitava murreks voi olla esimerkiksi läheisen kuolema, josta voi jälkikäteen huomata olleen jo heikkoja signaaleja esimerkiksi sairastelun muodossa.

Toimintaympäristö on se näyttämö, jossa tutkimuksen kohteena oleva asia tapahtuu. Toimintaympäristön muutosten tarkastelu on yksi tärkeimmistä vaiheista tulevaisuudentutkimusprosessissa. Aluksi koko toimintaympäristö täytyy määritellä. Tähän kuuluvat ainakin kaikki sosiaaliset, poliittiset, ekologiset, taloudelliset ja lakitekniset rakenteet, jotka vaikuttavat tutkittavaan kohteeseen. Tämän jälkeen voidaan tarkastella asian ympärillä tapahtuvia muutoksia ja arvioida niiden seurauksia. Tarkastelu sisältää erilaisten trendien, ajurien ja heikkojen signaalien tunnistamisen ja analysoinnin. [3]

Ajurit ovat yhteiskunnan ja laajemman tason ilmiöitä, sillä tapahtumat ja ilmiöt ovat joidenkin päämäärien ja tarkoitusten ohjaamia. Ajureilla ei ole suuntaa, mutta ne toimivat ylempällä tasolla päätösten taustalla. Ne voivat olla esimerkiksi tavoitteita, käsityksiä nykytilasta tai muiden oletusten joukko, jota ei kyseenalaisteta. Ajuri voidaan esittää väittämänä, kuten esimerkiksi ”EU:n integraatio tulee kasvamaan”. Eri skenaarioita voidaan muodostaa myös erilaisten määrävien tausta-ajurien perusteella. Esimerkiksi voimakas teknologian kehitys voi olla määrävä tausta-ajuri. [3]

Trendillä tarkoitetaan pitkän aikavälin kehityssuuntaa tai muutoksen kaavaa, josta voidaan tulkita todennäköistä tulevaisuuden kehitystä. Trendien ääripäitä ovat megatrendit ja heikot signaalit. Megatrendillä tarkoitetaan kehityksen suurinta virtausta, joka määrittelee ihmiskunnan kehitystä jopa vuosikymmenten aikavälillä. Tällaiset vaikuttavat jollain tasolla miltei kaikkeen kehitykseen ja päätöksentekoon sekä siten myös tämän työn aihepiiriin. Megatrendeiksi luetaan esimerkiksi globalisaatio, väestönkasvu, kaupungistuminen, digitalisaatio ja ilmastonmuutos. Osin nämä ovat kytköksissä toisiinsa, mutta ne vaikuttavat myös pienempiin trendeihin.

Heikoksi signaaliksi kutsutaan tapahtumaa tai ilmiötä, joka on ensimmäinen indikaatio tulevasta muutoksesta. Usein tässä vaiheessa tulevaa kehitystä on hankala ennakoida, mutta jälkepäin yhteys voidaan helposti nähdä. Tällaisten löytäminen on hankalaa, sillä niillä ei ole aiempaa historiaa. Löytäminen on kuitenkin hyvin tärkeää tulevaisuudentutkimuksessa, mikäli aiotaan tehdä trendeistä poikkeavia ennusteita. Villit kortit ovat hieinan samanlaisia, joskin niitä luonnehtii enemmän äkillisyys ja epäjatkuvuus. Villien

korttien todennäköisyys on usein pieni, mutta seuraukset suuria. [3]. Villejä kortteja ja heikkoja signaaleja tulkittaessa on tärkeää ymmärtää ilmiön ja sen seurausten toimintamekanismit [3], minkä vuoksi tässäkin työssä käydään asiaan liittyvä taustateoria huolellisesti läpi. Kenties tunnetuin esimerkki edellisistä lienee Internet, jonka kehitystä ja tulevaa vaikutusta moni tuskin osasi ennustaa vielä 80-luvulla, kun se oli lähinnä Yhdysvaltain armeijan ja yliopistojen kommunikointikeino. [2] Yleisesti ottaen trendit ovat selitettäviä muuttujia, kun taas ajurit ovat muutosta selittäviä tekijöitä [3].

Tulevaisuudentutkimuksessa on monia perinteisiä sudenkuoppia, joihin tässä työssä pyritään olemaan astumatta ne tiedostamalla. Nämä liittyvät pääsääntöisesti ajattelutavan jäykkyyteen. Esimerkiksi ”tässä se nyt on”-ajattelutavassa uskotaan nykyisen tilanteen olevan kehityksen lopputulos, joka tuskin tulee muuttumaan tulevaisuudessa. Tällainen ajattelutapa on todistettu esimerkiksi tekniikan historian aikana lukemattomia kertoja vääräksi, eikä siihen kannata nytkään tuudittautua. Hieman samantapaista naiiviutta edustaa trendiajattelu, jossa uskotaan asioiden jatkavan aiemmin toteutunutta kehityskulkuun. Teknologian suhteen kehityksen jatkumisen olettaminen lienee silti jopa suotavaa, kun taas taloudessa trendiajattelulla voidaan mennä pahastikin metsään. Teknologiaan perustuvissa tarkasteluissa suurena riskinä voidaan pitää eräänlaista omaan kuplaan jäähättämistä kuvaavia paradigmasokeutta ja uuden vähättelyä. Paradigmasokeudessa esimerkiksi elämäkokemuksen ja koulutuksen avulla muodostunut näkemys rajoittaa tulevaisuuden toisenlaisten mahdollisuuksien näkemistä. Samanlaisen riskin voi aiheuttaa uuden vähättely, joka tässä tapauksessa tarkoittaa esimerkiksi uusien teknologioiden ja tavoitteiden mahdollisuuksien väheksymistä. Edellisille vastakohtaisena voidaan nähdä yli-into, joka teknologioita käsitellessä tarkoittaa uusien mahdollisuuksien yliarviointia. Edellisille sukua on myös kulttuurinen ylimielisyys, joka tarkoittaa oletusta oman yhteisön, esimerkiksi kansakunnan tai yrityksen ylivertauisuudesta muihin nähden, jolloin muita tuotteita tai yhdyskuntia ei nähdä ajoissa vakavina kilpailijoina. [4] Tässä työssä trendiajattelu ja vaihtoehdottoman tulevaisuuden ennustaminen pyritään välttämään käyttämällä tutkimusmenetelmänä skenaariotekniikkaa. Myös aikaväli on valittu sellaiseksi, että voidaan olettaa tapahtuvan riittävästi murroksia, muttei kuitenkaan niin suuria, ettei niitä voitaisi ennakoita.

1.2.2 Skenaariotutkimus

Skenaariotutkimus on menetelmä, joka on kehitetty muuttuvan ja monimutkaistuvan tulevaisuuden tutkimiseen. Menetelmässä luodaan toimintaympäristön ja sen tulevien muutosten analyysin jälkeen mahdollisia skenaarioita, joihin tulevaisuudessa voitaisiin päätyä. Skenaariot ovat läpileikkauksia vaihtoehtoisista tulevaisuuksista ja yrityksiä esittää tapahtumien tai prosessien ketju, jossa jonkin järjestelmän nykytila kehittyy loogisesti joksikin tulevaisuuden tilaksi. Skenaarioajattelussa tulevaisuutta ei nähdä deterministisenä vaan monen erilaisen ja vaihtoehtoisia lopputuloksia omaavan muuttujan tuloksena. Lopputuloksena ei ole, tapahtuuko jokin asia tulevaisuudessa vai ei, vaan mikä siihen

voisi johtaa ja mitä sen jälkeen voidaan tehdä. [3] Suomalaisen tulevaisuudentutkimuksen uranuurtajan Mika Mannermaan mukaan ”Skenaariomenetelmällä luodaan loogisesti etenevä tapahtumasarja, jonka tarkoituksena on näyttää, miten mahdollinen, joko todennäköinen, tavoiteltava tai uhkaava tulevaisuudentila kehittyy askel askeleelta nykytilasta.” [2]

Skenaarioparadigman mukaan tutkimuksen ei ole tarkoitus ennustaa varmasti toteutuvaa tulevaisuutta vaan monipuolisia mahdollisia tulevaisuuden käsikirjoituksia eli skenaarioita. Niiden hyvyttä ei arvostella niiden toteutumistodennäköisyyden vaan tapahtumakulkujen uskottavuuden ja merkityksen perusteella. Skenaario voi siis olla tärkeä, vaikka sen toteutumistodennäköisyys olisikin vähäinen. Tällaisia ovat esimerkiksi merkittävää uhkaa kuvaavat skenaariot. Uskottava skenaario perustuu tilastolliseen tai empiiriseen analyysiin nykyhetkestä ja on kokonaisvaltainen, loogisesti etenevä eikä sisällä ristiriitaisuuksia. [2]

Yleensä skenaarioissa pyritään kuitenkin mahdollisimman todennäköisiin kehityskulkuihin. Erilaisia vaihtoehtoja saadaan asettamalla muuttujia, joita voivat olla esimerkiksi talouden kehitys ja arvojen muutokset. Joskus todennäköistä kehityskulkua käytetään vain viitetasona, ja lopulliset skenaariot ovat kärjistettyjä eli kontrastisia skenaarioita. Nykyaikaiseen tulevaisuudentutkimukseen eivät kuulu fatalistiset skenaariot, joissa tulevaisuus määräytyy suurempien luonnonvoimien tai kasvottomien suurten tahojen toiminnan tuloksena. Sen sijaan kannattaa ajatella hieman kliseisesti kaiken vaikuttavan kaikkeen. Tämän vuoksi myös muiden kuin tiukasti tutkittavaa kohdetta sivuavien aihealueiden tutkiminen on tärkeää realistisen tulevaisuudenkuvan saavuttamiseksi. [2]

Skenaariomenetelmää sovelletaan yleisesti myös yritysmaailmassa. Yrityksiä varten onkin kehitetty monia työskentelymenetelmiä, joilla pyritään tuottamaan tietoa päätöksenteon tueksi. Skenaariomenetelmää käytetään etenkin pidemmän aikavälin tarkasteluissa, sillä kun aikaväli kasvaa, myös ennalta odottamattomien muutosten määrä ja niiden yhteisvaikutus lisääntyvät. Laadittaessa monia skenaarioita pystytään mukauttamaan yhtiön strategiaa ja tulevaa toimintaa joustavammaksi yllättäviäkin tulevaisuuksia varten. Todellisten murrosten havaitseminen helpottuu, jos niitä on käsitelty monipuolisesti jo etukäteen skenaariotarkasteluissa. Luotaessa vain yksi, esimerkiksi trendiin perustuva ennuste, voi muodostua harha vaihtoehdottomasta tulevaisuudesta tai vähintäänkin varaudutaan vain sellaiseen. [3]

Skenaariotyöskentelyssä voidaan käyttää useita apumetodeja. Tässä työssä käytettävä menetelmä on rakenteellinen analyysi, jossa pyritään aluksi tunnistamaan kaikki tutkittavaan asiaan vaikuttavat muuttujat makrotasolta mikrotasolle. Nämä muuttujat voivat olla yleisiä asenteita, toimintaympäristön muutoksia tai vaikka taloudellisia tekijöitä. Tämän jälkeen näiden muuttujien väliset suhteet selvitetään isossa matriisissa, jossa pyritään miettimään jokaisen löydetyn muuttujan vaikutus kaikkiin muihin muuttujiin. Tässä vai-

heessa työskentely ei perustu kokonaan tieteellisiin faktoihin, vaan sen tarkoitus on subjektiivisten näkemysten avulla nostaa esiin merkittävimmät tekijät ja piilevät syy-seuraussuhteet tarkempaa arviointia varten. Tällainen onnistuu yksinkertaisimmillaan laskeamalla tällaisen matriisin rivi- ja sarakesummat, jolloin saadaan selville vaikuttavimmat sekä eniten muista riippuvaiset muuttujat eli panos- ja tulosmuuttujat. Niiden lisäksi esiintyy myös väliin jääviä keskiklusterin muuttujia ja välillisiä muuttujia. Kun mukana on mahdollisimman monentasoisia muuttujia, saadaan analyysimenetelmien avulla selville useamman muuttujan ketjuja. Suhteellisen yksinkertaiselta kuulostavalla menetelmällä saadaan sekä itsestäänselviä että yllättäviä tuloksia, joiden perusteella on helpompaa valita keskeiset muuttujat perusteellisempaan tarkasteluun. [2]

Skenaarioita voidaan toteuttaa monella tavalla, mutta lopputuloksena tulisi esittää vähintään kolme elementtiä: nykyisen toimintaympäristön kuvaus, tulevaisuudentilan kuvaus sekä reitti, joka yhdistää nämä toisiinsa. Prosessissa tulisi edetä suuremmasta kuvasta kohti käsitellyn asian yksityiskohtaisempaa tarkastelua. Lopputuloksena saatavia skenaarioita tulisi olla 3-5. Kahdesta tulee helposti korostetun hyvä ja huono skenaario, kun taas liian monesta tulee usein yksiulotteisia ja mahdollisesti vain yksittäiseen muuttujaan perustuvia. Tärkeää on huomioida skenaariotyöskentelyn tavoite: kartoitetaan tulevaisuusavaruuden reunoja, jotta voitaisiin varautua mahdollisimman monenlaisiin tulevaisuuksiin. [2]

1.2.3 Tutkimusmenetelmän kritiikki

Tulevaisuudentutkimus on jo tieteenä lähtökohtaisesti hieman poikkeuksellinen. Varsinkin insinöörیتieteiden näkökulmasta tutkimuskohde, jota ei voi mitata tai muutoin havainnoida, vaikuttaa mahdottomalta tai vähintäänkin epätieteelliseltä. Toisaalta tällaisessa ajatuksessa tulevaisuudentutkimuksen idea on ymmärretty väärin. Lopulta kyse on pikemminkin nykyisyyden syvällisestä analyysistä, jonka pohjalta voidaan tehdä arvioita tulevasta kehityksestä. Nykyinen toimintaympäristö sekä siinä erilaisina signaaleina ja ajureina havaittavat mahdolliset muutokset ovat paremmin havainnoitavissa. Näiden pohjalta tehdyt ennusteet muodostavatkin eräänlaisen hypoteesin tulevasta eivätkä niinkään ehdotonta totuutta.

Skenaariota luotaessa ja tulevaisuudentutkimuksessa yleensäkin ei voida koskaan ottaa huomioon kaikkia asian kehitykseen vaikuttavia tekijöitä. Etenkin eri muuttujien väliset suhteet ja ristikkäisvaikutukset sekä ihmiset päätöksentekijöinä vaikeuttavat täydellisen analyysin tekoa. Lisäksi asiasta tehtävät ennusteet saattavat vaikuttaa päätöksentekoon, mikä vaikuttaa ennusteisiin ja niin edelleen. Tulevaisuudentutkimus onkin aina epätäydellistä ja sen onkin tarkoitus toimia vain suuntaa antavana. [2]

Valittu menetelmä, jossa näkemys tulevaisuudesta pyritään muodostamaan erilaisia vaihtoehtoisia skenaarioita kirjallisuuskatsaukseen perustuen ilman numeerisia tuloksia voi

myöskin vaikuttaa epätieteelliseltä. Lopputulokset ovat laadullisia ja ne esitetään sanallisesti, mikä mahdollistaa kirjoittajan subjektiivisten näkemysten päätyminen lopputulokseen. Tämä voi joidenkin mielestä korostaa entisestään edellä esitettyä tutkimuksen epätäydellisyyttä, sillä tulokset eivät ole luonnontieteelliseen tapaan numeroin tai kaavoin esitettävissä ja saattavat siksi tuntua epämääräisiltä. Työssä pyritään tästä huolimatta objektiivisuuteen unohtamatta skenaariotyöskentelyn tarkoitusta, eli erilaisiin mahdollisiin tulevaisuuksiin varautumista.

1.3 Työn kulku

Työ alkoi kirjallisuuskatsauksella, jossa selvitettiin maakaasun suurimpia käyttökohteita Suomessa. Tämän perusteella valittiin tutkittavat kohteet, eikä vaihetta ole dokumentoitu tarkemmin. Sen jälkeen pyrittiin alan kirjallisuudesta selvittämään, mitkä ovat maakaasun kilpailukykyyn vaikuttavia yleisiä tekijöitä, suurimpien käyttökohteiden tekniset taustat sekä näissä maakaasun kanssa kilpailevat ratkaisut. Työvaihe pyrittiin tekemään huolellisesti, jotta voitaisiin arvioida realistisesti toimintaympäristön muutosten vaikutuksia kuhunkin käyttökohteeseen. Maakaasun kilpailukykyä on arvioitu pääasiassa sanallisesti mutta työssä esitetään myös kerättyihin tietoihin perustuvia kirjoittajan tekemiä laskelmia.

Tämän jälkeen arvioitiin toimintaympäristöä ja sen tulevia muutoksia. Tämänkin työvaiheen pohjalla oli katsaus kirjallisuuteen, joskin nyt perehdyttiin energia-alalla viime vuosina tehtyihin pääasiassa mahdollisimman käytännönläheisiin raportteihin alan nykytilasta ja lähitulevaisuudesta. Raportit olivat julkisesti saatavilla olevia ja esimerkiksi julkisten tahojen, kuten ministeriöiden, sekä yksityisten toimijoiden, kuten etujärjestöjen, julkaisemia tilastoja ja asiantuntijoilla teettämiä selvityksiä. Nämä liittyivät usein johonkin yksittäiseen tässä työssä käsiteltävään aihealueeseen, kuten sähkömarkkinoihin tai päästökauppaan, eivätkä suoraan maakaasun näkymiin. Taustatietoina toimineet selvitykset olivat asiantuntijoiden laatimia ja sisälsivät arvioita tulevasta kehityskulusta yleensä kvantitatiivisiin malleihin perustuen. Tällaiset asiantuntija-arviot vaikuttivat tietenkin myös kirjoittajan näkemyksiin työn teon aikana, joskin lopputuloksena syntynyt kokonaiskäsitys energia-alan tilasta hahmottui täysin itsenäisesti hyvin erilaisista tietolähteistä. Edellä mainittuihin lähteisiin on tietenkin viitattu työssä asianmukaisesti. Muita asiantuntijalähteitä ei käytetty normaalin työn ohjaamisen lisäksi.

Varsinainen skenaariotyöskentely alkoi toimintaympäristön tärkeimpien muuttujien tunnistamisella, mihin käytettiin rakenteellista analyysiä. Aluksi listattiin kymmeniä muuttujia, trendejä ja ajureita, jotka olivat nousseet esiin ja saattaisivat vaikuttaa maakaasun tulevaisuudennäkymiin. Sitten näiden keskinäisiä suhteita, tapahtumisen todennäköisyyksiä ja vaikutuksia maakaasun käyttöön ja kilpailukykyyn arvioitiin karkeasti ja subjektiivisesti vaikuttavuusanalyysitaulukkojen avulla. Taulukon avulla näistä poimittiin merkittävimmät muuttujat tarkempaa ja objektiivisempaa tarkastelua varten. Tämän jälkeen toimintaympäristöä ja sen kehityksen mahdollisia epäjatkuvuuskohtia analysoitiin

erilaisten realististen tulevaisuuskuvien muodostamiseksi. Tässä työvaiheessa palattiin myös aiemmin mainittuihin selvityksiin ja tilastoihin. Tähän mennessä kuvatut työvaiheet olivat osittain iteratiivisia, sillä eri vaiheissa nousi esiin uusia tekijöitä, jotka täytyi myös saattaa koko prosessin läpi

Teknisen taustatyön, toimintaympäristön analyysin, muuttujien tunnistamisen ja toimintaympäristön arvioitujen muutosten perusteella oli mahdollista arvioida, minkälainen olisi niin sanottu perusskenaario, jossa asiat jatkaisivat nykyistä kulkuaan trendien mukaan ilman suurempia murroksia. Tällainen skenaario ei ole lopputuloksena kovinkaan kiinnostava eikä lopulta edes realistinen, sillä aiemmassa toimintaympäristön analyysissä löydettiin paljon erilaisia epäjatkuvuuskohtia, jotka voivat muuttaa tulevaisuutta lähes mihin suuntaan tahansa. Esiin nousseita muuttujia, ajureita, seurauksia ja muita tekijöitä yhdistelemällä oli mahdollista luoda monenlaisia kehityskulkuja. Tämä tapahtui aluksi yksinkertaisesti kokeilemalla, mutta järkevimmiltä vaikuttavat skenaarioiden esiasteet nousivat esiin nopeasti. Lopulta muodostettiin perusskenaarion ja keskeiseksi havaittujen kehityskulkujen pohjalta neljä lievästi kärjistettyä skenaariota, jotka toimivat myös tämän työn lopputuloksena. Tämän jälkeen arvioitiin vielä skenaarioiden yhtäläisyyksiä ja huomioon otettavia asioita skenaarioiden toteutumisesta riippumatta.

Dokumentoitu työ kulkee karkeasti ottaen samassa järjestyksessä kuin edellä kuvatut työvaiheet. Ensin luvussa 2 käsitellään kirjallisuuskatsauksessa esiin nousseita taustatietoja, kuten maakaasun historia Suomessa, sekä sen ja eri polttoaineiden kilpailukykyyn suoraan vaikuttavia tekijöitä. Tämän jälkeen luvussa 3 käsitellään maakaasun suurimmat käyttökohteet. Näiksi valittiin perinteisesti käsiteltävien yhdyskuntien ja teollisuuden sähkön ja lämmön yhteis- ja erillistuotantojen lisäksi suurimmat teollisuuden prosessit, joita ovat meesauunit, paperinkuivaimet, metalliteollisuuden uunit ja vedyn valmistus. Luvussa 4 pyritään kuvaamaan mahdollisimman kattavasti nykyistä toimintaympäristöä ja sen tulevia muutoksia. Edellisten perusteella arvioidut skenaariot esitetään luvussa 5, jonka jälkeen johtopäätöksissä luvussa 6 pohditaan vielä skenaarioiden yhteisiä tekijöitä ja muita huomioon otettavia seikkoja maakaasun tulevaisuudessa.

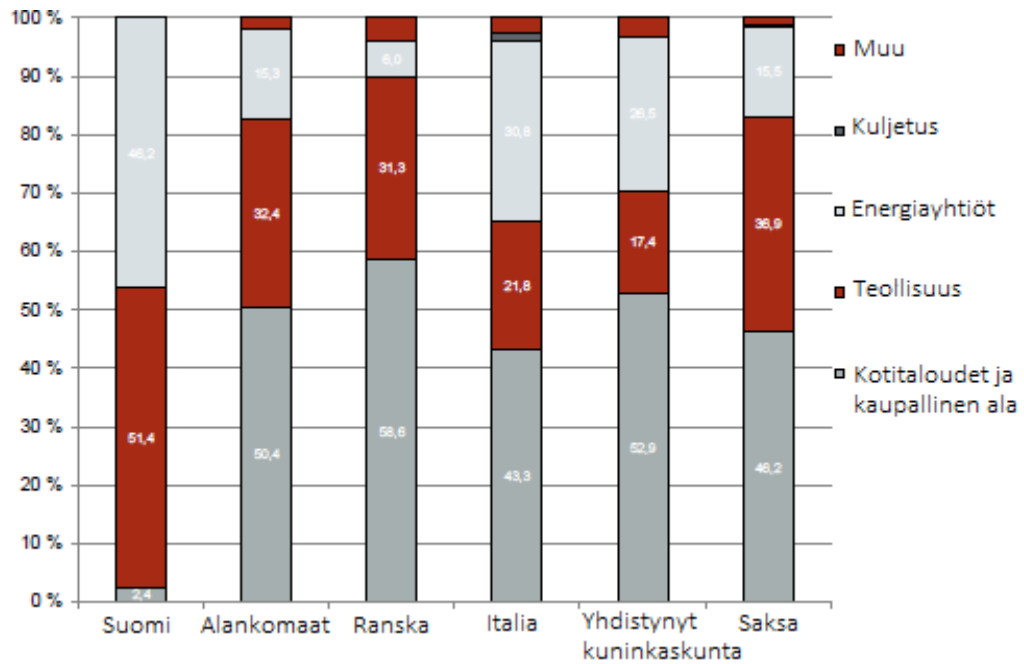
2. TAUSTATIIETOA

Tässä luvussa käydään läpi maakaasun nykyinen asema sekä tekijät, jotka siihen ovat vaikuttaneet. Myös historian ymmärtäminen on tärkeää, jotta huomataan miten suuri vaikutus politiikalla on aina ollut maakaasun käyttöön. Lisäksi maakaasun teknisiä ominaisuuksia, verotusta ja kasvavan ympäristötietoisuuden aikana yhä merkityksellisempiä palamisen päästöjä käydään läpi, jotta saataisiin selville ratkaisevat kilpailukykytekijät muihin polttoaineisiin verrattuna. Lopuksi käsitellään vielä biomassan kaasutusta, jota on laajasti esitetty kaasumaiset fossiiliset polttoaineet korvaavaksi teknologiaksi.

2.1 Maakaasu Suomessa

Maakaasu tuli suomalaiseen poliittiseen keskusteluun vuonna 1958, kun Neuvostoliitto ilmaisi halunsa alkaa myymään luonnonkaasua Eurooppaan ja jopa osallistua sen vaatimien verkostojen rakentamiseen. Vaikka kaasun käytöstä ei ollut juurikaan kokemusta, nähtiin tällainen avaus uudesta kauppatavarasta silti houkuttelevana silloisen vaihtokauppan perustuvan idänkaupan vuoksi. Tätä seurasi pitkään jatkunut poliittinen väentö ja erinäisten työryhmien jopa vuosia kestäneitä selvityksiä. Alusta alkaen jännitteitä aiheutti maakaasun kilpailu valtion omistaman ja tuohon aikaan hyvin vaikutusvaltaisen öljy-yhtiö Nesteen tuotteiden kanssa. Tällöin Suomessa ei ollut vielä myöskään ydinvoimaa ja kokonaisenergiankulutuksesta miltei kaksi kolmasosaa katettiin öljyllä. [5]

Tehtyjen selvitysten mukaan Suomi oli niin harvaan asuttu maa, ettei kaasua kannattaisi eteläisemmän Euroopan tapaan käyttää kotitalouksissa, vaan suurimpien kaupunkien energiahuollossa ja suurteollisuudessa tasaisen kulutuksen aikaansaamiseksi. Järkeväksi kaasunjakelualueeksi katsottiin Tampereen eteläpuolinen Suomi. Joissain visioissa putki oli ollut tarkoitus vetää Turun kautta Tukholmaan saakka kulujen jakamiseksi, mutta Ruotsin vähäinen kiinnostus hankkeeseen tyrehtytti sen myöhemmistä uudelleenlämmittelyistä huolimatta. [5] Kaasun keskittäminen teollisuuden ja energiayhtiöiden käyttöön muuttui myöhemmin itseään toteuttavaksi ennustukseksi. Kuvasta 1 nähdään että perinteisemmissä maakaasua käyttävissä maissa noin puolet kulutuksesta muodostuu pienkäytöstä kotitalouksissa ja kaupallisella alalla, kun taas Suomessa niiden osuus on vain 2,4 %.



Kuva 1. Maakaasun kulutuksen jakaantuminen Suomessa ja eräissä EU-maissa, muokattu lähteestä [6] katso [7].

Lopullinen sopimus kaasun toimituksista ja verkoston rakentamisesta saatiin Neuvostoliiton kanssa aikaan vasta vuonna 1971. Sopimus oli suurilta osin kauppapoliittinen energia-asioiden jäädessä sivuosaan. Tämä ei ollut lainkaan tavatonta tuohon aikaan, vaan esimerkiksi samoihin aikoihin vireillä olleet ensimmäiset ydinvoimahankkeet laitetoimitajineen päätettiin pitkälti eduskunnassa. Myös kaasun tulevasta myyjästä oli pitkään kiistaa. Kaasulle kertyneen huomattavan poliittisen painolastin vuoksi päädyttiin valtiojohtoiseen Nesteeseen, vaikka yhteistyömallia ajanut teollisuus vastustikin tätä. Putken ensimmäinen Imatralta Kouvolaan kautta Kotkaan kulkenut osa oli valmis vuoden 1973 lopussa. Samoihin aikoihin puhjennut öljykriisi nosti kuitenkin öljyyn sidotun maakaasun hinnan moninkertaiseksi, jolloin kulutus jäi suunniteltua pienemmäksi. Maakaasun jakelija Neste panosti lopulta enemmän päätuotteeseensa öljyyn, ja maakaasu jäikin 1970-luvulla vain Kymenlaakson metsäteollisuuden polttoaineeksi. Toinen öljykriisi vuosikymmenen lopulla vain vahvisti tätä ilmiötä. Öljykriisien myötä pitkälti kiinteistökohtaiseen öljyn käyttöön perustuneita lämmitysjärjestelmiä pyrittiin ohjaamaan kaupungeissa kaukolämpöön. [5]

1980-luvulla maakaasun käyttö lähti nousuun monien asioiden vuoksi. Vuosikymmenen alussa Neste muutti uuden toimitusjohtajansa johdolla strategiaansa maakaasun suhteen ja aloitti myös vähittäisjakeluun panostamisen. Ensimmäinen kohde oli Hamina, jonne rakennettiin kalliiksi arvioidun kaukolämpöverkon sijaan maakaasuputki Kotkasta ja lähes koko kantakaupungin kattava pienjakeluverkko. Tämä kehitys sai jatkoa kun Kouvolassa, Kuusankoskella, Imatralla ja Lappeenrannassa aloitettiin maakaasun pienjakelu joillakin asuinalueilla, joita ei kannattanut saattaa kaukolämmön piiriin. Nesteen katse

suuntautui myös vielä kaasuputken ulottumattomissa olleeseen Helsinkiin, jossa kannattamattomaksi muuttanutta kaupunkikaasuverkkoa oltiin sulkemassa. Todellisen sysäyksen kaasun käytön lisäykselle antoi vuonna 1982 hyväksytyt ensimmäinen ilmansuojelulaki, jolla pyrittiin estämään ongelmaksi muodostuneita happosateita ja yleistä ympäristön pilaantumista. Tämä antoi kaivattua nostetta puhtaana pidetylle maakaasulle erityisesti kaupunkien kaukolämpöpolttoaineeksi valikoitunutta kivihiiltä vastaan. Kolmas merkittävä muutos oli kaasun hinnoittelun öljyriippuvuuden pienentäminen ja sitominen myös kivihiilen ja kotimaisen sähkön hintaan, mikä paransi maakaasun kilpailukykyä ja sitoi hinnan lähemmäs sen todellisia kilpailijoita. 80-luvun puoliväliin mennessä lähes kaikki kaupungit ja isoimmat teollisuuslaitokset kaasuputken varrella olivatkin siirtyneet käyttämään maakaasua. [5]

Tärkein kaasun käyttöä ja saatavuutta lisännyt muutos oli vuoden 1984 päätös jatkaa kaasuputkea alkuperäisen suunnitelman mukaisesti Kouvolasta Mäntsälän kautta sekä Tampereelle että pääkaupunkiseudulle. Tampereen haara valmistui lopulta loppuvuodesta 1986, jolloin puhuttiin jopa maakaasun toisesta tulemisesta. Samana vuonna tapahtunut Tšernobylin ydinvoimalaonnettomuus oli lisännyt suomalaisten huolta eri energiantuotantomuotojen ympäristövaikutuksista, ja lisäsi siten myös puhtaana pidetyn maakaasun kannatusta. Tämän vuoksi eduskunnan energiavaliokunta linjasi, että suunnitteilla ollut viides ydinvoimalahanke laitetaan jäihin ja tuleva lisäenergiantarve tuotetaan mieluiten sähkön ja lämmön yhteistuotannolla hiilestä, turpeesta ja maakaasusta. Hiili nähtiin halpana, turve kotimaisena ja maakaasu puhtaana polttoaineena. Huomionarvoista on, että vielä tuohon aikaan puun polttamista ei pidetty edes vaihtoehtona kuin metsäteollisuuden omissa kattiloissa. Sekä Tampereella että Helsingissä maakaasun käyttöönotto lämpövoiman polttoaineena vaati pitkän poliittisen väännön Tampereen turveyhteyden ja Helsingin hiilisedosten vuoksi. Lopulta Tampereelle Lielahden ja Helsinkiin Vuosaaren rakennettiin kaasukombivoimalaitokset 90-luvun vaihteessa. Samoihin aikoihin myös tietoisuus kasvihuoneilmiön aiheuttamasta ilmastonmuutoksesta alkoi kasvaa, ja vuonna 1990 käyttöönotettu hiilidioksidipäästöön perustuva haittavero paransi maakaasun kilpailukykyä oleellisesti muihin fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna. [5]

1990-luvun alussa halua kaasunkäytön lisäämiseksi olisi ollutkin enemmän kuin putkisto antoi myöden. Toisaalta Neuvostoliiton hajoaminen ja tihentyneet toimituskatkot aiheuttivat epäluottamusta kaasutoimituksia kohtaan siten, että uusia investointeja ei uskallettu tehdä, sillä Neuvostoliiton raunioille jääneen ja kipeästi rahaa tarvitsevan Venäjän epäiltiin suuntaavan toimituksiaan rahakkaammille Keski-Euroopan markkinoille. Suomi ja sen vakaaseen teollisuus- ja voimalaitoskäyttöön perustuva maakaasun kulutus nähtiin silti tärkeänä Venäjällä, jossa haluttiin tiivistää yhteistyötä kaupankäynnin kehittämiseksi. Pitkällisten neuvotteluiden jälkeen Neste ja Venäjän kaasunmyyntiyhtiö Gazprom pääsivät lopulta molempia osapuolia miellyttävään ratkaisuun. Maakaasuliiketoiminta eriytettiin omaksi yhtiökseen nimeltä Gasum, josta Gazprom sai 25 %:n osuuden kohtuullisempaa kaasun myyntihintaa vastaan. [5]

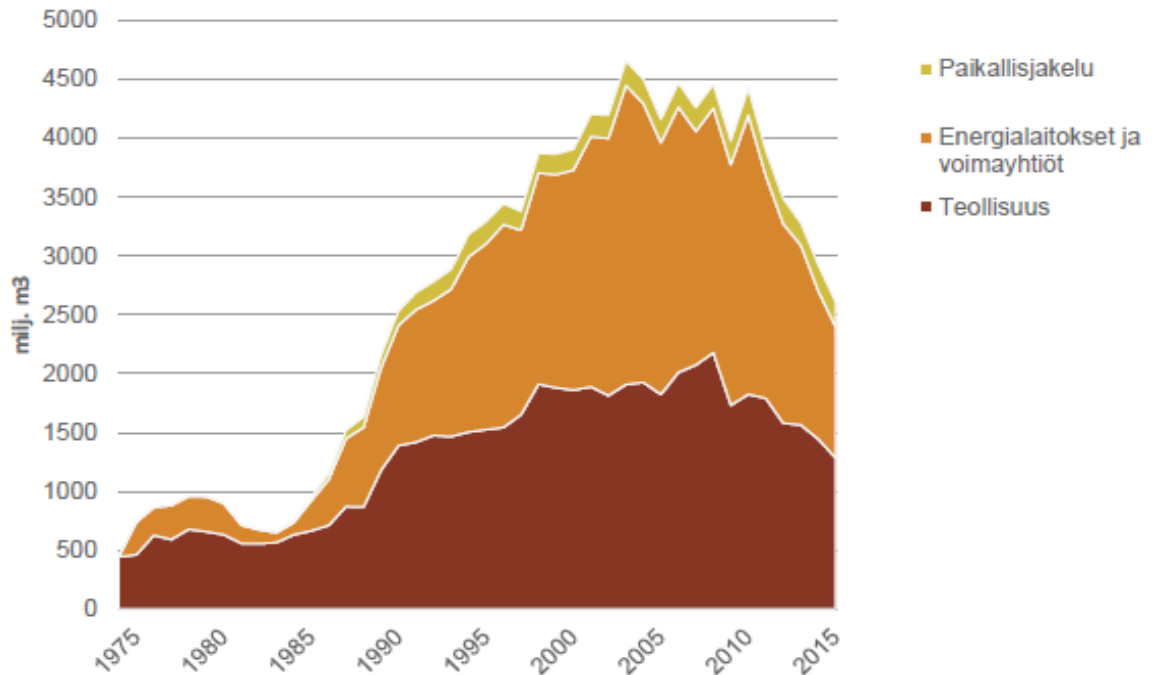
Myöhemmin kun toinen pörssiin listattu valtion energiayhtiö, energian tuotantoon keskittynyt Imatran Voima fuusioitiin Nesteen kanssa Fortum Oyj:ksi, oli sillä EU:n komission mukaan liian määräävä markkina-asema maakaasumonopolin vuoksi. Ehtona yhdistymiselle oli Gasumin irrottaminen tulevasta yhtiöstä. Järjestely tapahtui vuoden 1999 alussa siten, että 26 % Gasumista myytiin sijoittajille ja 24 % Suomen valtiolle. [5] Myöhemmin valtio lunasti lopulta koko yhtiön itselleen vuonna 2016 [8].

Koko 1990-luvun ja osan 2000-lukua maakaasun kulutus kasvoi tasaisesti talouskasvun mukana eritoten yhdyskuntien energiantuotannon osalta. Vuonna 2011 tapahtui nopea muutos, kun fossiilisten polttoaineiden verotusta yhdenmukaistettiin ja kiristettiin. Tavoitteena oli vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä niiden päästöihin perustuvan verotuksen turvin. Maakaasu oli nauttinut aiemmin suhteessa edullisemmasta verokannasta esimerkiksi kivishiileen ja öljyyn nähden, mutta uusi veromalli perustui suoraan energiasisältöön ja hiilidioksidipäästöön. Tämä nosti suhteessa eniten maakaasun verotusta, mikä alensi verottomalta hinnaltaan kalliin polttoaineen kilpailukykyä huomattavasti muihin nähden. Veronkorotuksia on jatkettu tasaisesti koko 2010-luvun ajan, tosin vuoden 2011 muutoksen jälkeen samoissa suhteissa. Verotuksen muutosta kuvaa se, että vuoden 2008 verotasoon verrattuna maakaasun valmistevero on yli yhdeksänkertaistunut, kun taas kivishiilen on vain miltei nelinkertaistunut vuoteen 2017 mennessä. [9].

Maakaasukenttään on jälleen tulossa muutoksia lähitulevaisuudessa, sillä EU pyrkii energiamarkkinoiden integroimiseen yhteiseurooppalaisiksi avoimiksi ja tehokkaiksi markkinoiksi. EU-lainsäädännön mukaan markkinoiden tulisi olla avoimet. Esimerkiksi sähkömarkkinat ovat avautuneet samalla tavalla. Suomen kaasumarkkinoiden valtiojohtoinen monopoli on sallittu tähän asti erityispoikkeuksella, sillä käytännössä kaikki kaasu tulee yhdeltä toimittajalta eli Gazpromilta ja markkinoilta ei ole yhteyttä toiseen EU-maahan. [10] Suomesta ollaan tällä hetkellä rakentamassa EU:n tuella Viroon Suomen ja Baltian kaasuverkot yhdistävää Balticconnector-putkea, jonka on tarkoitus valmistua vuoteen 2020 mennessä. Samalla myös maakaasumarkkinoiden on tarkoitus aueta kilpailulle. Käytännössä tämä tapahtuu erottamalla maakaasun siirtoon liittyvät toiminnot omaksi Gasumista irralliseksi kantaverkkoyhtiökseen Fingridin tapaan. [10] Balticconnectorin valmistumisen jälkeenkin kaikki kaasu tulee edelleen käytännössä Venäjältä vaikka se kulkisikin Baltian kautta. Tämäkin on vain väliaikainen ongelma, sillä suunnitteilla oleva EU:n rahoittama GIPL-putki (*Gas Interconnector Poland-Lithuania*) yhdistää Baltian ja Suomen kaasuverkot Puolan kaasuverkkoon ja sitä kautta koko Euroopan laajuiseen verkostoon. Tämän putken on tarkoitus valmistua vuoden 2021 loppuun mennessä. [11] Tämän jälkeen myös Suomen kaasuverkko on osa yhteiseurooppalaista kaasumarkkinaa, ja kaasun hankinta esimerkiksi Norjan, Hollannin tai Algerian lähteistä on periaatteessa mahdollista. Suomen ja Baltian kaasuverkostot sekä suunnitteilla olevat yhdysputket on esitetty liitteessä A.

Kuvassa 2 on esitetty maakaasun käyttö Suomessa 1974–2015. Kuvasta nähdään vuosien 1974–1986 lähinnä Kaakkois-Suomen teollisuuden käyttöön perustunut tasainen kulutus.

Vuoden 1986 putken laajentaminen Tampereelle ja pääkaupunkiseudulle näkyy kiihtyvänä kasvuna 90-luvun taitteessa, jolloin Tampereen, Helsingin ja Espoon ensimmäiset maakaasuvoimalaitokset valmistuivat. Maakaasun kulutus alkoi sakata 2000-luvun lopun talouskriisin vuoksi vähentyneen teollisuustuotannon takia. Se kääntyi lopulta veromuutosten seurauksena heikentyneen kilpailukyvyn vuoksi laskuun vuonna 2011 ja on laskenut siitä asti aina viimeisimpään tarkasteluvuoteen 2016 [1].

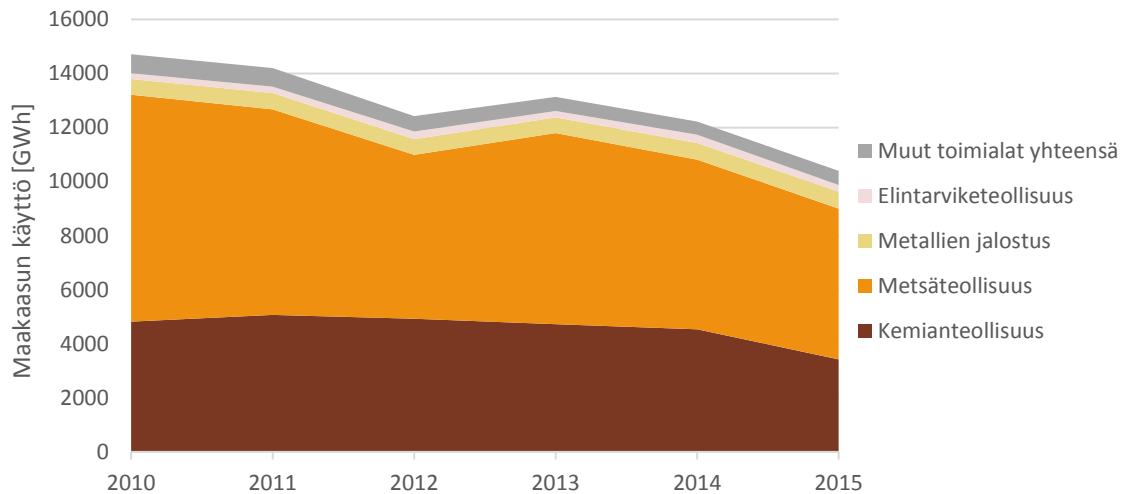


Kuva 2. Maakaasun käyttö Suomessa 1974 – 2015. [12]

Vuoden 2015 kaasunkäyttötilastojen mukaan Suomessa maakaasun kulutus jakaantuu nykyisin puoliksi teollisuudelle ja energiayhtiöille. Lisäksi 2,3 % kaasusta käytetään yksityistalouksien ja kasvihuoneiden suorassa lämmityksessä ja 0,2 % maakaasukäyttöisten ajoneuvojen polttoaineena. Energiayhtiöiden kaasun käytöstä noin 84 % kuluu kaukolämmön CHP-tuotannossa, ja noin 16 % kaukolämmön erillistuotannossa. Teollisuudessakin prosessilämmön yhteistuotanto on suurin käyttökohde noin 33 %:n osuudella. Loput käyttökohteet jakaantuvat suoraan prosessikäyttöön (31 %), raaka-ainekäyttöön (22 %), erilliseen prosessilämmön tuotantoon (9 %) ja suoraan lämmitykseen (4 %). [12]

Kuvasta 2 nähdään myös, että teollisuuden käyttö on ollut jonkin verran tasaisempaa kuin energiayhtiöiden, eikä lasku ole ollut yhtä voimakasta. Tähän voivat vaikuttaa esimerkiksi suuria investointeja vaativat polttoainemuutokset, teollisuuden ja prosessikäytön erilainen verokohtelu sekä tekniset syyt. Teollisuuden prosessi- ja raaka-ainekäytön kilpailukykytekijät lienevät toisenlaisia kuin yhdyskuntien CHP-laitoksilla. Prosessi- ja raaka-ainekäyttö kattaa yli puolet teollisuuden kaasunkäytöstä, minkä vuoksi niihin painudutaan tässä työssä suhteellisen tarkasti.

Kuvassa 3 on esitetty eri teollisuudenalojen maakaasun käyttö. Kemianteollisuus käyttää liki puolet teollisuuteen menevästä kaasusta ja metsäteollisuus reilun kolmanneksen. Lopuosa jakaantuu suuruusjärjestyksessä metalliteollisuudelle, savi- ja lasiteollisuudelle, elintarviketeollisuudelle ja muille aloille. Tässä työssä pyritään käsittelemään suurimpia käyttökohteita, joten ne ovat valikoituneet metsä-, metalli- ja kemianteollisuuden aloilta. [12]



Kuva 3. Maakaasun käyttö Suomen teollisuudessa aloittain [13]

2.2 Polttoaineiden käyttöön vaikuttavia tekijöitä

Polttoaineen valinta riippuu monesta tekijästä. Markkinatalouteen perustuvassa maailmassa tärkein tekijä on polttoaineen käytön hinta.. Lopulta myös ympäristöystävällisempiin ratkaisuihin siirryttäessä todellisenä ajurina toimii käytön todellinen kustannus, jota voidaan ohjata esimerkiksi verotuksella. Todellisiin käytön kustannuksiin vaikuttavat markkinahinnan lisäksi eniten verot, päästömaksut ja mahdollinen päästöjen käsittely. Lisäksi polttoaineen käsittely ja esimerkiksi huonompi hyötysuhde voivat tuoda kustannuksia toiseen polttoaineeseen verrattuna. Varsinkin prosessikohteissa myös teknisillä ominaisuuksilla on merkitystä. Toisissa kohteissa ne vaikuttavat myös lopulta kustannuksiin, mutta kaikissa kohteissa ei yksinkertaisesti voida käyttää kaikkia polttoaineita.

2.2.1 Maakaasun ominaisuudet

Maakaasulle on sen yksinkertaisen kemiallisen rakenteen sekä kaasumaisen olomuodon vuoksi tyypillistä nopea ja käytännössä täydellinen palaminen korkeassa lämpötilassa. Puhdas palaminen mahdollistaa savukaasujen suoran kosketuksen herkkiinkin käsiteltäviin tuotteisiin, kuten elintarvikkeisiin. Savukaasujen puhtauden vuoksi myös maakaasun kastepiste on matala, eikä happokastepistettä ole käytännössä ollenkaan. Nopea sekoittuminen ja täydellinen palaminen ovat pääsääntöisesti hyviä ominaisuuksia, mutta voivat joissain heikentää lämmönsiirtoa.

Palamisen vaiheistuksella voidaan parantaa säteilylämmönsiirtoa ja pienentää NO_x -päästöjä. Vaiheistuksessa palotapahtumaan syötetään alimääräisesti primääri-ilmaa, jonka vuoksi palaminen on epätäydellistä ja syntyy paremmin säteilevää nokea ja lauhtuvia hiilivetyjä eli tervoja. Epätäydellinen palaminen korjataan myöhemmin sekundääri-ilmalla, jolla kaasumaiset välituotteet saadaan palamaan loppuun. Tällä voidaan myös tasoittaa kaasulle ominaista tiukkaa lämpötilajakaumaa siirtämällä osa palamisesta myöhemmäksi, jolloin korkeassa lämpötilassa syntyvien typpioksidien määrä vähenee. Myös hyvästä sekoittumisesta seuraava vähäisempi yli-ilman tarve vähentää hukkaan menevää energiaa, kun ylimääräistä ilmaa ei tarvitse lämmittää palamislämpötilaan. Raskaammat hiilivedyt, eritoten nestemäisenä ja kiinteänä, vaativat käytännössä paljon enemmän yli-ilmaa stökiometriseen palamiseen nähden. [14] Maakaasulle ei ole käytännössä olemassa happokastepistettä, mutta sen vesikastepiste on 45–57 °C ilmakertoimella 1–2. Alhainen kastepiste tarkoittaa sitä, että savukaasut eivät tiivisty helposti savukaasukanaviin. Haitallisempi happokastepiste puuttuu kokonaan, sillä maakaasu ei sisällä klooria tai merkittävässä määrin rikkiä, joiden palotuotteet voisivat tiivistyä happoina savukaasukanaviin ja aiheuttaa korroosiota. Tämän vuoksi savukaasujen lämpötila voidaan laskea huomattavasti matalammalle kuin muita polttoaineita poltettaessa. Näin voidaan saavuttaa parempi hyötysuhde ainakin kaasulle suunnitelluissa polttosovelluksissa, sillä savukaasujen lämpösäilytys saadaan paremmin talteen. [15]

Maakaasun perinteistä kilpailijaa öljyä poltettaessa säteilylämmönsiirto, joka on tärkein lämmönsiirtomuoto teollisuuden uuneissa, on lähtökohtaisesti parempaa. Tämä johtuu pääasiassa raskaampien hiilivetyjen pilkkoutumisesta syntyvistä kiinteistä nokipartikkeleista sekä osin myös runsaammasta tuhkasta. Näiden emissiviteetti eli säteilevyys on huomattavasti suurempaa kuin hiilidioksidilla ja vesihöyryllä, joista maakaasun polton savukaasut käytännössä kokonaan koostuvat. Toki näitä heikommin säteileviä kaasuja syntyy myös öljyn poltossa. [14] Öljyliekin adiabaattinen eli teoreettinen palamislämpötila on noin 100 °C korkeampi kuin maakaasuliekillä. Käytännössä tilanne on toinen, sillä öljyliekin vaatima yli-ilma ja suurempi säteilylämmönsiirto liekin alueella alentavat todellista palamislämpötilaa. Maakaasun todellinen palamislämpötila sen sijaan on lähellä adiabaattista arvoaan. Korkeampi palamislämpötila johtaa nopeasti typenoksidipäästöjen lisääntymiseen. Toisaalta tämä kompensoituu sillä, että maakaasun poltossa ei synny ollenkaan polttoaineperäisiä typenoksideja, joita on hankalampi vähentää polttoteknisillä menetelmillä. Lisäksi nokinen liekki johtaa ennen pitkää myös palotilan nokeentumiseen ja sitä kautta huonompaan lämmönsiirtoon. Tämän estämiseksi palotilaa täytyy nuohota säännöllisesti, mitä kaasuja poltettaessa ei jouduta tekemään.

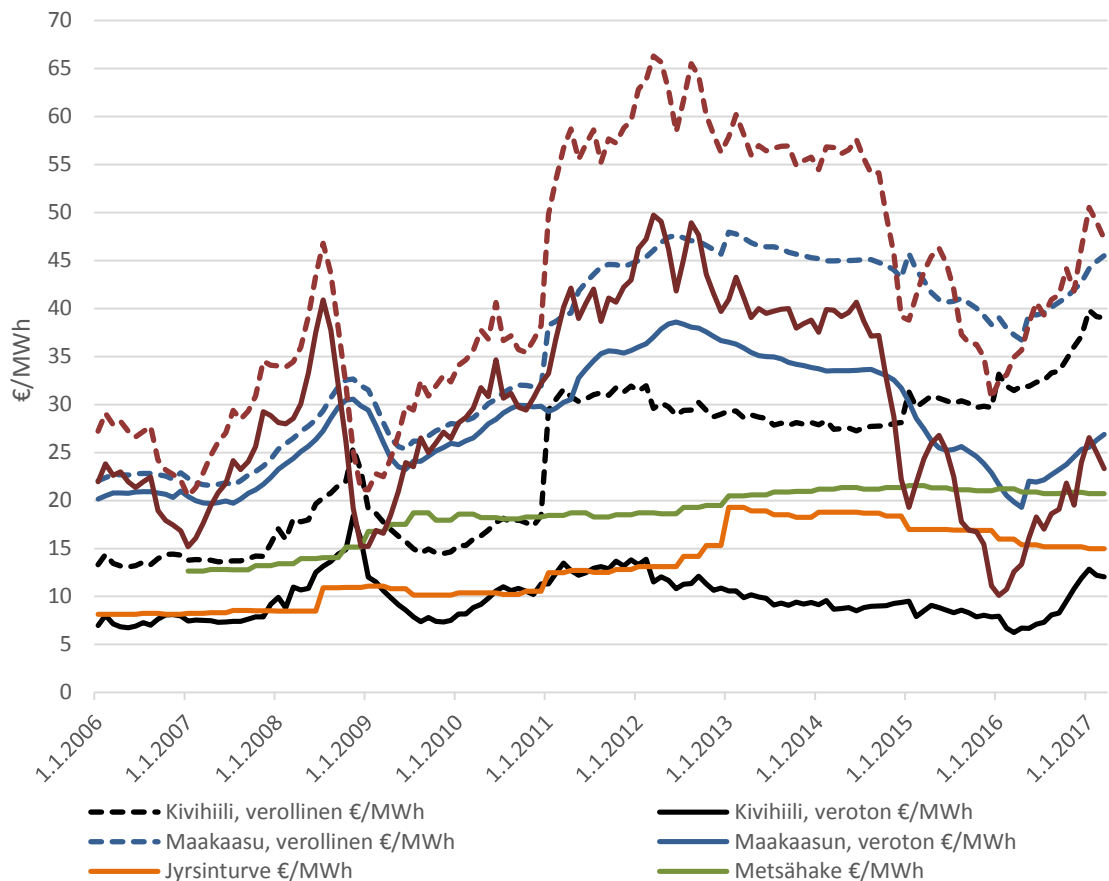
Maakaasun varastointi on suhteellisen hankalaa. Tähän vaaditaan järkevien varastointimäärien saavuttamiseksi nesteyttämistä, jolloin puhutaan LNG:stä. Maakaasun nesteyttäminen vaatii lämpötilan laskun -161,5 °C:seen. Yleisesti ottaen kaikkien kilpailevien

polttoaineiden varastointi ja kuljetus onkin helpompaa kuin maakaasun. Toisaalta maakaasua saadaan kaasuverkon alueella suoraan putkesta helposti, ja muiden polttoaineiden varastointi ja kuljetukset aiheuttavatkin lisäkustannuksia tähän verrattuna.

Maakaasun erot toiseen yleisesti käytettyyn kaasumaiseen polttoaineeseen eli nestekaasuun tai sen komponentteihin propaaniin ja butaaniin ovat marginaalisia. Pienet mutta joissakin tapauksissa esiin nousevat erot johtuvat pidemmistä hiiliketjuista, luonteesta öljyntuotannon jäännösjakeena sekä erilaisesta toimitustavasta. Nestekaasu esimerkiksi nopeaa pidemmän hiiliketjuna vuoksi helpommin vaativissa poltto-olosuhteissa, kuten käytettäessä Low NO_x-polttimia [16]. Oleellisin ero lieneekin toimitustavassa ja varastoinnissa, sillä maakaasun hankinta kaasuputkesta on yksinkertaisempaa ja tehokkaampaa kuin nestekaasun kuljettaminen säiliöautoilla. Toisaalta kaasuverkon ulkopuolella tilanne on toisenlainen, sillä nestekaasun käyttö ja toimitukset eivät vaadi samanlaista infrastruktuuria kuin LNG.

2.2.2 Polttoaineiden hinnat

Polttoaineiden hinnat ovat tärkeä tekijä eri polttoaineiden välisessä kilpailukyvyssä. Maakaasun suurin heikkous lieneekin sen kallis hinta. Kuvassa 4 on esitetty tärkeimpien polttoaineiden hintakehitykset vuodesta 2006 alkaen. Kuten kuvasta nähdään, on maakaasu polttoainevalikoiman kalleimmasta päästä sekä verottomana että verollisena. Maakaasun perinteinen kilpailija raskas polttoöljy on myös kallista, mutta sen hintakehitys on ollut huomattavasti vaihtelevampaa. Näiden sijoitus kalleimpana polttoaineena onkin vaihdellut. Kiinteät polttoaineet ovat selvästi edellisiä edullisempia. Hiili on ollut kaikista halvin polttoaine verottomana, mutta hiilidioksidipäästöön perustuva verotus rasittaa sitä eniten. Tämän vuoksi hiili onkin pääasiallinen lauhdetuotannon polttoaine, sillä sähköntuotanto on verotonta. Biomassan ja turpeen hinnat ovat olleet tasaisen alhaisia, joskin pitkällä aikavälillä nousujohteisia.



Kuva 4. Eri polttoaineiden hintoja verottomina ja verollisina 1.1.2006–1.3.2017 [9]

2.2.3 Polttoaineiden verotus

Verotus vaikuttaa merkittävästi erilaisten polttoaineiden ja sähkön kilpailukykyyn. Nykyinen pääosin hiilidioksidipäästöön ja fossiiliseen energiasisältöön perustuva verotus ohjaa kulutusta uusiutuvaan suuntaan. Esimerkiksi maakaasun hinnasta miltei puolet ja kivihiilen hinnasta yli kaksi kolmasosaa voi olla veroa hintatasosta ja käyttötavasta riippuen. Toisaalta esimerkiksi biomassan poltosta ei peritä energiaveroja, mikä toimii kannustimena biopolttoaineiden lisäämiselle. Turpeen osalta verotuksessa näkyy omavaraisuuden tavoittelu ja suomalainen suhtautuminen siihen niin sanottuna hitaasti uusiutuvana luonnonvarana, sillä turpeen verotus on hiilidioksidipäästöihin suhteutettuna vain murto-osa muihin fossiiliseksi luokiteltuihin polttoaineisiin nähden.

Eri polttoaineiden ja sähkön verotus vuonna 2017 on esitetty alla taulukossa 1. Valmistevero sisältää kaikki polttoaineista kannettavat verot eli energiasisältöveron, hiilidioksidiveron ja energiaveron. Biomassasta ei kanneta ollenkaan veroa. Sähköstä kannetaan veroa kahdessa eri veroluokassa, joista teollisuuden, konesalien ja kasvihuoneiden veroluokka on huomattavasti matalampi II-veroluokka. [17]

Taulukko 1. Polttoaineiden ja sähkön verot sekä veroluontoiset maksut 2017 [18]

Polttoaine	Valmistevero ja huoltovarmuusmaksu tai sähkövero [€/MWh]
Kivihiili	26,980
Maakaasu	18,614
Nestekaasu	20,771
Turve	1,9
Kevyt polttoöljy	22,824
Raskas polttoöljy	23,739
Sähkö I-veroluokka	22,53
Sähkö II-Veroluokka	7,03

Verojen vaikutus näkyy eniten erillisessä lämmön- tai höyryntuotannossa, jossa vero peritään täysimääräisenä käytetyn polttoaine-energian perusteella. Sen sijaan sähköntuotannossa käytetty polttoaine on verotonta sähkön toimitusvarmuuden lisäämiseksi. Sähköntuotannon verottomuus koskee myös yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantoa sähköntuotannolle jyvittyvältä osuudelta. Lisäksi yhteistuotannossa lämmölle jyvittyvästä polttoaineesta vain 90 % on verollista, ja siitäkin veroa maksetaan niin sanotun CHP-leikkurin vuoksi vain puolet. Tämä tekee yhteistuotannolla tuotetun lämmön verokuorman noin 55 % pienemmäksi erilliseen lämmöntuotantoon nähden. CHP-leikkurin eli lämmön yhteistuotantoon käytetyn polttoaineen verokevennyksen tarkoituksena on edistää energiatehokkaan yhteistuotannon käyttöä ja osaltaan myös varmistaa sähköntuotantoa [19].

Teollisuuden prosesseissa tilanne on hieman erilainen, sillä osassa prosessikäyttöistä polttoaineet ovat verottomia. Polttoaineet, joita käytetään energianlähteenä öljynjalostusprosessissa, raaka-aineena teollisessa tuotannossa tai apuaineena tai muuten välittömässä ensikäytössä tuotteen valmistuksessa, ovat nestemäisten polttoaineiden valmisteverolain mukaan verottomia ja huoltovarmuusmaksuttomia. Välittömäksi ensikäytöksi lasketaan yleisesti käyttö, jossa savukaasut koskettavat tuotetta. Jos savukaasuilla kuumennetaan väliainetta, esimerkiksi vettä tai säteilyputkea, ilman että kaasut koskettavat lopputuotetta, on käyttö verollista. [17] Tämän mukaan esimerkiksi meesauunit ja vedyn valmistus höyryreformoinnilla ovat verottomia käyttökohteita, kun taas säteilyputkiuunit ja höyrykattilat eivät.

Polttoaineiden aiheuttamaa verokustannusta sekoittaa vielä energiaintensiivisen teollisuuden veronpalautus. Sen mukaan teollisuusyritys, jonka jalostusarvosta yli 0,5 % muodostuu energian (sähkö ja polttoaineet) valmisteveroista, on oikeutettu hakemaan veronpalautusta 85 % edellisen rajan ylittävästä osasta. [17] Tästä summasta maksetaan vain 50 000 € ylittävä osuus, mikä sulkee pois pienempiä energiaintensiivisiä yrityksiä. Palautuksen piirissä ovat kaikki suuret metsä-, metalli- ja kemianteollisuuden yritykset eli käytännössä kaikki yhtiöt, joiden toimintaa tämäkin työ koskee. Energiaintensiivisimmillä

suuryrityksillä palautus voi olla jopa 80 % maksetuista energiaveroista. Paperiteollisuudessa keskimääräinen palautusprosentti on teollisuusaloista suurin ollen noin 72 %. [20] Vero ei tietenkään koske yhdyskuntien energiantuotantoa.

2.2.4 Polttamisen päästöt

Polttoaineiden käytöstä aiheutuvat päästöt voidaan jakaa karkeasti kasvihuonepäästöihin sekä terveydelle ja ympäristölle suoraan haitallisiin ilmansaasteisiin. Energiantuotannon ja koko kasvihuoneilmaston kannalta tärkein kasvihuonekaasu on hiilidioksidi, sillä sitä syntyy kaikessa palamisessa. Merkittävimmät terveydelle ja ympäristölle haitalliset päästöt, joita seurataan ja rajoitetaan, ovat typenoksidi-, rikkidioksidi- ja hiukkaspäästöt. Ne ovat ilmansaasteiksi luokiteltavia kaasuja. Typenoksidit ja rikkidioksidi ovat happamoitavia yhdisteitä ja aiheuttavat esimerkiksi happosateita, savusumua ja otsonikatoa. Pienhiukkaset taas aiheuttavat suorimpia terveysongelmia ihmisille.

Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu ja kasvihuoneilmaston voimistumisesta johtuvan ilmastomuutoksen merkittävin aiheuttaja. Kasvihuoneilmasto on elämälle välttämätön mekanismi, jonka ansiosta maapallo on elinkelpoinen. Miljooniksi vuosiksi maaperään sitoutunutta hiilidioksidia on fossiilisia polttoaineita polttamalla vapautettu 1800-luvulla käynnistyneen teollistumisen jälkeen niin paljon, että ilmiö on voimistunut. Tämä johtaa ilmaston lämpenemiseen ja sitä kautta napajäätiköiden sulamiseen, vedenpinnan nousuun ja sään ääri-ilmiöiden voimistumiseen. Ilmastomuutos ja sen hillintä ovat nykyajan merkittävimpiä megatrendejä koko yhteiskunnassa ja erityisesti energiantuotantoon liittyvissä kysymyksissä.

Termillä NO_x viitataan haitallisiin typpioksidiyhdisteisiin NO ja NO_2 . Näistä NO muodostaa noin 95 % kaikista typenoksidipäästöistä. Typen oksideja syntyy käytännössä aina palamisessa polttoilman sisältämän typen ja korkeiden lämpötilojen vuoksi. Esimerkiksi taannoisessa Volkswagen-päästökandaalissa oli kysymys juuri NO_x -päästöjen sallitun tason ylittämisestä todellisissa ajotilanteissa. Typen oksidien muodostuminen ei kuitenkaan tapahdu yksinkertaisesti ilman typen ja hapen reagoidessa keskenään typpioksidiksi, vaan tapahtuma on hidas ja hyvin endoterminen reaktio. Tosiasiassa reaktion käynnistää käytännössä aina jonkin muun tekijän, kuten korkean lämpötilan, aikaansaama radikaalimolekyylä. Typen oksideja syntyy palamisessa kolmella eri mekanismilla, jotka ovat termien, nopea ja polttoaineperäinen NO_x -ien muodostuminen. Kahdessa ensimmäisessä mekanismissa typpi on peräisin palamisilmasta, kun taas viimeisessä se on nimensä mukaisesti polttoaineperäistä. [21]

Näistä mekanismeista merkittävin on termien NO_x -ien muodostuminen, joka tapahtuu korkeissa lämpötiloissa. NO_x -ien muodostuminen riippuu lämpötilasta eksponentiaalisesti, ja kriittisenä rajana voidaan pitää noin 1400 °C:tta. Yli 1900 °C:n lämpötilassa 90 °C:n nousu lämpötilassa voi jopa kaksinkertaistaa muodostuvien NO_x -ien määrän. Tämän

vuoksi palamislämpötilaa joudutaan monissa polttoprosesseissa rajoittamaan esimerkiksi palamisen vaiheistuksen tai savukaasujen takaisinkierrätyksen avulla. Suurin osa palamisen NO_x-päästöistä muodostuu juuri termisellä mekanismilla, jonka vuoksi se on vähintään otettava huomioon päästöjä arvioitaessa. Nopea NO_x muodostuu tiettytyypissä palamisympäristöissä, kuten matalalämpötilaisissa ja ali-ilmaisissa olosuhteissa, joissa viipymäajat ovat lyhyitä, kuten kattilan ylösajovaiheessa. Nopeiden NO_x:ien syntymiselle ovat alttiita esimerkiksi pintapolttimet, vaiheistettu palaminen ja kaasuturbiinit. Polttoaineperäinen NO_x:ien muodostuminen johtuu siitä, että monissa polttoaineissa on sitoutuneena typpeä, joka kemiallisen rakenteen hajotessa muodostaa vapaita typpiradiikaaleja. Näistä voi muodostua tavallista N₂:ta, mikäli ne reagoivat keskenään, tai NO_x:eja, mikäli ne reagoivat hapen kanssa. Polttoaineperäiset NO_x-päästöt ovat vain kiinteiden ja nestemäisten polttoaineiden ongelma. Kaasumaisissa polttoaineissa typpi on kaasuna N₂-muodossa ja se reagoi samoin kuin ilmankin typpi. Esimerkiksi hiili ja öljy sisältävät suhteellisen paljon kemialliseen rakenteeseen sitoutunutta typpeä. Öljynjalostuksessa typpipitoiset yhdisteet rikastuvat pääasiassa raskaisiin jakeisiin, kuten raskaaseen polttoöljyyn. Polttoaineeseen sitoutuneesta tyypestä noin 20–30 % muuttuu poltossa typen oksideiksi. [21]

Typen oksidien päästöjä voidaan rajoittaa ennen ja jälkeen niiden syntymisen. Ennen syntymistä tapahtuva eli primäärisillä menetelmillä rajoittaminen tarkoittaa käytännössä polttoaineen valintaa ja erilaisia polttoteknisiä menetelmiä. Polttoilman tai polttoaineen syöttö voidaan vaiheistaa, jolloin palaminen jakaantuu yli- ja ali-ilmaiseen vyöhykkeeseen, mikä alentaa palamislämpötilaa ja sitä kautta lämpötilaperäisten typenoksidien muodostumista. Lisäksi ali-ilmainen palamisvyöhyke pelkistää osan NO_x:eista syntymekanismista riippumatta takaisin alkuainemuotoon. Typen oksidien syntymistä vähentäviä polttimia kutsutaan yleisesti Low NO_x-polttimiksi. [22] Tällaiset menetelmät eivät välttämättä enää riitä päästörajoihin pääsemiseksi rajojen tiukentuessa lähitulevaisuudessa. Lisäksi voidaan tarvita sekundäärisiä menetelmiä.

Jo syntyneitä typen oksidien päästöjä voidaan vähentää savukaasuista sekundäärisesti SNCR- ja SCR-menetelmien (*Selective non-catalytic reduction* ja *selective catalytic reduction*) avulla. Kummassakin savukaasuihin ruiskutetaan urea- tai ammoniakkiliuosta, joka pelkistää syntyneet typen oksidit. SCR-menetelmässä savukaasut menevät vielä katalyyttipedin läpi, mikä tehostaa päästövähennystä. SNCR on investointikustannuksiltaan edullisempi ja helpommin sovitettavissa olemassa oleviin laitteistoihin. Toisaalta sen käyttökustannukset ovat kalliimmat ja NO_x-vähennysaste matalampi. SCR vaatii suuremman investoinnin ja enemmän laitteistomuutoksia, mutta sillä voidaan päästä jopa 90 %:n vähennykseen. [22] Eri lähteiden mukaan NO_x-päästöjen vähentämisen hinnaksi sekundäärisillä menetelmillä tulee isossa hiilivoimalaitoksessa noin 0,3–1 €/MWh riippuen päästövähennyksen tarpeesta, tuotannosta ja käyntiajasta. [22] [23]

Rikkidioksidipäästöt muodostuvat rikkipitoisen polttoaineen palamisessa rikin hapettuessa rikkidioksidiksi. Rikkipitoisia polttoaineita ovat esimerkiksi hiili ja raskaammat öljyjakeet, kun taas maakaasusta rikkipäästöjä ei käytännössä synny. Rikkidioksidipäästöt ovat usein suoraan verrannollisia polttoaineen rikkipitoisuuteen. Helpoin tapa päästöjen vähentämiseen on vähärikkisemmän polttoaineen valinta, joskin vähärikkiset polttoaineet ovat pääsääntöisesti kalliimpia. Raskaasta polttoöljystä on saatavilla myös vähärikkisiä versioita, joiden hinta on merkittävästi korkeampi, mikä vaikuttaa polttoaineiden kilpailukykyasetelmaan päästörajoiden tiukentuessa. Myös rikkipäästöjä voidaan vähentää sekundäärisillä menetelmillä. Nykyisin, ja erityisesti tulossa olevien päästövaatimusten tullessa voimaan, vaaditaan useimpia rikkipitoisia polttoaineita poltettaessa jonkinlainen rikinpoistojärjestelmä ainakin suuremmissa yksiköissä, joille rajat ovat tiukemmat. Tällaisia menetelmiä ovat esimerkiksi puolikuiva ja märkä menetelmä, joissa kalkkipohjaisia yhdisteitä ruiskutetaan savukaasuihin. Kalkki sitoo rikin kiinteäksi yhdisteeksi, joka voidaan erottaa mekaanisilla suotimilla. Näiden investointi- ja käyttökustannukset jakaantuvat suunnilleen samoin kuin edellä käsitellyillä SCR:llä ja SNCR:llä märän menetelmän ollessa kalliimpi ja tehokkaampi tekniikka. Leijupetikattiloissa voidaan kalkkikiveä syöttää myös suoraan tulipesään. Lisäksi biokattiloissa on yleisesti käytössä alkalisia savukaasupesureita, joissa pystytään hiukkasten ja rikinpoiston lisäksi ottamaan kondenssilämpönä talteen runsaasti matala-arvoista hukkalämpöä esimerkiksi kaukolämpökäyttöön. [22]

Rikkidioksidipäästöjen rajoittaminen on suhteellisen kallista, ja tiukentuvat päästörajat ovatkin käytännössä sulkeneet raskaan polttoöljyn pois polttoainevaihtoehdoista sellaisissa pienemmissä lämpökattiloissa, joihin ei vähäisempien käyttötuntien vuoksi kannata investoida rikinpoistolaitteita. Eri lähteiden mukaan SO₂-päästöjen vähentämisen hinnaksi sekundäärisillä menetelmillä tulee isossa hiililauhdevoimalaitoksessa noin 1–3 €/MWh riippuen päästövähennyksen tarpeesta, tuotannosta ja käyntiajasta. [22] [23] Tämä luku tosin on heikosti sovellettavissa Suomen olosuhteisiin, sillä Suomessa biopolttoaineita käytävillä yhteistuotantolaitoksilla investointi rikki- ja hiukkaspäästöjä vähentävään savukaasupesuriin voi jopa lisätä tuottoja lisääntyneen kaukolämmöntuotannon vuoksi. Useimmissa hiilivoimaloissakin rikinpoisto on ollut käytössä jo vuosia, minkä vuoksi kustannukset ovat Suomessa tuskin yhtä suuria, sikäli kun edellisistä luvuista suurin osa muodostuu investointikustannuksista.

Kolmas yleensä seurattava terveydelle haitallinen päästömuoto on hiukkaset. Nämä aiheuttavat eniten suoria terveysongelmia. Hiukkaspäästöt jaotellaan niiden kokoluokan mukaan. Haitallisimpia ovat pienhiukkaspäästöt, sillä ne kulkeutuvat keuhkorakkuloihin ja jäävät sinne aiheuttaen esimerkiksi keuhkoputkentulehduksia ja syöpiä. Hiukkaspäästöjä syntyy eniten kiinteiden polttoaineiden poltossa, mutta myös nestemäisillä polttoaineilla. Kaasuja poltettaessa hiukkaspäästöjä ei käytännössä synny. Energiantuotannon lisäksi suurimpia pienhiukkaspäästöjen aiheuttajia ovat liikenne (autojen päästöt ja tien ku-

luminen) ja puun pienpoltto. Hiukkaspäästöjä voidaan voimalakäytössä vähentää tehokkaasti erilaisilla kiinteillä suodattimilla sekä sähkösuodattimilla ja savukaasupesureilla. Nämä aiheuttavat tietenkin myös kustannuksia mutta eivät niin suuria kuin typen ja rikin poisto. Vähennettäessä rikki- ja hiukkaspäästöjä hiukkasten väheneminen tulee ikään kuin kaupan päälle [22].

2.2.5 Biomassan kaasutus

Kaasutus on prosessi jossa kiinteää ainesta, uusiutuvana vaihtoehtona yleensä biomassaa, hajotetaan palavaksi kaasuksi. Kaasua voidaan käyttää maakaasun tapaan sellaisissakin kohteissa, joissa polttoaineelta vaaditaan kaasumaista olomuotoa tai maakaasua muistuttavaa koostumusta. Siksi kaasutus tulee esiin uusiutuvana vaihtoehtona käytännössä kaikissa maakaasun käyttökohteissa prosessikäytöstä kaasuturbiineihin. Se lienee biokaasutuotantoa lukuunottamatta ainut suurempaan mittakaavaan soveltuva tapa käyttää biomassaa kaasun korvaajana.

Käytännössä kaasutus tapahtuu termisesti kattilamaisessa reaktorissa, jossa biomassaa ikään kuin poltetaan vajaalla hapella, mistä syntyvä tuotekaasu on häkä- ja vetypitoista. Tuotekaasu voidaan käyttää suoraan polttoaineena tai raaka-aineena esimerkiksi neste-mäisten biopolttoaineiden valmistuksessa. Kaasu on hyvin palavaa, joskin kaasutustekniikasta riippuen lämpöarvoltaan matalaa. Yksinkertaisemmassa tavallista polttoilmaa käyttävässä kaasutuksessa tuotekaasuun tulee paljon inerttiä typpeä, mikä laskee sen lämpöarvoa. Happikaasutus, jolla saataisiin huomattavasti väkevämpää tuotekaasua, on jonkin verran kalliimpaa ja tulee toistaiseksi kyseeseen vain korkeamman jalostusasteen käytössä, jossa halutaan puhdasta synteetikaasua. Kaasutus on sinällään yksinkertainen ja tunnettu prosessi. Tuotekaasu vaatii kuitenkin käyttökohteesta riippuen puhdistusta, mikä monimutkaistaa prosessia. Puhdistus nostaa kaasutuksen kustannuksia nopeasti kannattamattomalle tasolle. Korkeat kustannukset voivat olla kaasutuksen käytön rajoittavana tekijänä myös tässä työssä käsiteltävissä käyttökohteissa. Edullisimpia olisivat sellaiset käyttökohteet, joissa riittäisi pelkkä mekaaninen puhdistus ja tuotekaasu voitaisiin ohjata jäähdyttämättömänä suoraan polttoon. Kun kaasu on jo valmiiksi useiden satojen asteiden lämpötilassa, kompensoi se matalaa lämpöarvoa. Tällaisia käyttökohteita ovat esimerkiksi vanhojen hiilikattiloiden kaasutuskonversiot ja meesauunit.

Kaasutusta on tutkittu vaihtoehdoksi käytännössä kaikkiin maakaasua käyttäviin prosesseihin (ks. [24–27]) mutta toistaiseksi se ei ole lyönyt itseään läpi kuin meesauunikäytössä. Asiaa on tutkittu etenkin Suomessa ja Ruotsissa, joissa metsäbiomassaa on paljon tarjolla. Kaasutus laskee jonkin verran kokonaisenergiatehokkuutta, minkä vuoksi esimerkiksi biomassan kestävyyskriteerien muutokset tai muut rajoitukset, voivat karsia villempiä kaasutusvisioita.

3. MAAKAASUN SUURIMMAT KÄYTTÖKOHTEET

Tässä luvussa tarkastellaan tekniseltä kannalta maakaasun suurimpia käyttökohteita. Tutkittavat alat valittiin luvussa 2.1 esitettyjen alakohtaisten kulutuslukemien perusteella vastaamaan mahdollisimman suurta osaa kaasun käytöstä Suomessa. Käsiteltävät teollisuuden ja energiantuotannon sovellukset valittiin kaasuverkon alueella toimivien yritysten ympäristölupuihin kohdistuneen selvityksen perusteella.

Valikoidut kohteet voidaan jakaa sähkön ja lämmön tuotantoon sekä teollisuuden prosessikohteisiin. Suurin mutta samalla vaihtelevin kaasunkäyttökohde ovat olleet sähköä ja lämpöä tuottavat kaasukombivoimalat sekä yhdyskunnissa että teollisuudessa. Muita vähemmän merkittäviä kaasua käyttäviä lämmöntuotantotapoja ovat kaukolämmön erillistuotanto ja teollisuuden prosessihöyryn tuotanto. Teollisuusprosesseista merkittävimmäksi osoittautui vedyn valmistus, jota tapahtuu kemianteollisuudessa sekä öljyn- ja metallinjalostuksen yhteydessä. Muita merkittäviä teollisuusprosesseja olivat meesauunit ja paperinkuivaimet metsäteollisuudessa sekä metalliuunit metallinjalostusteollisuudessa.

Maakaasun käyttökohteet teollisuudessa ja sen erilaisissa prosesseissa on asetettu suurenuslasin alle, sillä niitä sivutaan vain hyvin kevyesti ja usein jätetään jopa kokonaan huomiotta erilaisissa energia-alan tulevaisuutta käsittelevissä katsauksissa. Lisäksi prosessikohteet ovat huomattavasti vähemmän herkkiä toimintaympäristön muutoksille verrattuna energiantuotantoon yhdyskunnissa, mikä näkyi jo aiemmin maakaasun kulutuksen jakautumista esittävässä kuvaajassa 2. Syynä ovat esimerkiksi tehtaiden yhdyskuntiin verrattuna pienempi koko ja prosesseissa rajalliset tekniset ratkaisut, joiden vuoksi vaihtoehtoisia tuotantotapoja ei ole saatavilla kuin kalliiden korvaavien investointien jälkeen. Toisin sanoen rinnakkaisia järjestelmiä ei tehdasympäristössä ole varaa ylläpitää samaan tapaan kuin yhdyskunnissa, joissa esimerkiksi sähkö voidaan tuottaa missä päin Suomea tai jopa Pohjoismaita tahansa. Prosessikohteista puhuttaessa voi myös olla, ettei yksinkertaisesti ole olemassa toisenlaista vaihtoehtoa. Näiden syiden vuoksi teollisuuden prosessikohteita ja niiden skenaarioista riippumattomia tulevaisuudennäkymiä käsitellään erityisen tarkasti. Sähkön ja lämmön tuotannon tulevaisuustarkastelu on vahvemmin kytköksissä toimintaympäristön muutoksiin ja siksi sitä käsitellään tarkemmin lopullisissa skenaarioissa.

3.1 Sähkön ja lämmön tuotanto

Maakaasun ja monen muunkin polttoaineen tärkein käyttökohde on sähkön ja lämmön tuotanto. Suomessa sähkön ja lämmön tuotanto on suuressa roolissa, sillä ilmasto on kylmä ja teollisuus energiaintensiivistä. Etenkin CHP eli sähkön ja lämmön yhteistuotanto (*Combined Heat and Power*) on korkean hyötysuhteen vuoksi järkevää, sikäli kun

myös lämmölle on enemmän käyttöä kuin lämpimämmissä maissa. Sähkön ja lämmön tuotanto voidaan jakaa karkeasti yhdyskuntien ja teollisuuden käyttöön. Yhdyskuntien käyttö liittyy Suomessa yleensä kiinteästi kaukolämpöön, jota voidaan tuottaa sekä sähkön ja lämmön yhteistuotantona että lämmön erillistuotantona. Myös sähköä voidaan tuottaa erillistuotantona. Teollisuudessa puolestaan tarvitaan usein höyryä, mutta siinä sivussa kannattaa tuottaa myös sähköä ja lämpöä.

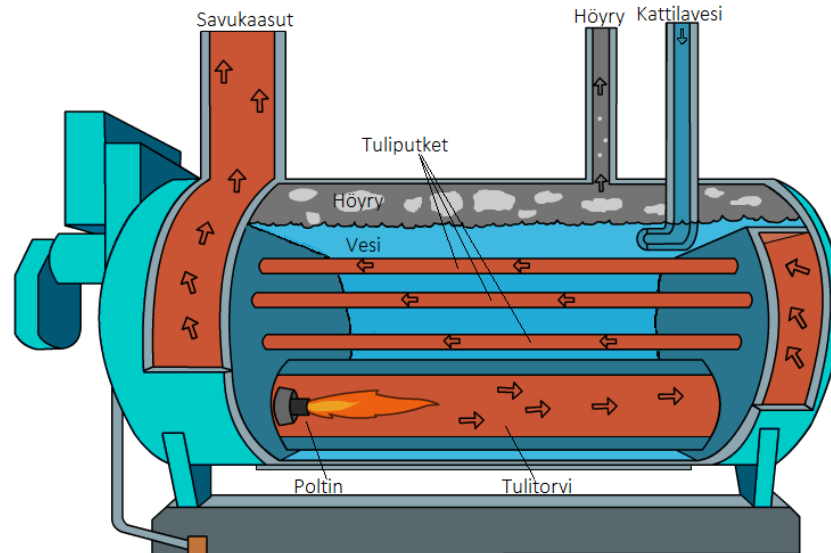
3.1.1 Voimalaitostekniikka

Teknisesti sähkön ja lämmön tuotantotavat voidaan jakaa karkeasti mekaaniseen välitykseen perustuviin ja veden kiertoon perustuviin laitteisiin eli kattiloihin. Mekaanisia laitteita ovat kaasuturbiinit ja moottorit. Niitä voidaan käyttää sähkön ja lämmön tuottamisen lisäksi mekaanisen energian tuottamiseen esimerkiksi erilaisissa kulkuvälineissä. Näissä tehokkain energia saadaan mekaanisena akselitehona, ja lämmöntuotanto perustuukin yleensä vain jälkilämmön hyödyntämiseen. Kattiloilla voidaan tuottaa lämmintä vettä ja höyryä, ja ne ovatkin selkeästi yleisempiä tuotantotapoja.

Veden kiertoon perustuvat kattilat voidaan jakaa korkeimmalla tasolla vesiputki- ja tuliputkikattiloihin. Jako perustuu siihen, kummalla puolella putkea lämmitettävä vesi ja palotapahtuma ovat. Tuliputkikattiloissa palaminen tapahtuu putkissa, joita ympäröi lämmitettävä vesi. Vesiputkikattiloissa taas palaminen tapahtuu isossa tilassa, jossa kulkeviin vesi- ja höyryputkiin lämpö siirtyy. Yleisesti ottaen kumpiakkin käytetään pienemmissä sovelluksissa, kun taas suuremmissa kohteissa lähinnä vesiputkikattilat tulevat kyseeseen esimerkiksi höyryn suurempien painevaatimusten ja laajemman polttoainevalikoiman vuoksi. Tuliputkikattilat ovat yksinkertaisuutensa vuoksi yleisiä pienen mittakaavan kaasu- ja öljykäyttöisissä lämpö- ja höyrykattiloissa.

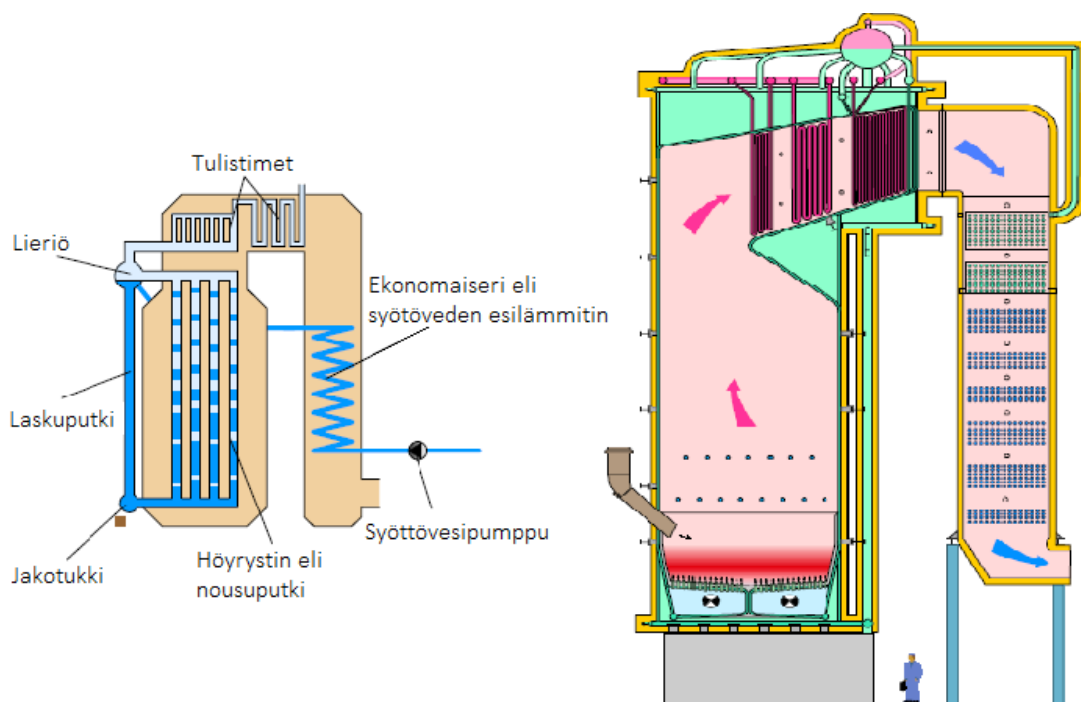
Tuliputkikattila on yleisesti ottaen yksinkertaisin kattilavaihtoehto. Rakenteellinen yksinkertaisuus ja pienempi koko mahdollistavat tuliputkikattiloiden valmistuksen sarjatuotantona ja toimituksen valmiina pakettina. Tämä luonnollisesti laskee tuliputkikattiloiden hintaa huomattavasti. Tehon skaalaus voidaan hoitaa asentamalla monta pienempää kattilaa rinnan. Myös käyttökustannukset ovat edulliset rakenteen koostuessa vain muutamasta osasta. Pienessä mittakaavassa myös hyötysuhde on parempi kuin vesiputkikattiloilla. Pienemmän mittakaavan käytössä tuliputkikattila on suosituin ratkaisu, mikäli poltetaan kaasua tai öljyä, joihin polttoainevalikoima käytännössä rajoittuukin suljetun rakenteen ja yksinkertaisen polttotekniikan vuoksi. Hyviä puolia ovat siis yksinkertaisuus, edullisuus ja varmuus. Huonona puolena ovat suhteellisen matalaksi rajoittuneet teho- ja painetasot sekä pieni polttoainevalikoima. Kuvassa 5 on esitetty yksinkertaistettu 2-vevoinen tulitorvi-tuliputkikattila. Vetojen määrällä tarkoitetaan karkeasti ottaen tuliputkien tekemiä kierroksia vesihauteessa. Yleisesti vaihtoehtona ovat 2-, 3-, ja 4-vevoinen kattila. Vetojen määrää kasvattamalla voidaan parantaa savukaasujen lämmön talteenottoa, mutta samalla se kasvattaa kattilan kokoa, monimutkaisuutta ja likaantuvia pintoja. Lisäksi läm-

pöä voidaan ottaa talteen veden ja polttoilman esilämmittimillä. Maakaasulla savukaasujen energia voidaan hyödyntää öljyä paremmin alhaisen kastepisteen vuoksi. Tuliputkikattilat ovat alhaisten investointikustannusten ja yksinkertaisuutensa vuoksi suosittuja kaukolämmön huippukuormakattiloina ja ei-energiaintensiivisessä teollisuudessa, jossa ei vaadita korkeita painetasoja ja suuria tehoja.



Kuva 5. 2-vetoinen tulitorvi-tuliputkihöyrykattila. Muokattu lähteestä [28]

Vesiputkikattiloiden teknisissä ratkaisuissa on enemmän hajontaa ja ne rakennetaan ainakin isommissa sovelluksissa käytännössä tapauskohtaisesti. Ne sopivat paremmin isompiin käyttökohteisiin, joskin tuhkaa tuottavien kiinteiden polttoaineiden käyttö pienemmissäkin sovelluksissa vaatii käytännössä vesiputkirakenteen. Höyryä tuottavien vesiputkikattiloiden päätyypit ovat karkeasti luonnonkiertokattila ja läpivirtauskattila. Luonnonkiertokattilassa käytetään höyrylieriötä, jossa höyry erottuu vedestä ja höyrystymätön vesi kiertää luontaisen tiheyseron vuoksi kattilan höyrystinpiiriä, kunnes poistuu höyrynä lieriöstä. Läpivirtauskattilassa ei nimensä mukaisesti ole kiertoa, vaan vesi virtaa kattilan läpi höyrystyksen matkalla. Läpivirtauskattilat on tarkoitettu enimmäkseen suurimman mitakaavan voimalaitoskäyttöön. Lieriölliset kattilat sopivat paremmin teollisuuden tarpeisiin niin vastapainevoiman kuin matalapaineisemmankin höyryn tuotantoon. Matalapaineista höyryä tuotettaessa ei välttämättä tarvita tulistimia. Vesiputkikattiloiden polttoainevalikoima kattaa käytännössä kaikki polttoaineet. Investointi- ja käyttökustannukset nousevat huomattavasti tehon ja painetason noustessa, mutta toisaalta samoja tasoja ei voida saavuttaa järkevästi tuliputkikattiloilla. [29] Kuvassa 6 on esitetty luonnonkiertokattilan toimintaperiaate ja sen erikoistapauksena leijukattila.



Kuva 6. Luonnonkiertokattilan toimintaperiaate ja esimerkkinä tyypillisen leijupetikattilan rakenne ja kokoluokka. Muokattu lähteestä [29]

Nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita, pääasiassa maakaasua ja öljyä, on suhteellisen helppo polttaa eikä näitä varten tarvita monimutkaisia syöttö- ja käsittelylaitteita tai polttotekniikoita. Raskasta polttoöljyä poltettaessa joudutaan yleensä käyttämään höyryä tahmean öljyn hajottamiseksi paremmin palaviksi pisaroiksi. Yleisesti puhutaan poltinpoltoista, jossa yksinkertaistetusti polttimesta vain syötetään polttoainetta ja ilmaa palotilaan. Nykyiset päästörajoitukset ja pyrkimys energiatehokkuuteen ovat toki asettaneet vaatimuksia myös poltinsuunnittelulle. Poltettaessa öljyä ja kaasua kattilassa myös säädettävyys ja turndown ratio eli minimi- ja maksimikuorman suhdeluku ovat eri polttoaine- ja energiantuotantomuotojen parhaasta päästä. [30] Luvussa 2.2.1 esitellyistä lämmönsiirtoominaisuuksista johtuen maakaasukattila täytyy mitoittaa noin 30 % suuremmaksi kuin vastaavan tehoinen öljykattila. Toisaalta esimerkiksi hiilikattilasta tulee noin 85 % suurempi [29]. Kaasu- ja öljykattilat soveltuvat Suomen kustannusolosuhteissa lähinnä lämmön ja höyryn vaihtelevaan erillistuotantoon.

Kiinteät polttoaineet ovat selvästi kaasua ja öljyä edullisempia, mutta samalla myös hankalammin poltettavia. Näille onkin kehitetty erilaisia menetelmiä, joista tärkeimmät ovat pöly-, leiju- ja arinapoltto. Nämä kaikki perustuvat vesikattilatekniikkaan. Kiinteän polttoaineen kattiloiden ylösajo ja tukipoltto ongelmatilanteissa tapahtuu joko öljy- tai kaasupoltinten avulla. Tällainenkin käyttää maakaasua jonkin verran kaasuverkon alueella. Kiinteän polttoaineen kattilat käsitellään tässä kuitenkin siksi, että ne ovat merkittävimpiä kilpailijoita kaasukäyttöisille voimalaitoksille.

Arinapoltto on vanhin kiinteän polttoaineen polttotapa, jossa polttoaine palaa periaatteessa samaan tapaan kuin takassa tuhkaritilän päällä. Polton primääri-ilma tulee ritilän

alta polttoainekerroksen läpi. Nykyaikaisissa arinakattiloissa tämä ritilä on moniosainen, kalteva ja liikkuu sekoittaen ja liikuttaen polttoainetta. Nykyisin arinatekniikkaa käytetään lähinnä pienissä kattiloissa ja joissakin erikoissovelluksissa, kuten jätteenpoltossa. [30] Pölypoltto on tarkoitettu kuiville kiinteille polttoaineille, pääasiassa hiilelle, vaikka sitä onkin Suomessa aiemmin sovellettu turpeen ja viime aikoina myös pellettien polttamiseen. Ennen polttoa kiinteä polttoaine jauhetaan mahdollisimman hienoksi pölyksi, joka syötetään polttimien kautta tulipesään. Hienonnettu polttoaine sekoittuu ja palaa tehokkaasti. Pölypolton huonoja puolia ovat kapea polttoainevalikoima ja korkeahkot käyttökustannukset sekä osin niistä johtuva suuri taloudellinen minimikoko. Toisaalta pölypoltolla voidaan kivihiilellä saavuttaa tarvittaessa todella suuria tehoja. Suurin osa maailman suurimmista voimalaitoksista on hiilen pölypolttolaitoksia. [30]

Leijupoltossa palaminen tapahtuu kuplivassa hiekkapedissä. Hiekkapetiä leijutetaan primääri-ilmalla, joka samalla sekoittaa polttoainetta ja petiä, mutta toimii myös palamisilmana. Hieman monimutkaisempi versio on kiertoleijutus, jossa leijutusilman puhallus on niin voimakasta, ettei petikerrosta ja palotilaa voi periaatteessa erottaa toisistaan. Hiekkapedin tarkoitus on toimia sekä kuivaavana ja polttoainelaadun muutoksia tasaavana lämpövarastona että sekoittavana väliaineena. Leijutuksen etuna on käytännössä rajaton polttoainevalikoima, suuri sieto polttoaineen kosteudelle ja laadunvaihteluille sekä muita polttotekniikoita matalampi palamislämpötila, joka korostuu erityisesti kiertoleijutetekniikassa. [30] Huonoja puolia ovat suuremmat investointi- ja käyttökustannukset sekä varsinkin vanhemmilla kattiloilla huono säädettävyyttä. Kiertoleijukattilat ovat paremmin säädettäviä mutta minimikooltaan ja kustannuksiltaan suurempia. Leijutustekniikkaa on kehitetty paljon Suomessa märkien puuperäisten polttoaineiden hyödyntämiseksi. Lisäksi uusissa kiertoleijukattiloissa voidaan polttaa eri polttoaineita, myös kivihiiltä, hyvin joustavasti esimerkiksi hintasuhteiden mukaan [19].

Kaasuturbiini on kaasunkäytön kannalta merkittävä sovellus. Kaasuturbiini muodostuu samalla akselilla olevasta kompressorista, turbiinista ja generaattorista. Kompressorin puristaa paloilmalla suuren paineeseen ja lämpötilaan, jonka jälkeen siihen ruiskutetaan polttoaine palokammiossa. Tämä seos palaa nopeasti ja tehokkaasti laajeten samalla turbiiniosan läpi. Turbiini pyörittää akselilla painetta tuottavaa kompressoriosaa sekä generaattoria, jolla voidaan tuottaa sähköä noin 30 %:n hyötysuhteella. Vaikka generaattorin pyörittäminen mekaanisesti onkin turbiinin päätehtävä, sisältävät savukaasut poistuessaan vielä paljon energiaa, joka kannattaa ottaa talteen jossain muodossa. Usein turbiinin savukaasuilla lämmitetään kaukolämpöä tai sähköä tuottavaa höyrypiiriä, jolloin puhutaan kombivoimalasta. Höyrypiirillä saadaan kerran käytetyistä savukaasuistakin paljon lämpöä talteen kaasun puhtauden vuoksi. Tällöin saavutetaan lauhdesähkön tuotannossa korkea, jopa 60 %:n hyötysuhde ja CHP-tuotannossa muihin yhteistuotantotapoihin verrattuna korkea rakennusaste. Rakennusaste on kombivoimalla noin 1, eli jokaista tuotettua lämpöyksikköä kohden tuotetaan yhtä paljon sähköä. Koska sähkötehon osuus on noin

puolet saatavasta hyötytehosta, mielletään maakaasu-CHP usein korkean sähkön hinnan tuotantomuodoksi [29].

Pelkän kaasuturbiinin hyviä puolia ovat edulliset investointikustannukset ja todella nopea ylösajettavuus täyteen tehoon asti. Huonona puolena puolestaan ovat korkeat käyttökustannukset kapeasta polttoainevalikoimasta johtuen. Näiden ominaisuuksien vuoksi kaasuturbiinit ovatkin yleisiä varavoima- ja reservikäytössä, sillä niillä voidaan korvata nopeasti ja tehokkaasti suuretkin poikkeamat sähkönjakelussa. Kombivoimalan etuna on korkea hyötysuhde ja rakennusaste. Tällöin investointikustannuskin nousee, mutta toisaalta suhteelliset käyttökustannukset alenevat, kun suurempi osa lämmöstä saadaan talteen. Viime aikoina kuitenkin matala sähkön hinta ja muita voimalaitospolttoaineita kalliimpi maakaasun hinta ovat vähentäneet kaasukombien käyttöä huomattavasti.

Moottorivoimalat ovat kaasuturbiinien tapaan mekaaniseen voimansiirtoon perustuvia nopeasti käynnistyviä ja suhteellisen pieniä voimalaitoksia. Kyseessä on esimerkiksi auton moottoria muistuttava mutta teholtaan voimalaitoskokuksen ratkaisu. Voimalaitoskokuksessa moottori pyörittääkin generaattoria. Periaatteessa myös moottorivoimalan jälkilämpöä voidaan käyttää hyväksi, joskin se harvemmin tulee varavoimakäytössä kyseeseen. Moottorivoimaloiden hyviä puolia ovat todella nopea ylösajettavuus sekä kaasuturbiineja parempi säädettävyys. Sähköntuotannon hyötysuhdekin on hyvä. Huonona puolena on kapea polttoainevalikoima, joka rajoittuu käytännössä öljyyn ja kaasuun, sekä niistä johtuvat korkeat käyttökustannukset. Moottorivoimaloita käytetäänkin avoimien kaasuturbiinien tapaan enimmäkseen varavoimana tai pientuotannossa.

Sähkön ja lämmön tuotannossa koko polttoainevalikoima on käytettävissä kattilateknikasta riippuen. Tuliputkikattiloissa, kaasuturbiineissa ja -moottoreissa voidaan kuitenkin käyttää vain öljyä ja kaasuja. Käytännössä kaikki biopolttoaineita hyödyntävät kattilat ovat leiju- tai kiertoleijukattiloita. Lisäksi nykyaikaisissa monipolttoainelaitoksissa voidaan polttaa puuta, hiiltä ja turvetta miltei missä suhteessa tahansa, mikä mahdollistaa polttoaineiden hintojen mukaan tapahtuvan optimoinnin. Kattilatekniikan valinta tapahtuukin käyttökohteen vaatimusten, polttoaineen hinnan ja saatavuuden mutta myös investointi- ja käyttökustannusten perusteella. Investointikustannukset vaikuttavat käyttötunneista riippuen megawattitunnille jyvittyvään kustannukseen.

Hiilidioksidipäästöjen lisääntyessä myös hiilidioksidin talteenotto voi yleistyä. Toistaiseksi se on vasta kehitysasteella ja osoittautunut sekä hankalaksi että kalliiksi. Kaasun osalta eräs ratkaisu olisi siirtyä metaanin hajottamiseen ennen käyttöä, jolloin saadaan vetyä ja kiinteää hiiltä. Toistaiseksi tekniikan kannattavuus riippuu pitkälti sivussa saatavan hiilen myyntihinnasta [31].

3.1.2 Yhdyskuntien ja teollisuuden erityispiirteitä

Yhdyskuntien energiantuotanto voidaan jakaa sähkön ja lämmön yhteistuotantoon sekä kummankin erillistuotantoon. Näissä muuttuvilla kustannuksilla on suuri rooli, sillä usein laajassa järjestelmässä on rakennettuna toimitusvarmuuden turvaamiseksi monenlaisia tuotantomuotoja, joista edullisin menee käytännössä aina ajojärjestyksessä edelle sähkön tuotannossa. Teollisuudessa yksittäisellä tehtaalla ei usein ole kovinkaan montaa vaihtoehtoa.

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto ja lämmön erillistuotanto kytkeytyvät kiinteästi kaukolämmön tai prosessihöyryn tarpeeseen. Näitä ajetaan lämmöntarpeen mukaan, joskin sähkön- ja polttoaineiden hinnat määrittävät eri laitosten ajojärjestyksen. Tämän vuoksi CHP ja lämmön erillistuotanto ovat voimakkaasti kausiluonteisia lämmöntarpeen lämpötilariippuvuuden vuoksi. Toisaalta myös sähkön tarve vaihtelee paljon, joskin lievemmin, vuodenajan mukaan. Sähkön hinnan ollessa korkea, saadaan CHP-tuotannon lämpö ikään kuin kaupan päälle. Matalalla sähkön hinnalla sähkö voi olla jopa ylimääräinen kuluerä, jos pelkästä lämmöstä saataisiin parempi tuotto. Tällöin voidaan tuottaa erillislämmön tuotantoa CHP:n sijaan.

CHP-tuotantoa on etupäässä suurimmissa kaupungeissa sekä energiaintensiivisissä metsä- ja kemianteollisuudessa, joissa on tarpeeksi lämpökuormaa riittävän vastapaineen tuottamiseksi. Sähkön erillistuotanto on vähentynyt viime aikoina rajusti. Lauhdevoimaloita on käytössä enää yksi, Meri-Porin kivihiiuvoimalaitos. Muut on yksitellen suljettu 2000-luvulla. Lisäksi joillain voimalaitoksilla on edelleen varalla käyttämättömänä olleita lisälauhdeturbiineja, joilla voidaan tuottaa sähköä jäähdytysvedellä kaukolämmön vastapaineen sijasta tai sitä osin korvaten. [19] Sähkön siirtoyhteyksien parantuessa lauhdesähköä alkaa todennäköisesti virrata uudelleen myös Suomessa, sillä Itämeren toisella puolella suurin osa sähköstä tuotetaan lauhdevoimalla. Lämmön erillistuotantoa on käytännössä kaikilla paikkakunnilla, joissa kaukolämpöä on saatavilla, joskin usein vain huippukuormakäytössä.

Teollisuuden energiaratkaisuihin tehdyn katsauksen mukaan pääosa teollisuuden energiantuotannon kaasusta käytetään kaasukombiteknikkaan perustuvana CHP:na tai huippukuormaa tuottavilla kaasukattiloilla. Sellutehtaat ovat yleensä energiaomavaraisia, mutta integraateissa ja varsinkin erillisillä paperitehtailla tarvitaan myös ulkopuolelta ostettuja polttoaineita energiantuotantoon. Kaasua käytetään polttoaineena myös vähemmän energiaintensiivisessä teollisuudessa, joskin näiden osuus kokonaismäärästä on pienempi. Tällöin kaasukattilat ovat usein pienehköjä, tasaista kuormaa tuottavia höyrykattiloita. Näissä tehontarve voi olla tasainen mutta koko usein niin pieni, että kiinteiden polttoaineiden järkevä käyttö rajautuu pois. Käytännössä vaihtoehdoksi maakaasulle jää yleensä kevyt polttoöljy. Pienissä kattiloissa myös käytön varmuus ja helppous voi olla tärkeää. Tällöin ei tarvita useita työntekijöitä vahtimaan höyryntuotantoa vuorokauden ympäri, vaan kattilan hoito voidaan ulkoistaa esimerkiksi paikalliselle energiayhtiölle.

Säätävät kaasukattilat ovat yleensä huippuvoimaa, joita on öljyyn palaamatta vaikea korvata esimerkiksi kiinteän polttoaineen kattiloilla. Ongelmaksi nousee suuri joustavuuden tarve tehossa, mikä on aiemmin rajannut kiinteän polttoaineen kattilat kankeutensa vuoksi pois vaihtoehtoista. Nykyisin myös biopolttoaineita voidaan polttaa joustavammin, mutta ongelmaksi muodostuu perinteiseen kaasu- tai öljykattilaan verrattuna paljon korkeampi investointikustannus, joka johtaa matalamman käyttöasteen vuoksi pitkään takaisinmaksuaikaan. Lisäksi toimintavarmuus ja nopea käyttöönotto ovat tärkeitä esimerkiksi pääkattilan toimintahäiriöissä.

Tuotantomuotojen kannattavuuteen vaikuttavat hyötysuhteiden ja hintojen lisäksi verotus ja tukijärjestelmät. Luvussa 2.2.3 käsiteltiin jo polttoaineiden erilainen verokohtelu eri käyttökohteissa sekä energiaintensiivisen teollisuuden veronkevennys. Lisäksi myös suorat tuet vaikuttavat kilpailukykyihin. Tällaisia nauttivat tuulivoimalla ja metsähakkeella tuotettu sähkö, joille kummallekin on oma tukijärjestelmänsä. Verotusta ja tukia käsitellään tarkemmin luvussa 4. Teollisuudessa polttoaineiden verotus tapahtuu periaatteessa samoin kuin yhdyskuntakäytössäkin. Erona on energiaintensiivisen teollisuuden veronpalautus, joka tekee esimerkiksi höyryntuotannosta maakaasulla huomattavasti vähemmän verotettua kuin erillislämmöntuotannosta kaukolämpökäyttöön.

3.1.3 Kustannukset

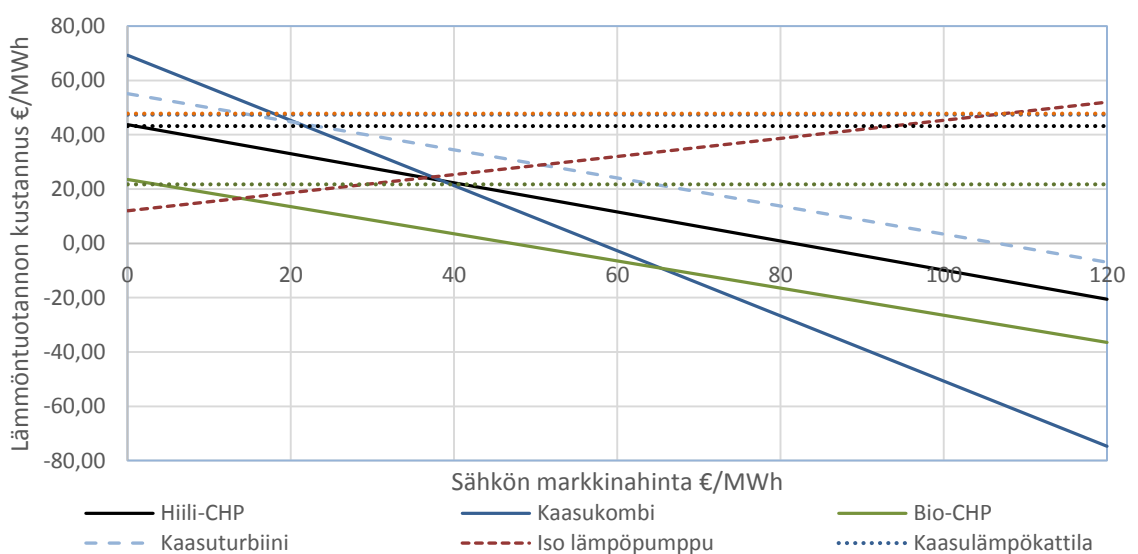
Sähkön ja lämmön yhteistuotannon sekä kummankin erillistuotannon kustannukset ja siihen pohjautuva ajojärjestys määräytyvät hieman eri tavoin. Yleisesti kaukolämpöön kytkeytyvissä CHP-tuotannossa ja lämmön erillistuotannossa ajojärjestys määräytyy saatavan kaukolämmön muuttuvien tuotantokustannusten mukaan. Myös kiinteillä kustannuksilla on väliä investointeja harkittaessa, mutta todellisessa ajotilanteessa hankinnan kustannuksia ei ole järkevää jyvittää tietylle tuotantomuodolle vaan pikemminkin koko järjestelmälle, sillä kaukolämmössä kyseessä on yleensä luonnollinen monopoli. Lämmöntuotannon kustannuksiin perustuva ajojärjestys saattaa kuulostaa yksinkertaisemmalta kuin onkaan. CHP-laitoksissa lämmöntuotannon kustannuksiin vaikuttaa suuresti erilainen verotus, samalla tuotettavasta sähköstä saatava markkinahinta sekä erilaiset tukijärjestelyt. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tuotetun lämpöenergiämäärän kustannuksista vähennetään samalla tuotetun sähkön myynnistä sekä esimerkiksi hakesähkön tuotantotuesta saatavat tulot. Yhteistuotannon lämpönä hyödynnettävää osuutta lisäksi verotetaan eri tavalla, mikä tekee siitä lähes automaattisesti edullisempaa kuin erillistuotantolämmöstä alhaisimpia sähkön hintatasoja lukuunottamatta.

Lämpöpumppujen kustannuksia arvioidessa tulee huomioida niiden suhteellisen suuri investointikustannus sekä vaatimuksena oleva riittävä ylijäämälämmönlähde [32]. Lisäksi satunnaiseen varalämmityskäyttöön voidaan käyttää myös sähkökattiloita, joissa sähkö muuttuu käytännössä hyötysuhteella 1 lämmöksi yksinkertaisilla vastuksilla. Sähkökatti-

lan etuina lämpöpumppuun verrattuna ovat liki mitätön investointikustannus ja täydellinen säädettävyys, minkä vuoksi se sopii joissain tapauksissa kesäajan varalämmönlähteeksi.

Seuraavaksi esitetään eri tekijöiden vaikutusta erilaisten sähkön ja lämmön tuotantotapojen kustannuksiin. Laskelmat on tehty tämän tutkimuksen puitteissa perustuen saatavilla olevaan tekniseen tietoon, vuoden 2016 keskimääräiseen hintatasoon ja vuoden 2017 verotukseen. Laskuja, niissä käytettyjä muuttujia sekä teknisiä vakioarvoja on avattu tarkemmin liitteessä B. Liitteessä on esitetty myös eri tuotantomuotojen keskimääräiset tuotantokustannukset nykyisillä hinnoilla.

Liitteen laskelmista voidaan poimia tärkeimpinä joitakin asioita. Todelliset lämmöntuotannon kustannukset eivät ole sama asia kuin polttoainekustannukset. Nykyisillä sähkön hinnoilla lämmöntuotannon kustannukset menevät kuitenkin samassa järjestyksessä kuin polttoaineiden hinnatkin. Ehdottomasti edullisin on bio-CHP, jolla lämmöntuotantokustannukset ovat alle 9 €/MWh hakkeella tuotetun sähkön tuotantotuen vuoksi. Sähköntuotannon lämmöntuotannon kustannuksia laskeva vaikutus huomataan kokonaisuhyötysuhteeltaan suunnilleen yhtä hyväksi arvioitujen kaasukombin ja kaasuturbiinin hintaerossa, joka on yli 6 €/MWh kaasukombin eduksi. Lämmön erillistuotannossa eri tuotantomuotojen hintasuhteet menevät jotakuinkin polttoaineiden käytön hintasuhteiden mukaan. Tässä erityisesti veroilla on suuri merkitys, sillä ne maksetaan täysimääräisinä. Mikäli verot pysyvät vakiona, ainoat muuttujat muuttuvissa kustannuksissa ovat polttoaineiden ja päästöoikeuden hinnat. Teollisuuden lämmön ja höyryn erillistuotannossa veroilla on puolestaan pienempi vaikutus erilaisten veronpalautusjärjestelmien vuoksi. Kuvassa 7 on esitetty liitteen B tietojen perusteella laskettu herkkyyystarkastelu eri CHP-tuotantomuotojen sekä erillislämmön tuotantotapojen lämmöntuotannon kustannuksista muuttuvan sähkön markkinahinnan suhteen.

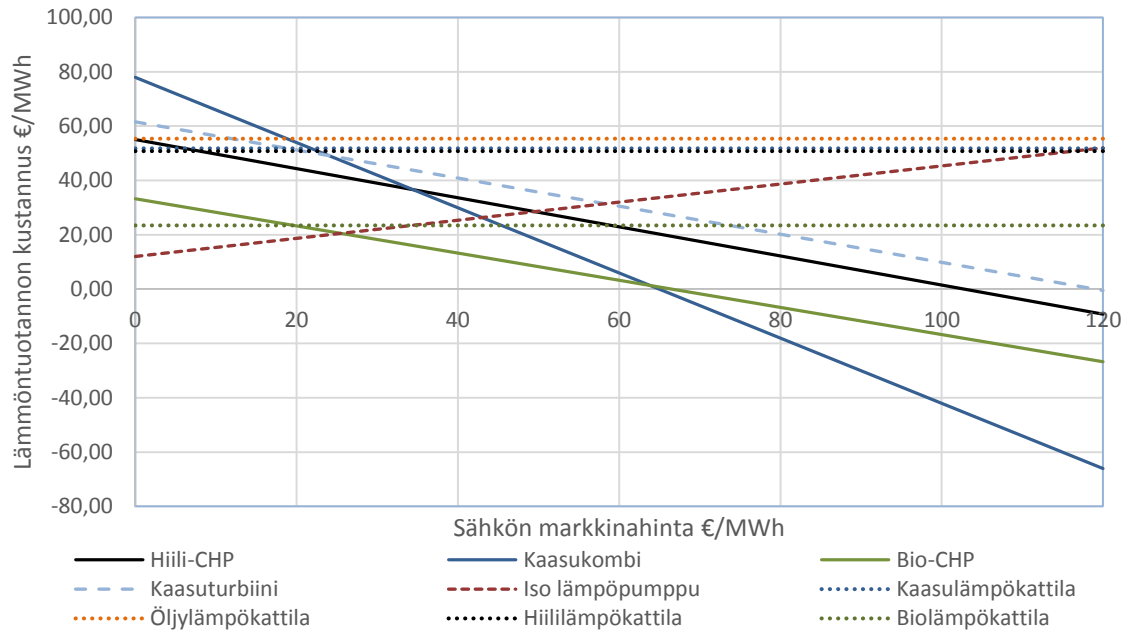


Kuva 7. Sähkön markkinahinnan vaikutus yleisimpien lämmöntuotantolaitostyyppien tuottaman lämmön hintaan

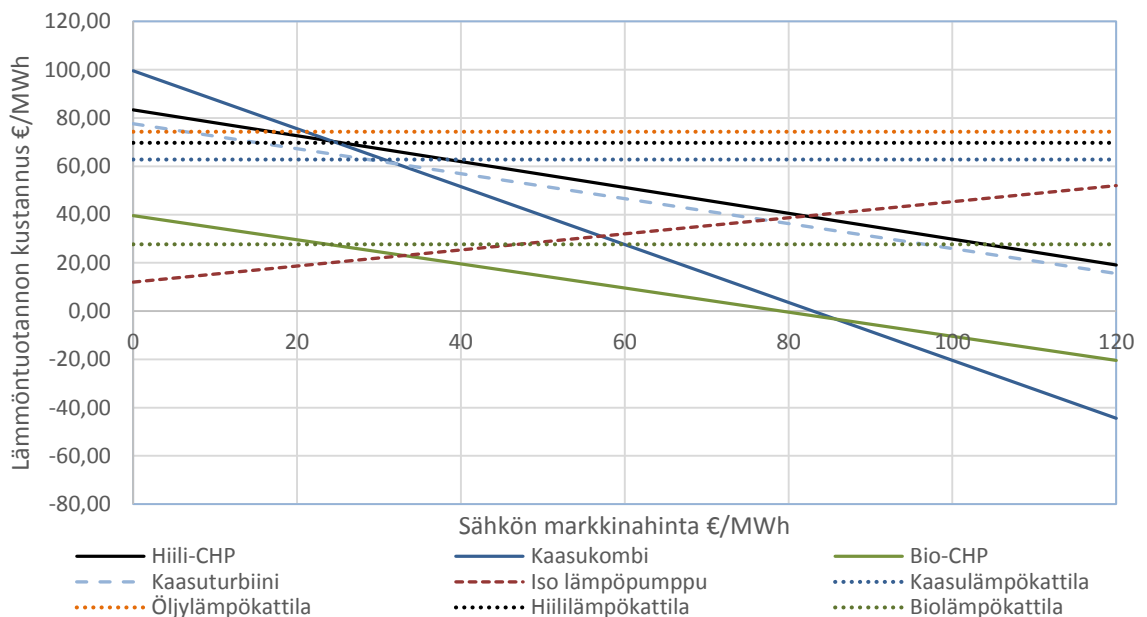
Kuvasta 7 nähdään loogisesti kaikkien yhteistuotantomuotojen lämmöntuotantokustannusten laskevan ja sähköä käyttävien lämpöpumppujen kustannusten nousevan sähkön hinnan noustessa. Kustannus menee jopa negatiiviseksi, jolloin voidaan ajatella sähköä tuottavan osuuden maksavan kaikki kustannukset takaisin ja lämmön tulevan ikään kuin kaupan päälle. Tällöin tuotannon kannattavuus on jo varsin hyvä, eikä erillistuotantoa kannata käyttää kuin poikkeustilanteissa. Huomataan myös, että hiili-CHP:n, bio-CHP:n ja kaasuturbiinin kustannukset näyttävät kulkevan liki yhdensuuntaisia suoria, mikä tarkoittaa, että pelkkä sähkön hinnan muutos ei vaikuta näiden ajojärjestykseen. Tämä johtuu niiden samaa kokoluokkaa olevista rakennusasteista. Maakaasukombivoimalan suora on sen sijaan huomattavasti jyrkempi, ja se meneekin sähkön kallistuessa kannattavuudeltaan ohi kaikista muista tuotantomuodoista yksi kerrallaan. Esimerkiksi sähkön hinnan ollessa 100 €/MWh, tuottaa jokainen myyty lämpömegawattitunti noin 50 €, minkä lisäksi energiayhtiö ottaa asiakkaalta todennäköisesti täysimittaisen hinnan myydystä lämmöstä. Vajaa 40 €/MWh:n sähkön hinta näyttää olevan jonkinlainen solmukohta, sikäli kun siinä hiili-CHP, maakaasu-CHP, lämpöpumppu ja biolämpökattila näyttävät olevan suunnilleen samanhintaisia.

Kuvasta 7 nähdään myös, että pelkkää lämpöä tuottava biokattila ja lämpöpumppu ovat nykyisillä alhaisilla sähkön hinnoilla lämmöntuotantokustannuksiltaan edullisempia kuin mikään edellä käsitellyistä fossiilisia polttoaineita käyttävistä yhteistuotantomuodoista. Kun otetaan vielä huomioon lämpökattiloiden suhteellisesta yksinkertaisuudesta johtuva edullisempi investointikustannus, selittää tämä kaukolämpöalan murrosta, jota käsitellään myöhemmin luvussa 4.2.

Edellä esitetyn perusteella voisi kuvitella CHP-tuotannon olevan suorastaan ylivoimaisen kannattavaa sähkön hieman kallistuessa. Sähkö ei kuitenkaan kallistu yksikseen, vaan taustalla vaikuttaa muitakin mekanismeja. EU:n pääasiallisen päästöjen hillintämekanismien päästökaupan toiminnan mahdollisen tehostumisen ja päästöoikeuksien hintojen nousun uskotaan nostavan myös sähkön hintaa. Lisäksi päästöoikeuden hinta muuttaa eri polttoaineiden kilpailukyky-suhteita. Tämä johtuu fossiilisten polttoaineiden erilaisista hiilidioksidipäästökertoimista tuotettua energiamäärää kohden, sekä siitä, että hakesähkön tukijärjestelmä on sidottu päästöoikeuden hintaan poistuen kokonaan päästöoikeuden hinnan ollessa yli 23 €/tCO₂. Niin sanotun vakauseron käyttöönoton on arvioitu nostavan päästöoikeuden hinnan tasolle 25 €/tCO₂ vuoteen 2025 mennessä [33]. Päästökauppaa käsitellään tarkemmin luvussa 4.1.2. Kuvassa 8 on esitetty eri tuotantomuotojen lämmöntuotantokustannuksia päästöoikeuden ollessa 25 €/tCO₂, ja kuvassa 9 päästöoikeuden ollessa 75 €/tCO₂.



Kuva 8. Eri CHP-tuotantomuotojen ja erillislämmön lämmöntuotantokustannuksia sähkön markkinahinnan funktiona kun päästöoikeuden hinta on 25 €/tCO₂.



Kuva 9. Eri CHP-tuotantomuotojen ja erillislämmön lämmöntuotantokustannuksia sähkön markkinahinnan funktiona kun päästöoikeuden hinta on 75 €/tCO₂.

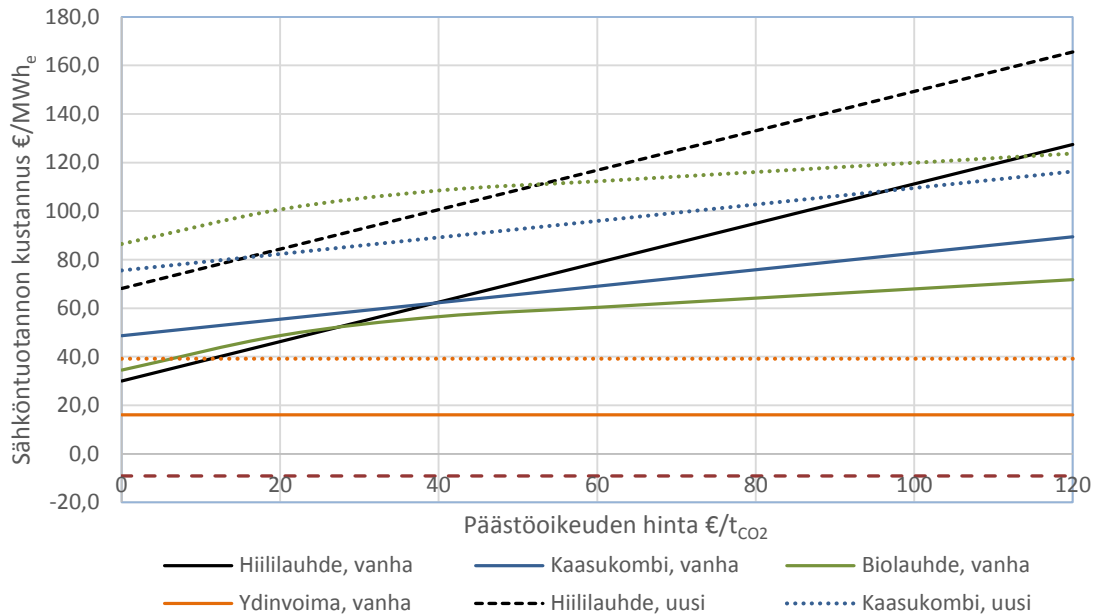
Kuvista 8 ja 9 nähdään, että hiilidioksidipäästön kallistuminen siirtää lähes kaikkien tuotantomuotojen suoria ylöspäin kuvaajassa. Ainoastaan biolämpökattila ja lämpöpumppu pysyvät miltei paikoillaan. Nämä olisivatkin alhaisilla sähkön hintatasoilla entistä kilpailukykyisempiä fossiilisilla polttoaineilla mutta myös biopolttoaineilla yhteistuotetun lämmön kanssa. Päästöoikeuden hinnalla 75 €/tCO₂ lämpöpumput olisivat kannattavin vaihtoehto aina alle 37 €/MWh:n sähkön hintaan asti, ja kaikkia fossiilisia yhteistuotantomuotoja kannattavampi alle 58 €/MWh:n sähkön hinnalla. Toisaalta on huomioitava, että

päästöoikeuden hinnan nousu todennäköisesti nostaa myös yleistä markkinasähkön hintatasoa, minkä vuoksi myös CHP:n kilpailukyky paranee. Bio-CHP:n kilpailukyvyn lievä heikkeneminen perustuu hakesähkön tuen poistumiseen yli 23 €/tCO₂:n päästöoikeuden hinnoilla. Toisaalta tämän jälkeen päästöoikeuden hinnan kasvu ei enää juurikaan vaikuta bio-CHP:n hintaan. Päästön kustannusten nousu kurittaa eniten hiilivoimaa, ja varavoi-
maksi mielletty kaasuturbiini ohittaa hiili-CHP:n päästöoikeuden hinnan noustessa riittävästi. Myös maakaasulla tuotettu erillislämpö tulee päästön hinnan noustessa eri fossiilista polttoaineista edullisimmaksi varalämmöksi esimerkiksi talven äkillistä huippukulutusta silmälläpitäen.

Sähkön erillistuotantoa on kahta lajia. Toisen muodostavat sähkön hinnasta riippumattomat ydinvoima sekä tuuli- ja aurinkovoima. Toinen on sähkön hintaan perustuva lauhdetuotanto, jota ajetaan vain silloin, kun se on taloudellisesti kannattavaa. Tällaisen kannattavuuden rajana käytetään yleensä sähköntuotannon kustannuksia, joihin on lisätty tavoiteltava tuottomarginaali sekä alas- ja ylösajosta aiheutuvat kustannukset. Myös eri lauhdetuotantomuotojen arvioituja kustannuksia ja niiden perusteina toimivia teknisiä tietoja on esitetty liitteessä B. Myös uutena rakennettavan voimalan kustannuksia on arvioitu. Laskelmista nähdäänkin, että perinteisen lämpövoimaan perustuvan lauhdetuotannon rakentamista voi tuskin pitää järkevänä nykyisessä markkinaympäristössä. Suurten käyttö-
tuntien vuoksi edullisimman ydinvoimankin kustannukset nousevat miltei kymmenen euroa megawattitunnilta korkeammiksi kuin viime vuosien keskimääräinen sähkön hinta. Sen sijaan olemassa olevilla hiili- ja biolaitoksilla tuotanto voi korkean kysynnän tunteina ollakin kannattavaa. Suurin huomio on se, että tuulivoima on nyky-ympäristössä selvästi kannattavin sähköntuotantoinvestointi. Tukijärjestelmän ansiosta sähköntuotanto kannattaa laskelman mukaan jopa -9,1 €/MWh:n sähkön hinnalla, joskin todellisuudessa tuen maksaminen pysähtyy negatiivisilla hinnoilla. Joka tapauksessa tämä selittänee jossain määrin myös tuulivoiman kasvavaa lisärakentamista. Ydinvoiman osalta huomataan, että olemassa olevan investointikustannuksensa maksaneen laitoksen tuotantokustannus on varsin alhainen. Tämän perusteella voisi olettaa, että myös nykyisillä vanhoilla ydinvoimatoimijoilla on intressejä jatkaa laitostensa käyttöä mahdollisimman pitkään.

Sähkön hinta ei vaikuta erillistuotantomuotojen kustannuksiin, vaan sähkömarkkinassa, jossa huippukulutus katetaan lauhdevoimalla, on vaikutussuhde päinvastainen. Sähkön hinta toki vaikuttaa siihen, kannattaako lauhdevoimaa käyttää ollenkaan. Lauhdesähkön fossiilisiin polttoaineisiin perustuvat tuotantomuodot ovat riippuvaisia päästöoikeuden hinnasta. Päästöoikeuden hinnan vaikutus sähköntuotannon kustannuksiin on esitetty kuvassa 10. Kuvasta huomataan, että vanha hiililauhde on kustannustehokkain lauhdetuotantomuoto nykyisillä alhaisilla päästöoikeuden hinnoilla, jos käyttötavaltaan erilaista ydinvoimaa ei lasketa. Biolauhde ohittaa hiililauhteen noin 30 €/tCO₂:n tuntumassa ja kaasu-
lauhde 40 €/tCO₂:ssa. Uusia lauhdevoimainvestointeja ei kuitenkaan voi perustella todennäköisiltä vaikuttavilla sähkön hintatasoilla. Toisaalta mikäli päästöoikeuden hinta

kohoa korkeaksi, voisi vanhojen voimaloiden konvertointi lauhdekäyttöön tulla kyseeseen. Tätä voidaan perustella ainakin kombivoimaloiden osalta näiden suhteellisen edullisella saattamisella tiukentuneita ympäristörajoituksia vastaavaksi. [34]. Ydinvoiman tuotantokustannukset vaikuttavat hyvin alhaisilta. Uusien voimaloiden rakentaminen lieenee silti hyvin vaikeaa rakennuslupien poliittisen luonteen ja rakenteilla olevien laitosten vuoksi.



Kuva 10. Sähkön erillistuotannon kustannukset uudelle ja olemassa olevalle laitokselle tuotantomuodoittain päästöoikeuden hinnan funktiona

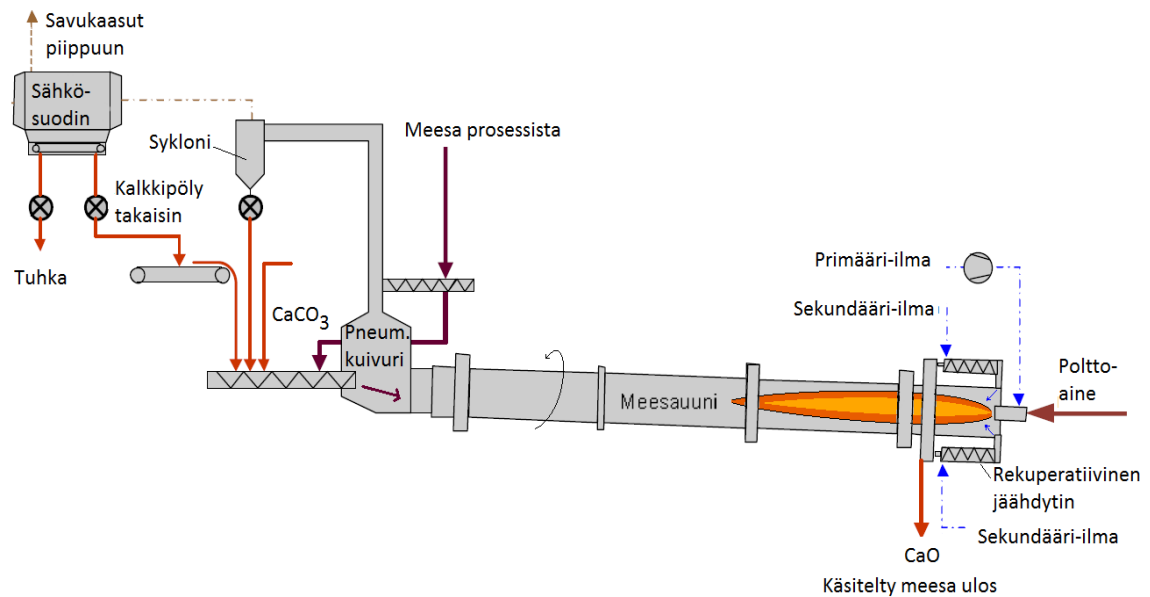
Edellä esitettyjä kuvaajia tarkastellessa tulee huomioida, ettei kaikkia kustannustekijöitä voi ottaa huomioon suhteellisen yksinkertaisessa laskelmassa. Lisäksi kustannuksiin vaikuttavia muuttujia on paljon muitakin kuin sähkön ja päästöoikeuden hinta. Esimerkiksi rikkipäästörajojen tiukentuminen voi nostaa hiili-CHP:n tai -lauhteen muuttuvia kustannuksia useilla euroilla megawattituntia kohden [23].

3.2 Meesauuni

Meesauuni on sellutehtaan prosessilaitte, jota käytetään keitossa käytettyjen kemikaalien kierrätykseen käytetyn meesan regeneroimiseen. Tähän tarvitaan runsaasti lämpöenergiaa ja korkeita lämpötiloja, minkä vuoksi meesauunissa tarvitaan erillistä polttoainetta. Meesauuni löytyy jokaiselta sulfaattimenetelmää käyttävältä sellutehtaalta, jollaisia myös kaikki suomalaiset tehtaat ovat. Sen energiankäyttö ei ole kovin suurta verrattuna koko tehtaan valtaviin energiamääriin, mutta se on merkittävä, sillä se on usein ainut ulkoista polttoainetta tarvitseva prosessikohde muutoin energiayliomavaraisissa nykyaikaisissa sellutehtaissa. Uunissa vaaditaan lämpötiloja joita ei voida saavuttaa esimerkiksi tehtaan voimalaitoksen höyryllä.

3.2.1 Prosessi

Sellutehtaan toiminnasta merkittävä osa liittyy keitossa käytettävien kemikaalien kierrättämiseen. Kierto mahdollistaa kemikaalien käyttämisen yhä uudelleen, mikä on sekä taloudellisesti että ympäristön kannalta järkevää. Keittokemikaaleina toimivat natriumyhdisteet saadaan takaisin kiertoon kalkin reaktioiden avulla. Meesauuni on kemikaalikierron prosessilaitte, jossa käytetty meesa eli pääasiassa kalsiumkarbonaatti reagoi korkeassa lämpötilassa takaisin poltetuksi kalkiksi ja hiilidioksidiksi. [35] Meesauuni on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Meesauunin toimintaperiaate. Muokattu lähteestä [36]

Meesauunissa tapahtuu reaktio



jonka alkaminen vaatii noin 800 °C:n lämpötilan, mutta optimaalinen reaktionopeus saavutetaan noin 1100 °C:n lämpötilassa. Savukaasujen lämpötilan täytyy kuitenkin olla huomattavasti korkeampi uunin heikon lämmönsiirron vuoksi. Lämpötila ei saa nousta myöskään liian korkeaksi, sillä lopputuotteen rakenteesta tulee tällöin liian kiteinen, mikä heikentää käsiteltävyyttä ja reaktiivisuutta. Ulkoisen polttoaineen tarve meesauunilla on koosta ja energiatehokkuudesta riippuen 5,5–7 GJ/t eli noin 1,5–1,9 MWh/t meesaa. [35]

Meesauuni on rakenteeltaan tiilellä vuorattu, kallistettu ja pyörivä rumpu-uuni, jossa raaka-aineet syötetään korotetusta syöttöpäästä. Meesa liikkuu uunissa lietemäisenä pyörivänä laattana tai pallona. Matalammassa päässä on poltin, jolla tuotetaan prosessissa tarvittava lämpö. Poltossa syntyvät savukaasut kulkeutuvat vastavirtaan meesan kulkuun nähden lämmittäen tätä. Meesauuni on kooltaan keskimäärin 100–140 m pitkä ja halkaisijaltaan 4–4,5 m. Pyörimisnopeus on 1–1,7 kierrosta minuutissa. Uuni voidaan

jakaa syöttöpäästä lukien kuivaus-, kalsinointi- ja jäähdytysvyöhykkeisiin. Kokonaisuudessaan viipymäaika on joitakin tunteja. Kuivausvyöhykkeessä meesan lämpötila ei vielä nouse sen sisältämän veden haihtumisen vuoksi. Mikäli erillistä kuivauslaitetta ei ole, käytetään kuivauspäässä metallisia ketjuja, joilla lämmönsiirtoa ja sekoittumista saadaan tehostettua. Nykyaikaisissa uuneissa meesaa kuivataan etukäteen pneumaattisella kuivaimella käyttämällä uunin savukaasujen lämpöä. Lopuksi reagoanut tuote saadaan ulos polttopäästä erillisen rekuperatiivisen jäähdytysosan kautta. Ennen jäähdytysosaa on patoava osa, jolla pidennetään meesan viipymäaika ja siten myös kalsinoitumisastetta. Jäähdytysosassa lopputuotetta jäähdytetään ilmavirralla, joka käytetään tämän jälkeen polton sekundääri-ilmana. [35]

Pääasiallinen lämmönsiirtomuoto uunissa on säteily, jonka voimakkuuteen lämpötila ja savukaasujen koostumus vaikuttavat suuresti. Näihin voidaan vaikuttaa polttoainevalinnalla ja polttotekniikalla. Primääri-ilmaa syötetään polttimesta yleensä vain 10–20 % palamiseen vaadittavasta ilmasta, jotta saavutetaan pitkä ja ”laiska” liekki (*lazy flame*). Polton osalta myös säädettävyys ja stabiilius ovat tärkeitä ominaisuuksia, sillä hallitsemattomat muutokset lämmönsiirrossa heikentävät kalkin ominaisuuksia, aiheuttavat renkaanmuodostusta ja voivat jopa vaurioittaa uunin vuorauksia. [35]

Säteilylämmönsiirron kannalta optimaalinen mahdollisimman korkea lämpötila on ristiriidassa tiukentuvien NO_x -rajojen kanssa, sillä korkeissa lämpötiloissa NO_x :n syntyminen kiihtyy. Päästöjä voidaan kuitenkin vähentää jopa 50 % pelkällä palamisilman vaiheistuksella. Meesauunien päästörajat on johdettu BAT-päätelmistä, eli ne perustuvat parhaaseen käytettävissä olevaan tekniikkaan ja olemassa olevien vähäpäästöisten laitteiden päästötasoihin. Kaasumaisille ja nestemäisille polttoaineille on asetettu erilaiset raja-arvot, mikä tasoittaa maakaasun tyypillisesti korkeampien NO_x -päästöjen vaikutusta polttoainevalintaan, eikä siten suosi esimerkiksi öljyä puhtaamman maakaasun kustannuksella. [37]

Polttoaineen sisältämä rikki lisää rikkidioksidipäästöjä, jotka ovat meesauunissa huomattavasti matalampia kuin muissa polttosovelluksissa, sillä suuri osa rikistä sitoutuu meesan sisältämään kalkkiin tai natriumiin ja siirtyy sitä kautta prosessiin. Täten rikkipäästöjä ei voida laskea suoraan polttoaineen rikkipitoisuuden perusteella, kuten yleensä on tapana. Lisäksi myös prosessista voi siirtyä jonkin verran rikkiä savukaasuihin. Rikkipäästöt ovatkin hyvin tehdaskohtaisia, esimerkiksi meesan pesu vaikuttaa yllättävän paljon savukaasujen rikkidioksidipitoisuuteen. [38] Kalkkia käytetäänkin esimerkiksi hiilivoimaloissa rikin sitomiseen. Kalkin rikinsidontakyvystä johtuen BAT-päätelmiin perustuvat päästörajat ovat huomattavasti tiukemmat kuin esimerkiksi saman kokoluokan voimalaitoksilla. Rikkipäästöjä voidaan vähentää sekundäärisesti alkalisella savukaasupesurilla, joka on useimmiten käytössä tehtailla, joilla meesauunissa poltetaan öljyä ja hajukaasuja yhdessä. [37]

Prosessissa rikki vähentää saatavan kalkin liukoisuutta ja reaktiivisuutta muodostamalla kalkkisulfidikerroksen kalkkioksidikappaleiden pinnalle sekä voimistaa renkaanmuodostusta uunissa. Kalkin liukoisuuden heikentyminen johtaa suurempaan korvauskalkin tarpeeseen, sillä liukenematon kalkki päätyy lopulta ulos prosessista kokkareenpoistolaitteiston kautta. Renkaanmuodostus tarkoittaa kalkin kovettumista uunin seinille, mikä on luonnollinen osa prosessia mutta liikaa voimistuessaan aiheuttaa lämpötilavaihteluja ja lopulta tukkii uunin. Lisääntyvä rikkipitoisuus vaikuttaa myös keittoprosessin parametreihin. Monista vaikutuksistaan huolimatta suurikaan rikkipitoisuus ei estä käyttöä prosessin kannalta [38], kunhan asia tiedostetaan prosessin suunnittelussa ja polttoainevalinnassa. [39] Päästörajat voivat kuitenkin muodostua esteeksi.

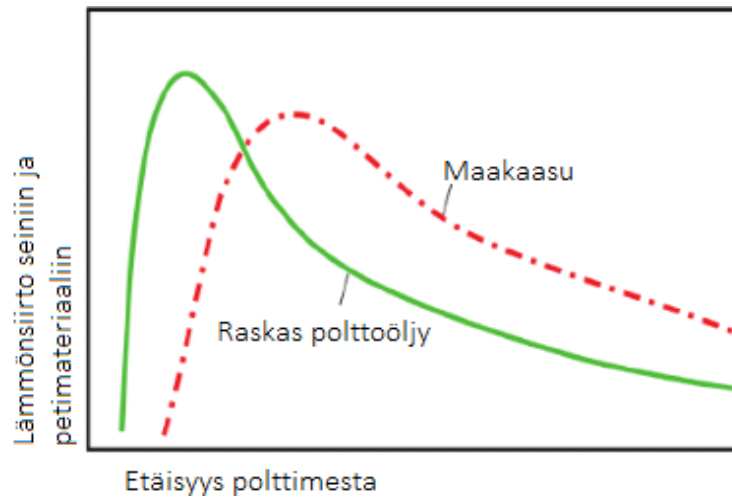
Käsiteltävän meesan altistuminen polttamisesta syntyville tuhkille asettaa joitakin rajoituksia polttoainevalinnoille, sillä suuri osa tuhkasta jää tuotteeseen ja siirtyy sen mukana myös muuhun selluprosessiin. Ongelmallisimpia ovat alkuaineet, jotka rikastuvat prosessiin. Sellunkeitolle haitallisimpia tuhkan komponentteja ovat alumiini, pii, fosfori ja magnesium. Esimerkiksi hiilen tuhka sisältää näitä liikaa, minkä vuoksi hiilen pölypolttoa ei voida käyttää meesauuneissa samaan tapaan kuin muutoin hyvin samankaltaisissa sementtiuuneissa. Myös muut mineraalit, kuten rikki, voivat aiheuttaa ongelmia prosessissa ja renkaanmuodostusta eli tukkeutumista uunissa, mutta näitä voidaan yleensä hallita poistamalla tasaisesti meesaa kierrosta. [35].

3.2.2 Perinteiset polttoaineet

Meesauunissa on perinteisesti käytetty polttoaineena maakaasua tai raskasta öljyä riippuen niiden hinnoista, saatavuudesta ja päästövaatimuksista. Usein maakaasukäyttöisissä uuneissakin on raskaan öljyn polttomahdollisuus. Lisäksi ohessa poltetaan yleensä jonkin verran sellutehtaalla syntyviä palavia jakeita, pääasiassa metanolia, tärpähtiä ja hajukaa-suja. Niiden osuus jää silti parhaimmillaankin vain joihinkin prosentteihin kokonaisenergiasta. Viime aikoina myös puunjalostuksessa syntyvää kiinteää puuainesta hyödyntävät biopohjaiset ratkaisut ovat yleistyneet, joskin ne vaativat miljoonien investointeja korvaavaan tekniikkaan. [35]

Sekä raskaalla polttoöljyllä että maakaasulla saavutetaan riittävän korkea lämpötila ja niiden koostumus on riittävän tasainen. Maakaasulla adiabaattinen palamislämpötila on noin 2220 °C ja raskaalla polttoöljyllä noin 2330 °C. [35] Palamislämpötilalla on merkitystä kalsinointireaktion vaatiman lämpötilan sekä lämpötilasta voimakkaasti riippuvan säteilylämmönsiirron vuoksi. Meesauunissa tulee hyvin esiin aiemmin käsitelty säteilylämmönsiirron ero raskaalla ja nokeavalla hiilivedyllä puhtaasti palavaan maakaasuun verrattuna. Ero on niin suuri, että vertailtaessa vaihtoehtoisia polttoaineratkaisuja, käytetään näiden liekkiä kuvailemaan jopa termejä ”maakaasumainen” tai ”öljymäinen”. Liekkien lämmönsiirtoprofiilit ovat varsin erilaiset, mikä näkyy kuvassa 12, jossa on esitetty lämmönsiirto meesauunissa etäisyyden funktiona perinteisillä polttoaineilla. Tämä johtaa esimerkiksi siihen, että raskaalle öljylle suunnitellun uunin muuttaminen kaasulle voi johtaa

jopa polttoaineenkulutuksen lisääntymiseen noin 5–7 prosentilla, kun kaasut poistuvatkin korkeammassa lämpötilassa kuin aiemmin. [38] Eroa voidaan kuroa jonkin verran umpeen uunikohtaisesti määriteltävillä polttoteknisillä ratkaisuilla. Toisaalta puhtaasta ja yksinkertaisesta palamisesta johtuen maakaasua poltettaessa tarvitaan vähemmän yli-ilmaa, eli ylimääräisen ilman lämmittämiseen ei kulu niin paljoa energiaa kuin öljyä käytettäessä [38].



Kuva 12. Lämmönsiirto etäisyyden funktiona meesauuniin perinteisillä polttoaineilla. Muokattu lähteestä [38]

Maakaasulla todellinen palamislämpötila on puhtaan palamisen vuoksi korkeampi, mikä aiheuttaa suurempia lämpötilaperäisiä NO_x -päästöjä. Paljon typpeä sisältävien kiinteiden ja nestemäisten polttoaineiden kanssa myös polttoaineperäinen NO_x -muodostus lisää typipitoisuutta. Esimerkiksi raskasta polttoöljyä käytettäessä tämä johtaa nykyaikaisilla polttimilla varustetuissa uuneissa lopulta keskimäärin saman kokoluokan päästöihin, mikä ilmenee laskettaessa päästöä tuotettua sellutonna kohden. Tästä huolimatta kaikista vähäpäästöisimmät uunit käyttävät polttoaineenaan öljyä. Enemmän päästöön näyttäisivät vaikuttavan joissain uuneissa poltettavat hajukaasut, joiden sisältämä ammoniakki tuottaa palaessaan helposti NO_x :eja. Päästörajat ovat kuitenkin polttoainekohtaisia, joten NO_x -päästöt eivät suoraan estä minkään polttoaineen käyttöä. Päästötietokatsauksen mukaan NO_x -päästöt eivät vaikuta olevan ongelma ainakaan suomalaisilla meesauuneilla. [37]

Polttoöljyn sisältämä rikki voi muodostua ongelmaksi. Rikillä on aiemmin esitettyjä vaikutuksia prosessiin, joskin öljyä on käytetty meesauuneilla niin kauan, että näiden kanssa pystytään silti toimimaan. Suurempina ongelmana ovat tiukkenevat rajat rikkipäästöille, sillä niihin pääseminen voi aiheuttaa ongelmia ilman savukaasujen puhdistuslaitteita, sillä rikkiä siirtyy savukaasuihin myös muualta prosessista etenkin vanhemmilla tehtailla. Siirtymistä maakaasusta öljyyn voidaan tuskin nähdä järkevänä. BAT-päätelmien mukaan meesauunissa tulisi valita käytettäväksi mahdollisimman vähärikkinen polttoaine.

3.2.3 Vaihtoehtoiset polttoaineet

Öljyn ja kaasun korkea hinta sekä osin myös pyrkimys ympäristöystävällisyyteen ovat saaneet metsäteollisuusyhtiöt etsimään myös vaihtoehtoisia polttoaineita meesauuneille. Yhdysvalloissa esimerkiksi petrokoksin käyttö on herättänyt kiinnostusta sen edullisen hinnan vuoksi. [40] Täällä kiinnostus on ollut suurinta uusiutuvia ja tehtaiden omia sivujakeita hyödyntäviä ratkaisuja kohtaan. EU:n BAT-asiakirjojen mukaan fossiilisten polttoaineiden korvaaminen sellutehtaan omilla biomassajakeilla on suositeltavaa ja nykyään jo koeteltuakin tekniikkaa. Yleisimmät menetelmät ovat kuoren kaasutus, kuoren pölypoltto, mäntyöljyn ja sen johdannaisten poltto sekä mustalipeästä erotetun ligniinin poltto. Nykyaikaisella sellutehtaalla energiaomavaraisuus on täysin mahdollista normaalikäynnissä. [37]

Merkittävimmäksi noussut sovellus lienee kaasutus, jonka tuotekaasua voidaan mekaanisen puhdistamisen jälkeen käyttää suoraan polttoaineena. Tuotekaasu on kaasuna helposti poltettavaa, ja sillä voidaankin saavuttaa maakaasumainen liekki. Lisäksi osa puun sisältämistä prosessille haitallisista aineista jää tuhkaksi kaasuttimeen eikä rikastu kemikaalikiertoon. [35] Tuotekaasu sisältää paljon hiilidioksidia, vettä ja paljon typpeä, mikäli kaasutushapettimena on käytetty ilmaa. Tämän vuoksi saatavan kaasun lämpöarvo on huomattavasti esimerkiksi maakaasua matalampi. Tämä johtaa suurempiin kaasuvirtauksiin saman energiamäärän siirtämiseksi, mikä puolestaan voi rasittaa esimerkiksi savukaasujen käsittelyä ja puhaltimia, mikäli laitteisto on suunniteltu toisenlaiselle käytölle. Toisaalta kun tässä tapauksessa kaasu voidaan johtaa viilentämättömänä suoraan polttokohteeseen jopa 700 °C:n lämpötilassa, ei matala lämpöarvo haittaa vaan voidaan saavuttaa jopa maakaasua korkeampia palamislämpötiloja. Erilainen lämpötilajakauma voi silti aiheuttaa ongelmia siirryttäessä perinteisemmistä polttoaineista kaasutukseen. [41] Kaasutus alkaa kuitenkin olla jo koeteltua tekniikkaa, sillä esimerkiksi Ruotsissa eräällä tehtaalla kuoren kaasutus on ollut käytössä jo vuodesta 1985 [37]. Suomessakin tekniikasta on nähty joitakin toteutuksia. Kuoren kaasutuksen meesauunin polttoaineeksi voidaan ajatella olevan tällä hetkellä niin sanottu state-of-the-art-tekniikka, sillä se tulee olemaan käytössä kaikissa Suomeen lähivuosina tulevilla tai suunnitteilla olevilla biojalostamoiksikin nimetyissä sellutehtaissa [36] [42] [43].

Meesauunin energianlähteenä kaasutus tulee halvemmaksi kuin monissa muissa kohteissa. Kustannuksia alentavina seikkoina ovat suhteellisen vähäinen lopputuotteen puhdistuksen tarve, matalat painevaatimukset kaasuttimelle sekä samalla tehtaalla syntyvät kaasutuskelpoiset puujakeet. Kannattavuus riippuu lopulta eniten perinteisten polttoaineiden hinnoista. 1980-luvulla noussut kiinnostus kaasutukseen hävisi nopeasti öljytuotteiden halventuessa öljykriisin jälkeen. Nykyisin tämä kiinnostus on taas palannut myös ilmastomuutoksen vuoksi. [35]

Yksinkertaisemmassa suorassa puun poltossa kuori tai puru kuivataan, murskataan ja poltetaan samaan tapaan pölypolttona kuin hiili. Etuna on kaasutukseen verrattuna suhteellinen yksinkertaisuus ja haittapuolena puun sisältämien haitallisten aineiden rikastuminen prosessiin, polttoaineen laadunvaihtelu, hankalammat poltto-ominaisuudet sekä alhainen palamislämpötila. Haitallisten aineiden päätyminen prosessiin aiheuttaa suurentunutta kemikaalien kulutusta ja mahdollisesti muutoksia sellunkeitossa.

Hieman erilainen mutta myös selluntuotannon ylimääräistä energiaa hyödyntävä ratkaisu on erottaa mustalipeästä sen sisältämä ligniini ja polttaa se meesauunissa. Ligniinin talteenotto on järkevää siksi, että se sisältää suurimman osan mustalipeän energiasta. Kuivatun ligniinin lämpöarvo onkin suhteellisen korkea. Erottamalla ligniini voidaan laskea kuormaa soodakattilalla, mikä nostaa menetelmän kiinnostavuutta erityisesti tehtailla, joilla soodakattila on pullonkaula tehtaan kapasiteetin nostamisen kannalta. Joidenkin arvioiden mukaan tarve soodakattilan kuorman alentamiseksi on jopa edellytys taloudelliselta kannalta, sillä ligniinin talteenotto on suhteellisen kallista verrattuna muihin polttoainevaihtoehtoihin. Se tulee kuitenkin huomattavasti halvemmaksi kuin sellutehtaan kalteimman komponentin, soodakattilan uusiminen. [38] Ligniinin talteenotto ja pölypoltto ovat olleet hieman marginaalisempia ratkaisuja, mutta kummastakin löytyy joitakin toteutuksia ainakin Suomessa ja Ruotsissa. Ligniinistä voidaan valmistaa myös joitain korkeamman jalostusarvon kemikaaleja, minkä vuoksi sen energiakäyttö ei liene pidemmän ajan tavoitteena.

Sellunvalmistuksen yhteydessä erotettava mäntyöljy vastaa poltto-ominaisuuksiltaan pitkälti raskasta polttoöljyä ja kävisi periaatteessa sellaisenaan sen korvaajaksi, joskin käsittelylaitteistojen materiaalivalintoihin tulisi kiinnittää huomiota mäntyöljyn happaman luonteen vuoksi. Toisaalta mäntyöljylle on korkeammankin jalostusasteen käyttökohteita kuin polttaminen. [35] Todennäköisesti tämän vuoksi mäntyöljyn poltto on raskaasti verotettua myös prosessien polttoaineena [17], minkä vuoksi sen käyttö pääpolttoaineena ei ole kovin kannattavaa Suomessa. Tokikin energiaveron palautus tasoittaa hieman käytön kustannuksia. Mäntyöljyn jatkojalostuksen sivutuotteena syntyvän pien käyttö meesauunissa on kuitenkin suotavampaa, ja sitä harjoitetaankin käytännössä miltei kaikilla tehtailla, joiden läheisyydessä mäntyöljyä jalostetaan. Ruotsissa piki on jopa suosituin polttoaine meesauuneilla.

Tuhkan sisältämien prosessiin kuulumattomien yhdisteiden rikastuminen on yksi rajoite vaihtoehtoisia polttoaineita valittaessa. Käsittelyistä tämä on suurin ongelma tehtaan puunkäsittelyssä syntyvän kuoren suorassa polttamisessa uunissa. Muita ongelmia ovat biopolttoaineiden kosteus, usein matalampi palamislämpötila ja laatu vaihtelut. Nämä voidaan osittain kiertää kaasuttamalla puu ja käyttämällä saatavaa tuotekaasua polttoaineena. Joka tapauksessa jonkinlainen kuivausjärjestelmä yleensä vaaditaan. Tässä voidaan yleensä käyttää sellutehtailla saatavilla olevaa matala-arvoista ylijäämälämpöä tai kaasuttimen savukaasuja.

Yleisesti ei voida sanoa mitään tiettyjä rajoja prosessiin kuulumattomien aineiden pitoisuuksille tai esimerkiksi vaadittavaa käytettävyyttä (*availability*), vaan nämä riippuvat suuresti tehtaasta ja sen prosesseista. Eri-ikäisillä ja erilaisille kapasiteeteille suunnitelluilla tehtailla joustovarot esimerkiksi meesauunin käynnin ja eri pitoisuuksien suhteen vaihtelevat suuresti. Joka tapauksessa kunnossapidon ja valvonnan tarve kasvaa voimakkaasti verrattuna perinteisiin ratkaisuihin. Yleisimmät katkosten aiheuttajat ovat ongelmat polttoaineen kuivauksessa, kuten tulipalot, sekä kaasutuksessa pedin sintraantuminen. Yleisesti ottaen meesauunin käytettävyys laskee alhaiseksi verrattuna tehtaan muihin komponentteihin ollen 70–90 %. Lisäksi korvauskalkin syöttöä joudutaan lisäämään kemikaalikiertoon, jotta vierasainepitoisuudet saadaan pidettyä alhaisina. Tämä pätee erityisesti kuoren pölypoltolle. Ongelmana vanhojen laitteiden konversioissa voidaan pitää myös vain osittaista korvaavuutta, sillä korvausinvestoinneissa alkuperäistä polttoainetta joudutaan käyttämään 35–65 % kokonaisenergiämäärästä toimintavarmuuden ja kunnollisten uuniolosuhteiden takaamiseksi. [27] Tilanne lienee parempi alusta asti biopolttolaitteille suunnitelluissa ratkaisuissa, joita ei tiettävästi ole Suomen maakaasuverkon alueelle suunnitteilla.

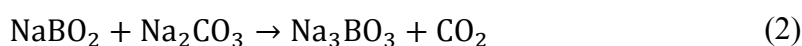
Meesauuneissa kilpailevia polttoaineita ovat maakaasu, raskas ja kevyt polttoöljy sekä sellutehtaiden erilaiset sivutuotteet kaasutettuna tai suoraan poltettuna. Eri polttoaineilla ei tiettävästi saada mitään ratkaisevia laadullisia etuja, joskin prosessin ulkopuolisten aineiden kertyminen ja mekaanisten syöttölaitteiden ongelmat aiheuttavat jonkin verran lisäkustannuksia. Maakaasun hyviä puolia meesauunilla ovat puhtaus, tasaisuus, riittävä lämpötila ja ohjattavuus. Lisäksi maakaasu palaa helposti käytännössä täydellisesti, minkä vuoksi ei tarvitse lämmittää yli-ilmaa. Huonoja puolia ovat huonompi säteilylämmönsiirto ja hinta sekä fossiilisuus. Nykyisin energiaomavaraisella sellutehtaalla se voi olla ainut fossiilinen polttoaine, mikä laskettaneen huonoksi puoleksi, mutta tämä on toisaalta ongelma myös sen suorimmalla kilpailijalla öljyllä. Maakaasun palamislämpötila on täydellisestä palamisesta ja vähäisestä yli-ilmamäärästä johtuen korkeampi kuin sen kilpailijoilla, mikä voi aiheuttaa lisäkustannuksia NO_x-päästöjen vähentämiseksi. Raskaan polttoöljyn rikkipitoisuus ei automaattisesti sulje sen käyttöä pois kuten pienissä lämpökeskuksissa, sillä valtaosa rikistä sitoutuu lopputuotteeseen ja siten siirtyy sellunkeittoprosessiin. Tämä aiheuttaa lisääntyntä keittokemikaalien tarvetta ja voi vaikuttaa myös sellun laatuun.

3.2.4 Kilpailevat teknologiat

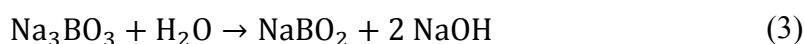
Boraattiautokaustisointi ei varsinaisesti kilpaile maakaasun polton kanssa, vaan se on sellutehtaan kalkkikierron kanssa osittain vaihtoehtoinen uusi teknologia, joka voi korvata kalkkikierron osin tai jopa kokonaan. Tämä vaikuttaa siten suoraan kalkkikiertoon kuuluvan meesauunin käyttöön. Täydellistä kalkkikierron korvaamista ei ole vielä kokeiltu, mutta osittainen korvaaminen on käytössä joillakin tehtailla Pohjois-Amerikassa ja Ruot-

sissa. Tyypillinen korvausaste on 10–30 %, mikä näkyy suunnilleen vastaavana energiankäytön vähenemisenä. Toistaiseksi menetelmästä ei ole löytynyt merkittäviä haittapuolia ainakaan käytössä olevilla korvausasteilla. Teknologia mahdollistaa myös kapasiteetin nostamisen tehtailla, joilla kaustisointilaitteisto on prosessin pullonkaula. Tällainen nähdäänkin tällä hetkellä autokaustisoinnin merkittävimpänä käyttökohteena erityisesti taloudelliselta kannalta, sillä se ei vaadi juuri ollenkaan investointikustannuksia tuottavia laitteistomuutoksia. [37] Tällöin meesauunin energiantarve pysyisi siis vakiona tuotannon kasvaessa.

Boraattiautokaustisoinnissa soodakattilaan syötetään natriummetaboraattia, joka reagoi jo kattilassa käytetyn keittokemikaalin eli natriumkarbonaatin kanssa muodostaen trinatriumboraattia reaktioyhtälön



mukaisesti. Yhdiste poistuu soodakattilan pohjasta sulana muiden kemikaalien kanssa, ja reagoi sulanliuotuksessa veden kanssa muodostaen jälleen natriummetaboraattia sekä keittokemikaali natriumhydroksidia reaktioyhtälön



mukaisesti. [37]

3.2.5 Tulevaisuus

Maakaasun käyttö meesauuneilla ei hyvin todennäköisesti tule enää lisääntymään. Se on ollut tähän mennessä käytössä kaikilla kaasuverkon alueella olevilla sellutehtailla, ja osa on siirtynyt siitä jo pois. Verkon laajentuessa maakaasuun siirtymistä voisi tapahtua, joskin laajentaminen on hyvin epätodennäköistä. Kaikki uudet sellutehdashankkeet ovat suunnitteilla tai rakenteilla satojen kilometrien päähän kaasuputkesta, joten niiden osalta kasvua ei ole tulossa. Lisäksi näistä jokaisessa meesauunien polttoaineeksi on valittu kaasutuskaasu, mikä on vahva indikaatio siitä, että se on ainakin nykyisessä poliittisessä ja taloudellisessa ympäristössä paras ratkaisu uuteen hankkeeseen. Ennemminkin nyt kyseeseen tulee pohtia, tuleeko kaasun käyttö pysymään nykyisellä tasollaan.

Korvausinvestointien suhteen toisiin fossiilisiin polttoaineisiin siirtyminen tuskin tulee kyseeseen, ellei hinnoissa tai verotuksessa tapahdu suuria muutoksia nykyisestä kehityksestä poikkeavasti. Etenkään suorimman kilpailijan eli raskaan polttoöljyn suhteen tuskin tullaan tekemään sellaisia päätöksiä, jotka suosisivat sitä puhtaamman maakaasun käytön sijaan. Tosin normaalisti kalliimpi öljy on edullisina aikoina maakaasua halvempaa verottomuuden vuoksi. Sivujakeilla, kuten tärpätillä ja hajukaasuilla, voidaan vielä korvata joitakin prosentteja. Toisaalta vallalla oleva biojalostamoajatus voi tukea näiden jakeiden jatkojalostamista arvokkaammiksi tuotteiksi.

Todennäköisin korvaaja on uusiutuviin tehtaan sivutuotteisiin perustuva ratkaisu, joka tosin riippuu paljon tehtaan tilanteesta. Korvausinvestoinnit on tehty kaikilla erillisillä sellutehtailla, mutta ei paperitehdasintegraateissa. Integraateissa sivutuotteena syntyville puujakeille on usein parempaa käyttöä paperitehtaalla tarvittavan energian tuottamisessa. Jos höyryn tuotanto kuoresta vähenee ja se täytyy korvata esimerkiksi maakaasukäyttöisellä apukattilalla, tulee tämä lopulta kalliimmaksi höyrykattiloiden ja meesauunin sekä polttoaineiden erilaisen verokohtelun vuoksi. Korvausinvestoinnin kannattavuus onkin siis pitkälti tehdaskohtainen asia. Isompi paperintuotantopuoli vaatii enemmän energiaa selluntuotannon sivujakeista ja toisaalta isommalla sellutehtaalla syntyy puolestaan enemmän ylimääräistä puutähdettä.

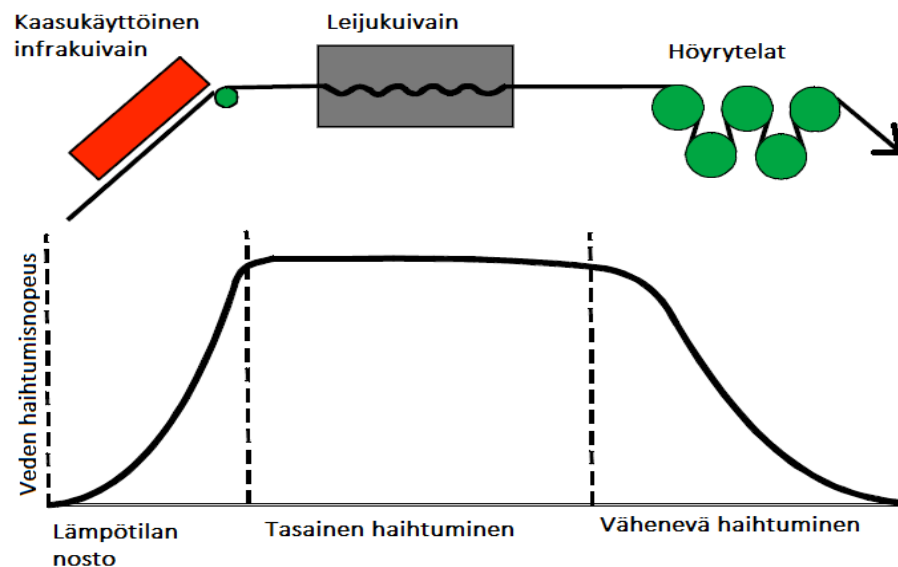
Korvausinvestoinnin tehneillä tehtailla käytetään toistaiseksi edelleen merkittäviä määriä fossiilisia tukipolttoaineita. Eräs uhkakuva on tämänkin tukikäytön väheneminen ja lopulta loppuminen. Toisaalta jos tukikäytön tarve on näin mittava, voitaneen olettaa, että maakaasun kulutus ei tule kokonaan loppumaan, vaikka korvausinvestointeihin päädyttäisiinkin.

Jonkinlainen lisääntyminen nykytasosta on mahdollista vain olemassa olevien tehtaiden tuotannon lisäyksen kautta, sillä meesauunin energian käyttö on suoraan verrannollinen tehtaan tuotantoon. Tämän osalta kasvu voi olla jopa mahdollista lähivuosina, sillä sellun valmistaminen on kannattavampaa kuin aikoihin ja investointeja kapasiteettien nostamiseksi on tehty paljon. Toisaalta edellä esitetyn boraattikaustisoinnin avulla tuotantoa voidaan lisätä energiankulutusta kasvattamatta. Tässä työssä tarkateltavan aikavälin sisällä muutos voi tapahtua myös toiseen suuntaan, jolloin käyttö vähentyisi tuotannon mukana. Maakaasun käyttö voi vähentyä rajusti myös tehtaiden sulkemisen vuoksi. Vaikka suurin tehtaiden sulkuvimma on jo takanapäin ja sellulla tuntuu olevan kysyntää, ei tätäkään vaihtoehtoa voida sulkea kokonaan pois varsinkaan integroimattomien ja vanhojen tehtaiden osalta. Toisaalta, kuten edellä mainittiin, on yksittäisillä sellutehtailla meesauunien korvausinvestoinnit jo tehty, minkä vuoksi tällaisten integroimattomien tehtaiden sulkeminen ei vaikuttaisi suuresti maakaasun käyttöön. Suurten valmisteilla olevien sellutehdashankkeiden valmistuminen voi ylitarjonnan vuoksi vähentää kaasun kulutusta nykyisillä tehtailla.

3.3 Paperinkuivaimet

Paperikone muodostuu suurimmaksi osaksi erilaisista kuivaimista. Pääosassa perinteisessä paperin valmistuksessa ovat sylinterin muotoiset höyrykäyttöiset telakuivaimet, mutta lisäksi käytetään yleisesti myös kaasukäyttöisiä kuivaimia. Nämä voidaan jakaa karkeasti infrapunasäteilyyn perustuviin infrakuivaimiin ja kuuman ilman puhallukseen perustuviin leiju- ja puhalluskuivaimiin. Yleensä näitä käytetään paperikoneen alkupäässä, jotta rainan lämpötila voidaan nostaa nopeasti kuivausalueelle. Merkittävin käyttökohde on päällystetyn paperin valmistus, jossa näitä käytetään päällystyskoneen alku-

osassa heti päällystyksen jälkeen. Päällystys ei kestä märkänä tavallisen höyrytelakuivaimen kosketusta. Lisäksi lämpötilan nopea nosto kuivausalueelle on tärkeää pohjapaperin vettymisen estämiseksi. [44] Päällystyskoneilla käyttöjärjestys on yleensä seuraava: infrapunakuivain, leijukuivain ja viimeisenä sylinterikuivaimet. Joissain tapauksissa yksi kolmesta voidaan jättää pois [44]. Toinen merkittävä kaasua käyttävä sovellus on pehmo-paperin tuotanto, jossa kuivaamiseen käytetään yleisesti isoa höyrylämmitteistä ”jenkki-sylinteriä”, jonka kuivaustehoa parannetaan usein suoraan kaasulla lämmitetyllä ilmapuhalluksella. Kuvassa 13 on esitetty tyypillinen päällystetyn paperin kuivausprosessi ja veden haihtumisen vaiheet siinä.



Kuva 13. Tyypillinen päällystetyn paperin kuivausprosessi ja veden haihtuminen. Kuvaaaja ei ole mittakaavassa. Muokattu lähteestä [45].

3.3.1 Prosessi

Kaasukäyttöiset kuivaimet voidaan jakaa pääasiassa säteilylämmönsiirtoon perustuviin infrakuivaimiin sekä konvektioon perustuviin ilma-kuivaimiin. Vaihtoehtona kaasun poltolle säteilykuivaamiseen voidaan käyttää sähköä ja puhallusilman lämmittämiseen höyryä.

Infrakuivaimet ovat kaasukäyttöisistä kuivaimista hieman vanhempi keksintö ja ilma-kuivaimet tuoreempaa ja joissain kohteissa edellistä korvaavaa tekniikkaa. Joissakin kohteissa käytetään vain jompaakumpaa teknisistä syistä. Infrakuivaimella voidaan kohdistaa lämpösäteily tarkasti tietylle alueelle kuivattavaa paperia koskettamatta sitä. Usein infrakuivaimia käytetäänkin paperin pinnan lämpötilan nopeassa nostamisessa kuivausalueelle, minkä jälkeen varsinainen kuivausenergia tuodaan jollain muulla tavalla. Infrakuivaus on toteutettavissa sähköisillä halogeenilampuilla tai polttamalla kaasua säteilyssä. Kaasun tai sähkön tehtävänä on tuottaa riittävä lämpötila, jolla lämpöenergia siirtyy tehokkaasti lämpösäteilynä paperiin. Säteilylämmönsiirto noudattaa yhtälöä

$$q_s = \sigma(T_s^4 - T_k^4)\epsilon_s\epsilon_k\epsilon_n, \quad (4)$$

jossa q_s on lämpövuoto, σ Stefan-Bolzmännin vakio, T_s säteilijän lämpötila, T_k kohteen lämpötila, ϵ_s säteilijän emissiviteetti, ϵ_k kohteen emissiviteetti, ja ϵ_n näkyvyyskerroin. Nähdään että koko yhtälössä suurin vaikutus on neljännessä potenssissa olevilla lämpötiloilla. Lisäksi on huomioitava, että vastaanottavan paperin emissiviteetti riippuu suuresti säteilyn aallonpituudesta. [44]

Kaasun poltolla saavutetaan noin 1950 °C:n lämpötila, jolla ylläpidetään säteilijän lämpötilaa noin 800 °C–1100 °C:ssa. Sähköinfralla käytetään korkeintaan 2 260 °C:n lämpötilaa. Sähköinfrassa 80–85 % sähköenergiasta muuntuu säteilyksi. Kun otetaan huomioon lamppujen tarvitsema viilennys, on kuivauksen kokonaishyötysuhde 25–40 %. Kaasuinfralla vain noin 28–55 % kaasun poltossa vapautuvasta energiasta siirtyy säteilyyn, mutta toisaalta myös savukaasujen sisältämä lämpö hyödynnetään useissa kuivaimmalleissa puhaltamalla ne kuivattavaan paperirataan, mikä nostaa kokonaishyötysuhdetta huomattavasti. Savukaasut tosin absorboivat osan säteilystä, mikä monimutkaistaa las-kentaa. [44]

Ilmakuivaimet voidaan jakaa puhallus- ja leijukuivaimiin. Leijukuivaimessa paperiin molemmilta puolilta puhallettu kuuma ilma sekä kannattelee että kuivaa paperirataa. Leijukuivaimia käytetään samaan tapaan kuin infrakuivaimia eli erityisesti kuivauksen alkuvaiheissa yleensä heti infrakuivainten jälkeen tai joissain tapauksissa niiden sijaan. Infrakuivainta korvaavaan käyttöön suunniteltu leiju- tai puhalluskuivain voi käyttää jopa 50 % vähemmän energiaa. Valmistettaessa molemmilta puolilta päällystettyä paperia käytetään joskus myös leijutekniikkaan pohjautuvia kääntölaitteita, joilla paperirataa saadaan ohjattua ilman päällystettä vahingoittavaa suoraa telakosketusta. Puhalluskuivaimella (*impingement dryer*) puhalletaan myös lämmitettyä ilmaa, mutta vain toiselta puolelta rataa, eikä ilmavirta kannattele paperia. Tällaisia tarvitaan sovelluksissa, joissa radan toista puolta ei ole tarkoitus kuivata tai sitä kuivataan esimerkiksi höyryllä tavallisella tai jenkkisylinterillä. Jenkkisylinteri on korkeapaineisella höyryllä lämmitettävä valurautatai terässylinteri. Se on pehmopaperikoneen tärkein ja suurin osa, joka voi olla halkaisijaltaan jopa seitsemän metriä. Sylinteriä ympäröi huuva, joka toimii puhalluskuivaimena. Huuvaan syötetään yleensä kaasua polttamalla saatua kuumaa ilmaa, joskin myös höyrykäyttöisiä huuvia on nähty vanhemmissa ja hitaammassa koneissa. Suuria tuotantonopeuksia ei höyryllä kuitenkaan voida saavuttaa. Pehmopaperikoneet ovat lyhimpiä ja kuivausteholtaan suurimpia koneita paperiteollisuudessa. Toisaalta ne ovat myös hyvin energiaintensiivisiä. Noin 60 % pehmopaperin kuivausenergiasta tulee huuvasta ja 40 % sylinteristä. Sylinterillä on myös paperin rakenteeseen vaikuttavia tehtäviä. [46]

Puhalluskuivaimella voidaan lyhentää huomattavasti tavallistakin paperikonetta ja parantaa energiatehokkuutta yhdistämällä sylinteri- ja ilmakuivaus. Tällainen on vielä suhteellisen uutta teknologiaa ja tulee kyseeseen tilanteissa, joissa vanhan koneen kapasiteettia halutaan nostaa koon kasvamatta tai ylimääräistä edullista höyryä ei ole saatavissa. [46]

Koska biomassalla tai integraateissa mustalipeällä tuotettu höyry on huomattavasti kaasua edullisempaa, ovat tällaiset ratkaisut usein tapauskohtaisia optimointitehtäviä.

Ilmakuivaimissa vallitseva lämmönsiirtotapa on konvektio, joskin osa lämmönsiirrosta tapahtuu myös säteilynä kuumista kuivainrakenteista. Ilmakuivainten ilman lämmittämisessä käytetään joko ulkoista polttoainetta, höyryä, kuumaöljypiiriä tai sähköä yleisyydeltään tässä järjestyksessä. Toki kuumaöljypiirin öljy täytyy myös lämmittää jollain, ja usein siihen käytetäänkin omaa kattilaa, jonka polttoainevaihtoehdot ovat hieman laajemmat kuin suorassa kuivauskäytössä. Toisaalta tällöin menetetään suorasta ensikäytöstä saatava veroetu. Yleisesti vaaditaan ulkoista polttoainetta riittävän lämpötilan saavuttamiseksi. Kaasukäyttöisissä kuivaimissa käytetään yleensä 300 – 400 °C:n ilman lämpötiloja. Tyypillisellä höyryllä saavutetaan vain noin 175–185 °C:n lämpötila puhallusilmalle, millä ei välttämättä saada riittävää kuivaustehoa nykyaikaisille nopeille paperikoneille. Höyryn käyttö voi tulla kyseeseen, mikäli sitä on saatavilla hyvin halvalla verrattuna kaasumaisiin polttoaineisiin. Jos polttoilman lämmitys tapahtuu lämmönsiirtimellä, ei polttoaineella periaatteessa ole väliä. Yleensä silti polttoaineena käytetään joko maatai nestekaasua, sillä täydellisen palamisen vuoksi ilmaa voidaan lämmittää suoraan savukaasuilla ja myös savukaasut voidaan ohjata paperirataan. Tällöin energiaa ei kulu lämmönsiirtohäviöihin ja polttoainetta voidaan käyttää verottomasti. Lisäksi kaasukäyttöisen ilmakuivaimen säädettävyys on erittäin hyvä. [46] [44]

3.3.2 Polttoaineet

Infra-, leiju- ja puhalluskuivaimilla käytetään lähinnä kaasumaisia polttoaineita eli maakaasua tai nestekaasuja, sillä niiden savukaasut voidaan ohjata koskettamaan paperirataa ja täten saada nekin poistamaan kosteutta. Tämän vuoksi kaasumaisten polttoaineiden käyttö lasketaan verottomaksi ensikäytöksi. [17] Periaatteessa myös nestemäisiä polttoaineita voitaisiin käyttää, mutta lämmönsiirrinten käyttö ja savukaasujen lämmön hukkaaminen tekee tästä vähemmän tehokasta. Joissain sovelluskohteissa, kuten pehmopaperin tuotannossa, voidaan periaatteessa käyttää kevyimpiä öljyjakeita, kuten petroolia myös suoraan. Tällaisissa täytyy kiinnittää todella suurta tarkkuutta palamiseen, jotta se olisi mahdollisimman täydellistä. Poltto tapahtuu erillisessä polttokammiossa nurkkapolttona eikä puhallusilman syöttölinjassa, kuten kaasulla. Haasteellisemmasta poltosta johtuen öljypoltinten säädettävyys on heikko kaasukäyttöisiin verrattuna. [46]

Maakaasun ja nestekaasun polttotekniset erot ovat marginaalisia, joskin tiheydestä ja lämpöarvosta johtuvat erot estävät suoran vaihdettavuuden. Lisäksi nestekaasupolttimilla on havaittu maakaasua pidemmästä hiiliketjusta johtuvaa helpommin tapahtuvaa nokeamista ja savuttamista epäoptimaalisissa palamisolosuhteissa, kuten Low NO_x-poltossa. [16] Tämä saattaa olla ongelma joissakin suurta puhtautta vaativissa kohteissa.

Kaasukäyttöiset infrakuivaimet ovat periaatteessa suoraan korvattavissa sähköinfroilla, joskin tällöin kyseessä on täysin erillinen laite. Tähän asti sähköinfrojen käyttökustannukset ovat olleet huomattavasti muita kuivaintyyppisiä korkeampia. [44] Sähkökuivainten käyttökustannukset riippuvat suoraan sähkön hinnasta. Paperiteollisuuden tarvitsemassa kokoluokassa kaasukuivaimet ovat myös investointikustannuksiltaan edullisempia [47]. Valinta sähkö- ja kaasukäyttöisten kuivaimien välillä tapahtunee lähinnä teknisistä syistä sähkökuivainten tullessa kyseeseen vain vaativammissa tapauksissa. Teknisiä syitä voivat olla esimerkiksi sähkökäytöllä saavutettava pienempi koko, korkeampi lämpötila, nopeampi käynnistyminen tai säteilyn tarkempi kohdistaminen esimerkiksi vain osaan kuivattavaa rataa. Käynnistys- ja pysäytysaikojen erot ovat nykyaikaisilla kuivaimilla tosin vain muutamia sekunteja [47].

Ilmakuivaimilla polttoaineet voidaan puolestaan korvata höyryllä, joka tulee huonomman hyötysuhteen vuoksi kyseeseen lähinnä silloin, kun sitä on saatavilla huomattavan edullisesti. Vaikka Suomessa kaasukäyttöisillä kuivaimilla onkin vankka asema polttoainetomiin vaihtoehtoihinsa verrattuna, ei näitä pidä kuitenkaan väheksyä. Esimerkiksi Ruotsissa toimintaympäristö on sen verran erilainen, että höyry- ja varsinkin sähkökäyttöiset infrakuivaimet ovat olleet huomattavasti kaasukäyttöisiä yleisempiä [48].

Kuten kaikissa muissakin maa- ja nestekaasua polttoaineenaan käyttävissä sovelluksissa, myös paperinkuivaimien tapauksessa on tutkittu biomassan kaasutuksen mahdollisuuksia fossiilisten kaasujen korvaajana. Tutkimukset ovat toistaiseksi rajoittuneet teorian tasolle. Erään tutkimuksen simulaatioiden ja laskelmien mukaan tämä voisi olla taloudellisesti järkevää, ja kokonaisenergiankäytön lisäys olisi vain noin 3,5 %. Simulaatioissa ei kuitenkaan voitu ottaa huomioon kaasutuskaasun sisältämän tervan ja hiukkasten vaikutusta paperin laatuun, mikä olisi varsin tärkeää, sillä juuri puhtaan palamistuotteen vuoksi maa- ja nestekaasu ovat valikoituneet paperinkuivauksen polttoaineiksi. Jos vaaditaan tehokkaampaa puhdistusta, nousevat kaasutuksen kulut helposti korkeiksi. Muita esiinnousteita ongelmia, joita ei voitu ratkaista teoreettisessa tarkastelussa olivat kaasuttimen reagointi väistämättömiin suuriin kaasutustehon vaihteluihin sekä synteesikaasuun käyttäytyminen poltossa. Synteesikaasun kanssa ilmenneitä ongelmia ovat esimerkiksi niin sanottu takatuli, liekin irtoaminen ja itsesytyminen. Lisäksi kaasuputkistoon ja -polttimiin vaaditaan muutoksia alemmasta lämpöarvosta ja tiheydestä johtuvien suurempien virtausmäärien vuoksi. Myös yksinkertaiset putkensisäiset polttimet joudutaan vaihtamaan nurkkapolttoon, erilliseen esipolttokammioon tai jopa säteilyputkiin matalamman lämpöarvon ja nokeamisen vuoksi. Säteilyputkia käytettäessä savukaasuja ei enää ohjattaisi paperiin, mikä laskisi hyötysuhdetta jonkin verran. [24] Toisaalta biomassan kaasutuksen ollessa kyseessä tämä ei vaikuta verotukseen samalla tavalla kuin kaasulla biomassan käytön verottomuuden vuoksi.

3.3.3 Tulevaisuus

Pinnoitettujen paperien osuus on nykyisin varsin suuri, varsinkin kun korkeiden tuotantokustannusten Suomessa on siirrytty bulkkipapereista jalostetumpiin tuotteisiin. Tämän perusteella pinnoituksessa välttämättömät infra- ja leijukuivainten käyttö tulee siis jatkuamaan ja jopa kasvamaan tulevaisuudessa. Kaasunkäytön kannalta tulevaisuus on nykyisenkaltaisessa toimintaympäristössä turvattu, sikäli kun nämä ovat pääasiassa kaasukäyttöisiä. Kirjallisuuden mukaan tulevaisuudessa saatetaan siirtyä yhä enemmän puhalluskuivaimiin myös pinnoittamattoman paperin tuotannossa niiden tila- ja energiatehokkuuden vuoksi. Puhalluskuivaimilla voidaan myös nostaa vanhan koneen kapasiteettia merkittävästi kasvattamatta koneen kokoa. [46]

Esimerkiksi Valmetin markkinointimateriaalien mukaan puhalluskuivaimilla voidaan saavuttaa merkittävä tuotantokapasiteetin ja kokonaistehokkuuden nosto, jos lisäenergian tarve ollaan valmiita kattamaan höyryä kalliimmalla kaasulla. [49] Ilmakuivaimilla voidaan saavuttaa huomattavasti parempia hyötysuhteita kuin infrakuivaimilla. Erityisesti nykyaikaisilla ulkoista polttoainetta käyttävillä korkealämpötilaisilla laitteilla voidaan vähentää kokonaisenergiankulutusta jopa puoleen [46]. Höyrykäyttöisillä telakuivaimilla voidaan kuitenkin käyttää myös suhteellisen matala-arvoista höyryä, jota saadaan ikään kuin ylimääräisenä varsinkin integroiduilla sellutehtailla huomattavasti. Tämän vuoksi niitä ei kannata pelkän tehokkuuden nimissä korvata kaasukuivaimilla. [46] Tulevaisuuden kaasunkäytön kannalta kysymykseksi nouseekin, onko tärkeämpää vähentää kokonaisenergiankulutusta vai fossiilisten polttoaineiden käyttöä.

Tulevaisuudessa tasainen tai jopa kasvava kuivainten käyttö ei välttämättä ole suoraan verrannollinen kaasun kulutukseen, mikäli toimintaympäristö muuttuu, sillä kaasu ei ole ainoa energianlähde näihin periaatteessa pakollisiin kuivaimiin. Esimerkiksi Ruotsissa, jossa sähkön käyttö teollisuudessa on ollut suhteessa edullisempaa ja kaasuverkon ulkopuolella vaihtoehtona ollut nestekaasu kalliimpaa, ovat kaasukäyttöiset kuivaimet huomattavasti harvinaisempia kuin Suomessa. [48] Myös nestekaasuun pysyvä halpeneminen voi houkuttaa joitakin toimijoita vaihtamaan polttoainetta. Nestekaasun hinta on tosin ailahtelevampi ja vahvemmin sidottu öljyn hintaan, mikä voi vähentää sen houkuttelevuutta. Sähkökäyttöiset kuivaimet saattavat tulla houkuttelevammiksi sähkön hintatason alentuessa. Varsinkin rinnakkainen kaasu- ja sähköjärjestelmä voi tuottaa merkittäviä säästöjä mikäli sellaisen asentaminen on teknistaloudellisesti mahdollista. Sähköenergian hinnan suhdetta maakaasun käytön hintaan on laskettu tarkemmin luvussa 4.2.1.

Tässäkin tapauksessa myös tuotannon väheneminen tai tehtaiden sulkeminen voi vähentää maakaasun kysyntää huomattavasti. Alttiimpia sulkemisille lienevät erilliset paperitehtaat, sillä integraatit saavat kustannushyötyjä yhdistetyistä toiminnoista, sellupuolen ylimääräisestä energiasta ja pienistä sellun kuljetuskustannuksista. Tuotannon vähenemisen taustalla voi olla tuotteiden markkinahintojen ja kysynnän tai raaka-aineen eli sellun hinnan pysyvät muutokset.

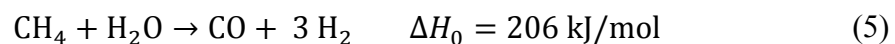
3.4 Vedyn valmistus

Vety on monipuolinen raaka-aine, jolla on monia käyttökohteita teollisuudessa ja vielä useampia mahdollisuuksia tulevaisuudessa. Suurin osa maailmankaikkeuden aineesta on vetyä. Sitä ei kuitenkaan esiinny vapaana sen reaktiivisuuden vuoksi, vaan sitä täytyy valmistaa jotain vetyä sisältävää hajottamalla. Tärkeimpiä hajotettavia aineita ovat metaani, josta maakaasukin suurimmaksi osaksi koostuu, sekä vesi. Hiilivetyjen hajottamista kutsutaan reformoinniksi.

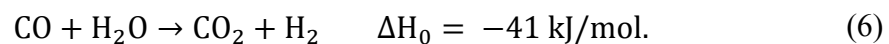
Maailman vedystä suurin osa, noin 48 %, tuotetaan maakaasua tai jalostamokaasuja reformoimalla, 30 % saadaan muun kemikaalituotannon sivutuotteena, 18 % hiiltä kaasuttamalla ja 4 % elektrolyysillä. [50] Maakaasun reformointi on edullisin teknologia vedyn tuotantoon, ja on sitä todennäköisesti myös vuonna 2030. Muiden menetelmien käyttö johtuu pääasiassa maakaasun rajallisesta saatavuudesta, teknisistä syistä sekä siitä, että joissakin teollisissa prosesseissa vetyä syntyy sivutuotteena. [51]

3.4.1 Prosessi

Reformointiprosessiin kuuluu itse endoterminen höyryreformointireaktio, jossa vesihöyry ja metaani hajoavat hääksi ja vedyksi,



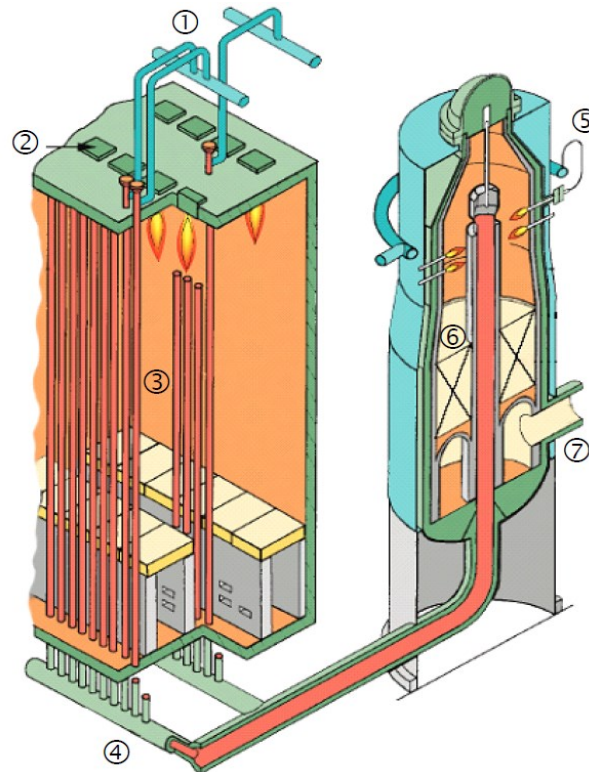
sekä eksoterminen vesikaasureaktio, jossa häkä ja vesihöyry muodostavat vetyä ja hiilidioksidia



Tuotteena saatavasta kaasusta erotetaan puhdas vety yleensä fysikaalisesti niin sanotussa PSA-yksikössä (*Pressure Swing Adsorption*). Jäljelle jää vettä, hiilidioksidia, metaania, häkää ja typpeä. Nämä voidaan kierrättää poltettavaksi prosessilämmön tuottamiseksi. Prosessin hyötysuhde riippuu paljon siitä, voidaanko se integroida muihin prosesseihin höyrynkäytön kannalta. Itsenäisessä yksikössä täytyy polttaa osa maakaasusta prosessilämmön tuottamiseksi. Reformointiprosessin hukkalämpöä voidaan myös hyödyntää höyrynä, jolloin tämän höyryn hyötykäyttö parantaa myös hyötysuhdetta.

Tyypillinen reformointilaitteisto on esitetty kuvassa 14. Reformointiputket on täytetty katalyytillä, ja prosessin vaatima lämpö tuodaan erillisillä kaasupolttimilla. Usein käytetään reaktiostökiometriaa korkeampaa höyry/hiili-suhdetta, joka on noin 3. [52] Höyry voidaan tuottaa joko kaasua polttamalla tai erillisessä voimalaitoksessa, jolloin voidaan säästää integrointietuna esimerkiksi mahdollisuus käyttää edullisempia polttoaineita tai ylijäämähöyryä. Vedyn tuotanto maakaasusta kuluttaa energiaa noin 3,5–3,9 kWh per 1 nm³ vetyä, kun vähennetään käyttökelpoisen syntyvän höyryn energiasisältö. Höyryre-

formointi on vedyn valmistukseen niin sanottua BAT-tekniikkaa eli parasta tarjolla olevaa tekniikkaa osittaisen hapetuksen ohella. [53] Keskimäärin maakaasun reformointi tuottaa 7,33 kg hiilidioksidia per kg vetyä eli 0,219 t/MWh_{H2}. [54]



Kuva 14. Ammoniakkituotannossa tarvittavan vedyn valmistukseen käytettävä maakaasun reformointiyksikkö, jossa vasemmalla höyryreformoija ja oikealla vesikaasureaktori. Kuvassa 1: raaka-aineiden jakotukki, 2: polttimet, 3: reformointiputket, 4: tuotekaasun jakotukki, 5: prosessi-ilman sisääntulo, 6: katalyyttipeti, 7: lopputuotteen ulostulo [52]

Periaatteessa maakaasun sijaan voitaisiin käyttää esimerkiksi nestekaasua ja muita pidempiä hiilivetyjä. Kun hiilivedyt muuttuvat suuremmiksi, monimutkaistuu prosessi saannon vähentyessä ja aletaan jossain vaiheessa puhua jo osittaisesta hapetuksesta ja lopulta kaasutuksesta. Vedyn valmistus hiiltä ja raskaita öljyjakeita kaasuttamalla on mahdollista mutta vaatii suurempia investointeja ja lopputuotteen tarkempaa puhdistamista riippuen lopputuotteesta. Kun reformoitavat hiilivedyt pitenevät, nousevat höyrystä peräisin olevan vedyn määrä ja hiilidioksidipäästö vetykiloa kohti. Eri fossiilisista lähteistä tuotetun vedyn hiilidioksidipäästöt on esitetty taulukossa 2. Teoreettisen saannon perusteella hiilijalanjälki kasvaa 5–15 % tuotettua vetykiloa kohti joka askeleella siirryttäessä raskaampiin hiilivetyihin. Jalanjälki on suurimmillaan hiilestä valmistetulla vedyllä, jonka hiilidioksidipäästö on jopa 3 kertaa suurempi kuin maakaasusta valmistettaessa. [54] Tämä vaikuttaa vedyn tuotannon kestävyys- ja kustannuksiin, erityisesti jos päästökauppa tehostuu lähitulevaisuudessa.

Taulukko 2. Eri hiilivedyistä valmistetun vedyn hiilidioksidipäästöt ja höyryperäisen vedyn osuus oletetulla 75 %:n hyötysuhteella [54]

	Höyryperäinen H ₂ (%)	kg CO ₂ /kg H ₂	t CO ₂ /MWh _{H₂}
Metaani (Maakaasu)	50,0	0,25	0,220
Etaani	57,1	0,29	0,255
Pentaani	62,5	0,31	0,273
Teollisuusbenssiini (C ₁₀ H ₂₂)	64,5	0,32	0,282
Raskaammat öljyjakeet, alkaen	> 65,3	> 0,42	> 0,369
Hiilen kaasutus	70	1,0	0,880

3.4.2 Vaihtoehtoiset teknologiat

Hiilivetyjen reformoinnille vaihtoehtoisia tekniikoita ovat veden elektrolyysi ja biomasan kaasutus. Kummatkin ovat toistaiseksi huomattavasti kalliimpia investointi- ja käyttökustannuksiltaan. Vakavammin otettavana kilpailijana sähköistyvässä tulevaisuudessa voidaan pitää elektrolyysiä, jonka käytön esteenä on ainakin toistaiseksi kallis hinta.

Elektrolyysissä vesi atomi hajotetaan sähköä avulla vedyksi ja hapeksi reaktioyhtälön



mukaisesti. Vedyn tuotanto elektrolyysillä sopii pienillekin käyttökohteille, mutta sen heikkouksia ovat reformointiin verrattuna huono hyötysuhde ja suuri sähkönkulutus. Toisaalta tuotanto ei vaadi raaka-aineikseen kuin puhdistettua vettä ja sähköä. Elektrolyysin hyötysuhde on parhaimmillaan 60–70 % ollen parempi pienellä virralla, mutta silloin myös tuotanto hidastuu. Saatava vety on toisaalta hyvin puhdasta. Käytännössä elektrolyysiä ei juurikaan käytetä kuin suurta puhtautta vaativissa pienemmän mittakaavan kohteissa. [50] Lisäksi elektrolyysiä tekniikkana käytetään suuressa mittakaavassa muihin tarkoituksiin kemianteollisuudessa, jolloin syntyy merkittäviä määriä sivutuotevetyä.

Elektrolyysiä käyttämällä hiilidioksidipäästöt siirtyvät sähköntuotantoon. Huonon hyötysuhteen vuoksi tämä tekee elektrolyysin ympäristöystävällisyydestä hieman kyseenalaista. Viime vuosina sähköntuotannon ominaishiilidioksidipäästö on keskimäärin laskenut vuosi vuodelta Suomessa [55], mikä tehnee elektrolyysistäkin ilmastomielessä ennen pitkää järkevää. Energian käytön hyötysuhde on maakaasua käytettäessä kuitenkin parempi, mikä täytyy huomioida esimerkiksi maissa, joissa sähköntuotanto pohjautuu fossiiliseen lauhdevoimaan. Täysin uusiutuvalla tuuli- tai aurinkosähköllä tilanne on tietenkin erilainen. Elektrolyysillä tuotettua vetyä onkin kaavailtu tulevaisuuden uusiutuviin energiantuotantomuotoihin perustuvan energijärjestelmän ailahtelevan sähköntuotannon väliavarastoksi. Tällaisessa käytössä elektrolyysiä käytettäisiin vain kun tarjolla on ”ilmaista sähköä”, jolloin huonompi hyötysuhde ei haittaa. [50]

Elektrolyysin teoreettinen puhtaaseen kemiaan perustuva saanto on $25,4 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{MWh}_{\text{sähkö}}$. Teollisen mittakaavan nykyaikaisissa laitteissa saavutetaan parhaimmillaan noin $19,2 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{MWh}_{\text{sähkö}}$, joskin esimerkiksi säädettävyys ja alemmat investointikustannukset huontavat hyötysuhdetta. Elektrolyysilaitteiston hinta on nykyisin 1000–1500 €/kW, mutta tulee arvioiden mukaan jopa puolittumaan lähitulevaisuudessa. [50] Teollisuuskokoluokan kymmenien megawattien vedyntuotantolaitoksen korvaaminen vastaavalla elektrolyysilaitteistolla maksaisi siis kymmeniä miljoonia, minkä vuoksi ei liene järkevää rakentaa rinnakkaista järjestelmää sähkön hintavaihtelujen varalle.

Toistaiseksi laajan mittakaavan elektrolyysi ei ole vielä muuttunut kannattavaksi toiminnaksi, sillä VTT on arvioinut jatkuvatoimisen suuren vedyntuotantolaitoksen tuottaman vedyn hinnaksi 96 €/MWh. Hinta on tosin vahvasti riippuvainen sähkön hintatasosta ja käyntiajasta vaatien jopa negatiivisia sähkön hintoja, mikäli käyntiaika tippuu puoleen käytetystä 8000 h/a:sta. [25] Tämä on ongelmallista tuuli- ja aurinkovoiman lisääntymisestä johtuvan ”ilmaisen sähkön” hyödyntämisessä, sillä tällaisille edullisille hetkille ajoittuva tuotanto tiputtaa väistämättä käyntiaikaa, mikä puolestaan moninkertaistaa kalliin investoinnin takaisinmaksuajan. Toistaiseksi tällaiset suuret hintatasojen vaihtelut ovat olleet Suomessa harvinaisempia, mutta voivat tuki lisääntyä tulevaisuudessa tuuli- ja aurinkosähkön sekä sähkömarkkinaintegraation lisääntyessä.

Biomassan, raskaan polttoöljyn tai kivihiilen kaasutus ja tuotekaasun reformointi vedyksi perustuu periaatteessa samaan ajatukseen kuin hiilivetyjen reformointikin. Hajotettavat yksiköt vain ovat huomattavasti suurempia, ja raaka-aineen ja lopputuotteen välillä on useampia monimutkaisia reaktioita, minkä vuoksi prosessi on haastavampi. Kivihiilen ja raskaan polttoöljyn kaasutusta on käytetty joissain suuren mittakaavan prosesseissa, joskin se on monimutkaisempaa kuin kaasun reformointi, eikä sitä välttämättä voida pitää relevanttina tulevaisuuden vaihtoehtona pyrittäessä päästövähennyksiin.

Biomassan kaasutus vedyksi voisi olla biotalouden kannalta houkuttelevin vaihtoehto, mikäli siitä saadaan taloudellisesti kannattavaa. Aihetta on tutkittu paljon pääasiassa biopoltoainetuotannon kannalta sekä joissakin vetytaloussuunnitelmissa. Lopputuote vaatii tavallista kaasutusta enemmän puhdistamista ja käsittelyä, mikä nostaa kustannuksia huomattavasti. Biomassan kaasutus tai jopa hiilen kaasutus hiilidioksidin talteenotolla nähdään silti mahdollisina keinoina vetytalouteen pyrkiessä. Tällä hetkellä kustannukset eivät kuitenkaan ole kilpailukykyisiä. Eräässä tutkimuksessa, jossa tutkittiin puun ja kivihiilen suuren mittakaavan yhteiskaasutusta, arvioitiin vedyn tuotannon olevan yhä noin kaksi kertaa kalliimpaa kuin maakaasulla. Lisäksi vaikutti siltä, että vedyn tuotannossa kaasuttamalla ei saavuteta kovin helposti mittakaavaetua nopeasti koon mukana kasvavien laitteistokustannusten vuoksi. Biomassan käyttö hiilen seassa laski huomattavasti rikin käsittelystä ja hiilidioksidista aiheutuvia kuluja. [56]. VTT:n arvion mukaan nykyaikaisella tekniikalla vedyn tuotanto biomassasta isossa 200 MW:n yksikössä maksaisi 58 €/MWh, kun huomioidaan sivutuotteena saatavan kaukolämmön ja sähkön myynti.

[25] Eri vedyntuotantomuotojen arvioidut hinnat on esitetty taulukossa 3. Taulukossa esitetty reformoinnin kustannus perustuu omaan arvioon 85 %:n hyötysuhteella, maakaasun todellisella hinnalla sekä kiinteiden kustannusten osalta kaupallisten laitosten investointi- ja tuotantotiedoilla.

Taulukko 3. *Kilpailevien vedyntuotantomuotojen kustannukset suuressa jatkuvassa tuotannossa.*

Menetelmä	Arvioitu hinta Suomessa	Muuta
Maakaasun reformointi	35 €/MWh	Oma arvio
Veden elektrolyysi	96 €/MWh [25]	Todella riippuvainen sähkön hinnasta, tässä yht. 50 €/MWh
Biomassan kaasutus	58 €/MWh [25]	

3.4.3 Vedyn käyttökohteet ja tulevaisuus

Koska maakaasun reformointi on tällä hetkellä tehokkainta ja toistaiseksi myös ympäristöystävällisintä teknologiaa vedyn tuottamiseksi, lienee syytä tarkastella maakaasun käytön tulevaisuutta vedyn käytön ja sen tulevaisuuden kautta. Nykyisin vetyä käytetään pääasiassa öljynjalostuksessa ja muualla kemianteollisuudessa sekä esimerkiksi metallien jalostuksessa. Öljynjalostuksen vetyä kuluttaviin prosesseihin kuuluvat vetykäsittely, vetyprosessointi ja vetykrakkaus [53]. Maailmanlaajuisesti suurin vedyn käyttökohte on ammoniakkin valmistus pääasiassa lannoitetuotantoa varten, joskaan sitä ei harjoiteta Suomessa. Muita käyttökohteita ovat esimerkiksi vetyperoksidin ja muiden kemikaalien valmistus. Tulevaisuudessa vety nähdään usein myös vetytaloudeksi kutsutun järjestelmän pääasiallisena energian varastointimuotona.

Öljynjalostuksessa vetykäsittelyllä voidaan poistaa rikkiä, typpeä, tyydyttymättömiä ja aromaattisia yhdisteitä öljystä. Päätehtävänä voidaan pitää rikin poistoa, pääasiassaliikennepolttoaineista ja muista keskitisleistä. Liikennepolttoaineista poistettavan rikin määrä lisääntyy kun yhä suurempi osa raakaöljystä jalostetaan katalyyttisellä krakkauksella kevyemmiksi jakeiksi. Erityisen haastavaa, mutta myös tärkeää, on rikin syväpoisto dieseljakeesta. Myös raskaille jakeille tehdään vetykäsittelyä jatkokäsittelyominaisuuksien parantamiseksi. Tyydyttymättömien ja aromaattisten yhdisteiden poistaminen on tärkeää lopputuotteen tasalaatuisuuden ja palamisominaisuuksien vuoksi. Esimerkiksi aromaattiset yhdisteet nokeavat herkästi. Vetyprosessoinnilla voidaan poistaa myös erinäiset metallit raakaöljystä, jossa esiintyy luonnostaan nikkeliä ja vanadiumia. Öljyyn saattaa jalostamalla joutua myös lyijyä ja piitä, jotka voidaan myös poistaa. Vetykrakkauksen avulla voidaan pilkkoa raskaampia öljyjakeita todella joustavasti. Oikeanlaisilla katalyyteillä ja olosuhteilla saadaan teoriassa minkälaisia kevyempiä lopputuotteita tahansa. Pääasiassa tuotetaan rikittömiä keskijakeita eli liikenne- ja lentopolttoaineita, joille saadaan hyvät palamis- ja kylmänkesto-ominaisuudet. Pääsyytteenä vetykrakkaukseen on raskas

öljyjäe, jota ei saada pilkottua tavallisessa katalyyttisessä krakkauksessa. [53] Keskimäärin vedyn kulutus on öljynjalostuksessa noin $34 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2 / \text{m}^3$ raakaöljyä. [57] Käytettäessä höyryreformointia öljynjalostuksessa osa jalostamolta saatavista kevyemmistä kaasujakeista soveltuu myös reformoitavaksi, mikä pienentää maakaasun tarvetta mahdollisesta laskennallisesta tarpeesta. [53]

Vedyn käyttö öljynjalostukseen on suhteellisen vakiintunutta, eikä esimerkiksi uusia toimijoita Suomeen ole odotettavissa. Tosin vetykäsittelyn ja vetykrakkauksen käyttö on viime vuosina lisääntynyt, sillä tiukentuneet päästörajat vaativat puhtaampia polttoaineita. Lisäksi kevyempien jakeiden eli käytännössä liikennepolttoaineiden suhteellinen tuotanto-osuus on kasvanut esimerkiksi raskaan polttoöljyn kustannuksella. Rikinpoistossa voi myös vielä tulla lisää kasvua, etenkin jos rikkiä aletaan poistamaan enenevässä määrin myös raskaasta polttoöljystä. Toistaiseksi tämä on ollut haastavaa ja kallista. Toisaalta kehittyvät uudet teknologiat tähtäävät nimenomaan vedyn käytön vähentämiseen ja tutkimustyö myös kokonaan vetyä käyttämättömien rikinpoistomenetelmien kehittämiseksi on viime vuosina ollut intensiivistä. Jotkin menetelmät, kuten happeen perustuva SulphCo, voivat tulla jopa kustannuksiltaan edullisemmiksi teknologian kypsyessä. [53]

Tuorein vedyn käyttökohde on biopolttoaineiden jalostus. Tällä hetkellä Suomessa valmistettava suoraan nykyisiin moottoreihin sopiva biodiesel valmistetaan kasviöljyistä, kuten palmu- tai mäntyöljystä, ja jäterasvoista vetykäsittelyllä. Tällaisen HVO-biodieselin (*Hydrotreated Vegetable Oil*) valmistuksessa käytetään suhteellisen paljon vetyä, joka puolestaan tuotetaan maakaasua reformoimalla. Rasvojen sisältämät pitkäketjuiset rasvahapot puhdistetaan, pilkotaan ja pelkistetään vetykäsittelyn avulla lyhemmiksi hiilivedyiksi. Erään arvion mukaan vetyä tarvitaan $300\text{--}400 \text{ m}^3$ kasviöljyistä valmistettua biodieselkuutiota kohden. [57] Nykyaikaisella reformointitekniikalla vedyn tuotanto kuluttaa maakaasuenergiaa $3,5\text{--}3,9 \text{ kWh/m}^3 \text{ H}_2$, kun syntyvästä lämmöstä tuotettua höyryä ei lasketa energiataaseeseen eli oletetaan tuotannon olevan integroitu. [53] Täten voidaan laskea biodieselkuution valmistamiseen kuluva maakaasu $1,05\text{--}1,56 \text{ MWh/m}^3 \text{ H}_2$. HVO-prosessin etuja ovat suuri joustavuus raaka-aineiden suhteen, lopputuotteen suora yhteensopivuus nykyisten diesel-moottoreiden kanssa sekä suhteellisen edulliset tuotantokustannukset. HVO-diesel on tällä hetkellä tiettävästi kustannustehokkain suoraan nykymoottoreihin soveltuvien biopolttoaineiden tuotantomuoto [58].

Vedyn käyttökohteita käsiteltäessä täytyy ottaa huomioon myös mahdolliset tulevaisuuden käyttökohteet. Vedyn tuotannon tulevaisuuskuvia sävyttävät suuret visiot, vaikkakin niiden toteutettavuus lyhyellä aikavälillä vaikuttaa varsin utopistiselta. Merkittävin ja eniten maailmanlaajuisuista huomiota saanut lienee vedyn käyttö polttoaineena ja yleisenä sähköistyvän yhteiskunnan energiavarastona. Monissa tulevaisuuden energiaratkaisuja käsittelevissä suunnitelmissa kokonaan vetyyn pohjautuva energiajärjestelmä nähdään jonkinlaisena lopullisena tavoitteena. Vety nähdään samassa vetytaloudeksi kutsutussa visiossa myös autojen polttoaineena. Vedyn hyvinä ominaisuuksina nähdään helpohko muunneltavuus sähköisestä kemialliseksi energiaksi ja toisinpäin, hiilettömyys, valmistettavuus

pelkästä vedestä sekä sähköön verrattuna hyvä varastoitavuus. Visioissa vety tuotettaisiin siirtymävaiheen jälkeen lopulta elektrolyysillä vedestä pelkästään uusiutuvista energiamuodoista saatavalla sähköllä. Uusiutuvien, vaihtelevasti sähköä tuottavien tuotantomuotojen yleistymistä käsitellään lisää luvussa 4.

Näissä visioissa maakaasulla on usein vahva rooli, vaikkei sitä yleensä korostetakaan. Siirtymävaiheessa vety nimittäin tuotettaisiin käytännössä maakaasua reformoimalla. Maakaasu on tämän hetken teknologialla halvin ja tehokkain raaka-aine vedylle sekä suhteellisen vähän hiilidioksidia tuottava, kun huomioidaan myös sähköntuotannon synnyttämät päästöt. Hiilidioksidipäästöjä voidaan jatkossa vähentää myös voimalaitossovelluksista tutulla hiilidioksidin talteenotolla, mikä nähdäänkin pidemmän aikavälin ratkaisuna maakaasun käytölle vety-yhteiskunnan varapolttoaineena. Vetytalouteen siirtymisessä on kuitenkin vielä monta teknistä ja taloudellista estettä, ja sitä voidaankin pitää vielä jonkinlaisena utopiana, joka ei tule toteutumaan tämän työn tarkasteluajanjakson aikana.

Hieman maltillisempi kehityssuunta on power-to-gas-teknologia, jolla elektrolyysillä tuotettavasta vedystä tuotettaisiin hiilidioksidin kanssa metaania. Koska maakaasukin koostuu pääasiassa metaanista, voitaisiin tätä käyttää olemassa olevissa sovelluksissa ja jakeluinfrassa. [59] Sanomattakin lienee selvää, ettei maakaasusta valmistetusta vedystä olisi järkeä tehdä uudelleen metaania, vaan kyseessä on nimenomaan teollisten prosessien sivutuotevedyn ja uusiutuvan ylijäämänsähkön käyttökohde. Kuitenkin tällainen kehitys ylläpitää maakaasun käyttökohteita ja infraa. Myöskään power-to-gas-teknologialla ei ole vielä kaupallisen mittakaavan sovelluksia, mutta sen yleistymistä voitaneen pitää todennäköisempänä kuin pelkkään vetyyn perustuvaa energiajärjestelmää.

Vedyn tuotanto maakaasua reformoimalla vaikuttaa olevan kilpailukykyisin teknologia vielä pitkälle tulevaisuuteen. Uusiutuvat teknologiat, kuten biomassan kaasutus ja aurinko- tai tuulivoimalla käytettävä elektrolyysi, saattavat haukata osan tulevasta kasvusta kaukaisemmassa tulevaisuudessa. Metaanin reformointi pysynee varteenotettavan vaihtoehdona myös tällöin, vaikka tiukkenevat päästötavoitteet vaatisivatkin hiilidioksidin talteenottoa. Hieman maltillisemmissakin tulevaisuuden näkymissä vedyn ja sitä kautta maakaasun käyttö tulee silti ainakin välillisesti lisääntymään.

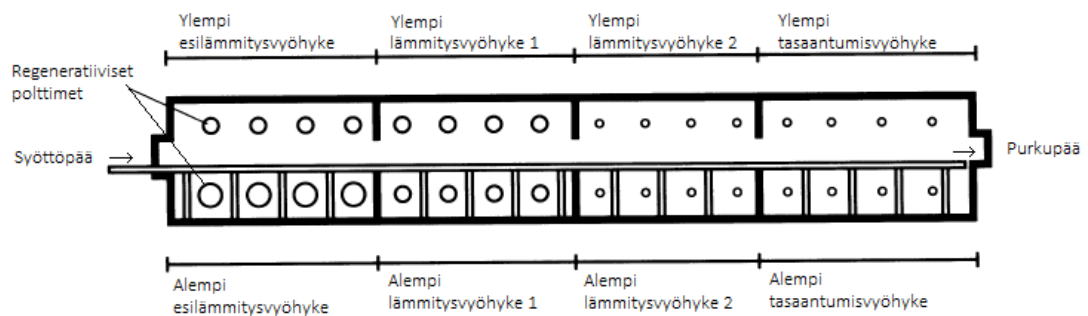
3.5 Terästeollisuuden uunit

Terästeollisuuden kaasunkäyttö tapahtuu enimmäkseen erilaisissa uuneissa. Uuneissa joko sulatetaan tai lämmitetään metallia mekaanista käsittelyä varten tai tehdään erilaisia metallin ominaisuuksiin vaikuttavia lämpökäsittelyjä. Polttoaineena käytetään pääsääntöisesti kaasuja, sillä palotuotteet koskettavat lopputuotetta. Myös metalliteollisuudessa saavutetaan metsäteollisuuden tapaan energiankäyttöhyötyjä integroimalla raaka-aineen valmistus ja jatkojalostus. Raaka-aineen valmistuksessa syntyviä koksi- tai häkäkaasuja

voidaan käyttää myös uunien polttoaineena. [60] Kaasuverkon alueella on vain jatkojalostuslaitoksia, joissa lämmitykseen täytyy käyttää sähköä tai ulkoista polttoainetta, kuten maakaasua. [61]

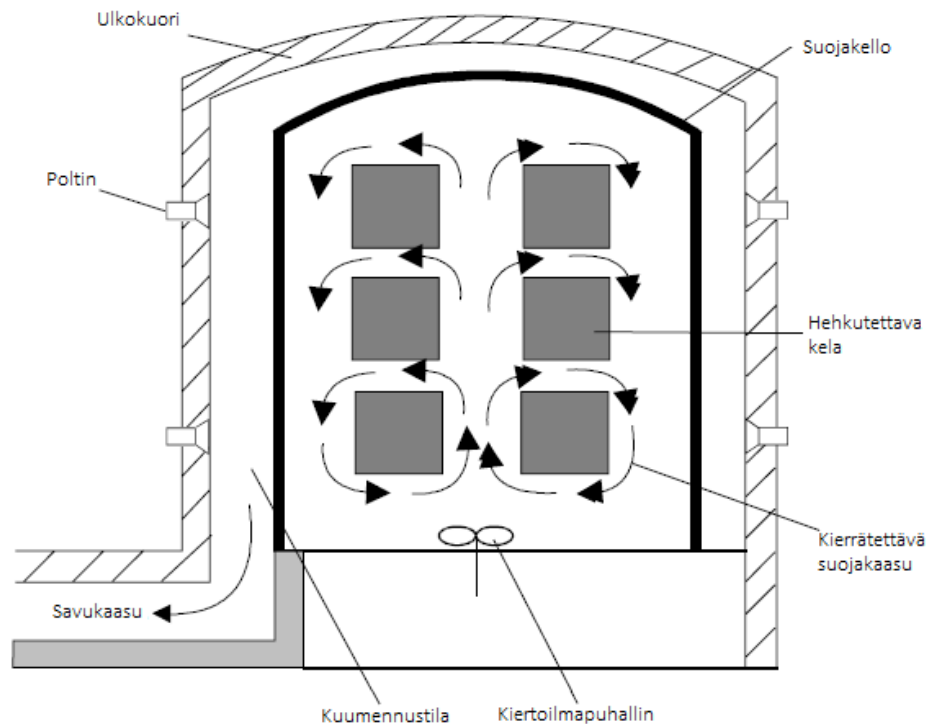
3.5.1 Uunityypit

Uunit jaetaan yleisesti jatkuvatoimisiin ja panostyyppisiin uuneihin. Ne lämmitetään joko sähköllä tai ulkoisella polttoaineella, joka on yleensä joko maa- tai nestekaasu, mikäli esimerkiksi kooksaamokaasuja ei ole saatavilla. [60] Erilaisten jatkuvatoimisten uunien jaottelu perustuu pääasiassa niissä käsiteltävän teräksen muotoon ja liikkumistapaan. Nauhauuneissa metalli puretaan kelalta jatkuvana nauhana. Askelpalkkiuuneissa kuumennettavia tuotteita kuljetetaan eteenpäin palkeilla työntämällä, kun taas rulla-arinalla edellinen tuote työntää seuraavaa eteenpäin rullilla. Jatkuvatoimisissa palkkiuuneissa käytetään yleensä suoraa polttoa uunin sisällä. Joissakin sovelluksissa, joissa matalaseoksisen teräksen hapettuminen pyritään estämään, käytetään vain säteilyyn perustuvaa lämmönsiirtoa polttamalla polttoaine säteilyputkissa. Askelpalkkiuuni on esitetty kuvassa 15. Toisenlainen perinteisesti kaasua käyttävä toiminto on teräksen maalipinnoitus. Tällaisilla linjoilla käytetään pääasiassa maakaasukäyttöisiä kuivaimia maalin liuottimien haihduttamiseen. Lisäksi käytetään kaasuliekkejä haihtuvien liuotinkaasujen polttamiseen uunin ulkopuolella.



Kuva 15. Askelpalkkiuunin poikkileikkaus pituussuunnassa. Muokattu lähteestä [60]

Panostyyppisiä uuneja ovat teräksen sulatuksessa ja sulan käsittelyssä käytettävät valokaari- ja konvertteriuunit sekä matalaseosteisen teräksen hehkutuksessa käytettävät kellouunit. Teräksen sulatus tapahtuu esimerkiksi kierrätysterästä raaka-aineena käytettäessä parhaiten sähkön avulla valokaariuunissa [60], mutta prosessin energiatehokkuutta voidaan parantaa ja sähkönkulutusta vähentää kaasu-happi-polttimilla. [62] Kello- tai kupuuunissa käsiteltävät metallikelat asetetaan kupumaisen suojakellon sisään ja tätä kelloa lämmitetään polttimilla ulkoapäin. Teräksen hapettuminen pyritään estämään käyttämällä vedystä ja tpestä koostuvaa suojakaasua. Suojakellossa lämpö siirtyy sen sisällä suojakaasun kautta hehkutettavaan kohteeseen. Puhdas vety on paras suojakaasu sen pelkistävän luonteen ja hyvien lämmönsiirto-ominaisuuksien vuoksi. [60] Tämän vuoksi edellisessä kappaleessa käsiteltyä vedyn valmistusta harjoitetaan myös metalliteollisuuden yhteydessä. Kellouuni on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Hehkutuksessa käytettävä kellouuni. Muokattu lähteestä [60]

Polttoaineiden kilpailukyvyn kannalta lämmönsiirrolla ja savukaasujen kululla on merkitystä. Esimerkiksi teräksen sinkityksessä käytettävät lämpökäsittelyuunit ovat säteilyputkiuuneja, joissa polton savukaasut eivät kosketa tuotetta. Myöskin kellouunissa lämpö siirtyy väliaineen kautta. Näissä kohteissa polttoaineiden käyttö on verollista eli huomattavasti kalliimpaa fossiilisesta polttoaineesta riippumatta. Tällaisten uunien suunnittelussa on pyritty minimoimaan käsiteltävän teräksen hapettuminen eikä välttämättä polttoaineiden käytön aiheuttamia kustannuksia. Toki näiden vertailussa on huomioitava energiaveron palautus, joka vähentää verotuksen todellista kustannusvaikutusta. Suurimassa osassa muita uuneja polttimet sijaitsevat samassa tilassa käsiteltävän teräksen kanssa, mikä johtaa verottomuuteen. Tutkimusten ja BAT-suositusten mukaan säteilyputkien ja panoskellojen käyttö ei ole välttämätöntä, vaan jatkuvatoiminen ja sitä kautta tehokkaampi ja nykyisessä veroympäristössä edullisempi hapettamaton uuni voidaan toteuttaa myös ali-ilmaisella suoralla poltolla. [60]

3.5.2 Vaihtoehtoiset teknologiat ja polttoaineet

Metalliteollisuuden uuneissa käytetään lähinnä kaasumaisia ja harvemmin myös neste-mäisiä polttoaineita. Joissain uuneissa käytetään sähköä teknisistä syistä, sillä esimerkiksi sulatuksessa sähköllä on mahdollista tuottaa nopeasti korkeampia lämpötiloja kuin mitä palamisella voitaisiin saavuttaa. Kuitenkin halpenevilla sähkön hinnoilla sähkökäyttö voi tulla kyseeseen, ensimmäisenä verollisissa lämmityskohteissa, sillä periaatteessa säteilyyn perustuvissa uuneissa voitaisiin käyttää sähköä, joskin se on ollut tähän asti huomattavasti kalliimpaa. [60]

Terästeollisuuden uuneihin liittyvät uudemmat tekniikat ovat pääasiassa hyötysuhdetta parantavia ja polttoaineenkulutusta vähentäviä eivätkä niinkään täysin fossiilisia polttoaineita korvaavia. Näiden käyttöönotto toki voi vähentää maakaasun kulutusta jonkin verran, mutta toisaalta ne myös parantavat sen asemaa tehokkaana polttoaineena, sikäli kun kaikki lämmön talteenottotavat eivät ole sovellettavissa nopeaville polttoaineille, kuten öljylle. BAT-asiakirjojen mukaan tärkeimpiä energiaa säästäviä tekniikoita ovat rekupe-ratiivinen ja regeneratiivinen poltto, joissa käytetään savukaasuja polttoilman lämmittämiseen liki palotilan lämpötilaan. Vaikka tämä kuulostaakin suhteellisen yksinkertaiselta, voidaan niillä saavuttaa jopa 60 %:n polttoainesäästöt verrattuna kylmän ilman käyttöön. Huonona puolena kummassakin tekniikassa on NO_x-päästöjen lisääntyminen palamis-lämpötilan kasvaessa. Monet tekniikat, kuten esilämmitys ilman vähentäminen ja savu-kaasujen takaisinkierrätys kuitenkin huonontavat energiatehokkuutta. Käytännössä ti-lanne voikin johtaa tasapainoiluksi NO_x-päästöjen ja energiansäästön välillä. Teoreetti-siin palamisreaktioihin perustuvien laskelmien mukaan polttoaineen kulutus vähenee 6–9 % jokaista palo ilman 100 °C:n lisäystä kohti.

BAT-asiakirjoissa nousevana tekniikkana on mainittu myös happipoltto eli puhtaan ha-pen käyttö paloilmassa. Tekniikalla saadaan polttoaineenkulutusta vähennettyä noin 10 %, joskin lisäkuluja tulee hapen valmistuksesta. Toisaalta paremman uuniatmosfäärin vuoksi myös läpimenoaika lyhenee ja kapasiteettia voidaan nostaa. Päästörajoiden kannalta on-gelmia aiheuttaa savukaasujen lisääntyvä typenoksidipitoisuus, joka tosin on pienempi esimerkiksi aikayksikköä tai tuotettua terästä kohden. [60]

Eräs maalauslinjojen kehitteillä oleva teknologia on lämpösäteilyyn perustuva kuivaus, jossa käytettäisiin UV- tai katodisädelamppuja. Toistaiseksi tällaiseen tekniikkaan siirty-minen ainakaan olemassaolevilla tuotantolinjoilla ei ole vielä vaikuttanut teknistaloudel-lisesti järkevältä. [63] Maakaasun käytön kannalta merkittävintä on näiden lamppujen sähkökäyttöisyys.

Kuten käytännössä kaikissa kaasumaisia fossiilisia polttoaineita käyttävissä kohteissa, myös metalliteollisuuden osalta on tutkittu biomassan kaasutusta ratkaisuna tulevaisuu-den polttoaineen tarpeeseen. Metalliteollisuudessa ei kuitenkaan synny kaasutuskelpoisia jakeita, kuten metsäteollisuudessa, minkä vuoksi tällaiset hankkeet eivät ole niin houkut-televia. Asiaa on tutkittu eri tutkimuksissa lähinnä taloudelliselta tasolta tasepohjalta eikä esimerkiksi vaadittavia muutoksia uuneissa tai lämmönsiirtoasioita ole otettu huomioon. Esimerkiksi eräässä tutkimuksessa tutkittiin biomassan kaasutusta ja synteetikaasusta valmistetun metaanin käyttöä nestekaasun korvaajana. Tutkimuksen mukaan biomassan kaasutus ei ole nykytilanteessa eikä käsitellyissä tulevaisuuskenaarioissakaan järkevää. Tuotetun biometaanikaasun hinnaksi saatiin Ruotsin hinta- ja tukitasoilla 79–130 €/MWh, mikä ei ole kilpailukykyinen ilman merkittäviä toimintaympäristön muutoksia. [26]

3.5.3 Tulevaisuus

Metalliteollisuuden uuneilla ei ole näkyvissä muutoksia polttoaineiden suhteen. Maakaasu voitaisiin periaatteessa korvata nestekaasulla, mutta tällä ei saavuteta mitään etuja ilman hintasuhteiden suuria muutoksia. Pikemminkin suunta on ollut päinvastainen, sillä maakaasuverkon ulottumattomissa oleva Pohjois-Suomen metalliteollisuus on vaihtamassa nestekaasua LNG:iin [64].

Periaatteessa sähköön siirtyminen voi olla mahdollista, mikäli sähkön hinta jatkaa laskeutumistaan ja maakaasu veroineen kallistumistaan. Erityisesti tämä pätee verollisille käyttökohteille, joissa ero on pienempi. Vaihtelevasta uusiutuvasta tuotannosta johtuvan vaihtelevan sähkön hinnan vuoksi uunikäytössä voi tulla kyseeseen rinnakkainen sähkö- ja kaasukäyttö, jolloin voidaan hyödyntää alhaisia sähkön hintoja. Tämä tietenkin laskisi maakaasun kokonaiskulutusta.

Vuodelta 2001 peräisin olevien BAT-asiakirjojen mukaan metalliteollisuuden uuneissa on monia mahdollisia tapoja parantaa energiatehokkuutta. Oletettavasti suuri osa näistä on jo käytössä Suomessa toiminnassa olevissa tehtaissa tiukan kilpailutilanteen sanelemana. Tehokkuus tulee todennäköisesti vielä parantumaan energiatehokkuustavoitteiden kiristyessä. Myös tässä tuotantotason muutoksilla ja esimerkiksi tehtaiden sulkemisilla lienee suurin vaikutus tulevaan kaasun kulutukseen. Kaasuverkon alueella olevat metallinjalostajat ovat erillään pohjoisemmasta sijaitsevasta raaka-aineen valmistuksesta. Tämän vuoksi integrointihyötyjä ei saavuteta, mikä voi vähentää tuotannon kannattavuutta tiukentuvassa kilpailussa.

4. TOIMINTAYMPÄRISTÖ JA SEN MUUTOKSET

Tässä luvussa käsitellään maakaasun toimintaympäristöä sekä sen viimeaikaisia ja tulossa olevia mahdollisia muutoksia. Luku on jaettu politiikkaan, markkinoihin ja yleiseen talouteen. Näistä politiikka lienee merkittävin ohjaava tekijä, sillä eritasoiset tavoitteet ja asenteet siirtyvät käytäntöön yleensä politiikan kautta. Markkinat puolestaan kuvaavat käytännön tason muutoksia taloustilanteen ja teollisuustuotannon ollessa enemmänkin satunnaismuuttujia.

Työn toisen luvun katsauksessa maakaasun historiaan huomattiin, että maakaasun kehityskulku on ollut hyvin riippuvaista erilaisista poliittisista päätöksistä. Siksi tässä luvussa tutkitaan tarkkaan politiikan näkymiä niin käytännönläheisemmällä tasolla, kuten verotuksessa, kuin myös korkeampien tavoitteiden tasolla. Toinen merkittävä alue ovat erilaiset energiamarkkinat. Niihin kuuluvat tässä työssä sähkö-, kaukolämpö-, kaasu- ja muut polttoainemarkkinat. Erityisesti sähkömarkkinat ovat monella tapaa kriittisiä maakaasun käytön kannalta. Toisaalta maakaasumarkkinoilla on tapahtumassa melko varmasti merkittäviä muutoksia työn tarkastelujakson aikana.

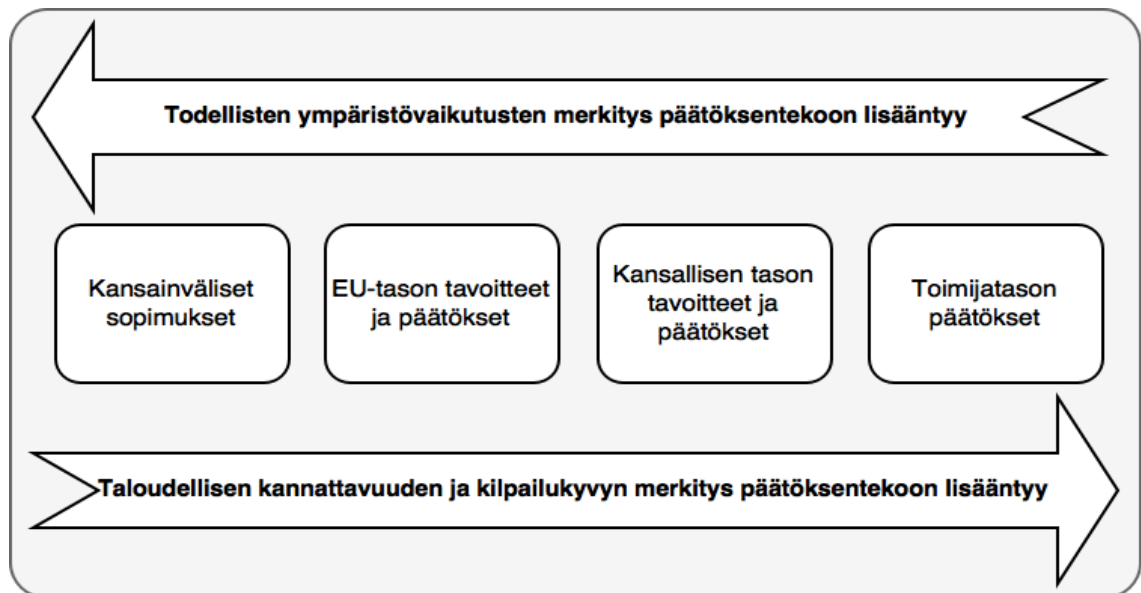
Taloustilanteella, eri polttoaineiden hinnoilla sekä näiden hintakehityksillä on kiistatta suuri vaikutus polttoaineiden käyttöön ja näiden väliseen kilpailukykyyn. Näiden tulevaisuudennäkymät sisältävät kuitenkin niin paljon satunnaisempia muuttujia, että niiden tarkempi analyysi ei mahdu tämän työn järkevään rajaukseen.

4.1 Energia- ja ilmastopolitiikka

Maakaasun käyttö on energiahyödykkeenä voimakkaasti riippuvainen energiapolitiikasta. Energiapolitiikan merkittävin globaali trendi on ollut viime vuosikymmeninä ilmastomuutos, ja kansainvälistä energiapolitiikkaa ovatkin määrittäneet tavoitteet ilmastomuutoksen hillitsemiseksi. Globaalilla tasolla suurin yhteinen nimittäjä ovat kansainväliset ilmastosopimukset, viimeisimpänä Pariisin sopimus. Sopimus on sisällöltään hyvin suurpiirteinen, ja tavoitteet on asetettu vain tavoitellun ilmaston keskilämpötilan nousun ja kokonaispäästövähennyksen mukaan. Päästövähennystavoitteiden jako perustuu esimerkiksi maiden kehittyneisyyteen. Toisin sanoen EU-alueen päästövähennystarve on suurempi kuin Afrikan valtioiden. Tarkkoja päästölukuja tärkeämpää onkin varmistaa mahdollisimman kattava valtioiden sitoutuminen tavoitteeseen. Laaja sitoutuminen voi vähentää yleistä ristiriitaa ilmastonsuojelun ja taloudellisen edun välillä, sillä kaikki muutkin kärsivät eikä hiilivuotoa tapahdu niin helposti.

Pariisin sopimusta solmittaessa EU edusti Suomea, ja Suomen kannalta merkittävintä onkin näiden tavoitteiden muuttuminen EU-tason linjauksiksi. Nämä sisältänevät jo tarkkoja

päästövähennysprosentteja eri aloille ja toisaalta menetelmiä niihin pääsemiseksi unohtamatta keinoja, joilla pidetään oma teollisuus kilpailukykyisenä. EU-tasolla merkittävin päästövähennyskeino on päästökauppajärjestelmä. Suomen tasolla ilmastotavoitteet muuttuvat jo suhteellisen tarkoiksi energia- ja ilmastostrategioiksi sekä lopulta hallitusohjelmiksi ja päätöksiksi. Todelliset toimet voivat olla esimerkiksi verotuksellisesti tai suorilla tuilla kestävämpiä ratkaisuja suosivia. Tällä tasolla vaikutukset talouteen alkavat korostua, ja kohteiksi valitaan todennäköisesti kansantalouden ja kilpailukyvyn kannalta edullisimmat vaihtoehdot ja ohjauskeinot. Lopulliset päästövähennykset toteuttavalla tasolla eli pääasiassa yrityksissä ja julkisyhteisöissä taloudellinen kannattavuus nousee kuitenkin tärkeimmäksi ajuriksi. Investoinnit vähäpäästöisempiin tai päästöttömiin tuotantomuotoihin tapahtuvatkin käytännössä vain silloin, kun ne nähdään taloudellisesti kannattavina tulevaisuudessa joko tuilla tai ilman, vaikka yhtiön visiot ja arvot olisivat kuinka vihreät tahansa. Toki juuri kansallisen ja lopulta myös ylemmän tason politiikalla voidaan vaikuttaa erilaisten ratkaisujen kannattavuuteen ja tulevaisuudennäkymiin. Ilmastopolitiikan eri tasoja on havainnollistettu kuvassa 17.



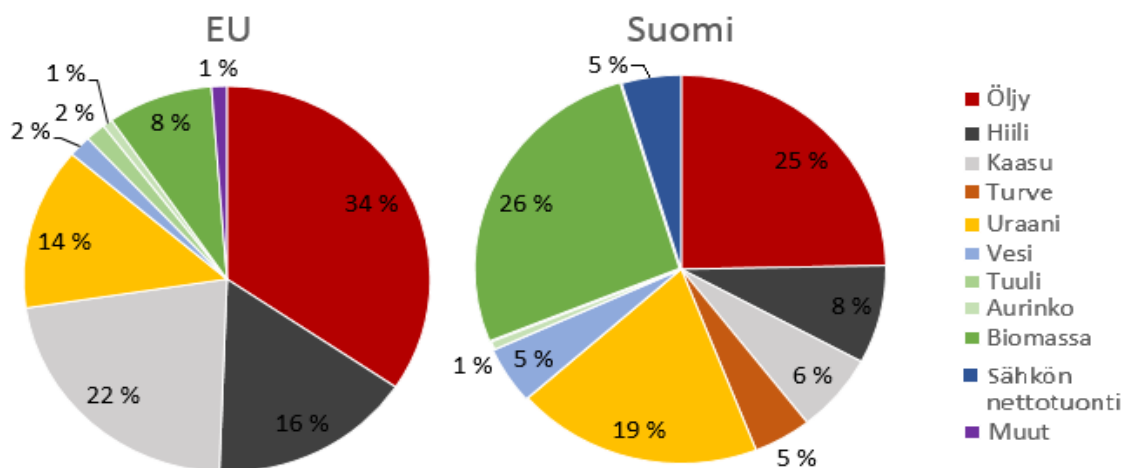
Kuva 17. Ilmastopolitiikan eri tasojen ajurien merkitys

EU:n vuoden 2030 ilmastotavoitteiksi on kirjattu kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 40 %:lla vuoden 1990 tasosta. Tätä tuetaan 27 %:n uusiutuvan energian tavoitteella ja 27 %:n energiatehokkuuden parantamisella. Lisäksi tarkoituksena on vähentää kansallisia tukia uusiutuvalla energialle, jotta pääasialliseksi ohjauskeinoksi tarkoitettu päästökauppajärjestelmä saataisiin toimimaan. [65]

Vastaavat tavoitteet ovat siirtyneet kansalliselle tasolle Suomen energia- ja ilmastostrategiassa vuodelta 2016. Sen tärkeimmiksi tavoitteiksi on asetettu 50 %:n uusiutuvan energian osuus, 55 %:n omavaraisuus, hiilen käytön lopettaminen ja öljyn käytön puolittaminen 2020-luvulla. Lisäksi liikenteen päästöjä on tarkoitus vähentää 50 %. Tavoitteisiin

aiotaan päästä esimerkiksi biotalouteen perustuvia ratkaisuja tukemalla ja kokonaisenergiankulutusta vähentämällä. Hiilestä on tarkoitus luopua poikkeuskäyttöä lukuunottamatta siten, että uusia investointeja hiilikapasiteettiin ei enää sallita. [65] Hiiltä käytettiin Suomessa vuonna 2015 noin 28 TWh [1], mikä täytyy korvata jollain muulla energiamuodolla, mikäli käyttö loppuu. Maakaasua kohtaan ei ole asetettu tavoitteita, mutta se on mainittu erikseen siltapolttoaineena, mitä voi pitää sen tulevan käytön kannalta hyvänä asiana. Strategiaa koskevassa selvityksessä on arvioitu maakaasun käytön olevan noin 25 TWh vuonna 2025 tavoitteiden toteutuessa. [65] Tämä on pari terawattituntia nykyistä enemmän.

Suomen omat tavoitteet ovat kunnianhimoisemmat kuin EU-tasolla. Kuvassa 18 on esitetty energiankulutuksen jakauma Suomessa ja EU:ssa vuonna 2015. Kuvasta nähdään, että tiukemmat tavoitteet ovat perusteltuja Suomen suuremman uusiutuvien osuuden ja suhteellisesti paljon pienemmän hiilidioksidipäästöjä tuottavien polttoaineiden osuuden vuoksi. Kuvasta voidaan lisäksi nähdä, että hiilidioksidipäästöjä tuottavien fossiilisten polttoaineiden osuus on miltei $\frac{3}{4}$ EU:n kokonaisenergiankulutuksesta. Voimakkaan riippuvuuden vuoksi näiden merkittävä rajoittaminen tuskin on EU:n asialistalla lähitulevaisuudessa.



Kuva 18. Vuonna 2015 käytetyn energian jakauma lähteittäin EU:ssa ja Suomessa [1] [66]

Osaksi energiapolitiikkaa voidaan laskea myös ilmansaasteiden rajoittaminen, sikäli kun se vaikuttaa jonkin verran energiantuotannon kustannuksiin ja kilpailukykyyn savukaasujen puhdistuskulujen ja polttoainevalintojen kautta. Myös päästörajoista säädetään EU-tasolla. Yleisesti linja on ollut jatkuvasti rajoituksia tiukentava. Eri teollisuudenaloille ja energiateollisuudelle on omat rajansa, jotka perustuvat kunkin alan päästökohdeiden parhaaseen käytettävissä olevaan tekniikkaan, mikä ottaa huomioon esimerkiksi erilaiset olosuhteet polttoaineiden prosessikäytössä ja voimalaitospoltossa. Näitä BAT-asiakirjoja päivitetään toisistaan riippumatta, ja esimerkiksi yli 50 MW:n voimalaitosten ja lämpökeskusten uudet tiukentuneet päästörajat tulevat voimaan 2021. [22] Maakaasun kilpailu-

kyvyn kannalta tiukkenevat rajoitukset ovat lähes poikkeuksetta hyvä asia, sillä sen poltosta ei synny käytännössä ollenkaan rikkidioksidi- ja hiukkaspäästöjä, toisin kuin lähes kaikista muista polttoaineista. Päästörajat ovat maakaasun kannalta merkittäviä, sillä ne parantavat sen kilpailukykyä myös bioenergiaa vastaan, varsinkin kun kyse on puun ja turpeen yhteispoltosta. Typenoksideja joudutaan maakaasukattiloissakin jonkin verran rajoittamaan, mutta kuitenkin yleensä huomattavasti vähemmän kuin muilla polttoaineilla. Toisaalta alati tiukkenevat rajat voivat ennen pitkää rajoittaa kaikkea lämpövoimaa ja edistää sähköistymistä, mikäli energijärjestelmä sen vain sallii.

4.1.1 Tuet ja verot

Ilmastotavoitteet ja lyhyen tähtäimen taloudellinen etu ovat usein ristiriidassa. Esimerkiksi korkeat energiaverot tai fossiilisten polttoaineiden kieltäminen heikentäisivät todennäköisesti tuntuvasti teollisuuden kilpailukykyä. Tämän vuoksi ilmastotavoitteisiin pääsemisen välineenä käytetään erilaisia, usein väliaikaiseksi tarkoitettuja tukia tai sellaisiksi laskettavia verohelpotuksia. Erilaisilla energiatuilla ja -veroilla ohjataan vahvasti suomalaista energian käyttöä ja tuotantoa. Erityisen suuri vaikutus näillä on puun ja turpeen yhteispolton kilpailukykyyn. Tähän vaikuttavat ainakin biomassan energiaverottomuus, turpeen alhainen verokanta sekä osin edellisestä riippuva hakesähkön tukitariffi. Toisaalta myös fossiilille polttoaineille on myönnetty helpotuksia energiantuotannon ja teollisuuden kilpailukykyyn varmistamiseksi, kuten sähköntuotannon ja prosessikäytön energiaverottomuus, energiaintensiivisen teollisuuden veronpalautus sekä yhteistuotantolämmön hiilidioksidiveron puolitus.

Biomassan poltosta ei makseta ollenkaan energiaveroa. Tämä on perusteltua, sillä energiaverotus perustuu nykyisin pitkälti hiilidioksidipäästöihin ja energiasisältöön, ja valalla olevan määritelmän mukaan poltto voidaan olettaa päästöttömäksi uuden kasvun sitoessa hiilidioksidin takaisin. Lisäksi biomassan käyttö edistää suomalaista energiaomavaraisuutta ja metsätalouden ja -teollisuuden jätejakeiden tehokasta käyttöä. Kuten alun historiikissa mainittiin, on 2010-luvulla tapahtunut fossiilisten polttoaineiden verotuksen yhdenmukaistaminen ja tuntuva kiristäminen heikentänyt maakaasun kilpailukykyä merkittävästi. Tähän tuskin on tulossa muutoksia, sillä työ- ja elinkeinoministeriön raportin mukaan hiilen verotuksen kiristäminen tai maakaasun verotuksen keventäminen eivät ole EU:n yhdenmukaisen energiaverotuksen vuoksi mahdollisia [67]. Järjestelmän kiertäminen on kuitenkin mahdollista, sillä esimerkiksi Ruotsissa on käytössä rikkivero, jota peritään vain raskaalta öljyltä, hiileltä ja turpeelta [68]. Turpeen verotus on monimutkaisempi asia, sillä turve on kansainvälisesti luokiteltu fossiiliseksi polttoaineeksi. Sen verotusta ei ole silti yhdenmukaistettu EU-tasolla, joten verotus ei perustu hiilidioksidipäästöön, kuten muilla fossiililla polttoaineilla [67]. Vero on nykyisellään vain 1,9 €/MWh, kun se olisi muiden fossiilisten polttoaineiden tavoin hiilidioksidiverolla 58 €/tCO₂ lasketuna 22,1 €/MWh. Lisäksi fossiilisten polttoaineiden energiasisältövero on hieman yli 7 €/MWh, jolloin kokonaisveroksi tulisi noin 30 €/MWh.

Turpeen verotus vaikuttaa päästöoikeuden hinnan kanssa myös hakesähkön tuotantotukeen. Metsähakkeella tuotetun sähkön tuotantotuen suuruus [€/MWh] lasketaan kaavalla

$$T = 35,65 - 1,827 V_t - 1,359 P, \quad (8)$$

jossa V_t on turpeen vero [€/MWh] ja P päästöoikeuden hinta [€/t]. Jos päästöoikeuden hinta on alle 10 €/t, kuten viime aikoina on ollut, lasketaan tuotantotuki kaavalla

$$22,06 - 1,827 V_t. \quad (9)$$

Tuotantotukea ei makseta, jos sen suuruudeksi tulee alle 1 €/MWh, eikä se voi ylittää 18 €/MWh:a. Tuki maksetaan metsähakkeen polttoaineosuuden mukaan, eli turvetta ja metsähaketta polttava voimalaitos ei saa koko sähköntuotannolleen tukea. [69] Nykyisessä ympäristössä tuki on täydet 18 €/MWh. Tuki parantaa puuhun ja turpeeseen pohjautuvan yhteistuotannon kannattavuutta huomattavasti, erityisesti matalalla sähkön hinnalla. Myös kohtuullisesti korkeammilla sähkön hinnoilla tuki ylittää maakaasu-CHP:n korkeammasta rakennusasteesta saatavan hyödyn. Tuki on sidottu päästöoikeuden ja turpeen hintaan, sillä sen on tarkoitus parantaa hakesähkön kilpailukykyä turvetta ja muita fossiilisia polttoaineita vastaan. Toistaiseksi päästöoikeuden hinta on pysynyt matalalla, ja turpeen veroa on alennettu entisestään, mikä on johtanut tuen pysymiseen korkeana. Esimerkiksi aiemmin käsitelty turpeen verotuksen yhdenmukaistaminen poistaisi hakesähkön tuen kertaheitolla ja laskisi samalla perinteisen puuta ja turvetta käyttävän yhteistuotannon kannattavuutta rajusti, mikä voisi olla ongelmallista biopolttoaineiden käytön ja omavaraisuuden kannalta. Tällaista tuskin on odotettavissa nykyisellä omavaraisuuden nimeen vannovalla hallituskokoonpanolla. Tämän työn tarkastelujakson aikana hallitukset ehtivä vaihtua, ja esimerkiksi viime aikoina kovassa nosteessa ollut Vihreät pyrkii turpeen käytön tukemisen lopettamiseen ja asteittaiseen alasajoon heti kivihiilen jälkeen [70]. Hakesähkön tuotantotukijärjestelmä on alun perin tarkoitettu väliaikaiseksi, ja se on toistaiseksi voimassa vuoteen 2021. Tuen jatkoa on tarkoitus arvioida vuonna 2018. Jatkokin voi olla mahdollista, mikäli pääasialliseksi ohjauskeinoksi tarkoitettu päästökauppa ei ole alkanut toimimaan. [65] Jatkolla tai jatkamattomuudella on merkittävä vaikutus metsähakkeella tuotetun sähkön kilpailukykyyn, varsinkin matalilla sähkön ja päästöoikeuden hinnoilla.

Yhdistetyn sähkön- ja lämmön yhteistuotannon hiilidioksidiveron puolitus eli niin sanottu CHP-leikkuri on vuodesta 2011 käytössä ollut energiaverohelpotus yhteistuotannolle. Sillä on merkittävä vaikutus hiilellä ja maakaasulla tuotetun yhteistuotannon kannattavuuteen, sillä se puolittaa lämmöntuotannosta koituvan verotaakan. Suhteellisesti leikkurilla on suurempi vaikutus kivihiilen hintaan hiilivoiman tyypillisesti huonomman rakennusasteen eli suuremman lämmöntuotannon vuoksi. CHP-veroleikkurin vaihteellinen poisto kirjattiin Sipilän I-hallituksen ohjelmaan vuonna 2015 tarkoituksenaan hiilidioksidipäästöjen ja erityisesti hiilen käytön vähentäminen. VTT teki asiasta selvityksen, jonka mukaan poistolla ei saavutettaisi päästövähennyksiä vaan lähinnä yhteistuotantolämmön

korvautumista jopa hiilellä tuotetulla erillislämmöllä. Leikkaus ei esimerkiksi olisi tehnyt maakaasu-CHP:ta kivihiili-CHP:ta kilpailukykyisemmäksi vaan pelkästään nostanut molempien hintoja ajojärjestyksen pysyessä samana. Tämä olisi näkynyt varsinkin pääkaupunkiseudulla kaukolämmön hinnan nousuna. Biopolttoaineiden käyttöä muutos ei olisi selvityksen mukaan lisännyt, sillä puu ja turve ovat jo edellisiä kilpailukykyisempiä polttoaineita. [19] CHP-leikkurin poisto peruttiin ja syntynyt aukko budjetissa paikattiin polttoaineiden energiaveron korotuksella, joka tuli voimaan vuoden 2017 alussa. [71] Tämän pitäisi sekä kompensoida CHP-leikkurin poiston perumisesta aiheutuva verovaje budjetissa että vähentää hiilidioksidipäästöjä. Yleinen veronkorotus painaa tuotantomuotojen verojen erilaisen laskentatavan vuoksi jopa hieman enemmän erillistuotantoa, minkä on tarkoitus parantaa energiatehokkaamman CHP:n kilpailukykyä suhteessa erillistuotantoon, mutta kuitenkin säilyttää biopolttoaineet kilpailukykyisimpänä vaihtoehtona. Veroleikkurin poisto olisi maakaasun kilpailukykyyn kannalta huono asia, mutta tehtyjen selvitysten ja päätöksen perumisen perusteella sitä tuskin voidaan pitää enää kovin todennäköisenä lähitulevaisuudessa.

Energiaintensiivisen teollisuuden veronpalautus pienentää tämänkin työn piiriin kuuluvan raskaan teollisuuden energiaveroista kertyvää laskua jopa 70–80 %. Lisäksi teollisuuden sähkövero, jota vähennys myös koskee, on jo lähtökohtaisesti paljon edullisempi kuin muiden sektorien. Palautus laskee huomattavasti energiaverotuksen vaikutusta juuri siellä, missä energiaa eniten käytetään. Kevennystä kohtaan onkin esitetty voimakasta kritiikkiä esimerkiksi Valtion taloudellisen tutkimuskeskuksen VATT:n palautusjärjestelmän vaikutuksia tutkineessa raportissa, sillä sen koetaan olevan vain yritystuki energiantensiivisille yrityksille parantamatta kuitenkaan oleellisesti niiden kilpailukykyä. [20] Toistaiseksi veronpalautuksesta ei silti olla luopumassa. Luopuminen heikentäisi maakaasun kilpailukykyä verollisissa käyttökohteissa biopolttoaineisiin ja sähköön verrattuna mutta parantaisi sitä muihin fossiilisiin polttoaineisiin nähden. Poisto voisi vaikuttaa myös teollisuuden kilpailukykyyn kokonaisuudessaan, mutta sen analysoiminen ei oikeastaan kuulu tämän työn aihepiiriin.

4.1.2 Päästökauppa

Hiilidioksidipäästöille ei ole olemassa varsinaisia savupiippukohtaisia päästörajoja, vaan niiden suhteen asetetaan kansallisia ja kansainvälisiä tavoitteita. Hiilidioksidipäästöjen syntymistä pyritään vähentämään mieluiten taloudellisilla ohjauskeinoilla, joihin kuuluvat pääasiassa polttoaineiden verotus ja päästökauppa. Verojen vaikutusta hintaan käsiteltiin jo aiemmin luvuissa 2.2.3 ja 4.1.1. Päästökaupan ideana on, että hiilidioksidipäästöjä jaetaan markkinoille tietty määrä, jolloin niille muodostuu markkinaehtoisesti hinta ja päästöjen vähentäminen on taloudellisesti kannattavaa teknologianeutraalisti. Joillekin hiilivuotoriskin omaaville aloille päästöoikeuksia jaetaan myös ilmaiseksi, joskin ilmaisaon määrä on pienentynyt jatkuvasti päästökaupan kehittyessä. Kaikki tätä työtä koskevat teollisuudenalat ja yhdyskuntien energiantuotanto kuuluvat päästökaupan piiriin.

Lisäksi esimerkiksi lentoliikenne kuuluu päästökauppaan. Ulkopuolella eli niin sanotussa taakanjakosektorissa ovat ainakin toistaiseksi esimerkiksi kotitalouksien, liikenteen ja maatalouden päästöt.

Päästöjen määrät lasketaan päästökertoimien avulla, ja niiden perusteella voidaan myös suoraan määrittää päästöstä aiheutuva kustannus energiamäärää kohden. Kertoimet ja kustannusvaikutukset on esitetty taulukossa 4. Taulukosta nähdään, että päästökaupan vaikutus on pienintä maakaasun hintaan, vaikkakin nykyisellä noin 5 €/t_{CO2}:n hinnalla vaikutus on melko mitätön millä tahansa polttoaineella. Uusiutuvien biomassojen laskennallinen päästökerroin on 0 t_{CO2}/MWh. Todellisuudessa tietenkin myös pitkälti hiilestä koostuvan puun polttaminen tuottaa välittömiä hiilidioksidipäästöjä, jopa 0,395 t_{CO2}/MWh, mutta hiilidioksidin katsotaan sitoutuvan takaisin kaadetun puun tilalle kasvavaan biomassaan. Tällä hetkellä päästöoikeuden hinnan arvioidaan vaikuttavan Suomen aluemarkkinan sähkön hintaan noin 0,75 €/MWh per €/t_{CO2} sähkön hintaa määrittävän hiililauhdetuotannon kautta. [72]

Taulukko 4. Polttoaineiden CO₂-päästökertoimia ja niiden vaikutuksia polttoaineen käyttökustannukseen [73]

Polttoaine	CO ₂ -päästökerroin t _{CO2} /MWh	5 €/t _{CO2} päästöoikeuden vaikutus käytön hintaan €/MWh	100 €/t _{CO2} päästöoikeuden vaikutus käytön hintaan €/MWh
Puubiomassa (teor.)	0 (0,395)	0	0
Maakaasu	0,199	1,0	20
Nestekaasu	0,234	1,2	23
Kevyt polttoöljy	0,265	1,3	27
Raskas polttoöljy S < 1%	0,285	1,4	29
Kivihili	0,336	1,7	34
Palaturve	0,367	1,8	37
Jyrsinturve	0,381	1,9	38

Suomi on mukana EU:n päästökauppajärjestelmässä, jonka toimivuus on kuitenkin tähän mennessä ollut heikkoa päästöoikeuksien ylitarjonnan vuoksi. Ylitarjonta johtuu pääasiassa talouskriisin vähentämästä kulutuksesta, arvioitua suuremmasta uusiutuvan energian lisääntymisestä sekä toisaalta myös kansainvälisten päästöyksiköiden käytön lisääntymisestä. Tämä on johtanut alhaiseen, noin 5 €/t:n päästöoikeuden hintaan, mikä ei ole riittävä aiheuttamaan toivottuja päästövähennyksiä. Järjestelmää ollaan uudistamassa seuraavalle päästökauppakaudelle niin sanotulla markkinavakausvarannolla, jonka tarkoituksena on siirtää ylimääräiset päästöoikeudet markkinoilta varantoon, josta näitä siirretäisiin myöhemmin takaisin markkinoille päästöoikeuksien huetessa. Tämä tasaa sekä yli- että alitarjontaa. Nykyisessä tilanteessa vähennettävä määrä olisi noin 12 % ylijäämästä vuodessa. Kokonaisuudessaan ylijäämä olisi arvioiden mukaan poistettu vuoteen 2030 mennessä. Päästökaupan on arvioitu vaikuttavan sähkön hintaan tulevaisuudessa 0,5

€/MWh per €/t_{CO2}, kun se aiemmin on vaikuttanut noin 0,75 €/MWh per €/t_{CO2}. Vaikutuksen vähentyminen johtuu hintaa määrittävänä tekijänä toimivan hiililauhteen vähentymisestä, joskin se tulee vähäisempänä esiin jatkossa siirtoyhteyksien kautta Tanskasta ja Saksasta. Markkinavakauseron ja tiedettyjen sähköntuotantoinvestointien perusteella sähkön keskihinnaksi Suomessa arvioidaan 42 €/MWh vuonna 2025, kun se olisi ilman vakauseron muutosta alle 30 €/MWh. [72]

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan vielä keskeneräisen Pöyryltä tilaaman selvityksen mukaan päästöoikeuden hinta tulisi uudella mallilla olemaan arviolta 20–25 €/t_{CO2}, ja sen vaikutus sähkön hintaan Suomessa noin 7–10 €/MWh vuonna 2025. Tämänkin jälkeen sekä päästöoikeuden että sähkön hinnat jatkaisivat tasaista kasvua. Vaihteluväli johtuu direktiiviä säätävien ministerineuvoston ja komission erilaisista näkemyksistä direktiivin yksityiskohdista. Lisäksi muutoksen arvioidaan vaikuttavan kaukolämmön hintaan samalla aikavälillä 0,4–1,5 €/MWh. Tällä tuskin on lopulta kaukolämmön houkuttelevuutta vähentävää vaikutusta, sillä samaan aikaan nouseva sähkön hinta nostaa myös esimerkiksi maalämmön kustannuksia suunnilleen saman verran. Teollisuuden osalta muutos iskisi päästöoikeuden ja sähkön hintojen nousun vuoksi pahasti erityisesti metalliteollisuuteen, jossa käyttökate saattaisi pienentyä jopa 40 %. [33]

4.1.3 Liikennepolttoaineet

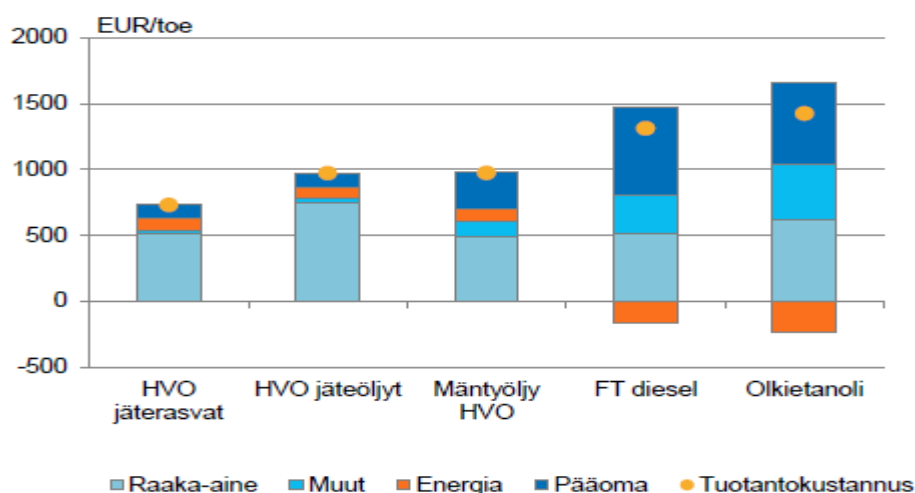
Vähähiilisempään yhteiskuntaan pyrkiessä yhdeksi haastavimmista alueista muodostuu fossiilisen öljyn korvaaminen liikennepolttoaineena. Suomen ilmasto- ja energiastrategiassa on asetettu vuoden 2030 tavoitteeksi tieliikenteen päästöjen vähentäminen 50 %:lla, ja yksi osatavoite tässä on uusiutuvien biopolttoaineiden osuuden nostaminen 30 %:iin. Lisäksi tavoitteena on, että Suomessa olisi yhteensä 250 000 sähköautoa ja 50 000 kaasuautoa. Strategian mukaan päästövähennyksen toteuttaminen ei onnistu millään yksittäisellä ratkaisulla, vaan niitä täytyy yhdistellä. Varsinkin siirtymäkaudelle parhaana vaihtoehtona nähdään drop-in-biopolttoaineet, eli suoraan nykyisiin moottoreihin sopivat biopolttoaineet. [65]

Drop-in-biopolttoaineissa oleellista on lopputuotteen hapettomuus, jolla saavutetaan fossiilista vastinetta muistuttava koostumus ja suora korvattavuus. Tietävästi nimenomaan hapettomuus on vaatimuksena suoraan sopiville drop-in-polttoaineille. Happea sisältävien biopolttoaineiden happiyhdisteet, kuten etanoli, aiheuttavat ongelmia polttoaineiden käsittely- ja käyttölaitteistoissa. Lisäksi happipitoisuus laskee yleisesti polttoaineen lämpöarvoa verrattuna hapettomaan vastaavaan hiilivetyyn. [57]. Esimerkiksi happea sisältäviä perinteistä FAME-biodieseliä tai etanolia voidaan käyttää vain pieninä seoksina, kuten 98 E5 tai 95 E10, ilman laitteistomuutoksia.

Sähkökäyttö nähdään usein lähitulevaisuuden ratkaisuna henkilöautoihin ja raideliikenteeseen esimerkiksi sen hyvän energiatehokkuuden ja käytönaikaisen päästöttömyyden vuoksi. Todelliset päästöt siirtyvät toki sähkön tuotantoon, mutta Suomessa sen päästöt

ovat vähentyneet viime vuosina hyvää tahtia [55]. Vetykäyttöiset polttokennoautot ovat osa sähköautoilun jatkumoa kaukaisemmassa tulevaisuudessa. Ongelmana on kuitenkin pitkiä ajosuorituksia tekevät ja varastoitavuudelta paljon vaativat raskas liikenne, lentoliikenne ja työkoneet. Näissä käyttövoiman korvaaminen järkevällä tavalla esimerkiksi vedyllä, sähköllä tai kaasulla on osoittautunut haastavaksi [25]. Niissä olisi tarkoitus jatkaa drop-in-biopolttoaineiden käyttöä myös kaukaisemmassa tulevaisuudessa. Tällaisessa käytössä polttoaineiden tulisi olla nimenomaan dieseliä korvaavaa biodieseliä, jolloin niitä toki voitaisiin käyttää myös diesel-henkilöautoissa. Bensiinin korvaamiseen voidaan käyttää lisäksi bioetanolia ja biokaasua, joskin näitä ei voi laskea suoraan korvaaviksi vaadittavien kohtuullisten laitteistomuutosten vuoksi. Myös maakaasu nähdään hyvänä siirtymäratkaisuna. Fossiilisella maakaasulla saavutetaan autokäytössä noin 25 %:n hiilidioksidipäästövähennys bensiiniin verrattuna, mutta tärkeämpää on, että sille luodulla infralla voidaan siirtyä helposti suhteellisen yksinkertaisesti tuotettavaan ja varmasti päästöttömään biokaasuun. [65]

VTT:n ja VATT:n selvityksen mukaan suoraan nykyisiin moottoreihin sopivat korvikkeet olisivat myös Suomen kansantalouden ja teknisen toteutettavuuden kannalta paras vaihtoehto EU:n vaatiman 40 %:n tieliikenteen päästövähentymän toteuttamisessa. Biopolttoaineiden tulisi olla suurimmaksi osaksi dieseliä vastaavia aiemmin kerrotuista syistä. Merkittävimmät uusiutuvan dieselin valmistustavat ovat aiemmin käsitelty kasviöljyjen vetykäsitely eli HVO-biodiesel sekä Fischer-Tropsch-prosessi biomassan kaasutuksen yhteydessä. [25] Toisessa selvityksessä HVO-biodiesel on arvioitu myös tämän hetken kustannustehokkaimmaksi tavaksi tuottaa drop-in-biopolttoaineita. [58] Kuvassa 19 on esitetty eri biopolttoneiden tuotantomuotojen arvioidut kustannukset.



Kuva 19. Todennäköisten drop-in-biopolttoainevaihtoehtojen arvioidut tuotantokustannukset [58]

Arvion mukaan suoraan nykymoottoreihin sopivia biopolttoaineita pitäisi tuottaa noin 600 000 toe, joka on dieseliksi muunnettuna 706 730 m³ nykyistä enemmän vuodessa. Tämä tarkoittaa suunnilleen nykyisen tuotannon tuplaamista. Suomen nykyisestä noin

549 000 toe:n biopolttoainetuotannosta 480 toe on HVO-dieseliä, 44 toe biobensiiniä, 10 toe bioetanolia ja 15 toe biokaasua. [25]

Samaa lukua on käytetty vaadittavana biopolttoainetuotannon lisäyksenä myös muissa selvityksissä. Näissä vähintään puolet tuotannon lisäyksestä on arvioitu tuotettavan HVO-dieselinä. [74] [58]. Heikon kehityksen skenaariona on pidetty puolta edellä esitetystä 600 000 toe:sta, jolloin suurin osa tuotannon lisäyksestä olisi nykyisten laitosten kapasiteettia lisäämällä tuotettua. Selvityksen mukaan HVO-menetelmällä valmistettu diesel on kuitenkin huomattavasti FT-dieseliä kilpailukykyisempää, joten osuus voi olla suurempi-kin ilman merkittäviä ohjauskeinoja puuperäisen FT-dieselin tuottamiseksi. [58].

Aiemmin käsitellyn perusteella pidetään useassa raportissa esiintyvää 600 toe:n biopolttoainetuotannon lisäystä todennäköisenä hyvän kehityksen vaihtoehtona. Myös paljon vetyä tuotannossaan tarvitsevien HVO-dieseliä osuuden voi näiden lähteiden perusteella arvioida olevan vähintään puolet tulevasta tuotannosta. Mikäli arvioidaan minimita-paukseksi aiemmin mainittu 150 000 toe:n lisäys ja maksimivaihtoehtoksi 90 % koko 600 000 toe:n lisäyksestä käyttämällä HVO-öljyjä, olisi maakaasun käytön lisäys aiemmissä kappaleissa esitettyjä vedyntuotannon lukuarvoja käyttäen noin 186–991,8 GWh/a. Koska luvut eivät sisällä vedyn tuotannosta saatavaa höyrynä talteen otettua energiaa, voi todellinen kaasun kulutus olla jopa suurempi, jos tuotantoa ei ole integroitu johonkin hal-paa höyryä tuottavaan toimintaan.

Epävarmuutta HVO-dieselin tulevaisuudesta aiheuttavat raaka-aineina toimivien jätete-peräisten öljyjen kestävyysperusteet ja biopolttoaineiden kaksoislaskenta, joihin voi tulla muutoksia EU-tasolla. Päästövähennyksen kaksoislaskennan poistaminen esimerkiksi joltain jäteteperäiseltä raaka-ainejakeelta voisi huonontaa oleellisesti tekniikan kilpailukykyä. Lisäksi ongelmaksi voi muodostua tuotannon kasvaessa uusien sopivien raaka-ai-neiden löytyminen. Nyt tuotanto perustuu jäterasvoihin ja mäntyöljyyn, joita ei kuitenkaan ole loputtomasti saatavilla kestävästi ja edullisesti. Maakaasun kannalta merkittävä tekijä on myös biopolttoaineen valmistuspaikka, sillä esimerkiksi Nesteellä on samankal-taisia biodieselin tuotantolaitoksia myös muissa maissa. Jos biodiesel tuodaankin laivalla Suomeen, ei tämä tietenkään kasvata maakaasun käyttöä Suomessa. Myös öljyn hinnan pysyminen alhaisella tasolla sekä muutokset ympäristöpolitiikassa voivat laskea erilais-ten liikennepolttoaineratkaisujen kannattavuutta ja muuttaa niiden välisiä kilpailusuh-teita. Esimerkiksi sähköautoilun valikoituminen tulevaisuuden liikkumamuodoksi syö biopolttoainetuotannon markkinoita, joskin edellä esitetyt ongelmat raskaan liikenteen ja työkonoiden kanssa voivat pitää markkinoita auki myös biodieselille.

Vedyn käyttökohteiden yhteydessä käsitellyssä vetytaloudessa liikennepolttoaineiden korvaaminen vedyllä on yksi tärkeimpiä askelia kohti täysin hiiletöntä yhteiskuntaa kau-kaisemmassa tulevaisuudessa. VTT:n vetytalouden mahdollisuuksista tekemän selvityk-sen mukaan vetyautot voisivat optimistisessä skenaariossa kattaa jopa 27 % Suomen hen-

kilöautokannasta vuonna 2050. Tämä vaatisi kuitenkin merkittäviä panostuksia vetyinfraan sekä tukia vetyautoiluun, mikä vaikuttaa hyvin optimistiselta. Konservatiivisemmän VTT:n skenaarionkin mukaan osuus olisi 11,7 %. Näissä skenaarioissa arvioitu vedyn liikennekulutus tulisi olemaan vuonna 2030 38 200–74 000 toe vuodessa, mihin tarvittaisiin maakaasua aiemmin käytettyjen arvojen mukaan 517–1109 GWh. [59] On otettava huomioon, että varsinkin optimistisessä skenaariossa oletetaan vety ainoaksi merkittäväksi vaihtoehtoiseksi polttoaineeksi, joka otettaisiin käyttöön. Todellisuudessa vaihtoehtoiset polttoaineet tulevat todennäköisesti kilpailemaan keskenään ilman merkittäviä poliittisia ohjauskeinoja. Vetyautojen lisääntyminen vaatisi kaikista vaihtoehdoista suurinta poliittista ohjausta infrastruktuurin ja teknologian markkinaehtoisen kehittämättömyyden vuoksi. [25]

Liikennepolttoainetavoitteita tarkasteltaessa on huomioitava, että vetytalouden kehittymisskenaariot ovat voimakkaasti päällekkäisiä biopolttoaineskenaarioiden kanssa jälkimmäisten ollessa teknistaloudellisista syistä toteutumisltaan todennäköisempiä. Kun huomioidaan, että päästövähennyksiä tutkineen selvityksen mukaan kaikista eri käyttövoimavaihtoehdoista vety on sekä teknisesti kehittymättömin että laskelmien mukaan ylivoimaisesti haitallisin vaihtoehto Suomen kansantaloudelle [25], voidaan pitää epätodennäköisenä, että syntyisi yhtenäinen poliittinen tahto siirtyä vetypohjaiseen liikenteeseen ainakaan kovin nopeassa aikataulussa. Pienessä määrin vetyautoja voi silti tulla käyttöön, jos kiinnostus niitä kohtaan kasvaa kansainvälisesti ja kilpailukykyistä kalustoa tulee saataville. Laajan yhtenäisen jakelun puuttuessa vetyä voitaisiin tuottaa paikallisesti esimerkiksi elektrolyysillä tai teollisuuden sivutuotteena. Näiden syiden vuoksi vetytalouden kehittymistä ei voida realistisesti pitää maakaasun kulutukseen vaikuttavana kehityskulkuna ainakaan tämän työn aikaperspektiivissä.

Biokaasun käyttöä ei nähdä missään edellä mainituista kokonaisvaltaisena ratkaisuna. Silläkin nähdään silti olevan oma roolinsa osana monipuolista palettia, etenkin tankkauspiisteiden ja kaluston määrän kasvaessa markkinaehtoisesti. Myös maakaasun käyttö voi lisääntyä, sillä etenkin biokaasun käyttöönotossa se on selkeä siltapolttoaine. Ainakin toistaiseksi biokaasun jakelu perustuu kaasuverkon alueella pääasiassa maakaasun jakeluputkistoon lukuunottamatta yksittäisiä biokaasulaitoksia. Kaasujakeet erotellaan putkistossa vain laskennallisesti. Lisäksi erillisillä liikennekaasua tarjoavilla biokaasuasemilla on yleensä käytössä maakaasu varapolttoaineena. Tällöin jos ja kun laskennallisesti maakaasua tulee olemaan aina saatavilla biokaasun tankkausasemilla, tullaan sitä myös todennäköisesti käyttämään sekä ainakin toistaiseksi edullisemman hintansa vuoksi että myös biokaasun varapolttoaineena kaasuverkon ulkopuolella. Bio- ja maakaasun etuna on pienenevien hiilidioksidipäästöjen lisäksi jo aiemmin suurempien prosessien yhteydessä käsitelty vähäinen haitallisten päästöjen muodostuminen. Tämä pätee tietenkin myös liikennepolttoainekäytössä, minkä vuoksi puhtaasti palavat kaasut voivat saada tiukkenevista päästörajoista joitain etuja. Diesel-autot ovat olleet viime aikoina vastatulessa niiden

runsaampien typenoksidi- ja hiukkaspäästöjen vuoksi. Monissa maailman suurkaupungeissa ollaankin kieltämässä diesel-autojen käyttö kokonaan tulevaisuudessa [75]. Toisaalta tämä voi vähentää myös aiemmin käsiteltyjen biodiesel-hankkeiden houkuttelevuutta, mikä vähentäisi todennäköisesti myös maakaasun kulutusta. Energia- ja ilmastostrategiassa mainittu 50 000 kaasuauton tavoite on kuitenkin merkittävä, sillä vuoden 2009 keskimääräisellä ajosuoritteella (17 000 km) ja bensiininkulutuksella (7,5 l/100 km) [76] maakaasuksi muunnettuna maa- ja biokaasun kulutus olisi näissä autoissa noin 570 GWh/a. Suomen energia- ja ilmastostrategian tavoitteena on maa- ja biokaasun noin 0,8 TWh:n liikennekäyttö kummallekin puoliksi jakaantuneena vuonna 2030 [65].

4.1.4 Biomassan kestävyysmäärittely

Biomassan käyttö sähkön, lämmön ja biopolttoaineiden tuottamisessa on oleellinen osa suomalaista energiastategiaa [65]. Metsäisenä ja metsäteollisuusvaltaisena maana tällainen strategia on myös Suomen taloudellisen edun mukainen. Puubiomassan kestävyys laajamittaisena energiaratkaisuna ja metsien asema hiilinieluna eivät ole kuitenkaan kiiveen hakattuja totuuksia, ja näistä keskustellaan erikseen työn tekohetkellä EU-tasolla [77] [78].

Pidemmällä oleva keskustelu liittyy niin sanotun Lulucf-sektorin eli metsätalouden ja maankäytön päästöihin. Käytännössä nämä tarkoittavat hiilinieluna toimivien metsien hakkuita ja näiden rajoituksia. Maankäytön päästöjen rajoittamisesta esimerkiksi sademetsien suojelemiseksi sovittiin jo aikanaan Kioton sopimuksessa 1997. Tällä hetkellä EU:n ympäristövaliokunnan mukaan metsien käytön yläraja tulee sitoa tiettyjen vuosien hakkuiden pinta-alaan, kun taas Suomen virallisen mielipiteen mukaan myös puuston kokonaistilavuus tulee huomioida. Lisäksi hakkuiden ylärajan määrittäviksi vertailuvuosi ehdotettu aikaväli 2000–2009 on Suomelle haitallinen sen aikaisen vähäisen puunkäytön vuoksi, mikä johtaisi alhaiseen hakkuiden ylärajaan. Pinta-alaan sitominen on ongelmallista myös siksi, että se ei ota huomioon erilaisten metsien erilaisia hiilensitomiskapasiteetteja, jolloin esimerkiksi tehokkaasti hoidettu pitkä talousmetsä on samanarvoinen luonnontilaisen metsikön kanssa. Suomen metsäteollisuuden tuotannon ja biopolttoaineiden käytön lisäämiseen tämä vaikuttaa siten, että hakkuiden eli puunkäytön lisääminen jouduttaisiin kompensoimaan ostamalla hakkuuoikeuksia tai vähentämällä päästöjä muualta. [77] Maakaasun kannalta vaikutukset olisivat sekä positiivisia että negatiivisia. Toisaalta asetus voi hillitä maakaasun kanssa kilpailevan biomassan lisäämistä voimalaitospolttoaineena, mutta toisaalta se voi jopa vähentää maakaasua käyttävää teollisuustuotantoa.

Toinen uhkakuva liittyy biopolttoaineiden kestävyyskriteereihin. Toistaiseksi tämä koskee nestemäisten biopolttoaineiden valmistuksessa käytettävien raaka-aineiden kestävyttä, mutta periaatteessa samat kriteerit voivat laajeta myös käsittämään energiaksi poltettua biomassaa. EU-parlamentin ympäristövaliokunnassa esitetty luonnos uusiutuvan

energian direktiivistä asettaisi uusia rajoituksia biopolttoaineiden valmistukseen. Esimerkiksi harvennuspuun, mäntyöljyn ja turvemailta korjatun puun käyttöä ei laskettaisi uusiutuvien polttoaineiden kiintiöön. Lisäksi hakkuutähteiden käytön kestävyyttä arvioitaisiin erikseen. Arvioiden mukaan tällaiset muutokset lopettaisivat suuren osan vireillä olevista biopolttonestehankkeista. [78] Esimerkiksi kiinalainen Kaidi on lykännyt lopullista päätöstä suunnittelemaansa Kemiin rakennettavasta biojalostamosta siihen asti, kunnes lopullisen direktiivin sisältö selviää [79]. Lisäksi edellä lueteltujen jakeiden kestäväksi luokiteltu käyttö jopa voimalaitospolttoaineena saattaisi vaikeutua. Tämä prosessi on vielä alkuvaiheessa verrattuna edelliseen, joten suuriakin muutoksia voi tulla. Toteutus- saan direktiivi rajoittaisi vahvasti biopolttoainealan kehitystä, mutta tuskin vaikuttaisi metsäteollisuuden perustuotantoon.

Suomalaisittain ajateltuna puun käytön rajoittaminen saattaa vaikuttaa käsittämättömältä. Päästöttömäksi energiaksi määritellyn puun käytössä on kuitenkin tapahtunut Euroopan tasolla ylilyöntejä, jotka ovat herättäneet poliitikoita laatimaan käyttöön jonkinlaisia pelisääntöjä. Esimerkkinä tästä käy Isossa-Britanniassa sijaitseva 10 000 MW:n Draxin hiililauhdevoimala, jonka käyttämästä hiilestä iso osa on korvattu Pohjois-Amerikasta laivattavalla runkopuusta valmistetulla pelletillä erilaisten tukijärjestelmien vuoksi [80].

Päätöksien ja keskustelun taustalla täytyy myös huomioida EU poliittisena järjestelmänä. Monilla EU-mailla ei ole samanlaisia metsävaroja kuin Suomella, tai ne on voitu tuhota jo satoja vuosia sitten. Tämän vuoksi hakkuurajojen sitominen 10–20 vuoden taakse ei aiheuta suurempia taloushaittoja kaikille asiasta päättävälle taholle. Lisäksi puunkäytön lisääminen ei ole monelle suurelle maalle samalla tavalla taloutta kasvattava tekijä ja realistinen päästövähennyskeino. [81] Metsien käytön lisäämisen mahdollistaminen voidaan nähdä epäkiinnostavana tai jopa epärealistisena kilpailuetuna, sillä Manner-Euroopan energiajärjestelmä nojaa vahvasti hiileen ja kaasuun, mitä käsiteltiin aiemmin luvussa 4.1.

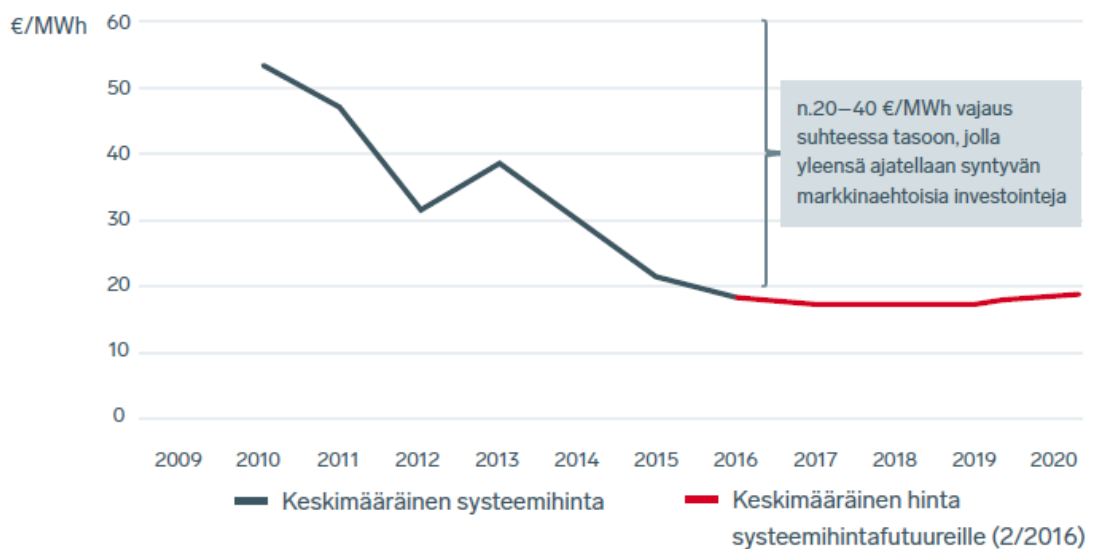
Toistaiseksi biomassan kestävyys ei ole noussut ongelmaksi. Edellä kuvatusta kehityksestä voisi kuitenkin kompromissina seurata esimerkiksi pieni päästökerroin puulle. Tämä voisi perustua esimerkiksi toimitusketjun päästöihin.

4.2 Energiamarkkinat

Polttoaineena ja energiantuotannon hyödykkeenä maakaasun tuleva kulutus on voimakkaasti riippuvainen erilaisista energiamarkkinoista, joten näiden muutoksia ja nykytilaa on syytä käsitellä monipuolisesti. Tässä luvussa käsitellään sähkö-, kaukolämpö- sekä polttoainemarkkinat. Erityisesti yhdyskuntien CHP-käyttö sekä siihen liittyen myös kaukolämmön tuotanto ovat osaltaan riippuvaisia sähkömarkkinoista. Kilpailevien polttoaineiden markkinat vaikuttavat eniten toistensa väliseen kilpailukykyyn, joskin maakaasumarkkinat käsitellään tarkemmin näkyvissä olevien suurten muutosten vuoksi.

4.2.1 Sähkötmarkkinat

Suomi kuuluu pohjoismaiseen sähkömarkkina-alueeseen, joka on murroksessa. Suurimpia muutoksia ovat tuulivoiman lisääntymisen lisäksi 1–2 suuritehoisen ydinvoimalan valmistuminen sekä sähkön pitkään jatkuneesta alhaisesta hinnasta johtuva lämpövoimakapasiteetin alasajo ja uusien investointien puute. Tarjolla on siis yhä enemmän joustamatonta ydinvoimaa ja vaihtelevaa tuulivoimaa. Näitä koetetaan tasapainottaa lisäämällä siirtoyhteyksiä sekä pohjoismaisen sähkömarkkinan sisällä että pohjoismaista Eurooppaan. Jatkuessaan nykyisenä kehitys uhkaa jopa kaupunkien CHP-tuotannon kannattavuutta. Tähän saakka merkittävänä muuttujina pohjoismaisessa sähkön hinnassa ovat olleet pohjoismaiset sademäärät ja sitä kautta vesivoiman tuotanto, mutta nykyisessä ympäristössä myös pohjoismaiset tuuliolosuhteet heiluttavat hintaa, tosin huomattavasti lyhemmällä aikavälillä. Pohjoismaisen sähkön systeemi- ja johdannaishinta tulevaisuudelle on esitetty kuvassa 20, josta voidaan päätellä, että ainakin markkinoiden mukaan keskimääräinen sähkön hinta tulee myös pysymään alhaisena.

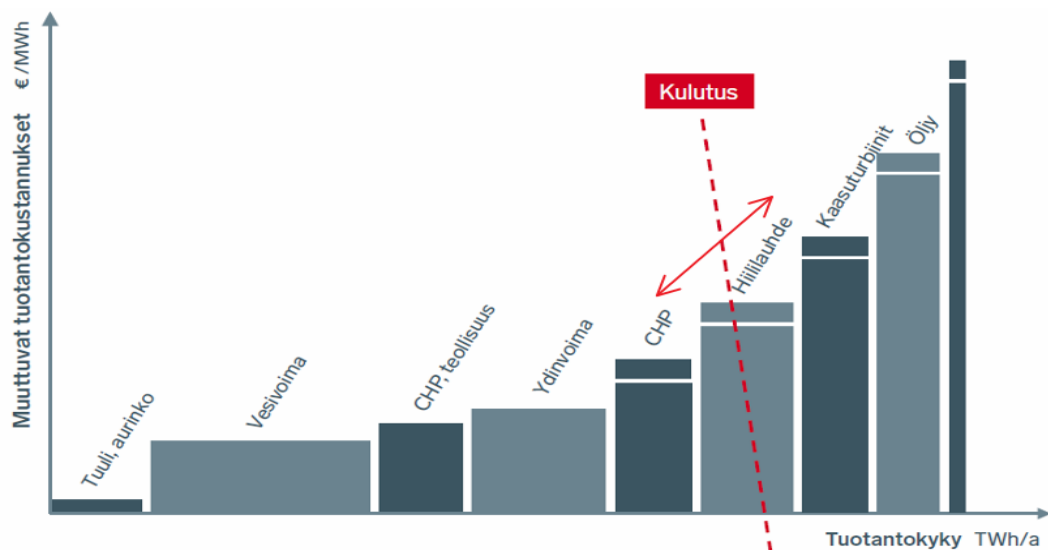


Kuva 20. Keskimääräinen systeemi hinta ja tulevaisuuden hintafutuurit (2/2016) pohjoismaiselle sähkölle. [82]

Sähkön markkinahinta, kuten muidenkin tuotteiden markkinahinnat, muodostuu kysynnän ja tarjonnan mukaan. Erona on kuitenkin se, että kysynnän ja tarjonnan täytyy kohdata joka hetki, jotta järjestelmä pysyy tasapainossa. Tätä vaikeuttaa perinteisten tuotantomuotojen kankeus sekä yhä lisääntyvien uusiutuvien tuotantomuotojen vaihteleva ohjaamattomissa oleva tuotanto. Yksinkertaistetusti eri sähköntuotantomuodot on voitu jakaa niiden kustannusten ja tuotannon joustavuuden mukaan peruskuormaan, säätökykyisempään välikuormaan ja huippukuormaan. Peruskuormalle on ominaista matalat käyttökustannukset mutta korkeat investointikustannukset, minkä vuoksi laitosta kannattaa ajaa mahdollisimman paljon ja täydellä teholla. Usein peruskuormalaitoksen sähkötehoa ei edes voitaisi säätää teknisistä syistä. Tyypiesimerkki sähköntuotannon peruskuormasta

on ydinvoimala. Periaatteessa myös vähemmän lämpötilasta riippuvat teollisuuden yhteistuotantolaitokset voidaan laskea peruskuormaan, sillä niiden tuotanto ei riipu sähkön tarpeesta. Toisaalta se voi muuttua tehtaan höyryn tarpeen mukaan. Huippukuormaa tarvitaan vain talven kylmimpinä hetkinä tai vakaampien laitosten varakuormana. Huippukuorman muuttuvat kustannukset ovat yleensä korkeat mutta investointikustannus matala säädettävyyden tai käynnistysnopeuden ollessa hyvä. Edellisten väliin jää välikuorma, joksi etenkin Suomessa voidaan laskea kaupunkien CHP-voimalat. Vaikka CHP-laitoksia ajetaan lämmöntarpeen mukaan, on niiden käyttöprofiili kohtuullisesti myös sähkön tuotannon välikuormaa vastaava. Luokittelu eri muotoihin on lopulta karkeaa ja todellinen luonne vaihtelee voimakkaasti sähkömarkkinasta toiseen. Esimerkiksi eteläisessä Euroopassa, jossa CHP-tuotanto ja biomassan poltto on harvinaisempaa, suuren mittakaavan hiililauhdetta pidetään peruskuormana, kun taas Suomessa se sijoittuu johonkin väli- ja huippukuorman väliin.

Sähkön hinnan määräytymisen, kulutuksen ja tuotantomuotojen kustannusten suhdetta Suomessa on havainnollistettu kuvassa 21. Sähkön hinta määräytyy kalleimman vaadittavan tuotantomuodon tuotantokustannuksen mukaan kullakin kulutustasolla siten, että edullisemmat tuotantomuodot ovat jo käytössä. Käytännössä tämä tapahtuu markkinoilla osto- ja myyntitarjousten perusteella. Kuvan kulutusviivan kaltevuus johtuu hintasensitiivisestä kulutuksesta.

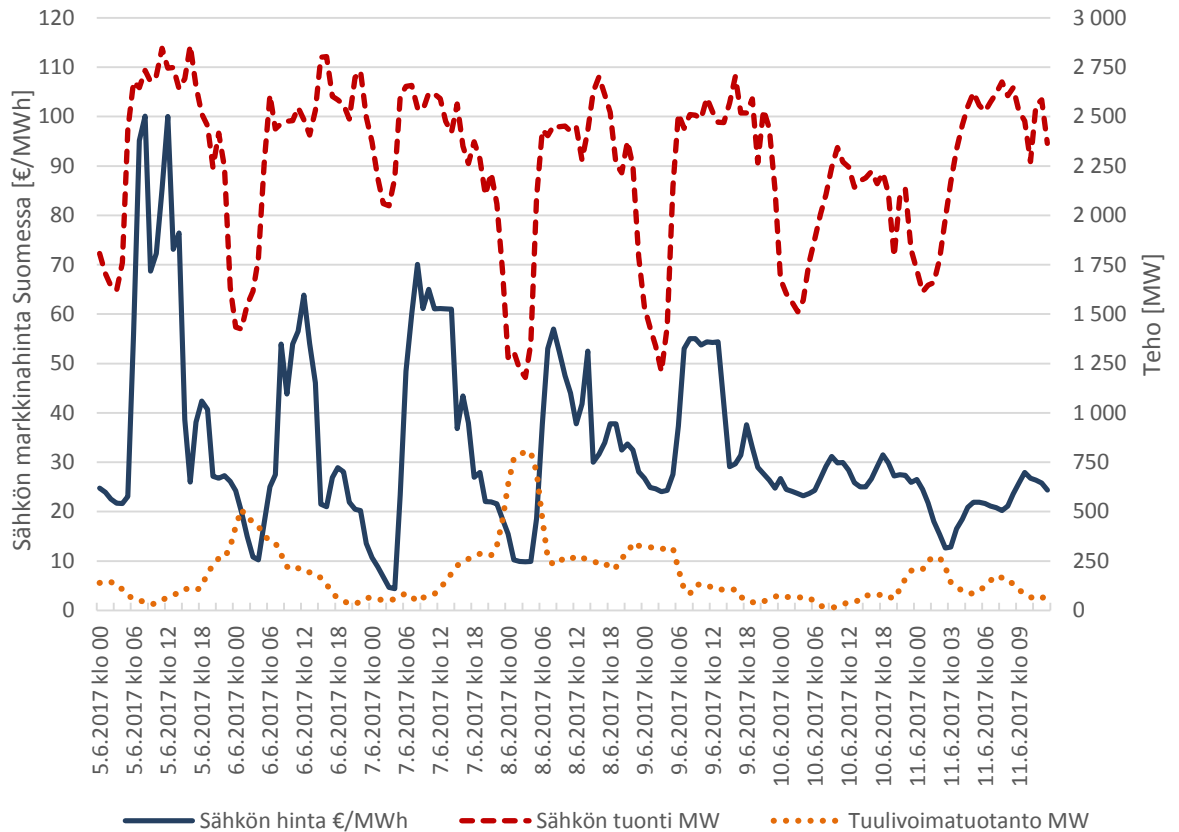


Kuva 21. Sähkön hinnan määräytyminen kulutuksen ja tuotantomuotojen kustannusten mukaan [82]

Perinteistä tasapainoa horjuttavana uutena tekijänä tässä asetelmassa on ohjaamattomissa oleva ja usein syöttötariffilla tuettu tuuli- ja aurinkovoima. Koska näiden muuttuvat kustannukset ovat likimain nollassa ja sähköntuotannolle maksetaan vakiona pysyvä syöttötariffi, kannattaa kaikki tuotettavissa oleva sähkö myydä markkinoille käytännössä aina, eivätkä sähkön hinnan muutokset vaikuta sen kannattavuuteen. Joissain maissa syöttöta-

riffi maksetaan myös negatiivisilla sähkön hinnoilla, mikä tekee jopa negatiivisten myyntitarjousten tekemisen järkeväksi. Suomessa tariffia ei kuitenkaan makseta niiltä tunneilta, jolloin sähkön hinta on negatiivinen. Toisena negatiivisiin sähkön hintoihin ohjaavana tekijänä ovat normaalisti niin sanotut must-run-voimalat, joiden on teknisesti pakko syöttää sähköä verkkoon joko teknisistä tai huoltovarmuudellisista syistä, jolloin ne ovat valmiita maksamaan saadaksesen tuottaa sähköä. Normaalisti tällaiset voimalat ajavat alinta peruskuormaa, mutta tuulisähkön tuotantohuiput voivatkin hetkellisesti riittää syrjäyttämään kaiken säätökykyisen tuotannon. Must-run-voimalaitosten tilannetta voi hahmottaa kuvittelemalla osan aiemmin esitetyssä kuvassa 21 olleista palkeista, kuten ydinvoiman ja osan teollisuuden CHP:sta, negatiiviseksi. Tuulivoiman aiheuttamia muutoksia havainnollistaisi puolestaan vaihtelevan kokoinen ja muita tuotantomuotoja edeltään työntävä tuulivoimapalkki kulutussuoran pysyessä paikallaan. Nämä voivat yhdessä korkean tuulivoimatuotannon lävistävyyden eli kokonaiskapasiteetin riittävän suuruuden ja hetkellisesti matalan kysynnän kanssa vääristää markkinoita siten, että sähkön markkinahinta laskee välillä todella alas tai jopa negatiiviseksi. Tällaista on esiintynyt enenevässä määrin Euroopan sähkömarkkinoilla. [83]

Merkkejä kuvatusista muutoksista on näkyvillä kuvassa 22, jossa on esitetty Suomen aluemarkkinan sähkön hinta, sähkön nettotuonti sekä tuulivoimatuotanto viikolla 23 vuonna 2017. Kuvassa nähdään voimakkaita muutoksia sähkön hinnassa välillä 4–100 €/MWh, tuulivoimatuotannossa välillä 0–770 MW sekä sähkön nettosiirrossa välillä 1250–2850 MW. Sähkön hinta korreloi kohtuullisesti tuulivoimatuotannon kanssa, joskin halvinta hetkeä neljän euron tuntumassa ei voi selittää ainakaan kotimaisella tuulivoimalla. Hinnan heiluntaa voimisti myös kyseisellä viikolla huollossa ollut Olkiluodon toinen yksikkö, jonka tuottama sähköteho puuttui markkinoilta.



Kuva 22. Sähkön hinta, nettotuonti ja tuulivoimatuotanto Suomen aluemarkkinalla viikolla 23 vuonna 2017. [84]

Suomen sähkömarkkinoille on tulossa paljon uutta sähköntuotantokapasiteettia tämän työn tarkastelujakson aikana. Uusi kapasiteetti koostuu pääasiassa vaihtelevasta tuulivoimasta ja jäykästä ydinvoimasta. Lisäksi rakenteilla oleva Äänekosken biotuotetehdas tulee tuottamaan uusiutuvaa ylijäämä sähköä noin 130 MW ja suunnitteilla oleva Kuopion biojalostamo mahdollisesti saman verran lisää [42] [36]. Pitkään rakenteilla olleen Olkiluoto 3:n on tarkoitus aloittaa säännöllinen sähköntuotanto vuoden 2018 loppupuolella. Tämä tuo markkinoille 1600 MW perusvoimaa, millä todennäköisesti on suuria vaikutuksia sähkön hintaan. Sähköteho korvaa ainakin aluksi pääasiassa edullista Ruotsista siirrettävää sähköä. Lisäteho vapauttaa pohjoismaista vesivoimaa käytettäväksi säätämiseen, mikä voi poistaa markkinoilta kalliimpaa kapasiteettia. Vuosina 2015–2017 sähkön keskimääräinen siirto Ruotsista on ollut noin 2000 MW [85], joten tilaa omalle tuotannollekin vielä löytyy. Valmistumisen jälkeen Ruotsin tuontikapasiteetista varataan osa ydinvoimalan häiriötilanteiden varalle, mikä laskee sähkömarkkinoiden käytössä olevaa siirtokapasiteettia 300 MW:lla. [86] Fennovoiman valmisteilla olevan Hanhikivi 1:n pitäisi myös valmistua tämän työn tarkastelujakson aikana vuonna 2024 ja tuottaa 1200 MW lisää perusvoimaa pohjoismaiseen sähköverkkoon. Mikäli hanke valmistuu aikataulussa, eletään Suomessa vuonna 2025 todellista ydinsähkön kulta-aikaa, kun vanhenevia Loviisan yksiköitä ei ole vielä suljettu. Nykyisin yhteenlaskettu ydinvoimateho on 2752 MW, kun se tulee olemaan molempien laitosten valmistuttua aikataulussaan 5552 MW.

Tämä on kesäaikaan jo reilusti yli puolet Suomen sähkön kulutuksesta. Loviisan yksiköt on tarkoitus sulkea vuosina 2027–2030, joskin myös jatkolupien hakemista on spekuloitu. Yksiköt ovat käytännössä maksaneet itsensä takaisin jo aikoja sitten, mikä voi houkutella hakemaan jatkoaikaa ja tekemään pienempiä investointeja. Uudet hankkeet olisivat todennäköisesti hyvin kalliita ja aikaa vieviä, minkä lisäksi uutta lupapäätöstä voisi olla hyvin hankala saada sen poliittisen luonteen vuoksi.

Tuulivoimakapasiteettia on Suomessa käytössä noin 1500 MW. Kapasiteetin kasvu on nyt suurta, sillä yli 500 MW edellisestä rakennettiin vuoden 2016 aikana. Vuoden 2017 alussa fyysisesti rakenteilla on hieman vajaa 400 MW ja suhteellisen varmaa rakentamista odottamassa yli 1200 MW luvitettuja voimaloita. Lisäksi noin 6700 MW kapasiteettia on lupa- ja kaavoitusprosessin eri vaiheissa ja noin 1500 MW vielä suunnitteluasteella tai keskeytettynä. Kaikki suunnitteilla olevat voimalat eivät tietenkään toteudu, mutta jo puolellakin olisi merkittäviä vaikutuksia. Valmisteilla olevista laitoksista jopa 2500 MW on aikataulujensa mukaan valmistumassa vuoteen 2020 mennessä. [87] Jo luvitettujen ja tariffijärjestelmään päässeiden laitosten lienee kannattavaa valmistua ajoissa.

Suomen sähkösaanti on vahvasti riippuvaista tuonnista. Eniten käytössä ovat Ruotsiin suuntautuvat siirtojohdot, joiden kautta ollaan yhteydessä myös Norjan vesivoimavaroitoin ja Tanskan tuulikapasiteettiin. Normaalitilanteessa Ruotsi ja Norja ovat yliomavaraisia sähkön suhteen. [88] Ruotsin yhteyksien suurin kaupallinen siirtopotentiaali on yhteensä 2700 MW. Lisäksi käytössä on 1016 MW:n siirtoyhteys Viroon ja 1300 MW:n yhteys Venäjälle, joista varsinkin Venäjän yhteys on hieman vähemmällä käytöllä erilaisen sähkömarkkinajärjestelmän ja integraation puutteen vuoksi. Viron kaapelin liikenne on molemminpuolista hintatilanteesta riippuen. Vuoteen 2025 mennessä valmistuu Pohjois-Suomen ja -Ruotsin välille uusi siirtoyhteys. Tämä kasvattaa Suomen ja Ruotsin välistä siirtokapasiteettia 800 MW:lla. Lisäksi suunnitteilla on olemassa olevan eteläisen siirtoyhteyden korvaaminen uudella, jolloin myös siirtokapasiteetti lisääntyisi 300 MW:lla. Jälkimmäisen olisi tosin tarkoitus valmistua vasta 2020-luvun loppupuolella, joten se ei kuulu tämän työn aikaikkunaan. [89] Vuonna 2025 valmistuva siirtoyhteys yhdessä ydinvoimaloiden kanssa tulee todennäköisesti laskemaan sähkön hintaa Suomessa ja toisaalta voi poistaa markkinoilta kalliimpaa kapasiteettia. Nykyisellään Suomen aluehinta irtaantuu usein Nordpoolin systeemihinnasta, mikä tarkoittaa käytännössä siirtoyhteyksien loppumista kesken.

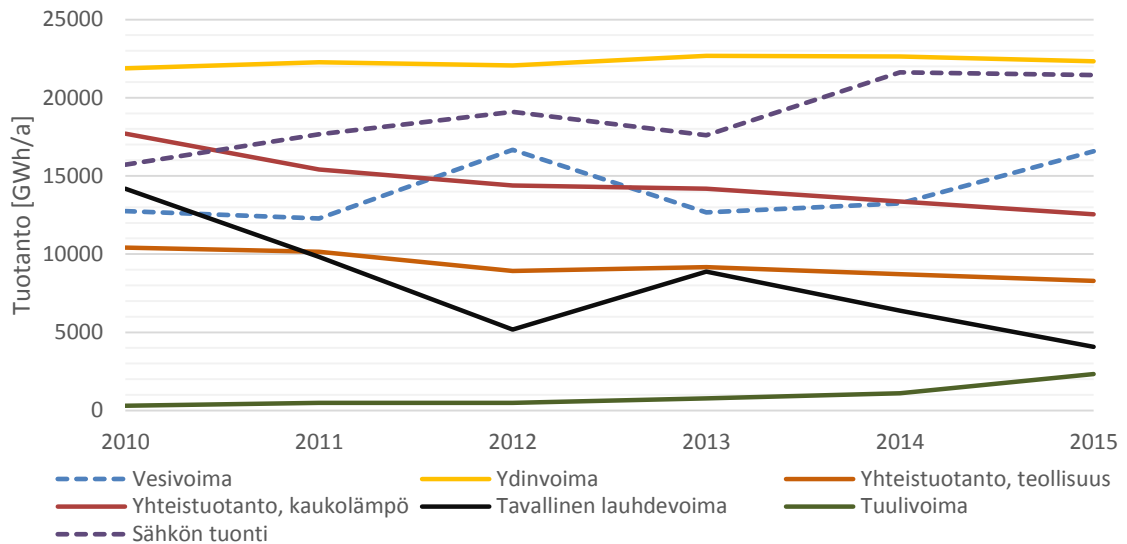
Suomen kuullessa pohjoismaiseen sähkömarkkinaan myös muiden maiden siirtoyhteydet vaikuttavat Suomen sähkön hintaan. Tällä hetkellä rakenteilla on yhteensä 3900 MW ja suunnitteilla 4100 MW siirtoyhteyksiä Skandinaviasta muualle Eurooppaan, pääasiassa Saksaan ja Iso-Britanniaan. Tämä on osa eurooppalaista yhdentymiskehitystä ja auttaa tasapainottamaan tuuli- ja aurinkovoiman lisäämää heiluntaa sähkömarkkinoilla. [90] Toisaalta nämä yhteydet lisäävät kilpailua samasta edullisesta Norjan ja Ruotsin sähköstä, josta Suomikin on saanut viime vuodet nauttia. Yhteydet tulevat todennäköisesti nostamaan koko pohjoismaisen sähkömarkkinan systeemihintaa, etenkin tilanteissa jolloin

mantereen puolella ei tuule tai paista. Toisaalta sähkön hinta voi myös painua uusiin pohjalukemiin silloin, kun sääolosuhteet suosivat koko pohjoisempaa Eurooppaa. Lisäksi yhteydet tarjoavat pääsyn suurempaan varavoimakapasiteettiin, jolloin niin laajan oman kapasiteetin ylläpitäminen ei välttämättä ole kannattavaa. [88]

Vuoden 2025 sähkömarkkinatilanteen suurin epävarmuustekijä lienee Hanhikivi I -ydinvoimalan valmistuminen. Epävarmuutta voidaan perustella Olkiluoto 3 -projektin viivästyksellä liki kymmenellä vuodella. Epävarmuuden vaikutusta lisää ydinvoimalan suuri koko ja vaikutus sähkömarkkinaan, sillä Hanhikiven valmistuessa ennen Loviisan laitosten sulkemista ydinvoimalla tuotettaisiin normaalitilanteessa yli puolet Suomen sähkötarpeesta. Lisäksi vaikuttaa siltä, että tuulivoimatuotanto tulee kaikkialla pohjoismaissa lisääntymään jopa suhteessa enemmän kuin mitä Suomessa. Markkinoilla tulee siis olemaan todella paljon päästötöntä tarjontaa kokonaiskulutukseen nähden, ellei sähkön tarve kasva huomattavasti. Tämän vuoksi onkin syytä miettiä, onko tällaisessa tilanteessa markkinoilla ollenkaan tilaa perinteiselle lämpövoimalle eli lauhde- ja CHP-voimalaitoksille. Lisäksi tuulivoiman suuri lävistävyys luo todennäköisesti lisää heiluntaa sähkön hintaan.

Tuhansilla megawateilla lisääntyvä säätökyvytön sähköntuotanto tuuli- ja ydinvoiman muodossa saattaa syrjäyttää joitakin sähköntuotantomuotoja markkinoilta kannattamattomina. Uusien ydinvoimalaitosten vähentäessä kuormaa täydellä teholla käytössä olevilta Ruotsin siirtojohtoilta vapautuu Ruotsin ja Norjan vesivoimakapasiteettia käytettäväksi edullisena säätösähkönä. Lauhdetuotanto onkin jo ajettu alas Meri-Porin hiilivoimalaa ja joidenkin voimalaitosten varalla olevia lauhdeperiä lukuunottamatta. Alhainen sähkön hinta alkaa heijastua myös CHP-tuotantoon, sillä eräissä kaupungeissa on päätetty korvata CHP:tä pelkästään lämpöä tuottavilla kattiloilla vanhojen tullessa käyttöikänsä päähän. Polttoaineesta riippumatta CHP:n kannattavuus kärsii sähkön hinnan laskiessa, eikä siitä ole lämmöntarpeen mukaan ajettavana niin paljoa hyötyä huippukulutuksen tasajana. Tuulivoima on nykyisessä tuki- ja hintaympäristössä ainut houkutteleva investointikohde sähköntuotannossa. Lämmöntuotannossakin erillistuotanto biopolttoaineilla muodostuu kannattavammaksi edellä kerrotuista syistä. [34]

Edellä kuvattua kehitystä on havainnollistettu kuvassa 23. Kuvasta nähdään, että perinteisten lämpövoimamuotojen eli teollisuuden ja yhdyskuntien yhteistuotannon sekä lauhdevoimatuotantomäärät ovat vähentyneet melko tasaisesti koko tarkastelujakson ajan. Sen sijaan pääasiassa tuonti, ja lisäksi myös tuulivoimatuotanto ovat lisääntyneet.



Kuva 23. Eri sähköntuotantomuotojen vuosituotantoja Suomessa vuosina 2010–2015 [1]

Kehitystä voitaneen hillitä erilaisilla tukijärjestelyillä, kuten tällä hetkellä käytössä olevilla hakesähkön tuella ja CHP-leikkurilla. Nykyisessä ympäristössä hakesähkön tuki tekee metsähakkeeseen perustuvasta CHP-tuotannosta ylivoimaisen tuotantomuodon muihin CHP-polttoaineisiin verrattuna. CHP-leikkuri on silti ylläpitänyt myös muita polttoaineita kohtuullisina vaihtoehtoina bio-erillislämmölle.

Lämpövoiman alasajoon johtava kehitys alkaa olemaan uhka hintojen lisäksi myös sähkötehon riittävyydelle. Pöyryn selvityksen mukaan Suomen sähköntuotantokapasiteetti ei tule tulevaisuudessa riittämään kylmän talven huippukulutustilanteessa missään todennäköiseksi arvioituissa tulevaisuuden markkinaympäristöissä. Suomi tulee olemaan tulevaisuudessa yhä enemmän riippuvainen naapurivaltioiden tuonnista. [88] Sähköistymisen seurauksena sähkönkulutuksen kylmien talvien kovimmat piikit tulevat olemaan entistä suurempia suhteessa peruskulutukseen. Tämä johtuu enimmäkseen teollisuuden ulkopuolisesta kulutuksesta, joka muodostuu esimerkiksi lisääntyneistä lämpöpumpuista ja vain kylmimpinä aikoina päälle kytkettävistä sähköisistä lisälämmittimistä. Kehitys tulee vielä voimistumaan, sillä pääasiassa maa- ja ilmalämpöpumppujen sekä sähköautoilun yleistymisen uskotaan kasvattavan huipunaikaisen tehon tarvetta jopa tuhansilla megawateilla lähivuosikymmeninä. [91]

Huoli sähkötehon riittävyydestä sekä huippukulutustilanteissa että tuotannon vaihdellessa rajusti on tuottanut monia kannanottoja järjestelmän kehittämiseksi. Esimerkiksi Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid ehdottaa tasesähköjärjestelmän kehittämistä siten, että niukuustilanteissa säätösähkön hinta vastaisi paremmin todellisia tehovajauksen kustannuksia. Käytännössä tämä tarkoittaisi säätösähkön hinnan nousua, mikä voisi edesauttaa myös markkinaehtoista toimintaa järjestelmän tasapainottamiseksi. [82] Maanlaajuisen sähkökatkon hinnaksi on arvioitu noin 100 miljoonaa euroa tunnilta. Huoltovarmuusk-

kuksen, energiaviraston ja työ- ja elinkeinoministeriön tilaaman toisen selvityksen mukaan kustannustehokkaimpia keinoja sähkön saatavuuden takaamiseksi olisivat vanhojen poistumassa olevien ja jo poistuneiden laitosten ylläpitäminen toimintakuntoisina ja ympäristökriteerit täyttävinä sekä käytettyjen tai käyttämättä jääneiden kaasuturbiinien- ja moottorien hankkiminen. Kummassakin tapauksissa kaasu- tai öljykäyttöisyys nähdään kannattavimpana vaihtoehtona, sillä ne sitovat vähiten pääomaa, työvoimaa ja huollettavaa laitteistoa vähän käytettävään voimalaan. Käytännössä kaasuturbiineja ja -moottoreita voidaan käyttää täysin etäohjauksella. [34]

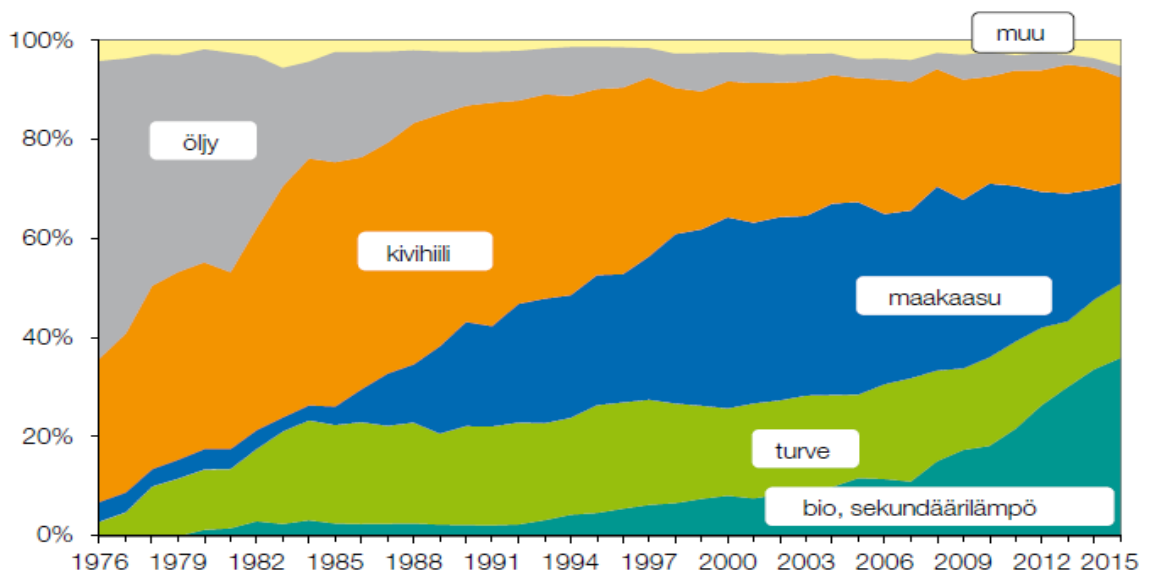
Sähkön hinta on merkittävä muuttuja, sillä se vaikuttaa kaikista yhteistuotantomuodoista eniten juuri maakaasu-CHP:n kilpailukykyyn, mikä ilmeni luvussa 3.1.3 ja liitteessä B esitetyissä laskelmissa. Se johtuu kaasukombin korkeasta rakennusasteesta, minkä vuoksi maakaasu tuottaa paljon sähköä myös silloin, kun sille ei olisi tarvetta. Tällöin myös tuotetaan vähemmän yhteistuotannon verohelpotuksen alaista lämpöä.

Teollisuusprosessien osalta selvästi halpeneva sähkön hinta voi lisätä sähkökäyttäjien houkuttelevuutta sellaisissa kohteissa, joissa se on teknisesti mahdollista. Jos oletetaan, että sähköä ja kaasumaisia polttoaineita käytettäessä hyötysuhteet olisivat suunnilleen samaa luokkaa, voidaan näiden kilpailukykyä verrata suoraan hinnan kautta. Maakaasun veroton hinta siirtoineen on ollut aikavälillä 3/2016 – 3/2017 keskiarvella tasaisesti kaasua käyttävälle asiakkaalle keskimäärin 23,40 €/MWh, mikä tekee veroineen 42,014 €/MWh. [92] Kun, huomiodaan että esimerkiksi metalli- ja mineraaliteollisuuden keskimääräinen energiaveron palautus on ollut 51,4 % [20], saadaan todelliseksi verollisen maakaasun hinnaksi metalliteollisuudessa noin 32,45 €/MWh. Suomalaisen suuren teollisuusasiakkaan sähkön hankintakustannukseksi vuonna 2015 veroineen ja palautuksineen on arvioitu noin 38 €/MWh. [93] Kun ottaa huomioon, että vuonna 2015 sähkön keskimääräinen markkinahinta oli Suomessa noin 30 €/MWh [84], voitaneen olettaa että suurella teollisuuskäyttäjällä sähkön siirto ja verot maksavat noin 8 €/MWh. Tästä voidaan laskea, että sähköenergia tulee verollisen maakaasuenergian kanssa samanhintaiseksi, jos sen keskimääräinen markkinahinta laskee 23 €/MWh:iin. Verottomissa käyttökohteissa sähkön hinnan pitäisi olla jo alle 16 €/MWh.

Laskelman perusteella maakaasu on verottomissa käyttökohteissa toistaiseksi kilpailukykyistä. Sähkön hinta alittaa hetkellisesti verollisen ja harvemmin myös verottoman käytön rajan ajoittain nykyisessäkin ympäristössä, mutta toisaalta se myös ajoittain nousee moninkertaiseksi. Tällainen voi kannustaa asentamaan rinnakkaisia järjestelmiä sellaisissa kohteissa, joissa se on teknistaloudellisesti järkevää ja mahdollista. Tällainen hintasuhteiden mukaan tapahtuva optimointi vähentäisi tietenkin alkuperäisen polttoaineen eli tässä tapauksessa maakaasun kulutusta poikkeuksetta, vaikka sähkön hinta olisikin voimakkaasti vaihteleva.

4.2.2 Kaukolämpö

Kaukolämmön ja yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon polttoaineena on käytetty perinteisesti öljyä, hiiltä, maakaasua, turvetta, puupolttoaineita ja erinäistä sekundäärilämpöä. Kaukolämpö kaupunkien ja pienempien taajamien lämmitysmuotona alkoi yleistyä 60- ja 70-luvuilla. Alun perin valtaosa kaukolämpöjärjestelmistä toimi öljyllä, josta siirryttiin isommissa yksiköissä hiileen 70-luvun öljykriisien seurauksena. Kotimaisella turpeella oli myös osuutensa. Maakaasua käytettiin sen alkutaipaleella vain Lappeenrannassa, mutta 80-luvun putkistolaajennukset toivat sillekin merkittävän aseman suurissa kaupungeissa [5]. Polttoaineiden käyttö suomalaisessa kaukolämmön tuotannossa vuodesta 1976 alkaen on esitetty kuvassa 24. Maakaasun huippuaikaa oli 2000-luvun vaihe ja alku, jolloin jopa 40 % kaukolämmöstä tuotettiin maakaasulla. Tämän jälkeen biopolttoaineiden ja sekundäärilämmön käyttö on kasvanut voimakkaasti, enimmäkseen kalliin maakaasun kustannuksella. Myös öljyn käyttö on taantunut jo vuosia sitten pelkäsi huipukuormien leikkaajaksi. Kivihiilen kulutus on sen sijaan laskenut huomattavasti hitaammin tai jopa pysynyt vakiona 2000-luvulla. Kuvan trendejä analysoimalla voisi edellä kuvatun kehityksen ajatella myös jatkuvan.



Kuva 24. Kaukolämmön ja sen kanssa yhteistuotetun sähkön tuotantoon käytetyt polttoaineet Suomessa [67]

Kuten jo aiemmin on ilmennyt, lämmön ja sähkön tuotanto on Suomessa vahvasti kytkeytynyttä toisiinsa. Sähkön hinta vaikuttaa CHP-tuotannon kannattavuuden kautta tietenkin myös kaukolämmön tuotannon rakenteeseen. Polttoaineesta riippumatta CHP:n kannattavuus kärsii sähkön hinnan laskiessa. Etenkin maakaasu-CHP:n kannattavuus heikkenee sen korkeamman rakennusasteen vuoksi. Toisaalta sähkön hinnan noustessa riittävän korkeaksi kannattaisi kaikki lämpö tuottaa kombivoimalassa, jolloin sähköstä saatava hinta kattaisi suuren osan lämmöntuotannon kustannuksista.

Kun sähkön hinta laskee riittävän alas, muuttuu sähköntuotanto rasitteeksi. Kun mietitään korvaavia investointeja epävarmassa poliittisessa ja taloudellisessa ympäristössä, saattaa selvästi edullisempi ja takaisinmaksuajaltaan lyhempi investointi erillislämmöntuotantoon muuttua houkuttelevammaksi kuin CHP-voimalaitos. Erillislämmöntuotannosta tekee edullisempaa usein pienempi kokoluokka sekä höyrypiirin puuttumisesta johtuva alempi painetaso ja yksinkertaisuus. Esimerkiksi turbiinia ei tällöin tietenkään tarvita. Haittapuolena voidaan mainita täysi polttoaineerotus, joka on noin 55 % yhdistetyn tuotannon lämmön osuutta korkeampi. CHP-tuotantoa pidetään silti sen energiatehokkuuden vuoksi suositeltavana lämmöntuotantomenetelmänä [22], minkä vuoksi sen tukeminen voidaan nähdä tarpeellisena. Nykyisin CHP:n kannattavuuteen vaikuttavia tukijärjestelmiä ovat esimerkiksi niin sanottu CHP-leikkuri ja hakesähkön tuki.

Edellä kuvattu kehitys on näkynyt jo investoinneissa, sillä eräissä kaupungeissa on päätetty korvata CHP-tuotantoa pelkästään lämpöä tuottavilla kattiloilla vanhojen tullessa käyttöikänsä päähän. Toisaalta tällainen lisää yleisesti lämpökattiloiden käyttöä kaukolämmön tuotannossa ja mahdollisesti sitä kautta myös maakaasun käyttöä jonkin verran, vaikkei asetelma varsinaisesti parannakaan sen kilpailukykyä. Kiristyvät päästörajoitukset tulevat todennäköisesti rajoittamaan perinteisesti käytetyn rikkipitoisen raskaan polttoöljyn käyttöä.

Pysyvästi halpeneva sähkö voi houkuttaa siirtymään erilaisiin lämpöpumppuratkaisuihin. Tämä koskee sekä kotitalouksien maa- ja ilmalämpöpumppuratkaisuja että kaukolämpöyhtiöitä ja megawattikokoluokan lämpöpumppuja. Isoista pumpuista on jo ainakin osana palettia hyviä kokemuksia esimerkiksi Helsingissä. Tällöin CHP-tuotantoa ei korvattaisikaan polttamalla tuotetulla erillislämmöllä, joten myöskään maakaasun kulutus ei lisääntyisi. Toistaiseksi isot lämpöpumput ovat kuitenkin suhteellisen kalliita, ja niiden kannattavalle toiminnalle on useita edellytyksiä, kuten ilmainen pysyvä ylijäämälämmönlähde ja lämpöakku kaukolämpöjärjestelmässä. Toisaalta nämä ehdot voivat keventyä, jos sähkö halpenee edelleen merkittävästi. [32] Tällaista kehitystä voinee hidastaa nimenomaan lämmön kulutushuippuihin painottuva sähkön huippukulutus, mikä luonnollisesti nostaa sähkön ja sitä kautta tuotetun lämmön hintaa. Lämpöpumppujen yleistyminen voidaankin nähdä huoltovarmuuden suhteen ongelmallisena, sillä ne sekä lisäävät sähkönkulutusta että vähentävät sähköomavaraisuudessa merkittävän CHP-tuotannon tarvetta [19].

Kaukolämmön käyttöön yleisesti vaikuttavia trendejä ovat kaupungistuminen, energiatehokkuuden parantuminen ja älykkäät energiajärjestelmät. Toisaalta kaupungistuminen lisää kaukolämmön piirissä olevan asutuksen osuutta ja tätä kautta lämmitystarvetta, mutta toisaalta koko ajan parantuva energiatehokkuus vähentää sitä. Lisäksi älykkäät energiajärjestelmät ja mahdollisesti avautuvat kaukolämpömarkkinat ovat oma mutta kokonaisuuden kannalta pienempi muuttujansa. Todennäköisesti ne lopulta vähentävät keskitetyn erillis- ja yhteistuotannon tarvetta.

Kaukolämmitettyjen rakennusten energiaiindeksi eli kulutettu lämpöenergia vuodessa pinta-alaa tai tilavuutta kohden on laskenut Suomessa noin 50 % vuodesta 1970 lähtien ja viimeisen kymmenen vuoden aikanakin yli 10 %. Energiatehokkuus on parantunut siis viime vuosina jopa prosenttiyksiköllä vuodessa. Kuitenkin myös kaukolämmön lämpötilakorjattu kulutus on kasvanut varsin tasaisesti, 2010-luvulla keskimäärin 0,5 TWh vuodessa. [94] Viimeisten 25 vuoden aikana suurinten kaupunkiseutujen osuus maan väestöstä on kasvanut noin 0,15 prosenttiyksikköä vuodessa. VTT:n arvion mukaan vuoteen 2040 mennessä Suomeen tulee rakentaa noin 700 000 uutta asuntoa, keskimäärin 27 000 vuodessa, joista noin 90 % suurimpiin kaupunkeihin ja siten todennäköisesti myös kaukolämmön piiriin. [95] Kaukolämmön kulutus tulee siis todennäköisesti jatkamaan kasvuaan. Trendin mukaan tämä kasvu olisi n. 5 TWh vuoteen 2025 mennessä.

Uudet energijärjestelmät voisivat kaukolämmön osalta tarkoittaa jonkinlaista kysyntäjoustoa, joskin sen merkitys lienee pienempi kuin sähkömarkkinoilla. Toinen kiinnostuksen kohteena ollut malli on kaksisuuntainen kaukolämpöverkko, jossa myös asiakkaat voivat tuottaa lämpöä verkkoon esimerkiksi omilla maalämpöpumpuillaan. Tällöin pien-tuotanto tapahtuisi todennäköisesti pääasiassa kevään ja syksyn välillä kun esimerkiksi aurinkokeräimillä ja pienemmän kokoluokan pumpuilla voidaan tuottaa ylijäämälämpöä. Tämä voi voimistaa valitusta mallista riippuen kausivaihtelua. Tällöin talviaikainen huipputehon määrä kasvaa suhteessa kaukolämmön peruskuormaan, mikä heikentää isompien CHP-laitosten kannattavuutta takaisinmaksuajan pidetessä. Malli voi olla kaukolämpöyhtiölle ongelmallinen, jos se joutuu ottamaan esimerkiksi kesällä tuotettua lämpöä vastaan jopa ylimäärin mutta on silti lopulta yksin vastuussa lämmön toimituksesta asiakkaille myös talven kylmimpinä pakkasina. [96] Tällaisissa tapauksissa nopeasti säädettävän maakaasulämmön houkuttelevuus voisi lisääntyä samaan tapaan kuin sähkömarkkinoilla.

4.2.3 Kaasumarkkinat

Kaasumarkkinoilla on tapahtumassa useita merkittäviä muutoksia tämän työn tarkastelujakson aikana. Jo tapahtumassa oleva muutos on LNG:n tulo Suomen energiamarkkinoille. Suomen maakaasumarkkina on avautumassa vuonna 2020. Samaan aikaan myös Balticconnectorin eli Suomen ja Viron sekä sitä kautta koko Baltian maakaasuverkot yhdistävän putken olisi tarkoitus valmistua. Lisäksi arviolta vuonna 2021 Baltian kaasuverkko on tarkoitus yhdistää Puolan kautta Euroopan laajuiseen kaasuverkkoon. [10]

Rakennettavat LNG-terminaalit ja lisääntyvä liuskekaasun tuotanto voivat lisätä maakaasun tarjontaa ja saatavuutta. Tässä työssä tutkitaan vain maakaasuverkon alueella käytettävää kaasua, johon LNG voi vaikuttaa tulevaisuudessa lähinnä turvaamalla kaasun saatavuutta ja suurimpia hintavaihteluita.

Kaasumarkkinan avautuminen vapauttaa kilpailun sekä vähentää tukkumyyntiin kohdistuvaa sääntelyä. Vapaan kilpailun voisi ajatella alentavan hintoja, mutta tämän edellytyksenä on toimivan ja tehokkaan markkinan muodostuminen. Riskinä voi alkuvaiheessa olla uusien toimijoiden puuttuminen ja siitä johtuva nykyisen toimijan monopolin jatkuminen vähäisemmällä sääntelyllä, mikä voi johtaa kaasun käyttäjän kannalta heikompaan tilanteeseen. Toisaalta markkinoiden avaaminen nimenomaan mahdollistaa todellisen kilpailun syntymisen, minkä pidemmän päälle pitäisi laskea kaasun hintaa. [10] Huomioitavaa on, että kaasu on jo nyt kilpailluilla energiamarkkinoilla, sillä sille on riittävästi vaihtoehtoja, jotka pitänevät hintatason jatkossa kilpailukykyisenä.

Baltian markkina-alueen integroituminen voi auttaa toimivan markkinan muodostumisessa. Toisaalta se riippuu integroitumisen luonteesta eli siitä, muodostuuko tehokasta markkina-alueen lopullista EU:n laajuiseen markkina-alueeseen liittymistä. Yhteinen markkina-alue voisi tehostaa kaupankäyntiä ja hinnanmuodostusta sekä lisätä kustannusten jakajien määrää, mikä voisi mahdollisesti laskea maakaasun hintaa. Lisäksi markkinan vapautumiseen liittyvä sääntelyn purkaminen voi uusien ja joustavien hinnoittelumallien vuoksi lisätä maakaasun käytettävyyttä erilaisissa kohteissa. Esimerkiksi pitkiin toimitussojmuksiin perustuvasta öljypohjaisesta hinnoittelusta luopuminen ja siirtyminen lähemmäs Eurooppalaisten kaasupörssien gas-on-gas-hinnoittelua voisi muuttaa merkittävästi polttoaineiden hintasuhteita. Baltiassa sijaitsevat putkeen kytketyt LNG-terminaali ja suuri kaasuvaramo tuovat vaihtoehtoisina hankintalähteinä toimitusvarmuuden lisäksi myös oman muuttujansa kaasun hintaan ja mahdollistavat esimerkiksi hinnan kausivaihtelulla spekuloinnin. [10]

Liityttäessä Euroopan kaasumarkkinoihin GIPL-putkella vaikutukset olisivat samankaltaisia mutta suurempia. GIPL-putki toisi myös läntisen Euroopan ja Pohjois-Afrikan kaasuvaramot saataville, jolloin riippuvuus Venäjältä tuotavasta kaasusta loppuisi. Vaikka vaihtoehtoisten lähteiden kaasu olisikin kalliimpaa, toisi se kuitenkin tarvittavaa painetta hinnoitteluun. Viimeistään tässä vaiheessa markkinan pitäisi tehostua ja hinnoittelun siirtyä kohti Euroopan kaasuhubien gas-on-gas-hinnoittelua.

Tällaisten kaasupörssien markkinahinnat ovat olleet huomattavasti Suomen maakaasun hintaa vaihtelevampia, ja esimerkiksi hintamuutoksia vastaan suojaautuminen lienee jatkossa järkevää. Vaihtelun lisääntyminen johtuu markkinamuotoisen kaupankäynnin suuremmista kausivaihteluista, erilaisten epävarmuustekijöiden heijastumisesta markkinoille sekä siitä, että kaasun hinta on Suomessa sidottu öljyn ja hiilen pitkän aikavälin keskiarvoon eikä niinkään kaasun kysyntään ja tarjontaan. Euroopan likvidein eli markkinaltaan tehokkain kaasuhubi on Hollannissa sijaitseva TTF. Tämän tai toisen tehokkaan hubin, brittien NBP:n, hintatasoa voidaan pitää eurooppalaisena maakaasun hintatasona. Yleisesti Euroopan hubien hinnat ovat olleet edullisempia kuin Suomen hinnat. Luultavasti viimeistään Euroopan verkkoon tapahtuvan integraation jälkeen tämä hintataso määrittäisi myös Suomen hintatasoa.

Kuvassa 25 on esitetty TTF:n ja Suomen kaasunenergiainhinnat sekä vertailun vuoksi öljyn maailmanmarkkinahinta lokakuusta 2013 alkaen. Hintatasot eivät ole suoraan verrattavissa, sillä Suomen hintana käytetään hankintahinnan salaisuuden vuoksi Gasumin myymän maakaasuenergian hintaa. Kuvasta nähdään, että TTF:n hintataso on liki koko vertailuajaltaan matalampi tai yhtä suuri kuin Suomen hintataso. Lisäksi voidaan huomata, että Suomen hinta seuraa hieman tarkemmin öljyn maailmanmarkkinahinnan suuntaa, joskin usean kuukauden keskiarvon käyttäminen tasaa terävimpiä piikkejä. Toisaalta jonkinlaista korrelaatiota voi olla havaittavissa myös TTF-hinnassa. Kuvassa olevat hinnat on ilmoitettu energiana, eli ne eivät sisällä siirtokustannuksia. Tämä täytyy huomioida Eurooppaan integroidun verkon hintoja spekuloidessa, sillä siirto Euroopasta maksaa lisää vielä kotimaan siirtohinnan päälle. Toisaalta Euroopan verkossa liikenne on niin suurta, että siirtomaksut lienevät enempien jakajien vuoksi pienemmät.



Kuva 25. Kaasuenergian hinta Suomessa ja Hollannin TTF-hubissa sekä Brent-laatuisten raakaöljyn maailmanmarkkinahinta. [92] [97] [98]

Kaasumarkkinoilla tapahtuvat muutokset vaikuttavat työn tekohetkellä suhteellisen varmoilta. Muutokset kaasun kilpailukykyyn lienevät kuitenkin pieniä, vaikka hintakilpailukyky hieman paraniskin. Näiden syiden vuoksi maakaasumarkkinat eivät ole merkittävä muuttuja lopullisissa skenaarioissa.

4.2.4 Muiden polttoaineiden markkinat

Öljyllä on maailman aktiivisimmat ja suurimmat markkinat sekä volyyमितään että arvoltaan. Öljyn hinta on sama ympäri maailmaa, joskin eri viitelatujen hinnat vaihtelevat.

Euroopassa käytetään Brent-viitelaatua. Öljyn hinta riippuu monesta tekijästä, ja sen ennustaminen on hyvin vaikeaa. Esimerkiksi yleinen taloustilanne vaikuttaa hintaan, mutta toisaalta myös öljyn hinta vaikuttaa taloustilanteeseen. Edullinen öljy kiihdyttää kasvua öljystä riippuvaisissa länsimaissa, kun taas esimerkiksi Venäjän talous kärsii myyntitulojen pudotessa. [99] Toisaalta esimerkiksi Yhdysvaltojen suurimmat lamat ovat tapahtuneet aikoina, joina öljyn hinta on ollut korkealla. Toinen suuri tekijä on merkittävien öljyntuottajien kartelli OPEC, joka pyrkii tuotannonrajoituksilla pitämään öljyn hinnan mahdollisimman korkeana omien tulojensa maksimoimiseksi. OPEC:n jäsenet ovat Lähi-idän, Afrikan ja Etelä-Amerikan valtioita. Lähi-idän valtioilla on hallussaan merkittävä osa maailman öljyreserveistä, minkä vuoksi myös alueen levottomuus ja konfliktit vaikuttavat ajoittain öljyn hintatasoon. Lisäksi joidenkin tutkijoiden mukaan öljymarkkinoilla lisääntynyt spekulointi eli kaupankäynti johdannaisilla on edesauttanut viime vuosien voimakasta hinnan vaihtelua. [100] [101] Öljyn hinnalla on ainakin toistaiseksi suuri vaikutus myös maakaasun hintaan, sillä se on perinteisesti ollut sidottu öljyyn.

Kaupankäynti hiilellä on suurimmaksi osaksi kahdenvälisiin toimitussopimuksiin perustuvaa ja siten tasaisempaa. Viime aikoina kuitenkin myös reaaliaikainen spot-kaupankäynti on lisääntynyt. Hiilen hinta seuraa maakaasun hintaa, sillä nämä ovat usein kilpailuvia sähköntuotannon polttoaineita. Tämän vuoksi hiilen markkinahinta seurailee myös öljyn hintaa, joskin huomattavasti pienemmin muutoksin. [100]

Polttoaineiden hinnat ovat hankalasti ennustettavia ja toisistaan riippuvaisia. Siksi hintamuutoksilla ei spekuloida skenaarioita muodostettaessa, vaan oletetaan hintasuhteiden pysyvän suunnilleen nykyisiä vastaavina.

4.3 Talous ja teollisuustuotanto

Taloudellisen tilanteen vaikutus energian käyttöön on merkittävä, mikä on nähtävissä konkreettisesti polttoaineiden hinnoissa sekä suoraan energian kulutuksessa. Tämä heijastuu esimerkiksi päästökauppaan aiemmin käsiteltynä toimimattomuutena vuoden 2008 taluskriisin jälkeen. Talous vaikuttaa tietenkin suoraan teollisuustuotantoon ja sitä kautta etenkin energiantensiivisessä teollisuudessa sen energian käyttöön. Tämä näkyy hyvin Suomessa, jossa teollisuus on luonteeltaan energiantensiivistä. Lisäksi talousnäkökulmät vaikuttavat pitemmällä aikavälillä suuresti investointihalukkuuteen, mikä vaikuttaa uusien ratkaisujen käyttöönottoon. Toisaalta lisääntyvä kulutus ja tuotanto vaikuttavat myös energiahyödykkeiden, kuten sähkön ja polttoaineiden, markkinahintoihin, mikä muuttaa eri polttoaineiden välisiä kilpailukyky-suhteita. Erityisesti öljyn hinnalla on ollut voimakas vaikutus yleiseen talouskehitykseen ja toisaalta myös toisin päin. Maakaasunkin hinta on Suomessa edelleen sidottu osittain öljyn hintaan, joskin pidemmän ajan keskiarvona, mikä tasaa hieman öljyn hinnalle tyypillistä heiluntaa. Valtiovarainministeriön ennusteen mukaan myös maailmantalous on työn kirjoitushetkellä ja tulevina vuosina kovassa nousussa [102]. Myös Suomen bruttokansantuote on kääntynyt vuosien tauon jälkeen maltilliseen mutta kiihtyvään kasvuun.

Suomalaisten metallinjalostajien mukaan alan tuotantomäärät ja energiankulutus tulevat pysymään Suomessa nykyisellä tasolla ainakin vuoteen 2030, joskaan pörssiyhtiöt eivät ole voineet spekuloida mahdollisilla investoinneilla. Työ- ja elinkeinoministeriön arvion mukaan terästeollisuudella ei todennäköisesti ole edellytyksiä lisätä kapasiteettia Suomessa. Mahdolliset investoinnit keskittynevät lähinnä kilpailukyvyn parantamiseen ja erikoistumiseen. Värimetallialan investoinnit nähdään sen sijaan todennäköisempinä, joskin tällaisia tehtaita ei maakaasuverkon alueella ole. [103]

Luonnonvarakeskuksen markkinakatsauksen mukaan metsäteollisuuden markkinanäkymät ovat työn kirjoitushetkellä positiiviset. Markkinasellun, kartongin ja erikoispapereiden osalta tulevaisuus vaikuttaa valoisalta, kun taas tavallisen paperin suhteen pitkään jatkunut kulutuksen vähentyminen tulee jatkumaan. Kartongin kysyntä tulee kasvamaan voimakkaimmin verkkokaupan ja elintarvikepakkausten lisääntymisen vuoksi. Suomessa onkin viime vuosina investoitu kartongin tuotantoon keskittyen paremman jalostusarvon kuluttajapakkaus- ja elintarvikekartonkeihin. Kartongin osuus on jo nyt noin kolmannes koko massa- ja paperiteollisuuden viennin arvosta. Pehmopaperin käytön lisääntyminen kehittyvissä maissa näkyy puolestaan markkinasellun kysynnän kasvamisena. [104]

Vaikka taloustilanteen ja teollisuustuotannon merkitystä ei voikaan kiistää, maailmantalouden, Suomen kansantalouden tai teollisuudenalojen talousnäköymien tarkastelu lienee kuitenkin niin laaja alue, ettei sillä ole tämän työn laajuudessa järkevää spekuloida. Tämän muuttujan vakioiminen skenaarioissa lienee työn rajauksessa pysymiseksi perusteltua. Joissakin skenaarioissa Suomen kansantalous liittyy olennaisesti kuvattuun tapahtumaketjuun, tosin enemmänkin seurauksena kuin syynä muutoksille.

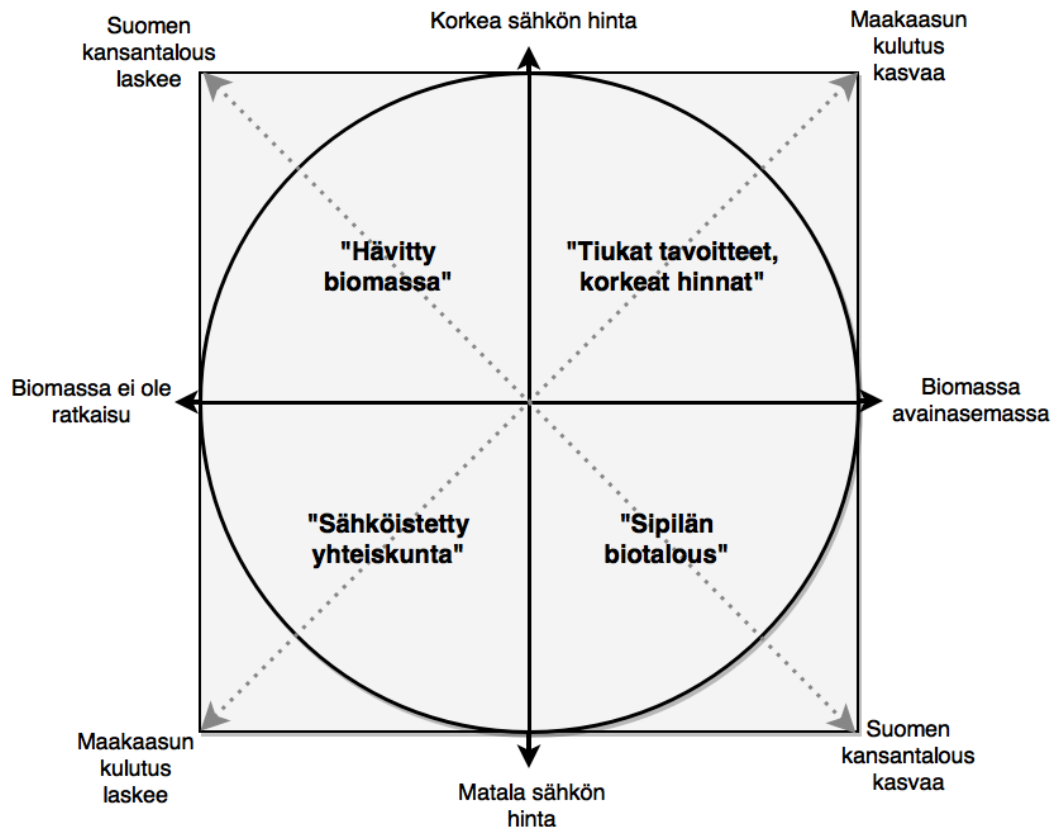
5. SKENAARIOTYÖSKENTELYN TULOKSET

Skenaariomenetelmän mukainen työskentelymalli esitettiin ensimmäisessä luvussa. Tärkeimmät muuttujat valikoituivat maakaasun käyttökohteiden teknisen arvioinnin ja toimintaympäristön analyysin perusteella.

Energia-alan kannalta ilmastonmuutos on kenties merkittävin tulevaisuutta määrittävä tekijä. Pariisin ilmastopimuksen myötä entisestään tiivistynyt yhteistyö ilmaston hyväksi antanee syyn olettaa, että ilmastonmuutoksen estämiseksi tullaan tulevana vuosina tekemään entistä enemmän töitä kaikissa vaihtoehtoisissa tulevaisuuksissa. Perusteettomista katastrofiskenaarioista ei ole tämän työn tavoitteisiin nähden hyötyä. Sen sijaan on tärkeää pohtia, miten ilmastonmuutoksen torjuminen vaikuttaa Suomen energiankäyttöön ja mitkä ovat erilaisten tulevaisuuksien kannalta kriittisiä tekijöitä.

Tehdyn tutkimuksen perusteella Suomen energiatulevaisuus kietoutuu ainakin suunnitelmissa vahvasti metsäbiomassan käytön ympärille. Biomassan asema ilmastotyössä asettuikin tämän työn skenaariojaottelun toiseksi pääakseliksi. Akselin toisessa päässä biomassassa on merkittävässä asemassa tulevaisuuden energiaratkaisuissa. Akselin toisessa päässä se ei puolestaan ole osa ratkaisua joko parempien vaihtoehtojen tai muuttuneen kestävyysmäärittelyn vuoksi. Toiseksi merkittäväksi muuttujaksi valikoitui sähkön hinta, jolla on vaikutuksia sekä yhdyskuntien että teollisuuden energian käyttöön. Periaatteessa sähkön hinta ei ole samanlainen muuttuja tulevaisuuden kannalta vaan pikemminkin seuraus, mutta tutkimuksen kohteena olleen maakaasun käytön kannalta se on vahvasti kilpailukykyä määrittävä tekijä. Muut tutkitut muuttujat ja trendit esiintyvät myös skenaarioissa, joskaan ne eivät määrittele niitä samalla tavalla kuin edellä esitetyt päämuuttujat. Esimerkiksi ilmansaastepäästöjen rajoittaminen havaittiin merkittäväksi vaikuttajaksi, joskaan sen ympärille ei voitu muodostaa erillisiä skenaarioita.

Toimintaympäristön muutoksia tarkastellessa huomattiin, että jotkin merkittävät muuttujat kannatti arvioida vakioiksi niiden satunnaiselta vaikuttavan luonteen sekä työn laajuuden ja aihepiirin puitteissa. Tällaisia olivat esimerkiksi maailmantalouden tilanne ja polttoaineiden hintasuhteet. Työskentelyn tuloksena saatiin neljä erilaista skenaarioita. Skenaarioita on hieman kärjistetty mielenkiintoisempien ja toisistaan eroavien tapahtumakulujen aikaansaamiseksi. Lopulliset skenaariotyöskentelyn tulokset on esitetty nelikentässä kuvassa 26.



Kuva 26. Valitut skenaariot sekä niiden keskeiset muuttujat ja seuraukset nelikentässä

”Tiukat tavoitteet, korkeat hinnat”-skenaario on perinteinen tehostuneiden ilmastotoimien näkymä, jossa ilmastotavoitteet johtavat tasaisesti kiristyvään hiilidioksidiverotukseen tai päästökauppaan sekä ilmansaasteiden rajoittamiseen. Tämä johtaa lopulta korkeaan hintatasoon sähkömarkkinoilla sekä kalliisiin savukaasujen puhdistuskuluihin likaisemmilla polttoaineilla. Biomassan asema pysyy vahvana, mutta maakaasu saa lisää käyttäjiä kannattamattomaksi muuttuneen hiilen käyttäjästä. Muutoin toimintaympäristö pysyy suhteellisen samanlaisena, ja skenaario muistuttaakin eniten niin sanottua business-usual-skenaariota.

”Sipilän biotalous”-skenaarion perustana on aiemmin esiteltyn Suomen energia- ja ilmastostrategian tavoitteiden toteutuminen ja yleisesti biotaloutta ajava ja omavaraisuuteen tähtäävä ajatusmaailma. Strategia johtaa puubiomassan edelleen kasvavaan käyttöön. Strategiassa siltapolttoaineeksi mainitun maakaasun kannalta tavoitteet öljyn käytön puolittamisesta ja hiilen käytön lopettamisesta ovat kuitenkin edullisia.

”Sähköistetty yhteiskunta”-skenaariossa tuuli- ja ydinvoiman lisääntyminen takaa halvan ja päästöttömän sähkön tarjonnan, eikä perinteiselle lämpövoimalle ole juurikaan tarvetta. Kasvava sähkömarkkinaintegraatio erityisesti pohjoismaissa yhdessä säätöön valjastetun vesivoiman ja älykkäiden verkkojen kanssa johtavat stabiiliin mutta edulliseen sähkömarkkinaan. Kaukolämmön tuotanto ja teollisuusprosessit sähköistyvät. Maakaasulle on tarvetta vain aiempaa enemmän käytettävänä varavoimana.

”Hävitty biomassa”-skenaariossa EU tai jopa korkeampi taho määrittelee metsäbiomassan energiakäytön kestävämmäksi ilmaston kannalta. Tämä johtaa yleiseen alennustilaan biomassan varaan rakennetussa Suomessa. Energiantuotannossa käytetään vanhoja ja jo käytöstä poistettujakin laitoksia. Tuuli- ja aurinkovoimaan panostetaan ainoana hyväksytyinä uusiutuvan energian muotoina. Sähkön hinta nousee alas ajetun tuotannon sekä puun ja turpeen muuttuneen verotuksen ja tukien vuoksi. Maakaasua käytetään jälleen vanhoissa kaasukombeissa.

Seuraavissa alaluvuissa käsitellään nämä skenaariot tarkemmin. Luvussa 6 pohditaan vielä skenaarioiden yhteisiä piirteitä ja yleisiä tulevaisuudennäkymiä.

5.1 ”Tiukat tavoitteet, korkeat hinnat”

Skenaariossa ajavana voimana on kasvava ympäristöajattelu, jolla pyritään ilmastomuutoksen estämisen lisäksi saastumisen tehokkaampaan hillitsemiseen. Näitä pannaan toimeen varsin perinteisin keinoin eli erinäisiä päästöjen hillintämekanismia tiukentamalla. Päämekanismi päästökauppa saadaan viimein toimimaan vuonna 2019 varantojärjestelmän käyttöönoton jälkeen. Lisäksi päästöoikeuksien määrää vähennetään suunniteltua enemmän kasvaneen ilmastopaineen vuoksi. Tämä johtaa kymmenien eurojen hintaiseen hiilidioksiditonniin. Kasvavat ympäristötavoitteet tiukentavat myös ilmansaasteiden päästörajoja kiihtyvällä tahdilla, mikä parantaa puhtaammin palavan maakaasun kilpailukykyä. Kilpailukyky kasvaa jopa biomassaan nähden, etenkin kun turvetta aletaan kohtelemaan verotuksessa kuin muitakin fossiilisia polttoaineita. Tiukkenevat ympäristönormit vaikuttavat myös Hanhikivi I -projektiin, eikä se valmistu tarkasteluvuoteen 2025 mennessä, mikä pitää sähkön hinnan korkeammalla. Lisäksi siirtoyhteydet Pohjoismaista Eurooppaan lisääntyvät integraation nimissä.

Miltei kaikki edellä lueteltu nostaa osaltaan sähkön hintaa. Korkea sähkön hinta tekee CHP-tuotannosta jälleen kannattavaa. Tämä vaikuttaa eniten korkean rakennusasteen kaasukombiin, jolla hoidetaankin isojen kaupunkien lisääntyvä kaukolämmön tarve. Päästörajojen tiukentuminen tekee hiilen polttamisesta entistä vaikeampaa. Päästöoikeuden hinnan noususta johtuva hakesähkön tuen poistuminen ja savukaasujen puhdistamistarve tasoittavat bio-CHP:n kilpailuetua, vaikka se pysyykin vallitsevana peruskuormana. Erillislämpöä ei kannata tuottaa kuin kovimman huippukulutuksen aikaan, jolloin maakaasupaikkakunnilla suositaan kaasua, sillä esimerkiksi bio- tai öljylämpölaitosten savukaasujen käsittely tulisi maksamaan vähäisellä käytöllä liikaa.

Talvella tarvitaan edelleen lauhdevoimaa Fennovoiman viivästymisen ja siirtosähkön vähentyneen saatavuuden vuoksi. Vanhoja kaasukombeja muutetaan lauhdevoimaloiksi, sillä lisäinvestointeja hiileen ei nähdä järkevänä. Kuten luvun 3.3.1 tarkasteluissa havaittiin, kaasulauhe ohittaa kannattavuudessa hiililauhteen hiilidioksidipäästön hinnan ylitäessä 40 €/tCO₂.

Tiukentuvat energiatehokkuus- ja päästövaatimukset pitävät maakaasun kilpailukykyisenä vaihtoehtona teollisuuden prosesseissa. Energiatehokkuus parantuu uusien vaatimusten vuoksi, mikä lopulta vähentää kokonaiskulutusta saturoituneella sektorilla.

Metsäbiomassa on todettu EU-tasolla kestäväksi polttoaineeksi ja biopolttoaineiden raaka-aineeksi. Maankäyttödirektiivit rajoittavat kuitenkin hakkuiden lisäämistä, minkä vuoksi periaatteessa rajallista biomassaa ohjataan energiantuotannon sijaan korkeamman jalostusasteen tuotteisiin. Tällaisia ovat esimerkiksi nestemäiset biopolttoaineet, jotka ovat muuttuneet kannattaviksi, sillä perinteisten liikennepolttoaineiden hinnat ovat nousseet rajusti erinäisten verojen ja liikenteen päästökaupan vuoksi. Tämä lisää vedyn tuotantoa maakaasusta yhdessä enemmän vetykäsittelyä vaativien puhtaampien fossiilisten liikennepolttoaineiden kanssa.

5.2 ”Sipilän biotalous”

Skenaarion ajavana voimana on Sipilän I hallituksen ilmasto- ja energiastrategia, josta myös skenaario on saanut nimensä. Skenaariossa oletetaan näiden tavoitteiden ja muiden biotalousvisioiden toteutuvan. Oleellista toteutumisen kannalta on puubiomassan kestävyuden määrittely, EU:n suhtautuminen biopolttonesteisiin ja poliittisen päätöksenteon jatkuvuus Suomessa.

Tarkasteluajanjakson aikana valmistuvat Olkiluodon ja Hanhikiven ydinvoimalat sekä useat biojalostamot tuottavat edullista ja päästötöntä sähköä yhdessä lisääntyvän tuulivoimatuotannon kanssa. Strategiassa tärkeäksi mainitun omavaraisuuden ylläpitämiseksi puuhun ja turpeeseen perustuvaa CHP-tuotantoa tuetaan ja turve pysyy edelleen erityis- asemassaan. Tiukat tavoitteet öljyn ja hiilen käytön vähentämiseksi sekä kasvava verotus pitävät hinnat kuitenkin kohtuullisella tasolla.

Tavoitellun korkean uusiutuvan energian osuuden varmistamiseksi fossiilisten polttoaineiden energiaverotusta kiristetään. Hiilen käyttö on saatu erinäisillä rajoittavilla toimenpiteillä loppumaan tavoitteiden mukaisesti tarkasteluajankohtaan mennessä. Tavoite öljyn käytön puolittamisesta on hyvin kunnianhimoinen. Eritoten liikenteen ja pienkäyttäjien öljyn käytön hillitseminen on ollut hankalaa, minkä vuoksi on päädytty rajoittamaan raskaan polttoöljyn käyttöä esimerkiksi lämpökeskuksissa ja teollisuudessa. Maakaasu nähdään puhtaana siltapolttoaineena esimerkiksi biokaasuun tai synteettiseen maakaasuun. Vuonna 2025 tällaiset järjestelmät eivät kuitenkaan ole vielä käyttökelpoisia suuressa mittakaavassa. Joka tapauksessa öljyn ja hiilen käytön pakotettu vähentäminen lisää maakaasun käyttöä sellaisissa kohteissa, joissa ei ole järkevää käyttää biomassaa. Myös esimerkiksi pääkaupunkiseudun energiahuolto palaa maakaasuun talviaikojen polttoaineena, joskin peruskuorma tuotetaan enenevässä määrin lämpöpumpuilla. Toisaalta soveltuvat teollisuuden kohteet, kuten meesauunit, ovat siirtyneet kokonaan biomassaan vuoteen 2025 mennessä.

Liikennepolttoaineiden tuotantoa tuetaan voimakkaasti 50 %:n tavoitteen saavuttamiseksi. Kustannustehokkaiden HVO-öljyjen tuotanto lisääntyy eniten, mikä lisää myös maakaasun käyttöä vedyn tuotannossa. Lisäksi tavoite 50 000 kaasautosta vaikuttaa positiivisesti myös maakaasun kulutukseen.

Voimakkaat panostukset biotalouteen ovat saaneet talouden vahvalle nousu-uralle. Tämä on lisännyt sekä yleistä että etenkin teollisuuden energiankäyttöä, mikä näkyy lopulta myös ainoaksi hyväksytyksi fossiiliseksi polttoaineeksi muotoutuneen maakaasun kulutuksessa.

Maakaasun kulutus vähenee entisestään CHP-tuotannossa ja esimerkiksi meesauuneissa, mutta toisaalta kasvua tulee hiilen ja öljyn käyttöä korvaavissa kohteissa sekä yleisestä talouden kasvusta johtuvasta energiankulutuksen noususta. Kokonaisuutena kaasun kulutus pysyy siis nykytasollaan tai jopa kasvaa hieman.

5.3 ”Sähköistetty yhteiskunta”

Skenaarion ajavana voimana ovat runsaasti lisääntyvä ilmastoneutraali sähköntuotanto ja tehostuva sähkömarkkinoiden integraatio, jotka takaavat vakaan ja edullisen sähkön hinnan. Tämä johtaa ennen pitkää yhteiskunnan kokonaisvaltaiseen sähköistymiseen, joka on tosin vielä kesken vuonna 2025. Maakaasun ja muiden polttoaineiden asema on kuitenkin pysyvästi heikentynyt.

Olkiluoto 3 ja Hanhikivi I ovat valmistuneet aikataulussaan. Lisäksi tuulivoima on lisääntynyt optimistisimpien ennusteiden mukaan koko pohjoismaissa. Tämä tarkoittaa Suomessa noin 3000 MW:n tuulivoimakapasiteetin lisäystä 1500 MW:n päälle, minkä lisäksi myös muiden pohjoismaiden kapasiteetti on kasvanut tuhansia megawatteja. Kun tähän lisätään vielä 260 MW lisää uusiutuvaa sähkötehoa uusilta sellutehtailta ja pohjoismaisen yhteistyön nimissä 1000 MW:lla kasvatetut siirtoyhteydet Ruotsiin, saatetaan jo huomata, että sähkömarkkinoilla riittää edullista sähköä ylimäärin.

Vaihtelevan tuulivoiman ja jäykän ydinsähkön haasteisiin on vastattu kehittämällä tasasähköjärjestelmää sellaiseksi, että säätäminen on markkinaehtoisesti kannattavaa. Pohjoismaiden säätökykyiset vesivoimavarat on valjastettu kokonaan lyhytaikaisempaan säätöön. Tämä on johtanut tasaiseen ja edulliseen sähkön hintaan yhdessä kasvaneen verkkointegraation ja älykkäiden sähköverkkojen kanssa. Manner-Euroopasta, jossa kannattaa edelleen tuottaa lauhdesähköä, saadaan siirtoyhteyksien rajoissa lisäsähköä vähäisemmissä notkahduksissa. Sähkön hinta on suurimman osan ajasta alle 20 €/MWh.

Sähkön halpa hinta ja sen riittävyys päästöttömillä tuotantomuodoilla tuotettuna on syrjäyttänyt lauhde- ja yhteistuotannon hiljalleen markkinoilta. Myös biomassan käyttö ja

haaveet sen suurimittaisesta käytöstä ovat vähentyneet markkinaehtoisesti, eikä hakesähkön tukijärjestelmää ole jatkettu tarpeettomana. Biomassan käyttöä ei siis ole rajoitettu, se on vain muuttunut kannattamattomaksi suuressa mittakaavassa.

Kauko- ja prosessilämmön tuotannoissa on siirrytty erilliseen lämmöntuotantoon, sillä sähköstä ei saada sen kustannuksia kattavaa korvausta. Etenkin yhdyskuntien lämpöä tuotetaan enenevässä määrin erikokoisilla lämpöpumppuratkaisuilla, erityisesti lämpötilojen pysytellessä nollan yläpuolella. Polttamiseen perustuvaa erillistuotettua kaukolämpöä tarvitaan vain pakkasten aikaan. Teollisuudessa, jossa tarvitaan paineistettua höyryä, käytetään edelleen biomassaa ja huippukuormakattiloissa kaasua tai öljyä. Metsäteollisuuden yhteydessä tapahtuva tuotannon sivujakeiden poltto pysyy edelleen järkevänä, samoin kuin teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen paikallisesti kaukolämpönä.

Sähköistyminen on edennyt myös liikenteeseen, ja suuri osa uusista henkilöautoista on sähköautoja. Raskaan liikenteen ja lentoliikenteen polttoaineeksi tarvitaan kuitenkin edelleen nestemäisiä polttoaineita. Jopa dieseliä voidaan edelleen käyttää muilla sektoreilla saatujen päästövähennysten ansiosta, mutta myös biopohjaiset ratkaisut nähdään hyväksyttävänä. Yhä enemmän biomassaa ohjautuukin korkeamman jalostusasteen kohteisiin sähköön ja jopa lämmön tuotannon kannattamattomuuden vuoksi. Teollisuuden prosesseissa sähkökäyttö on vallannut hiljalleen alaa sellaisissa kohteissa, joissa se on mahdollista. Tällaisia ovat esimerkiksi vedyn tuotanto, paperinkuivaimet ja osittain metalliteollisuuden uunit.

Yhteiskunta on yhä voimakkaammin riippuvainen sähköenergiasta ja mahdollisen sähkökatkon kustannukset ovat nousseet jopa miljardiluokkaan tunnissa. Nykyisin kustannukset ovat noin 100 miljoonaa tunnista [34]. Tämän vuoksi eritasoisia häiriöreservejä on kehitetty voimakkaasti varmistamaan sähköön saatavuus ja verkon häiriötön toiminta kaikissa tilanteissa. Tähän tarkoitukseen parhaita ratkaisuja ovat edelleen nopeasti käynnistyvät kaasuturbiini- ja moottorit, joita myös tarvitaan yhä enemmän sähköjärjestelmän heilahtelun estämiseksi.

Kaasun osalta tämä skenaario vaikuttaa huonoimmalta. Sillä on silti oma asemansa nopeasti käyttöön otettavana varavoimana sekä sähköön että lämmön tuotannossa. Sähköistymisen vuoksi varavoimaa myös tarvitaan entistä enemmän, sillä huippukuorman suuruus suhteessa perustehoon kasvaa sekä sähköön että lämmön osalta. Sähköistyminen ei ole edennyt vuoteen 2025 mennessä kovin pitkälle, vaan kaasulla ja muilla polttoaineilla on edelleen oma asemansa monissa kohteissa, varsinkin teollisuudessa ja kohteissa, joissa aiemmin tehdyillä investoinneilla on vielä järkevää elinikää jäljellä. Toisaalta sähköistyminen vähentää polttamista tasaisesti kaikkialla ja kokonaisuutena kulutuksen lasku on merkittävä.

5.4 ”Hävitty biomassa”

Skenaarion tärkeimpänä ajurina on havainto siitä, että aiemmin käsitelty lievä vastatuuli metsäbiomassan käytölle EU-tasolla saattaa olla heikko signaali, jonka voimistuminen tarkoittaisi Suomelle epäedullista puun käytön rajoittamista.

Kehitys saa alkunsa, kun EU:ssa pyritään luomaan yhteisiä pelisääntöjä ilmastonmuutoksen estämiseksi. Ylilyönnit, kuten tuhansien megawattien hiilivoimalan muuttaminen Atlantin takaa laivattua pellettiä käyttäväksi, ovat pakottaneet rajoittamaan hallitsematonta biomassan käyttöä energiantuotannossa. EU:n suurilla jäsenmailla ei ole erityisiä intressejä puun käyttöä kohtaan, minkä vuoksi metsäisten maiden kuten Suomen ja Ruotsin näkökanta jää vähemmistöön. Lopulta suuri osa nykyisin käytettävistä puujakeista määrätellään ilmaston kannalta kestävämmiksi, sikäli kun niillä olisi muitakin käyttökohteita kuin energiakäyttö. Lisäksi pyritään säilyttämään nykyiset metsät hiilinieluinä, mikä rajoittaa uusia hakkuita Suomessa.

Lopputuloksen kannalta mekanismi voi olla toisenlainenkin, mutta lopulta muodostuu tilanne, jossa puubiomassaa ei lasketa enää uusiutuvaksi polttoaineeksi tai sille asetetaan sen polttohetkellä vapautuvaa hiilidioksidimäärää vastaava päästökerroin, eikä hakkuita voida enää kasvattaa. Samoin turpeen suosimiseen on puututtu EU-tasolta, minkä vuoksi sen verotus yhtenäistetään muiden fossiilisten polttoaineiden kanssa. Näiden lisäksi hakesähkön tukeminen loppuu, sillä uusiutumattoman energianlähteen tukeminen ei ole EU:n pelisääntöjen mukaista. Esimerkiksi hiilen käyttöä ei kuitenkaan rajoiteta muiden EU-maiden huomattavan hiiliriippuvuuden vuoksi.

Osa biomassajakeista pysyy kuitenkin edelleen kestävinä. Niiksi luetaan esimerkiksi metsäteollisuudesta jäävä mustalipeä, puru ja kuori. Niitä voidaan edelleen käyttää energiantuotannossa, mutta toisaalta ne ovat muuttuneet niin arvokkaiksi, että niille yritetään etsiä korkeamman jalostusasteen käyttökohteita.

Kestävämmätkin puupolttoaineet ovat tarkasteluajankohtana toistaiseksi edullisia ja niille on olemassa infra, jossa polttaa niitä. Hakesähkön tuen poisto tekee puun poltosta kuitenkin muuttuvilta kustannuksiltaan hiilen veroista. Mahdollisen päästökertoimen tulo ja turpeen kiristytävä verotus tekee siitä jopa kalliimpaa pienelläkin päästöoikeuden arvolla. Erityisesti puun käytön kustannusten lisääntyminen johtaa sähkön hinnan nousuun. Puuta ja turvetta pyritään omavaraisuuden nimissä suosimaan edelleen hiilen kustannuksella ainakin siihen asti, kunnes hiili muuttuu ratkaisevasti edullisemmaksi. Uusia investointeja ei kuitenkaan enää tehdä.

Nestemäiset biopolttoaineet ovat ensimmäisiä kärsijöitä kestävyyskriteerien muuttuessa. Yhdessä hakkuurajoitusten kanssa tämä lopettaa metsäteollisuuden jo suunnitellut investoinnit. Tämä näkyy myös maakaasun kulutuksessa tehtaiden prosesseissa ja biopolttoai-

nevedyn tuotannossa. Suomen talous ja energiahuolto ovat nojannet niin vahvasti metsään, että sen käytön vaikeutuessa koko talous on ajautunut jyrkkään alamäkeen. Tämä vaikuttaa myös muuhun teollisuustuotantoon ja yleiseen investointihalukkuuteen.

Ilmastonmuutoksen uhka ei ole keinojen vähetessä silti hävinnyt mihinkään. Tuulivoimaan on alettu investoida entistä enemmän, jotta asetetut uusiutuvan energian tavoitteet toteutuisivat. Toisaalta sähkön hinta on alkanut heittelehtiä voimakkaasti tuulien mukana. Todellisiin päästövähennyksiin pyritään uusilla ydinvoimainvestoinneilla joskus tulevaisuudessa. Myös maakaasu nähdään kohtuullisena vaihtoehtona hiilipäästöjen pienentämiseen, onhan sen päästökerroin vain puolet kestävämmäksi luokitellun puun uudesta päästökertoimesta.

Energia-alan toimijoiden luottamus päätöksentekoon on vähentynyt eikä uusia pitkäkestoisia investointeja uskalleta tehdä. Ainakin tarkasteluajankohdassa 2025 käytetään vielä jo nyt olemassaolevaa voimalaitoskalustoa. Sähkön hinnan nousu tekee maakaasun jokseenkin kilpailukykyiseksi ja jo poistettuja kombilaitoksia otetaan uudelleen käyttöön. Toisaalta viime vuosina rakennetuissa joustavissa monipolttoainelaitoksissa aletaan käyttää enenevässä määrin hiiltä sen puuta ja turvetta alempien kustannusten vuoksi.

Skenaariossa nykyisin fossiiliseksi luokiteltavat polttoaineet valtaavat alaa puulta, hiili halpuutensa vuoksi monipolttoainekattiloissa ja maakaasu hyvän hyötysuhteensa sekä alhaisten päästöjensä vuoksi vanhoissa kombivoimaloissa. Kokonaiskulutusta vähentää kuitenkin talouden yleinen alennustila, joka hieman nurinkurisesti auttaa Suomea pääsemään menneisyyden päästöihin sidottuihin päästötavoitteisiin. Lopulta muutos pois puupolttoaineista ei olekaan niin iso, vaan voidaankin puhua jonkinlaisesta paluu menneeseen -skenaariosta. Vielä esimerkiksi 1990-luvuilla puun poltto metsäteollisuuden ulkopuolisissa isoissa yksiköissä oli huomattavasti vähäisempää [1] [13].

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Skenaariotutkimuksen ideana on toimia esimerkiksi yrityksen strategiatyöskentelyssä siten, että voidaan varautua mahdollisimman hyvin toisistaan poikkeaviin tulevaisuuksiin. Näissä johtopäätöksissä tarkastellaan tilannetta maakaasua myyvän tahon kannalta, jolloin myynnin kasvaminen nähdään tavoiteltavana asiana.

Taustatieto-osiossa huomattiin, että maakaasun käytön muutokset johtuvat pitkälti erilaisista poliittisista tekijöistä, oli kyseessä sitten verotus tai öljykriisi. Maakaasun vahvuudeksi arvioitiin puhdas palaminen, hyvä hyötysuhde erityisesti sähköntuotannossa sekä soveltuvuus varavoimaksi. Heikkouksia puolestaan ovat kallis hinta ja fossiilisuus, joskin maakaasu on fossiilisista polttoaineista vähiten haitallinen.

Toimintaympäristön analyysi keskittyi enimmäkseen poliittisten tavoitteiden ja mahdollisten muutosten, sekä energiamarkkinoiden analyysiin. Erilaisilla muuttujilla oli paljon sidoksia toisiinsa, mutta selvimmin nämä ilmenivät sähkön hinnassa, jolla on suora yhteys maakaasun kilpailukykyyn monissa kohteissa. Sähkön hintaan vaikutti kuitenkin niin moni asia, että se jäi avoimeksi muuttujaksi. Maakaasun kehitys riippuukin pitkälti tulevaisuuden energia- ja ilmastopolitiikasta. Tällä alalla suurimmaksi yksittäiseksi kysymykseksi muotoutui metsäbiomassan asema suomalaisella energiakentällä. Huomattavaa on myös, että suurimmat eri polttoaineisiin vaikuttavat muutokset tulevat todennäköisesti EU-tason päätöksistä. Näitä ovat biomassan aseman lisäksi myös erilaiset päästörajat.

Maakaasun tulevaisuus kietoutui monella tapaa metsäbiomassan tulevaisuuteen. Esimerkiksi verotuksessa ja tukijärjestelmissä on tuskin tulossa merkittäviä muutoksia nykyiseen linjaan. Biomassan nykyinen asema tuettuna ja ilmastoneutraalina polttoaineena tekee siitä liian kovan kilpailijan maakaasulle kohteissa, joissa sen käyttö on mahdollista. Toisaalta metsäbiomassan käyttö esimerkiksi nestemäisten biopolttoaineiden valmistuksessa tai jopa korkeamman jalostusasteen kohteissa voisi siirtää puun käyttöä matalimman jalostusasteen energiakäytöstä pois päin ja antaa tilaa maakaasulle, etenkin jos hakkuille asetetaan rajoituksia. Toisaalta puun kestävyuden uudelleenmäärittely ja esimerkiksi turpeen verotuksen kiristyminen voi heikentää biovoiman kilpailukykyä avaten markkinoita fossiilisille polttoaineille.

Kaikissa skenaarioissa, erityisesti sellaisissa, joissa biomassaa säilyttää vahvan asemansa Suomessa, maakaasun puhtaus ja asema vähiten haitallisena fossiilisena polttoaineena nousi esiin. Tämän vuoksi nousevat hiilidioksidipäästöön perustuvat kustannukset parantavat maakaasun kilpailukykyä muihin fossiilisiin nähden. Suurempi vahvuus on kuitenkin puhtaus, jonka ansiosta kaikki ilmansaastepäästöihin liittyvät rajoitukset ja kustannukset parantavat maakaasun kilpailukykyä kaikkiin muihin polttoaineisiin, jopa puupolttoaineisiin, verrattuna, sillä niillä joudutaan ottamaan käyttöön erilaisia lisäkustannuksia

tuovia päästöjen rajoittamismenetelmiä. Päästörajat ja muut tiukentuvat säädökset kannattaakin siis ottaa hyvillä mielin vastaan maakaasualalla.

Maakaasun asema kriittisenä ja vähemmän kriittisenä varavoimana on sen käytettävyyden, saavutettavien hyötysuhteiden ja pienten päästöjen vuoksi suhteellisen turvattu. Lisäksi pääasialliset varavoimatekniikat eli moottorit ja turbiinit voivat käyttää polttoaineena vain kaasua tai öljyä, joista jälkimmäisen hinta tulee todennäköisesti olemaan pääsääntöisesti korkeampi kuin kaasulla. Tämä pätee myös lämmöntuotantoon, joskin myös raskaan polttoöljyn käyttö voi olla mahdollista. Todennäköisten kehityskulkujen valossa näyttäisi siltä, että varavoiman tarve tulee lisääntymään sekä sähkön että lämmön tuotannossa. Sähkömarkkinoilla lisääntyvä vaihteleva tuotanto ja vähenevä säädettävä lämpövoima sekä kaukolämpöpuolella lisääntyvä energiatehokkuus ja lämpöpumppujärjestelmät tulevat lisäämään huippukulutuksen piikkien suhteellista korkeutta.

Teollisuuden osalta maakaasun käyttö vaikuttaa huomattavasti stabiilimmalta kuin yhdyskunnilla. Toisaalta teollisuuden käyttö on saturoitunutta ja muutos tulee todennäköisemmin alaspäin vähintäänkin energiatehokkuuden kehittymisen vuoksi. Kasvua ei ole näkyvissä kuin korkeintaan lisääntyvän teollisuustuotannon vuoksi. Poikkeuksen tähän tekee vedyn tuotanto, joka voi tulevaisuudessa lisääntyä esimerkiksi kasvavan biopolttainetuotannon tai vetytalouskokeiluiden avustuksella. Yleisesti ottaen suurimmat uhkat teollisuuskäytölle olivat joidenkin kohteiden osalta siirtyminen puupohjaisiin ratkaisuihin ja toisaalta sähköistyminen. Meesauunit ovat todennäköisin puubiomassaan keskipitkällä aikavälillä siirtyvä prosessi. Sähköistymiselle alttiita ovat erilaiset uunit ja paperinkuivaimet. Kriittisenä markkinasähkön rajahintana voidaan pitää noin 23 €/MWh:a verollisissa ja 16 €/MWh:a verottomissa käyttökohteissa. Vedyn tuotannossa on mahdollista siirtyä sekä sähköön että biomassaan, joskin siirtymä on lähitulevaisuudessa epätodennäköinen ja tapahtuu mahdollisesti vain tulevaisuuden uusissa, ei jo olemassa olevissa käyttökohteissa.

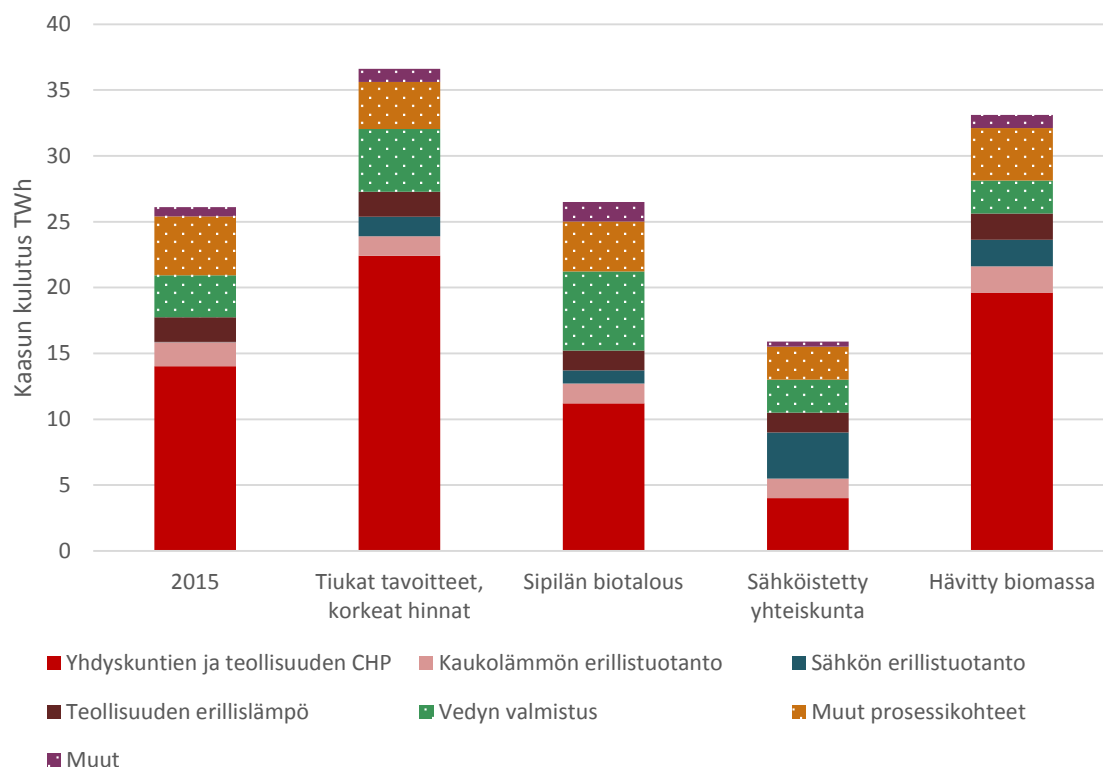
Skenaariot olivat luonteeltaan kevyesti kärjistettyjä. Vaikka niistä saattoikin jäädä positiivinen kuva maakaasun tulevasta asemasta, näyttää kokonaisuus siltä, etteivät muutokset tule lopulta olemaan kovinkaan radikaaleja tarkastellulla aikavälillä. Viime vuosien historiaan peilaten lopputulokseksi jäävä hienoinen kasvu tai stabiilina pysyvä käyttö voidaan kuitenkin nähdä positiivisena tuloksena.

Yhteenveto eri käyttökohteiden arvioiduista muutoksista on esitetty kuvassa 27. Kuvaa tarkasteltaessa on hyvä huomioda, että eri käyttökohteiden volyymit ovat hyvin eri koluokkaa. Nuolet sisältävät sekä arvioidusta kilpailukyvyn muutoksesta että käyttötärpeesta johtuvan kokonaiskulutuksen muutoksen. Esimerkiksi ”Tiukat tavoitteet, korkeat hinnat”-skenaariossa maakaasu pysyy kilpailukykyisenä teollisuuden prosesseissa, mutta niiden kokonaiskulutus laskee energiatehokkuuden parantumisen vuoksi.

	Tiukat tavoitteet, Korkeat hinnat	Sipilän biotalous	Sähköistetty yhteiskunta	Hävitty biomassa
CHP				
Erillislämpö				
Varavoima ja lauhesähkö				
Teollisuuden höyrykattilat				
Meesauunit				
Paperinkuivaus				
Vedyn valmistus				
Metalli- teollisuuden uunit				

Kuva 27. Arviot eri käyttökohteiden maakaasun käytön muutoksista eri skenaarioissa

Kuvassa 28 on esitetty edellä esitettyjen arvioiden perusteella arvioitu maakaasun kokonaiskulutus vuonna 2025 verrattuna vuoteen 2015. Kuvasta nähdään, että tiukkien tavoitteiden skenaario on arvion mukaan maakaasun kannalta edullisin, kun taas ”sähköistetty yhteiskunta” heikoin. Erityisesti CHP:lla on sen suurimman osuuden vuoksi todella merkittävä vaikutus kokonaiskulutuksen jakautumiseen.



Kuva 28. Arvioitu maakaasun kulutus eri skenaarioissa. Vertailuvuoden tiedot lähteestä [12]

Skenaariomenetelmällä saatavat tulevaisuudenkuvat ovat aina jossain määrin työn tekijän subjektiivisen ajattelun ja tulkinnan tuloksia eivätkä siten mitenkään absoluuttisia totuuksia. Esimerkiksi analyysi nykytilasta pohjautuu tutkijan omiin käsityksiin ja voi siten olla jo lähtökohtaisesti virheellinen, mikä tietenkin heijastuu myös lopputuloksiin. Myös merkittäviksi arvioitujen muuttujien valinta voi osoittautua virheelliseksi ja jotain tärkeää on saattanut jäädä huomaamatta. Esimerkiksi teknologian kehitykselle ei ole annettu kovin suurta painoarvoa työn lyhyen aikajänteen vuoksi.

Tulevaisuudenkuvat ovat tyypiltään laadullisia ja kuvailevia, eivätkä niinkään ehdottomia ennusteita, joiden onnistuminen voitaisiin määritellä virheen suuruudella. Toisaalta menetelmän tarkoituksena onkin valottaa mahdollisia kehityskulkuja erilaisiin tulevaisuuksiin, minkä vuoksi ennusteita ei pidä arvioida niiden oikeaan osumisen, vaan erilaisiin tulevaisuuksiin varautumisesta tulevan hyödyn kautta. Tähän tulokseen työssä kuitenkin päästiin riippumatta ennustusten paikkansapitävyydestä. Todennäköinen lopputulos lieenee yhdistelmä monesta, ellei kaikista skenaarioista.

LÄHTEET

- [1] Suomen virallinen tilasto (SVT) Energian hankinta ja kulutus 2017, 1. vuosineljännes, Tilastokeskus, web page. Available (accessed 7/14/2017): <http://www.stat.fi/til/ehk/2017/01/>.
- [2] Mannermaa, M. (1999). Tulevaisuuden hallinta - skenaariot strategiatyöskentelyssä, WSOY, Porvoo, 227 p.
- [3] Rubin, A. Tulevaisuudentutkimus tiedonalana. TOPI – Tulevaisuudentutkimuksen oppimateriaalit, Tulevaisuuden tutkimuskeskus, Turun yliopisto, web page. Available (accessed 7/19/2017): <https://tulevaisuus.fi/>.
- [4] Mannermaa, M. (2004). Heikoista signaaleista vahva tulevaisuus, WSOY, Porvoo, 249 p.
- [5] Parpola, A. & Åberg, V. (2004). Kaasua! Maakaasu ja Suomi 1974–2004, 1st ed., Edita, Helsinki, 127 p.
- [6] Hautakangas, E. Maakaasumarkkinalain kokonaisuudistus. Esitys Kaasuyhdistyksen kevätkokouksessa 2016, Suomen kaasuyhdistys, web page. Available (accessed 21.3.2017): http://www.kaasuyhdistys.fi/sites/default/files/pdf/esitykset/20160428_kevatsenaari/Hautakangas.pdf.
- [7] Eurostat Supply, transformation and consumption of gas - annual data, Eurostat, the statistical office of European Union, web page. Available (accessed 21.3.2017):.
- [8] Valtio ostaa Gazpromin osuuden Gasumista - Tiedote, Valtioneuvoston viestintäosasto, web page. Available (accessed 7/25/2017): http://valtioneuvosto.fi/artikkel/-/asset_publisher/valtio-ostaa-gazpromin-osuuden-gasumista?_101_IN-STANCE_3wyslLo1Z0ni_groupId=10616.
- [9] Suomen virallinen tilasto (SVT) Energian hinnat, 1. Vuosineljännes 2017, Tilastokeskus, web page. Available (accessed 6/22/2017): http://www.stat.fi/til/ehi/2017/01/ehi_2017_01_2017-06-07_tie_001_fi.html.
- [10] Hallituksen esitys eduskunnalle maakaasunmarkkinalaiksi ja eräksi siihen liittyviksi laeiksi (2017). HE 50/2017. Available: <http://tem.fi/paatos?decisionId=0900908f80534017>.
- [11] Construction of the Gas Interconnection Poland-Lithuania [GIPL] including supporting infrastructure, European Commission Innovation and networks executive

- agency, web page. Available (accessed 7/14/2017): https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/fiche_8_5-0046-pllt-p-m-2014_final_1.pdf.
- [12] Maa- ja biokaasu Suomessa ja maailmassa (2016). Tilastoesitys, Suomen Kaasuyhdistys ry, .
- [13] Suomen virallinen tilasto (SVT) Teollisuuden energiankäyttö [Verkojulkaisu], Tilastokeskus, web page. Available (accessed 3.4.2017): <http://www.stat.fi/til/tene/index.html>.
- [14] Akhtar, S.S., Ervin, E., Raza, S. & Abbas, T. (2016). From Coal to Natural Gas: Its Impact on Kiln Production, Clinker Quality, and Emissions, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52(2), pp. 1913-1924.
- [15] Maakaasukäsikirja. Suomen Kaasuyhdistys, 2014.
- [16] Emission factor documentation for AP-43 Section 1.5: Liquefied petroleum gas combustion, (1993). Air emission factor and quantification Office of Air Quality Planning and Standards, Office of Air And Radiation, U.S. Environmental protection agency, Research Triangle, .
- [17] Energiaverotusohje 2016 (2016). Verohallinto, .
- [18] Talousarvioesitys 2017: 07. Energiaverotus, Valtiovarainministeriö, web page. Available (accessed 20.3.2017): <http://budjetti.vm.fi/indox/download.jsp;jsessionid=0E145EF8372B4801D31D46D2A7997117?lang=fi&file=/2017/tae/valtiovarainministerionKanta/YksityiskohtaisetPerustelut/11/08/07/07.pdf>.
- [19] Koreneff, G., Lehtilä, A., Hurskainen, M., Pursiheimo, E., Tsupari, E., Koljonen, T. & Kärki, J. (2016). Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon hiilidioksidiviron puolituksen poiston vaikutukset, VTT-R-01173-16, VTT, Espoo, 64 p.
- [20] Tamminen, S., Ollikka, K. & Laukkanen, M. (2016). Suomen energiaverotus suosii energiantensiivisiä suuryrityksiä, VATT Policy Brief 2, Valtion taloudellinen tutkimuskeskus, Helsinki.
- [21] Flagan, R. & Seinfeld, J. (1988). Pollutant Formation and Control in Combustion, in: Fundamentals of air pollution engineering, Prentice-Hall Inc, New Jersey, .
- [22] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. Final Draft (June 2016), (2016). The European IPPC Bureau, .

- [23] Wynn, G. & Goghe, P. (2017). Europe's Coal-Fired Power Plants: Rouch Times Ahead - Analysis of the impact of a New Round of Pollution Controls, Institute for Energy Economics and Financial Analysis, Cleveland, .
- [24] Nilsson, L., Andreasson, R., Axelsson, B., Gustavsson, C., Malutta, R., Ottoson, A., Paulson, F. & Zotterman, C. (2016). Fossil free tissue drying, *Energigas-teknik* 2016:231, Energiforsk, Stockholm, .
- [25] Nylund, N., Tamminen, S., Sipilä, K., Laurikko, J., Sipilä, K., Mäkelä, K., Hannula, I. & Honkatukia, J. (2015). Tieliikenteen 40 %:n hiilidioksidipäästöjen vähentäminen vuoteen 2030: Käyttövoimavaihtoehdot ja niiden kansantaloudelliset vaikutukset, VTT-R-00752-15, VTT, Espoo, .
- [26] Johansson, M.T. (2013). Bio-synthetic natural gas as fuel in steel industry reheating furnaces – A case study of economic performance and effects on global CO2 emissions, *Energy*, Vol. 57pp. 699-708.
- [27] Wadsborn, R., Berglin, N. & Richards, T. (2007). Konvertering av mesaugnar från olje- till biobränsleeldning - drifterfarenhet och modellering, S5-606, Värmeforsk service AB, Stockholm, .
- [28] Boiler Basics, Technology Transfer Services, web page. Available (accessed 24.4.2017): <https://www.techtransfer.com/blog/boiler-basics/>.
- [29] Teir, S. (2003). Steam boiler technology, 2nd ed ed., Helsinki University of Technology, Espoo, iii, 215, [2] sivua p.
- [30] Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. & Hupa, M. (2002). Poltto ja palaminen, International Flame Research Foundation, Helsinki, 629 sivua p.
- [31] Keipi, T., Hankalin, V., Nummelin, J. & Raiko, R. (2016). Techno-economic analysis of four concepts for thermal decomposition of methane: Reduction of CO2 emissions in natural gas combustion, *Energy Conversion and Management*, Vol. 110pp. 1-12.
- [32] Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä, (2016). Loppuraportti - VALOR partners Oy Energiateollisuus ry, Helsinki, .
- [33] Päästökauppadirektiivin uudistamisen vaikutukset Suomen energiasektoriin ja teollisuuteen - esitys, (2017). Seminaari päästökauppadirektiivin uudistamisen vaikutuksista teollisuuteen ja energiasektoriin Suomessa, 6.6.2017, Pöyry, Helsinki, .

- [34] Hankalin, V., Sivill, L., Rantanen, L., Hellsten, J. & Juuri, K. (2016). Selvitys keinoista sähkötehon riittävyyden varmistamiseksi kulutushuipussa, Huoltovarmuuskeskus, Energiavirasto ja työ- ja elinkeinoministeriö, Espoo, .
- [35] Tikka, P., Arpalahti, O., Engdahl, H., Jäntti, J., Kiiskilä, E., Liiri, O., Pekkinen, J., Puumalainen, R., Sankala, H., Vehmaan-Kreula, J., Halinen, E., Kapanen, j., Kottila, M., Lankinen, M., Lintunen, T., Näsänen, H., Toropainen, T. & Parviainen, K. (2008). White liquor preparation, in: Tikka, P. (ed.), Papermaking science and technology. Book 6, Chemical pulping. Part 2, Recovery of chemicals and energy, 2nd ed., totally updated version ed., Finnish Paper Engineers' Association : Paperi ja puu, Helsinki, pp. 124-387 sivua.
- [36] Kuopion biotuotetehtaan ympäristölupa ja toiminnanaloittamislupa sekä vesitalouslupa ja valmistelulupa, Kuopio (2017). ISAVI/1171/2016 ed., Itä-Suomen aluehallintovirasto, Mikkeli, .
- [37] Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Gonzalo, M.R., Santonja, G.G., Roudier, S. & Sancho, L.D. (2015). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the production of Pulp, Paper and Board, Industrial Emissions directive 2010/75/EU (Integrated pollution prevention and control) The European IPCC Bureau, Luxembourg, .
- [38] Manning, R. & Tran, H. (2015). Impact of cofiring biofuels and fossil fuels on lime kiln operation, Tappi Journal, Vol. 14(7), pp. 474-484.
- [39] Francey, S. & Tran, H. (2012). Impacts of Burning High Sulphur Fuels in Lime Kilns, Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes, Vol. 2(3), pp. 32-37.
- [40] Francey, S., Tran, H. & Berglin, N. (2011). Global survey on lime kiln operation, energy consumption and alternative fuel usage, (Tappi Journal), pp. 19-26.
- [41] Francey, S., Tran, H. & Jones, A. Current status of alternative fuel use in lime kilns, (Tappi Journal), pp. 33-39.
- [42] Metsä Fibre Oy:n biotuotetehtaan ympäristölupa, Äänekoski (2015). LSSAVI/4652/2014 ed., Länsi- ja sisä-Suomen aluehallintovirasto, Vaasa, .
- [43] Kemijärven biojalostamon ympäristövaikutusten arviointiohjelma (2016). Boreal Bioref Oy, Kemijärvi, .
- [44] Heikkilä, P. & Rajala, P. (2009). Drying of paper coatings and drying equipment, in: Paltakari, J. (ed.), Papermaking science and technology. Book 11, Pigment coating and surface sizing of paper, 2nd ed., totally updated version ed., Finnish Paper Engineers' Association, Helsinki, pp. 558-615 sivua.

- [45] Rennes, J.M. (1998). Drying systems and new techniques for paperboard coating, *Tappi Journal*, Vol. 81(11), pp. 99-112.
- [46] Karlsson, M. (2010). Papermaking science and technology. Book 9, Papermaking : part 2, Drying, 2nd ed., totally updated version ed., Finnish Paper Engineers' Association : Paperi ja puu, Helsinki, 634 sivua p.
- [47] Palm, M. (2000). Jamförelse mellan el-IR och gas-IR vid tillämpningas i industriella processer, SGC 107, Svenskt gastekniskt center AB, Stockholm, .
- [48] Persson, P. (1992). Papperstorkning med gas-IR - Sammanfattning av et antal FUD-projekt, SGC 025, Svensk Gastekniskt Center AB, Stockholm, .
- [49] Impingement Drying - Valmet technical paper series 2012, Valmet, web page. Available (accessed 3/20): http://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/drying-and-air-systems/wpd_impingementdrying.pdf.
- [50] Bertuccioli, L., Chan, A., Hart, D., Lehner, F., Madden, B. & Standen, E. (2014). Study on development of water electrolysis in the EU. Final report, Fuel cells and hydrogen joint undertaking, 160p, .
- [51] Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport (2014). 2013 Technology Map of the European Strategic Technology Plan: Technology Descriptions, Publications Office of the European Union, Luxembourg, .
- [52] Reference document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers, (2007). European BAT-references The European IPPC Bureau, .
- [53] Barthe, P., Chaugny, M., Roudier, S. & Sancho, L.D. (2015). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU European IPPC Bureau, Luxembourg, .
- [54] Kothari, R., Buddhi, D. & Sawhney, R.L. (2008). Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12(2), pp. 553-563.
- [55] Energiavuosi 2016 - Sähkö. 2017. Energiatoteellisuus ry. Saatavissa: (Viitattu: 30.6.2017) http://energia.fi/files/1407/Energiavuosi_2016_-_Sahko.ppt
- [56] Galanti, L., Franzoni, A., Traverso, A. & Massardo, A.F. (2011). Existing large steam power plant upgraded for hydrogen production, *Applied Energy*, Vol. 88(5), pp. 1510-1518.

- [57] Karatzos, S., McMillan, J.D. & Saddler, J.N. (2014). The Potential and challenges of drop-in biofuels, IEA Bioenergy Task 39 IEA Bioenergy, .
- [58] Pöyry Management Consulting Oy (2017). Metsäbiomassan kustannustehokas käyttö, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 23/2017, Valtioneuvoston kanslia, Helsinki, 43 p.
- [59] Kauranen, P., Solin, J., Törrönen, K., Koivula, J. & Laurikko, J. (2013). Vetytiekartta - Vetyenergian mahdollisuudet Suomelle, VTT, .
- [60] Reference document on Best Available Techniques in Ferrous Metals Processing Industry, (2001). Reference documents under the IPPC Directive and the IED The European IPPC Bureau, 538 p.
- [61] Heikkinen, V. & Loukola-Ruskeeniemi, K. (2015). Metallien jalostus Suomessa: nykytila ja tulevaisuuden haasteet, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki, .
- [62] Kirschen, M., Risonarta, V. & Pfeifer, H. (2009). Energy efficiency and the influence of gas burners to the energy related carbon dioxide emissions of electric arc furnaces in steel industry, Energy, Vol. 34(9), pp. 1065-1072.
- [63] Reference Document on Best Available Techniques on Surface Treatment using Organic Solvents, The European IPPC Bureau, Available: 2007.
- [64] Tornio Manga LNG -hankkeen esittely, Tornio Manga Oy, web page. Available (accessed 7/31/2017): <https://www.torniomangalng.fi/hankkeen-esittely/>.
- [65] Huttunen, R. (2017). Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017, Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki, .
- [66] Simplified EU Energy balances statistics, Eurostat, web page. Available (accessed 8/1/2017): http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_100a&lang=en.
- [67] Liukko, A., Veijonen, K. & Vilén, O. (2016). Uusiutuvan energian tukijärjestelmien kehittämissryhmän loppuraportti, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja - Energia ja ilmasto 16/216, Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki, .
- [68] Energy, Carbon Dioxide and Sulphur Taxation in Sweden, International Energy Agency, web page. Available (accessed 7/20/2017): <https://www.iea.org/policiesandmeasures/pams/sweden/name-21011-en.php>.

- [69] Valtioneuvoston asetus uusiutuville energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta (2016). 1397/2010.
- [70] Vihreä energiavisio 2035 - puolueen linjaus (2016). in: <https://www.vihreat.fi/sites/default/files/attachments/page/2f58f383-df6c-474c-94e4-79a1b77645be/vihreaenergiavisio2035.pdf>, Vihreä liitto, .
- [71] Tiedote: Talouspoliittinen ministerivaliokunta linjasi toimista yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon kilpailukyvyn turvaamiseksi (2016). Valtioneuvoston viestintäosasto, Helsinki, .
- [72] Sulamaa, P. & Forrström, J. (2015). Selvitys päästökaupan markkinavakausvarannon vaikutuksista sähkön tukkuhintaan, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 9/2015, Valtioneuvoston kanslia, Helsinki, .
- [73] Tilastokeskus Polttoaineluokitus 2017, Tilastokeskus
http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html.
- [74] Koljonen, T., Soimakallio, S., Asikainen, A., Lanki, T., Anttila, P., Hildén, M., Honkatukia, J., Karvosenoja, N., Lehtilä, A., Lehtonen, H., Lindroos, T.J., Regina, K., Salminen, O., Savolahti, M., Siljander, R. & Tiittanen, P. (2017). Energia- ja ilmastostrategian vaikutusarviot: Yhteenvetoraportti, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 21/2017, Valtioneuvoston kanslia, Helsinki, 106 p.
- [75] Kokkonen, Y. Neljä pääkaupunkia kieltämässä dieselautot, Yle, web page. Available (accessed 7/7/2017): <https://yle.fi/uutiset/3-9329887>.
- [76] Tervonen, J., Ristikartano, J. & Sorvoja, S. (2010). Tieliikenteen ajokustannusten yksikköarvojen määrittäminen - Taustaraportti, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 33/2010, Liikennevirasto, Helsinki, .
- [77] Euroopan parlamentista kylmä suihku metsäteollisuudelle - Suomen hakkuut voivat vaikeutua (11.7.2017). <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/euroopan-parlamentista-kylma-suihku-metsateollisuudelle---suomen-hakkuut-voivat-vaikeutua/rHDJ2xzE> ed., Kauppalehti, Helsinki, .
- [78] Europarlamentin rankka raportti murskaa Suomen bioenergian (2017). in: 14.6.2017, <http://www.maaseuduntulevaisuus.fi/politiikka/europarlamentin-rankka-raportti-murskaa-suomen-bioenergian-1.193778> ed., Maaseudun tulevaisuus, Helsinki, .
- [79] Kaidin maansiirtotöiden piti alkaa Kemissä ensi viikolla - Lykkääntyy EU-raportin vuoksi (2017). in: 23.6.2017, <http://www.maaseuduntulevaisuus.fi/talous/kaidin-maansiirtot%C3%B6iden-piti-alkaa-kemiss%C3%A4-ensi-viikolla->

- [lykk%C3%A4%C3%A4ntyy-eu-raportin-vuoksi-1.195394](#) ed., Maaseudun Tulevaisuus, Helsinki, .
- [80] Upton, J. New EU Wood Energy Rules Threaten Climate and Forests, Climate Central, web page. Available (accessed 7/24/2017): <http://www.climatecentral.org/news/new-eu-wood-energy-rules-threaten-climate-forests-20988>.
- [81] Vakkilainen, E. Kaataako EU:n ympäristövaliokunta Suomen talouden? - Kannanotto, Lappeenranta University of Technology, web page. Available (accessed 7/24/2017): https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/kaataako-eu-n-ymparistovaliokunta-suomen-talouden-.
- [82] Sähkömarkkinat korjauksen tarpeessa - mitä voimme tehdä? (2016). Fingrid Oyj, Helsinki, .
- [83] Negative electricity market prices, (2014). Ei-Fact Sheet 2014 - 01 Ku Leuven Energy Institute, Heverlee, Available: <https://set.kuleuven.be/ei/images/negative-electricity-market-prices>.
- [84] Elspot Prices 2015 daily - Historical Market data, Nordpool Spot, web page. Available (accessed 4/5/2017): <http://www.nordpoolspot.com/historical-market-data/>.
- [85] Sähkömarkkinoiden rajakapasiteetti ja -siirrot, Ruotsin historiatiedot, Fingrid Oyj, web page. Available (accessed 6/8): <http://www.fingrid.fi/fi/sahko-markkinat/rajakapasiteetit/Sivut/Ruotsi.aspx>.
- [86] Lausunto Olkiluoto 3 käyttölupahakemukseen, (2016). Fingrid Oyj, Helsinki, .
- [87] Tuulivoimahankkeet Suomessa, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, web page. Available (accessed 8/6): <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/hankelista>.
- [88] Pöyry Management Consulting Oy (2015). Suomen sähkötehon riittävyys ja kapasiteettirakenteen kehitys vuoteen 2030, Energiategollisuus ry, Fingrid Oyj, Metsäteollisuus ry, Suomen ELFI oy ja Työ- ja elinkeinoministeriö, Vantaa, .
- [89] Lehdistötiedote: Fingrid luo mahdollisuuksia sähköjärjestelmän murrokselle: Megainvestointeja ja ehdotuksia konkreettisista uudistuksista sähkömarkkinoille, Fingrid Oyj, web page. Available (accessed 6/7): <http://www.fingrid.fi/fi/ajankoh-taista/tiedotteet/Sivut%2FFingrid-luo-mahdollisuuksia-s%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelm%C3%A4n-murrokselle.aspx>.
- [90] Challenges and opportunities for the Nordic Power System, (2016). Statnett, Fingrid, Energinet.dk & Svenska Kraftnät, .

- [91] Heljo, J., Harsia, P., Holttinen, H., Aalto, P., Björkqvist, T., Järventausta, P., Kaivo-Oja, J., Kojo, M., Korpela, T., Rautiainen, A., Repo, S., Ruostetsaari, I. & Sorri, J. (2016). Tammikuun tehopiikki – mitä tapahtui 7.1.2016? Miten tehoa hallitaan paremmin jatkossa? EL-TRAN Analyysi 7/2016, EL-TRAN konsortio, Tampere, .
- [92] Maakaasun teollisuuskäyttäjähintojen ja tukkutariffi-indeksin kehitys (aikasarja, XLS), Energiavirasto, web page. Available (accessed 4/3/2017): <https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Tukkumaakaasutilasto.xlsx/8c3cd1ee-77cf-4f64-978f-42202d105d57>.
- [93] Pöyry Oyj (2016). Energiapolitiittisten ohjauskeinojen vaikutus metsäteollisuuden energiakustannuksiin Euroopassa, Metsäteollisuus ry, Available: <https://www.metsateollisuus.fi/mediabank/7497.pdf>.
- [94] Wilhelms, T. Kaukolämpö graafeina - Energiavuosi 2015, Energiateollisuus, web page. Available (accessed 6/20/2017): https://energia.fi/ajankoh-taista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolampo_2015_graafeina.html#material-view.
- [95] Vainio, T. (2016). Asuntotuotantotarve 2015–2040, VTT Technology 247, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Espoo, 36 p.
- [96] Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit, (2016). Pöyry Management Consulting Oy:n raportti Energiateollisuus ry:lle Energiateollisuus ry; Sitra, Vantaa, .
- [97] Endex Dutch TTF Gas Base Load Futures, Continuous Contract #1 (TFM1) (Front Month), Quandl, web page. Available (accessed 6/28/2017): https://www.quandl.com/data/CHRIS/ICE_TFM1.
- [98] Crude Oil Prices: Brent - Europe, Federal Reserve Bank of St. Louis, web page. Available (accessed 28/6/2017): <https://fred.stlouisfed.org/series/DCOILBRETEU>.
- [99] Suni, P. (2015). Raakaöljyn hinnan laskun talousvaikutukset, ETLA Muistio No. 29, ETLA, Helsinki,
- [100] Ruska, M., Koljonen, T., Koreneff, G. & Lehtilä, A. (2012). Fossiiliset polttoainevarat ja -markkinat, VTT Technology 28, VTT, Espoo, .
- [101] Koljonen, T., Ruska, M., Flyktmann, M., Forström, J., Kiviluoma, J., Kirkinen, J., Lehtilä, A. & Pahkala, K. Energiaresurssit ja -markkinat, VTT Tiedotteita - Research notes 2489, VTT, Espoo, .

- [102] Taloudellinen katsaus, kesä 2017, (2017). Valtionvarainministeriön julkaisuja 28a/2017, Valtiovarainministeriö, Helsinki, .
- [103] Heikkinen, V. & Loukola-Ruskeenniemi, K. (2017). Energian kulutus ja sähkön hinta metallinjalostusteollisuudessa, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 15/2017, Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki, .
- [104] Viitanen, J. & Hänninen, R.(.). (2017). Metsäsektorin suhdannetiedote 2017, Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 38/2017, Luonnonvarakeskus, Helsinki, .

LIITE A: SUOMEN JA BALTIAN KAASUVERKOSTOT



Suomen ja Baltian kaasuverkot sekä suunnitteilla olevat Balticconnector ja GIPL. Balticconnector yhdistää Suomen ja Baltian kaasuverkot ja GIPL nämä kaikki Euroopan laajuiseen kaasuverkkoon.

Kuvan lähde: Balticconnector-projekti, Balticconnector Oy, verkkosivusto. Saatavissa (viitattu 28.6.2017): <http://balticconnector.fi/fi/projekti/>.

LIITE B: VOIMALAITOSLASKELMIEN TAUSTATIEDOT

Tässä liitteessä esitetään taustatiedot ja laskelmat kappaleessa 3.1.3 esitettyihin lukuihin ja kuvaajiin. Kuvaajien käyrät on laskettu varioimalla niissä esitettyjä muuttujia, kuten sähkön ja päästöoikeuden hintaa. Taulukoissa esitetyt hinnat ovat vuoden 2016 keskimääräisiä hintoja [1,2], ja verot vuoden 2017 alussa voimaan tulleita [3]. CHP-voimaloiden ja lämpökattiloiden tekniset tiedot ovat lähteestä [4], lämpöpumppujen tiedot lähteestä [5], ja sähkön erillistuotannon tiedot lähteestä [6]. Laskelmissa biokattiloissa oletetaan poltettavan puuta ja turvetta suhteessa 80/20. Sähkökattilan ja lämpöpumpun laskuissa siirtokustannukset on sisällytetty veroon. Tämän liitteen lopussa on esitetty oma lähdeluettelo. Taustatiedot on esitetty alla olevissa taulukoissa ja käytetyt kaavat näiden jälkeen.

Muuttujien lähtöarvot	
Päästön hinta	5 €/t CO ₂
Hakesähkön tuki	18 €/MWh
Sähkön hinta	30 €/MWh
Turpeen vero	1,9 €/MWh
Korkokanta	0,03

Polttoaineiden kustannukset	Maakaasu	Hiili	Öljy	Bio
Veroton hinta €/MWh	22,25	8,1	16,7	16,8
Vero €/MWh	18,614	26,98	23,739	0,38
Päästökerroin t CO ₂ /MWh	0,198	0,341	0,284	0,0762
Päästökaupan vaikutus €/MWh	0,99	1,705	1,42	0,381

CHP-laitosten tekniset arvot	Hiili-CHP	Kaasu-kombi	Bio-CHP	Kaasuturbiini
Kokonaishyötysuhde	0,86	0,88	0,84	0,88
Sähköntuotannon netto-osuus	0,3	0,48	0,28	0,3
Rakennusaste	0,54	1,20	0,50	0,52
Muut muuttuvat kustannukset [€/MWh]	1,9	0,8	1,2	0,4
Todellinen vero [€/MWh]	14,62	7,67	0,21	10,32
Lämmöntuotannon kustannus lähtöarvoilla [€/MWh _{th}]	27,65	33,29	8,53	39,61

Erillislämmöntuotannon tekniset arvot	Kaasu	Öljy	Hiili	Bio	Lämpöpumppu	Sähkö
Kokonaishyötysuhde	0,9	0,9	0,9	0,9	3	1
Muut muuttuvat kustannukset [€/MWh]	0,8	0,8	2,1	2	2	0
Todellinen vero [€/MWh]	18,614	23,739	26,98	0,38	30	30
Lämmöntuotannon kustannus lähtöarvoilla [€/MWh _{th}]	47,39	47,48	43,21	21,73	22,00	60,00

Erillissähköntuotannon tekniset arvot	Hiili	Kaasu- kombi	Bio	Ydin- voima	Tuuli- voima
Investointikustannus €/kW_e	1460	1030	1990	4485	1360
Muut muuttuvat kustannukset €/MWh_e	10,71	10,49	6,89	10,94	8,9
Lauhdesähköntuotannon hyötysuhde	0,42	0,583	0,4	0,37	0,95
Taloudellinen elinikä	25	25	25	40	25
Huipunkäyttöaika	2200	2200	2200	8400	2200
Jyvittyvä investointikustannus €/MWh_e	38,1	26,9	51,9	23,1	35,5
Tuotantotuki €/MWh_e			14,4		53,5
Sähköntuotannon kustannus uudella laitoksella alkuperäisillä lähtöarvoilla €/MWh_e	72,2	77,2	87,4	39,2	-9,1
Sähköntuotannon kustannus vanhalla laitoksella alkuperäisillä lähtöarvoilla €/MWh_e	34,1	50,4	35,4	16,1	

CHP-laitosten lämmöntuotannon kustannus $k_{\text{lämpö}}$ on laskettu kaavalla:

$$k_{\text{lämpö}} = k_{\text{pakustannus}} / (\mu_{\text{kok}} (1 - \mu_{\text{sähkö}}) - R(k_{\text{sähkö}} + k_{\text{tuki}})),$$

jossa $k_{\text{pakustannus}}$ on polttoaineen kustannus, μ_{kok} kokonaishyötysuhde, $\mu_{\text{sähkö}}$ sähkön-
tuotannon hyötysuhde, R rakennusaste, ja k_{tuki} mahdollinen sähkön tuotantotuki.
Polttoaineen kustannus lasketaan kaavalla

$$k_{\text{pakustannus}} = (k_{\text{pa}} + k_{\text{tod.vero}} + k_{\text{muut}} + k_{\text{päästö}}),$$

jossa k_{pa} on polttoaineen veroton hinta, $k_{\text{tod.vero}}$ polttoaineesta maksettava vero, k_{muut}
muut muuttuvat kustannukset ja $k_{\text{päästöt}}$ päästökaupasta aiheutuvat kustannukset. Yhteis-
tuotannon verotuksen huomioiva $k_{\text{tod.vero}}$ lasketaan kaavalla

$$k_{\text{tod.vero}} = 0,9 \mu_{\text{kok}} k_{\text{vero}} (1 - \mu_{\text{sähkö}}),$$

jossa k_{vero} on polttoaineen kokonaisvero. Hakesähkön tuotantotuen laskenta on esitetty
työn luvussa 4.1.1. Lisäksi täytyy huomioida puun osuus biokattilassa, joka on tässä 80
%. Erillislämmöntuotannon kustannukset on laskettu kaavalla

$$k_{\text{lämpö}} = \frac{k_{\text{pakustannus}}}{\mu_{\text{kok}}}$$

Vanhan lauhdetuotannon sähköntuotantokustannus $k_{\text{sähkö}}$ on laskettu kaavalla

$$k_{\text{sähkö}} = \frac{k_{\text{pa}} + k_{\text{päästö}}}{\mu_{\text{sähkö}}} + k_{\text{muut}} - k_{\text{tuki}}.$$

k_{muut} :n erilainen sijoittaminen johtuu lauhdetuotannon taustatietojen erilaisesta ilmoitusmuodosta. Tässä tapauksessa mukana on myös tuulivoima, jonka tuotantotuki laskeaan kaavalla

$$k_{tuki} = 83,5 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} - k_{sähkö},$$

jos sähkön hinta on positiivinen. Muutoin tukea ei makseta. Uuden lauhdetuotannon kustannuksiin on lisätty lisäksi jyvittyvä investointikustannus $k_{jyv.inv}$, joka lasketaan kaavalla

$$k_{jyv.inv} = k_{investointi} \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Kaavassa $k_{investointi}$ on investointikustannus, i korkokanta ja n investoinnin pitoaika, joka on merkitty taulukoissa taloudellisena elinikänä.

LIITTEEN LÄHDELUETTELO

- [1] Suomen virallinen tilasto (SVT) Energian hinnat, 1. Vuosineljännes 2017, Tilastokeskus, verkkosivusto. Saatavissa (viitattu 22.6.2017): http://www.stat.fi/til/ehi/2017/01/ehi_2017_01_2017-06-07_tie_001_fi.html.
- [2] Elspot Prices 2015 daily - Historical Market data, Nordpool Spot, verkkosivusto. Saatavissa (viitattu 5.4.2017): <http://www.nordpoolspot.com/historical-market-data/>.
- [3] Talousarvioesitys 2017: 07. Energiaverotus, Valtiovarainministeriö, verkkosivusto. Saatavissa (viitattu 20.3.2017): <http://budjetti.vm.fi/indox/download.jsp;jsessionid=0E145EF8372B4801D31D46D2A7997117?lang=fi&file=/2017/tae/valtiovarainministerionKanta/YksityiskohtaisetPerustelut/11/08/07/07.pdf>.
- [4] Koreneff, G., Lehtilä, A., Hurskainen, M., Pursiheimo, E., Tsupari, E., Koljonen, T. & Kärki, J. (2016). Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon hiilidioksidiveron puolituksen poiston vaikutukset, VTT-R-01173-16, VTT, Espoo, 64 s.
- [5] Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä, (2016). Loppuraportti - VALOR partners Oy Energiateollisuus ry, Helsinki.
- [6] Vakkilainen, E., Kivistö, A. & Tarjanne, R. (2012). Sähkön tuotantokustannusvertailu, 27, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, LUT Energia, Lappeenranta.