

# Ilmastopaneeli

---

LÄMPÖPUMPUT JA KAUKOLÄMPÖ  
ENERGIAJÄRJESTELMÄSSÄ

Suomen ilmastopaneeli  
Raportti 3/2013

SAMULI RINNE JA SANNA SYRI

## LÄMPÖPUMPUT JA KAUKOLÄMPÖ ENERGIAJÄRJESTELMÄSSÄ

S. RINNE, S. SYRI

Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu, energiatekniikan laitos, PL 14100, 00076 Aalto

### TIIVISTELMÄ

- Tässä työssä tarkasteltiin kaupunkien yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon (CHP, combined heat and power) kaukolämpöä osana laajempaa energijärjestelmää. Se on vähäpäästöinen tapa tuottaa yhdyskuntien lämmitys, ja sen ympäristöystävällisyyttä aliarvioidaan yleisesti. Samalla metodiikalla arvioitiin myös maalämpöpumppujen päästövaikutuksia. Ilmastopaneelin erillisessä osaraportissa on tarkasteltu hajautettuja energijärjestelmiä tarkemmin.
- CHP:n päästövaikutusten arvioinnissa tulee muistaa että vaihtoehto CHP:llä tuotetulle sähkölle on sekä pohjoismaisella markkinalla että tulevaisuuden yhdentyvällä Euroopan sähkömarkkinalla yleensä hiililauhdesähkö, jossa lämpöä ei oteta talteen hyötykäyttöön.
- Tämä huomioiden CHP-lämmön järjestelmätason päästöt ovat tuntipohjaiseen markkinatarkasteluun perustuen pienemmät kuin yleisesti laskenta-arvona käytetään, Suomen keskiarvona noin 40 gCO<sub>2</sub>/kWh. Tämä metodiikka pätee, kun halutaan selvittää mahdollisen muutoksen vaikutus, esimerkiksi vastaus kysymykseen: ”Mitä tapahtuu, jos rakennamme uudelle asuinalueelle CHP-laitoksen X?” tai ”Mitä tapahtuu, jos nykyisessä järjestelmässä, jossa on CHP-laitos X, kaukolämmön kulutus muuttuu?” (Tässä laitos X edustaisi keskimääräistä CHP-polttoainejakaumaa Suomessa. Luvussa 3.3 on esitetty päästövaikutukset eri polttoaineita käyttäville laistostyypeille).
- Vastaavasti maalämpöpumpuilla tuotetun lämmön päästökerroin on tuntipohjaiseen markkinatarkasteluun perustuen noin 200 gCO<sub>2</sub>/kWh, ja ilmalämpöpumpuilla yleisesti enemmän johtuen sekä huonommasta lämpökertoimesta että enemmän talviajalle painottuvasta sähkönkulutuksesta. Suoran sähkölämmityksen päästökerroin vastaavalla metodiikalla laskettuna on n. 650-700 gCO<sub>2</sub>/kWh. Tämä metodiikka pätee esimerkiksi vastauksena kysymykseen: ”Mitä tapahtuu, jos lisäämme lämpöpumppulämmitystä / suoraa sähkölämmitystä Suomessa?”
- Vastaavalla metodiikalla tulevaisuuden skenaarioissa CHP-kaukolämmön järjestelmätason päästöt ovat 0...300 gCO<sub>2</sub>/kWh ja maalämmön 50...250 gCO<sub>2</sub>/kWh, riippuen päästöoikeuksien hinnoista, polttoaineiden hintasuhteista ja ydinvoiman ja hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin tulevaisuuden määrästä energijärjestelmässä.
- Maalämpöpumput ovat hiili- ja turve-CHP-lämpöä vähäpäästöisempiä, jos sähköjärjestelmässä ydin- ja/tai CCS-sähkön määrä lisääntyy. Sen sijaan maakaasua tai merkittävässä määrin biomassaa käyttävä CHP-lämpö on tällöinkin hyvin vähäpäästöistä. Maalämpöpumput ovat kuitenkin suositeltava lämmitysmuoto korvaamaan esim. suoraa sähkölämmitystä.
- Yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa on järkevää siirtyä hallitusti kohti suurempaa uusiutuvan energian osuutta (yhtenä reunaehtona kannattavuus päästökaupan oloissa). Teknologisia mahdollisuuksia on useita (esim. hake, pelletit, torrefioidut pelletit, kierrätyspolttoaine kivihiilen korvaajina, biokaasu tai SNG maakaasun korvaajana). Erilaisen polttoaineen tuominen olemassa olevaan laitokseen voi olla järkevintä vaiheittaisena oppimisprosessina. Lisäksi uusien voimalaitosten rakentamisen myötä CHP-järjestelmissä ollaan siirtymässä kohti ko. monipolttoainevaihtoehtoja.
- Energijärjestelmän suunnittelussa on tehokkaan päästöjen vähentämisen lisäksi huomioitava riittävän oman sähköntuotantokapasiteetin turvaaminen erityisesti talviaikana, jolloin monet

uusiutuvan energian muodot eivät ole luotettavasti käytettävissä. Suomen voimalaitoskapasiteetti vanhenee, ja sähkön nettotuonin jatkuminen erityisesti Venäjältä on epävarmaa. Riittävän voimalaitoskapasiteetin lisäksi kysynnän hintajoustoon tulisi panostaa kaikilla sektoreilla, ja tuoda pörssin hintasignaalit suoraan tai jopa jyrkennettynä kuluttajille. Myös kaukolämmön hinnoittelua voisi kehittää marginaalikustannusten suuntaan. Tällöin CHP-lämpö olisi useimmiten erittäin edullista, mutta pakkasilla öljykattiloiden käydessä lämpö olisi huomattavasti kalliimpaa.

- Tuotannoltaan joustamattomien energialähteiden yleistyessä tulee uudet bio- tai muita polttoaineita käyttävät voimalaitokset rakentaa nopeasti säädettäviksi. Suomessa CHP-laitokset toiminevat tulevaisuudessa entistä enemmän säätövoimana.
- Uusien voimalaitosten suunnittelussa tulisi varmistaa tekninen valmius sekä suureen biopolttoaineiden osuuteen että mahdollisuuteen muunnella polttoainesuhteita. Tekninen mahdollisuus mahdollisuus eri polttoainejakeiden käyttöön on tärkeä myös hintasuojaa ajatellen, kun tulevaisuudessa puupolttoaineen kansainvälinen kysyntä kasvaa.
- Kotimaiset tukitoimet fossiilisten polttoaineiden vähentämiseksi tulisi kohdentaa päästökaupparektorin ulkopuolelle todellisten päästövähennemien aikaansaamiseksi.

Tulevaisuuden vähäpäästöisen energiajärjestelmän elementtejä Suomessa ovat:

- matalalämpötilainen lämmönjako (on hyötyä sekä CHP:n rakennusasteen, lämpöverkkojen mitoituksen, lämpöpumppujen että lämmön varastoinnin kannalta).
- lämmön varastointimahdollisuus lyhytaikaisesti rakenteisiin tai varastosäiliöihin ja pitkäaikaisesti kalliovarastoihin. Tällöin kulutus voidaan ajoittaa siten, että se tukee muuta energiajärjestelmää.
- nykyisten lämpöverkkojen säilyttäminen (ei-maakaasu-CHP:n ja pitkäaikaisvarastoinnin kannalta lähes välttämättömiä).
- Uusiutuvan energian tuominen ketjun eri vaiheisiin (biopolttoaineet keskitettyyn tuotantoon, aurinkolämpö, lämmön pientuotanto kulutuspäähän) ja mahdollisesti verkkojen avaaminen pientuotannolle.

Näillä keinoilla rakennusten lämmitys voidaan hoitaa sähköntuotannon "jätteillä" suurimman osan ajasta. "Jätettä" voi olla matalalämpötilainen energia (kuten CHP-kaukolämmössä nyt) tai tulevaisuudessa esim. muun kulutuksen kannalta väärään aikaan tuuli- tai ydinvoimalasta tuleva sähkö. Lämpöä on huomattavasti helpompi varastoida kuin sähköä, ja tämä voi tuoda järjestelmään lisää tärkeää säätömahdollisuutta.

Kulutuksen ja suunnittelun ohjaamiseksi sekä sähkö- että lämpöenergian hinnan tulisi vastata mahdollisimman hyvin ympäristövaikutuksia, pörssisähkön nykyisen hinnoitteluperiaatteen mukaan. Hintaviestin vain tulisi välittyä sellaisenaan tai jopa jyrkennettynä kuluttajalle saakka. Tämä kannustaisi vähentämään esim. pakkashuippujen aikaista lämmönkulutusta, joka hoidetaan öljykattiloilla. Kulutusjouston tulee tuoda hyötyä kuluttajalle. Hintavakautta haluavalle voisi olla tarjolla finanssituotteena takuuhintaisia tuotteita eli nykyhinnoittelun tapaista energiaa.

## ALKUSANAT

Suomen pitkän aikavälin tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 80% vuoteen 2050 mennessä. Myös Euroopan komission joulukuussa 2011 julkaiseman vähähiilisyiden tiekartan tavoitteena on lähes päästötön energiajärjestelmä vuoteen 2050 mennessä.

Energiajärjestelmä ja sen eri ohjaukeinit EU-tasolla muodostavat monimutkaisen kokonaisuuden. Eri osasektorit ovat kytköksissä toisiinsa sekä energiavaroihin. Yhdellä osasektorilla tehdyt muutokset, kuten päästönrajoitustoimet, vaikuttavat usein muihin osasektoreihin ja päästöihin, jopa muissa maissa. Kytkennät voivat heikentää toimenpiteen päästönvähennysvaikutusta merkittävästi. Samalla toimenpiteen kustannustehokkuus voi alentua.

Ilmastopaneeli päätti loppukeväästä 2012 käynnistää energiajärjestelmän päästönvähennystoimia koskevan selvityshankkeen, johon osallistuvat ympäristöministeriön tekemillä rahoituspäätöksillä Teknologian tutkimuskeskus (VTT), Aalto-yliopisto, Suomen ympäristökeskus (SYKE), Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus (MTT) sekä Helsingin yliopiston (HY) opettajankoulutuslaitos ja metsätieteiden laitos. Työn tavoitteena on tarkastella aihepiirejä, jotka ovat haasteita ilmasto- ja energiastrategian laadinnassa ja joiden hallintaa tulisi kehittää.

Tässä osahankkeessa selvitettiin saatavilla olleen tiedon pohjalta, miten Suomen sähköjärjestelmä, yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto sekä lämpöpumput keskimäärin toimivat tuntitasolla vuoden eri aikoina. Tämän pohjalta arvioitiin eri lämmitysmuotojen mahdollisten muutosten vaikutuksia sähköjärjestelmään ja siten kokonaisuuden päästöihin. Tämän pohjalta arvioitiin suositeltavia toimia ja muutoksia, jotka edesauttavat lämmityksen päästöjen vähentämistä osana koko energiajärjestelmää. Koska Suomessa sekä sähkön että lämmön kulutus ja myös eri tuotantomuotojen käyttö vaihtelevat voimakkaasti eri vuodenaikoina, vain vuoden keskiarvoisten tietojen käyttäminen voi antaa huomattavan harhaanjohtavia tuloksia.

Mitä voimakkaampiin toimiin energiasektorin päästöjen rajoittamiseksi ryhdytään, sitä tärkeämpää on analysoida monipuolisesti sekä toimien vaikutukset muuhun energiajärjestelmään että toimien yhteensopivuus EU-tason lainsäädännön kanssa. Yhteiskunnan voimavarat ovat rajalliset, ja toimet tulee kohdentaa niin, että niillä saavutetaan mahdollisimmat tehokkaat päästövähennykset ja tuetaan rakenteellista siirtymää päästöttömiin energiajärjestelmiin.

Espoossa 21.1.2013

Sanna Syri  
Energiatalouden professori, Aalto-yliopisto

Samuli Rinne  
Tohtorikoulutettava, Aalto-yliopisto

## SISÄLTÖ

### 1. Kaukolämpö ja CHP osana suomalaista energiajärjestelmää

- 1.1. CHP:n peruseriaate
- 1.2. Tuotantomäärät nyt ja tulevaisuudessa
- 1.3. Euroopan sähköntuotannon tulevaisuudennäkymät
- 1.4. Polttoaineet Suomen kaukolämpö- ja lauhdevoimalaitoksilla

### 2. Lämpöpumput osana suomalaista energiajärjestelmää

- 2.1. Lämpöpumppujen peruseriaate
- 2.2. Tuotantomäärät nyt ja tulevaisuudessa

### 3. Tulokset: CHP-kaukolämmön ja lämpöpumppujen käytön muutosten vaikutukset

- 3.1. Sähkökulutuksen *muutoksen* päästökerroin on ainakin lyhyellä aikavälillä merkittävästi suurempi kuin vuosittainen keskiarvo ”koko sähköntuotannon päästöt jaettuna vuosituotannolla”
- 3.2. ...joten CHP-kaukolämmön kulutusmuutosten vaikutus on paljon yleisesti ajateltua pienempi lyhyellä aikavälillä
- 3.3. Kaukolämmön laitostyyppikohtaiset erot ovat kuitenkin suuria
- 3.4. Jos lämmitykseen käytetään lämpöpumppua CHP-kaukolämmön sijasta, nykytilanteessa päästöt kasvavat
- 3.5. Pitkällä aikavälillä ratkaisujen hyvyys riippuu ilmastopolitiikan kunnianhimoisuudesta: mitä kunnianhimoisempaa, sitä vähäpäästöisempiä lämpöpumput ovat järjestelmätasolla, CHP:n osalta päinvastoin

### 4. Johtopäätökset

- 4.1. Sähkön tuotanto- tai kulutusmuutosten vaikutuksia tulisi tarkastella kulutuksen ajoittuminen huomioiden
- 4.2. CHP on tällaisissa kokonaisjärjestelmätarkasteluissa ympäristön ja päästöjen vähentämisen kannalta järkevä, myös käyttäessään fossiilisia polttoaineita.
- 4.3. Voimakkaalla ydinvoiman, CCS-lauhdevoiman ja/tai aurinko- ja tuulienergian lisäyksellä CHP-kaukolämpö voi olla yhä hyvä päästöjä vähennyskeino, mutta se edellyttää muutoksia järjestelmään.
- 4.4. Lämpöpumput voivat erityisesti tietyillä ehdoilla olla myös osa vähäpäästöistä energiajärjestelmää
- 4.5. Talviajan sähkökapasiteetin riittävyys on turvattava
- 4.6. Kaukolämpöverkot kannattaa säilyttää ja uusia rakentaa
- 4.7. Rakennusten lämmitys voidaan hoitaa käyttäen pääasiassa sähköntuotannon ”jätteitä”
- 4.8. Matalaenergiakaukolämpöä kannattaa edistää
- 4.9. Päästökauppasektorin päällekkäiset toimet eivät vähennä päästöjä

### Viitteet

LIITE. Laskentamenetelmien kuvaus: elinkaariarviontimenetelmien vertailua.

Johdanto

1. ALCA (attribitional life cycle assessment) sopii tietyin rajoituksin stabiilin tilan tarkasteluun, mutta ei kuvaa muutoksen vaikutuksia

2. CLCA (consequential life cycle assessment) on vaikeampi tehdä, mutta soveltuvampi kun tarkastellaan muutosta

3. Entä välilliset vaikutukset ?

4. Laskennassa käytetyt menetelmät ja lähtötiedot

4.1. Nykyhetken oletus: Sähköpörssin tuntihinta on kutakuinkin verrannollinen ns. marginaaliteknologiaan

4.2. Tulevaisuuden mahdollinen kehitys: teknis-taloudellinen voimalaitoskannan optimi nykyiselle sähkön kulutusprofiilille ja katsotaan, miten CHP tai lämpöpumppujen aiheuttama kulutusprofiilin muutos vaikuttaa siihen.

4.2.1. Investoinniltaan kalliit laitokset kuten ydinvoima ja CCS sopivat peruskuorman ajoon

4.2.2. Vesivoimalla voidaan tasata osa sähkönkulutuksen päivä- ja vuodenaikaisvaihtelusta, mutta kapasiteetti on rajallinen, Euroopan tasolla arviolta noin 40 % päivävaihtelusta

4.2.3. Tuuli- ja aurinkovoima vaativat paljon säätövoimaa

4.2.4. CHP-tuotanto tasaa myös sähkönkulutuksen päivävaihtelua

4.2.5. Lämpöpumput lisäävät sähkönkulutuksen päivä- ja vuodenaikaisvaihtelua

4.2.6. Nykyinen sähköpörssin hinnoittelujärjestelmä ei kannusta rakentamaan ydinvoimaa tai CCS:ää yli vakiona pysyvän kulutuksen osan

## 1. KAUKOLÄMPÖ JA CHP OSANA SUOMALAISTA ENERGIAJÄRJESTELMÄÄ

### 1.1. CHP:N PERUSPERIAATE

CHP-tuotannossa voimalaitoksen muuten hukkaan menevää lämpöä käytetään rakennusten lämmittämiseen tai teollisuusprosesseihin. Yhteistuotannossa menetetään hiukan tuotettua sähkötehoa verrattuna pelkkään sähköntuotantoon lauhdevoimaloissa, mikä korvautuu monin verroin lämpönä.

### 1.2. TUOTANTOMÄÄRÄT NYT JA TULEVAISUUDESSA

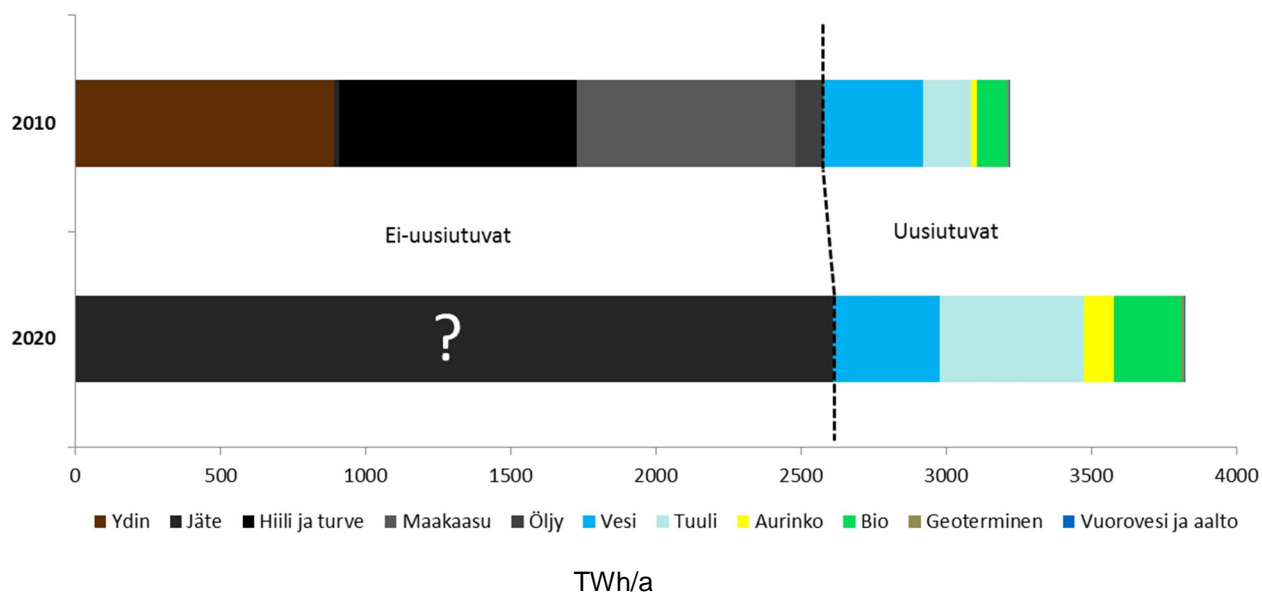
Suomessa kaukolämpövoimalat tuottivat vuonna 2010 sähköä 18 TWh (20 % Suomen sähkön kokonaiskulutuksesta) ja lämpöä 29 TWh (35 % Suomen lämmitysenergian loppukulutuksesta). Tuotannon keskimääräinen kokonaishyötysuhde oli 85 % ja rakennusaste eli sähkön- ja lämmöntuotannon suhde 0,61. (Tilastokeskus 2011)

CHP-kaukolämmön lisäyspotentiaali on yleensä arvioitu Suomessa melko vähäiseksi, koska suurimmat (=kannattavimmat) kaukolämpövoimalaitokset on jo rakennettu. Pienvoimalaitoksissa saattaa kuitenkin olla huomattava potentiaali. Polttoaineita suoraan lämmöksi polttamalla tuotetaan Suomessa lämmitysenergiaa noin 18 TWh/a ja sähköllä 14 TWh/a (Tilastokeskus 2011). Tekniikasta riippuen tätä lämpökuormaa vastaan saataisiin sähköä 10-30 TWh/a, joskin on epärealistista olettaa CHP-tuotannon olevan kannattavaa tai käytännössä toteutuvaa kaikessa lämmityksessä.

Toinen tapa lisätä CHP-sähköntuotantoa on parantaa CHP-laitosten rakennusastetta. Se noussee kiinteitä polttoaineita käyttävissä suurissa laitoksissa laitoskannan uudistumisen myötä tasolle 0,6...0,7, kun se nyt kaikissa kiinteän polttoaineen laitoksissa on keskimäärin noin 0,45 (Tilastokeskus 2011). Sähköntuotannon lisäyspotentiaalia tässä on teoriassa noin 5 TWh, käytännössä vähemmän, koska pieniä laitoksia ei ainakaan tähän asti ole kannattanut varustella korkeaa rakennusastetta tavoitellen. Kaasutustekniikalla olisi mahdollista päästä rakennusasteessa 1:n suuruusluokkaan, mutta tekniikan kehitys on vielä kesken. Kaasukombilaitosten rakennusaste on jo nyt noin 1 ja niiden rakentaminen olisikin todennäköisissä tulevaisuuden skenaariossa tehokas keino pienentää päästöjä. Maakaasun viimeaikainen hinnannousu ja riippuvuus yhdestä toimittajasta saattavat olla esteitä maakaasun nykyistä laajemmalle käytölle CHP-tuotannossa.

### 1.3. EUROOPAN SÄHKÖNTUOTANNON TULEVAISUUDENNÄKYMÄT

Tällä hetkellä noin puolet EU-27-alueen sähköntuotannosta perustuu fossiilisiin polttoaineisiin. CHP:n osuus on 11 % eli vajaa 400 TWh (Euroopan komissio 2012). Lisäyspotentiaalia on arvioitu olevan siten, että CHP-sähköntuotanto voisi olla noin 1000 TWh (COGEN 2012). Kuvassa 1 on esitetty sähköntuotanto Euroopassa vuonna 2010 ja ennakoitu tilanne vuonna 2020 uusiutuvan energian kansallisten toimintasuunnitelmien (NREAP) perusteella (Beurksens ym. 2011). Uusiutuvat kattavat referenssiskenaariossa vain kulutuksen lisäyksen. Energiategohkuusskenaariossa sähkönkulutus olisi referenssiskenaariota noin 300 TWh pienempi vuonna 2020 ja primäärienergiankulutus sama kuin 2010, mutta CHP:llä tai uusiutuvilla korvattavaa hiili-, kaasu- ja öljylauhdevoimaa jäisi silti runsaasti, varsinkin huomioiden esimerkiksi Saksan suunnitelman luopua ydinvoimasta vuoteen 2022 mennessä.



Kuva 1. Sähkön tuotanto Euroopassa (EU-27) 2010 ja ennakoitu tilanne vuonna 2020. (Beurskens ym. 2011)

## 1.4. POLTTOAINEET SUOMEN KAUKOLÄMPÖ- JA LAUHDEVOIMALAITOKSILLA

Polttoainejakauma vuonna 2010 oli taulukon 1 mukainen (Tilastokeskus 2011). Vertailun vuoksi mukana on myös Suomen lauhdevoimalaitosten keskimääräinen polttoainejakauma.

	Lauhdevoimalaitokset	Kaukolämpövoimalaitokset
Maakaasu	6	38
Kivihiili	58	29
Turve	21	20
Puu	7	10
Öljy	2	2
Muu	6	1

Taulukko 1. Polttoaineet Suomen lauhde- ja CHP-kaukolämpövoimalaitoksilla vuonna 2010, % (Tilastokeskus 2011).

Näistä osuuksista laskien polttoaineen (ei siis sähkön tuotannon) keskimääräinen päästökerroin oli kaukolämpövoimalaitoksilla 63 g/MJ eli 227 g/kWh ja lauhdevoimalaitoksilla 83 g/MJ eli 299 g/kWh.

Puun käyttö ohjautunee enemmän CHP-laitoksille kuin lauhdelaitoksille, koska ensin mainitut ovat keskimäärin lähempänä puupolttoainevaroja, lisäksi nykyisissä lauhdelaitoksissa puun tekninen käyttömahdollisuus on varsin rajallinen. Vuodesta 2000 lähtien metsäenergian käytön kasvusta noin 80 % on ohjautunut teollisuuden tai kaukolämmön tuotannon CHP-laitoksiin (Metsäntutkimuslaitos 2012), ja tämä kehitys myös jatkunee, ellei esimerkiksi tukipäätöksillä toisin ohjata.

Taulukon 1 oikea sarake kuvaa polttoaineiden kulutusta yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa. Tyypillisen mitoituksen mukaan kaukolämpövoimalaitokset ovat täydellä teholla noin -5 °C lämpötilassa, jota kylmemmissä lämpötiloissa joudutaan ottamaan käyttöön huippukuormakattiloita, jotka tuottavat

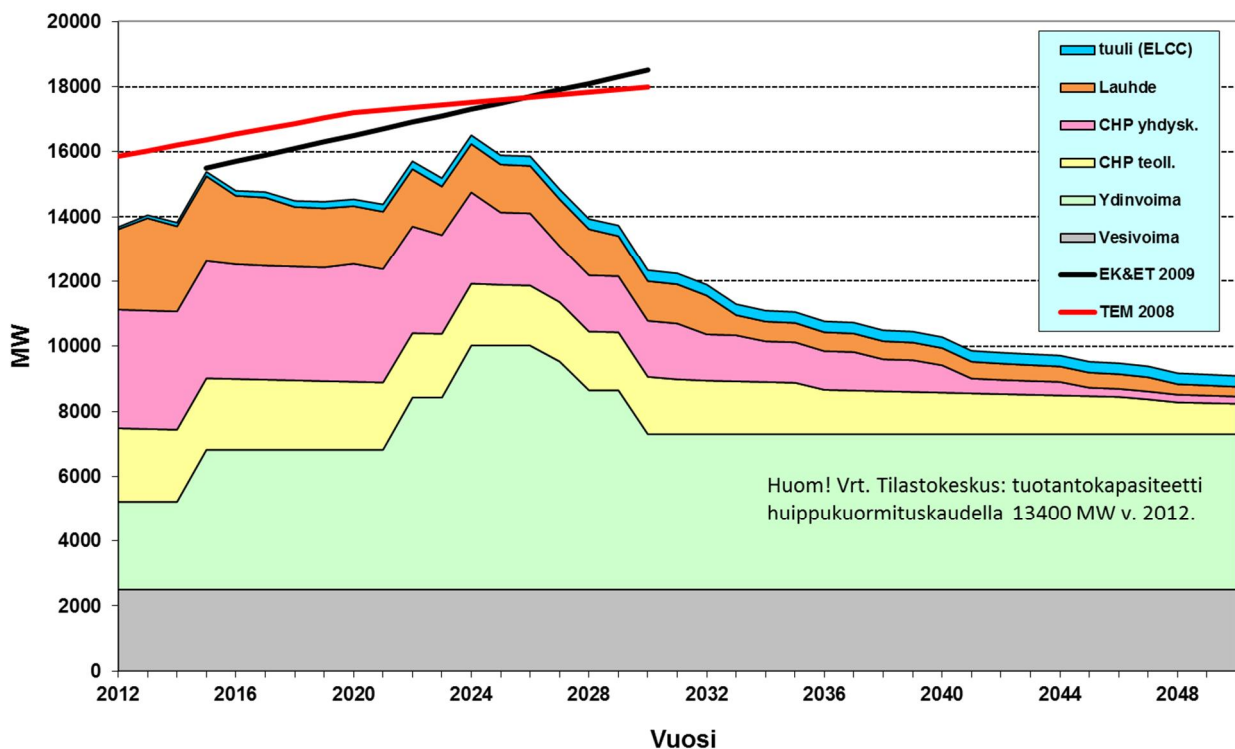


vain lämpöä, yleensä öljyllä. Näin ollen CHP-verkkojen kaukolämpöä kannattaisi säästää ennen muuta kovilla pakkasilla. Huippukuormakattilat tuottavat noin 5-10 % koko lämmönkulutuksesta.

Sähköntuotannon tulevan kehityksen mahdollisuuksia Suomessa voi arvioida kuvasta 2 (Syri ym. 2012). Kuva näyttää, mitä kapasiteettia on nyt ja miten sen on arvioitu poistuvan teknisen vanhentumisen vuoksi. Lauhdekapasiteetin eliniäksi on oletettu 40 vuotta ja CHP:n 50 vuotta. Tuulivoimaa on oletettu rakennettavan 1500 MW vuoteen 2020 mennessä ja 3000 MW vuoteen 2030 mennessä. Sen käytettävyys huippukulutuksen aikana on arvioitu ns. Effective Load Carrying Capability-metodiikalla. Pienillä osuuksilla käytettävyys huipun aikana on noin 20% nimellistehosta ja 3000 MW:n tasolla 11%. Kaikkea uutta kapasiteettia rakennettaneen teknis-taloudellisen optimin mukaan, esim. tulevaa polttoaineiden hintakehitystä ja päästöoikeuden hintaa ennakoiden ja sähköntuotannon ajoittuminen päivä- ja vuositasolla huomioiden.

Kaaviossa on oletettu uusien ydinvoimahankkeiden toteutuminen tällä hetkellä voimassa olevien suunnitelmien mukaisesti, eli Olkiluoto 3:n jälkeen 2020-luvun alkupuolella käyttöön tulisivat Fennovoiman laitos ja Olkiluoto 4.

On syytä huomata, että vaikka uusimmat sähkön tarpeen ennusteet ovat todennäköisesti alempia kuin vuoden 2008 energia- ja ilmastostrategian yhteydessä laaditut, niin uutta sähköntuotantokapasiteettia erityisesti talvikauden tarpeeseen tullaan tarvitsemaan. Sähköntuotannon investoinnit ovat pitkäaikaisia, ja siksi on tärkeää että tulevaisuuden tuotantorakenne ohjautuu vähäpäästöiseen suuntaan. Uusiutuvan sähköntuotannon lisäämismahdollisuudet talvikauden tarpeeseen ovat varsin rajalliset – lähinnä bioenergia on luotettavasti käytettävissä.



Kuva 2. Suomen sähköntuotannon kapasiteetin ja kulutuksen huipputehontarpeen kehitys (Syri ym. 2012).

## 2. LÄMPÖPUMPUT OSANA SUOMALAISTA ENERGIAJÄRJESTELMÄÄ

### 2.1. LÄMPÖPUMPPUJEN PERUSPERIAATE

Lämpöpumppu ottaa lämpöä matalalämpötilaisesta, edullisesta lämmönlähteestä ja luovuttaa sitä korkeammassa lämpötilassa käyttökohteeseen. Tämä on mahdollista käyttämällä ”arvokkaampaa” energiaa, kuten sähköä tai esim. 50 astetta lämmönluovutustilaa kuumempaa vettä. Pumpun voi tavallaan ajatella hyödyntävän arvokkaammassa energianlähteessä olevan potentiaalin tehdä työtä (=exergian). Mitä pienempi lämpötilannostotarve on, sitä vähemmän ”arvokasta” energiaa tarvitaan eli sitä parempi on lämpökerroin, COP (coefficient of performance). COP on maalämpöpumpuilla yleensä välillä 4,5...2,5, kun lämmityskiertoon menevä vesi on 30...60-asteista. Tällöin lämmönlähteen eli maaputkistossa kiertävän nesteen lämpötila on noin 0 C. Ilmalämpöpumpuilla COP on huonompi, vuositasolla luokkaa 2,5. Kovilla pakkasilla ilmalämpöpumput lopettavat toimintansa kokonaan tai ainakin teho heikkenee ja COP pienenee lähelle yhtä (=suora sähkölämmitys), koska lämpötilaero kasvaa liian suureksi.

Investointikustannusten pienentämiseksi lämpöpumput mitoitetaan usein noin 60 %:lle tarvittavasta maksimilämmitystehosta. Loppu tuotetaan yleensä sähkövastuksilla tai öljyllä. Sähkövastusten käyttö ei ole hyvä asia verkon tai voimalaitosten taloudellisen käytön kannalta, koska se ajoittuu yleensä aikaan, jolloin kulutus on muutenkin suurimmillaan. Koska toistaiseksi sähkön kuluttajahinnoittelu on vain harvoin sähkön pörssihintaan (joka voi huippujen aikaan nousta hyvinkin korkealle) perustuvaa, täystehopumppu ei välttämättä ole kuluttajalle rahallisesti houkutteleva. Se olisi kuitenkin kokonaisuutta ajatellen todennäköisesti järkevämpi ratkaisu kuin osatehospumppu. Mitoitus täysteholle vähentäisi päästöjä suuruuluokkaa 15%.

Lämpöpumppuja voidaan käyttää myös jäähdytykseen kuten kylmäkoneissa. Joitakin lämpöpumppuja, kuten ilmasta ilmaan lämpöä siirtäviä (yleensä vain ilmalämpöpumpuiksi kutsuttuja) voidaan käyttää sekä lämmitykseen että jäähdytykseen kääntämällä lämmönluovutuksen suunta.

Kuumalla vedellä tai höyryllä toimivia lämpöpumppuja kutsutaan sorptiopumpuiksi. Niiden toiminta perustuu sähkökäyttöisten laitteiden kompressorin sijasta erilaisten liuosten kierrättämiseen ja sekoittamiseen, jolloin näissä imeytymisprosesseissa syntyviä lämpövirtoja käyttämällä saadaan aikaan haluttu lämmönsiirto. Laitteet ovat kookkaita ja COP huonompi kuin kompressorimalleissa, luokkaa 1,5...2, mutta toisaalta käyttöenergia voi olla halvempaa kuin sähkö. Lämmönluovutuksen maksimilämpötila on noin 35 astetta, mikä kuitenkin olisi riittävä matalalämpötilajärjestelmiin. Kaupalliset sovellukset varsinkin lämmitystarkoituksiin ovat kuitenkin toistaiseksi harvinaisia.

### 2.2. TUOTANTOMÄÄRÄT NYT JA TULEVAISUUDESSA

Lämpöpumpuilla tuotetaan Suomessa nykyään lämpöä noin 4 TWh/a, johon kuluu sähköä noin 1,4 TWh/a (Tilastokeskus 2011). Suurin osa lämpöpumpuista sekä lukumääräisesti että antamansa tehon perusteella on omakotitaloissa, ellei kauppojen kylmäkoneita lueta mukaan. EU-27-alueella lämpöpumppulämpöä tuotetaan nyt noin 50 TWh/a. Määrien arvioidaan kolminkertaistuvan vuoteen 2020 mennessä (Beurskens ym. 2012).

Muut kuin sähkökäyttöiset lämpöpumput ovat harvinaisia. Helsingin Energialla on suuri, kuumaa kaukolämpöä käyttävä absorptiolämpöpumppu kaukokylmän tuotannossa. Absorptio- ja hieman viileämmällä vedellä toimiva adsorptiolämpöpumppu ovat kuitenkin mahdollisia tulevaisuuden ratkaisuja esimerkiksi kaukolämpöverkoissa tai muualla, missä edullista lämpöä on saatavissa.

Maalämpöpumppuja on asennettu melko paljon öljylämmitystaloihin. Olemassa olevaan vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään pumpun liittäminen onkin helppoa. Potentiaalia on Suomessa teoriassa noin 8

TWh lämmitysenergian tuottona mitaten, olettaen, että kaikki öljyn lämmityskäyttö voitaisiin korvata lämpöpumpuilla (Tilastokeskus 2011). Tämä tuskin toteutuu, mutta varsin suuri osa potentiaalista lienee kannattavastikin toteutettavissa. Investoinnin takaisinmaksuaika on noin 10 vuotta, riippuen tosin suuresti öljyn hintakehityksestä.

Koko järjestelmän energiatehokkuuden kannalta olisi suotavaa korvata myös suoraa sähkölämmitystä (Suomessa 14 TWh/a, Tilastokeskus 2011) esimerkiksi maalämpöpumpuilla. Tämä ei täysin tasaisi kulutushuippuja talviaikaan, mutta säästäisi sähköä vuositasolla. Suorasähkötaloon olisi kuitenkin asennettava vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä, jonka hinta tyypilliseen omakotitaloon jälkiasennuksena on luokkaa 2000-7000 euroa lämmönjaon tasaisuuden vaatimustasosta riippuen. Tämä pidentää takaisinmaksuaikaa muutamalla vuodella, mutta investointi on silti melko pieneen riskiinsä suhteutettuna kannattava, toisin kuin usein annetaan ymmärtää. Toisaalta sähköisen lattialämmityksen korvaaminen vesikiertoisella vastaavalla tuskin kannattaa, ellei lattiapinnoitetta ole uusittava joka tapauksessa. Ilmalämpöpumput säästävät sähköä vuositasolla verrattuna suoraan sähkölämmitykseen, mutta pakkasoloissa ne ovat huomattavasti tehottomampia kuin maalämpöpumput.

### 3. TULOKSET: CHP-KAUKOLÄMMÖN JA LÄMPÖPUMPPUJEN KÄYTÖN MUUTOSTEN VAIKUTUKSET

#### 3.1. SÄHKÖNKULUTUKSEN MUUTOKSEN PÄÄSTÖKERROIN ON AINAKIN LYHYELLÄ AIKAVÄLILLÄ MERKITTÄVÄSTI SUUREMPI KUIN VUOSITTAINEN KESKIMÄÄRÖ ”KOKO SÄHKÖNTUOTANNON PÄÄSTÖT JAETTUNA VUOSITUOTANNOLLA”

Liitteen kohdassa 4.1. kuvatulla tavalla laskien saadaan keskimääräiseksi pienen sähkönkulutuksen muutoksen päästökertoimeksi 680 gCO<sub>2</sub>/kWh vuoden 2010 esimerkkitilanteessa. Tämä muutoksen vaikutuksia kuvaavan CLCA-laskentatavan (ks. liitteen kappaleet 1 ja 2) mukaan saatu tulos on merkittävästi enemmän kuin yleensä käytetty noin 200 g/kWh (Motiva 2004), joka puolestaan saadaan vuosikeskiarvoja käyttävällä ALCA-laskentatavalla (myös kuvattu liitteessä). Sähköntuotannon vuosikeskiarvopäästöjen käyttö ei sovellu muutoksen vaikutusten kuvaamiseen muuten kuin mahdollisesti pitkällä aikavälillä (energiatekniikan kyseessä ollen yli 10...20 vuotta) eikä silloin, kun tuotantorakenne mahdollisesti muuttuu. Muutoksen vaikutusten ilmaisemiseen tulee käyttää nimenomaan CLCA-menetelmää. (Useita lähteitä, luettelossa numerot 8-18)

#### 3.2. ...JOTEN CHP-KAUKOLÄMMÖN KULUTUSMUUTOSTEN VAIKUTUS ON PALJON YLEISESTI AJATELTUA PIENEMPI LYHYELLÄ AIKAVÄLILLÄ

Kun on näin arvioitu sähkön kulutusmuutoksen vaikutus, voidaan tästä edelleen johtaa se, miten CHP-tuotannon muutos vaikuttaa järjestelmään. Tämä voidaan laskea siten, että tarkasteltavan laitoksen kokonaispäästöistä vähennetään päästöt, jotka vältettiin tuottamalla sähköä eli vähentämällä verkosta tulevan sähkön kulutusta. Vältetyn sähkönoston päästökerroin on edellä mainitun mukaisesti tässä tapauksessa 680 g/kWh, jolloin CHP-kaukolämmön aiheuttamaksi päästölisäykykseksi jää suomalaisen, keskimääräisen CHP-laitoksen polttoainejakaumaa ja rakennusastetta laskennassa käyttäen vain 9 g/kaukolämpö-kWh. Se on erittäin vähän verrattuna vaikkapa sähkönkulutuksen muutokseen vastaavaan vaikutukseen, joka siis oli 680 g/kWh ja myös ”virallisena” lukuna kaukolämmölle käytettyyn 200 g:aan/kWh (Motiva 2004).

Huippupakkasten aikainen öljynkäyttö on kuitenkin otettava vielä huomioon, jolloin kaukolämmön kulutusmuutoksen päästövaikutuksiksi tulee keskimäärin noin 40 g/kWh, joka edelleenkin on hyvin pieni. Tilanne voi kuitenkin olla toinen tulevaisuudessa, jos uusiutuvien, ydinvoiman ja/tai CCS:n (carbon capture and storage) osuus sähköntuotannossa kasvaa dramaattisesti. Tätä ei kuitenkaan liene tapahtumassa ainakaan 20-30 vuoteen. Varastoinnin (Lund 2002) ja järjestelmien älykkään ohjauksen

seurauksena päästöt saataaneen pysymään silti pieninä kaikissa todennäköisissä skenaarioissa, mistä lisää luvussa 4.6.

### 3.3. KAUKOLÄMMÖN LAITOSTYYPPIKOHTAISET EROT OVAT KUITENKIN SUURIA

Nykytilanteessa on otettava huomioon, että tarkasteltavaa verkkoa syöttävällä kaukolämpövoimalaitoksella käytetyillä polttoaineilla ja sähkön- ja lämmöntuotannon suhteella (rakennusaste eli sähköntuotanto/lämmöntuotanto) on merkitystä tulokseen. Taulukossa 2 on esitetty vastaavan määrittelyn tulos eri laitostyypeille.

Kaukolämpölaitoksen tyyppi	Rakennusaste	Polttoaineet, %	Kaukolämmön kulutusmuutoksen vaikutus lyhyellä aikavälillä, g CO <sub>2</sub> /kaukolämpö-kWh
Pieni, kotimainen polttoaine KPA (esim. Forssa)	0,35	Turve 60 Puu 40	150
Suuri, kotimainen polttoaine KPA (esim. Keljonlahti, Jkl)	0,6	Turve 60 Puu 40	60
Kaasukombi-CHP (esim. Vuosaari, Hki)	1,0	Maakaasu 100	-180
Hiili-CHP (esim. Salmisaari B, Hki)	0,6	Kivihiili 100	230
Hiili + puupelletti -CHP (suunnitteilla Helsinkiin)	0,6	Hiili 90 Puu 10	190

Taulukko 2. CHP-kaukolämmön säästön vaikutus järjestelmätason päästövähennykseen tapauksissa, joissa CHP-sähköntuotannon muutos vaikuttaa suurimmaksi suomalaiseseen, keskimääräiseen lauhdesähköntuotantoon. Muutos vaikuttaa ajoittain myös CHP-tuotantoon ja vesivoiman tuotantoon, mikä on otettu huomioon liitteen kuvan 4 mukaisesti. Huippukuormalaitosten öljynkäyttö on huomioitu. Taulukko kuvaa tyypillistä nykytilannetta.

Kaasukombin negatiivinen päästökerroin johtuu siitä, että polttoaineen päästökerroin on pienempi kuin lauhdevoimaloissa keskimäärin käytetyn seoksen ja siitä, että kaasukombin sähköntuotantohyötysuhde on kaukolämpöäkin tuottaessa parempi kuin keskimääräisen lauhdevoimalaitoksen (noin 45% vs. 37%, Tilastokeskus 2011).

Kotimaisen polttoaineen laitosten polttoaineseos antaa saman polttoaineen päästökertoimen kuin kaukolämpövoimalaitoksilla on nyt. Lisäksi kyseinen suhde on tämän hetken päästöoikeuksien hinnoilla realistinen käytettäväksi keskiarvona soveltuvilla laitoksilla.

Varsinkin niissä kaukolämpöverkoissa, joissa lämpö tuotetaan hyvän rakennusasteen kotimaisten polttoaineen laitoksella tai kaasukombilla, lämmönsäästön kannattavuus on yleisesti ajateltua huonompi.

### 3.4. JOS LÄMMITYKSEEN KÄYTETÄÄN LÄMPÖPUMPPUA CHP-KAUKOLÄMMÖN SIJASTA, NYKYTILANTEESSA PÄÄSTÖT KASVAVAT

Kohdassa 3.1. todettiin, että sähkönkulutuksen muutoksen päästökerroin on esimerkiksi Suomen vuoden 2011 tilanteelle 680 gCO<sub>2</sub>/kWh CLCA-laskentatavan mukaisesti ajateltuna. Ottaen huomioon kulutuksen

jakauman vuositasolla ja maalämpöpumpun tässä käytetyn lämpökertoimen 3,2, saadaan lämpöpumpulla tuotetun lämmön vuosittaiseksi päästökertoimeksi lyhyellä aikavälillä 216 gCO<sub>2</sub>/kWh. Tämä on 4-5-kertainen CHP-kaukolämmön keskiarvoon (taulukon 4 laitostyyppien painotettu keskiarvo) verrattuna. Ilma- ja ilma-vesilämpöpumppujen lämpökerroin on huonompi ja kulutus ajoittuu vielä enemmän talviaikaan, jolloin säätävä sähköntuotanto on vuosikeskiarvoa enemmän hiili- tai muuta lauhdevoimaa, joten niiden tuottaman lämmön päästökertoimet ovat vastaavasti suurempia.

### 3.5. PITKÄLLÄ AIKAVÄLILLÄ RATKAISUJEN HYVYYS RIIPPUU ILMASTOPOLITIIKAN KUNNIANHIMOISUUDESTA: MITÄ KUNNIANHIMOISEMPAA, SITÄ VÄHÄPÄÄSTÖISEMPIÄ LÄMPÖPUMPUT OVAT JÄRJESTELMÄTASOLLA, CHP:N OSALTA PÄIN VASTOIN

Hieman yksinkertaistaen voidaan luvuissa 1-2 ja liitteessä esiteltyjen lähtökohtien perusteella todeta, että nykyisellä hinnoittelu- ja investointilogiikalla tasaisen peruskuorman ylittävä osa, kuten lämmityssähkö, tehtäisiin käytännössä kokonaan lauhdevoimalla, ellei CHP-tuotantoa olisi. Vastaavasti CHP-kaukolämmön tuottama, rakennusten lämmitykseen menevä lämpöenergia ja sen ohessa tuotettu sähkö korvaavat nykyisellään enimmäkseen lauhdevoimaa. CHP-kaukolämmön todelliset päästöt ovat tällöin sen sähköntuotannon päästöt, joka korvaa CHP-tuotannon sähköntuotannon menetyksen lauhdetuotantoon verrattuna. Tähän on lisättävä huippukuormalämpölaitosten öljynkäyttö, joka on useimmiten 5-10% koko kaukolämpöenergiasta.

Kuvat 3 ja 4 esittävät potentiaalisia CHP-kaukolämmön ja maalämpöpumpun tuottaman lämmön aikaansaamia hiilidioksidipäästöjä tulevaisuudessa. "Potentiaalisuus" tarkoittaa tässä sitä, että on laskettu teknis-taloudellinen lauhdevoimalaitosyhdistelmän optimi tietynlaiselle sähkön vuosikulutusprofiilille tilanteissa, joissa joko tuotetaan CHP-lämpöä (ja siten myös CHP-sähköä) tai käytetään maalämpöpumppua (International Energy Agency 2010, Tzimas ym. 2009). Näitä on verrattu tilanteeseen, joissa lämpöä ei kuluisi lainkaan sen kummempin CHP:llä kuin maalämmölläkään tuotettuna. Näiden "tuotetaan/ei tuoteta"-tilanteiden erosta saadaan ko. lämmitysmuodon järjestelmätason päästöt, kuten luvussa 1.3.2. on kuvattu. Päästöt voivat olla myös negatiiviset, jos vaihtoehtona CHP-tuotannolle olisi käytetyillä oletuksilla ollut suuripäästöisempi lauhdetuotanto.

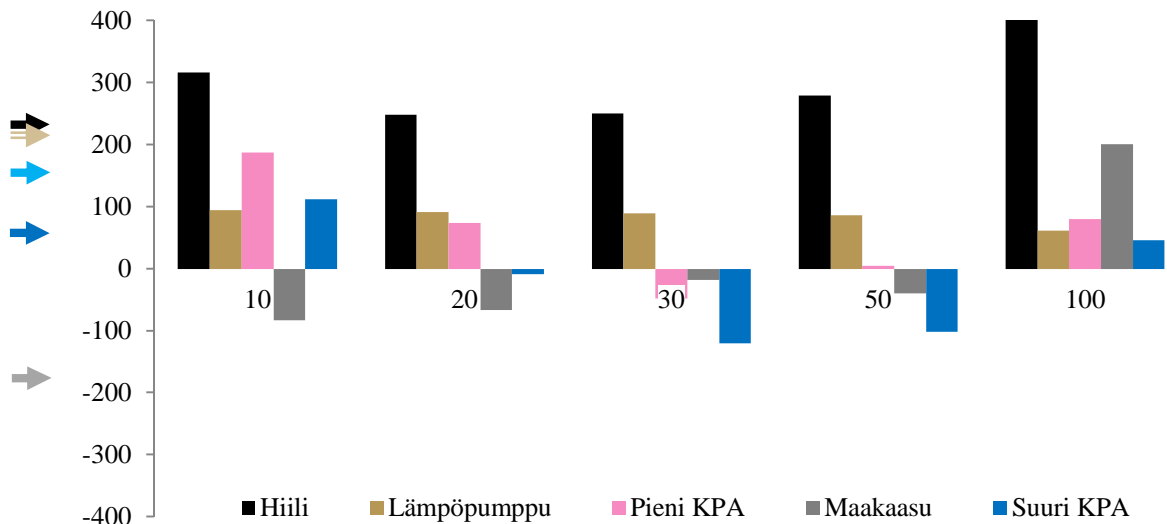
CHP-laitosten polttoaineenkäytössä puun osuus on Suomessa, suomalaisia puuenergiavaroja käyttäen, lähellä maksimiaan jo silloin, kun päästöoikeuden hinta on 20...30 euro/tonni (Kärhä ym. 2009). Toisen päästöjen kannalta melko edullisen polttoaineen eli maakaasun käyttö CHP:ssä riippuu hyvin paljon maakaasuverkon mahdollisesta laajentamisesta ja kaasun hinnasta. Tässä on kuitenkin lukittu CHP-laitostyyppit potentiaalisten päästöjen laskennassa tietynlaisiksi, ts. valinta "maakaasua vai kiinteää polttoainetta käyttävä laitos" jää lukijan tehtäväksi. Päästöoikeuden hinta on otettu CHP-laitoksilla huomioon siten, että kotimaisen polttoaineen laitosten (KPA) oletetaan siirtyvän käyttämään puuta sitä suuremmalla osuudella, mitä suurempi on päästöoikeuden hinta. Puun osuuden on oletettu näillä laitoksilla saavuttavan maksiminsa (73 % koko polttoainekäytöstä, Kärhä ym. 2009) 30 euron päästöoikeuden hinnalla. Päästöoikeuden hinnalla 10 euroa/tonni puun osuuden on oletettu olevan 36%. Lopun KPA-laitosten polttoaineesta on oletettu olevan turvetta. Näiden seossuhteiden on arvioitu olevan Suomen tasolla keskimäärin kustannusoptimaalisia puupolttoaineiden saatavuus huomioiden.

Toisin kuin CHP-voimaloiden tyyppiä, potentiaalista CHP:lle vaihtoehtoista lauhdevoimalayhdistelmää optimoidaan tässä laskentatavassa ydin-/hiili-/kaasu-/CCS-hiilivoimalaitosten välillä päästöoikeuden hinnan ja huipunkäyttöaikojen mukaan. Tämä on sikäli perusteltua, että tiettyä kaukolämpöverkkoa syöttää yleensä vain yksi tai kaksi laitosta eikä tiettyyn verkkoon kovin helposti rakenneta uutta laitosta, jos entinen on vielä käyttökuntoinen. Sähköverkko sen sijaan on paljon suurempi ja sen voidaan ajatella olevan jatkuvasti dynaamisessa tilassa investointien suhteen. Sähköverkosta on myös paljon vaikeampi tietää, minkä lauhdelaitoksen toimintaan sähkönkulutuksen tai -tuotannon muutos tulevaisuudessa vaikuttaa, minkä vuoksi kannattaa ajatella pikemminkin tässä kuvatulla tavalla: mihin suuntaan muutos vuosikulutusprofiilissa todennäköisesti tuotantoa muuttaa, tietyillä taustaoletuksilla?

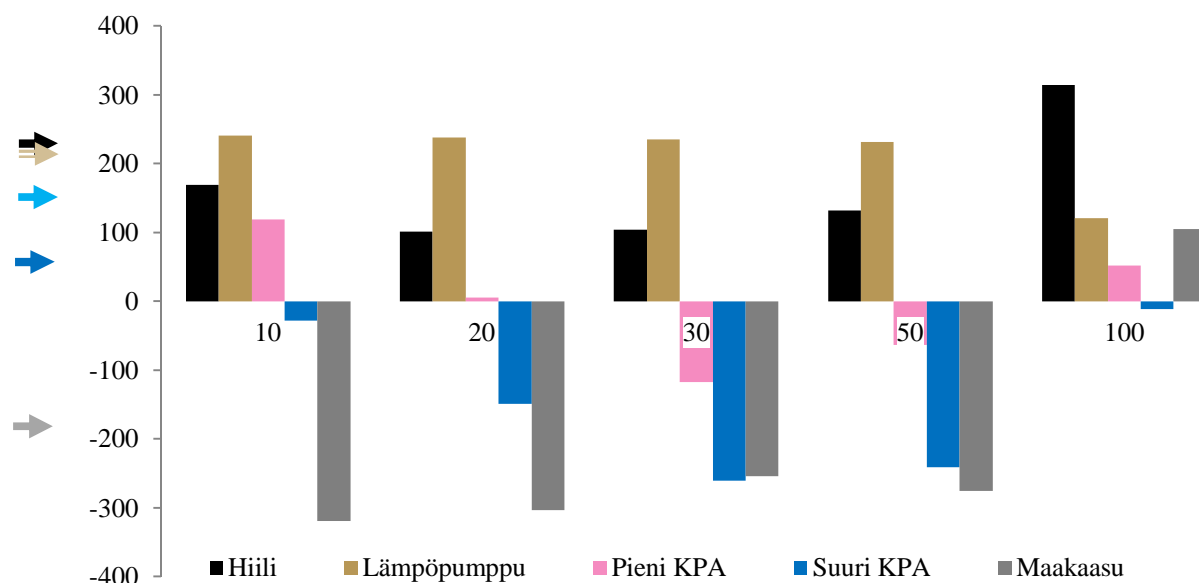
Lauhdetuotannossa on odotettavissa siirtymää hiilestä maakaasuun ja pieneltä osin puuhun päästöoikeuden hinnan noustessa. Varsinainen teknologiahyppäys lauhdetuotannossa voinee tapahtua päästöoikeuden hinnan noustessa tasolle 60...70 €/tonni, jolloin CCS tulee kannattavaksi. Toisaalta esimerkiksi niinkin korkealla päästöoikeuden hinnalla kuin 100 €/tonni ja Suomen nykyisellä korkeahkolla maakaasun hinnalla (36 €/MWh) kaasukombilaitos on lauhdevoimalatyypeistä kannattavin alle 2000 tunnin vuotuisella huipunkäyttöajalla. Tätä luokkaa oleva huipunkäyttöaika on esimerkiksi sähkölämmityksellä tai lämpöpumpun käyttämällä sähköllä, ellei käyttöveden vuoden mittaan ottamaa lähes vakiotehoa oteta huomioon.

Kuvissa vaaka-akselilla oleva päästöoikeuden hinta tarkoittaa siis sitä hintaa, jonka mahdollinen lauhdevoimalaitoksiin investoija olettaa hinnan laitoksen elinikänsä olevan. CHP-laitosten rakennusasteet on oletettu taulukon 2 mukaisiksi. Kuvassa 3 on oletettu, että ydinvoimaa tai CCS-hiililauhdetta rakennettaisiin niin paljon kuin teknis-taloudellisesti kannattaisi eikä poliittisia esteitä olisi. Kuvassa 4 puolestaan on oletettu, että ydinvoimaa ja CCS-teknologiaa ei saisi rakentaa lainkaan eli lauhdesähköntuotanto tukeutuisi vain fossiilisiin polttoaineisiin.

Mitä enemmän ydinvoimaa tai CCS:ää saa rakentaa, sitä pienemmät ovat sähköä käyttävän toiminnon potentiaaliset päästöt. Sähköä tuottavan prosessin (CHP) osalta asia on luonnollisesti päinvastoin.



Kuva 3. Erilaisten CHP-laitosten (KPA=kotimainen polttoaine, puu/turve) ja maalämpöpumpun potentiaaliset järjestelmätason päästöt eli lämmön kulutusmuutoksen vaikutus (gCO<sub>2</sub>/tuotetun lämmön kWh), kun mahdollisten lauhdevoimalaitosten investoija käyttää vaaka-akselilla olevaa päästöoikeuden hintaa laskiessaan, millaiseen lauhdevoimalaan kannattaa investoida. Perusoletuksena on, että lauhdevoimaloita joudutaan rakentamaan, jos CHP-tuotanto vähenee tai lämpöpumppujen osuus järjestelmässä kasvaa. Ydinvoimaa ja CCS:ää oletetaan saatavan rakentaa niin paljon kuin teknis-taloudellisesti kannattaa. Kotimaisen polttoaineen CHP-laitosten on ajateltu käyttävän edullisinta polttoaineseosta (puu/turve) päästöoikeuden hinnan mukaan siten, että puun osuus saavuttaa maksiminsa (73 %) CO<sub>2</sub>-hinnalla 30 €/tonniCO<sub>2</sub>. Vastaavien laitosten järjestelmätason päästöt ovat tällä hetkellä likimain vasemman reunan nuolien kuvaamilla tasoilla. Sähkölämmityksen kulutusmuutoksen päästö vastaavalla logiikalla olisi noin 3x lämpöpumpun päästö eli alle 50 €/ tonniCO<sub>2</sub> päästöoikeuden hinnoilla vajaa 700 gCO<sub>2</sub>/kWh. Päästöjä mahdollisesti huomattavastikin alentavaa lämmön varastointimahdollisuutta ei tässä ole huomioitu.



Kuva 4. Samat järjestelmätason lämmöntuotannon päästöt (eli lämmön kulutusmuutoksen vaikutus) kuin kuvassa 3, mutta tässä on oletettu, että ydinvoimaa tai CCS:ää ei rakenneta lainkaan, ts. CHP-sähkölle vaihtoehtoinen tuotanto on hiili- tai kaasulauhdetta.

## 4. JOHTOPÄÄTÖKSET

### 4.1. SÄHKÖN TUOTANTO- TAI KULUTUSMUUTOSTEN VAIKUTUKSIA TULISI TARKASTEELLA KULUTUKSEN AJOITTUMINEN HUOMIOIDEN

Päästökertoimia käytetään esimerkiksi arvioitaessa erilaisten energiansäästötoimien vaikutusta ja politiikkatoimien vaikutusta. Päätöksenteon ja demokratian yleisemminkin apuvälineinä kertomien tulisi olla sellaisia, että niitä käyttämällä voidaan arvioida, mitä jokin toimenpide todellisuudessa aiheuttaa.

Marginaalitarkastelu eli CLCA-ajattelutapa (joka antaa sähkölle yleensä paljon suuremman päästökertoimen kuin keskiarvotarkastelu) on esimerkiksi sähkönkulutukseen muutosten tarkastelun vaikutusten arvioinnissa paikallaan silloin, kun säätävä tuotantomuoto pysyy vakiona todennäköisen muutoksen suuruusella alueella. Keskipitkällä aikavälillä (10-30 vuotta) ja koko Euroopan tasolla voidaan suurella todennäköisyydellä olettaa, että tuotanto, johon enimmäkseen sähkönkulutuksen muutokset vaikuttavat, on hiili- tai kaasulauhdetta. Näiden yleensä ensimmäisenä joustavien tuotantomuotojen osuus Euroopan sähköntuotannosta on noin 50 %, eivätkä esimerkiksi uusiutuvat todennäköisesti ehdi muuttaa tilannetta kovin nopeasti mm. niiden vaatiman säätövoiman vuoksi. Suomi on yhä vahvistuvien siirtoyhteyksien kautta osa eurooppalaista sähköverkkoa, ei erillinen saareke.

Pidempiaikaisia järjestelmävaikutuksia CHP-kaukolämmön tai lämpöpumppujen käyttömäärän muuttuessa voidaan tutkia päättelemällä, miten sähköntuotantorakenne muuttuisi vastaavasti. Voidaan lisäksi olettaa, että alle 50 vuoden aikavälillä muutos todennäköisessä toteutumislajuuudessaan vaikuttaisi pääasiassa ydin-, hiili- ja kaasulauhdevoimalaitosten rakentamiseen. Tässä on laskettu eri tilanteisiin taloudellisesti edullisin voimalaitoskokonaisuus erityyppisistä laitoksista vaihdellen päästöoikeuden hintaa. Kun näiden potentiaalisesti CHP-sähköä korvaavien tai lämpöpumppujen käyttämää sähköä tuottavien lauhdelaitosten hiilidioksidipäästöt tunnetaan, voidaan myös potentiaaliset muutoksen aiheuttamat päästöt laskea vertaamalla näitä päästöjä tilanteeseen, jossa CHP-tuotanto olisi käynnissä kuten nyt.

## 4.2. CHP ON TÄLLAISISSA KOKONAISJÄRJESTELMÄTARKASTELUISSA YMPÄRISTÖN JA PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMISEN KANNALTA JÄRKEVÄ, MYÖS KÄYTTÄESSÄÄN FOSSIILISIA POLTTOAINEITA.

CHP-tuotannon edullisuus perustuu siihen, että sillä korvataan fossiililla polttoaineilla tehtävää lauhdesähköntuotantoa. Mitä suuremman osan ajasta CHP korvaa lauhdetuotantoa, sitä parempi päästöjenvähennyskeino CHP on. Näin ollen esimerkiksi mitä enemmän siirtoyhteyksiä Eurooppaan rakennetaan, sitä todennäköisemmin CHP:n avulla saavutetaan todellisia päästövähennyksiä. Samoin, mitä enemmän siirtoyhteyksiä tulevaisuudessa on, sitä huonompi ratkaisu lämpöpumppu on päästöjen vähentäjänä, koska sitä todennäköisempää on, että marginaalituotanto on hiili- tai kaasulauhdetta. Verrattuna esimerkiksi suoraan sähkölämmitykseen lämpöpumppu on kuitenkin hyvä vaihtoehto.

Mitä lähempänä CHP-sähköntuotantohyötysuhde on korvattavan lauhdetuotannon sähköntuotantohyötysuhdetta, sitä vähemmän nettoprimäärienergiankulutusta kyseinen CHP-tuotanto aiheuttaa sellaisena hetkenä, jolloin se korvaa lauhdetuotantoa. Joissakin tapauksissa primäärienergiankulutus järjestelmätasolla saattaa jopa pienentyä CHP-tuotannon ansiosta (verrattuna siis tilanteeseen, jossa CHP-tuotantoa ei olisi ollut kyseisellä hetkellä), esimerkiksi silloin, kun maakaasu-CHP korvaa kivihiililauhdetta.

CHP-tuotannossa on järkevää siirtyä hallitusti kohti suurempaa uusiutuvan energian osuutta (yhtenä reunaehtona kannattavuus päästökaupan oloissa). Teknologisia mahdollisuuksia on useita (esim. hake, pelletit, torrefioidut pelletit, kierrätyspolttoaine kivihiilen korvaajina, biokaasu tai SNG maakaasun korvaajana). Erilaisen polttoaineen tuominen olemassa olevaan laitokseen voi olla järkevintä vaiheittaisena oppimisprosessina. Lisäksi uusien voimalaitosten rakentamisen myötä CHP-järjestelmissä ollaan siirtymässä kohti ko. monipolttoainevaihtoehtoja.

## 4.3. VOIMAKKAALLA YDINVOIMAN, CCS-LAUHDEVOIMAN JA/TAI AURINKO- JA TUULIENERGIAN LISÄYKSELLÄ CHP-KAUKOLÄMPÖ VOI OLLA YHÄ HYVÄ PÄÄSTÖJENVÄHENNYSKEINO, MUTTA SE EDELLYTTÄÄ MUUTOKSIA JÄRJESTELMÄÄN.

Jos ydinvoimaa tai CCS:ää (hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia) pidetään kyseeseen tulevana vaihtoehtoina tulevaisuuden sähköjärjestelmässä, on erittäin suotavaa pitää kulutus mahdollisimman tasaisena. Mainitut tuotantomuodot ovat taloudellisesti houkuttelevimpia tasaisen peruskuorman tuotantoon, koska pääomakustannukset ovat molemmissa suuret ja ydinvoimassa käyttökustannukset varsin pienet. CCS:n on arvioitu nostavan hiililaitoksen investointikustannuksia 40-80% verrattuna nykytekniikkaan<sub>21</sub>.

Ellei käsitys rahan aika-arvosta olennaisesti muutu (siis investointien tuottovaatimukset merkittävästi laske), tulee energiankulutusta vuoden mittaan pyrkiä siis tasoittamaan näiden energiamuotojen tekemiseksi taloudellisesti kannattavaksi myös lämmitysenergian tuotannossa. Normaali CHP-tuotantokin tasoittaa kuormaa, mutta vaikutusta voi tehostaa irrottamalla sähkön tuotanto lämmön kulutuksesta lämpövarastoilla. Lisäksi sähkön ajoittaista ylituotantoa voidaan varastoida lämpönä kaukolämpöverkkoon, lämpöpumpuilla tai suoraan.

## 4.4. LÄMPÖPUMPUT VOIVAT ERITYISESTI TIETYILLÄ EHDOLLILLA OLLA MYÖS OSA VÄHÄPÄÄSTÖISTÄ ENERGIAJÄRJESTELMÄÄ

CHP-kaukolämpöverkon ulkopuolella primäärienergiatehokkain lämmitysmuoto on lämpöpumppu. Se kuluttaa sitä vähemmän sähköä, mitä pienempi on lämmönlähteen ja lämmönluovutuksen välinen lämpötilaero. Tekemällä siis lämmönjakojärjestelmä rakennuksessa siten, että se toimii mahdollisimman pienellä lämpötilaerolla huonelämpötilaan nähden, mahdollistetaan energia- ja kustannustehokkuus lämpöpumppuja tai aurinkoenergiaa käytettäessä. Samoin lämmön varastointimahdollisuus on eduksi koko järjestelmän kannalta.



## 4.5. TALVIAJAN SÄHKÖKAPASITEETIN RIITTÄVYYS ON TURVATTAVA

Energiajärjestelmän suunnittelussa on tehokkaan päästöjen vähentämisen lisäksi huomioitava riittävän oman sähköntuotantokapasiteetin turvaaminen erityisesti talviaikana, jolloin monet uusiutuvan energian muodot eivät ole luotettavasti käytettävissä. Suomen voimalaitoskapasiteetti vanhenee, ja sähkön tuonnin jatkuminen erityisesti Venäjältä on epävarmaa. Riittävän voimalaitoskapasiteetin lisäksi kysynnän hintajoustoon tulisi panostaa kaikilla sektoreilla, ja tuoda pörssin hintasignaalit suoraan tai jopa jyrkennettynä kuluttajille.

Uusien voimalaitosten suunnittelussa tulisi varmistaa tekninen valmius sekä suureen biopolttoaineiden osuuteen että mahdollisuuteen muunnella polttoainesuhteita. Tekninen mahdollisuus mahdollisuus eri polttoainelajien käyttöön on tärkeä myös hintasuojaa ajatellen, kun tulevaisuudessa puupolttoaineen kansainvälinen kysyntä kasvaa ja hinta todennäköisesti nousee.

## 4.6. KAUKOLÄMPÖVERKOT KANNATTAÄ SÄILYTTÄÄ JA UUSIA RAKENTAA

Kaukolämpövoimalaitokset vaativat nykytoteutusmuodossaan (=suuret, keskitetyt laitokset) lämpöverkon. Tuotannon hajauttaminen pieniin CHP-laitoksiin isossa verkossa ei liene järkevää (kuljetukset ja kustannukset lisääntyvät, kaasumootorit voivat olla poikkeus). Kuten sähköverkosta, myös lämpöverkosta on hyötyä tuotanto- ja kulutusvaihteluiden tasaajana. Vaikka suuntaus on kohti pienempiä yksiköitä mm. aurinkoenergian vuoksi, koko järjestelmän kannalta muutamista suurista yksiköistä on kuitenkin hyötyä kustannusmielessä. Lisäksi suuret verkot mahdollistavat hyvähyötysuhteisen ja edullisen lämmön pitkäaikaisvarastoinnin esimerkiksi porakaivovarastoihin tai hieman lyhytaikaisemman terässäiliöihin. Tällä voi olla suuri merkitys tilanteessa, jossa CHP-voimalat toimivat yhä enemmän säätövoimana ”jäykkien” tuotantomuotojen kuten tuuli- ja aurinkoenergian ja ydinvoiman apuna<sup>19</sup>.

Haittana verkon ylläpidosta ovat rakennus- ja huoltokustannusten lisäksi verkon lämpöhäviöt (keskimäärin noin 8 % siirretystä energiasta, matalaenergiaomakotitaloalueilla jopa 40 %) ja pumppausenergia (keskimäärin 0,5 % siirretystä energiasta).

Tässä tehtyjen tarkastelujen perusteella CHP-kaukolämpöalueilla on muuttuvissa tilanteissakin lähes aina mahdollista löytää ratkaisu, jossa rakennuksen lämmityksen järjestelmätason päästöt ovat erittäin pienet. Nykyään kaukolämpöön liittyminen ei kuitenkaan ole aina edullisin ratkaisu kuluttajalle liityntäkustannusten vuoksi.

## 4.7. RAKENNUSTEN LÄMMITYS VOIDAAN HOITAA KÄYTTÄEN PÄÄASIASSA SÄHKÖNTUOTANNON ”JÄTTEITÄ”

Lämmitysmuotojen potentiaalisia ympäristövaikutuksia voi kuvata exergia- (yksinkertaistettuna lämpötila-) tason ja joustomahdollisuuden suuruuden avulla. Mahdollisimman vähäpäästöinen lämmitysmuoto on tuotannon kannalta sellainen, jonka ajoitus on vapaa ja lämpötilataso alhainen. Myös sähkön käyttö lämmitykseen voi tulla joissakin tapauksissa kyseeseen, jos siinä on ko. joustomahdollisuus. Perinteinen yösähkö on yksi tämän ajatuksen sovellus, joskin mahdollisiin tuleviin, vaihteleviin varastointitarpeisiin ehkä hieman jäykkä sellainen. Yösähkölämmitystä kannattaa kehittää joustavasti hintavaihteluihin reagoivaksi uusimalla ohjausautomaatiikka.

## 4.8. MATALAENERGIAKAUKOLÄMPÖÄ KANNATTAA EDISTÄÄ

Kaukolämmön lämpötilatasojen pudottaminen olisi hyvä ratkaisu rakennusasteen parantamisen (=järjestelmähyötysuhteen), lämpöpumppujen käytön, aurinkolämmön, lämpöhäviöiden vähentämisen ja muoviputkien käyttömahdollisuuden kannalta.

Tällä hetkellä normimukaisesti verkkoon menevän kaukolämpöveden lämpötila vaihtelee kesän noin 75 asteesta kovien pakkasten noin 110 asteeseen. Varsinkin uusissa taloissa ja myös useimmissa vanhoissa pärjättäisiin ilman lämmönjakojärjestelmän muutoksia talvella pienemmilläkin lämpötiloilla, mutta lämpötilojen pudottaminen vaatii ensin järjestelmän staattista ja dynaamista simulointia toimivuuden arvioimiseksi.

Kesällä minimilämpötilan asettaa lämpimän käyttöveden valmistus ja erityisesti legionellabakteerin torjunta, joka edellyttää lämpötilan pitämistä vähintään 55 asteessa. Kovilla pakkasilla alarajan asettaa minimijäähtymä (p.o. nykyverkoissa 50-60 °C ilman verkostojen väljentämistä tai pumppaustehon lisäämistä) ja käyttöveden lämmitys. Nykyverkoissa vain rakennuksissa tehtävillä toimenpiteillä (joissakin taloissa lämmönjakopinta-alaa tulisi lisätä tai talojen energiataloutta parantaa) lämpötila voisi olla ympäri vuoden minimissään noin 75 °C.

## 4.9. PÄÄSTÖKAUPPASEKTORIN PÄÄLLEKKÄISET TOIMET EIVÄT VÄHENNÄ PÄÄSTÖJÄ

EU:n päästökaupassa päästöjen sallittu määrä päätetään poliittisesti etukäteen ja tämän jälkeen päästöoikeuden hinta asettuu markkinaehtoisesti sille tasolle, että kyseinen päästömäärä toteutuu. Päästökaupan seurauksena vapaaehtoinen päästönvähennystoimi ei siis kannata, vaan yksittäisen laitoksen tulee toimia itselleen taloudellisimmalla tavalla. Kansallisilla subventioilla esimerkiksi kotimaisten biopolttoaineiden käyttöön ei päästökauppasektorilla saavuteta todellista päästövähennemää, vaan käyttämättä jääneet päästöluvut ovat markkinoilla muiden toimijoiden käytössä.

Kunnat ja muut toimijat voivat varautua tulevaisuuden tiukempiin päästörajoituksiin ja korkeampaan päästöoikeuden hintaan esimerkiksi tekemällä järjestelmätason päästöjen kannalta energiatehokkaita ja uusiutuvan energian tuotannolle edullisia kaavoitusratkaisuja.

## VIITTEET

Viitteet on soveltuvin osin linkitetty suoraan ko. verkkosivuihin. Sivut aukeavat painamalla Ctrl + hiiren napsautus ko. viitteen kohdalla.

1 Tilastokeskus (2011). Energiatilastot, vuosikirja 2011. 151 s.

2 Euroopan komissio (2012). [European statistics. European commission.](#)

3 [COGEN Europe \(2012\). Forthcoming vote in ITRE on February 28 th on the draft Energy Efficiency Directive 24 February 2012. Press Release.](#)

4 [Beurskens, L.W.M., Hekkenberg, M. & Vethman, P. \(2011\). Renewable Energy Projections as Published in the National Renewable Energy Action Plans of the European Member States. ECN-E-10-069. 270 p.](#)

5 [Metsäntutkimuslaitos \(2012\). Metsätalastotiedot 16/2012. Puun energiakäyttö 2011. 7s.](#)

6 Syri, S., Kurki-Suonio, T., Satka, V. and Cross, S. (2012). Nuclear power at the crossroads of liberalised electricity markets and CO<sub>2</sub> mitigation - case Finland. Energy Strategy Reviews, DOI 10.1016/j.esr.2012.11.005

7 [Motiva \(2004\). Yksittäisen kohteen CO<sub>2</sub>-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. 2004.](#)

8 [Ecometrica Press \(2009\). Consequential and Attributional Approaches to LCA: a Guide to Policy Makers with Specific Reference to Greenhouse Gas LCA of Biofuels.](#)

9 [Lund, H., Mathiesen B.V., Christensen P., Hojerup Schmidt J. Energy system analysis of marginal electricity in consequential LCA. Int Journal of Life Cycle Assessment 2010; 15\(3\): 260-271.](#)

10 [Soimakallio, S. Assessing the uncertainties of climate policies and mitigation measures. Doctoral thesis. 2012. VTT Science 11. 78 s. + liitteet 80 s.](#)

11 [Holttinen H., Tuhkanen S. The effect of wind power on CO<sub>2</sub> abatement in the Nordic Countries. Energy Policy 2004; 32\(14\): 1639-1652.](#)

12 [Finnveden G., Hauschild M.Z., Ekvall T., Guinée J., Heijungs R., Hellweg S., Koehler A., Pennington D., Suh S. \(2009\). Recent developments in Life Cycle Assessment. Journal of Environmental Management 2009; 91: 1-21.](#)

13 [Hawkes A.D. \(2010\). Estimating marginal CO<sub>2</sub> emissions rates for national electricity systems. Energy Policy 2010; 38\(10\): 5977-5987.](#)

14 [Mathiesen B.V., Munster M., Fruegaard T. \(2009\). Uncertainties related to the identification of the marginal energy technology in consequential life cycle assessments. Journal of Cleaner Production 2009; 17: 1331-1338.](#)

15 Ekvall T. & Weidema B.P. (2004). System Boundaries and Input Data in Consequential Life Cycle Inventory Analysis. The international journal of life cycle assessment 2004; 9(3): 161-171.

16 [Sköldbberg, H. & Unger, T. \(2008\). Effekter av förändrad elanvändning / elproduktion – Modellberäkningar. \(In Swedish\) \[Impacts of changed electricity use / production – model calculations\] Elforsk rapport 08.](#)

17 [Pehnt M., Oeser M., Swider D.J. \(2008\). Consequential environmental system analysis of expected offshore wind electricity production in Germany. Energy 2008; 33\(5\): 747-759.](#)

18 [Soimakallio S., Kiviluoma J., Saikku L. \(2011\). The complexity and challenges of determining GHG \(greenhouse gas\) emissions from grid electricity consumption and conservation in LCA \(life cycle assessment\) – A methodological review. Energy 2011; 36\(12\): 6705-6713.](#)

19 [Lund H., Clark W.W. \(2002\). Management of fluctuations in wind power and CHP comparing two possible Danish strategies. Energy 2002; 27\(5\): 471-483.](#)

20 [Kärhä K., Elo J., Lahtinen P., Räsänen T. ja Pajuoja H. \(2009\). Kiinteiden puupolttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa 2020. TTS tutkimuksen tiedote. Luonnonvara-ala: Metsä 10/2009 \(736\). 8 s.](#)

21 [Teir, S., Hetland, J., Lindeberg, E., Torvanger, A., Buhr, K., Koljonen, T. \(2010\). Potential for carbon capture and storage \(CCS\) in the Nordic region. Espoo 2010. VTT Tiedotteita – Research Notes 2556. 188 p. + app. 28 p.](#)

22 [Nord Pool Spot \(2012\). Nordic Power Market.](#)

23 [EEX \(2012\). The European Energy Exchange AG.](#)

24 [Bluenext \(2012\). Environmental trading exchange.](#)

25 [International Energy Agency \(2010\). Projected Costs of Generating Electricity. 218 p.](#)

26 DENA (2012). [Integration der erneuerbaren Energien in den deutsch-europäischen Strommarkt. Endbericht. DENA Deutsche Energie-Agentur.](#)

27 [Supponen, M. \(2011\). Influence of National and Company Interests on European Electricity Transmission Investments. Aalto University Doctoral dissertations 77/2011. 196 p.](#)

28 [Schraber, K., Steinke, F., Hamacher, T. \(2012\). Transmission Grid Extensions For The Integration Of Variable Renewable Energies In Europe; Who Benefits Where? Energy Policy 2012; 43: 123-135.](#)

29 [Tzimas E., Georgagaki A., Peteves S.D. \(2009\). JRC, Joint Research Centre, European Union. Future Fossil Fuel Electricity Generation in Europe: Options and Consequences. 99 p.](#)

30 Holopainen, Riikka; Vares, Sirje; Ritola, Jouko; Pulakka Sakari (2010). Maalämmön ja -viilennyksen hyödyntäminen asuinkeuhkoston lämmityksessä ja jäädytyksessä. VTT, Espoo. 56 s. VTT Tiedotteita - Research Notes : 2546

## LIITE. LASKENTAMENETELMIEN KUVAUS: ELINKAARIARVIONTIMENETELMIEN VERTAILUA.

### JOHDANTO

Tässä kuvaillaan lämpöpumppujen ja sähkön ja lämmön yhteistuotantona (combined heat and power, CHP) tehtävän kaukolämmön talous- ja ympäristövaikutuksia. Molemmissa on keskeistä niiden vaikutus sähköjärjestelmään. Lämpöpumput kuluttavat sähköä, silloin kun ne ovat yleisimmässä muodossaan eli sähkökäyttöisellä kompressorilla toimivia. CHP tuottaa sähköä eli kaukolämmön kulutuksen lisäys lisää tietyn edellytyksin myös sähköntuotantoa ja päinvastoin. Näin ollen kaikissa nyt tarkasteltavissa tapauksissa pitäisi kyetä arvioimaan, mitä sähköjärjestelmässä tapahtuu, kun lämpöpumpuilla tai CHP:llä tuotetun lämmön kulutus muuttuu eri tilanteissa.

Sähkönkulutuksen tai CHP–kaukolämmön ja sitä myötä CHP-sähköntuotannon muutosten vaikutusta voidaan lähestyä eri tavoilla. Kaikissa tapauksissa on olennaista pohtia, mitä järjestelmässä todella tapahtuisi vaihtelevissa tilanteissa: mikä sähköntuotantomuoto korvaisi tekemättä jääneen vastapainesähkön ja tuottaisi lämpöpumpun (tai muun lisäkulutuksen) tarvitseman sähkön? Kun tämä tiedetään tai arvioidaan, voidaan laskea myös muutoksen aiheuttamat päästöt ja kustannukset.

Lämmityksen erityispiirre on sen vuodenaikaisvaihtelu ja tulevaisuuden mahdollisuuksia ajatellen myös helppo varastoitavuus. Tässä keskitymme aluksi vaihtelun vaikutuksiin ja tämän raportin loppuvaiheessa varastoinnin mahdollisuuksiin.

Sähkön tai lämmön kulutusprofiilin vaikutus päästöihin on jäänyt melko vähälle huomiolle vuosikulutuksen ollessa yleensä tarkastelun kohteena. Ajoitus voi kuitenkin vaikuttaa ratkaisevasti siihen, kuinka paljon jokin toimenpide aiheuttaa päästöjä joko nyt tai välillisesti tulevaisuudessa. Lyhyellä aikavälillä lähes kaikki sähkön tai CHP-kaukolämmön kulutuksen muutos johtaa hiili- tai kaasulauhdesähkön tuotannon muutokseen. Varsinkin kesällä saattaa kuitenkin olla hetkiä, joskin tavallisesti melko harvoin, jolloin esimerkiksi vesivoimaa joudutaan juoksuttamaan hukkaan tarjonnan ollessa kysyntää suurempaa ja verkon siirtokapasiteetin rajoittaessa vientiä.

Pidemmällä aikavälillä vuoden mittaan täysin tasainen sähkönkulutus voidaan periaatteessa tuottaa lähes kasvihuonekaasupäästöttömästi ydinvoimalla tai CCS (carbon capture and storage)-tekniikalla. Tällaista sähköntuotantoa korvaava yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto ei näin ollen myöskään vähennä päästöjä, vaan päinvastoin lisää niitä. Sen sijaa esimerkiksi sähkölämmityksen tai valaistuksen aiheuttaman, vuodenajan mukaan voimakkaasti muuttuvan kulutuksen vaatima sähkö tuotetaan useimmissa tapauksissa käytännössä hiili- tai kaasulauhdevoimalla, koska ydinvoimaa tai CCS-voimaloita ei kannata rakentaa kuin pitkille vuotuisille huipunkäyttöajoille. Näin ollen CHP-voimalan tuottama kaukolämpö voi parhaimmillaan olla käytännöllisesti katsoen päästötöntä, jos kyseinen muuttuva sähkökuorma ja sen vaatima tuotanto on joka tapauksessa olemassa. Tämän väitteen todenperäisyyttä tarkastellaan tässä lähemmin.

### 1. ALCA (ATTRIBUTIONAL LIFE CYCLE ASSESSMENT) SOPII TIETYIN RAJOITUKSIN STABIILIN TILAN TARKASTELUUN, MUTTA EI KUVAA MUUTOKSEN VAIKUTUKSIA

Menetelmällisesti energiantuotannon ja sen muutosten ympäristövaikutuksia voidaan lähestyä eri tavoin, oleellisina eroina mm. se, kuinka pitkällä aikavälillä ja se, miten rajattuina ratkaisujen vaikutuksia tarkastellaan. Suppeimmillaan käytetään nykyisiä keskimääräisiä energianhintoja loppukuluttajille ja Suomen nykyistä sähköntuotantorakennetta ottaen huomioon vain vuositasen tuotanto ja yhteenlasketut päästöt. Elinkaariarviontimenetelmänä tämä on ALCA-tapa, attributional life cycle assessment. Kulutusmuutosten mahdollista vaikutusta tuotantorakenteeseen, siis esim. eri primäärienergianlähteiden osuuksiin, ei huomioida. Tämä ajattelutapa on vallitseva yksittäisen kuluttajan näkökulmasta ja myös ylivoimaisesti yleisin alan populaarikirjallisuudessa ja -tutkimuksissa. Myös elinkaarianalyysyjä tehdään usein tätä näkökulmaa käyttäen.

ALCA on näennäisen objektiivinen perustuessaan ”toteutuneisiin” päästöihin. Se sisältää kuitenkin lukuisia epävarmoja oletuksia. Seuraavassa on kuvattu näitä ongelmia.

- a) Lyhyellä aikavälillä pieni muutos sähkön kulutuksessa tai CHP-tuotannossa vaikuttaa vain osaan tuotannosta. Sähkön tuotannossa laitoksia käynnistetään tai sammutetaan siten, että muuttuvilta käyttökustannuksiltaan halvimmat laitokset (ydin-, vesi- ja tuulivoima) ovat käytössä niin suuren osan ajasta kuin mahdollista ja kalleimmat (hiili-, öljy, turve-, puu- tai kaasulauhdevoima) niin vähän kuin

mahdollista. Viimeksi mainittujen tuotanto muuttuu siis huomattavasti enemmän kulutuksen mukaan kuin ensin mainittujen. ALCA-laskentatavassa koko tuotannon oletetaan joustavan tasaisesti kaikkina hetkinä.

- b) Pidemmällä aikavälillä muutoksen vaikutus riippuu mm. siitä, miten tarkasteltava kulutusmuutos ajoittuu vuosisatasolla. Kärjistäen, on erittäin epätodennäköistä, että kalliin investoinnin vaativa ydinvoimala rakennettaisiin tuottamaan sähköä vain talven kulutushuippuihin. Myöskään ei ole realistista olettaa, että tuotannoltaan suuralueittainkin vaihteleva tuulivoima pystyisi täysin kattamaan vuoden mittaan tasaisena pysyvän sähkökulutuksen. Jos sähköä voitaisiin taloudellisesti varastoida, tilanne olisi toinen. Vesivoimaa lukuun ottamatta varsinkaan vuodenaikaisvarastointi ei ole toistaiseksi lähelläkään taloudellista kannattavuutta ja vesivoiman varastokapasiteetti on rajallinen.
- c) Jos sähköntuotannon rakenteen ajatellaan pysyvän nykyisenkaltaisena myös tulevaisuudessa, toimintaympäristön ja investointilogiikan pitäisi pysyä samoina kuin ne ovat olleet tähän saakka. Näin ei kuitenkaan liene mm. ilmastopolitiikan vaatimusten ja energianlähteiden hintojen muutosten vuoksi.
- d) Sähkön käytön vaikutuksia tarkasteltaessa ei voida rajoittaa tarkastelemaan vain Suomea, koska siirtoyhteyksien kautta olemme yhteydessä pohjoismaiseen ja edelleen keskieurooppalaiseen sähköverkkoon. Siirtokapasiteetti on rajallinen ja sikäli suomalaisella sähköntuotannolla on Suomen kannalta enemmän merkitystä kuin esim. saksalaisella, mutta jyrkkä raja on vain Suomeen tässä on liian karkea oletus.

Näistä syistä ALCA-lähestymistapaa voi CHP-kaukolämmön tai lämpöpumppujen vaikutuksia tarkasteltaessa pitää lähinnä arvauksena mahdollisesti tulevaisuudessa tapahtuvista vaikutuksista. Lyhyen aikavälin muutosten vaikutuksia arvioitaessa ALCA:n käyttö voi johtaa pahastikin harhaan.

## 2. CLCA (CONSEQUENTIAL LIFE CYCLE ASSESSMENT) ON VAIKEAMPI TEHDÄ, MUTTA SOVELTUVAMPI KUN TARKASTEELLAAN MUUTOSTA

Kulutusmuutosten tai CHP-tuotannon muutosten nykyvaikutuksia tarkasteltaessa tulisi arvioida, mitä muutoksia nykyjärjestelmässä tapahtuu laitostyypeittäin, myös Suomen rajojen ulkopuolella. Tämä arviointitapa on CLCA, consequential LCA. CLCA vastaa kysymykseen "mitä tapahtuisi, jos...". CLCA:ssa on määriteltävä marginaalituotanto (se tuotanto, johon muutos ensimmäisenä vaikuttaa) ja se, kuinka paljon kulutus saa muuttua, ennen kuin muutos vaikuttaa seuraavaan tuotantomuotoon. Näin ollen pitäisi pohtia myös sitä, kuinka suuri kulutusmuutos on todennäköinen.

Toisaalta on pohdittava myös sitä, millaiseen tuotantoon tarkasteltava kulutusmuutos vaikuttaa jatkossa. Voidaan esimerkiksi ajatella, että tietyllä tavalla ajoittuva kulutus aiheuttaa tietyllä investointilogiikalla tietynlaista tuotantoa. Tärkeää on määritellä toimintaympäristölle erilaisia skenaarioita esimerkiksi päästöoikeuden hintojen tai ydinvoiman poliittisen hyväksyttävyyden suhteen.

CLCA:n ongelmia saattavat olla energiantuotannon tapauksessa tunti- tai päiväkohtaisten tietojen hankala saatavuus ja tulevaisuuden skenaarioiden määrittämisen mielivaltaisuus. Myöskään se, mitä tarkalla tiedolla pitäisi tehdä, ei liene lainkaan selvää, ellei aiheeseen ole perehtynyt. Tästä syystä ALCA voi vaikuttaa houkuttelevammalta ja "objektiivisemmältä" ja siksi sitä usein käytetäänkin. Tätä problematiikkaa kuvaillaan tarkemmin lähteissä 8-18.

## 3. ENTÄ VÄLILLISET VAIKUTUKSET ?

Yksi tärkeä sivujuonne erilaisten ratkaisujen ilmastovaikutuksia pohdittaessa on se, millaisia välillisiä vaikutuksia rahankäyttö sinänsä aiheuttaa. Joissakin tutkimuksissa on käytetty logiikkaa, jonka mukaan välilliset vaikutukset ovat itse asiassa hyvin merkittäviä. Palveluihinkin käytetty raha menee suureksi osaksi enemmän tai myöhemmin ilmaston kannalta haitallisiin asioihin kuten primäärienergian ostamiseen. Loppupäätelmään vaikuttaa kuitenkin olennaisesti se, millaisia taustaoletuksia käytetään.

Ennen muuta tulisi pohtia, mitä tapahtuisi, jos jotakin asiaa ei tehtäisi? Mitä tekisivät ihmiset, jos eivät tekisi vaikutuksiltaan arvioitavaa tehtävää, mihin menisivät rahat jne.? Arvioinnissa on pohdittava muun muassa sitä, olisiko kyseinen rahamäärä tullut joka tapauksessa käytetyksi johonkin vai oletetaanko, että summa olisi "säästetty",

sitä ei siis olisi laitettu kiertoon lainkaan ja toteutukseen osallistuneet olisivat säästyneellä ajalla kuvainnollisesti laiskotelleet tai, toisin sanoen ja sopiviin tapauksiin soveltaen, nauttineet elämästä kuluttamatta mitään.

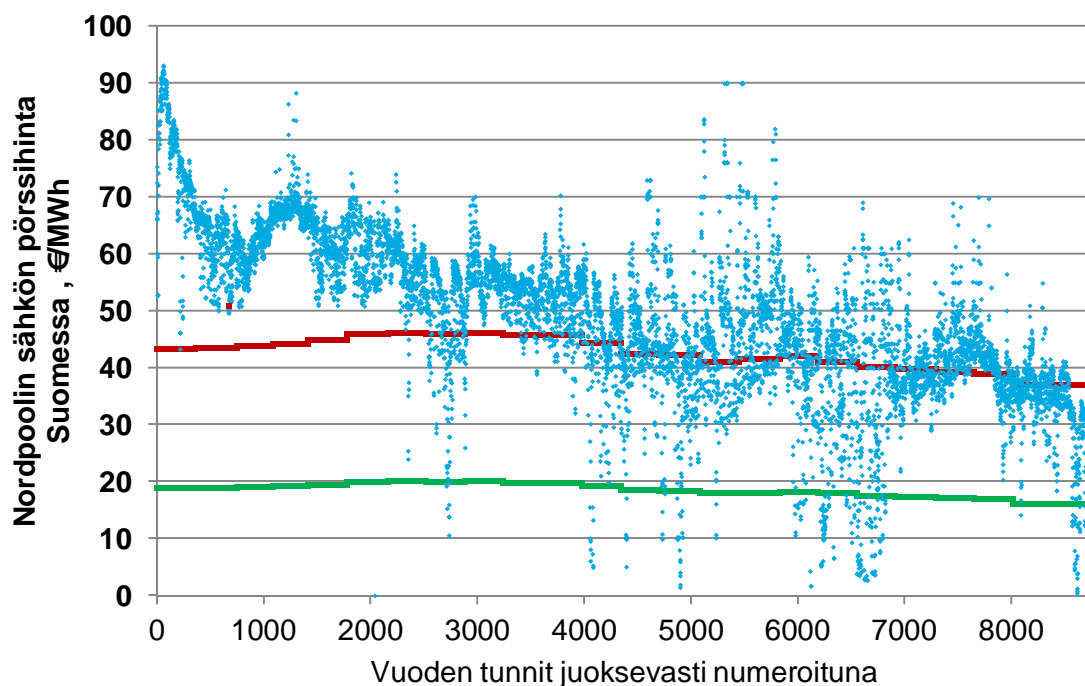
1 kuluttettu euro tuottaa keskimäärin noin 500 gramman hiilidioksidipäästöt ALCA-menetelmällä määriteltynä. Esimerkiksi rakennustöiden euroa kohden aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat lähellä kaikkien toimien keskiarvoa ja samaa voitaneen olettaa voimalaitosten, lämpöverkkojen ym. rakentamisesta. Tällä oletuksella tällaisten investointien aiheuttamat CLCA-päästöt ovat nolla, jos vaihtoehtona on se, että sama rahamäärä olisi käytetty muihin ostoihin keskimääräisen kulutusprofiilin mukaisesti. Jos sen sijaan vaihtoehtona olisi ollut rahan käyttämättä jääminen, päästöjä tulisi noin tuo 500 g/euro. ”Totuus” lienee jossakin näiden arvojen välissä riippuen siitä, miten tavoitteellisena ja toteutuvana palkkatyöllisyyttä ja siitä seuraavaa rahan kuluttamista pidetään. Toistaiseksi se ainakin on poliittisesti ja ihmisten mielissä suuressa arvossa ja sikäli on loogista ajatella, että esim. rakennustöihin kuluvan rahan välillinen päästövaikutus on vähäinen.

## 4. LASKENNASSA KÄYTETYT MENETELMÄT JA LÄHTÖTIEDOT

### 4.1. NYKYHETKEN OLETUS: SÄHKÖPÖRSSIN TUNTIHINTA ON KUTAKUINKIN VERRANNOLLINEN NS. MARGINAALITEKNOLOGIAAN

Kun sähkön kulutus tai CHP-sähkön tuotantomäärä muuttuu, muutos vaikuttaa periaatteessa ensin muuttuvilta kustannuksiltaan kalleimman senhetkisen käynnissä olevan sähköntuotantomuodon tuotantomäärään. Koska sähkön hinta pohjoismaisessa sähköpörssissä määräytyy tämän kullakin hetkellä kalleimman tuotantomuodon mukaan ja eri tuotantomuotojen kustannukset tiedetään suurin piirtein, hintatiedoista voidaan päätellä, mihin tuotantoon muutos olisi vaikuttanut.

Kuvassa 5 on hiiltä polttoaineenaan käyttävien lauhde- ja sekä sähköä että lämpöä tekevien laitosten muuttuvat energian tuotantokustannukset merkitty yhtenäisillä käyrillä, sähkön tunneittaiset pörssihinnat pisteillä (Tilastokeskus 2011, Nord Pool Spot 2012, EEX 2012, Bluenext 2012). Kun sähkön pörssihinta on yli lauhdesähkön laskennallisten muuttuvien tuotantokustannusten, voidaan olettaa, että sähkönkulutuksen muuttuessa muuttuu lauhdetuotannon määrä. Hintapiikkien aikana on käytössä myös hiilivoimaa huomommalla hyötysuhteella (CHP-voimaloiden apulauhdetta ym.) tai öljy- tai kaasulauhdetta. Vastaavasti kun sähkön pörssihinta on suurempi kuin CHP-tuotannon muuttuva kustannus mutta pienempi kuin lauhdevoiman muuttuva kustannus, säätävä tuotantomuoto on CHP. Jos sähkön pörssihinta on edullisempi kuin CHP:n muuttuva kustannus, säätävä tuotanto on vesi-, ydin- tai tuulivoimaa.



Kuva 5. Sähkön Suomen aluehinta (€/MWh) pohjoismaisessa sähköpörssissä vuonna 2011 ja suuntaa-antavasti eri tuotantomuotojen muuttuvat kustannukset (Tilastokeskus 2011, Nord Pool Spot 2012, EEX 2012, Bluenext 2012). Hiililauhteen marginaalikustannuksia kuvaa ylempi viiva, CHP-sähkön alempi. Jos sähkön hinta on kalliimpi kuin ylemmän suoran osoittama kustannus, säätö tapahtuu hiili-, kaasu- tai öljylauhdevoimalla, jos suorien välissä, CHP-tuotannolla ja jos alemman viivan osoittamaa hintaa alempi, vesi-, tuuli- tai ydinvoimalla.

Taulukossa 3 esitetään Suomessa vuonna 2011 toteutunut tilanne.

Vesi-/tuuli-/ydinvoima	1%
Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto	23%
Muu lauhdevoima kuin ydinvoima	76%

Taulukko 3. Marginaalisähkön tuotantomuodot Suomessa vuonna 2011, arvioitu pörssisähkön tuntihinnoista (Tilastokeskus 2011, Nord Pool Spot 2012, EEX 2012, Bluenext 2012).

Kun tässä on tarkasteltu, paljonko jokin muutos sähkönkäytössä olisi vaikuttanut päästöihin, on kunkin tunnin kulutusmuutos kerrottu kyseisen tunnin marginaalituotannon ominaispäästöllä. Näin on saatu selville esimerkiksi se, paljonko maalämpöpumpun aiheuttama lisäsähkönkulutus olisi tuottanut päästöjä tai se, paljonko CHP-kaukolämmön kulutuksen vähentäminen ja sitä myötä CHP-sähköntuotannon korvautuminen esimerkiksi lauhdesähköllä olisi muuttanut päästöjä verrattuna tilanteeseen, jossa näin ei olisi tapahtunut.

CHP-kaukolämmön tuotannon aiheuttamat hetkittäiset päästöt saadaan selville, kun tarkasteltavan CHP-laitoksen polttoainekäytön aiheuttamista päästöistä vähennetään päästöt, jotka olisivat aiheutuneet kyseisenä hetkenä CHP-tuotannolle vaihtoehtoisesta sähköntuotantomuodosta.

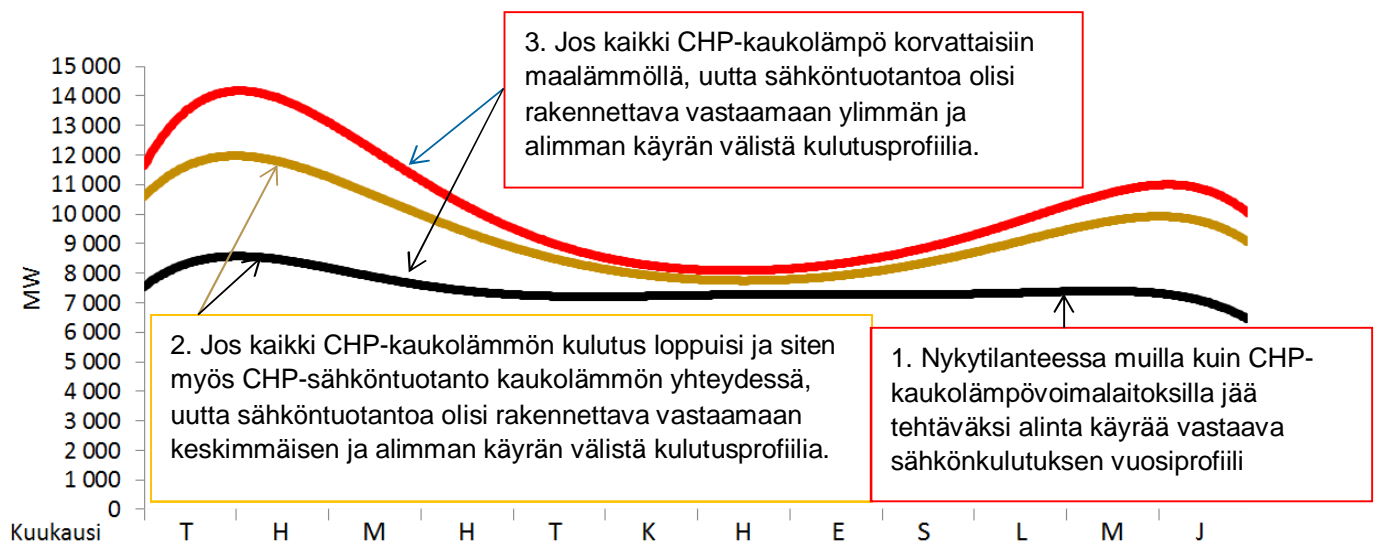
#### 4.2. TULEVAISUUDEN MAHDOLLINEN KEHITYS: TEKNIS-TALOUDELLINEN VOIMALAITOSKANNAN OPTIMI NYKYISELLE SÄHKÖN KULUTUSPROFIILILLE JA KATSOTAAN, MITEN CHP TAI LÄMPÖPUMPPUJEN AIHEUTTAMA KULUTUSPROFIILIN MUUTOS VAIKUTTAA SIIHEN.

Marginaalitarkastelu kohdassa 4.1. esitetyllä tavalla sopii lyhyen ajan pienehköjen muutosten vaikutusten tarkasteluun. Pitkällä aikavälillä rakennetaan uusia voimalaitoksia ja olennaista olisikin ennakoita, millaisia ja miksi.



Tässä käytetty tapa arvioida tulevaisuuden sähköntuotantoa on päätellä, millainen voimalaitosyhdistelmä olisi sopiva tulevaisuudessa oletettavalle kulutusprofiilille, siis kulutuksen jakaumalle vuoden mittaan. ”Sopivuus” tarkoittaa tässä tapauksessa sitä, että valitun voimalaitosyhdistelmän kokonaiskustannukset ovat mahdollisimman pienet. Kun erityyppisten laitosten investointi- ja käyttökustannukset tiedetään, voidaan päätellä tulevan tuotannon kapasiteetti optimoimalla se siis siten, että se kykenee tuottamaan vaaditun määrän sähköä tietyllä ajoituksella mahdollisimman edullisesti.

Lämpöpumppujen käyttömäärän tai CHP-kaukolämmön kulutuksen muutos muuttaa myös sähkön vuotuista kulutusprofiilia. Mahdollisesti muuttunutta tilannetta voidaan verrata nykytilanteeseen. Tämä pitäisi tehdä tarkastelemalla kulutuksen suuruutta tunneittain tai edes kuukausittain, joka tapauksessa tarkemmin kuin vain vuositasolla. Tällöin voidaan ennakoita perustellummin, mitä seurauksia esimerkiksi lämpöpumppujen tai CHP-kaukolämmön kulutusmuutoksilla todennäköisesti on. Kuva 6 esittää ”pyöristettyjä” kulutuskäyriä erilaisissa hypoteettisissa tilanteissa.



Kuva 6. CHP:n todellinen ja lämpöpumppujen hypoteettinen, provokatiivinen vaikutus siihen, kuinka paljon sähköä Suomessa on vuoden mittaan tuotettava muilla keinoilla kuin kaukolämpö-CHP:llä. Mitä tasaisempi käyrä, sitä kannattavampaa on rakentaa investoinniltaan kalliita ydin- tai CCS-voimalaitoksia.

Tämä teknis-taloudelliseen optimointiin kulutuksen vuosijakauman perusteella perustuva menetelmä antaa luotettavamman arvion tilanteesta kuin pelkkä nykytilanteeseen ja vuosikeskiarvoihin perustuva laskenta. Investoijien ajattelutapa saattaa olla sikäli suoraviivaisempi, että he yrittävät arvioida tulevaa sähkön hintakehitystä ja toisaalta tuotantopanosten hintaa tulevaisuudessa. Tällaisella tarkastelulla pyritään pikemminkin arvioimaan yksittäisen, tietyntyyppisen laitoksen rakentamisen kannattavuutta kuin optimoimaan kokonaisuutta. Periaatteessa lähestymistavat johtavat kuitenkin samansuuntaiseen lopputulokseen, jos kannattavuuslaskennassa käytettävät parametrit ovat samoja.

Seuraavassa on esitetty joitakin näkökohtia, jotka vaikuttavat tulokseen.

#### 4.2.1. INVESTOINNILTAAN KALLIIT LAITOKSET KUTEN YDINVOIMA JA CCS SOPIVAT PERUSKUORMAN AJOON

Taulukossa 4 on esitetty erityyppisten pelkkää sähköä tuottavien investointi- ja käyttökustannuksia (International Energy Agency 2010). Mitä kalliimpi laitos, sitä tärkeämpää on sen vuotuisen käyttöajan maksimointi. Investoinniltaan edullisia mutta käyttökustannuksiltaan kalliita laitoksia kannattaa puolestaan käyttää vain huippukuormien ajoon (International Energy Agency 2010, Tzimas ym. 2009).

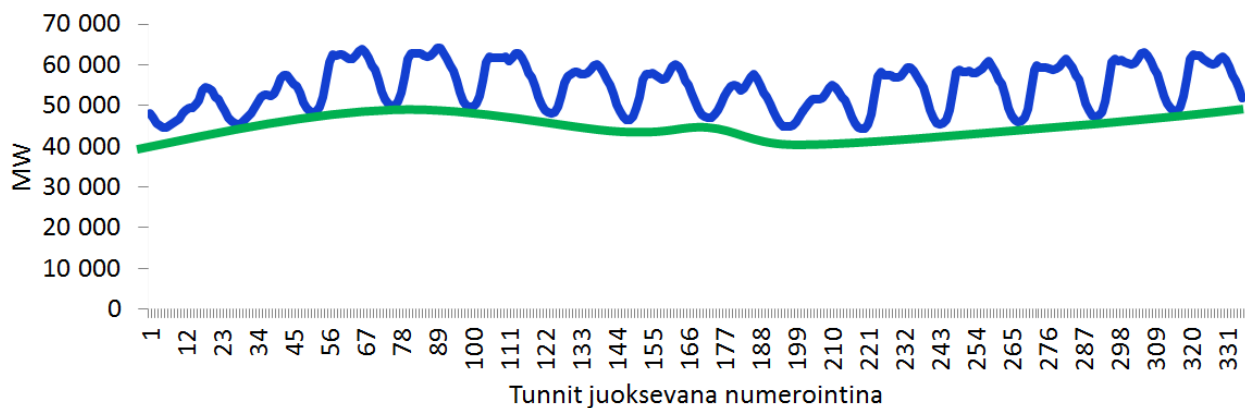
Ydin	Hiili, CCS	Hiili	CCGT	Dieselmoottori	OCGT
------	------------	-------	------	----------------	------

Investointi	2789	2610	1450	727	756	635	€/kWe
Muut kiinteät kulut	21	16	16	10	15	13	€/kWe/a
Polttoaine ilman päästöoikeuden hintaa	6	24	20	63	226	300	€/kWe
Muut muuttuvat kulut	6	37	5	5	5	23	€/MWh
Hyötysuhde	33	35	41	57	41	31	%

Taulukko 4. Erityyppisten pelkkää sähköä tuottavien voimalaitosten hankinta- ja käyttökustannuksia (International Energy Agency 2010). CCGT = combined cycle gas turbine (kaasukombi eli kaasuturbiini+ höyryturbiini), OCGT = open cycle gas turbine (pelkkä kaasuturbiini). Hiilidioksidin kuljetus- ja varastointikustannuksiksi on CCS:n tapauksessa oletettu 20 euroa/tonni (Teir ym. 2010). Ne on sisällytetty "muihin muuttuviin kuluihin". "e" tarkoittaa yksiköissä sähköä ja "a" vuotta.

#### 4.2.2. VESIVOIMALLA VOIDAAN TASATA OSA SÄHKÖNKULUTUKSEN PÄIVÄ- JA VUODENAIKAISVAIHTELUSTA, MUTTA KAPASITEETTI ON RAJALLINEN, EUROOPAN TASOLLA ARVIOLTA NOIN 40 % PÄIVÄVAIHTELUSTA

Sähkölämmitys (sekä suora että lämpöpumpuilla), valaistus ja sähkölaitteiden käyttö aiheuttavat sen, että kulutus on päivällä suurempi kuin yöllä ja talvella suurempi kuin kesällä. Tätä vaihtelua on tasattu Pohjoismaissa perinteisesti enimmäkseen vesivoimalla. Sen kapasiteetti on kuitenkin rajallinen, varsinkin koko Euroopan tilannetta tarkastellen. Sähkönkulutuksen päivävaihtelun tasoittamiseen päivittäisen minimikulutuksen ylittävältä osalta kuluu Pohjoismaissa laskennallisesti noin 60 TWh/a, siis pääosin vesivoimaa. Kuvassa 7 on havainnollistettu aiheesta. Yksi vuorokausi on aina kahden "laakson" välinen aika.



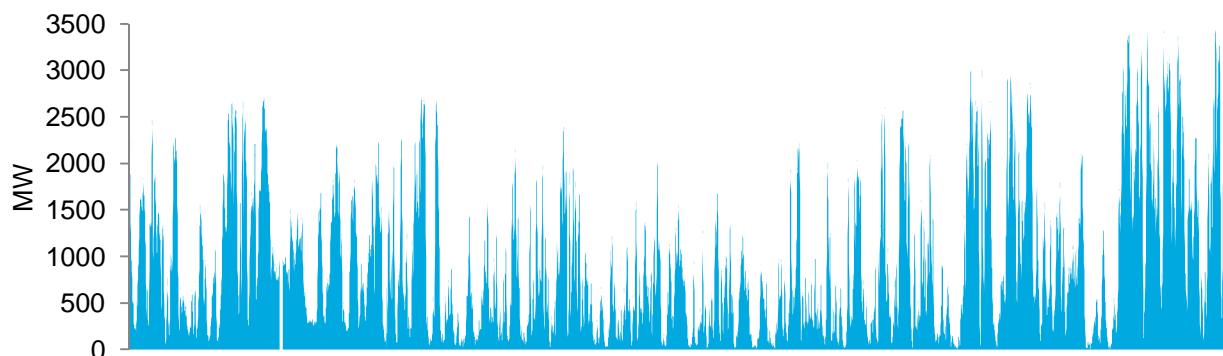
Kuva 7. Pohjoismaiden sähkönkulutus vuonna 1.1.2011-14.1.2011 (ylempi käyrä<sup>22</sup>) ja esim. vesivoiman juoksutusta säätämällä tasoitettu kulutus (alempi käyrä). Vesivoiman määrä on kuitenkin hyvin rajallinen, varsinkin huomioiden koko Euroopan tilanne.

EU-27-alueelle ekstrapoloituna vastaava päivävaihteluiden tasaustarve olisi noin 500 TWh, mutta vesivoimavarastojen maksimikoko vastaavalla alueella on vain noin 200 TWh. Siirtokapasiteetin rajoitusten vuoksi vesivoimaa on Pohjoismaissa riittänyt tähän asti myös vuosivaihtelun tasaamiseen. Säättökapasiteetti kiinnostaa kuitenkin myös Keski-Euroopan maita ja esimerkiksi Saksan energiapolitiikassa on toisinaan laskettu melko paljon ko. säädön varaan uusien siirtoyhteyksien myötä (DENA 2012, Supponen 2011, Schrabner ym. 2012). Kaikille säättökapasiteettia ei siis riitä eikä näin ollen Suomessakaan voida enää laskea ainakaan vuodenaikaisvaihtelun tasoittamista sen varaan, vaan säätövoima on suureksi osaksi perinteistä lämpövoimaa. Se ei välttämättä sijaitse Suomessa, mutta Suomen sähkönkäytön ajoittuminen vaikuttaa verkon kautta myös muualla tapahtuvaan sähköntuotantoon.

#### 4.2.3. TUULI- JA AURINKOVOIMA VAATIVAT PALJON SÄÄTÖVOIMAA

Tuuli- ja aurinkoenergian tuotanto vaihtelee paljon ja nopeasti. Esimerkki tästä on kuvassa 8. Jos kulutus ei jousta, vaihtelevaa tuotantoa tasaamaan tarvitaan nopeaa säätövoimaa. Kuten todettu, vesivoiman säätöpotentiaali ei täysin riitä päivävaihtelunkaan tasoittamiseen. Näin ollen vesivoimaa ei voi laskennassa ajatella käytettävän tuuli- ja

aurinkoenergian tuotannon tasaamiseen päästöttömästi, ellei päivävaihtelua tasoittamaan käytetä jotakin muuta päästötöntä tapaa.



Kuva 8. Tanskan tuulivoimaloiden tuottama sähköteho tunneittain vuonna 2011 (Nord Pool Spot 2012).

Ellei muuta säätövoimaa ole käytettävissä, esimerkiksi kaasukombi-, kaasuturbiini- tai polttomoottorivoimalaitokset voivat toimia käytännössä säätövoimana edullisten pääomakustannustensa ja nopean säädettävyytensä ansiosta. Erityisesti kaasukombilaitoksilla on kuitenkin otettava huomioon se, että niiden oltava jatkuvasti toiminnassa minimikuormalla (30-40 % täydestä tehosta). Muutoin kaasukombilaitokset ovat mainituista vähäpäästöisimpiä ja tietyntyyppiset uudet laitokset myös säätävät nopeasti, muutamassa minuutissa minimiteholta maksimiteholle.

Tuuli- ja aurinkoenergia voi vähentää päästöjä välillisesti huomattavasti enemmänkin kuin vain korvaamalla suoraan muuta sähköntuotantoa. Tarvittava säätävä sähköntuotanto ohjautuu nimittäin tällöin nimenomaan maakaasulaitoksiin. Jos kaasukombilaitokset korvaavat hiililaitokset, joita tasaisemman kuorman tapauksessa olisi rakennettu, päästöt uusiutuvilta ”jäljelle jääneen” sähköntuotannon osalta likimain puolittuvat. On myös muistettava, että Keski-Euroopassa on rakenteilla uutta hiililauhdetta mm. tuulivoiman lisäyksen vuoksi <sup>26</sup>. Sen sijaan jos uusiutuvat+kaasu-yhdistelmän tilalla olisi ollut esim. ydinvoimaa tai CCS-laitoksia, tilanne muuttuu päinvastaiseksi eli tuuli ja aurinko välillisesti lisäävät päästöjä, eivät vähennä niitä.

#### 4.2.4. CHP-TUOTANTO TASAA MYÖS SÄHKÖNKULUTUKSEN PÄIVÄVAIHTELUA

Kuvassa 6 esitettiin, että kaukolämmön kulutuksen mukaan vaihtuva CHP-sähköntuotanto tasoittaa sähkönkulutuksen vuosiprofiilia. Myös päivätasolla kaukolämmön kulutus vaihtelee samansuuntaisesti kuin sähkön kulutus (lämpimän käyttöveden, ilmanvaihtolaitteiden käyntiaikojen ja yölämpötilojen pudotusten vuoksi), joten päivätasollakin lämpökuorman mukaan tehtävä CHP-sähköntuotanto tasaa muille tuotantomuodoille tehtäväksi jäävän sähkön kulutusprofiilia. Tämä taas tarkoittaa sitä, että vesivoimaa jää enemmän käyttöön tuuli- ja aurinkovoiman tuotantovaihtelujen tasaamiseen.

Vesivoimaa tai muuta säätövoimaa kuluisi päiväkulutuksen leikkaamiseen Suomessa noin 10 TWh/a kuvan 7 esittämällä tavalla laskettuna. Kaukolämpövoimalaitosten tasoittava osuus tästä on noin 0,3 TWh/a.

#### 4.2.5. LÄMPÖPUMPUT LISÄÄVÄT SÄHKÖNKULUTUKSEN PÄIVÄ- JA VUODENAIKAISVAIHTELUA

Lämpöpumput lisäävät vaihtelua ilmeisen vuodenaikaisvaihtelun (ks. kuva 6) lisäksi kahdella tavalla. Kuten edellä todettiin, lämmönkulutus on yleensä päivällä suurimmillaan. Jos lämpöpumpuilla tuotettaisiin esimerkiksi saman verran lämpöä kuin CHP-kaukolämmöllä nyt (29 TWh/a, Tilastokeskus 2011), päivävaihtelun tasaamiseen tarvittaisiin noin 1 TWh/a lisää säätövoimaa. Tällöin on oletuksena, että lämpöpumpun tuottaman lämmön vuorokausiprofiili noudattaa samaa muotoa kuin kaukolämmön nykyään.

Toiseksi, lämpöpumppujen lämpökerroin yleensä huononee ilmojen kylmetessä sekä siksi, että kiertoveden lämpötilaa nostetaan (lämpöpumpun lämpökerroin on kääntäen verrannollinen lämmönlähteen ja -luovutuksen lämpötilaeroon) että siksi, että yleensä pumppuja ei mitoiteta koko tehontarpeelle vaan esim. 60%:lle maksimikuormasta. Loppu tehdään tavallisimmin suoralla sähköllä. Lisäksi ilmasta lämpöä ottavat pumput lopettavat toimintansa kokonaan kovimmilla pakkasilla. (Holopainen et al. 2010).

## 4.2.6. NYKYINEN SÄHKÖPÖRSSIN HINNOITTELUJÄRJESTELMÄ EI KANNUSTA RAKENTAMAAN YDINVOIMAA TAI CCS:ÄÄ YLI VAKIONA PYSYVÄN KULUTUKSEN OSAN

Sähkön pörssihinta määräytyy yhteispohjoismaisessa sähköpörssissä Nordpoolissa tunneittain kulloinkin käytössä olevan kalleimman sähköntuotantomuodon muuttuvien kustannusten mukaan (Nord Pool Spot 2012). Muuttuvilta kustannuksiltaan kalleinta tuotantoa on muu lauhdevoima kuin ydinvoima (International Energy Agency 2010). Sähköntuottajan ei siis kannata rakentaa muuttuvilta kustannuksiltaan edullista tuotantoa (esim. ydinvoimaa) niin paljoa, että se olisi muuten kuin satunnaisesti kalleimpana eli pörssihintaa määrittävänä tuotantomuotona.

Hinnoitteluperiaatteesta seuraa myös se, että tavanomaista lauhdevoimaa ei kannata rakentaa, ennen kuin vanhaa, muuttuvilta kustannuksiltaan vielä kalliimpaa tuotantokapasiteettia (esim. öljylauhdetta) joudutaan käyttämään niin paljon, että keskimääräinen pörssihinta nousee riittävästi. Erityisesti CCS-voimaloiden (sekä kiinteät että muuttuvat kustannukset ovat suuret, Teir ym. 2010, International Energy Agency 2010) rakentaminen edellyttäisi varsin korkeaa sähkön perushintaa. Tämä pätee niin kauan kuin voimalaitoskapasiteetista ei makseta erikseen, vain myydystä energiasta. Toisaalta marginaalihinnoittelujärjestelmä on sikäli hyvä, että se kannustaa säästämään sähköä juuri silloin kun säästöstä on eniten hyötyä, koska hinta on jossakin määrin suoraan verrannollinen ympäristövaikutuksiin, kuten kohdassa 4.1. kuvailtiin.

Ns. Mankala-periaatteen mukaisesti rakennetut laitokset poikkeavat edellä esitetystä logiikasta, koska niiden tuottama sähkö myydään omakustannushintaan suoraan osakkaille pörssin ohi.

Myös uusia CHP-kaukolämpölaitoksia on kannattanut rakentaa, sillä niiden yritystaloudellinen kannattavuus tulee sähköntuotannon ohella olennaisesti kaukolämmön tuotannosta saatavista tuloista. Jos CHP-kaukolämmön kulutus vähenee esimerkiksi rakennuksissa tehtävien energiaremonttien myötä, vähenee myös CHP-sähkön tuotanto ja lauhdevoiman tuotantoa joudutaan lisäämään. Tämä tapahtuu aluksi olemassa olevilla, käyttökustannuksiltaan kalliilla laitoksilla. Saman trendin jatkuessa pidempään on rakennettava CHP-tuotannon korvaajaksi uusia lauhdelaitoksia tai esim. tuulivoimaa, joka puolestaan edellyttää rinnalleen runsaasti säätövoimaa eli todennäköisesti lauhdevoimaa, ellei jäljellejäänyttä CHP-tuotantoa kyetä lämpövarastojen avulla käyttämään joustavaan sähköntuotantoon esimerkiksi tuuli- ja aurinkosähkön aiheuttamaa vaihtelua tasaamaan. Uusien laitosten rakentamista kuitenkin edeltää sähkön kuluttajahintojen nousu.