

Sähkön- ja lämmöntuotannon kustannussimulointi ja herkkyysanalyysi

Pekka Neittaanmäki

Osmo Schroderus

Jyväskylän yliopisto
Tietotekniikan laitos
2010

Tiivistelmä

Raportin tarkoituksena on esittää pelkistetyn matemaattisen mallin avulla sähköä ja lämpöä tuottavien voimalaitosten oleelliset kustannus- ja tuottotekijät. Mallin pohjalta on tehty Excel-pohjainen simulointiympäristö, jonka avulla asiasta kiinnostunut henkilö voi laskea omilla parametreillaan mallin kuvaamien voimalaitosten kannattavuutta eri polttoaineiden sekä sähkön ja kaukolämmön hinnoilla.

Raportissa on laskettu neljä esimerkkiä kahden voimalaitoksen tapauksessa:

1. Voimalaitos 1 ja Voimalaitos 2 tuottavat kaukolämpöä ja vastapainesähköä yhtä paljon. Lisäksi Voimalaitos 1 tuottaa lauhdesähköä.
2. Voimalaitos 1 ei tuota energiaa ollenkaan mutta aiheuttaa kiinteiden kustannusten verran kuluja. Voimalaitos 2 tuottaa energiaa täydellä kapasiteetilla.
3. Voimalaitos 1 tuottaa energiaa täydellä kapasiteetilla ja Voimalaitos 2 ei tuota ollenkaan energiaa vaan aiheuttaa kiinteiden kustannusten verran kuluja.
4. Voimalaitos 1 ei aiheuta minkäänlaisia kuluja, ei edes kiinteitä kuluja. Voimalaitos 2 tuottaa energiaa täydellä kapasiteetilla.

Kaukolämpömittari-työkalu visualisoi yksinkertaisella tavalla kahden voimalaitoksen kokonaisuuden käyttämän polttoaineen hinnan ja niistä tuotettavien lämpö- ja sähköenergioiden myyntihintojen keskinäisiä suhteita, kun otetaan huomioon voimalaitoksille asetettu taloudellinen tuotto ja laitoksista koituvat kiinteät kustannukset. Polttoaineen tai sähkön hintaa muutettaessa työkalu laskee muutoksen jälkeen uuden kaukolämmön hinnan, jolla päästään asetettuun tuottotavoitteeseen.

Raportissa esitetty simulointimalli on kehitysversio. Pyydämme palautetta sen ja raportissa esitettyjen mallien jatkokehityksen pohjaksi.

Pekka Neittaanmäki , pekka.neittaanmaki@mit.jyu.fi

Osmo Schroderus, osmo.schroderus@jyu.fi

1. Johdanto

Energiantuotanto on varsin kompleksinen prosessi ja sen ymmärtäminen ja eri vaikutusten arvioiminen on vaikeaa päättäjille, joilla ei ole alan koulutusta. Tämän raportin tarkoitus on esittää pelkistetyllä simulointimallilla energiantuotannon oleelliset kustannus/tuottoyhteydet ja osoittaa kustannusten kannalta oleelliset tekijät. Raportissa vastataan mm. seuraaviin kysymyksiin:

- Miten polttoaineen hinta vaikuttaa tuotantokustannuksiin?
- Mikä on päästömaksujen vaikutus polttoaineen hintaan?
- Miten hallituksen tuki puupohjaisille polttoaineille vaikuttaa sähkön tuotantokustannuksiin?
- Millä kaukolämmön ja sähkön hinnoilla tuotanto on kannattavaa?

Tässä raportissa tarkastellaan sähkön- ja lämmöntuotantoa yksiköissä, joissa turpeella ja puupohjaisissa polttoaineilla tuotetaan vastapainesähköä ja kaukolämpöä sekä mahdollisesti myös lauhdesähköä. Tuotantokustannukset muodostuvat polttoaine-, käyttö- sekä pääomakustannuksista. Näistä polttoainekustannukset ovat merkittävimpiä. Koska eri energiantuotantoprosesseissa hyötysuhteet vaihtelevat paljon, on tuotannon optimointi keskeistä kannattavuuden kannalta.

Simuloinnissa ja tuotannon optimoinnissa oletetaan, että on kaksi voimalaitosta, jotka molemmat käyttävät puupohjaisia polttoaineita ja turvetta. Voimalaitos 1 tuottaa kaukolämpöä, vastapainesähköä ja lauhdesähköä, Voimalaitos 2 tuottaa kaukolämpöä ja vastapainesähköä. Voimalaitos 1:n teho on 1.5-kertainen Voimalaitos 2:n tehoon verrattuna ja kiinteät kulut ovat 2.5 kertaa suuremmat kuin Voimalaitos 2:llä. Rajoitteena on kaukolämmön kysyntä. Kustannukset koostuvat polttoainekustannuksista, käyttö- ja pääomakuluista sekä omistajien tuotto-odotuksista. Riippuen voimalan käyttöasteesta käyttökulut ja pääomakulut vaihtelevat 20—40%.n välillä.

Polttoainekulut ovat kaikkein merkityksellisimpiä ja ne ovat vaikeasti ennakoitavissa. Käyttökustannukset koostuvat yksikön käyttö-, huolto-, materiaali-, jäte- ym. kuluista. Lisäksi kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. jakeluun (esim. kaukolämmön pumppaus verkostossa) liittyvät kulut sekä hävikit sähkön ja kaukolämmön jakelussa.

Excel-pohjaisella mallilla voidaan simuloida erilaisia tuotantostrategioita tuottavuuden maksimoimiseksi. Tuottavuutta voidaan optimoida voimalaitosten käyttöasteilla polttoaineen sekä sähkön ja lämmön hintojen muuttuessa. Edullisen vastapainesähkön tuotantoa rajoittaa kaukolämmön kysyntä ja tuotannon ohjautuminen kalliin lauhdesähkön tuotantoon.

Mikä vaikutus on, jos lauhdesähkön tuotannolle annetaan takuuhinta? Koska vastapainesähkön hintaan ei itse voida vaikuttaa, ainoaksi muuttujaksi jää kaukolämmön hinta. Simulaattorin avulla voi selvittää vaikutusta kaukolämmön hintaan. Simulaattori tekee mahdolliseksi analysoida, millä tuotantostrategialla ja millä tuotteiden hinnoilla päästään haluttuun tulokseen.

Simulointiaikana on käytetty yhtä vuotta. Tehty simulointimalli mahdollistaa luonnollisestikin esimerkiksi kuukausi- tai päiväkohtaisen tarkastelun, jolloin eri vuodenaikoihin liittyvät kaukolämmön tarpeet ja sen myötä edullisen vastapainesähkön tuotantomahdollisuudet vaihtelevat. Henkilö, joka on kiinnostunut laskennasta, voi

hyödyntää tehtyä Excel-pohjaista simulointimallia, joka löytyy osoitteesta www.mit.jyu.fi/scoma/energiasimulaattori/. Myös käytetyt parametrit ovat likiarvoja todellisesta tilanteesta. Lukija, joka haluaa saada tilanteesta tarkemman kuvan, voi käyttää kuhunkin tilanteeseen soveltuvia parametreja simuloinnissa.

Raportin sisältö on seuraava: Luvussa 2 esitetään matemaattisia malleja, joilla kuvataan polttoaineen hintojen sekä tuotantokustannusten ja kokonaistuottavuuden välisiä yhteyksiä. Luvussa 3 esitellään kehitetty Excel-pohjainen kokonaiskustannuslaskuri. Kaukolämpömittari-työkalu visualisoi yksinkertaisella tavalla kahden voimalaitoksen kokonaisuuden käyttämän polttoaineen hinnan ja niissä tuotettavien lämpö- ja sähköenergioiden myyntihintojen keskinäisiä suhteita, kun otetaan huomioon voimalaitoksille asetettu taloudellinen tuotto ja laitoksista koituvat kiinteät kustannukset. Mittarilla voidaan graafisesti muuttaa esimerkiksi polttoaineen hintaa ja samalla nähdä, mikä vaikutus sillä on kaukolämmön hintaan, jos sähkön myyntihinta pysyy vakiona. Vastaavasti voidaan muuttaa myytävän sähkön hintaa ja nähdä, miten kaukolämmön hinnan riippuvuus polttoaineen hinnasta muuttuu. Polttoaineen tai sähkön hintaa muutettaessa työkalu laskee muutoksen jälkeen uuden kaukolämmön hinnan, jolla päästään asetettuun tuottotavoitteeseen. Liitteessä 1 tarkastellaan päästöoikeuksien hintoja ja puupohjaisen sähköntuotannon tuen vaikutusta puun ja turpeen hintakilpailukykyyn. Liitteessä 2 on esitetty lauhdevoimalatuotannon herkkyysanalyysi eri polttoaineseosten ja päästöoikeushintojen osalta. Liitteessä 3 esitetään laajennettu puupolttoaineen tukimalli. Liitteenä 4 on sähkön hintakehitys vuoteen 2010 ja skenaariot vuosille 2011–2030.

2. Laskentamalli

2.1. Tuotantomalli

Polttoaineen hinnan vaikutusta energian tuotantokustannuksiin voidaan kuvata lineaarisella mallilla

$$(1) \quad y = kx + c,$$

missä k on polttoaineen kulukerroin, c kuvaa kiinteitä kuluja, muuttuja x on polttoaineen hinta €/MWh ja y on tuotantokustannus €/MWh.

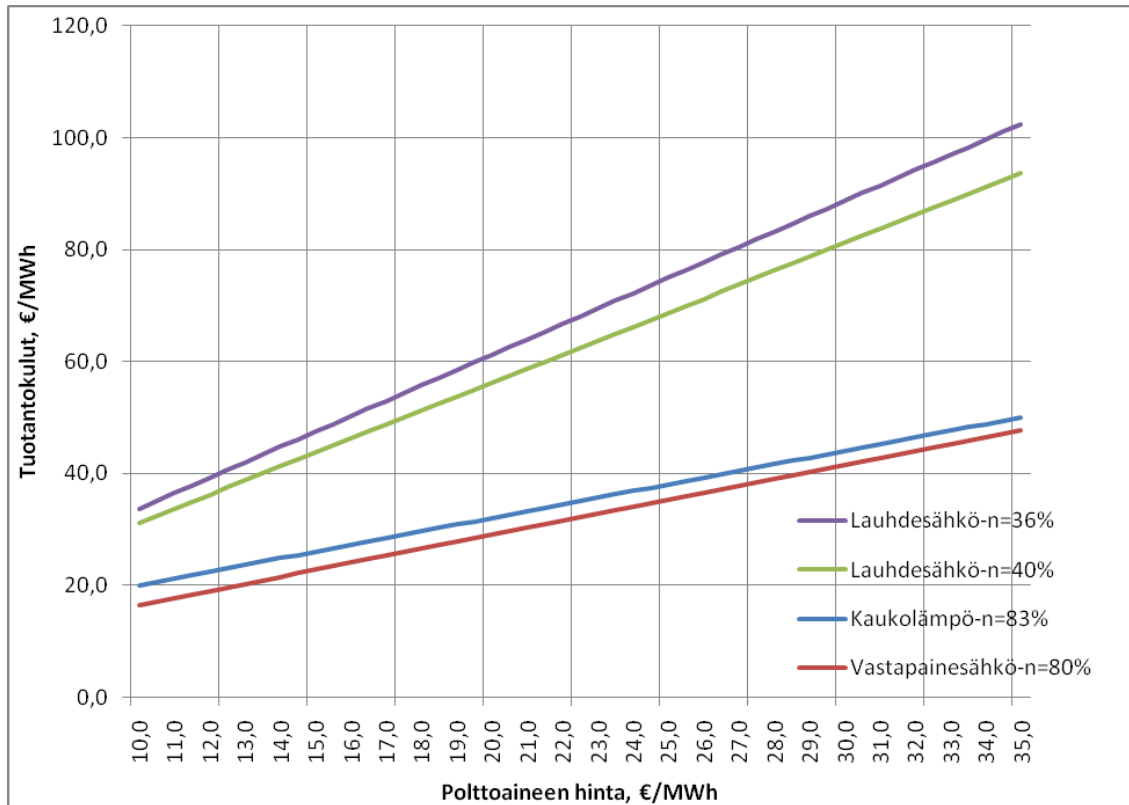
Polttoaineena on joko puu tai turve, joiden hinta simuloinneissa vaihtelee 10–30 €/MWh. Kiinteät kulut muodostuvat pääomakuluista (korko ja lyhennys) sekä käyttökuluista.

Oletus:

Kaukolämpö	kulusuhde 1.20	(hyötysuhde 83 %)
Vastapainesähkö	kulusuhde 1.25	(hyötysuhde 80 %)
Lauhdesähkö	kulusuhde 2.75	(hyötysuhde 36%) tai
	kulusuhde 2.5	(hyötysuhde 40%)

Vastapainesähköä tuotettaessa syntyy kaukolämpöä suhteessa 1:2. Siten edullista vastapainesähköntuotantoa rajoittaa kaukolämmön tarve. Voimalan sisäisiin toimintoihin kuluu 8% sekä siirtokuluihin 2% eli 10% sähköenergiasta. Nämä tekijät, samoin kuin kaukolämmön 8%:n hävikki jakelussa, on huomioitava kannattavuutta laskettaessa.

Kuvassa 2.1 on hahmotettu tuotantokuluja polttoaineen hinnan funktiona kaavan (1) mukaisesti. Lauhdesähkön osalta on käytetty kahta hyötysuhdetta, 36% ja 40%. Hyötysuhteella on ratkaiseva merkitys tuotantokuluissa.



Kuva 2.1. Tuotantokulut polttoaineen hinnan funktiona

2.2. Tuottolaskenta

Kaavaa (1) voidaan käyttää myös tuottolaskentaan. Kun tiedetään tuotto b_i tuotantotavalla i ($i = 1$ kaukolämpö, $i = 2$ vastapainesähkö, $i = 3$ lauhdesähkö), saadaan yksikkökustannukset y_i kaavasta

$$(2) \quad y_i = k_i x_i + c_i + b_i,$$

missä k_i on kulukerroin, c_i kiinteät kustannukset, b_i tuotto-odotus ja x_i polttoaineen hinta.

Tuotantokustannuksiin lisätään kerroin d_i , joka kuvaa sisäisiä kuluja: kaukolämmön hävikki 8% ($k_i = 1.08$) ja sähköntuotannon osalta sisäinen käyttö 8% ja hävikki verkossa 2%, yhteensä 10% ($k_2 = k_3 = 1.1$). Tästä saadaan

$$(3) \quad d_i y_i = k_i x_i + c_i + b_i,$$

Näin tuoton y_i antava polttoaineen hinta x_i voidaan laskea kaavasta

$$(4) \quad x_i = \frac{d_i y_i}{k_i} - \frac{c_i}{k_i} - \frac{b_i}{k_i}.$$

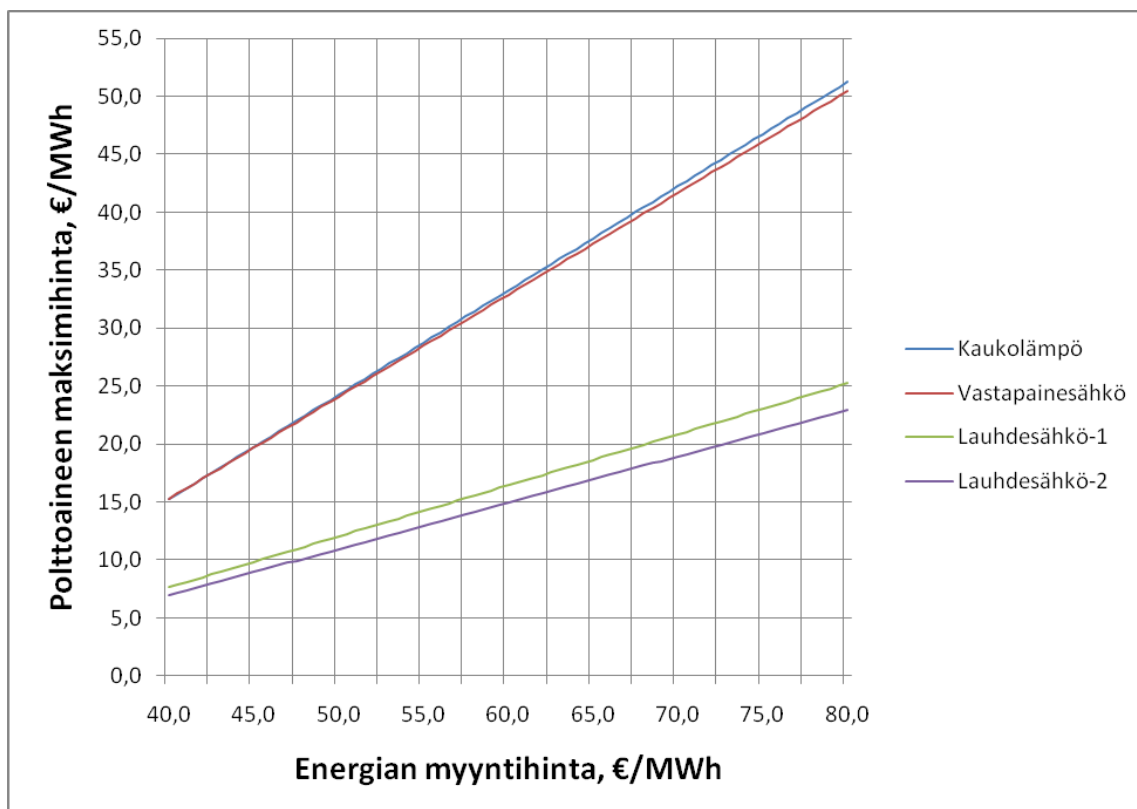
Taulukosta 2.1 ilmenevät kuvan 2.1 laskuissa käytetyt kertoimet.

Energiamuoto	k_i	c_i	b_i	d_i
Kaukolämpö	1.2	18.3 €/MWh	6.6 €/MWh	1.08
Vastapainesähkö	1.25	18.3 €/MWh	6.6 €/MWh	1.1
Lauhesähkö 1	2.5	18.3 €/MWh	6.6 €/MWh	1.1
Lauhesähkö 2	2.75	18.1 €/MWh	6.6 €/MWh	

Taulukko 2.1. Parametrit ja käytetyt arvot

Kuvassa 2.2 on polttoaineen hinnat kaavan (4) mukaan tuotantohinnan (40–80 €/MWh) funktiona. Kuvasta nähdään kuinka suuri polttoaineen hinta voi enimmillään olla, jotta päästään haluttuun euromääräiseen tuottoon tietyllä energian myyntihinnalla. Esimerkiksi nähdään, että kaukolämmön myyntihinnan (ALV 0%) ollessa 50 €/MWh polttoaineen hinta voi enimmillään olla noin 24 €/MWh, jotta lämmön myynnin osalta saavutetaan haluttu tuotto 6.6 €/MWh. Huom: Arvonlisävero 22% nostaa kuluttajahintoja ja esim. 50 €/MWh:n tapauksessa asiakashinta olisi 61 €/MWh.

Vastaavasti lauhdesähkö 2:n myyntihinnan ollessa 45 €/MWh polttoaineen hinta voi enimmillään olla noin 8 €/MWh, jotta sähkön myynnin osalta saavutetaan haluttu tuotto 6.6 €/MWh. Yli 70 €/MWh:n myyntihinnalla lauhdesähkön polttoainekulut voivat olla 20 €/MWh.. Tällöin asiakkaan arvonlisäveron sisältävä hinta olisi 85.4 €/MWh. Taulukossa 2.2 olevat kertoimet kuvaavat tilannetta, jossa kiinteät kulut ovat 0 €/MWh.



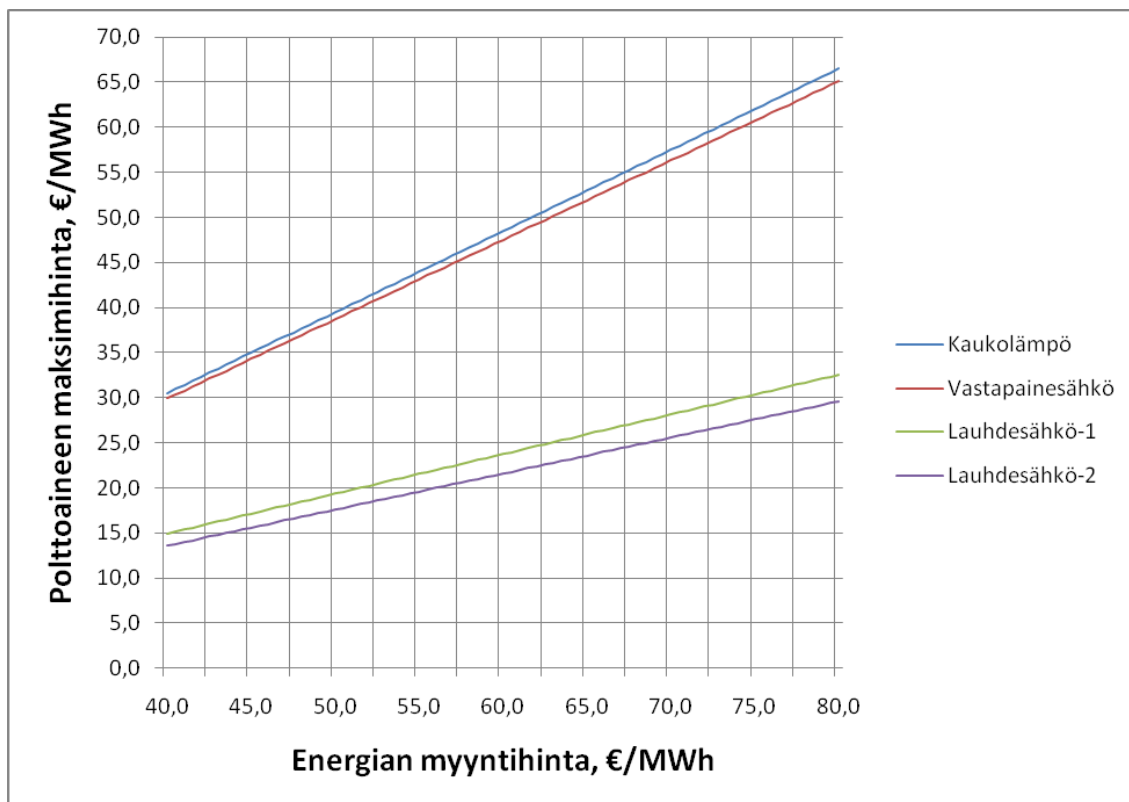
Kuva 2.2. Polttoaineen hinta energian tuotantohinnan (ALV 0%) funktiona eri tuotantomuodoilla.

Energiamuoto	k_i	c_i	b_i	d_i
Kaukolämpö	1.2	0 €/MWh	6.6 €/MWh	1.08
Vastapainesähkö	1.25	0 €/MWh	6.6 €/MWh	1.1
Lauhdesähkö 1	2.5	0 €/MWh	6.6 €/MWh	1.1
Lauhdesähkö 1	2.75	0 €/MWh	6.6 €/MWh	1.1

Taulukko 2.2 Parametrit ja käytetyt arvot, kiinteät kulut 0 €/MWh.

Kuvassa 2.3 on kaavan (3) mukaan polttoaineen hinnat tuotantohinnan (40–80 €/MWh) funktiona. Esimerkki on muuten samanlainen kuin kuvassa 2.1 esitetty, paitsi että kiinteät kustannukset on jätetty laskuista pois. Tällaisella oletuksella nähdään pelkkien muuttuvien kustannusten vaikutus polttoaineen enimmäishintaan. Esimerkistä nähdään että kaukolämmön myyntihinnan ollessa 50 € polttoaineen hinta voi enimmillään olla noin 39 €, jotta saavutetaan lämmön myynnin osalta haluttu tuotto 6.6 €/MWh.

Vastaavasti lauhdesähkö 2:n myyntihinnan ollessa 45 € polttoaineen hinta voi enimmillään olla noin 16 €, jotta saavutetaan sähkön myynnin osalta haluttu tuotto 6.6 €/MWh. Jos polttoaineen hinta olisi yli 20 €/MWh, olisi lauhdesähkö 2:n hinta yli 57 €/MWh 6.6 €/MWh:n tuottotavoitteella ilman kiinteitä kuluja.



Kuva 2.3. Polttoaineen hinta energian tuotantohinnan (ALV 0%) funktiona eri energiamuodoilla, kiinteä kulut 0 €/MWh.

2.3. Tuotannon kannattavuus

Kuten kuvista 2.2 ja 2.3 havaitaan, lauhdesähkön tuotanto ei ole kannattavaa, vaikka kiinteitä kuluja ei olisi lainkaan. Kulukerroin on 2.5 tai peräti 2.75 ja tuotantokulut tulevat liian korkeiksi.

Jos vastapainesähkö- ja kaukolämpötuotannot pystyvät kompensoimaan tappiollisen lauhdesähkön tuotannon, on laitos kannattava. Tuotantoa voidaan optimoida: lauhdesähköä tuotetaan vain silloin, kun hinta vastaa tuotantokuluja. Tällaiset huippuhintajaksot ovat lyhyitä, kuten liitteen 4 kuvasta ilmenee.

Lauhdesähkön tuotanto on kriittinen tekijä. Voidaan laskea, mikä on vaikutus kaukolämmön hintaan, jos lauhdesähkön tuotannolle annetaan takuuhinta. Koska vastapainesähkön hintaan ei itse voimalaitos voi vaikuttaa, ainoaksi muuttujaksi jää kaukolämmön hinta. Luvun 3 simulaatioissa havaitaan kaukolämmön hinnan voimakas kasvu polttoaineen hinnan funktiona kiinteillä sähkön hinnoilla.

3. Sähkön ja lämmöntuotannon kokonaiskannattavuuden laskuri

3.1. Yleistä

Lähtökohtana oli toteuttaa helppokäyttöinen työkalu, jolla voidaan simuloida ja visualisoida yleisellä tasolla kaukolämpölaitoksen toimintaan liittyviä kustannuksia ja sitä, miten erilaiset laitoksen toimintaan liittyvät parametrit vaikuttavat lopputulokseen. Tavoitteena helppokäyttöisyydelle oli se, että käyttäjä voi muutamia parametreja muuttamalla nähdä sekä numeerisena että graafisena tietona eri tekijöiden vaikutuksen laitoksen energiantuotannon lopputulokseen.

3.2. Simuloinnin ja visualisoinnin työkalu

Visualisoinnin työkaluksi valittiin Excel, koska ohjelma on käytettävissä lähes kaikissa Windows-koneissa, tai vastaava OpenOffice Calc –työkalu, joka on ilmaiseksi saatavilla ja sillä voidaan käyttää samaa Excel-taulukkoa pienillä muutoksilla myös muissa käyttöjärjestelmissä. Excel sopii myös ominaisuuksiensa puolesta riittävän hyvin tällaisiin simulointeihin ja visualisointeihin. Tämän luvun lopussa on omat versiot sekä Microsoft Excel että OpenOffice Calc –ohjelmille.

3.3. Voimalaitoksista ja kustannussimuloinnin olettamuksista

Yksityiskohtainen lämpö- ja sähkövoimalaitoksen kustannusten tarkastelu on kokonaisuutena hyvin moniulotteinen ongelma. Jotta siitä voisi esittää täysin tarkat laskelmat, vaatisi se tarkasteltavan voimalaitoksen toiminnan tarkan selvityksen ja voimalaitoksen hyötysuhteeseen vaikuttavien eri osien ja prosessien tarkat tekniset tiedot. Laitoksessa, jossa tuotetaan lämpöä ja sähköä ympäri vuoden, toimintaympäristö vaihtelee oleellisesti vuodenajan funktiona; esimerkiksi kaukolämpöä käytetään muutaman talvikuukauden aikana hyvin suuri osa vuotuisesta kokonaiskulutuksesta ja kesäaikana kulutus on huomattavasti vähäisempää. Sähkömarkkinoiden kulutus vaihtelee myös huomattavasti kalenterivuoden aikana, samoin sähkömarkkinoiden sähköstä tarjoama energiahinta ja fossiilisten polttoaineiden päästöoikeuksien hintakehitys.

Jotta kustannussimulointi voitaisiin pitää kohtuullisen yksinkertaisella tasolla ja saada yleiskuvan antava työkalu, laskennassa tehtiin seuraavia olettamuksia:

- Työkalu tehtiin kahden voimalaitoksen tarkastelemiseksi sekä erillisinä laitoksina että myös yhtenä investointikokonaisuutena.
- Voimalaitoksille on annettavissa vuositasolla yksi yhteinen tuottotavoite, minkä pohjalta laskelmissa on esitetty kokonaistulos sekä yhtenä kokonaisinvestointina että myös erillisinä laitospohjaisina investointeina tarkasteltuna. Simulointiaika

voi olla kuukausi, viikko tai päivä, jolloin vastaavat suuret pitää jakaa luvulla 12, 52 tai 365.

- Kaukolämmön ja sähköenergian tuotantoa tarkasteltiin vuositasolla.
- Kaukolämmön, vastapainesähkön ja lauhdesähkön tuottamisessa oletettiin kullekin toisistaan riippumattomat ja vakiona pysyvät kulukertoimet (käytetty polttoenergia/tuotettu energia, ks. luku 2).
- Vastapainesähkön ja kaukolämmön tuotannon suhde on 1:2.
- Kaukolämmön jakelun verkostohäviöksi oletettiin 8%.
- Sähköntuotannon osalta laitoksen omakäytön suuruudeksi oletettiin 8% ja verkostohäiriöksi 2% eli yhteensä 10%.
- Polttoaineiden hinnat määriteltiin energiasisältöä kohden (€/MWh).
- Laskelmissa ei huomioida laitoksessa käytettävien fossiilisten polttoaineiden ja uusiutuvien polttoaineiden keskinäistä suhdetta ja siten päästöoikeuden hinnan ja puun tukien vaikutusta polttoaineen hintaan. Asiaa on tarkasteltu liitteissä 1—3.

3.4. Simuloinnissa käytetyt voimalaitokset

Simulointityökalun avulla voidaan helposti muuttaa laskennassa käytetyn voimalaitoksen parametreja. Tässä dokumentissa on kuvattu tulokset seuraavanlaisille voimalaitoksille:

Voimalaitos 1: Laitos tuottaa kaukolämpöä, vastapainesähköä ja lauhdesähköä.

Voimalaitos 2: Laitos tuottaa kaukolämpöä ja vastapainesähköä.

3.5. Simulointityökalun toiminta

Työkalu muodostuu Excel-taulukosta, joka sisältää kaksi välilehteä – ”Numerot” ja ”Kuvaajat”. Numerot-välilehdellä on kaikki laskennoissa käytetyt parametrit ja niiden perusteella tehdyt numeeriset laskelmat. Kuvaajat-välilehdellä on esitetty tehdyistä laskelmista valittu graafinen kuvaaja.

Kaikki Excel-taulukon tiedot ovat vapaasti muokattavissa, mikäli halutaan tehdä tarkasteluja toisella tavalla. Jos kuitenkin halutaan muuttaa vain tarkastelujen käyttämiä parametreja, ainoastaan keltaisella pohjavärillä merkityt solut on tarkoitettu muutettaviksi.

Kuva 3.1 esittää simulointityökalun muutettaviksi tarkoitettut solut. Niiden merkitys on kuvattu alla:

Solu/Rivi	Merkitys
Rivi 4	Voimalaitos 1:n tuotannon määrittävät tiedot
Solu D4	Voimalaitos 1:n nimi
Solu F4	Voimalaitos 1:n kaukolämmön tuotanto vuodessa, GWh
Solu G4	Voimalaitos 1:n vastapainesähkön tuotanto vuodessa, GWh
Solu H4	Voimalaitos 1:n lauhdesähkön tuotanto vuodessa, GWh
Solu J4	Voimalaitos 1:n kaikki kiinteät kustannukset vuodessa, €
Rivi 5	Voimalaitos 2:n tuotannon määrittävät tiedot
Solu D5	Voimalaitos 2:n nimi
Solu F5	Voimalaitos 2:n kaukolämmön tuotanto vuodessa, GWh

Solu G5	Voimalaitos 2:n vastapainesähkön tuotanto vuodessa, GWh
Solu H5	Voimalaitos 2:n lauhdesähkön tuotanto vuodessa, GWh
Solu J5	Voimalaitos 2:n kaikki kiinteät kustannukset vuodessa , €
Solu F12	Voimalaitosten 1 ja 2 yhteinen vuositason tuotto-odotus, €
Solu B18	Kaukolämmön veroton myyntihinta, €
Solu B19	Vastapainesähkön veroton myyntihinta, €
Solu B20	Lauhdesähkön veroton myyntihinta, €
Solut E18:E23	Voimalaitoksen 1 laskelmissa käytetyt polttoaineenhinnat, €/MWh
Solut E24:E29	Voimalaitoksen 2 laskelmissa käytetyt polttoaineenhinnat, €/MWh
Rivit 18...23	Voimalaitoksen 1 laskelmat solujen B18, B19 ja B20 perusteella
Rivit 24...29	Voimalaitoksen 2 laskelmat solujen B18, B19 ja B20 perusteella

Alue **A18:T29** esittää laskelmat yksillä energian myyntihinnoilla, energian hinnat on määritelty soluissa **B18**, **B19** ja **B20**. Tätä aluetta on monistettu taulukossa alaspäin ja siten on muodostettu kuusi erilaista laskelmaa, kuudella eri kaukolämpöenergian hinnalla ja pitäen sähkön hinta vakiona. Näiden kuuden eri kaukolämpöhinnan laskelmat ovat alueella **A18:T89**.

Edellä mainittu kuuden eri kaukolämpöhinnan laskenta-alue on edelleen kopioitu taulukossa vaakasuunnassa siten, että myös vaakasuunnassa muodostuu kuusi eri laskelma-aluetta. Tässä suunnassa sähkön myyntihintaa on muutettu 3 €/MWh:n välein.

Näillä laskenta-alueilla (6×6-matriisi) kullakin on haettu taulukkolaskennan Goal-seek –toiminnon avulla kaukolämmön hinta, jolla laitokset kokonaisuutena tuottavat nollatuloksen tietyllä polttoaineen hinnalla, kun otetaan huomioon asetettu tuotto-odotus ja asetettu sähkön hinta. Lasketulla kaukolämmön ja asetetuilla sähkön hinnoilla laitokset tuottavat siis tuotto-odotuksen verran voittoa. Alueella **A18:DU29** on esitetty laskelmat, joissa sähkön hinta kehittyy 45 eurosta 60 euroon, kun polttoaineen hinta on 10 €/MWh. Tämän alueen alapuolella on vastaavat laskelmat viidellä muulla polttoaineen hinnalla, 15—35 €/MWh.

Edellä kuvattujen 6×6-laskelma-alueiden (Excel-alue **A18:DU89**) pohjalta on muodostettu välilehdellä oleva kuvaaja, jossa laskelmien numerot on esitetty graafisessa muodossa. Kuvaajan sisältöä on kuvailtu seuraavassa kappaleessa.

3.6. Kokonaiskannattavuuden kuvaaja

Kuva 2 esittää Numerot-välilehdellä tehdyt laskelmat graafisessa muodossa. Kuvaajassa on samaan kuvaan sovitettu kuusi kannattavuutta kuvaavaa käyrää (käyrät 1...6) ja kuusi kaukolämpöenergian hintaa kuvaavaa käyrää (käyrät A...F). Kuvaajan vasen pystyakseli kuvaa kahden voimalaitoksen kokonaiskannattavuutta, jossa asetettu tuotto-odotus on otettu huomioon, käyrille 1...6. Oikea pystyakseli kuvaa energian hintaa käyrille A...F. Vaaka-akselilla on polttoaineen hinnat välillä 10...35 €/MWh, joiden avulla kannattavuuskäyrät 1...6 ja kaukolämpöenergian käyrät A...F on sidottu toisiinsa.

Esimerkki 1

Tarkastellaan kokonaiskannattavuutta esimerkkitapauksessa:

Voimalaitos 1

- Kaukolämpöä tuotetaan 600 GWh/a, vastapainesähköä 300 GWh/a ja lauhdesähköä 600 GWh/a.
- Laitoksen kiinteät kustannukset ovat 27 miljoonaa €/a, sisältäen pääomakulut ja kiinteät käyttökulut.

Voimalaitos 2

- Kaukolämpöä tuotetaan 600 GWh/a ja vastapainesähköä 300 GWh/a.
- Laitoksen kiinteät kustannukset ovat 10 miljoonaa €/a, sisältäen pääomakulut ja kiinteät käyttökulut.

Kuvassa 3.1 on esitetty laskelmien tulokset ja kuvassa 3.2 graafinen esitys tuloksista.

Esimerkkejä käyrästöjen lukemisesta:

- A. Voimalaitosten käyttämä polttoaine maksaa 20 €/MWh (käyrä 4). Laitokset pääsevät nollatulokseen tietyillä energian myyntihinnoilla. Paljonko kannattavuus muuttuu, jos polttoaineen hinta nouseekin viidellä eurolla? Vastaus saadaan siirtymällä nollatulosta kuvaavasta kannattavuusakselin kohdasta 20 € kohtaan 25 €, piirtämällä siihen alaspäin pystyviiva, joka leikkaa käyrän 4, ja siirtymällä leikkauskohdasta vaakasuoraan vasemmalle kannattavuusakselille, josta voidaan lukea arvo –20 milj. €.

Kannattavuus huononi 20 milj. € kun polttoaineen hinta kasvoi 5 €/MWh.

- B. Voimalaitokset myyvät sähköä hintaan 45 €/MWh ja polttoaineen hintataso on 25 €/MWh. Mikä on kaukolämmön vähimmäishinta, jotta päästään kannattavaan toimintaan?

Etsitään polttoaineen hintaa 25 €/MWh kuvaavalta käyrältä 3 piste, jossa kannattavuus menee nollaan. Tähän pisteeseen piirretään pystysuora ja siirrytään suoraa pitkin pisteeseen, jossa suora leikkaa käyrän A (kuvaa kaukolämmön hintaa sähkön myyntihinnalla 45 €/MWh). Leikkauspisteestä siirrytään vaakasuorassa oikeanpuoleiselle akselille ja luetaan siltä kaukolämmön hinta, noin 82 €/MWh.

Jotta päästään kannattavaan toimintaan, kaukolämmön vähimmäishinta pitää siis olla vähintään 82 €/MWh, kun sähköä myydään hintaan 45 €/MWh ja polttoaineesta maksetaan 25 €/MWh.

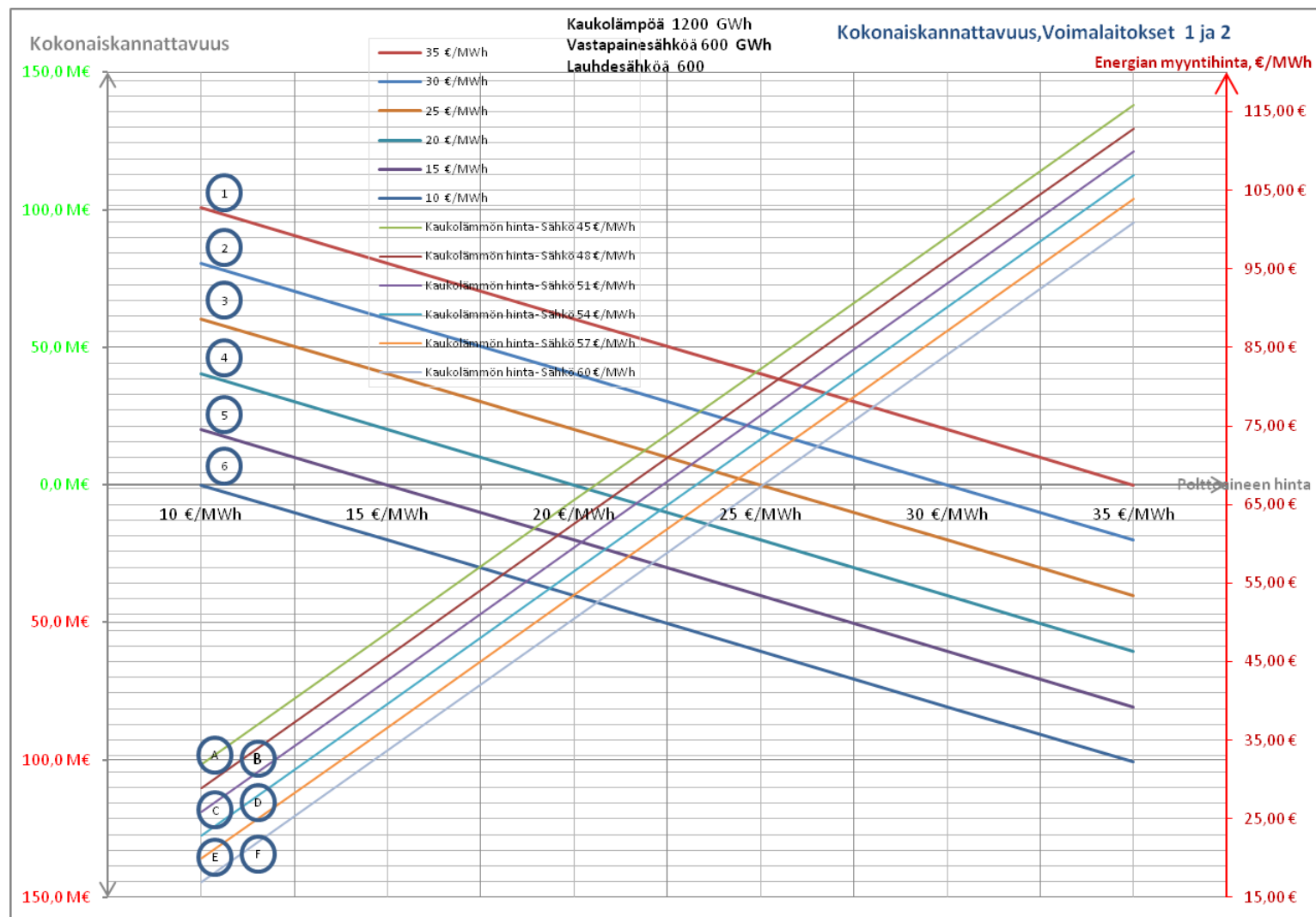
- C. Kaukolämmön myyntihinta on 47 €/MWh ja sähkön myyntihinta 51 €/MWh. Käytettävän polttoaineen hinta on 20 €/MWh. Onko laitosten toiminta kannattavaa?

Etsitään oikeanpuoleiselta akselilta kohta 47 €/MWh ja piirretään siihen vaakasuora viiva. Pisteestä, jossa viiva leikkaa suoran C (kuvaa kaukolämmön hintaa sähkön myyntihinnalla 51 €/MWh), siirrytään polttoaineen hintaa kuvaavalle akselille ja luetaan siltä polttoaineen hinta, noin 16.5 €/MWh. Tämä hinta kuvaa pisteen, jossa päästään nollatulokseen.

Koska käytetyn polttoaineen hinta on suurempi kuin saatu arvo 16.5 €/MWh, laitosten toiminta ei ole kannattavaa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2														
3				Vuosituotannot		Kauko- lämpöä	Vastapaine- sähköä	Lauhde- sähköä	Yhteensä	Kiinteät kustannukset	Kiinteät kustannukset, €/MWh			
4				Voimalaitos 1		600 GWh	300 GWh	600 GWh	1500 GWh	27 000 000 €	18,00			
5				Voimalaitos 2		600 GWh	300 GWh	0 GWh	900 GWh	10 000 000 €	11,11			
6								Yhteensä	2400 GWh	37 000 000 €				
7														
8				Kulukerroin		1,2	1,25	2,5						
9				Sis.käyttö/häviökerroin		1,08	1,1	1,1						
10														
11														
12				Tuotto-odotus		15 000 000 €	vuodessa							
13														
14														
15														
16					Polttoaineen hinta, €/MWh	Kaukolämpö			Vastapainesähkö			Lauhesähkö		
						Myyntihinta, €/MWh	Bruttotulo, €	Kulut + verkostohäviöt, €	Myyntihinta, €/MWh	Bruttotulo, €	Kulut + verkostohäviöt, €	Myyntihinta, €/MWh	Bruttotulo, €	Kulut + verkostohäviöt, €
17														
18	Kaukolämpö	31,92 €		Voimalaitos 1	10 €/MWh	31,9	19 151 000 €	7 776 000 €	45,0	13 500 000 €	4 125 000 €	45,0	27 000 000 €	16 500 000 €
19	Vastapainesähkö	45,00 €		Voimalaitos 1	15 €/MWh	31,9	19 151 000 €	11 664 000 €	45,0	13 500 000 €	6 187 500 €	45,0	27 000 000 €	24 750 000 €
20	Lauhesähkö	45,00 €		Voimalaitos 1	20 €/MWh	31,9	19 151 000 €	15 552 000 €	45,0	13 500 000 €	8 250 000 €	45,0	27 000 000 €	33 000 000 €
21				Voimalaitos 1	25 €/MWh	31,9	19 151 000 €	19 440 000 €	45,0	13 500 000 €	10 312 500 €	45,0	27 000 000 €	41 250 000 €
22				Voimalaitos 1	30 €/MWh	31,9	19 151 000 €	23 328 000 €	45,0	13 500 000 €	12 375 000 €	45,0	27 000 000 €	49 500 000 €
23				Voimalaitos 1	35 €/MWh	31,9	19 151 000 €	27 216 000 €	45,0	13 500 000 €	14 437 500 €	45,0	27 000 000 €	57 750 000 €
24				Voimalaitos 2	10 €/MWh	31,9	19 151 000 €	7 776 000 €	45,0	13 500 000 €	4 125 000 €	45,0	0 €	0 €
25				Voimalaitos 2	15 €/MWh	31,9	19 151 000 €	11 664 000 €	45,0	13 500 000 €	6 187 500 €	45,0	0 €	0 €
26				Voimalaitos 2	20 €/MWh	31,9	19 151 000 €	15 552 000 €	45,0	13 500 000 €	8 250 000 €	45,0	0 €	0 €
27				Voimalaitos 2	25 €/MWh	31,9	19 151 000 €	19 440 000 €	45,0	13 500 000 €	10 312 500 €	45,0	0 €	0 €
28				Voimalaitos 2	30 €/MWh	31,9	19 151 000 €	23 328 000 €	45,0	13 500 000 €	12 375 000 €	45,0	0 €	0 €
29				Voimalaitos 2	35 €/MWh	31,9	19 151 000 €	27 216 000 €	45,0	13 500 000 €	14 437 500 €	45,0	0 €	0 €

Kuva 3.1. Simulointityökalun muutettavat solut keltaisella pohjavärillä



Kuva 3.2. Kahden voimalaitoksen kokonaiskannattavuus ja kaukolämmön hinta sähkön hinnoilla 45...60 €/MWh

Esimerkki 2

Esimerkki kuvaa tapausta, jossa Voimalaitos 1 ei tuota energiaa ollenkaan mutta aiheuttaa kiinteiden kustannusten verran kuluja. Voimalaitos 2 tuottaa energiaa täydellä kapasiteetilla.

Voimalaitos 1:

Kaukolämpö = 0 GWh

Vastapainesähkö = 0 GWh

Lauhdesähkö = 0 GWh

Kiinteät kustannukset 27 milj. €/a

Voimalaitos 2:

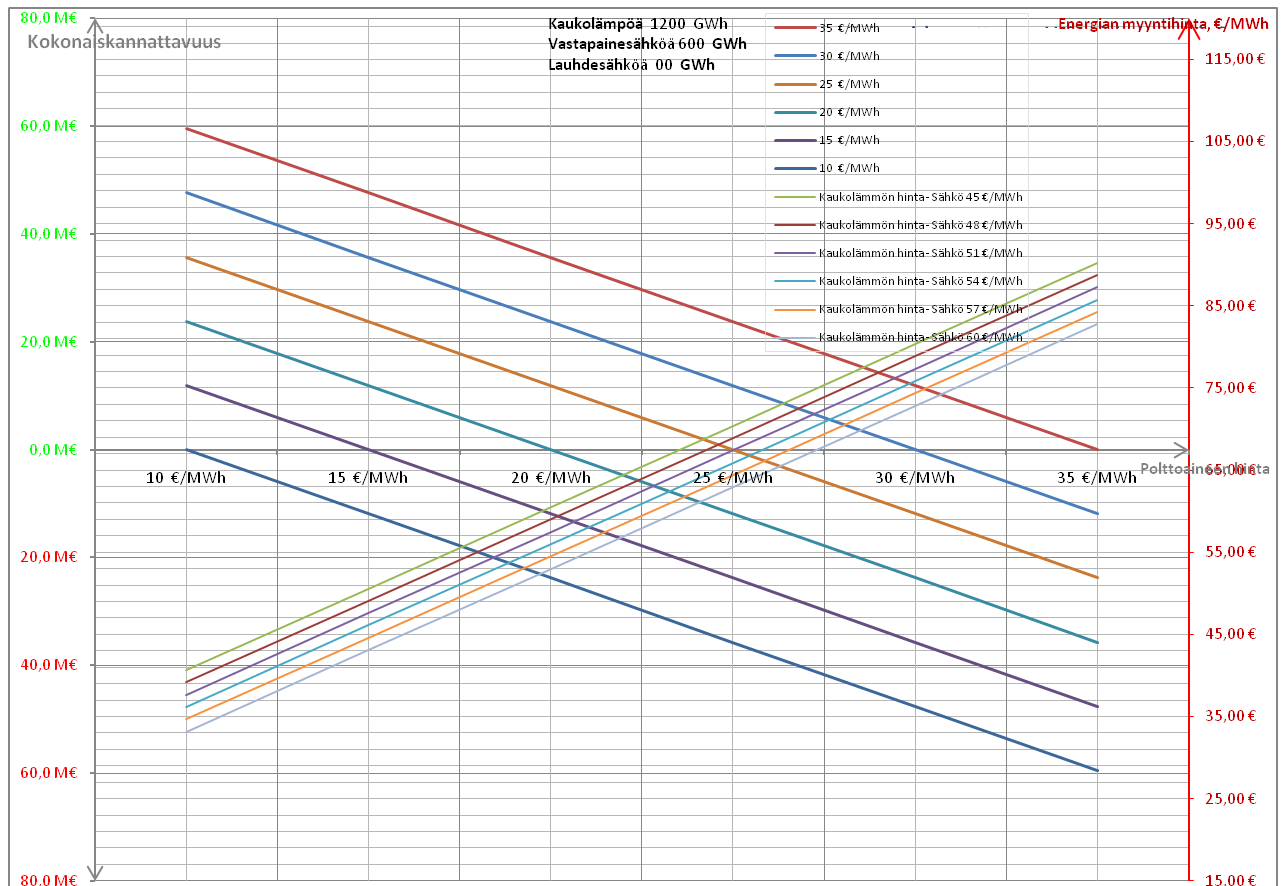
Kaukolämpö = 1200 GWh

Vastapainesähkö = 600 GWh

Lauhdesähkö = 0 GWh

Kiinteät kustannukset 10 milj. €/a

Kuvaajasta nähdään esimerkiksi, että polttoaineen hinnan ollessa 20 €/MWh ja sähkön myyntihinnan ollessa 45 €/MWh kaukolämmön hinnalla 60 €/MWh päästään kahden voimalaitoksen kokonaisuutena tulokseen, jossa omistajille tuloutetaan asetettu tuotto-odotus 15 milj. €/a.



Kuva 3.3.

Esimerkki 3

Esimerkki kuvaa tapausta, jossa Voimalaitos 1 tuottaa energiaa täydellä kapasiteetilla ja Voimalaitos 2 ei tuota ollenkaan energiaa vaan aiheuttaa kiinteiden kustannusten verran kuluja.

Voimalaitos 1:

Kaukolämpö = 1200 GWh

Vastapainesähkö = 600 GWh

Lauhdesähkö = 300 GWh

Kiinteät kustannukset 27 milj. €/a

Voimalaitos 2:

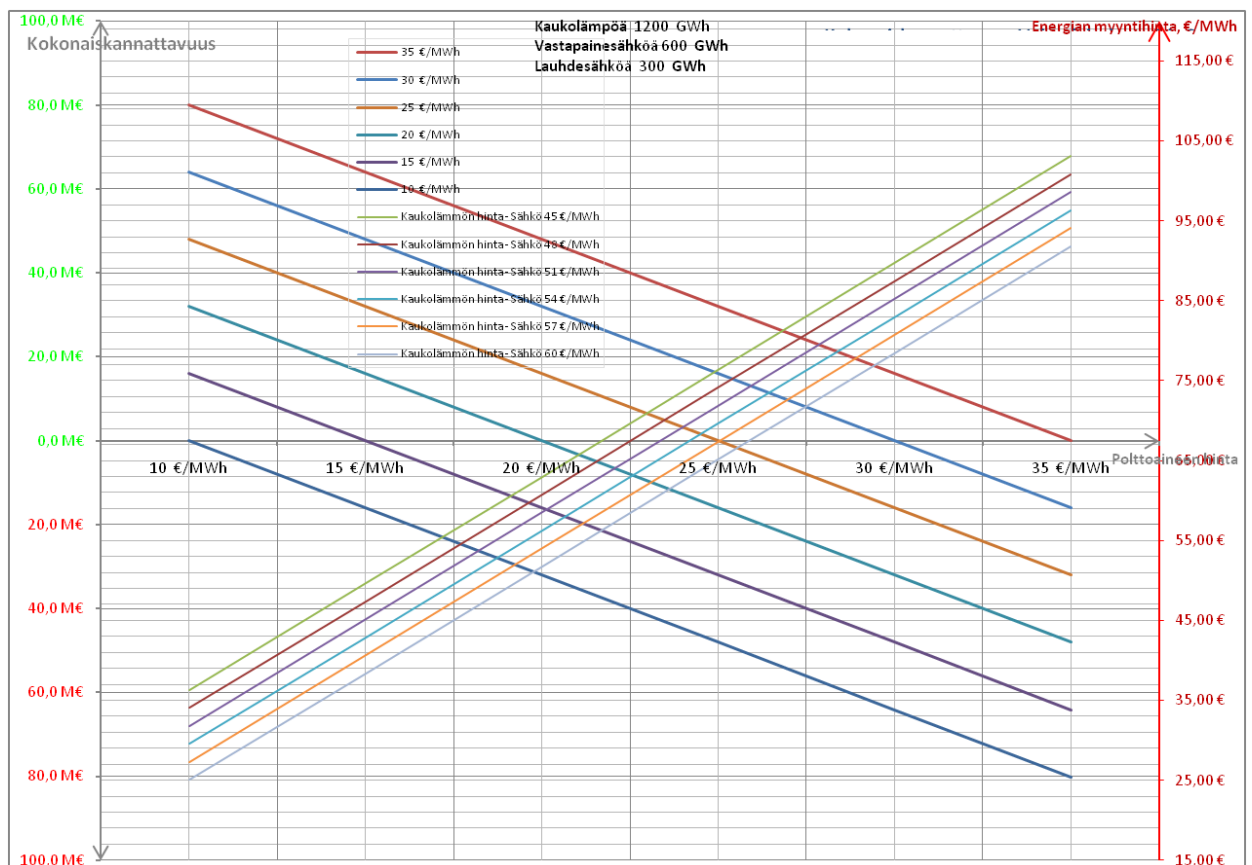
Kaukolämpö = 0 GWh

Vastapainesähkö = 0 GWh

Lauhdesähkö = 0 GWh

Kiinteät kustannukset 10 milj. €/a

Kuvaajasta nähdään esimerkiksi, että polttoaineen hinnan ollessa 20 €/MWh ja sähkön myyntihinnan ollessa 45 €/MWh kaukolämmön hinnalla 63 €/MWh päästään kahden voimalaitoksen kokonaisuutena tulokseen, jossa omistajille tuloutetaan asetettu tuotto-odotus 15 milj. €/a.



Kuva 3.4.

Esimerkki 4

Esimerkki kuvaa tapausta, jossa Voimalaitos 1 ei aiheuttaisi minkäänlaisia kuluja, ei edes kiinteitä kuluja. Voimalaitos 2 tuottaa energiaa täydellä kapasiteetilla.

Voimalaitos 1:

Kaukolämpö = 0 GWh

Vastapainesähkö = 0 GWh

Lauhdesähkö = 0 GWh

Kiinteät kustannukset 0 milj. €/a

Voimalaitos 2:

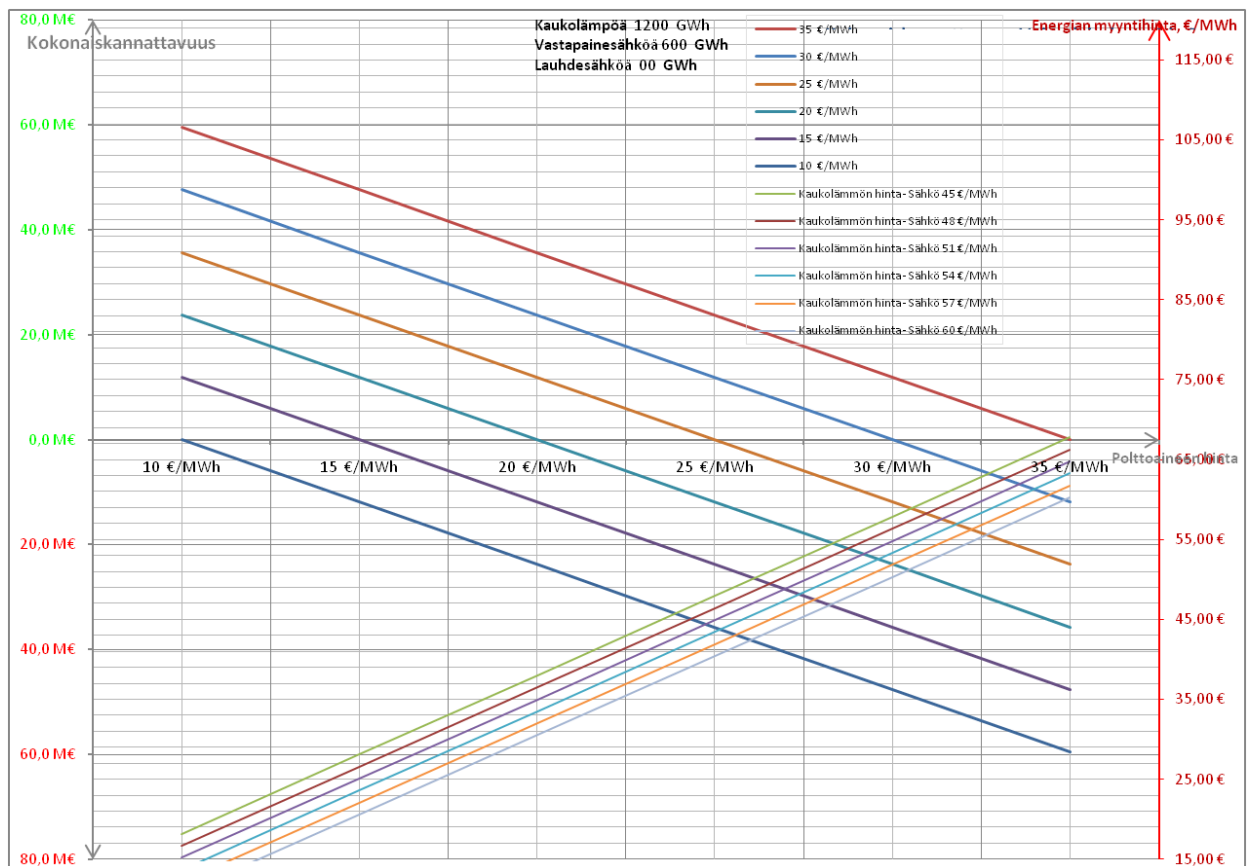
Kaukolämpö = 1200 GWh

Vastapainesähkö = 600 GWh

Lauhdesähkö = 0 GWh

Kiinteät kustannukset 10 milj. €/a

Kuvaajasta nähdään esimerkiksi, että polttoaineen hinnan ollessa 20 €/MWh ja sähkön myyntihinnan ollessa 45 €/MWh kaukolämmön hinnalla 38 €/MWh päästään kahden voimalaitoksen kokonaisuutena tulokseen, jossa omistajille tuloutetaan asetettu tuotto-odotus 15 milj. €/a.



Kuva 3.5.

3.7. Käytetyt työkalut



Kokonaiskannattavuus-2.xls

Laskennassa käytetty työkalu, MS Excel-versio:



Kokonaiskannattavuus-2.ods

Laskennassa käytetty työkalu, OpenOffice Calc-versio:



Kaukolämpö-mittari.xlsm

Kaukolämmön kannattavuusmittari:

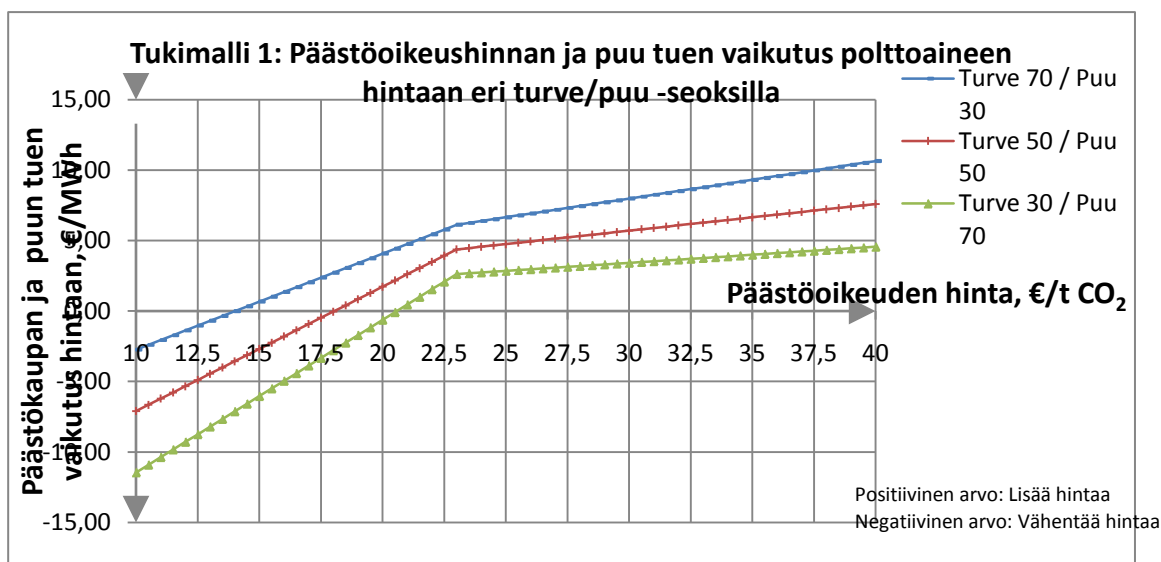
Liite 1 Päästöoikeuden hinta ja puupolttoaineiden tuen vaikutus polttoaineiden hintoihin

Voimaloiden polttoaineen hintaan vaikuttavat tuottajahinta, kuljetus- ja päästöoikeusmaksut sekä mahdolliset tuet. Turvepolttoaineessa on 0.38 tCO₂/MWh, josta pitää maksaa päästöoikeusmaksu. Päästöoikeuden hinta vaihtelee seuraavissa laskuissa välillä 10—40 €/tCO₂. Puupolttoaineet ovat päästöoikeusmaksuista vapaita. Lisäksi puupolttoaineilla on sähköntuotannossa tukea 18 €/MWh, mikäli päästöoikeusmaksu on 10 €/tCO₂ ja tuki loppuu, kun maksu ylittää 23 €/tCO₂:n rajan.

Taulukossa 1 on tarkasteltu turpeen ja puun hintaeroja €/tCO₂. Kuva 1 havainnollistaa tilannetta.

€/tCO ₂	turve (maksu)	puu (tuki)	hintaero
10	-3.8	+18	21.8
20	-7.6	+2.2	9.8
23	-8.74	0	8.74
30	-11.4	0	9.4
40	-15.5	0	15.5

Taulukko 1. Turpeen ja puun maksut/tuet ja hintaero €/MWh sähkön tuotannossa eri päästöoikeushinnoilla



Kuva 1

Päästöoikeusmaksu tekee pelkän turpeen käytön lauhdesähkön tuotannossa liian kalliiksi. Esim. jos maksu on 20 €/tCO₂, lisähinta on 2.5-kertaisella polttoaineen kulutussuhteella 19 €/MWh ja maksun ollessa 30 €/tCO₂ lisähinta olisi 28.5 €/MWh. Puupolttoaineiden käytön lisääminen ja niille tuleva tuki tulevat niukkuuden takia nostamaan niiden hintoja.

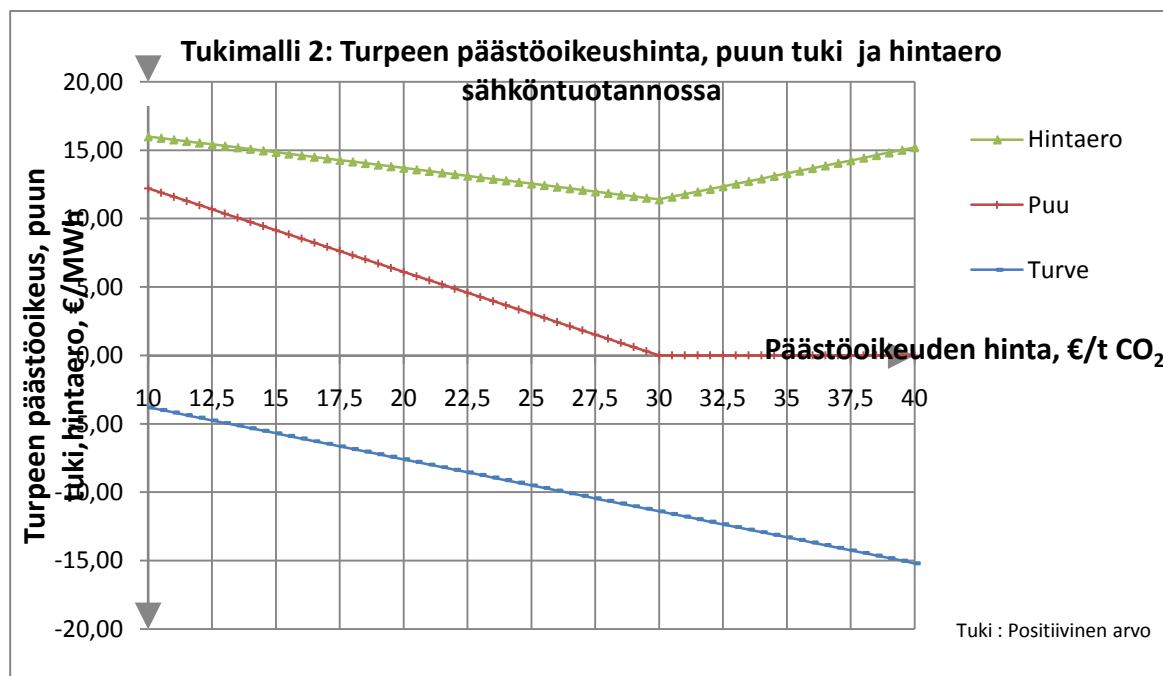
Taulukossa 2 on listattu puun ja turpeen tuki (– eli hintaa alentava määrä) ja lisähinta (+) eri päästöoikeuden hinnoilla ja eri polttoainesuhteilla, kun taulukon 1 turpeen päästöoikeusmaksu ja puun hintatuki sähköntuotannossa huomioidaan.

CO ₂ /t	70/30	50/50	30/70
10	-2.8	-7.1	-11.6
20	+4.38	+2.5	+0.62
23	+6.9	+4.37	+2.62
30	+7.98	+5.7	+3.42
40	+9.12	+7.6	+4.35

Taulukko 2. Päästöoikeusmaksun ja puupolttoaineen tuen vaikutus polttoaineen lisähintaan eri turve/puu seoksilla.

Taulukosta 2 ja kuvasta 2 havaitaan että päästöoikeusmaksun ollessa 10 €/tCO₂, voimalaitokset voisivat saada tukea jopa 11.16 €/MWh. Erotus turve/puupolttoainesuhteissa 70/30 tai 30/70 on peräti 8.30 €/MWh eli tappio on 8300 €/GWh 70/30 vaihtoehdossa. Sähköntuotannon ollessa 1000 GWh, tappio olisi 8.3 milj. €/vuosi, mikäli turve/puu suhde on 70/30 eikä puupainotteinen 30/70.

Kuten taulukosta 2 havaitaan, hintaerot eri polttoaineseoksissa tasoittuvat, kun päästöoikeusmaksu nousee yli 15 €/tCO₂. Puusähkön hintatukea ei saada 70/30-turve/puuseossuhteella. Taulukoista 1 ja 2 voidaan nähdä päästöoikeusmaksun vaikutus puupohjaisten polttoaineiden hyväksi. Tämä tulee lisäämään puupohjaisia polttoaineita.



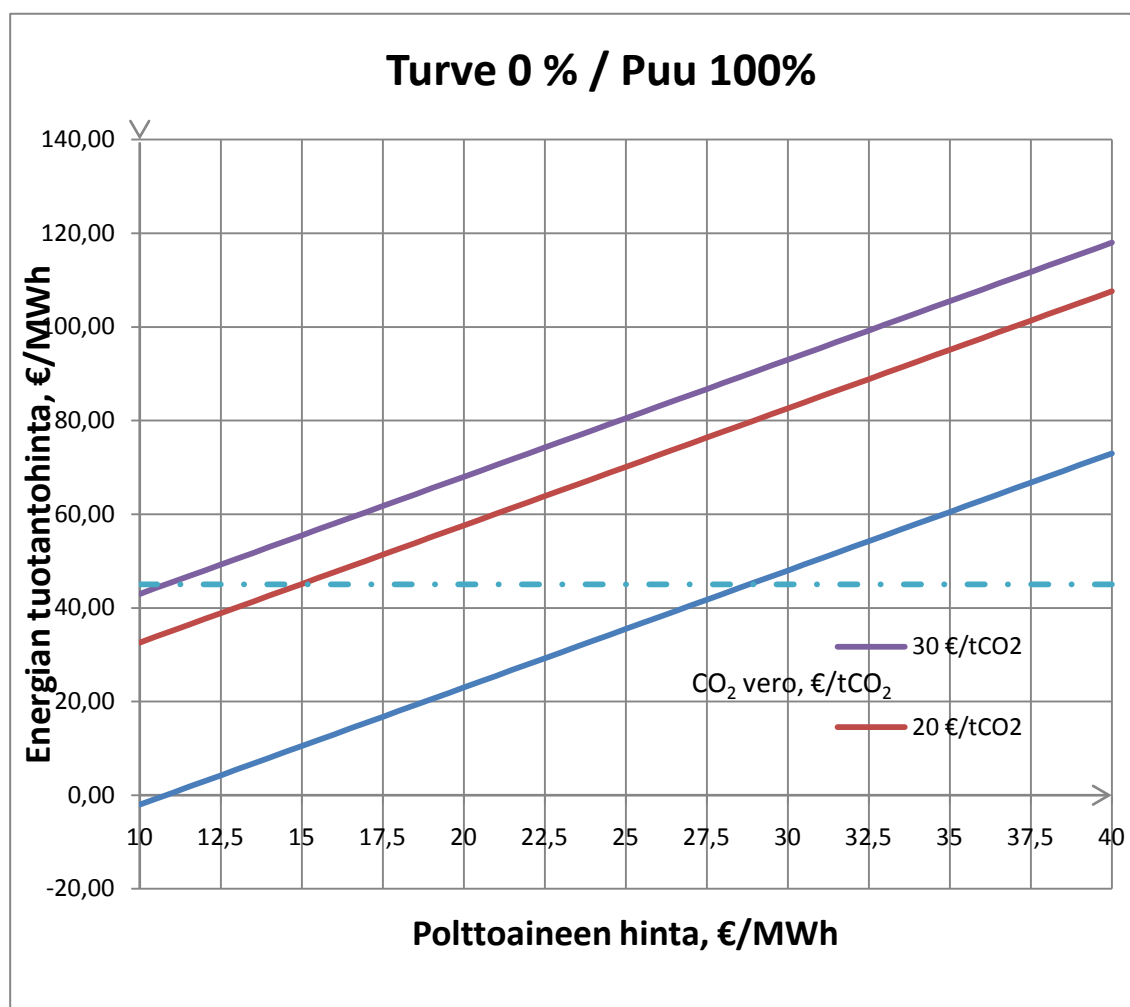
Kuva 2

Liite 2 Lauhdesähkötuotannon herkkyyssanalyysi

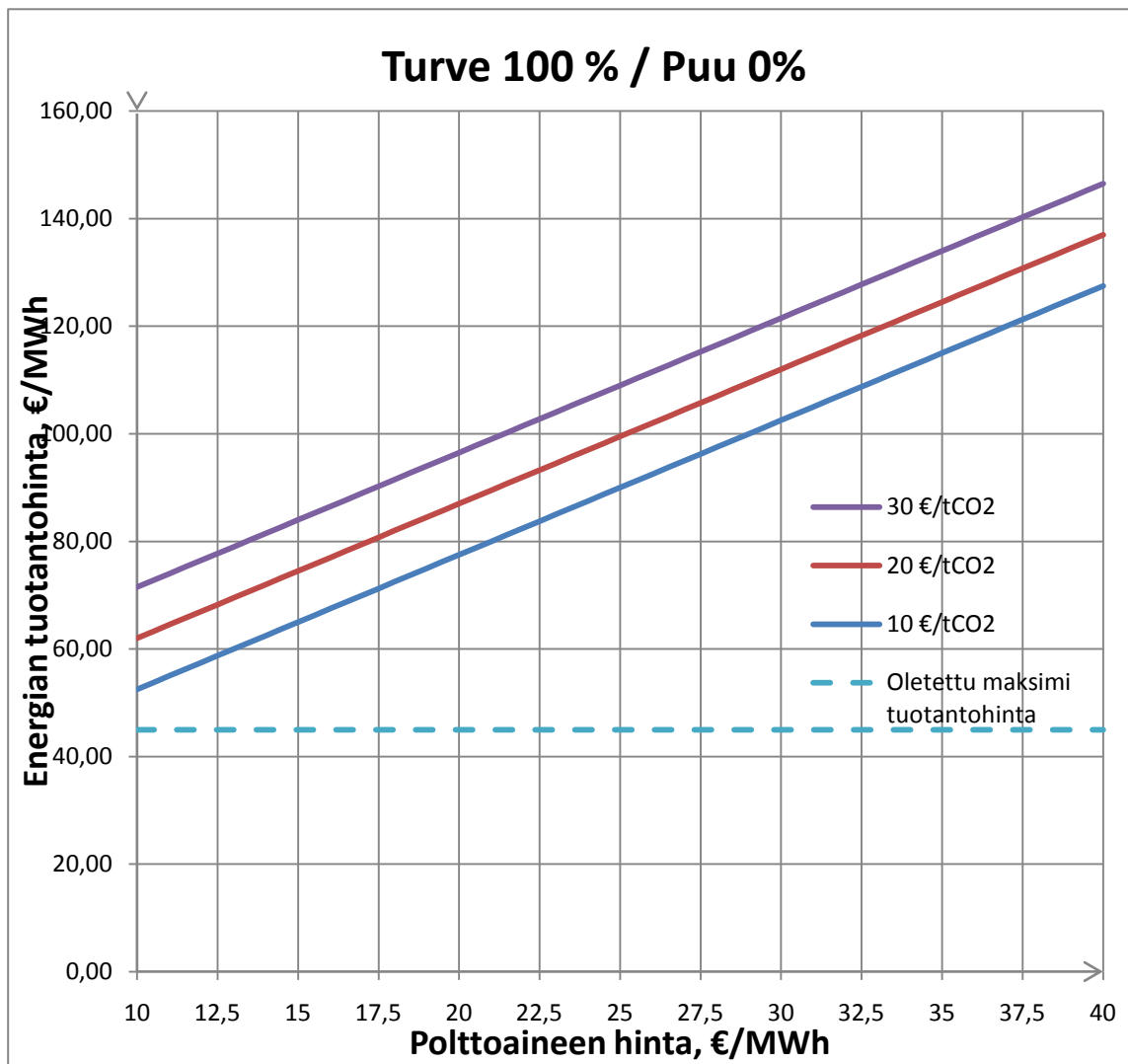
Lauhdesähkötuotannon hyötysuhde on teknologiasta riippuen luokkaa 42—33 % eli polttoaineen käyttösuhte on noin 2.5—2.75. Seuraavissa simulaatioissa havainnollistetaan kiinteiden kulujen, päästömaksujen ja puupohjaisen sähköntuotannon tukipaketin vaikutuksia lauhdesähkön tuotantohintoihin. Laskelmissa oletetaan, että kiinteät kulut ovat 18 €/MWh ja kulukerroin on 2.5. Tuotantokulujen maksimi on 45 €/MWh (kuissa 1—4). Parametrit ilmenevät taulukosta 1.

Päästöoikeus €/tCO ₂	10	20	23	30
Kuva 1: puu 100%	−18	−2.2	0	0
Kuva 2: turve 100%	+3.8	+7.6	+7.84	+11.4
Kuva 3: turve/puu 70/30	−2.8	+4.38	+6.9	+7.98
Kuva 4: turve/puu 50/50	−7.1	+2.5	+4.37	+5.7
Kuva 5: turve/puu 30/70	−11.16	+0.62	+2.62	+3.42

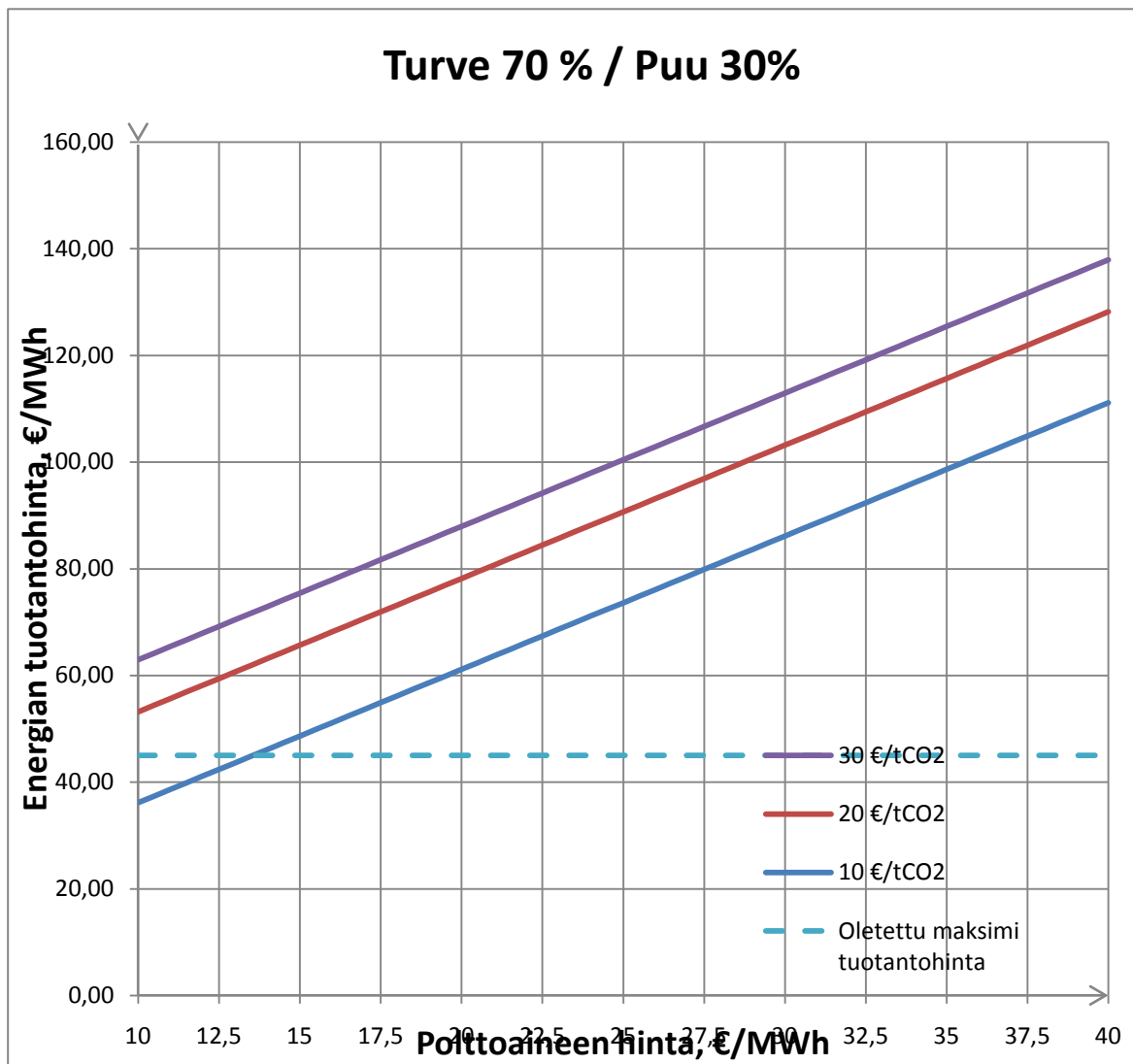
Taulukko 1. Avustukset (−) /lisähinnat(+) €/MWh eri polttoaineseoksilla



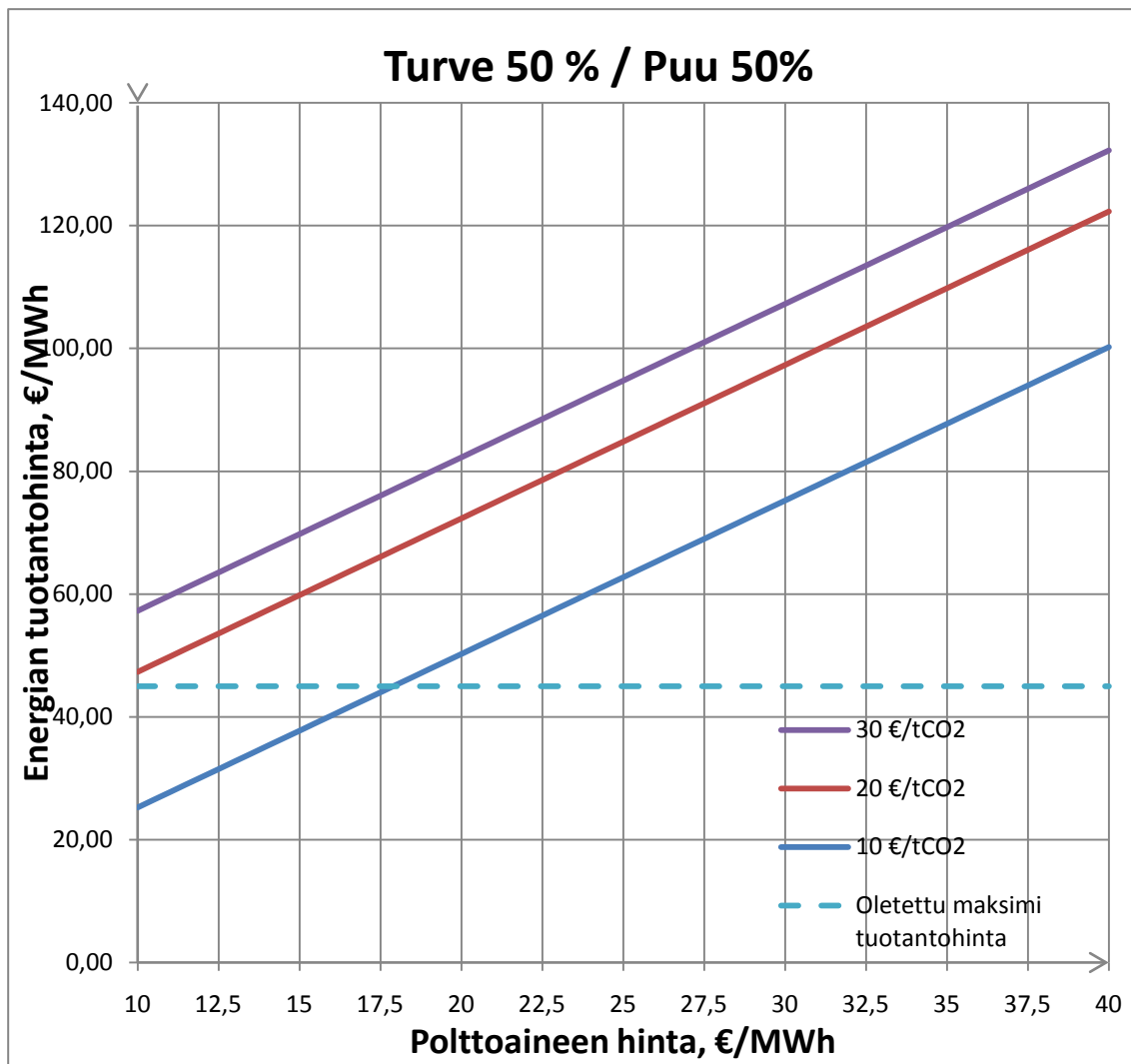
Kuva 1



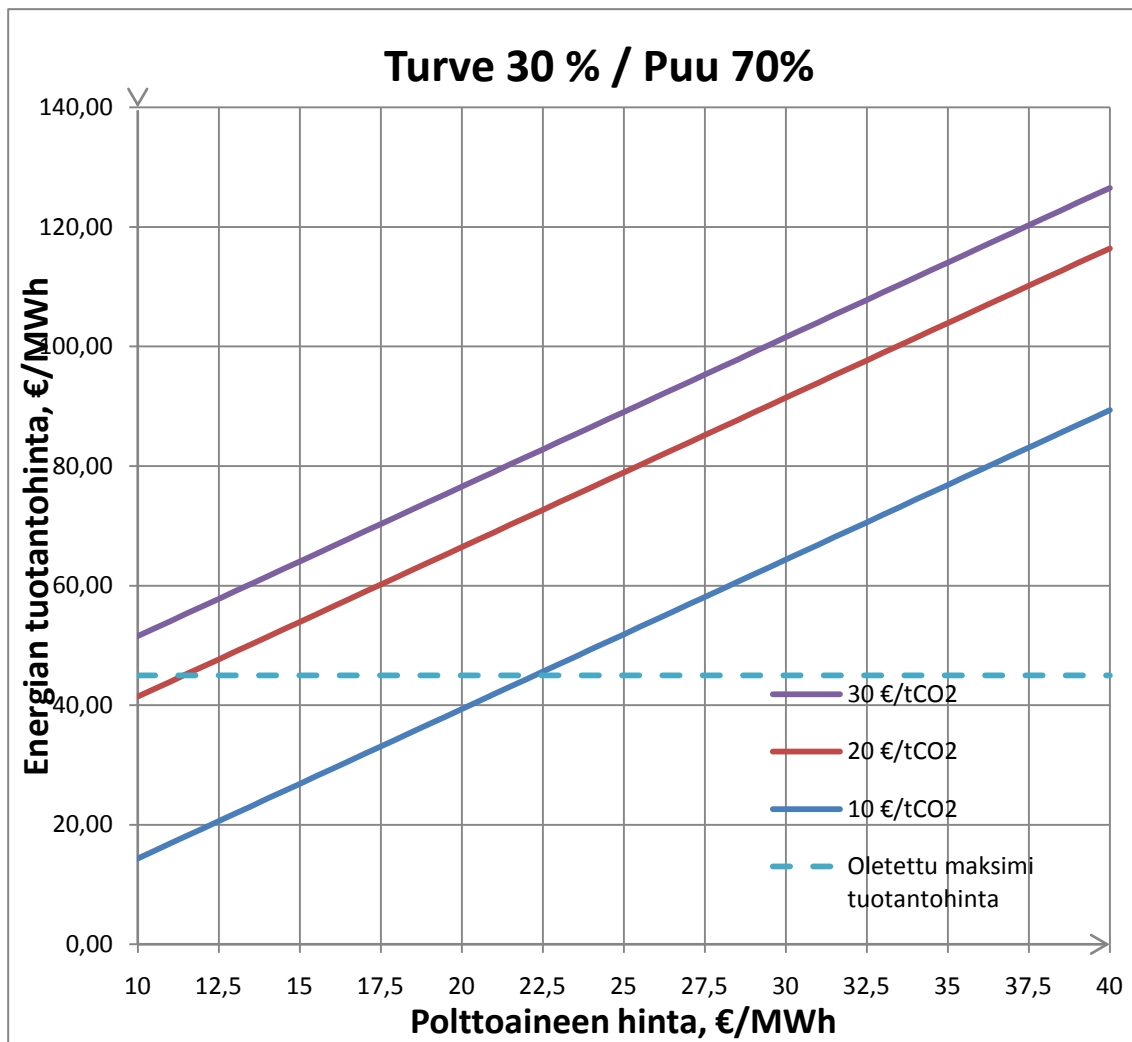
Kuva 2



Kuva 3



Kuva 4



Kuva 5

Yhteenveto

Koska forwardit vuosina 2011—2013 ovat 48.50, 44.50 ja 44.95 €/MWh, lauhdesähkötuotanto ei ole kannattavaa alla mainittuja erikoistilanteita lukuun ottamatta (ks. myös liitteen 4 sähkön hinnan kehitysskenaario):

- Puun 100%:nen käyttö lauhdetuotannossa on kannattavaa (tuotantohinta alle 42 €/MWh), kun päästöoikeusmaksu on 10 €/tCO₂. Kannattavuus heikkenee merkittävästi, kun päästöoikeusmaksut nousevat (kuva 1).
- Turpeen lauhdesähkötuotanto ei ole lasketuilla päästöoikeusmaksuilla kannattavaa (kuva 2).
- 70/30-turve/puuseos on kannattavaa vain alle 12 €/MWh:n hinnoilla (kuva 3).
- 50/50-turve/puuseos on kannattavaa vain kapealla alueella eli kun päästöoikeus on 10€/tCO₂. Muulloin tuotanto ei kannata (kuva 4).
- 30/70-turve/puuseos on kannattavaa 10 €/tCO₂:n päästöoikeushinnalla, kun energian hinta on alle 22 €/MWh. Muulloin tuotanto on kannattavaa ainoastaan alle 11 €/MWh:n hinnoilla, kun päästöoikeus on 20 €/tCO₂.

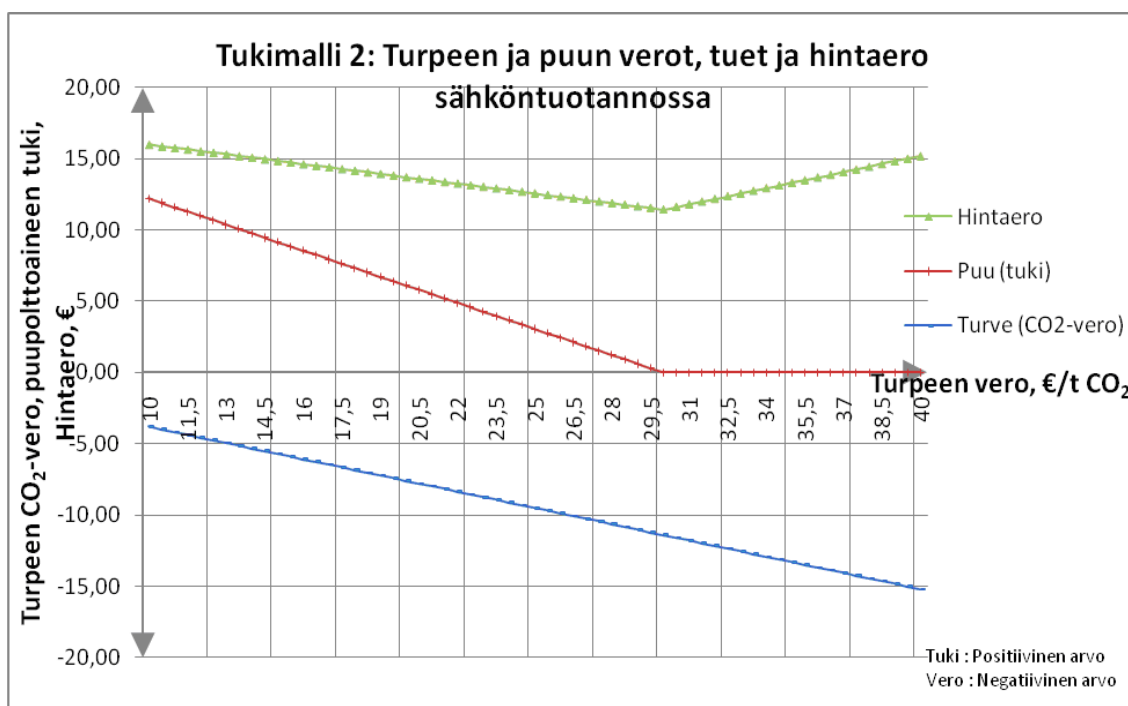
Liite 3 Ehdotus puun tukimalliksi

Taulukossa 1 on esitetty laajennettu versio hallituksen esittämään puusähkötuotannon puuenergiatukeen.

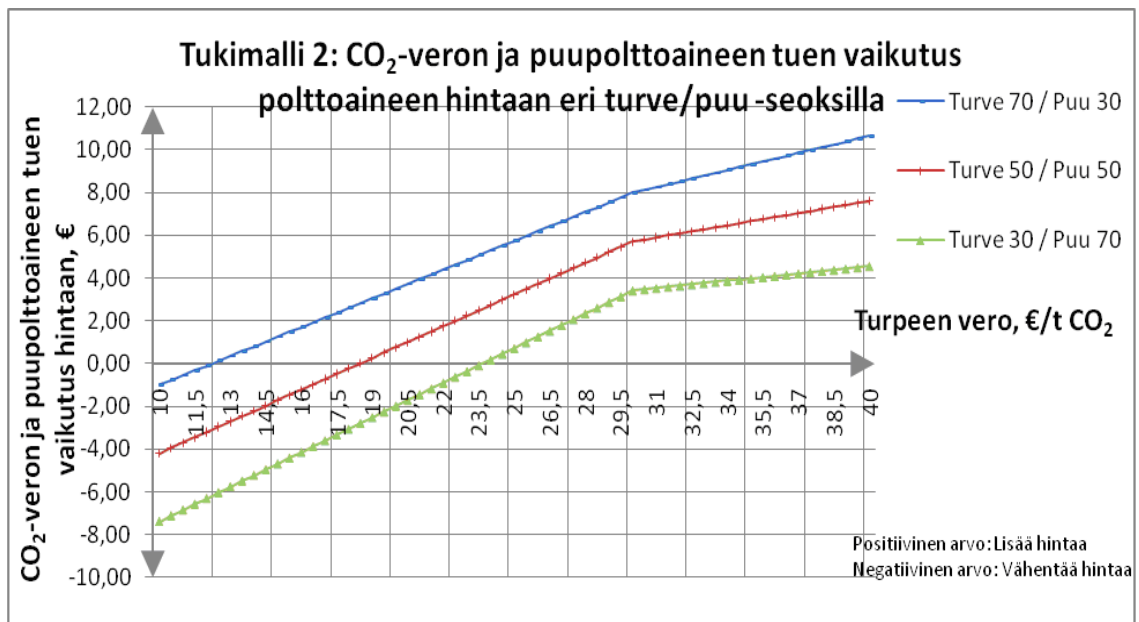
€/tCO ₂	turve (vero)	puu (tuki)	hintaero
10	-3.8	+12.2	16
20	-7.6	+6.10	13.70
23	-8.74	+4.27	13.01
30	-11.4	0	11.4
40	-15.2	0	15.2

Taulukko 1

Hallituksen esityksessä ongelmana on se, että turve ja puupolttoaineen hinta vaihtelee liikaa ja tilanne on liian herkkä päästöhintojen muutoksille. Taulukon 1 laajennettu malli on stabiilimpi. Kuvat 1 ja 2 havainnollistavat tilannetta.



Kuva 1. Tukimalli 2 puupolttoaineelle.



Kuva 2

Sähkön hankintahintaskenaariot

