

Kohtuullinen muuttuva kustannus sähkön jakeluverkkoyhtiöiden valvontamallissa:

**Ehdotus tehostamiskannustimen kehittämiseksi 6. ja 7.
valvontajaksoilla vuosina 2024-2031**

Timo Kuosmanen
Natalia Kuosmanen
Sheng Dai

Loppuraportti
12.9.2022

Sisällys

Esipuhe	3
1. Johdanto	4
2. Tehostamiskannustimen periaatteet ja vaikuttavuus	6
2.1 Talousteoreettinen perusta	6
2.2 Liiketaloudellinen tulkinta	6
2.3 Mittatikkukilpailu	8
2.4 Tehostamiskannustimen vaikuttavuus	10
3. StoNED-menetelmän kehitys tutkimuskirjallisuudessa	13
3.1 Nykymenetelmän kuvaus	13
3.2 Ylisovittaminen ja mallin ennustekyky	14
3.3 Endogeenisuus ja kontrollifunktio	16
4. Muuttujat ja aineisto	18
4.1 Tarkasteltava ajanjakso	18
4.2 Panosmuuttujat	19
4.3 Toivotut tuotokset	21
4.4 Ei-toivotut tuotokset	23
4.5 Toimintaympäristö ja kontrollimuuttujat	24
5. Mallin ennustekyvyn testaaminen	26
5.1 Varjohinnat ja toimintaympäristön vaikutus nykymallin mukaisesti	26
5.2 Mallin ennustekyvyn kehittäminen	27
6. Vaihtoehtoisten muuttujaspesifikaatiot	30
6.1 Kiinteä panos: JHA vai NKA?	30
6.2 Häviösäbkö kontrollimuuttujana	31
7. Tehokkuusanalyysi	33
8. Vertailulaskelmat ja vaikutusten arviointi	37
8.1 Jälleenbankinta-arvon korvaaminen nykykäyttöarvolla tehokkuuslukujen valossa	37
8.2 Nykykäyttöarvon varjohintojen vertailu	38
9. Kehittämisehdotukset	40
Lähteet	42
Tekninen liite: Selvityksessä tarkastellut mallispesifikaatiot	45

Esipuhe

Tämän selvityksen on laatinut ECKTA Oy Energiaviraston toimeksiannosta. Hankkeen toteutuksesta vastaa taloustieteen asiantuntijoista koostuva työryhmä, jonka jäsenet ovat Professori Timo Kuosmanen (Turun kauppakorkeakoulu, hankkeesta vastaava johtaja), MMT Natalia Kuosmanen (Elinkeinoelämän tutkimuslaitos ETLA) ja KTT Sheng Dai (Aalto yliopiston kauppakorkeakoulu). Työryhmä kiittää Energiaviraston Verkot yksikön asiantuntijoita, erityisesti Lari Teittistä, Tiina Karppista ja Veli-Pekka Saajoa hankkeen aikana saadusta palautteesta ja kommentista.

Raportissa esitettävät tulkinnat, analyysit, johtopäätökset ja kehittämissuhteet ovat ECKTA Oy:n työryhmän riippumattomasti esittämiä, eivätkä ne edusta Energiaviraston kantaa raportissa tarkasteltaviin asioihin.

1. Johdanto

Sähkön jakeluverkkotoiminta on lainsäädännössä määritelty luonnolliseksi monopoliksi, jonka hinnoittelun kohtuullisuutta valvoo Energiavirasto (EV). Muiden pohjoismaisten regulaattorien tavoin EV soveltaa kohtuullisen tuoton valvontaan perustuvaa mallia, johon sisältyy yhtäältä verkkoon sitoutuneen kiinteän pääoman kohtuullisen tuoton ja toisaalta toiminnasta aiheutuvan kohtuullisen muuttuvan kustannuksen arviointi. Kohtuullisen muuttuvan kustannuksen on periaatteessa tulkittu tarkoittavan tehokkaan toiminnan mukaista kustannustasoa.

Verkkoyhtiöiden tuotosprofiili on muuttunut viime vuosina. Yhteiskunnan digitalisaation ja liikenteen sähköistymisen myötä toimialan käyttäjämäärä ja verkkopituus ovat jatkaneet tasaista kasvua. Toisaalta talouden suhdanteiden ja koronakriisin myötä sähkön kulutus on vaihdellut vuodesta toiseen varsin voimakkaasti. Venäjän aloittama hyökkäyssota Ukrainassa on johtanut energian hintojen nousuun Euroopassa, mikä vaikuttaa väistämättä myös Suomen sähkömarkkinoihin. Näiden shokkien myötä tulevilla valvontajaksoilla sähkön kulutuksessa saattaa tapahtua suuria ja äkillisiä muutoksia. Siten valvontamallissa sovelletun tehostamiskannustimen tulisi kyetä ennustamaan nykyistä paremmin kohtuullista muuttuvien kustannusten tasoa myös tilastoaineistossa havaittavan vaihteluvälin ulkopuolella.

Sähkön jakeluverkkoyhtiöiden hinnoittelua ja kustannuskehitystä on julkisuudessa kritisoitu voimakkaasti niin sähkön käyttäjien kuin myös poliitikkojen toimesta. Aiemmillä valvontajaksoilla kannustinjärjestelmässä kiinnitettiin erityistä huomiota sähkön toimitusvarmuuteen ja säävarman sähköverkon rakentamiseen. Viime vuosina yleinen mielipide näyttää kääntyneen vahvemmin kokonaistaloudellista tehokkuutta korostavaksi. Tässä selvityksessä tarkasteltava tehostamiskannustin on hyvin keskeinen jakeluverkkoyhtiöiden kustannuskehitystä hillitsevä komponentti valvontamallissa.

EV:n on johdonmukaisesti pyrkinyt soveltamaan tehostamistavoitteiden asettamisessa menetelmiä, jotka perustuvat uusimpaan ja luotettavimpaan tutkimustietoon. Tämän kehitystyön loogisena jatkona EV tilasi ECKTA Oy:ltä selvityksen tehokkuusmittauksen kehittämisestä sähkön jakeluverkkotoiminnan valvonnassa 6. ja 7. valvontajaksoilla vuosina 2024-2031. Tässä loppuraportissa esitetään tutkimushankkeen tulokset ja niihin perustuvat konkreettiset toimenpide-ehdotukset.

Hankkeen kolme keskeisintä tavoitetta olivat seuraavat:

- 1) Kuvata tehostamiskannustimen taloustieteellinen perusta aikaisempaa selkeämmin.
- 2) Arvioida tehokkuusanalyysin ja erityisesti StoNED-menetelmän (Kuosmanen & Kortelainen, 2012; Kuosmanen ym., 2010, 2014) kohdalla tapahtunut kehitys ja sen hyödynnettävyys suomalaisten sähkön jakeluverkonhaltijoiden tehokkuusmittauksessa.
- 3) Arvioida käytettävää mallispesifikaatiota muuttujien ja niiden määritelmien osalta.

Menetelmäkehityksen osalta keskeisin kehittämiskohde on mallin ennustetarkkuuden parantaminen tulevilla valvontajaksoilla. Erityisesti ns. ylisovittamisen ehkäisemiseen on viime vuosina kiinnitetty aikaisempaa enemmän huomiota tutkimuskirjallisuudessa. Toisaalta hankkeessa tarkastellaan myös keinoja lieventää endogeenisuusharhaa kontrollifunktioon perustuvan mallin avulla. Muuttujien osalta

selvityksessä pohditaan erityisesti pääomakannan mittarina käytetyn verkon jälleenhankinta-arvon korvaamista nykykäyttöarvolla, joka huomioi paremmin pääomakannan kulumisen ja siten kuvaa paremmin verkon tämänhetkistä pääomapanosta. Lisäksi selvityksessä nostetaan esiin myös muita mahdollisia ajankohtaisia kehittämistarpeita kuten valvontamallissa tarvittavat inflaatiokorjaukset, joiden yksityiskohtaisempi tarkastelu rajataan kuitenkin tämän selvityksen ulkopuolelle.

Raportin rakenne on seuraava. Luvussa 2 tarkastellaan tehostamiskannustimen periaatetta ja perustellaan tehostamiskannustimen logiikka regulaatioteorian näkökulmasta. Luvussa 3 luodaan lyhyt katsaus tehokkuusmittauksen menetelmissä viime vuosina tapahtuneeseen kehitykseen ja menetelmännovaatioiden soveltamismahdollisuuksiin EV:n valvontamallissa. Luvussa 4 kuvataan selvityksessä käytetty tilastoaineisto ja muuttujat. Luvussa 5 testataan mallin ennustekykä sovittamalla ensin malli harjoitusaineistoon ja arvioimalla sen jälkeen kuinka hyvin malli kykenee ennustamaan kustannusten tulevaa kehitystä testijakson aikana. Luvussa 6 tarkastellaan vaihtoehtoisia muuttujaspesifikaatioita mallin ennustetarkkuuden näkökulmasta. Luvussa 7 estimoidaan tehottomuusermin odotusarvo ja raportoidaan selvityksessä ehdotetun muuttujaspesifikaation ja estimointimenetelmän mukaisesti lasketut yhtiökohtaiset tehokkuusestimaatit. Luvussa 8 verrataan lyhyesti muuttujaspesifikaation ja estimointimenetelmän vaikutuksia yhtiökohtaisiin tehokkuuslukuihin. Yhteenveto kehittämissuunnitelmista esitetään luvussa 9. Raportissa tarkastellut konveksin regression vaihtoehtoiset spesifikaatiot esitetään yksityiskohtaisemmin raportin lopussa olevassa teknisessä liitteessä.

2. Tehostamiskannustimen periaatteet ja vaikuttavuus

2.1 Talousteoreettinen perusta

Mikrotalousteorian mukaan täydellisen kilpailun markkinoilla toimivan yrityksen kokonaistuotto (engl. *total revenue*) on markkinoiden tasapainossa yhtä suuri kuin yrityksen kokonaiskustannus (engl. *total cost*) (esim. Bernstein & Sappington 1999; Kuosmanen & Johnson, 2020). Toisin sanoen kilpailullisten markkinoiden tasapainossa pätee yhtälö

$$\text{Ylivoitto} = \text{kokonaistulo} - \text{muuttuva kustannus} - \text{kiinteä kustannus} = 0$$

Vastaavaa periaatetta voidaan soveltaa paikallisen monopoliyhtiön kohtuullisen tuoton valvonnassa. Kohtuullista kokonaistulon (engl. *total revenue*) tasoa voidaan arvioida kustannusten kautta siten, että kokonaistulo kattaa toiminnan muuttuvat ja kiinteät kustannukset, mutta ylivoittoja ei sallita. Siten kohtuullinen kokonaistulo voidaan määritellä kustannusten perusteella seuraavasti:

$$\text{Kohtuullinen kokonaistulo} = \text{kohtuullinen muuttuva kustannus} + \text{kohtuullinen kiinteä kustannus} \quad (1)$$

Tämän yhtälön pohjalta valvova viranomainen voi ensin arvioida kohtuullisen kustannustason (yhtälön oikea puoli), joka riittää kattamaan muuttuvat ja kiinteät kustannukset, ja sen jälkeen asettaa kokonaistulolle kattotason (yhtälön vasen puoli). Kokonaistulo voidaan tulkita liikevaihdoksi, joka kattaa kaikki asiakkailta perittävät maksut, jolloin kokonaistulolle asetettu kattotaso rajoittaa monopoliyhtiön mahdollisuuksia korottaa loppukäyttäjiltä perittäviä yksikköhintoja ja muita maksuja kohtuuttoman korkeiksi.

2.2 Liiketaloudellinen tulkinta

On tärkeää huomata, että talousteorian mukainen ylivoitto (*economic profit*) poikkeaa olennaisesti laskentatoimessa käytetyn liikevoiton käsitteestä (*accounting profit*). Mikrotaloustieteessä liikevoittoon sisältyvä tuotto sijoitetulle pääomalle lasketaan mukaan oman pääoman kustannukseen, joten se sisältyy kaavassa (1) kiinteään kustannukseen. Vaikka kannustinmalli voitaisiin rakentaa yhtälön (1) mukaisesti liikevaihdon kattotasoksi, EV:n valvontamallissa sovelletaan liiketaloudellista lähestymistapaa, jossa kokonaistulon sijaan kattotaso asetetaan taloustieteen termein tulkittuna kiinteälle kustannukselle. Tämän johtamiseksi yhtälö (1) voidaan muokata yhtäpitävään muotoon seuraavasti:

$$\text{Kohtuullinen kiinteä kustannus} = \text{kohtuullinen kokonaistulo} - \text{kohtuullinen muuttuva kustannus} \quad (2)$$

Yhtälön (2) vasemmalla puolella oleva kiinteä kustannus voidaan tulkita liiketalouden termein pääoman kokonaistuotoksi, kun taas yhtälön oikealla puolella oleva tuoton ja muuttuvan kustannuksen erotus voidaan tulkita kohtuulliseksi liikevoitoksi, jolloin saadaan EV:n valvontamallissa sovellettu periaate:

$$\text{Kohtuullinen pääoman tuotto} = \text{kohtuullinen liikevoitto} \quad (3)$$

Valvontaviranomainen voi arvioida pääoman tuotolle kohtuullisena pidettävän tason (yhtälön (3) vasen puoli), ja asettaa sen perusteella kattotason monopoliyhtiön liikevoitolle. Edellä esitetyn perusteella olennaisin ero liiketalouden termein esitetyn yhtälön (3) ja taloustieteellisen yhtälön (1) välillä on siinä, että kattotaso asetetaan liikevaihdon (= kokonaistulo) sijasta liikevoitolle.

Kuitenkin kun keskitytään vertaamaan pääoman tuottoa ja liikevoittoa, yhtälöstä (3) supistuu muuttuva kustannus kokonaan pois. Tätä puutosta on pyritty paikkaamaan toteutuneeseen liikevoittoon tehtävien korjauserien avulla, joihin myös tässä selvityksessä tarkasteltu tehostamiskannustin lukeutuu. Tehostamiskannustimen avulla muuttuva kustannus saadaan palautettua yhtälöön (3) määrittelemällä kohtuullinen liikevoitto seuraavasti (yksinkertaisuuden vuoksi kaikki muut korjauserät jätetään tässä tarkastelussa huomioimatta):

$$\text{Kohtuullinen liikevoitto} = \text{toteutunut liikevoitto} + \text{tehostamiskannustin},$$

missä

$$\text{Tehostamiskannustin} = \text{toteutunut muuttuva kustannus} - \text{kohtuullinen muuttuva kustannus}$$

EV:n soveltamassa tehostamiskannustimessa sovellettu kontrolloitavissa oleva operatiivinen kustannus (KOPEX) voidaan taloustieteen termein tulkita kohtuulliseksi muuttuvaksi kustannukseksi. Siten tehostamiskannustimen keskeisin tehtävä on palauttaa valvontamalliin muuttuvat kustannukset, jotka muutoin vähennetään kuluina liikevoitosta (vrt. yhtälöt (2) ja (3)). Tehostamiskannustimen ansiosta liiketaloudellinen kannustinmalli (3) on pääpiirteissään yhtenevä taloustieteellisen yhtälön (1) kanssa.¹

Valitettavasti muuttuvien kustannusten esittäminen pelkkänä korjauseränä on omiaan vähättelemään tehostamiskannustimen taloudellista merkitystä. Jakeluverkkojen valvontaa koskevassa keskustelussa tehostamiskannustin ja muuttuvat kustannukset sivuutetaan usein ilman minkäänlaista mainintaa (vrt. esim. Collan, ym., 2022). Toisaalta silloin kun tehostamiskannustimesta keskustellaan, huomio kiinnittyy liiaksi yhtiökohtaisiin tehokkuuslukuihin (%), kun sen sijaan olennaisinta on muuttuvan kustannuksen kohtuullisen tason (€) määrittely. Tässä mielessä termi ”tehostamiskannustin” saattaa olla jossakin määrin harhaanjohtava ja tehostamiskannustimen taloudellista ohjausvaikutusta vähättelevä. Muuttuvat kustannukset on verkkoyhtiöille hyvin huomattava kuluerä: esimerkiksi toimialan yhteenlaskettu KOPEX vuonna 2020 oli tässä selvityksessä käytetyn tilastoaineiston mukaan hieman yli 475 miljoonaa euroa, kun vastaavasti kohtuullinen kiinteä kustannus (= sallittu pääoman tuotto) oli noin 600 miljoonaa euroa.

Mikäli valvontamallia halutaan tulevaisuudessa kehittää selkeämpään ja ymmärrettävämpään muotoon, edellä esitetty taloustieteellinen yhtälö (1) tarjoaisi mielestämme yksinkertaisemman, mutta silti hyvin perustellun vaihtoehdon. Korjatun liikevoiton sijaan kattotaso voitaisiin asettaa suoraan liikevaihdolle, jolloin toteutuneen oikaistun tuloksen laskennassa tehtävät oikaisut jäisivät tarpeettomiksi.²

¹ Yksi merkittävä poikkeus on tehostamiskannustimelle asetetut katto- ja lattiatasot, jotka eivät perustu yhtälöön (1).

² Toteutuneen oikaistun tuloksen laskenta toteutetaan seuraavasti (Energiavirasto, 2021, Liite 2, Luku 1.1.2): ”Toteutuneen oikaistun tuloksen laskennassa palautetaan (5.1) eriytetyn taseen mukainen palautuskelpoisten liittymismaksujen vuotuinen muutos sekä eriytetyn tuloslaskelman mukaiset verkkovuokrat, liikearvosta tehdyt poistot, eriytetyn tuloslaskelman suunnitelman mukaiset poistot ja arvonalentumiset sähköverkon hyödykkeistä ja muihin kuluihin kirjattu verkonosuuden myynnistä aiheutuva myyntitappio. Muihin tuottoihin kirjattu verkonosuuden myyntivoitto sen sijaan vähennetään (5.1) toteutuneen oikaistun tuloksen laskennassa. Tämän jälkeen vähennetään tuloksen korjauseränä rahoitusomaisuuden kohtuulliset kustannukset (5.3). Lisäksi vähennetään kannustimien vaikutukset. Kannustimia ovat investointikannustin (6.1),

Yksinkertaisempi taloustieteeseen perustuva malli olisi kirjoittajien subjektiivisen arvion mukaan helpompi kommunikoida eri sidosryhmille, mikä voisi lisätä sääntelyn läpinäkyvyyttä.

2.3 Mittatikkukilpailu

Kohtuullisen kustannustason arvioinnissa voidaan hyödyntää Shleiferin (1985) alun perin kehittämän mittatikkukilpailua (engl. *yardstick competition*). Mittatikkukilpailun perusideana on luoda puitteet kustannuskilpailulle paikallisten monopoliyhtiöiden välille, jotka eivät muutoin kohtaa hintakilpailua tai uusia markkinoille pyrkiviä yrittäjiä. Toisin sanoen mittatikkukilpailussa paikalliset monopoliyhtiöt joutuvat keskinäiseen kustannuskilpailuun vastaavalla tavoin kuin kilpailullisilla markkinoilla toimivat yhtiöt.

Shleifer (1985) ei tarkastelussaan erottele muuttuvia ja kiinteitä kustannuksia. Monissa energiatoimialan sovellutuksissa mittatikkukilpailu on rajattu ainoastaan muuttuviin kustannuksiin (OPEX-regulaatio), koska kiinteitä kustannuksia on nimensä mukaisesti lyhyellä aikavälillä vaikeata ellei jopa mahdotonta sopeuttaa. Kuitenkin kiinteiden kustannusten huomioimatta jättäminen mittatikkukilpailussa voi kannustaa verkkoyhtiöitä liiallisiin pääomainvestointeihin (ks. esim. Filippini & Wild, 2001; Weyman-Jones, 2001). Toisaalta kokonaiskustannuksiin perustuva TOTEX-regulaatio voi rankaista yhtiöitä kohtuuttomasti vuosikymmeniä aiemmin tehdyistä yli- tai ali-investoinneista, jolloin nykyisen kaltaista regulaatiota ei vielä sovellettu.

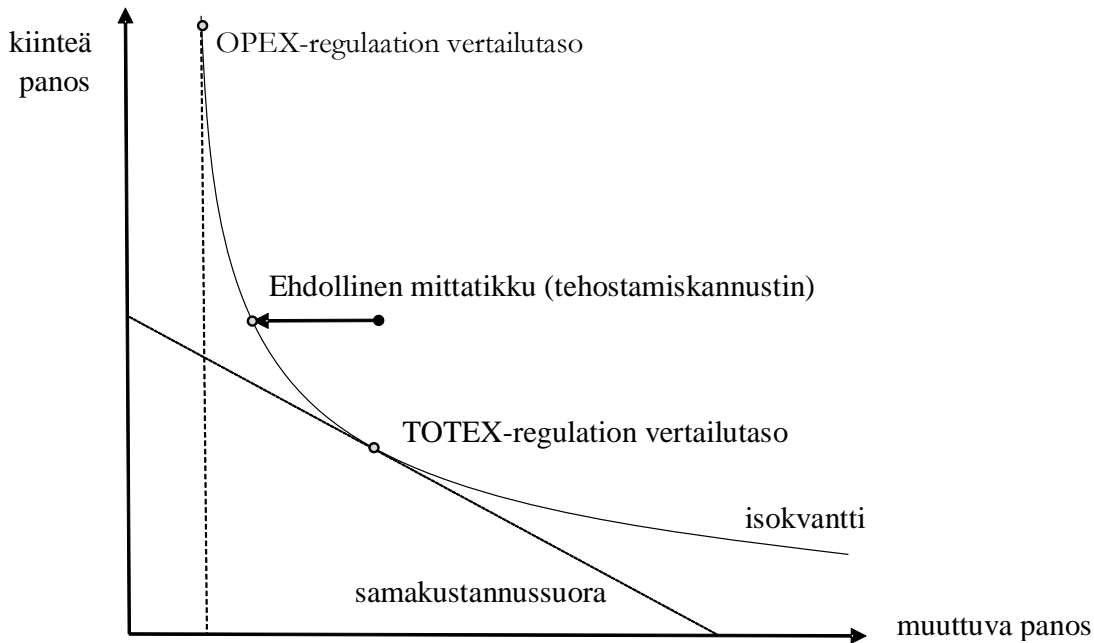
Ratkaisuksi edellä kuvattuun OPEX- vs TOTEX-dilemmaan Kuosmanen & Johnson (2020) ehdottavat ehdollista mittatikkukilpailua, jossa mittatikkukilpailu käydään muuttuvien kustannusten (OPEX) suhteen ottaen huomioon myös kiinteät kustannukset. Kuvio 2.1 havainnollistaa ehdollisen mittatikkukilpailun periaatteen verrattuna perinteisiin OPEX- ja TOTEX-pohjaisiin ratkaisuihin.

Kuviossa 2.1 muuttuviin kustannuksiin perustuvan OPEX-regulaation vertailutaso on piste kuvion yläosassa, jossa muuttuva panos minimoidaan annetulla tuotoksen tasolla. Tämän vertailutason saavuttaminen kuitenkin edellyttäisi mittavia investointeja kiinteään panokseen, jotka eivät ole kokonaistaloudellisesti kannattavia. Tämä on OPEX-regulaation keskeinen ongelma. Vastaavasti kokonaiskustannuksiin perustuvan TOTEX-regulaation mukainen vertailutaso on piste, jossa kuvioon piirretty samakustannussuora ja panosten teknisiä korvaavuuksmahdollisuuksia kuvaava isokvantti kohtaavat. Tässä pisteessä saavutetaan alhaisin kokonaiskustannusten taso. Kuitenkin jos yritys on aiemmin investoinut kiinteään pääomaan enemmän kuin kustannusten minimointi edellyttäisi, sen voi olla hyvin vaikeata ellei mahdotonta sopeuttaa pääomakantansa nopeasti optimaaliselle tasolle.

Ehdollisen mittatikkukilpailun ideana on vakioida kiinteä panos lyhyellä aikavälillä, mutta ottaa se kuitenkin huomioon muuttuvan kustannuksen kohtuullisen tason arvioinnissa. Ehdollisen mittatikkukilpailun vertailutaso on isokvantin piste, johon kuvioon piirretty nuoli osoittaa. Nuoli kuvaa tehostamiskannustinta: nuolen lähtöpiste kuvaa nykyistä kustannustasoa ja päätepiste tehostamiskannustimen vertailutasoa. Lyhyellä aikavälillä tehostamiskannustimen tarkoituksena on ohjata

laatukannustin (6.2), tehostamiskannustin (6.3) ja innovaatiokannustin (6.4). Laskennan lopputuloksena saadaan toteutunut oikaistu tulos.”

yritystä siirtymään vaakasuoraan kohti isokvantin kuvaamaa tehokasta kustannusrintamaa. Pidemmällä aikavälillä kiinteää panosta tulisi sopeuttaa kohti TOTEX-vertailutason mukaista kokonaiskustannukset minimoivaa pistettä.



Kuvio 2.1: Ehdollisen mittatikkukilpailun havainnollistus

Lähde: Kuosmanen & Johnson (2020)

Käytännössä EV:n soveltama sähkön jakeluverkkoyhtiöiden tehostamiskannustin ensimmäisellä ja toisella valvontajaksoilla 2005-2011 kohdistettiin laskennallisesti pelkästään muuttuviin kustannuksiin (OPEX), vaikka vertailutason arviointi perustuikin kokonaiskustannuksiin (TOTEX). Tulkitsemme näin ollen ensimmäisen ja toisen valvontajakson kannustimet OPEX-regulaatioksi. Kolmannella valvontajaksolla 2012-2015 tehostamiskannustin perustui pelkästään OPEX:n vertailutasoon ja kiinteä panos jätettiin tehostamiskannustimessa huomioimatta. Neljännellä ja viidennellä valvontajaksoilla 2016-2023 OPEX:n tehokkaan vertailutason arvioinnissa huomioitiin myös kiinteä pääomakanta, jolloin näillä valvontajaksoilla sovellettu tehostamiskannustin noudattaa ehdollisen mittatikkukilpailun periaatetta.

Tähän saakka kiinteään panokseen eli pääomakantaan ei tehostamiskannustimessa ole kohdistunut tehostamistavoitetta, vaan verkonhaltijoita on pikemminkin pyritty kannustamaan investoimaan säävarman jakeluverkon rakentamiseen. Tulevilla valvontajaksoilla kokonaistaloudellinen kustannustehokkuus on yksi tärkeimmistä kehityshaasteista valvontamallissa. Mielestämme muuttuvien kustannusten osalta 2016 käyttöön otettu ehdolliseen mittatikkukilpailuun perustuva KOPEX-vertailutaso on edelleenkin suositeltava ratkaisu, jota ei ole tarpeellista muuttaa. Pääomakantaa ja pääomainvestointeja reguloidaan valvontamallin muissa osissa, mm. pääoman yksikköhintojen sekä investointikannustimen avulla. KOPEX:n vertailutason määrittelyssä ehdollisen mittatikkukilpailun mukaisesti tarvitaan kuitenkin pääomakantaa kuvaava muuttuja. Tässä selvityksessä tarkastellaan

mahdollisuutta käyttää verkon nykykäyttöarvoa (NKA) jälleenhankinta-arvon (JHA) sijaan pääomakantaa kuvaavana muuttujana.

2.4 Tehostamiskannustimen vaikuttavuus

Tehostamiskannustimen vaikuttavuuden arvioimiseksi Kuosmanen & Johnson (2020) ovat vertailleet sähkön loppukäyttäjien maksamia keskimääräisiä siirtohintoja Suomessa, Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa. Vertailussa Eurostatin tilastoimista keskimääräisistä sähkön keskimääräisistä bruttohinoista (sisältäen energian ja siirron) on vähennetty keskimääräinen sähköenergian markkinahinta Nordpool sähköpörssissä sekä kaikki verot (mm. sähkövero ja arvonlisävero), jolloin jäljelle jää loppukäyttäjän sähkön siirrosta maksama keskihinta (sisältäen kanta- ja jakeluverkkojen maksut) sekä sähkön myyjien keskimääräinen preemio yli markkinahinnan. Puolivuositteiset keskihinnat esitetään Taulukossa 2.1 erikseen kotitalous- ja yritysasiakkaille (taulukossa Q1-Q2 viittaa vuoden kahteen ensimmäiseen kvartaaliin eli tammi-kesäkuuhun, Q3-Q4 taas loppuvuoteen heinä-joulukuu).

Taulukko 2.1: Keskimääräinen siirtohinta (€/MWh) Suomessa, Tanskassa, Ruotsissa ja Norjassa vuosina 2014-2019.

	Kotitalousasiakkaat (vuosikulutus 2,5 – 5 MWh)				Yritysasiakkaat (vuosikulutus 500 – 2000 MWh)			
	FIN	DEN	SWE	NOR	FIN	DEN	SWE	NOR
2014 Q3-Q4	67.74	68.34	86.94	87.22	27.94	33.94	33.64	35.12
2015 Q1-Q2	72.95	67.48	92.72	88.49	34.05	33.08	36.12	36.39
2015 Q3-Q4	70.15	65.98	100.62	81.81	32.75	34.38	38.92	35.61
2016 Q1-Q2	70.83	65.17	96.60	80.73	30.53	34.27	35.90	33.93
2016 Q3-Q4	66.90	62.49	94.02	82.48	27.30	30.99	31.02	33.38
2017 Q1-Q2	72.65	63.82	94.89	87.26	27.35	31.41	33.49	31.46
2017 Q3-Q4	71.90	59.70	98.10	84.65	26.00	30.40	31.80	31.05
2018 Q1-Q2	65.14	62.67	80.95	86.78	18.84	20.87	25.05	29.08
2018 Q3-Q4	62.84	59.53	78.12	89.70	12.04	13.03	18.22	28.60
2019 Q1-Q2	73.50	67.80	88.13	93.01	20.10	22.90	31.73	29.91

Lähde: Kuosmanen & Johnson (2020), Taulukko 1

Vaikka sähkön siirtohintojen nousua on kritisoitu voimakkaasti kotimaisessa mediassa, pohjoismainen vertailu osoittaa siirtohintojen olevan Suomessa lähes samaa luokkaa kuin Tanskassa ja huomattavasti alhaisempia kuin Ruotsissa ja Norjassa. Suomalainen sähköverkko osoittautuu tämän tarkastelun valossa keskimäärin hyvin kustannustehokkaaksi. Vertailussa ei ole huomioitu eri maiden olosuhteita millään tavoin. Esimerkiksi Norjassa sähköverkon rakentaminen ja ylläpito hankalissa vuoristo-olosuhteissa nostaa kustannuksia. Pohjoismaista Tanskassa on korkein väestötiheys, vähäisin lumikuorma ja tasainen maasto, joten etukäteen voisi olettaa keskimääräisten siirtohintojen olevan alhaisimpia Tanskassa. Suomessa väestötiheys on alhaisempi ja sääolosuhteet ankarammat, joten liki Tanskan hintatasoon yltäminen kieli sähköverkkojen kustannustehokkuudesta muihin Pohjoismaihin verrattuna.

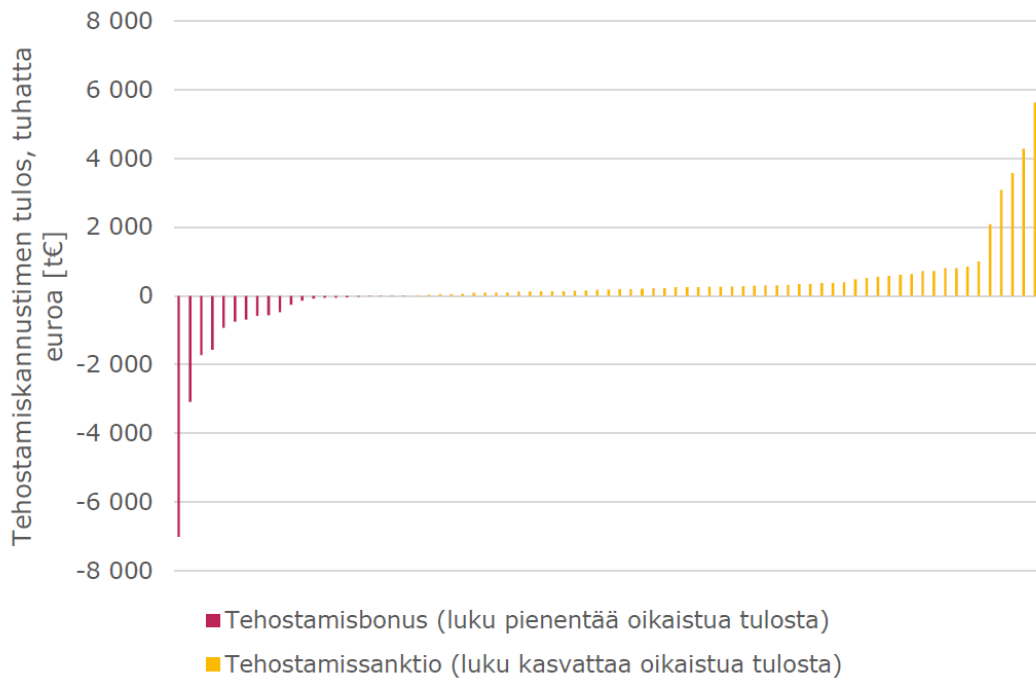
Asiakkaiden maksama siirtohinta määräytyy pitkällä aikavälillä Energiaviraston soveltaman valvontamallin perusteella. Valvontamallissa on tehostamiskannustimen lisäksi muitakin tärkeitä elementtejä, joten sähköverkkojen kustannustehokkuutta ei voida suoraan lukea tehostamiskannustimen ansioksi. Kuitenkin kohtuullisen tuoton sääntelyyn perustuva valvontamalli on hyvin samankaltainen

kaikissa Pohjoismaissa, eikä EV:n soveltama pääoman kohtuullinen tuottoaste ole ainakaan merkittävästi alhaisempi kuin muissa Pohjoismaissa. Arviomme mukaan keskeisin ero vertailtujen Pohjoismaiden välillä koskee nimenomaan tehostamiskannustinta, joka on kaikkien keskeisin kustannuksia hillitsevä komponentti valvontamallissa.

Loppukäyttäjän näkökulmasta tehostamiskannustin lisää tasapuolisuutta siinä mielessä, että jakeluverkkoyhtiöiden väliset tehokkuuserot eivät pitkällä aikavälillä vaikuta loppukäyttäjiltä perittäviin tariffeihin. Tehostamiskannustin siirtää havaitut tehokkuuserot operatiivisissa kustannuksissa pääoman tuottoa koskeviin bonuksiin ja sanktioihin, jolloin loppukäyttäjän kannalta ei ole suurta merkitystä kuinka kustannustehokkaasti paikallinen jakeluverkkoyhtiö toimii. Toisaalta tehostamiskannustin myös määrittelee olosuhteet, joiden puitteissa jakeluverkkoyhtiöt voivat siirtää toimintaympäristöstä johtuvia kustannuksia loppukäyttäjien maksettavaksi. Koska KOPEX:n vertailutaso riippuu mm. verkkopituudesta ja käyttäjämäärästä, väestön asukastiheys vaikuttaa myös loppukäyttäjiltä perittäviin tariffeihin: haja-asutusalueella toimivien jakeluverkkoyhtiöiden operatiiviset kustannukset ovat keskimäärin korkeammat kuin kaupunkiyhtiöillä ja tämä kustannusero siirtyy myös loppukäyttäjiltä perittäviin maksuihin.

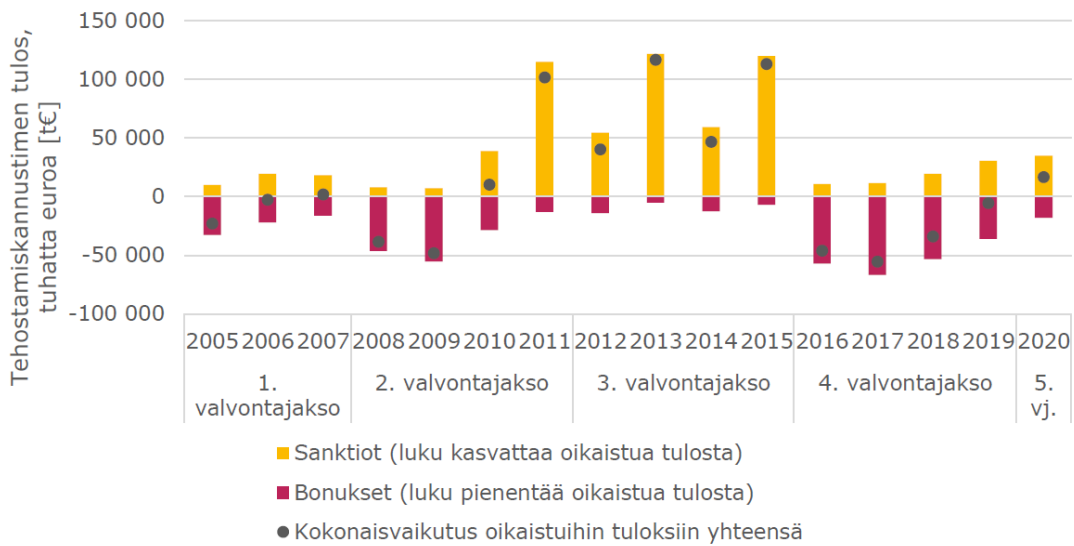
Energiavirasto (2022) on myös omassa selvityksessään tarkastellut tehostamiskannustimen vaikuttavuutta verkkoyhtiöiden välillä. Kuviossa 2.2 esitetään tehostamiskannustimen jakauma vuonna 2020. Verkkoyhtiöt on järjestetty suuruusjärjestykseen tehostamiskannustimen tuloksen mukaan; kuviossa kukin viiva kuvaa yksittäistä yhtiötä. Yhtiöt, joiden tehostamiskannustin saa negatiivisen arvon ovat toimineet asetettua KOPEX-vertailutasoa tehokkaammin, jolloin niille sallitaan korkeampi liikevoitto ja pääoman tuottoaste. Vastaavasti yhtiöt, joiden tehostamiskannustin saa positiivisen arvon ovat toimineet asetettua KOPEX-vertailutasoa tehottomammin, jolloin tehottomuus korvataan sähkön käyttäjille alhaisemman liikevoiton ja pääoman tuottoasteen myötä. Enemmistö verkkoyhtiöistä toimi varsin lähellä vuodelle 2020 määriteltyä tehokkaan muuttuvan kustannuksen tasoa, mutta ääripäistä löytyy hyvin tehokkaina ja toisaalta tehottomina näyttäytyviä yhtiöitä.

Kuvio 2.3 puolestaan kuvaa tehostamiskannustimen kannustinvaikutuksen kehitystä ajan kuluessa koko toimialan tasolla. Ensimmäisellä valvontajaksolla ja 2. valvontajakson alkuvuosina tehostamiskannustimen mukainen kustannusnormi asettui varsin alhaalle, jolloin monet yhtiöt saivat tehostamisbonuksia. Tehostamiskannustimen kustannusnormi muuttui ajan myötä tiukemmaksi varsinkin 3. valvontajaksolla, jolloin kohtuullisen kustannustason estimoinnissa otettiin käyttöön StoNED-menetelmä Kuosmasen ym. (2010) selvityksen pohjalta. Tällä jaksolla monille yhtiöiden oli vaikeampi saavuttaa tehokkaan toiminnan mukainen KOPEX:n taso, jolloin monille yhtiöille kertyi tehostamissanktioita. Tehostamiskannustimen kehittäminen jatkui siirryttäessä 4. ja 5. valvontajaksoille, mutta menetelmäkehityksen lisäksi kustannusnormia laskettiin mm. asettamalla ns. yleisen tehostamistavoitteen arvoksi nolla. Kaikki kuviossa havaittavat muutokset eivät tietenkään johdu yksinomaan valvontamallissa tai -menetelmissä tapahtuneista muutoksista, vaan myös verkkoyhtiöiden omalla toiminnalla on vaikutusta bonusten ja sanktioiden kertymiseen. Tehostamiskannustimen bonukset ja sanktiot eivät välittömästi siirry kuluttajilta perittäviin tariffeihin, mutta pitkällä aikavälillä tehostamiskannustimella on erittäin tärkeä rooli siirtohintojen nousua hillitsevänä tekijänä.



Kuvio 2.2: Tehostamiskannustimen yhtiökohtainen kannustinvaikutus vuonna 2020

Lähde: Energiavirasto (2022), Kuva 7.



Kuvio 2.3: Tehostamiskannustimen kannustinvaikutus jakeluverkoissa eri valvontajaksolla

Lähde: Energiavirasto (2022), Kuva 8.

3. StoNED-menetelmän kehitys tutkimuskirjallisuudessa

3.1 Nykyisen menetelmän kuvaus

Ehdollisessa mittatukkukilpailussa muuttuvan panoskäytön tehokasta vertailutasoa arvioidaan annetulla kiinteiden kustannusten, tuotosten ja muiden verkkoyhtiöitä ja niiden toimintaympäristöä kuvaavien tekijöiden tasolla. Nyt meneillään olevalla valvontajaksolla 2020-2023 sovellettava rintamamalli voidaan esittää formaalisti seuraavan yhtälön avulla (ks. Kuosmanen ym., 2014)

$$\ln x_{i,t} = \ln IR(\mathbf{x}_{i,t}, \mathbf{y}_{i,t}) + \boldsymbol{\delta}' \mathbf{z}_{i,t} + u_{i,t} + v_{i,t}, \quad (4)$$

missä

- $x_{i,t}$ on yhtiön i muuttuva panos (KOPEX) vuonna t ,
- IR on panostarvefunktio, joka täyttää asetetut monotonisuus-, konveksisuus- ja skaalatuottoehdot,
- $\mathbf{x}_{i,t}$ on yhtiön i kiinteiden panosten vektori vuonna t ,
- $\mathbf{y}_{i,t}$ on yhtiön i tuotosvektori vuonna t ,
- $\boldsymbol{\delta}$ on heterogeenisuuden marginaalivaikutuksia kuvaava vektori,
- $\mathbf{z}_{i,t}$ on yhtiön i heterogeenisuutta kuvaavien tekijöiden vektori vuonna t ,
- $u_{i,t}$ on yhtiön i tehottomuus vuonna t ,
- $v_{i,t}$ on yhtiön i satunnaisvirhe vuonna t .

Malli (4) huomioi useita panos- ja tuotosmuuttujia, yhtiöiden ja niiden toimintaympäristöjen heterogeenisuuden, erottelee tehottomuuden satunnaisvirheistä sekä hyödyntää paneeliaineistoa. Käytännössä mallin estimointi StoNED-menetelmällä sisältää kolme vaihetta:

- 1) Ehdollisen odotusarvon $E(\ln x_{i,t} | \mathbf{x}_{i,t}, \mathbf{y}_{i,t}, \mathbf{z}_{i,t})$ estimointi konveksin regression (*convex nonparametric least squares*, CNLS) avulla.
- 2) Tehottomuustermien odotusarvon $E(u_{i,t} | \mathbf{e}_{i,t})$ estimointi vaiheen 1) regressioresiduaalien \mathbf{e}_i perusteella hyödyntäen kernel dekonvoluutiomenetelmää (Hall & Simar, 2002).
- 3) Estimoidun kustannusrintaman muodostaminen ja yhtiökohtaisten tehokkuuslukujen laskenta vaiheiden 1) ja 2) tulosten perusteella.

Nykyisin sovelletun mallin ja estimointimenetelmän tarkemmat yksityiskohdat esitettiin raportissa Kuosmanen ym. (2014). Tässä selvityksessä keskitytään erityisesti vaiheen 1) konveksin regression ennustetarkkuuden parantamiseen.

StoNED-menetelmän ensimmäisessä vaiheessa KOPEX:n ehdollinen odotusarvo estimoidaan käyttämällä CNLS-mallia (Kuosmanen, 2008; Kuosmanen & Kortelainen, 2012). CNLS-mallin estimaatit saadaan ratkaisemalla seuraava pienimmän neliösumman (PNS) ongelma

$$\min_{\rho, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i,t})^2$$

siten että

(5)

$$\begin{aligned}
\ln x_{i,t} &= \ln(\rho_{i,t}) + \delta z_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad \forall i, t \\
\rho_{i,t} &= \boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, t \\
\boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} &\geq \boldsymbol{\gamma}'_{j,s} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{j,s} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, j; \forall s, t \\
\boldsymbol{\gamma}_{i,t} &\geq \mathbf{0} \quad \forall i, t \\
\boldsymbol{\beta}_{i,t} &\geq \mathbf{0} \quad \forall i, t
\end{aligned}$$

Kokonaisvirhetermi $\varepsilon_{i,t}$ sisältää sekä tehottomuustermin $u_{i,t}$ että virhetermin $v_{i,t}$, parametri $\rho_{i,t}$ kuvaa panostarvefunktiota IR yritykselle i periodilla t , kertoimet $\boldsymbol{\gamma}_{i,t}, \boldsymbol{\beta}_{i,t}$ ovat tuotosten ja panosten marginaalisia vaikutuksia muuttuvan panoksen käyttöön. Ei-toivotut tuotokset (eli ns. haitakkeet) mallinnetaan siten, että rajoitetta $\boldsymbol{\gamma}_i \geq \mathbf{0} \quad \forall i$ ei sovelleta ei-toivottuihin tuotoksiin, joten niiden rajakustannus γ_{is} voi olla positiivinen tai negatiivinen. Kaikille toivotuille tuotoksille epäyhtälörajoite $\boldsymbol{\gamma}_i \geq \mathbf{0} \quad \forall i$ on voimassa. Konveksin pienimmän neliösummatehtävän tulkinnasta löytyy kattava esitys artikkelissa Kuosmanen & Johnson (2020).

Pienimmän neliösumman ongelmassa on kvadraattinen tavoitefunktio sekä epälineaarisia rajoitteita, joten sen ratkaiseminen vaatii tehokkaan epälineaarisen ohjelmoinnin (engl. *nonlinear programming, NLP*) ratkaisualgoritmin. Ongelma on laskennallisesti vaativa, koska konkaavisuusrajoitteiden $\boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} \geq \boldsymbol{\gamma}'_{j,s} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{j,s} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, j; \forall s, t$ lukumäärä kasvaa kvadraattisesti havaintojen lukumäärän kasvaessa. Dai ym. (2021) ovat kehittäneet tehokkaan Python ohjelmointikieltä käyttävän laskentatyökalun PyStoNED, joka hyödyntää uusimpia menetelmätyökaluja ja laskenta-algoritmeja. PyStoNED paketti on vapaasti saatavissa internetosoitteessa: <https://github.com/ds2010/pyStoNED>.

3.2 Ylisovittaminen ja mallin ennustekyky

Tutkimuskirjallisuudessa on alettu viime vuosina kiinnittää aikaisempaa enemmän huomiota ns. ylisovittamisen (*overfitting*) vähentämiseen (ks. esim. Keshvari, 2018; Mazumder ym., 2019; Yagi ym., 2020; Bertsimas & Mundru, 2021; Dai, 2022). Mattsson (2020) kiteyttää ylisovittamisen käsitteen Tiede-lehden kolumnissaan seuraavasti: ”Eräs aineistolähtöisen mallinnuksen suurimpia syntejä on ylisovittaminen. Ylisovittaminen tarkoittaa, että mallinnetaan satunnaista kohinaa kiinnostavan ilmiön eli signaalin lisäksi.” Kolumnissaan Mattsson (2020) lainaa myös tunnettua matemaatikkoa John von Neumannia seuraavasti: ”Neljällä parametrilla sovitan aineistoon norsun, ja viidennellä saan sen heiluttamaan kärsäänsä”.

Ylisovittaminen on kustannusrintamamallin estimoinnin kannalta relevantti aihe kahdesta syystä. Ensinnäkin semiparametrinen malli sisältää suuren määrän estimoitavia parametreja, joita sitovat kustannusrintaman muotoa koskevat teoreettiset rajoitteet (monotonisuus, konveksisuus ja homogeenisuus). Toiseksi, kustannusrintamamalli estimoidaan aikaisempien valvontajaksojen tilastoaineiston perusteella, mutta estimoituja parametrioita sovelletaan tulevan valvontajakson kohtuullisen muuttuvan kustannustason määrittämiseen. Tästä syystä mallin ennustekyky seuraavaa valvontajaksoa ajatellen on jopa keskeisempi kysymys kuin mallin istuvuus saatavilla olevaan havaintoaineistoon.

Käytännössä ylisovittamista voidaan vähentää rajoittamalla tuotosten ja panosten rajakustannuksia kuvaavien varjohintojen $\boldsymbol{y}_{i,t}, \boldsymbol{\beta}_{i,t}$ vaihteluväliä siten, että äärimmäisen suuria ja pieniä varjohintoja pyritään välttämään, koska täysin vapaasti määräytyvät varjohinnat voivat johtaa epärealistisen suuriin rajakustannuksiin. Tehostamiskannustimen periaatteenahan on rajoittaa KOPEX kohtuullisena pidettävälle tasolle, mikä käytännössä tapahtuu asettamalla tuotosten rajakustannukset kohtuullisina pidettävälle tasolle (vrt. STOTEX:n vertailutason laskennassa käytetyt varjohinnat, jotka esitetään Excel-laskentatyökalun työkirjassa ”Laskenta”). Vaikka rajakustannuksissa on eroja yhtiöiden välillä, on rajakustannusten vaihteluväliä perusteltua rajoittaa siten, että tuotosten ja kiinteän panoksen rajakustannukset eivät nousisi kohtuuttoman suuriksi.

Varjohintojen rajoittamiseen on olemassa useita eri tapoja. Ensimmäinen vaihtoehto on lisätä mallin (2) tavoitefunktioon ns. rangaistusermi (*penalty term*) seuraavasti (ks. esim., Dai ym., 2022):

$$\min_{\rho, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}, \delta, \varepsilon} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i,t})^2 + k \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \|\boldsymbol{y}_{i,t}\|^2 + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \|\boldsymbol{\beta}_{i,t}\|^2 \right)$$

missä parametri k asetetaan käyttäjän toimesta etukäteen. Symboli $\|\boldsymbol{\beta}_{i,t}\| = \sqrt{\beta_{1,i,t} + \beta_{2,i,t} + \dots + \beta_{K,i,t}}$ tarkoittaa varjohintojen Euklidista normia (ts. L_2 -normi). Parametrin γ arvoa kasvattamalla rangaistusermi käytännössä pakottaa varjohinnat lähemmäksi nollaa, jolloin äärimmäisen suuret varjohinnat karsiutuvat pois ja varjohintojen vaihteluväli pienenee. Tähän lähestymistapaan viitataan jatkossa termillä L_2 -normi CNLS.

Toinen vaihtoehto on lisätä mallin (2) rajoitteisiin Lipschitz-normiin perustuva rajoite (ks. Mazumder ym., 2019):

$$\|\boldsymbol{y}_{i,t}\|^2 + \|\boldsymbol{\beta}_{i,t}\|^2 \leq L^2 \quad \forall i, t$$

missä Lipschitz parametri L asetetaan etukäteen käyttäjän toimesta. Periaate on täysin sama kuin edellä tarkastellussa L_2 -normi CNLS-mallissa, mutta tässä vaihtoehdossa sovelletaan rangaistusermin sijasta sitovia epäyhtälörajoitteita. Tähän lähestymistapaan viitataan jatkossa termillä Lipschitz normi CNLS.

Molemmat edellä tarkastelluista akateemisessa kirjallisuudessa esitetyistä lähestymistavoista pyrkivät karsimaan äärimmäisen suuria varjohintoja pakottamalla ne kohti nollaa. Kuitenkaan hyvin alhaiset varjohinnat tai nollan suuruiset varjohinnat eivät ole tässä yhteydessä välttämättä toivottavia. Tämän takia tässä selvityksessä tarkastellaan myös kolmatta vaihtoehtoa. Merkitään CNLS mallin (2) avulla estimoituja varjohintoja symbolilla $\hat{\boldsymbol{y}}_{i,t}, \hat{\boldsymbol{\beta}}_{i,t}$ ja estimoitujen varjohintojen jakauman mediaania symbolilla $M(\hat{\boldsymbol{y}}), M(\hat{\boldsymbol{\beta}})$. Sen sijaan että varjohinnat pakotetaan kohti nolla, varjohintojen vaihteluväliä voidaan rajoittaa kohti estimoitujen CNLS-varjohintojen jakauman mediaania asettamalla seuraavanlainen Lipschitz rajoite:

$$\|\boldsymbol{y}_{i,t} - M(\hat{\boldsymbol{y}})\|^2 + \|\boldsymbol{\beta}_{i,t} - M(\hat{\boldsymbol{\beta}})\|^2 \leq L^2 \quad \forall i, t$$

Neljäs tarkasteltu vaihtoehto on rajoittaa Euklidisen normin sijaan kunkin panos- ja tuotosmuuttujan vaihteluväliä erikseen. Tämän lähestymistavan merkittävin etu on se, että se sallii eri panos- ja tuotosmuuttujien mitta-asteikkojen ja vaihteluvälien suuretkin poikkeamat. Vastaavanlaisia painorajoituksia käytetään hyvin yleisesti kustannustehokkuuden analyysissä epätäydellisen hintainformaation mallintamiseen (esim., Kuosmanen & Post, 2001; Camanho & Dyson 2005), mutta tietääksemme painorajoituksia ei ole aikaisemmin sovellettu ylisovittamisen torjuntaan. Edellä esitetyn tapaan lähtökohdaksi voidaan ottaa CNLS mallin (2) avulla estimoitujen varjohintojen jakauma. Merkitään varjohintojen jakauman alinta desiiliä (ts. jakauman alin 10%) symboleilla $D_1(\hat{\gamma}), D_1(\hat{\beta})$ ja ylintä desiiliä (korkein 10%) symboleilla $D_9(\hat{\gamma}), D_9(\hat{\beta})$. Tällöin muuttujakohtaiset vaihteluvälit voidaan asettaa seuraavien epäyhtälörajoitteiden avulla:

$$\begin{aligned} D_1(\hat{\gamma}) &\leq \gamma_{i,t} \leq D_9(\hat{\gamma}) \\ D_1(\hat{\beta}) &\leq \beta_{i,t} \leq D_9(\hat{\beta}) \end{aligned}$$

Tähän lähestymistapaan viitataan jatkossa termillä WR CNLS (10%, 90%). Toisaalta rajoitteita voidaan tiukentaa edelleen soveltamalla alimman ja ylimmän desiilin sijaan ala- ja yläkvarttileja (ts. jakauman alin ja ylin 25%), joita merkitään symboleilla $Q_1(\hat{\gamma}), Q_1(\hat{\beta})$ sekä $Q_3(\hat{\gamma}), Q_3(\hat{\beta})$. Tällöin epäyhtälörajoitteet voidaan kirjoittaa muodossa

$$\begin{aligned} Q_1(\hat{\gamma}) &\leq \gamma_{i,t} \leq Q_3(\hat{\gamma}) \\ Q_1(\hat{\beta}) &\leq \beta_{i,t} \leq Q_3(\hat{\beta}) \end{aligned}$$

Tähän lähestymistapaan viitataan jatkossa termillä WR CNLS (25%, 75%).

Edellä esitettyjen mallispesifikaatioiden laskennallinen toteutus konveksin regression PNS tehtävänä esitetään tarkemmin teknisessä liitteessä.

3.3 Endogeenisuus ja kontrollifunktio

Endogeenisuusarha on perinteisesti hyvin suuri huolenaihe ekonometrian kirjallisuudessa (esim. Olley & Pakes, 1996), mutta toistaiseksi mahdolliseen endogeenisuusarhaan on kiinnitetty verkkoyhtiöiden regulaation käytännönsovelluksissa tai ylipäätään rintamamallien estimoinnissa varsin niukasti huomiota. Tässä yhteydessä endogeenisuus johtuu pääasiassa siitä, että tehottomuustermi $u_{i,t}$ voi korreloida selittävinä muuttujina huomioitujen panos- ja tuotosmuuttujien tai toimintaympäristöä kuvaavien tekijöiden kanssa. Mikäli esimerkiksi $z_{i,t}$ ja $u_{i,t}$ ovat positiivisesti korreloituneita, PNS-menetelmällä estimoitu parametri δ voi yliarvioida toimintaympäristön vaikutusta nappaamalla mukaansa myös tehottomuustermin epäsuoran vaikutuksen. Tällöin valvontamalli saattaa kompensoida liikaa toimintaympäristöstä johtuvia kustannuseroja, jotka todellisuudessa johtuvatkin tehottomasta toiminnasta.

Endogeenisuusarhan torjumiseen on olemassa monia keinoja. Tässä selvityksessä tarkastellaan kontrollifunktioon perustuvaa lähestymistapaa (Olley & Pakes, 1996; Levinsohn & Petrin, 2003,

Akerberg ym., 2015), joka tarjoaa varsin suoraviivaisen tavan endogeenisuusharhan korjaamiseen. Tätä varten tarvitaan havaittavissa oleva kontrollimuuttuja $\tilde{z}_{i,t}$, joka korreloi vahvasti tehottomuustermiin $u_{i,t}$ kanssa. Käytännössä kontrollimuuttuja mallinnetaan samaan tapaan kuin muutkin z-muuttujat, mutta $\tilde{z}_{i,t}$ ei kuitenkaan itsessään ole eksogeeninen toimintaympäristöä kuvaava tekijä. Tällöin kontrollimuuttujan $\tilde{z}_{i,t}$ lisääminen malliin selittäväksi muuttujaksi estimointivaiheessa 1) auttaa vähentämään endogeenisuusharhaa sitomalla itseensä tehottomuustermiin vaikutukset, jotka muuten aiheuttaisivat harhaa muissa mallin parametreissa. On syytä korostaa, että kontrollimuuttuja $\tilde{z}_{i,t}$ mallinnetaan eksplisiittisesti ainoastaan estimointivaiheessa 1), sen sijaan tehokkuusanalyysin vaiheissa 2) ja 3) kontrollimuuttujaa ei käytetä, koska tavoitteena on estimoida tehottomuustermi $u_{i,t}$.

Kontrollimuuttujaan ja sen estimointiin palataan tarkemmin alla luvuissa 4.5 ja 6.2.

4. Muuttujat ja aineisto

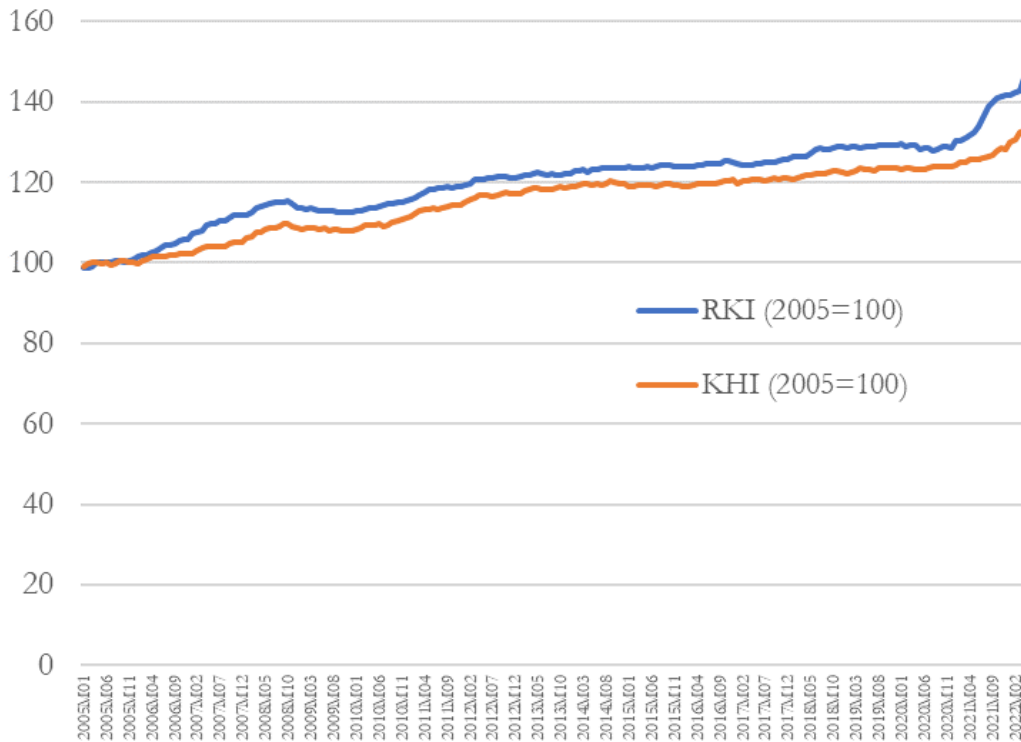
4.1 Tarkasteltava ajanjakso

Tässä selvityksessä tarkasteltava aineisto kattaa vuodet 2008–2020, tosin sanoen valvontajaksot 2-4 kokonaisuudessaan sekä 5. valvontajakson ensimmäisen vuoden. Rintamamallin estimoinnissa käytettävä aineisto on ns. tasapainottamaton paneeli (engl. *unbalanced panel*), jossa on mukana kaikkiaan 86 jakeluverkonhaltijaa. Näistä 9 jakeluverkonhaltijaa on fuusioitunut toisen jakeluverkonhaltijan kanssa tarkastelujakson aikana. Alalta poistuneet yhtiöt käsitellään aineistossa erillisinä havaintoyksikköinä siihen saakka, kunnes toiminta itsenäisenä verkonhaltijana päättyy. Toisin sanoen fuusioituvia yhtiöitä ei yhdistetä jälkikäteen laskennallisesti yhdeksi havaintopisteeksi. Fuusioituneet yhtiöt käsitellään yhtenä havaintoyksikkönä siitä vuodesta lähtien, kun verkonhaltijoiden EV:lle ilmoittamat tiedot on yhdistetty samaan yhtiöön.

Kuosmasen ym. (2010) raportissa tasapainottamattoman paneeliaineiston käyttäminen rintamamallin estimoinnissa perustellaan seuraavasti:

- 1) Tasapainottamattoman aineiston käyttäminen kasvattaa havaintoaineiston otoskokoa, mikä parantaa tilastollisen estimaattorin tarkkuutta verrattuna tasapainotettuun paneeliin, josta fuusioituneet yhtiöt poistetaan jälkikäteen. Tasapainottamaton paneeli sisältää tässä tapauksessa 46 havaintopistettä enemmän kuin tasapainotettu paneeli. Mikäli toimialan keskittyminen tapahtuu myös tulevaisuudessa, voi havaintoaineiston koko olla merkittävä estimoinnin tarkkuuteen vaikuttava tekijä.
- 2) Fuusioituneiden yhtiöiden laskennallinen yhdistäminen jälkikäteen jättää huomioimatta fuusion myötä syntyvät synergiaedut ja päällekkäisten toimintojen karsimisesta saatavat kustannussäästöt. Panostarvefunktion skaalatuotto- ja konveksisuus-ominaisuuksien takia jälkikäteen laskennallisesti yhdistetyn yhtiön tehokkuus on väistämättä alhaisempi, kuin kahden erikseen tarkastellun yhtiön tehokkuuslukujen painotettu keskiarvo.
- 3) Paneeliaineiston tasapainottaminen jättää huomioimatta ns. luovaan tuhoon perustuvan tuottavuuskasvun, joka perustuu siihen, että tehottomien yhtiöiden poistuessa toimialalta resurssit kohdetyvät tehokkaammin toimiville yhtiöille. Olley & Pakes (1996) osoittavat amerikkalaisten puhelinyhtiöiden aineistolla, että alalta poistuvien tehottomien toimijoiden vaikutus toimialan tuottavuuteen voi olla merkittävä.

Euromääräiset panosmuuttujat on deflatoitu viimeisimmän vuoden eli 2020 rahanarvoon käyttäen Tilastokeskuksen julkaiseman kuukausittaisen kuluttajahintaindeksin (KHI) huhti-kesäkuun pistelukujen keskiarvoa EV:n soveltaman inflaatiokorjausmenettelyt mukaisesti. KHI:n pisteluvun kehitys vuoden 2005 jälkeen esitetään kuviossa 4.1. Vertailun vuoksi kuviossa esitetään myös rakennuskustannusindeksin (RKI) kehitys vastaavana ajanjaksona. Koska yleinen hintataso kasvoi tarkastelujaksolla 2005-2020 varsin tasaisesti ja maltillisesti, KHI:n ja RKI:n poikkeamilla ei tässä raportissa tarkastellussa aineistossa ole havaittavaa merkitystä.



Kuvio 4.1: Euromääräisten panosmuuttujien deflatoinnissa sovelletun kuluttajahintaindeksin (KHI) sekä rakennuskustannusindeksin (RKI) kehitys 2005-2022.

Vuoden 2020 jälkeen rakennuskustannusindeksi kasvoi kuluttajahintaindeksiä selvästi voimakkaammin. Tämä johtunee koronapandemian aikana kasvaneesta rakennustarvikkeiden kysynnästä. Viime kuukausina kuluttajahinnat ovat lähteneet voimakkaaseen nousuun erityisesti energian ja elintarvikkeiden osalta Venäjän hyökättyä Ukrainaan. Mikäli KHI kasvaa seuraavan vuoden kuluessa huomattavasti voimakkaammin johtuen sellaisten tuotteiden ja palveluiden kuluttajahintojen noususta, jolla ei ole mitään tekemistä sähkön jakeluverkkojen kanssa, saattaa olla tarpeellista harkita KHI:n korvaamista jollakin toimialan hintakehitystä paremmin kuvaavalla hintaindeksillä, mahdollisesti useamman hintaindeksin yhdistelmällä. Tämän lisäksi eri vuosina kertyvien ali- ja ylijäämien inflaatiokorjaus olisi korkean inflaation oloissa tarpeellinen. Inflaatiokorjausta ja siihen soveltuvia hintaindeksejä on pohdittu aiemmin selvityksessä Kuosmanen & Pursiainen (2011).

4.2 Panosmuuttujat

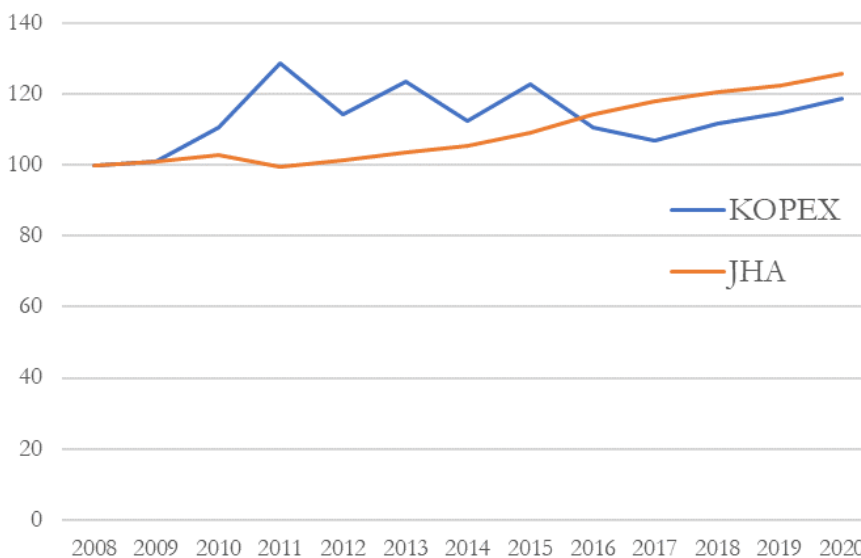
Nykyisellä valvontajaksolla sovelletaan mallia, jossa huomioidaan kaksi erillistä panosmuuttujaa:

- KOPEX muuttuvana panoksena (engl. *variable input*), johon kohdistetaan tehostamistavoite.
- Verkon jälleenhankinta-arvo (JHA) kiinteänä panoksena (engl. *fixed input*), johon ei kohdistu tehostamistavoitetta.

KOPEX ja JHA käsitellään erillisinä panosmuuttujina eikä niitä missään vaiheessa lasketa yhteen, jolloin JHA voidaan käsitellä varantosuurena (pääomakannan arvo) muuntamatta sitä virtasuureksi (esim.

pääoman vaihtoehtoiskustannus). Kahden erillisen panosmuuttujan malli mahdollistaa kiinteän pääomakannan huomioimisen ilman, että siihen kohdistuu tehostamistavoitetta. JHA:n huomioiminen panosmuuttujana parantaa mallin selitysastetta ja siten toimialan tehokkuus on suurempi verrattuna malliin, jossa JHA jätetään huomioimatta.

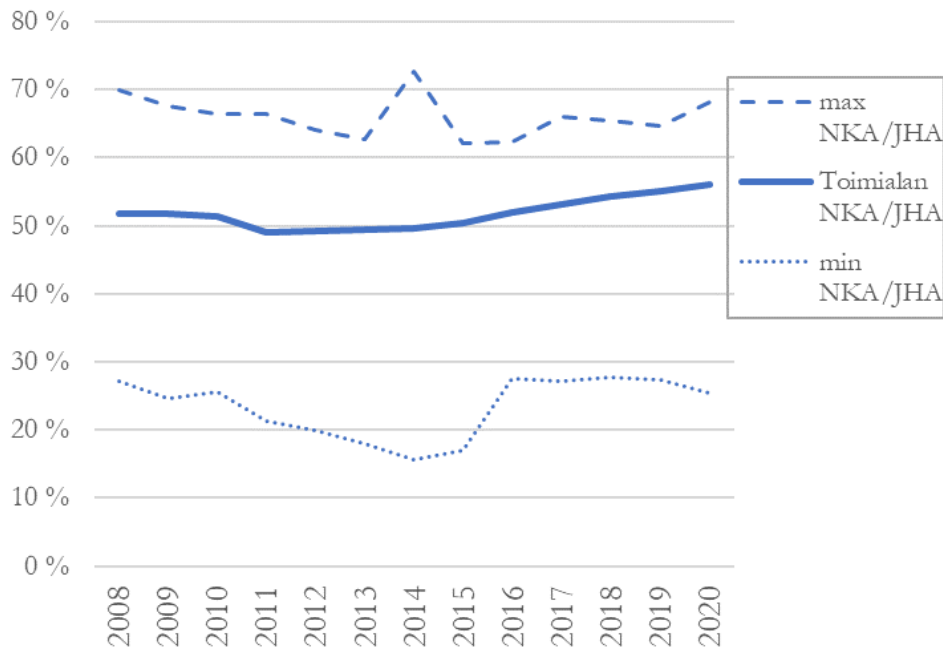
Panosmuuttujien KOPEX ja JHA kehitys koko toimialan tasolla tarkastelujakson aikana esitetään kuviossa 4.2 (indeksi 2008 = 100). Toimialan yhteenlaskettu KOPEX vaihteli voimakkaasti 2010-2016, noihin vuosiin ajoittuvien myrskytuhojen johdosta. Tarkastelujakson viimeisinä vuosina verkkojen säävarmuus on kehittynyt ja vuosivaihtelu on myös vähäisempää. Toimiajan yhteenlaskettu JHA kasvoi varsin tasaisesti vuodesta 2011 lähtien.



Kuvio 4.2: Panosmuuttujien kehitys toimialan tasolla tarkastelujaksolla (indeksi, 2008 = 100).

Nykyisin sovellettujen panosmuuttujien lisäksi tässä selvityksenä lisäksi tarkastellaan mahdollisuutta korvata kiinteätä panosta kuvaava JHA verkon nykykäyttöarvolla (NKA). NKA lasketaan JHA:n pohjalta, huomioiden lisäksi myös kiinteän pääoman laskennalliset tasapoistot. Siten NKA kuvaa paremmin verkon pääomakannan arvoa kyseisenä vuonna.

Kuvio 4.3 havainnollistaa NKA:n ja JHA:n mukaisesti laskettujen pääomakantojen suuruusluokkaa esittämällä niiden suhdeluvun koko toimialan tasolla sekä suhdeluvun yrityskohtaisen vaihteluvälin tarkastelujakson aikana. Koko toimialan tasolla NKA oli noin puolet JHA:sta jakson alussa, mutta kasvoi hieman yli 55 prosentin viimeisinä vuosina. Yhtiöiden välillä on kuitenkin suuria eroja: korkeimmillaan NKA:n ja JHA:n suhdeluku ylitti 70%, alimmillaan suhdeluku jää alle 20%:n. Korkea NKA/JHA suhdeluku on merkki siitä, että verkkoon on investoitu äskettäin joko korvausinvestointien tai verkon laajentumisen myötä. Hyvin alhainen NKA/JHA suhdeluku puolestaan kieli siitä, että verkkoon sitoutunut pääoma lähestyy teknis-taloudellisen käyttöikänsä loppua.



Kuvio 4.3: Verkon nykykäyttöarvon (NKA) ja jälleebankinta-arvon (JHA) suhdeluvun kehitys ja vaihteluväli.

Tässä selvityksessä keskitytään erityisesti tutkimaan mitä vaikutusta JHA:n tai NKA:n käytöllä kiinteä panosta kuvaavana muuttujana on kustannusrintamamallin ennustekyvyn näkökulmasta. Mallin ennustekyvyn lisäksi on myös syytä huomioida pääomakannan laskennan kannustinvaikutukset (vrt. Kuvio 2.1) Valinta JHA:n ja NKA:n väliltä koskee erityisesti korvausinvestointeja, jotka nostavat NKA:a, mutta eivät vaikuta JHA:n tasoon. Siten korvausinvestoinnit eivät vaikuta KOPEX:n vertailutasoon tehostamiskannustimessa, mutta todellisuudessa korvausinvestoinnit voivat ehkäistä vikatilanteita ja siten vähentää operatiivisia kustannuksia, jolloin yhtiön tehokkuusluku voi korvausinvestointien myötä nousta. Toisaalta NKA:n käyttöönotto toisi myös korvausinvestoinnit KOPEX:n vertailutason piiriin, mikä lisäisi verkkoyhtiöiden kannustinta investoida kokonaistaloudellisesti.

4.3 Toivotut tuotokset

Toivottujen tuotosmuuttujien osalta seuraamme EV:n nykyisin soveltamaa käytäntöä, jossa tuotokset y koostuvat kolmesta muuttujasta

y_1 = Siirretty sähköenergia (GWh) jännitetasoittain painotettuna

y_2 = Jakeluverkon kokonaispituus (km)

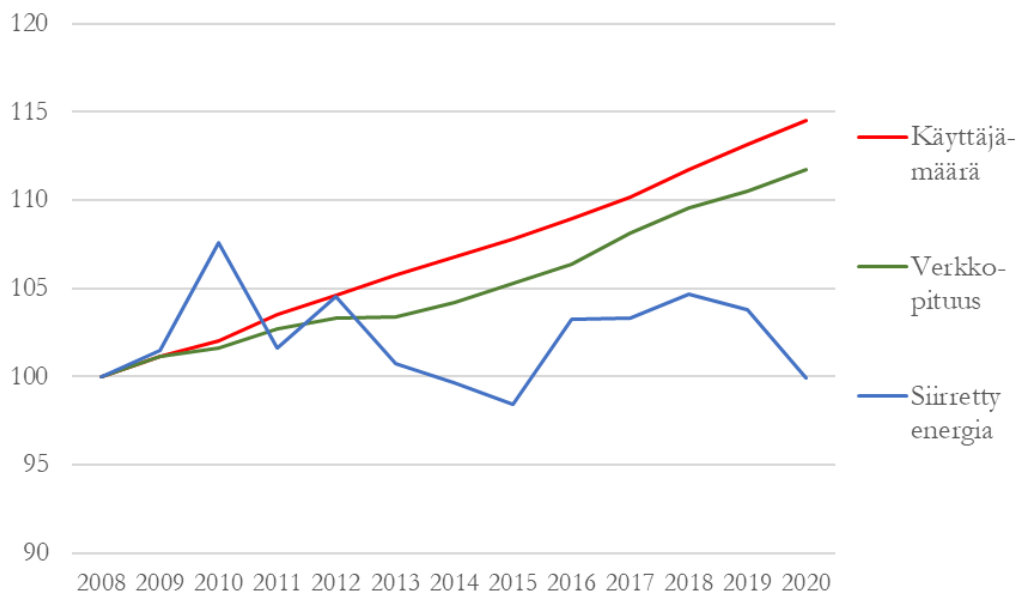
y_3 = Verkkoon liitettyjen käyttäjien määrä (kpl)

Tuotosmuuttuja y_1 kuvaa toteutunutta siirtopalvelua, kun taas tuotosmuuttujat y_2 ja y_3 ovat luonteeltaan kapasiteettia kuvaavia tuotoksia. Tuotosmuuttujan y_1 määrittelyssä sovellamme kulutukseen ja verkkoihin siirretyn sähkön määrää (GWh), joka on painotettu eri jännitetasojen (0,4 kV, 1-70 kV ja 110 kV) osalta käyttäen aiempaan tapaan seuraavia kiinteitä painokertoimia:

Jännitetaso:	0,4 kV	1 – 70 kV	110 kV
Painokerroin:	1	0,44560	0,20696

Painokertoimet on määritetty valtakunnallisten keskimääräisten siirtohintojen perusteella vuosina 2003–2006 (ks. Kuosmanen ym., 2010). Käyttämällä kiinteitä painoja yli koko tarkastelujakson turvataan tuotosmuuttujan y_1 vertailukelpoisuus eri vuosien välillä.

Kuvio 4.4 havainnollistaa tuotosmuuttujien kehitystä tarkastelujakson aikana koko toimialan tasolla (indeksi 2005 = 100). Koska tuotosmuuttujat ovat varsin vakaita, muutosten havainnollistamiseksi kuvion pystyakseli on skaalattu välille [90, 120], jolloin vuosimuutokset tulevat paremmin esiin (huom! kuvioiden 4.1 ja 4.2 erilainen asteikko). Kuvioiden skaalaus on syytä ottaa huomioon varsinkin siirretyn energian vuosimuutoksia tarkasteltaessa: noin 6 pisteen muutos siirretyn energian indeksissä vuodesta 2009 vuoteen 2010 ei ole niin raju muutos, kuin miltä kuvion 4.3 silmämääräisen tarkastelun perusteella saattaa vaikuttaa.



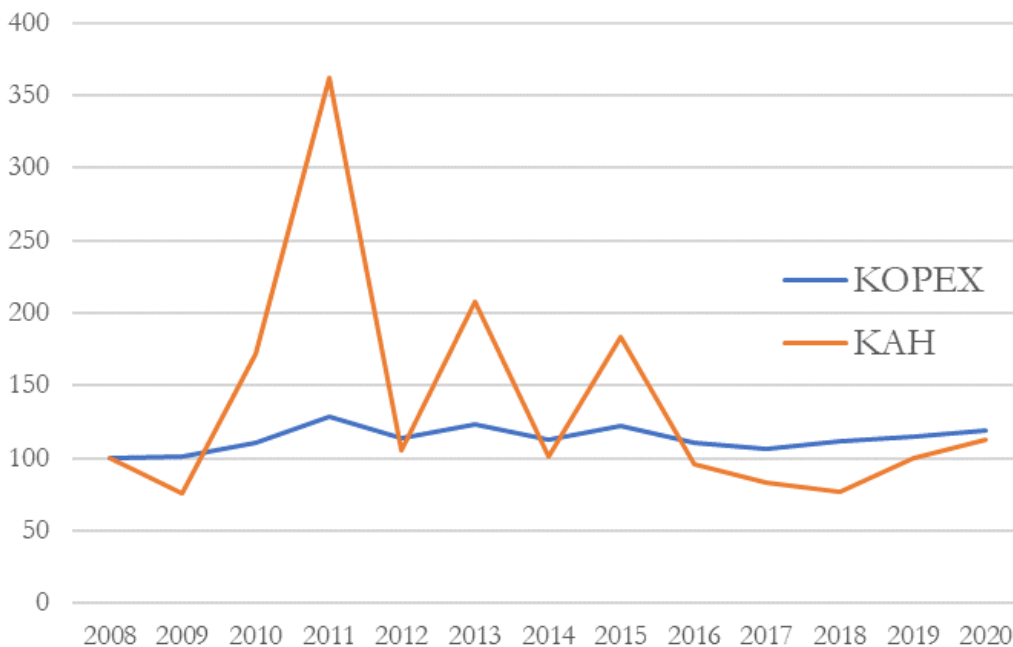
Kuvio 4.4: Tuotosmuuttujien kehitys toimialan tasolla tarkastelujaksolla (indeksi, 2008 = 100).

Tuotosmuuttujana käytetty siirretty sähköenergia (GWh) huomioi hyvin sähköverkon keskimääräisen kuormituksen ja siitä aiheutuvat kustannukset. Sähköverkon suurinta kuormitusta kuvaavaa huipputehoa (engl. *peak load*) tai verkon keskitehon ja huipputehon suhdelukua (engl. *load factor*) on myös joissakin tutkimuksissa käytetty kustannusrintamamallin tuotoksina (ks. esim. Kopsakangas-Savolainen & Svento, 2008). Jakeluverkon kapasiteettia ei käytännössä voida mitoittaa pelkästään keskimääräisen kuormituksen kannalta optimaaliseksi, vaan käytännössä yhtiöiden täytyy huomioida myös verkon huipputeho sähkötoimitusvarmuuden turvaamiseksi. Huipputehon käyttäminen valvontamallin tuotosmuuttujana olisi kuitenkin hyvin ongelmallista mallin kannustinvaikutusten näkökulmasta: huipputehon tuotosmuuttujana sisältävä malli loisi verkkoyhtiöille väärän kannustimen kasvattaa huipputehoa, kun sen sijaan

huipputehon aleneminen on toivottavaa. Huipputehon sijasta jakeluverkon potentiaalista kapasiteettia kuvaavina tuotosmuuttujina käytetään jakeluverkon pituutta ja käyttäjämäärää.

4.4 Ei-toivotut tuotokset

Tarkastelujakson aikana useat verkkoyhtiöt kohtasivat erittäin merkittäviä myrskyjen aiheuttamia tuhoja varsinkin vuosina 2010 ja 2011. Tämä näkyy selvästi kuviossa 4.5, joka havainnollistaa KAH:n kehitystä koko toimialan tasolla tarkastelujakson aikana (indeksi 2005 = 100). Vertailun vuoksi kuvioon on otettu mukaan myös KOPEX. Suurmyrskyt vuonna 2010 ja erityisesti vuonna 2011 nostivat useissa yhtiössä KAH:n moninkertaiseksi aikaisempiin vuosiin verrattuna. Vaikka ilmastonmuutoksen myötä sääolosuhteet vaihtelevat aikaisempaa enemmän, tarkastelujakson loppupuolella KAH-arvot pysyivät maltillisempina, mikä voidaan laskea suurelta osin sähkön toimitusvarmuuteen tehtyjen mittavien investointien ansioksi.



Kuvio 4.5: Keskeytyskustannuksen (KAH) kehitys toimialan tasolla tarkastelujaksolla (indeksi, 2008 = 100).

Kuosmasen ym. (2014) selvityksen pohjalta keskeytyskustannus KAH mallinnetaan nykyisin ei-toivottuna tuotosmuuttujana eli *haitakkeena*. KAH ei ole luonteeltaan tuotantopanos: KAH:a kasvattamalla ei voida saada aikaan yhtään enempää tuotosta, eikä KAH ole toiminnan kannalta välttämätön. KAH on sivutuote, jota kukaan ei toivo, mutta jonka välttämistä aiheutuu kustannuksia. Käytännössä KAH:n mallintaminen haitakkeena tarkoittaa sitä, että KAH:n vaikutus KOPEX:iin voi olla positiivinen tai negatiivinen. Yhtiöt, joiden KAH-arvo on alhainen, voivat käyttää korkeata laatutasoa ja jakeluvarmuutta kilpailutekijänä mittatikkukilpailussa, kun yhtiöiden kustannustehokkuutta verrataan suhteessa muihin yhtiöihin. Näille yhtiöille KAH:n varjohinta on negatiivinen. Toisaalta yhtiöt, joita kohtaa poikkeuksellisen ankara myrsky, voivat KAH:n positiivisen varjohinnan myötä käyttää korkeita KAH-arvoja perusteena korkeammille operatiivisille kustannuksille. Tämä on mielestämme perusteltua, koska

keskeytyksistä asiakkaille maksettavat vakiokorvaukset sisältyvät myös KOPEX:iin. Käytännössä positiivisen KAH-vaikutuksen kynnyсарvo on erittäin korkea, koska KAH-arvojen täytyy olla poikkeuksellisen suuria muihin jakeluverkonhaltijoihin verrattuna, jotta yhtiön toiminta vaikuttaisi kilpailukykyiseltä yhtiöiden välisessä mittatikkukilpailussa. Normaalioloissa KAH:n vaikutus KOPEX:iin on negatiivinen, joten KAH:n mallintaminen ei-toivottuna tuotoksena luo edelleen kannustimen panostaa jakeluverkon kunnossapitoon.

Käsityksemme mukaan KAH:n laskentaperusteita on tarkoitus arvioidaan uudelleen laatukannustinta koskevan selvitystyön yhteydessä. Arviomme mukaan KAH:n laskentaperusteisiin mahdollisesti tehtävillä tarkistuksilla ei lähtökohtaisesti ole kovin suurta merkitystä tehostamiskannustimen kannalta. On kuitenkin tärkeää varmistaa, että KAH:n laskentaperusteet eivät muutu kesken tarkastelujakson; kustannusrintamamallin estimoinnissa tulee käyttää paneeliaineistoa, jossa KAH on laskettu samalla tavalla yli koko havaintojakson.

4.5 Toimintaympäristö ja kontrollimuuttujat

Tuotosmuuttujina mallinnetut verkkopituus ja käyttäjämäärä erottelevat varsin hyvin taajamissa ja haja-asutusalueella toimivat verkkoyhtiöt toisistaan. Neljännellä ja viidennellä valvontajaksolla sovelletussa mallissa huomioitiin varsinaisten panos- ja tuotosmuuttujien lisäksi toimintaympäristöä kuvaavana muuttujana verkkoon liitettyjen liittymien määrää jaettuna verkkoon liitettyjen käyttäjien määrällä (L/K –suhde). Tämä χ -muuttuja ovat suhdelukuja, joka voidaan laskea EV:n keräämien tietojen perusteella ja todentaa kohtuullisen luotettavasti. L/K –suhdeluku ottaa huomioon kuinka suuri osuus käyttäjistä on liitetty verkkoon saman liittymän kautta, esimerkiksi kerrostaloissa. L/K –suhdeluku on rajattu nollian ja ykkösen välille. L/K –suhdeluku on pienin suurimmissa kaupungeissa toimivilla yhtiöillä, kun taas haja-asutusalueella toimivilla verkkoyhtiöillä L/K –suhdeluku on tasan 100% tai hyvin lähellä sitä. Tässä selvityksessä L/K –suhdelukua sovelletaan samalla tavoin kuin nykymallissa.

Uutena asiana tässä selvityksessä tutkitaan mahdollisuutta lieventää endogeenisuusharhaa ottamalla estimointivaiheeseen mukaan myös kontrollimuuttuja (ks. luku 3.3). Tässä selvityksessä kontrollimuuttujana käytetään häviösähköprosenttia, joka lasketaan häviöenergian ja verkkoon vastaanotetun sähköenergian suhdelukuna. Häviösähköprosentin käyttö kontrollimuuttujana perustellaan seuraavasti.

Vaikka sähkön siirrossa ja jakelussa häviää välttämättä aina jonkin verran energiaa, verkkoyhtiöt voivat omalla toiminnallaan ainakin jossakin määrin vaikuttaa häviösähkön määrään. Yhtiöillä on tähän myös taloudellinen kannustin, koska häviösähkö täytyy ostaa markkinahintaan. Teknisessä mielessä häviösähkön osuus verkkoon syötetystä energiasta on verkon suorituskykyä kuvaava mittari, jota käytetään usein myös kansainvälisissä vertailuissa. Suomessa häviösähkön osuus on keskimäärin melko alhainen, vain muutamia prosentteja, mutta valitettavasti joidenkin jakeluverkkoyhtiöiden kohdalla havaitaan jopa 20% ylittäviä häviösähköprosentteja useiden vuosien ajan. Tässä selvityksessä ei pureuduta tarkemmin käytännön keinoihin häviösähkön vähentämiseksi, koska aiheesta on olemassa kattavasti mm. insinööritieteisiin lukeutuvaa kirjallisuutta.

Häviösähköprosentti korreloi positiivisesti nykyisin sovelletun CNLS-mallin regressioresiduaalien kanssa (korrelaatio 0,15), mikä tarkoittaa sitä, että nykymallin mukaan estimoidun tehottomuuden ja häviösähköprosentin välillä on tilastollinen yhteys. Lisäksi havaitaan, että häviösähköprosentti korreloi negatiivisesti pääomamuuttujien NKA/JHA-suhdeluvun kanssa (korrelaatiokerroin -0,28), mikä viittaa siihen, että käyttöiän loppua lähestyvissä verkoissa häviösähkön osuus on keskimäärin suurempi kuin uudemmissa verkoissa. Toisaalta häviösähköprosentti korreloi positiivisesti L/K suhdeluvun kanssa (korrelaatio 0,39), mikä viittaa siihen, että häviötä tapahtuu suhteellisesti enemmän haja-asutusalueella kuin kaupunkiverkoissa. Tämän takia häviösähköprosenttikäyttö kontrollimuuttujana auttaa estimoimaan toimintaympäristön vaikutuksen nykyistä luotettavammin ehkäisemällä häviösähkön vääristävää vaikutusta.

Arviomme mukaan häviösähköprosentin käyttäminen kontrollimuuttujana konveksin regression estimointivaiheessa auttaisi vähentämään endogeenisuusharhaa, mutta sen käyttöä tehostamiskannustimessa toimintaympäristöä kuvaavana ξ -muuttujana ei kuitenkaan voida suositella. Tärkein perustelu liittyy kannustimiin: koska häviösähkön ja KOPEX:n välillä on positiivinen tilastollinen yhteys, joka säilyy positiivisena silloinkin kun kaikki malliin sisältyvät tekijät huomioidaan, häviösähköprosentin sisällyttäminen kannustinmalliin positiivisella etumerkillä varustettuna loisi yhtiöille väärän kannustimen kasvattaa häviösähkön määrää. Tämä ei tietenkään ole toivottavaa, vaan valvontamallin pitäisi mieluummin kannustaa yhtiöitä toimiin häviösähkön vähentämiseksi. Tämä ongelma voidaan poistaa siten, että häviösähköprosentti mallinnetaan estimointivaiheessa kontrollimuuttujana, mutta sen vaikutus palautetaan regressiomallin residuaaleihin ennen tehottomuustermien estimointia. Tällöin häviösähkön indikoima tekninen tehottomuus tulee huomioiduksi kokonaisvirhetermissä, joka koostuu tehottomuustermistä u ja satunnaisvirheestä v .

5. Mallin ennustekyvyn testaaminen

5.1 Varjohinnat ja toimintaympäristön vaikutus nykymallin mukaisesti

Estimoitua rintamaa on mielekkäintä tarkastella panosten ja tuotosten varjohintojen näkökulmasta, koska ne käytännössä määrittelevät muuttuvan kustannuksen KOPEX kohtuullisen tason. Varjohintojen asettaminen perustuu tehokkuusanalyysin logiikkaan (vrt. mittatikkukilpailu): varjohinnat lasketaan siten, että yhtiöiden toiminta näyttääyhtyy mahdollisimman suotuisassa valossa ja koko toimialan tehokkuus maksimoituu. Todellisten markkinoiden puuttuessa rintamamallin varjohinnat voidaan tulkita virtuaalisiksi markkinoiksi, joiden puitteissa yhtiöt kilpailevat kustannustehokkuudessa toisiin verkonhaltijoihin verrattuna. Kullekin yhtiölle valitaan estimoitujen varjohintojen joukosta ne hinnat, joiden perusteella arvioituna yhtiön toiminta näyttääyhtyy kaikkein kilpailukykyisimmässä valossa.

Nykyisin sovellettavan CNLS-mallin mukaisesti estimoidut varjohinnat esitetään taulukossa 5.1 erikseen kahdelle eri ajanjaksolle 2008-2016 sekä 2017-2020. Taloustieteen näkökulmasta tarkasteltuna varjohinnat voidaan tulkita tuotosten rajakustannuksiksi. Esimerkiksi siirretyn energian rajakustannuksen yksikkönä Taulukossa 5.1 on senttiä per kilowattitunti, verkkopituuden euroa per kilometri ja käyttäjämäärän euroa per käyttäjä. Euromääräisen JHA:n mittayksikkö on euroa per tuhat euroa ja KAH:n euroa per euro.

Taulukko 5.1: Panosten ja tuotosten estimoidut varjohinnat (alin desiili 10%, mediaani, ylin desiili 90%)

Vuodet 2008-2016	Energia (s/kWh)	Verkko-pituus (€/km)	Käyttäjämäärä (€/käyttäjä)	JHA (€/€1000)	KAH (€/€)
Alin desiili (10%)	0,007	1	26,66	0,000	-2,607
Mediaani (50%)	0,962	241	42,45	0,313	-0,017
Ylin desiili (90%)	4,619	516	103,02	29,067	0,049
Vuodet 2017-2020					
Alin desiili (10%)	0,006	0	0,44	0,000	-4,903
Mediaani (50%)	1,576	204	46,57	2,512	0,060
Ylin desiili (90%)	4,640	862	103,61	29,549	0,200

Yhtiökohtaiset ja vuosittaiset vaihtelut varjohinnoissa ovat erittäin suuria. Koska varjohintojen jakaumat on hyvin vinot, seuraavissa tarkasteluissa keskitytään vertaamaan varjohintojen mediaaneja sekä alinta (10%) ja ylintä (90%) desiiliä.

Siirretyn energian vaikutus operatiivisiin kustannuksiin on mediaaniyhtiölle lähes euron kilowattitunnilta, mutta suurimmillaan vaikutus on yli 4 euroa kilowattitunnilta. Yhtiö, jonka jännitetasoittain painotettu energian siirto on korkea suhteessa muihin tuotoksiin (esim. kaupunkiyhtiöt), näyttääyhtyy tehokkuusmittauksen kannalta kilpailukykyisimmillään silloin, kun energian varjohinnaksi asetetaan erittäin korkea lukuarvo. Tämä kuitenkin edellyttää, että siirretyn energian ja käyttäjämäärän

varjohinnoiksi asetetaan vastaavasti hyvin alhaiset arvot, jopa nolla.³ On syytä huomata, että yksikään yhtiö ei voi valita kaikille tuotoksille korkeita varjohintoja, vaan korkeamman varjohinnan käyttäminen laskee automaattisesti muiden tuotosten varjohintoja. Näin varjohinnat pyrkivät huomioimaan yhtiöiden ja niiden toimintaympäristöjen heterogeenisuuden: kustannusrintamamallissa yhtiöt kilpailevat operatiivisilla kustannuksilla muita vastaavanlaisen tuotosprofiilin ja pääomakannan omaavia yhtiöitä vastaan.

Taulukossa 5.1 esitetyt varjohintojen mediaanit ovat tasoltaan samaa suuruusluokkaa kuin aikaisemmassa raportissa Kuosmanen ym. (2014) esitetyt, jossa tarkastelujaksona oli vuodet 2005-2012. Jakaumien alimman ja ylimmän desiilin vertailu kuitenkin havainnollistaa, että vaihtelu eri yhtiöiden ja vuosien välillä on hyvin suuri. Taulukosta havaitaan myös, että estimoitujen varjohintojen jakaumat muuttuvat huomattavasti siirryttäessä aiemmalta jaksolta 2008-2016 tarkastelujakson viimeisiin vuosiin 2017-2020. Tämä johtuu tuotosmuuttujissa tapahtuneesta rakenteellisesta muutoksesta, jossa verkkopituus ja käyttäjämäärä ovat jatkaneet varsin tasaista kasvua, kun taas energian siirrossa kasvu näyttää pysähtyneen. Tämä muuttaa verkkoyhtiöiden tuotosprofiilia ja vaikuttaa luonnollisesti myös varjohintoihin.

Panos- ja tuotosmuuttujien lisäksi toimintaympäristöä kuvaavana muuttujana käytettiin suhdelukua L/K (= verkkoon liitettyjen liittymien määrä jaettuna verkkoon liitettyjen käyttäjien määrällä). Kuosmanen ym. (2014) laatimassa raportissa L/K –suhdeluvun estimoitu kerroin vuosina 2005-2012 oli 0,588. Tässä selvityksessä L/K –suhdeluvun estimoitu kerroin kasvoi lukuarvoon 0,777 jaksolla 2008-2016 sekä edelleen lukuarvoon 1,111 viimeisellä jaksolla 2017-2020. L/K –suhdeluvun positiivinen kerroin tarkoittaa sitä, että mitä useampi käyttäjä on liittynyt verkkoon saman liittymäpisteen kautta, sitä alhaisemmat ovat operatiiviset kustannukset. Kertoimen kasvu yli ajan viittaa siihen, että keskimääräinen kustannusero maaseutuyhtiöiden ja kaupunkiyhtiöiden välillä näyttäisi kasvaneen ajan myötä. Tämä perusteella emme kuitenkaan tiedä, onko kasvava kustannusero kasvu maaseutu- ja kaupunkiyhtiöiden välillä perusteltu, vai onko taustalla mahdollisesti kasvaneet tehokkuuserot yhtiöiden välillä. Palaamme tähän kysymykseen hieman tarkemmin luvussa 7.

5.2 Mallin ennustekyvyn kehittäminen

Luvussa 3.2 tarkasteltiin vaihtoehtoisia tapoja parantaa mallin ennustekykyä varjohintoja rajoittamalla. Seuraavassa testataan mikä mallinnusvaihtoehto tuottaisi parhaan ennustetarkkuuden. Tätä varten tarkastelujakso jaetaan seuraavassa kahteen osaan:⁴

Harjoitusjakso (*training set*): vuodet 2008-2016

Testijakso (*test set, validation set*): vuodet 2017-2020

Vertailussa huomioitujen kustannusrintamamallien parametrit estimoidaan ensin harjoittelujaksolla vuosien 2008-2016 aineiston perusteella. Tämän jälkeen harjoitusjaksolla estimoituja parametreja

³ Nollan suuruinen varjohinta tarkoittaa käytännössä sitä, että tuotoksen rajakustannus on olematon. Rajakustannuksella tarkoitetaan äärimmäisen pienen tuotoksen lisäyksen kustannusvaikutusta. Tuotoksen kasvaessa rajatuotos alkaa jossakin vaiheessa väistämättä kasvaa, ts. tuotosta ei voi loputtomasti kasvattaa ilmaiseksi.

⁴ Termit harjoitusjakso ja testijakso on poimittu koneoppimisen kirjallisuudesta, jossa algoritmi koulutetaan harjoitusjaksolla aikana, jonka jälkeen sen toimivuus testataan testijaksolla aikana.

sovelletaan vuosien 2017-2020 testijaksoon, jolloin voidaan tutkia kuinka hyvin eri mallispesifikaatiot kykenevät ennustamaan KOPEX:n kehitystä seuraavien neljän vuoden ajanjaksolla. Käytännössä nykyinen valvontamalli perustuu hyvin vastaavalla tavoin edellisten valvontajaksojen aineistosta estimoituihin varjohintoihin, joita sovelletaan seuraavalla nelivuotisella valvontajaksoilla. Siten tässä tarkastelussa ennustekykä testataan tarkastelujakson viimeisten neljän vuoden ajalta, vaikka jakso ei käykään täysin yhteen valvontamallin valvontajaksojen kanssa.

Mallin ennustekyvyn mittarina käytetään hyvin yleisesti keskimääräisen neliövirheen neliöjuurta (*root mean squared error*, RMSE), joka voidaan määrittellä seuraavasti

$$RMSE_h = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (x_{i,t} - \hat{x}_{h,i,t})^2}{nT}}$$

missä $\hat{x}_{h,i,t}$ on mallispesifikaation h tuottama ennuste yhtiölle i vuonna t . RMSE voidaan laskea sekä mallin sovittamiseen käytetylle harjoittelujaksolle (*in-sample fit*) että mallin ennustekyvyn mittaamisessa käytetylle testijaksolle (*out-of-sample fit*). Mitä pienempi RMSE, sitä tarkempi ennuste.

Lähtökohtana vertailussa on muuttujien osalta nykyisin sovellettu mallispesifikaatio. Vertailtujen mallien ennustetarkkuudet RMSE mittarilla esitetään taulukossa 5.2. Nykyisin sovellettu CNLS malli tuottaa teorian mukaisesti parhaan mahdollisen ennustetarkkuuden (alhaisin RMSE) harjoittelujaksolla 2008-2016. Valitettavasti mallin ennustekyky heikkenee huomattavasti kun mallin avulla yritetään ennustaa tulevien vuosien kehitystä testijaksolla 2017-2020. Ennustetarkkuuden heikkeneminen harjoittelujaksolta testijaksolle siirryttäessä on selvä merkki ylisovittamisena tunnetun ilmiön vaikutuksesta.

Taulukko 5.2: *Vaihtoehtoisten mallien ennustetarkkuus RMSE*

Malli	Harjoittelujakso 2008-2016	Testijakso 2017-2020
Nykymalli (perus CNLS)	2220	71909666
L2-normi CNLS	5398	5629
Lipschitz-normi CNLS (0)	2304	3195
Lipschitz-normi CNLS (mediaani)	2249	2827
WR CNLS (10%, 90%)	2223	2710
WR CNLS (25%, 75%)	2270	2785

Kaikki vertailussa tarkastellut keinot varjohintojen rajaamiseksi mielekkäämmän vaihteluvälin puitteisiin istuvat hieman huonommin harjoittelujakson aineistoon vuosilta 2008-2016, mutta vastaavasti niiden ennustekyky vuosien 2017-2020 testijaksolla on huomattavasti parempi kuin perus-CNLS -mallin. Ylisovittamisen ehkäiseminen varjohintojen vaihteluväliä rajoittamalla on selvästi suositeltava kehittämissuositus.

Kaikkein parhaan ennustekyvyn tässä vertailussa tuottaa ns. painorajoitettu WR CNLS -malli, jossa alkuperäisen CNLS-mallin varjohintojen jakaumasta leikataan pois alin ja ylin desiili (ts. pienimmät 10%

varjohinnoista ja suurimmat 10% varjohinnoista). Muihin vaihtoehtoihin verrattuna WR CNLS -mallin etuna on se, että kunkin panos- ja tuotosmuuttujan varjohintoja rajoitetaan erikseen, huomioiden kunkin muuttujan mittakaava ja vaihteluväli. WR CNLS -malli sallii edelleenkin yhtiökohtaiset varjohinnat, jolloin sen selitysaste harjoitusjaksolla ei juurikaan heikkene verrattuna perus-CNLS -malliin. Painorajoitteiden ansiosta WR CNLS -mallin ennustekyky säilyy lähes yhtä hyvän myös testijaksolla vuosina 2017-2020. Tämän vertailun perusteella suosittelemme varjohintojen rajoittamista WR CNLS -mallin avulla. Painorajoite voidaan helposti lisätä mallin estimointivaiheessa, eikä se vaadi muutoksia nykyiseen tehostamiskannustimeen.

Painorajoitusten havainnollistamiseksi Taulukossa 5.3 esitetään edellisessä vertailussa parhaan ennustetarkkuuden testijaksolla saavuttaneessa WR CNLS (10%, 90%) -mallissa sovelletut varjohintojen vaihteluvälit tuotos- ja panosmuuttujille. Nykyisin sovelletun CNLS-mallin tavoin WR CNLS -malli hakee kullekin havainnolle optimaaliset varjohinnat, kuitenkin niin, että pysytään Taulukossa 5.3 esitettyjen alaja ylärajojen puitteissa. Rajaamalla epärealistisen korkeat ja toisaalta nollan suuruiset rajakustannukset tarkastelun ulkopuolelle mallin ennustetarkkuus havaintoaineiston ulkopuolella paranee huomattavasti.

Taulukko 5.3: Painorajoitetussa WR CNLS (10%, 90%) -mallissa sovelletut varjohintojen vaihteluvälit

	Energia (s/kWh)	Verkko-pituus (€/km)	Käyttäjämäärä (€/käyttäjä)	JHA (€/€1000)	KAH (€/€)
Alaraja	0,019	1,40	22,48	0,001	-2,119
Yläraja	4,251	375,72	85,28	15,536	0,049

Luvun lopuksi on paikallaan muistuttaa, miksi mallin ennustekykyä on tarpeellista kehittää. Verkkoyhtiöiden tuotosprofiili on muuttunut viime vuosina sähkön kulutuksessa tapahtuneen vaihtelun myötä. Erilaisten shokkien ja kriisien myötä tulevilla valvontajaksolla sähkön kulutuksessa voi tapahtua suuria, äkillisiäkin muutoksia. Siten kustannusrintamamallin tulisi kyetä ennustamaan nykyistä paremmin kohtuullista muuttuvien kustannusten tasoa myös tilastoaineistossa havaitun vaihteluvälän ulkopuolella. Varjohintojen rajaaminen realistisempaan vaihteluväliin tukisi parhaiten tätä tavoitetta.

6. Vaihtoehtoiset muuttujaspesifikaatiot

6.1 Kiinteä panos: JHA vai NKA?

Seuraavassa tarkastellaan kuinka pääomakantaa kuvaavana muuttujana käytetyn JHA:n korvaaminen NKA:lla vaikuttaisi kustannusrintamamallin ennustetarkkuuteen. Tarkastelussa keskitytään nykyisin käytössä olevaan CNLS-malliin sekä sen painorajoitettuun WR CNLS (10%, 90%) laajennukseen, joka edellisessä luvussa esitetystä vertailusta tuotti kaikkein tarkimmat ennusteet havaintojaksoa seuranneiden neljän vuoden jaksolla. Edellisen luvun tavoin vertailemme ennustetarkkuutta jakamalla havaintojakson kahteen osaan (harjoitusjakso 2008-2016 ja testijakso 2017-2020) ja mittaamalla ennustetarkkuutta keskineliöpoikkeaman (RMSD) avulla. Vertailun tulokset esitetään taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1: Pääomamuuttujien JHA ja NKA vaikutus ennustetarkkuuteen RMSE

Malli	Harjoitusjakso 2008-2016	Testijakso 2017-2020
CNLS-malli		
Kiinteä panos JHA	2220	71909666
Kiinteä panos NKA	2187	67171117
WR CNLS (10%, 90%) -malli		
Kiinteä panos JHA	2223	2710
Kiinteä panos NKA	2204	2677

Tulosten perusteella voidaan todeta, että NKA:n käyttö kiinteänä panosmuuttujana parantaisi mallin ennustetarkkuutta paitsi harjoitusjaksolla, erityisesti myös testijaksolla. Ennustetarkkuuden paraneminen alhaisemman keskineliöpoikkeaman muodossa havaitaan sekä nykyisin sovelletussa CNLS-mallissa että sen painorajoitettussa WR CNLS laajennuksessa. Paras ennustetarkkuus saadaan kun käytetään WR CNLS -mallia, jossa kiinteänä panoksena NKA. Taulukon 6.1 vertailu havainnollistaa, että ennustetarkkuuden kannalta varjohintojen rajoittamisella on huomattavasti suurempi merkitys kuin JHA:n korvaamisella NKA:lla.

Ennustetarkkuuden lisäksi on syytä tarkastella kiinteän panosmuuttujan vaikutusta estimoituihin varjohintoihin, jotka käytännössä määrittelevät KOPEX:n kohtuulliseksi katsotun vertailutason. Estimoitujen varjohintajakauman mediaanit sekä ala- ja ylädesiilit raportoidaan vertailuille mallispesifikaatioille taulukossa 6.2.

Koska NKA on väistämättä pienempi kuin JHA, on kiinteän panosmuuttujan varjohinta vastaavasti suurempi mallispesifikaatioissa, joissa kiinteänä panoksena on NKA.⁵ Kiinteällä panosmuuttujalla on kuitenkin myös jonkin verran vaikutusta tuotosmuuttujien varjohintojen jakaumiin. Taulukosta 6.2 havaitaan, että erityisesti siirretyn energian mediaanivarjohinta kasvaa sekä CNLS että WR CNLS malleissa kun JHA korvataan NKA:lla. Jakauman alimmassa ja ylimmässä desiilissä vaikutus on pienempi.

⁵ Kuviossa 4.3 havaittiin, että NKA on keskimäärin hieman yli puolet JHA:sta. Kun JHA korvataan NKA:lla yhtälössä (4), täytyy pääomamuuttujan varjohintojen vastaavasti kasvaa, jotta kokonaisvirhetermin ε varianssi saadaan minimoitua.

Myös KAH-muuttujan osalta mediaanivarjohinta pienenee jonkin verran. Verkkopituuden ja käyttäjämäärän varjohinnoissa kiinteän panosmuuttujan vaikutus on varsin vähäinen.

Taulukko 6.2: Pääomamuuttujien JHA ja NKA vaikutus varjohintojen jakaumiin

	Energia	Verkko- pituus	Käyttäjä- määrä	JHA, NKA	KAH
CNLS, JHA					
Alin desiili (10%)	0,007	0,001	26,662	0,000	-2,607
Mediaani (50%)	0,962	0,241	42,449	0,313	-0,017
Ylin desiili (90%)	4,619	0,516	103,015	29,067	0,049
CNLS, NKA					
Alin desiili (10%)	0,008	0,001	15,301	0,001	-2,683
Mediaani (50%)	1,252	0,267	42,756	1,809	-0,052
Ylin desiili (90%)	5,101	0,446	86,932	21,054	0,055
WR CNLS, JHA					
Alin desiili (10%)	0,017	0,002	27,407	0,000	-1,997
Mediaani (50%)	0,969	0,215	41,451	0,268	-0,013
Ylin desiili (90%)	4,168	0,308	89,369	9,911	0,045
WR CNLS, NKA					
Alin desiili (10%)	0,018	0,001	21,147	0,002	-2,148
Mediaani (50%)	1,134	0,235	42,207	1,501	-0,102
Ylin desiili (90%)	4,299	0,381	85,957	16,026	0,049

6.2 Häviösähkö kontrollimuuttujana

Toinen muuttujia koskeva kehittämisidea koskee häviösähköprosentin käyttöä estimointivaiheessa kontrollimuuttujana, jonka avulla voidaan ehkäistä mahdollista endogeenisuusharhaa. Empiirinen tarkastelu osoittaa, että häviösähköprosentin sisällyttäminen malliin kontrollimuuttujana parantaa hieman ennustetarkkuutta sekä havaintoaineistossa että tulevana vuosina. Kontrollimuuttujan lisääminen WR CNLS (10%, 90%) malliin laskee ennustevirhettä RMSE vuosien 2008-2016 harjoitusjaksolla lukuarvoon 2218, kun vastaava luku ilman kontrollimuuttujaa on 2223. Mikä tärkeintä, vuosien 2017-2020 testijaksolla ennustevirhe laskee arvoon 2696, kun ilman kontrollimuuttujaa ennustevirhe on 2710.

Vaikka kontrollimuuttujan vaikutus ennustetarkkuuteen jää varsin pieneksi, sen huomioiminen mallissa voi kuitenkin vaikuttaa tuotos- ja panosmuuttujien varjohintoihin ja siten KOPEX:n vertailutasoon. Taulukossa 6.3 esitetään vertailun vuoksi varjohintojen jakauman tunnusluvut CNLS- ja WR CNLS -malleissa kun kontrollimuuttuja huomioidaan tai jätetään huomioimatta (tässä kiinteänä panoksena NKA harjoitusjaksolla 2008-2016). Käytännössä kontrollimuuttujan vaikutus tuotosmuuttujiin jää melko marginaaliseksi, mikä viittaa siihen, että myös nykyisin sovellettu malli on varsin robusti endogeenisharhan suhteen.

Taulukko 6.3: Kontrollimuuttujana käytetyn häviösähköprosentin vaikutus varjohintojen jakaumiin

	Energia	Verkko- pituus	Käyttäjä- määrä	NKA	KAH
CNLS, ilman kontrollimuuttujaa					
Alin desiili (10%)	0,008	0,001	15,301	0,001	-2,683
Mediaani (50%)	1,252	0,267	42,756	1,809	-0,052
Ylin desiili (90%)	5,101	0,446	86,932	21,054	0,055
CNLS, kontrollimuuttuja mukana					
Alin desiili (10%)	0,009	0,001	18,201	0,000	-2,589
Mediaani (50%)	1,237	0,261	41,045	1,355	-0,047
Ylin desiili (90%)	5,047	0,432	86,118	20,506	0,054
WR CNLS, ilman kontrollimuuttujaa					
Alin desiili (10%)	0,018	0,001	21,147	0,002	-2,148
Mediaani (50%)	1,134	0,235	42,207	1,501	-0,102
Ylin desiili (90%)	4,299	0,381	85,957	16,026	0,049
WR CNLS, kontrollimuuttuja mukana					
Alin desiili (10%)	0,019	0,001	22,481	0,001	-2,119
Mediaani (50%)	1,162	0,232	41,835	1,479	-0,101
Ylin desiili (90%)	4,251	0,376	85,278	15,536	0,049

Kaikkein huomattavin vaikutus Taulukossa 6.3 havaitaan kiinteänä panoksena käytetyn NKA:n varjohinnoissa; mediaani laskee selvästi kun kontrollimuuttuja otetaan mukaan malliin, erityisesti perus-CNLS mallissa. Tämä ei sinänsä ole yllättävää, koska jo edellä totesimme, että häviösähköprosentin ja NKA/JHA suhdeluvun välillä on tilastollinen yhteys.

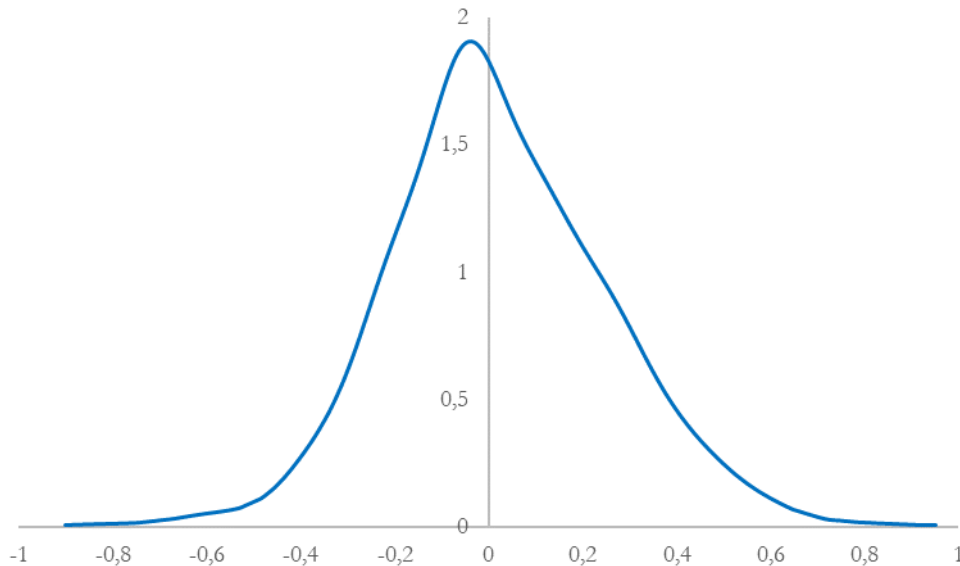
Kontrollimuuttujan käyttö samoin kuin muutkin esitetyt kehittämissuhteet vaikuttavat myös toimintaympäristöä kuvaavan L/K -suhdeluvun kertoimeen. WR CNLS-mallissa, jossa kontrollimuuttuja on huomioitu, L/K-suhdeluvun kerroin saa arvon 0,872, mikä on hieman korkeampi kuin nykyisen CNLS-mallin tuottama lukuarvoon 0,777 jaksolla 2008-2016, mutta toisaalta alhaisempi kuin jaksolla 2017-2020 saatu lukuarvo 1,111. Koska häviösähköprosentin osuus on keskimäärin suurempi haja-asutusalueella kuin tiheimmin asutuissa kaupungeissa, mahdollisten tehokkuuserojen väärinvaikutus saadaan kontrollimuuttujan avulla puhdistettua L/K -suhdeluvun kertoimesta. Koska L/K -suhdeluku saa aikaisempaa korkeamman lukuarvon kontrollimuuttujasta huolimatta, tämä viittaa siihen, että maaseutuyhtiöiden ja kaupunkiyhtiöiden välisten kustannuserojen kasvua voidaan pitää perusteltuna.

Kontrollimuuttujan lisääminen estimointivaiheessa on arviomme mukaan tehokas keino ehkäistä mahdollista endogeenisuusharhaa. Nykymalliin verrattuna kontrollimuuttujan vaikutus jää tällä ajanjaksolla kuitenkin lopulta varsin vähäiseksi.

7. Tehokkuusanalyysi

Olemme edellä korostaneet varjohintojen merkitystä KOPEX:n kohtuullisen tason määrittelyssä. Siirtymäajan päätyttyä neljännellä valvontajaksolla yhtiökohtaisilla tehokkuusluvuilla ei enää tulevilla valvontajaksoilla ole niin suurta merkitystä kuin aikaisemmin. Silti tehokkuusluvut herättävät mielenkiintoa, joten tässä luvussa tarkastellaan tehokkuuslukuja, jotka saadaan soveltamalla painorajoitettua WR CNLS-menetelmää ehdotettuun mallispesifikaatioon, jossa verkon JHA on korvattu NKA:lla ja häviösähköprosentti on mukana kontrollimuuttujana. Ajanjaksona käytetään koko havaintojaksoa 2008-2020.

Koska häviösähköprosentti huomioidaan mallissa mukana kontrollimuuttujana, mutta sitä ei lueta mukaan toimintaympäristöä kuvaavaksi z-muuttujaksi, tulee häviösähköprosentin estimoitu vaikutus lisätä WR CNLS -mallin residuaaleihin ennen tehottomuustermien estimointia. Tällöin häviösähkö tulee luetuksi kokonaisvirhetermiin, joka koostuu tehottomuustermistä u sekä satunnaisvirheestä v . Häviösähköprosentilla korjattujen residuaalien jakaumaa havainnollistetaan kuviossa 7.1, joka esittää korjattujen residuaalien jakauman kernel-menetelmällä estimoidun tiheysfunktion. Tiheysfunktio kuvaa satunnaisuuttujan $u + v - E(u)$ jakaumaa. Kuvioista havaitaan, että jakauma on hieman oikealle vino, mikä johtuu epäsymmetrisestä tehottomuustermistä u , joka on kustannusrintamamallin mukaisesti oikealle vino ja positiivinen (vrt. Kuosmanen ym., 2014, Kuvio 5.1).



Kuvio 7.1: Kernel-menetelmällä estimoidut residuaalien jakaumien tiheysfunktiot

Tehottomuustermien odotusarvo ($E(u_i)$) estimoidaan aiemman Kuosmanen ym. (2014) laatiman selvityksen tavoin soveltaen Hallin & Simarin (2002) esittämällä kernel dekonvoluutioon perustuvaa menetelmää, joka ei vaadi rajoittavia jakaumaoletuksia. Ehdotetussa WR CNLS mallissa keskimääräiseksi tehokkuudeksi saadaan 89%, mikä on yhden prosenttiyksikön korkeampi kuin Kuosmanen ym. (2014) selvityksessä saatu lukuarvo 88%.

Ehdotetun mallin tuottamien tulosten havainnollistamiseksi verkkoyhtiöiden keskimääräiset tehokkuusestimaatit valvontajaksolla 2, 3 ja 4 sekä tehokkuusluku 5. valvontajakson ensimmäisenä vuonna 2020 esitetään taulukossa 7.1. Taulukosta on jätetty pois tarkastelujakson aikana fuusioituneet yhtiöt.

Taulukko 7.1: Verkkoyhtiökohtaiset tehokkuuslukujen keskiarvot valvontajaksolla 2 (2008-2011), 3 (2012-2015), 4 (2016-2019) sekä tehokkuusluku 5. valvontajakson ensimmäisenä vuonna 2020

Verkkoyhtiö	valvontajakso			vuosi
	2	3	4	2020
Alajärven Sähkö Oy	93%	88%	79%	77%
Alva Sähköverkko Oy	94%	98%	102%	107%
Caruna Espoo Oy	86%	74%	81%	80%
Caruna Oy	93%	79%	113%	100%
Elenia Verkko Oyj	103%	99%	101%	108%
Enontekiön Sähkö Oy	87%	97%	87%	71%
ESE-Verkko Oy	98%	95%	94%	81%
Esse Elektro-Kraft Ab	77%	69%	50%	49%
Forssan Verkkopalvelut Oy	88%	84%	91%	89%
Haminan Energia Oy	66%	66%	43%	36%
Haukiputaan Sähköosuuskunta	64%	74%	78%	73%
Helen Sähköverkko Oy	81%	89%	101%	108%
Herrfors Nät-Verkko Oy Ab	132%	107%	105%	80%
Iin Energia Oy	81%	74%	63%	53%
Imatran Seudun Sähkönsiirto Oy	88%	89%	80%	50%
Jeppo Kraft Andelslag	123%	93%	73%	97%
Jylhän Sähköosuuskunta	78%	66%	84%	73%
Järvi-Suomen Energia Oy	118%	99%	105%	95%
Kajave Oy	74%	67%	62%	73%
Kemin Energia ja Vesi Oy	74%	67%	77%	81%
Keminmaan Energia ja Vesi Oy	100%	95%	90%	99%
Keravan Energia Oy	62%	74%	76%	70%
Keuruun Sähkö Oy	84%	63%	60%	66%
Koillis-Lapin Sähkö Oy	87%	71%	75%	84%
Koillis-Satakunnan Sähkö Oy	110%	93%	104%	99%
Kokemäen Sähkö Oy	117%	89%	88%	85%
Kokkolan Energiaverkot Oy	117%	110%	118%	90%
Kronoby Elverk Ab	109%	87%	83%	88%
KSS Verkko Oy	91%	91%	98%	103%
Kuopion Sähköverkko Oy	88%	90%	91%	87%
Kuoreveden Sähkö Oy	96%	83%	84%	92%
Kymenlaakson Sähköverkko Oy	89%	92%	97%	93%
Köyliön-Säkylän Sähkö Oy	112%	91%	101%	97%
Lahti Energia Sähköverkko Oy	100%	106%	113%	108%
Lammaisten Energia Oy	77%	83%	105%	93%
Lankosken Sähkö Oy	129%	99%	114%	106%

ECKTA OY

Lappeenrannan Energiaverkot Oy	86%	78%	101%	93%
Lehtimäen Sähkö Oy	97%	90%	85%	79%
Leppäkosken Sähkö Oy	80%	86%	90%	81%
Muonion Sähköosuuskunta	91%	81%	74%	58%
Naantalin Energia Oy	68%	68%	77%	75%
Nivos Verkot Oy	70%	56%	62%	83%
Nurmijärven Sähköverkko Oy	85%	79%	78%	74%
Nykarleby Kraftverk Ab	75%	65%	65%	69%
Okun Energia Oy	75%	63%	68%	55%
Oulun Energia Sähköverkko Oy	116%	130%	132%	120%
Oulun Seudun Sähkö Verkkopalvelut Oy	172%	120%	121%	119%
Paneliankosken Voima Oy	120%	103%	114%	96%
Parikkalan Valo Oy	71%	77%	82%	95%
PKS Sähkönsiirto Oy	91%	90%	76%	67%
Pori Energia Sähköverkot Oy	103%	105%	114%	97%
Porvoon Sähköverkko Oy	108%	92%	99%	102%
Raahen Energia Oy	62%	61%	56%	56%
Rantakairan Sähkö Oy	124%	105%	90%	83%
Raseborgs Energi Ab	57%	55%	72%	89%
Rauman Energia Sähköverkko Oy	89%	97%	100%	85%
Rovakaira Oy	91%	87%	97%	92%
Rovaniemen Verkko Oy	68%	71%	88%	89%
Sallila Sähkönsiirto Oy	101%	98%	109%	101%
Savon Voima Verkko Oy	104%	99%	99%	78%
Seiverkot Oy	61%	78%	158%	209%
Sipoon Energia Oy	106%	92%	91%	85%
Tampereen Sähköverkko Oy	97%	106%	116%	107%
Tervolan Energia ja Vesi Oy	103%	95%	83%	59%
Tornion Energia Oy	92%	85%	106%	106%
Tornionlaakson Sähkö Oy	129%	102%	92%	86%
Tunturiverkko Oy	101%	97%	80%	72%
Turku Energia Sähköverkot Oy	77%	77%	91%	95%
Vaasan Sähköverkko Oy	100%	101%	95%	64%
Vakka-Suomen Voima Oy	84%	85%	84%	70%
Valkeakosken Energia Oy	82%	86%	69%	62%
Vantaan Energia Sähköverkot Oy	93%	82%	102%	112%
Vatajankosken Sähkö Oy	80%	76%	71%	67%
Verkko Korpela Oy	127%	108%	101%	99%
Vetelin Energia Oy	88%	68%	55%	64%
Vimpelin Voima Oy	82%	76%	71%	66%
Äänekosken Energia Oy	84%	73%	64%	68%

Vaikka mallin muuttuihin ja estimointimenetelmään on tässä tehty muutoksia verrattuna aikaisempaan Kuosmasen ym. (2014) selvitykseen, tehokkuuslukujen osalta tulokset ovat varsin hyvin linjassa aikaisemmassa selvityksessä saatujen tulosten kanssa. Aikaisemmassa selvityksessä mainitut Oulun

Seudun Sähkö Verkkopalvelut Oy ja Oulun Energia Sähköverkko Oy ovat kyenneet toimimaan edelleen selvästi estimoitua kustannusrintamaa tehokkaammin. Myös kolme suurinta verkkoyhtiötä, Caruna Oy, Elenia Verkko Oyj ja Helen Sähköverkko Oy, ovat saavuttaneet tarkastelujakson viimeisinä vuosina tehokkaan toiminnan mukaisen KOPEX:n tason tai jopa alittaneet sen. Valitettavasti monilla pienemmillä yhtiöillä tehokkuusluvut ovat laskeneet selvästi tarkastelujakson aikana. Korkea tehokkuus on aineiston perusteella positiivisesti yhteydessä investointien kanssa: yhtiökohtaisten tehokkuuslukujen ja verkon suhteellista ikää kuvaava NKA/JHA suhdeluvun välinen korrelaatio on positiivinen 0,12.

Tehokkuuslukujen huomattavimmasta tulosparannuksesta vastasi Seiverkot Oy, jonka kaikki tuotosmuuttujat kasvoivat selvästi tarkastelujakson aikana, mutta tästä huolimatta KOPEX vuonna 2020 jäi alle puoleen vuoden 2008 tasosta. Tehokkuusluvun erittäin korkea lukuarvo 209% viittaa siihen, että kyseinen yhtiö on käyttänyt alle puolet kustannusrintamamallin perusteella tehokkaaksi KOPEX:n tasoksi arvioidusta kustannuksesta. Estimoitu kustannusrintama ei ole ehdoton minimitaso, jota alhaisempi KOPEX olisi mahdotonta saavuttaa, kuten Seiverkot Oy:n esimerkki osoittaa. Mikäli KOPEX:n vertailutaso asetettaisiin kaikkein tehokkaimpien havaintojen perusteella siten, että 100%:n tasoa ei voida ylittää, kaikki Taulukossa 7.1 esitetyt tehokkuusluvut täytyisi käytännössä puolittaa. Valitettavasti tehokkuuslukujen hajonta yhtiöiden välillä kasvoi tasaisesti neljännen valvontajakson aikana.

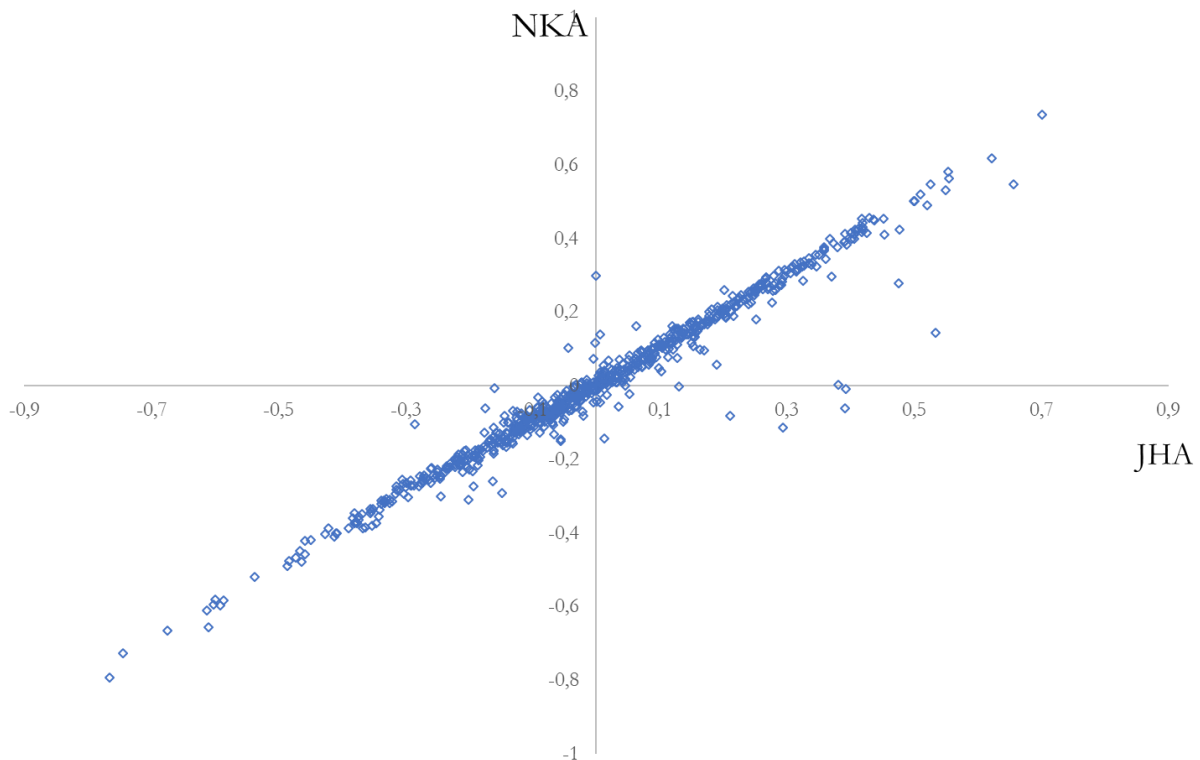
Lopuksi on syytä korostaa, että taulukossa esitetyt tehokkuusluvut ovat suuntaa antavia, eikä niitä sovelleta sellaisenaan valvontamallissa, vaan tulevilla valvontajaksoilla sovellettava malli suositellaan estimoitavaksi uudestaan ottaen huomioon mm. vuosien 2021-2022 tilastoaineisto, joka ei vielä tämän selvityksen puitteissa ollut käytettävissä. Myös mallin rakenteeseen, muuttujiin ja myös yksittäisten yhtiöiden lukuarvoihin voi tulla muutoksia ja korjauksia, jotka saattavat vaikuttaa yhtiökohtaisiin tehokkuusestimaatteihin. Tämä selvitys on laadittu Energiavirastolta saadun tilastoaineiston pohjalta, eikä selvityksen laatijat vastaa aineistossa mahdollisesti piilevistä virheistä.

8. Vertailulaskelmat ja vaikutusten arviointi

8.1 Jälleenbankinta-arvon korvaaminen nykykäyttöarvolla tehokkuuslukujen valossa

Keskeisin mallin muuttujia koskeva kehittämissuosituksemme koskee pääomakantaa kuvaavan verkon JHA:n korvaamista NKA:lla. Tarkastelemme seuraavaksi tämän muutoksen vaikutusta regressiomallin residuaaleihin ja siten tehokkuuslukuihin sekä nykyisin sovellettavan CNLS-mallin että ehdotetun WR CNLS -mallin perusteella.

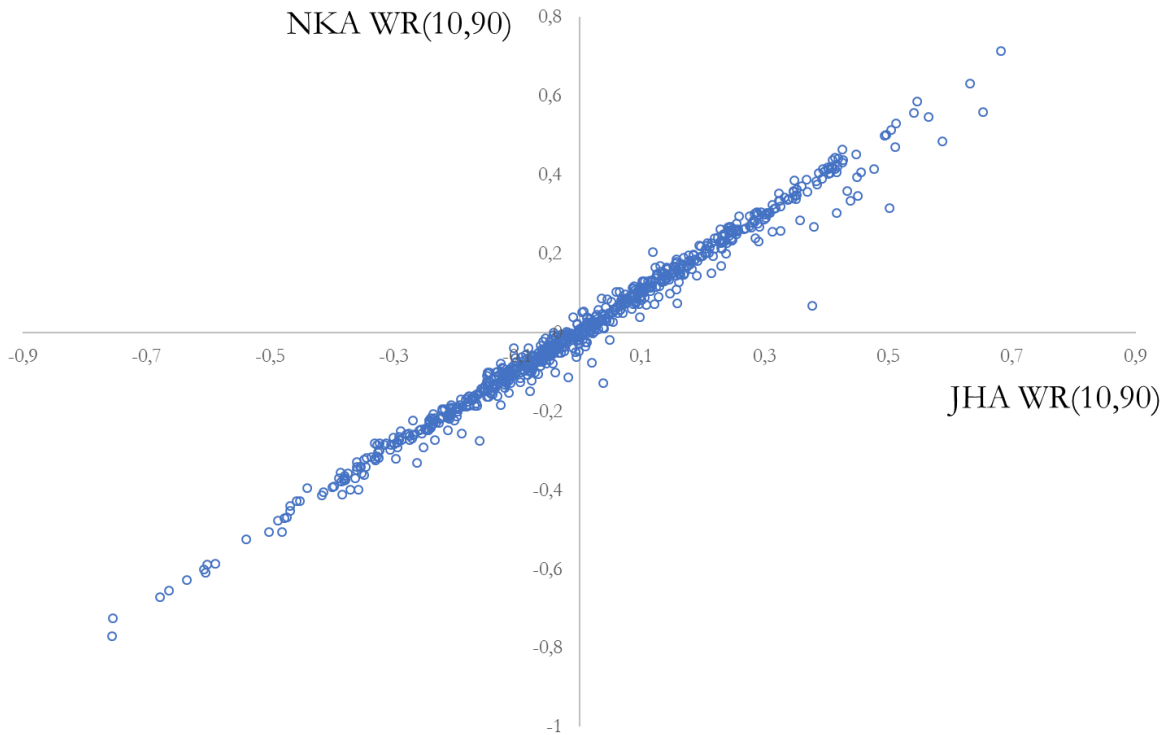
Kuviossa 8.1 esitetään CNLS-mallin residuaalien hajontakuviota: kuvion pisteet kuvaavat yksittäistä havaintoa kun pääomakantaa mitataan JHA:n mukaisesti (vaaka-akseli) ja NKA:n mukaisesti (pystyakseli). Koska pisteparvi asettuu hyvin lähelle 45 asteen suoraan, JHA:n korvaaminen NKA:lla ei vaikuta useimpien yhtiöiden osalta kovinkaan paljon tehokkuuslukuihin. 45 asteen suoran yläpuolella olevissa havaintopisteissä tehokkuusluku kasvaisi siirryttäessä NKA:n käyttöön, suoran alapuolella olevissa havaintopisteissä tehokkuusluku laskisi.



Kuvio 8.1: CNLS-mallin residuaalien vertailu kun pääomakannan mittarina käytetään verkon JHA:a (vaaka-akseli) tai NKA:a (pystyakseli).

Vertailun vuoksi kuviossa 8.2 esitetään vastaavanlainen hajontakuviota painorajoitetun WR CNLS-mallin residuaaleille. Myös tässä mallissa suurin osa havaintopisteistä sijaitsee hyvin lähellä 45 asteen suoraan, jolloin JHA:n tai NKA:n käytöllä ei ole suurta vaikutusta tehokkuuslukujen kannalta. Erityisesti kaikkein tehokkaimpien yhtiöiden osalta vaikutus jää marginaalisesti; näiden yhtiöiden residuaalit ovat negatiivisia.

Sen sijaan keskimääräistä alhaisemman tehokkuuden yhtiöissä NKA:n käyttö voi laskea tehokkuuslukua huomattavammin. Aineiston perusteella tehokkuuslukujen ja NKA/JHA suhdeluvun välillä on positiivinen korrelaatio, mikä viittaa siihen, että yhtiöt jotka ovat panostaneet korvausinvestointeihin toimivat myös tehokkaammin KOPEX:n osalta.



Kuvio 8.2: Painorajoitetun WR CNLS-mallin residuaalien vertailu kun pääomakannan mittarina käytetään verkon JHA:a (vaaka-akseli) tai NKA:a (pystyakseli).

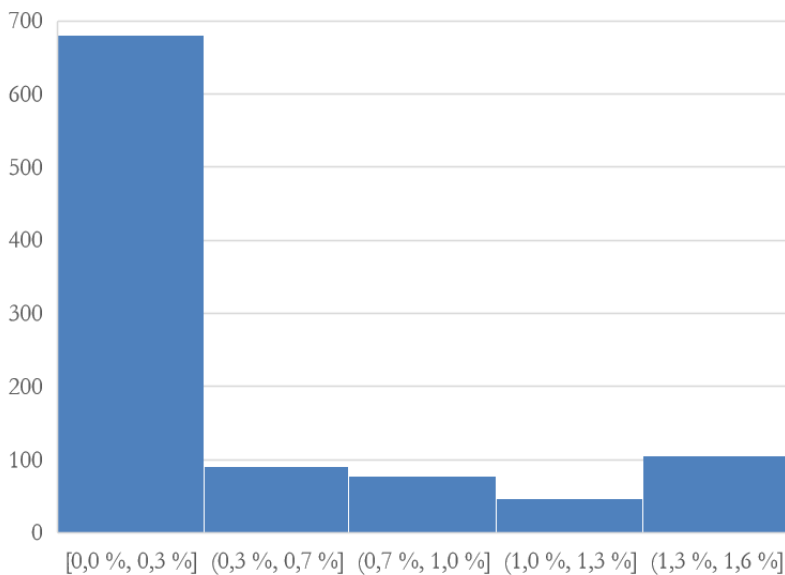
8.2 Nykykäyttöarvon varjohintojen vertailu

Taloustieteen kirjallisuudessa Averch-Johnson vaikutuksella viitataan säänneltyjen yritysten taipumukseen kerätä ylivoittoa pääomaintensiteettiä kasvattamalla (Averch & Johnson, 1962). Kuosmanen & Nguyen (2020) ovat esittäneet, että myös pohjoismaisten regulaattorien soveltama kohtuullisen tuoton sääntelyyn perustuva malli voi olla altis Averch-Johnsonin vaikutuksella. Tässä alaluvussa tarkastellaan pääoman tuottoastetta NKA:n varjohintojen näkökulmasta.

Kustannusrintamamallin varjohinnat mahdollistavat kiinteän ja muuttuvan panoksen suhteellisen hintavertailun. Varjohinta voidaan tulkita Kuviossa 2.1 havainnollistetun panos-isokvantin tangenttisuoran kulmakertoimeksi. NKA:n varjohinnan avulla voidaan laskea kiinteän ja muuttuvan panoksen välinen substitutiojousto. Hyvin korkea NKA:n varjohinta voi viitata siihen, että yhtiö ei ole investoinut tarpeeksi, kun taas hyvin alhainen NKA:n varjohinta saattaa kieltä yli-investoinneista. Averch-Johnson vaikutuksen perusteella säännellyllä toimialalla voidaan odottaa alhaisia varjohintoja. Toisaalta toimitusvarmuuden nimissä verkonhaltijoita on kannustettu investoimaan eikä ylisuuria investointeja ole

tehostamiskannustimessa pyritty systemaattisemmin rajoittamaan. Lisäksi on syytä muistaa, että myös tehostamiskannustin perustui ensimmäisillä valvontajaksoilla OPEX-normiin (vrt. Kuvio 2.1), mikä voi osaltaan kannustaa kokonaistaloudellisen tehokkuuden kannalta liian korkeaan pääomaintensiteettiin.

NKA:n varjohintojen jakauman histogrammi esitetään kuviossa 8.3. Varjohinnat on estimoitu tässä selvityksessä ehdotetun kustannusrintamamallin mukaisesti vuosien 2008-2020 aineistosta. Histogrammissa on huomioitu kaikki vuonna 2020 toimintaa jatkaneet yhtiöt koko tarkastelujakson ajalta.



Kuvio 8.3: NKA:n tehokkuuskorjattujen varjohintojen jakauman histogrammi

Kuviosta 8.3 havaitaan, että varjohintojen implikoimat pääoman tuottoasteet jäävät hyvin alhaiselle tasolle, mikä viittaa hyvin korkeaan pääomaintensiteettiin. Yli puolet estimoiduista varjohinnoista jää alle 0,3% tason (histogrammin korkein pylväs). Varjohintojen korkein desiili on noin 1,3%-1,6% (oikeanpuoleisin pylväs). Mikäli pääoman tuottoaste todellisuudessa ylittää Kuviossa 8.3 esitetyt prosenttiluvut, olisi pääomaintensiteetin laskeminen operatiivisia kustannuksia lisäämällä kokonaistaloudellisesti kannattavaa.

EV:n valvontamenetelmissä sovellettu kohtuullinen tuottoaste vaihtelee vuosittain riskittömän korkotason muuttuessa. Esimerkiksi kohtuullisena tuottoasteena sovellettu pre-tax WACC oli 3,97% vuonna 2022, kun vastaava luku vuonna 2017 oli huomattavasti korkeampi 7,05%. Korkea tuottoero pre-tax WACC:n ja Kuviossa 8.3 esitetyn NKA:n varjohinnan jakauman välillä voi viitata Averch-Johnson vaikutukseen: heidän mallissaan säännelty monopoli maksimoi voittoa hyödyntämällä sallitun tuottoasteen ja todellisen tuottoasteen välistä eroa, mikä johtaa pääomaintensiteetin kasvuun ja alhaiseen pääoman rajatuottoon. Edellä esitetyn varjohintojen vertailun perusteella yhdenkään yhtiön kohdalla ei näy merkkejä liian alhaisista pääomainvestoinneista. Kannustinmallin kokonaistaloudellisen ohjausvaikutuksen näkökulmasta ylimitoitettuja investointeja tulisi pyrkiä pidemmällä aikavälillä rajoittamaan. Ehdolliseen mittatikkukilpailuun perustuvassa tehostamiskannustimessa pääomakanta otetaan annettuna, joten pääomainvestointien kannustimet rajataan tämän hankkeen ulkopuolelle.

9. Kehittämis ehdotukset

Tässä raportissa kuvattu hanke keskittyi sähkön jakeluverkkoyhtiöiden valvontamallin tehostamiskannustimen kehittämiseen 6. ja 7. valvontajaksoilla. Tässä luvussa esitetään tiivistelmä hankkeen tulosten pohjalta laadituista kehittämis ehdotuksista. Lisäksi teemme yhteenvedon muista selvityksessä esiin nousseista kysymyksistä, jotka raportin laatijoiden mielestä kaipaisivat lisäpohdintaa, mutta jotka rajataan tämän selvitystyön ulkopuolelle.

Tehostamiskannustimen osalta esitämme seuraavat kehittämis ehdotukset:

StoNED-menetelmän kehitys:

- Mallin ennustetarkkuuden parantaminen varjohintojen vaihteluväliä rajoittamalla. Selvityksen perusteella painorajoitettu WR CNLS -malli tuottaa tässä aineistossa parhaan ennustetarkkuuden.
- Mahdollisen endogeenisuusharhan ehkäiseminen käyttämällä WR CNLS -mallin parametrien estimointivaiheessa kontrollimuuttujaa, jonka vaikutus palautetaan mallin residuaaleihin ennen tehokkuusestimointia.

Mallin muuttujat:

- Verkon jälleenhankinta-arvon (JHA) korvaaminen nykykäyttöarvolla (NKA) auttaisi edelleen parantamaan mallin ennustetarkkuutta ja kannustaisi verkkoyhtiöitä huomioimaan kokonaistaloudellisuuden verkkoinvestoinneissa.
- Kontrollimuuttujaksi suositellaan häviösähköprosenttia, joka on yhteydessä jakeluverkon tekniseen suorituskykyyn.

Edellä esitettyjen kehittämis ehdotusten lisäksi olemme selvityksessä kiinnittäneet huomiota valvontamallissa sovellettaviin inflaatiokorjauksiin, joita olisi ajankohtaista pohtia seuraavia valvontajaksoja ajatellen. Tilastokeskuksen tietojen mukaan KHI:n vuosimuutos oli 7,8% kesäkuussa 2022, mikä on huomattavasti korkeampi kuin mihin on viime vuosina totuttu. Inflaation kiihtyessä euromääräisten suureiden inflaatiokorjauksessa käytetty KHI saattaa tulevaisuudessa yli- tai aliarvioida jakeluverkkoyhtiöiden muuttuvien kustannusten hintakehitystä. Korkean inflaation oloissa ei myöskään ole perusteltua laskea yhteen eri vuosina kertyviä kyseisen vuoden nimellisin hinnoin laskettua yli- ja alijäämiä.⁶ Inflaatiokorjausten osalta suosittelemme Kuosmasen ja Pursiaisen (2011) esittämää reaalisen yli- ja alijäämän mallia, jossa valvontamallin kaikki euromääräiset suureet lasketaan kiinteän perusvuoden hinnoin koko valvontajakson ajan.

Valvontamallin tulevaisuuden kehitystarpeita silmällä pitäen selvityksessä pohdittiin myös lyhyesti mahdollisuutta siirtyä liikevoiton sijasta liikevaihtoa rajoittavaan sääntelyyn. Vaikka pääoman kohtuullisen tuoton sääntely on periaatteessa varsin hyvin linjassa taloustieteessä paremmin tunnetun kokonaistuoton

⁶ Seuraava esimerkki pyrkii havainnollistamaan miksi vuosittaisiin yli- ja alijäämiin olisi perusteltua tehdä inflaatiokorjaus ennen niiden laskemista yhteen. Olkoon yhtiön X ylijäämä vuonna t kyseisen vuoden nimellisin hinnoin laskettuna miljoona euroa. Vuonna $t+1$ yhtiön X alijäämä on miljoona euroa kyseisen vuoden nimellishinnoin. Tällöin vuosina t ja $t+1$ kertynyt yhteenlaskettu yli/alijäämä on nimellishinnoin laskettuna nolla euroa. Oletetaan esimerkin vuoksi, että hintataso nousee 7% vuodesta t vuoteen $t+1$. Mikäli vuosittaisiin yli/alijäämiin tehtäisiin inflaatiokorjaus ennen niiden laskemista yhteen, yhtiölle kertyisi esimerkissä reaalisesti ylijäämää 70 000 euroa vuoden t hinnoin ja 65 421 euroa vuoden $t+1$ hinnoin.

sääntelyn (*revenue cap regulation*) kanssa, liikevaihdon sääntelyyn perustuva malli voisi auttaa yksinkertaistamaan valvontamallin rakennetta sekä tuomaan muuttuvien kustannusten merkityksen selkeämmin esiin, jolloin valvontamallin kommunikointi eri sidosryhmille saattaisi osaltaan helpottua. Näin merkittävä muutos valvontamallin periaatteisiin vaatisi kuitenkin huomattavasti tarkempia selvityksiä, mahdollisesti jopa lakimuutoksia.

Lopuksi toivomme että tämä raportti voisi esitettyjen konkreettisten kehittämissuositusten lisäksi auttaa lukijaa hahmottamaan tehostamiskannustimen taloustieteellisen toimintaperiaatteen ja sen merkityksen kohtuullisen tuoton säätelyyn perustuvassa valvontamallissa aikaisempaa paremmin ja toisi siten lisäarvoa valvontamenetelmiä koskevaan keskusteluun.

Lähteet

- Akerberg, D.A., K. Caves & G. Frazer (2015) Identification Properties of Recent Production Function Estimators, *Econometrica* 83(6), 2411-2451.
- Averch, H. & L.L. Johnson (1962) Behavior of the firm under regulatory constraint, *American Economic Review* 52, 1052-1069.
- Bernstein, J.I. & D.E.M. Sappington (1999) Setting the X Factor in Price-Cap Regulation Plans, *Journal of Regulatory Economics* 16, 5–26.
- Bertsimas D. & N. Mundru (2021) Sparse convex regression, *INFORMS Journal on Computing* 33, 262-279.
- Camanho, A.S. & R.G. Dyson (2005) Cost efficiency measurement with price uncertainty: a DEA application to bank branch assessments, *European Journal of Operational Research* 161(2), 432-446.
- Collan, M., K. Huhta, P. Järventausta & M. Liski (2022) Lausunto Energiavirastolle sähkösiirron ja –jakelun tariffien laskentamenetelmistä, Työ- ja elinkeinoministeriö VN/2314/2021, Helsinki.
- Dai, S. (2022) Variable selection in convex quantile regression: L1-norm or L0 norm regularization? *European Journal of Operational Research* (accepted)
- Dai, S., Y.H. Fang, C.-Y. Lee & T. Kuosmanen (2021) pyStoNED: A Python Package for Convex Regression and Frontier Estimation, arXiv preprint arXiv:2109.12962.
- Dai, S., T. Kuosmanen & X. Zhou (2022) Non-crossing convex quantile regression, arXiv preprint arXiv:2204.01371.
- Energiavirasto (2021) Valvontamenetelmät neljännellä 1.1.2016 – 31.12.2019 ja viidennellä 1.1.2020 – 31.12.2023 valvontajaksolla, Helsinki.
- Energiavirasto (2022) Sähköverkkoliiketoiminnan kehitys, sähköverkon toimitus-varmuus ja valvonnan vaikuttavuus 2021 – Tuloksellisuuden ja ohjausvaikutusten kehittyminen vuosina 2016-2020 suhteessa aiempiin valvontajaksoihin, Helsinki.
- Filippini, M. & J. Wild (2001) Regional differences in electricity distribution costs and their consequences for yardstick regulation of access prices, *Energy Economics* 23(4), 477-488.
- Hall, P. & L. Simar (2002) Estimating a changepoint, boundary, or frontier in the presence of observation error. *Journal of the American Statistical Association* 97: 523-534.
- Keshvari, A. (2018) Segmented concave least squares: A nonparametric piecewise linear regression, *European Journal of Operational Research* 266, 585-594.

- Kopsakangas-Savolainen, M. & R. Svento (2008) Estimation of cost-effectiveness of the Finnish electricity distribution utilities, *Energy Economics* 30(2): 212-229.
- Kuosmanen, T. (2008) Representation theorem for convex nonparametric least squares, *Econometrics Journal* 11 (2), 308-325.
- Kuosmanen, T. & A.L. Johnson (2020) Conditional yardstick competition in energy regulation, *The Energy Journal* 41 (Special Issue).
- Kuosmanen, T. & M. Kortelainen (2012). Stochastic non-smooth envelopment of data: Semi-parametric frontier estimation subject to shape constraints. *Journal of Productivity Analysis* 38(1), 11-28.
- Kuosmanen, T., M. Kortelainen, K. Kultti, H. Pursiainen, A. Saastamoinen & T. Sipiläinen (2010) Sähköverkkotoiminnan kustannustehokkuuden estimointi StoNED-menetelmällä: Ehdotus tehostamistavoitteiden ja kohtuullisten kustannusten arviointiperusteiden kehittämiseksi kolmannelle valvontajaksolla 2012-2015, Sigma-Hat Economics Oy, Helsinki 31.8.2010.
- Kuosmanen, T. & T. Nguyen (2020) Capital bias in the Nordic revenue cap regulation: Averch-Johnson critique revisited, *Energy Policy* 139, 111355.
- Kuosmanen, T. & T. Post (2001) Measuring economic efficiency with incomplete price information: With an application to European commercial banks, *European Journal of Operational Research* 134(1), 43-58.
- Kuosmanen, T. & H. Pursiainen (2011) Inflaatiokorjaus ja siihen sovellettavat hintaindeksit sähköverkkotoiminnan valvontamallissa, Sigma-Hat Economics Oy, Helsinki.
- Kuosmanen, T., A. Saastamoinen, A. Keshvari, A. Johnson & C. Parmeter (2014) Tehostamiskannustin sähkön jakeluverkkoyhtiöiden valvontamallissa, Sigma-Hat Economics Oy, Helsinki.
- Levinsohn, J. & A. Petrin (2003) Estimating Production Functions Using Inputs to Control for Unobservables Get access Arrow, *Review of Economic Studies* 70(2), 317–341.
- Mattsson, T. (2020) Täydellisesti sopiva malli antaa huonompia ennusteita kuin yksinkertaisempi epätäydellinen malli, *Tiede*: <https://www.tiede.fi/blogit/rajankayntia/taydellisesti-sopiva-malli-antaa-huonompia-ennusteita-kuin-yksinkertaisempi>.
- Mazumder, R., A. Choudhury, G. Iyengar & B. Sen (2019) A computational framework for multivariate convex regression and its variants, *Journal of the American Statistical Association* 114, 318-331.
- Olley, G.S. & A. Pakes (1996) The dynamics of productivity in the telecommunications equipment industry, *Econometrica* 64: 1263–1297.
- Shleifer, A. (1985) A theory of yardstick competition. *Rand Journal of Economics* 16(3), 319-327.

Weyman-Jones, T. (2001) Yardstick and incentive issues in UK electricity distribution price controls. *Fiscal Studies* 22(2), 233–247.

Yagi, D., Y. Chen, A.L. Johnson & T. Kuosmanen (2020) Shape-constrained kernel weighted least squares: Estimating production functions for Chilean manufacturing industries, *Journal of Business & Economic Statistics* 38(1), 43-54.

Tekninen liite: Selvityksessä tarkastellut mallispesifikaatiot

CNLS malli (Kuosmanen, 2008; Kuosmanen & Johnson, 2021)

$$\min_{\rho, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i,t})^2$$

siten että

$$\begin{aligned} \ln x_{i,t} &= \ln(\rho_{i,t}) + \boldsymbol{\delta}' \mathbf{z}_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad \forall i, t \\ \rho_{i,t} &= \boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, t \\ \boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} &\geq \boldsymbol{\gamma}'_{j,s} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{j,s} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, j; \forall s, t \\ \boldsymbol{\gamma}_{i,t} &\geq \mathbf{0} \quad \forall i, t \\ \boldsymbol{\beta}_{i,t} &\geq \mathbf{0} \quad \forall i, t \end{aligned}$$

(CNLS)

 L_2 -normi CNLS (Dai, Kuosmanen, Zhou, 2022)

$$\min_{\rho, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i,t})^2 + k \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \|\boldsymbol{\gamma}_{i,t}\|^2 + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \|\boldsymbol{\beta}_{i,t}\|^2 \right)$$

siten että

$$\begin{aligned} \ln x_{i,t} &= \ln(\rho_{i,t}) + \boldsymbol{\delta}' \mathbf{z}_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad \forall i, t \\ \rho_{i,t} &= \boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, t \\ \boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} &\geq \boldsymbol{\gamma}'_{j,s} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{j,s} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, j; \forall s, t \\ \boldsymbol{\gamma}_{i,t} &\geq \mathbf{0} \quad \forall i, t \\ \boldsymbol{\beta}_{i,t} &\geq \mathbf{0} \quad \forall i, t \end{aligned}$$

(L_2 -normi CNLS)

Lipschitz-normi CNLS (Mazumder ym., 2019)

$$\min_{\rho, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i,t})^2$$

siten että

$$\begin{aligned} \ln x_{i,t} &= \ln(\rho_{i,t}) + \boldsymbol{\delta}' \mathbf{z}_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad \forall i, t \\ \rho_{i,t} &= \boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, t \\ \boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} &\geq \boldsymbol{\gamma}'_{j,s} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{j,s} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, j; \forall s, t \\ \|\boldsymbol{\gamma}_{i,t}\|^2 + \|\boldsymbol{\beta}_{i,t}\|^2 &\leq L^2 \quad \forall i, t \\ \boldsymbol{\gamma}_{i,t} &\geq \mathbf{0} \quad \forall i, t \\ \boldsymbol{\beta}_{i,t} &\geq \mathbf{0} \quad \forall i, t \end{aligned}$$

(Lipschitz-normi CNLS 0)

Laajennettu Lipschitz-normi CNLS mediaanilla

$$\min_{\rho, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i,t})^2$$

siten että

$$\ln x_{i,t} = \ln(\rho_{i,t}) + \delta' \mathbf{z}_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad \forall i, t$$

$$\rho_{i,t} = \boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, t$$

$$\boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} \geq \boldsymbol{\gamma}'_{j,s} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{j,s} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, j; \forall s, t$$

$$\|\boldsymbol{\gamma}_{i,t} - M(\widehat{\boldsymbol{\gamma}})\|^2 + \|\boldsymbol{\beta}_{i,t} - M(\widehat{\boldsymbol{\beta}})\|^2 \leq L^2 \quad \forall i, t$$

$$\boldsymbol{\gamma}_{i,t} \geq \mathbf{0} \quad \forall i, t$$

$$\boldsymbol{\beta}_{i,t} \geq \mathbf{0} \quad \forall i, t$$

(Lipschitz-normi CNLS Med)

WR CNLS (10%, 90%)

$$\min_{\rho, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i,t})^2$$

siten että

$$\ln x_{i,t} = \ln(\rho_{i,t}) + \delta' \mathbf{z}_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad \forall i, t$$

$$\rho_{i,t} = \boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, t$$

$$\boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} \geq \boldsymbol{\gamma}'_{j,s} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{j,s} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, j; \forall s, t$$

$$D_1(\widehat{\boldsymbol{\gamma}}) \leq \boldsymbol{\gamma}_{i,t} \leq D_9(\widehat{\boldsymbol{\gamma}})$$

$$D_1(\widehat{\boldsymbol{\beta}}) \leq \boldsymbol{\beta}_{i,t} \leq D_9(\widehat{\boldsymbol{\beta}})$$

$$\boldsymbol{\gamma}_{i,t} \geq \mathbf{0} \quad \forall i, t$$

$$\boldsymbol{\beta}_{i,t} \geq \mathbf{0} \quad \forall i, t$$

(WR CNLS, 10%, 90%)

WR CNLS (25%, 75%)

$$\min_{\rho, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i,t})^2$$

siten että

$$\ln x_{i,t} = \ln(\rho_{i,t}) + \delta' \mathbf{z}_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad \forall i, t$$

$$\rho_{i,t} = \boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, t$$

$$\boldsymbol{\gamma}'_{i,t} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{i,t} \mathbf{x}_{i,t} \geq \boldsymbol{\gamma}'_{j,s} \mathbf{y}_{i,t} - \boldsymbol{\beta}'_{j,s} \mathbf{x}_{i,t} \quad \forall i, j; \forall s, t$$

$$Q_1(\widehat{\boldsymbol{\gamma}}) \leq \boldsymbol{\gamma}_{i,t} \leq Q_3(\widehat{\boldsymbol{\gamma}})$$

$$Q_1(\widehat{\boldsymbol{\beta}}) \leq \boldsymbol{\beta}_{i,t} \leq Q_3(\widehat{\boldsymbol{\beta}})$$

$$\boldsymbol{\gamma}_{i,t} \geq \mathbf{0} \quad \forall i, t$$

$$\boldsymbol{\beta}_{i,t} \geq \mathbf{0} \quad \forall i, t$$

(WR CNLS, 25%, 75%)