

Tekninen edistys, pääoman syveneminen ja kustannusrintaman siirtyminen:

Uusimman paneeliaineiston vaikutus estimoituun StoNED-rintamaan

Timo Kuosmanen

Lisäselvitys
28.6.2023

Esipuhe

Tämä lisäselvitys täydentää ECKTA Oy:n vuonna 2022 laatimaa selvitystä Kuosmanen ym. (2022) sähkön jakeluverkkoyhtiöiden tehostamiskannustimessa sovellettavan kustannusrintamamallin ja sen estimoinnin kehittämisestä tulevilla 6.-7. valvontajaksoilla vuosina 2024-2031. Molemmat selvitykset on laadittu Energiaviraston toimeksiannosta.

Raportissa esitettävät tulkinnat, analyysit, johtopäätökset ja kehittämissuhteet ovat raportin laatijan riippumattomasti esittämiä, eivätkä ne välttämättä edusta Energiaviraston kantaa raportissa tarkasteltaviin asioihin.

1. Johdanto

Teknologisella kehityksellä viitataan yleensä uusiin innovatiivisiin tuotteisiin ja tuotantoprosesseihin. Sähkön jakeluverkkotoiminnassa ns. älykkään sähköverkon (smart grid) kehittäminen ja rakentaminen on hyvä esimerkki toimialalla parhaillaan käynnissä olevasta teknologisesta edistyksestä, jonka ansiosta verkon kapasiteettia on mahdollista hyödyntää nykyistä tehokkaammin (esim. Sarvaranta, 2010). Energiaviraston (EV) sähkön jakeluverkkoyhtiöihin soveltama valvontamalli pyrkii osaltaan kannustamaan verkkoyhtiöitä teknologian kehittämiseen ja hyödyntämiseen mm. innovaatiokannustimen avulla.

Teknologinen kehitys ei välttämättä kohtelee kaikkia yrityksiä tai niiden asiakkaita tasapuolisesti, vaan usein teknologia suosii joitakin yrityksiä enemmän kuin toisia. Vastaavasti myös sähkön jakeluverkkoyhtiöiden mahdollisuudet hyödyntää teknologiaa kehitystä kuten esim. älykkään sähköverkon tarjoamia ratkaisuja voivat poiketa huomattavasti maan eri alueilla.

Tässä selvityksessä tarkastellaan taloustieteen näkökulmasta kuinka ns. pääomaa syventävä teknologinen kehitys (Hicks, 1932) voi ajan myötä muodostaa ns. teknologiakuilun eri verkkoyhtiöiden välille. Selvitys keskittyy erityisesti sähkön jakeluverkkoyhtiöiden valvontamallissa sovellettavaan tehostamiskannustimeen: kuinka tehostamiskannustimessa sovellettava kustannusrintamamalli ottaa huomioon ajan myötä tapahtuvan teknologisen kehityksen aikaansaaman pääoman syvenemisen? Kysymys on tärkeä verkkoyhtiöiden tasapuolisen kohtelun näkökulmasta, jottei teknologiakuilu eri yhtiöiden välillä pääsisi muodostumaan kohtuuttoman suureksi.

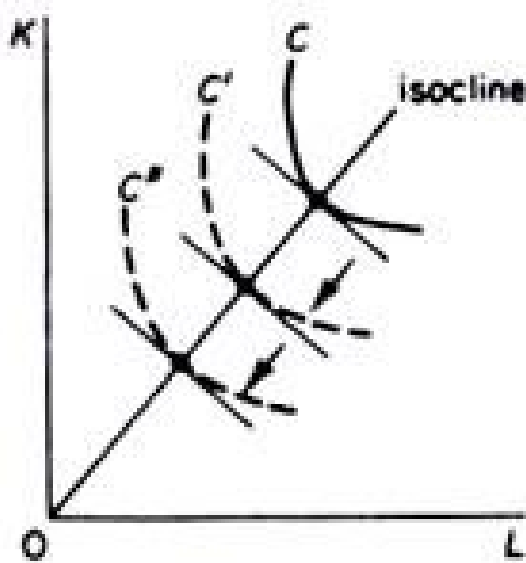
Raportin rakenne on seuraava. Luvussa 2 tarkastellaan lyhyesti teknologisen edistyksen ja pääoman syvenemisen mallintamista taloustieteessä. Kuinka teknologinen edistys huomioidaan jakeluverkkoyhtiöiden tehostamiskannustimessa esitetään luvussa 3. Luvussa 4 teknologista edistystä ja pääoman syvenemistä arvioidaan empiirisesti Energiaviraston keräämän paneeliaineiston pohjalta perustuen Kuosmasen ym. (2022) ehdottamaan mallispesifikaatioon ja estimointimenetelmään. Mallin robustisuutta tarkastellaan Luvussa 5. Luvussa 6 syvennytään yhtiökohtaisiin tuloksiin. Johtopäätökset ja toimenpidesuosituksukset esitetään luvussa 7.

2. Teknologinen edistys talusteoriassa

Taloustieteessä teknologinen kehitys tarkoittaa ajan myötä tapahtuvaa tuotannon tehostumista, jonka myötä samoilla tuotantopanoksilla saadaan aikaan aiempaa enemmän tuotosta tai vastaavasti sama tuotos voidaan tuottaa aiempaa kustannustehokkaammin pienemmillä resursseilla. Hicks (1932, 1946) havaitsi ensimmäisenä, että teknologinen edistys voi vaikuttaa tuotannon pääomaintensiteettiin ja sitä kautta pääoman tuottoon ja palkkakehitykseen.

Hicks kutsui tuotantopanosten suhteen *neutraaliksi* teknologiseksi edistykseksi tilannetta, jossa työn (L) ja pääoman (K) rajatuotos kasvaa samassa suhteessa teknologisen edistyksen myötä. Neutraali teknologinen edistys on havainnollistettu Kuviossa 1, joka esittää isokvantin eli samatuotoskäyrän C kolmella eri aikaperiodilla. C kuvaa teknisesti mahdollisia työn ja pääoman yhdistelmiä, jotka voivat tuottaa

vakiomäärän tuotosta. Teknologisen edistyksen myötä käyrä C siirtyy ajan kuluessa alaspäin (ensin tasolle C' , sitten C''). Ajan myötä sama tuotost määrä voidaan tuottaa pienemmällä määrällä työtä ja pääomaa.



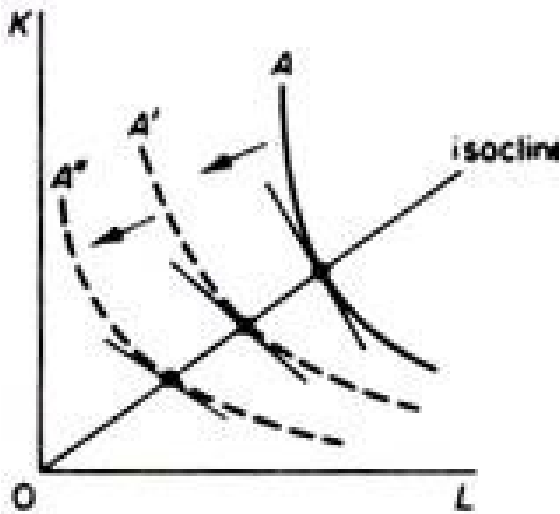
Kuvio 1: Neutraali teknologinen edistys ajan myötä

Lähde: Hicks (1946), Figure 3.31

Kuvioon 1 on merkitty myös origosta lähtevä nouseva suora (isocline) sekä laskevat tangenttisuorat samatuotostkäyrien C , C' , C'' leikkauspisteissä. Koska tangenttisuorien kulmakerroin on sama kaikissa kolmessa leikkauspisteessä, teknologinen edistys ei tässä tapauksessa muuta työn ja pääoman rajasubstituutioastetta. Tässä kuvattu neutraali teknologinen edistys ei ohjaa tuotantoteknologiaa pääomavaltaisempaan tai työvoimavaltaisempaan suuntaan. Tämä tapaus tunnetaan nykyisin Hicks-neutraalina teknologisenä kehityksenä.

Kuviossa 2 kuvataan toisenlainen tilanne, jossa teknologinen edistys ohjaa tuotantoa pääomaintensiivisempään suuntaan. Kuviossa 2 on kuvattu samatuotostkäyrä A kolmella aikaperiodilla, vastaavalla tavoin kuin edellisessä kuvioesimerkissä. Neutraalista teknologisesta edityksestä poiketen Kuviossa 2 samatuotostkäyrän muoto muuttuu ajan myötä. Tämä näkyy myös tangenttisuorien kulmakerrointen loivenemisena, mikä tarkoittaa sitä, että työn ja pääoman rajasubstituutioaste laskee.

Koska pääoman K rajatuotos kasvaa nopeammin kuin työpanoksen L , voittoa maksimoivien yritysten on kannattavaa kasvattaa tuotannon pääomaintensiteettiä eli korvata työpanosta pääomalla. Hicks kuvaa tilannetta termillä pääoman syveneminen (capital deepening). Uudemmassa tutkimuskirjallisuudessa mm. Färe ym. (1997) käyttävät termiä ”puolueellinen” (biased) tekninen kehitys viitaten vastaavanlaiseen ei-neutraaliin teknologiseen editykseen, kun taas Acemoglu (2002) käyttää termiä ”ohjattu” (directed) tekninen kehitys. Selvyyden vuoksi tässä raportissa käytetään Hicksin alkuperäiset termiä pääoman syveneminen viittaamaan Kuviossa 2 esitettyyn tilanteeseen, kun taas termi ”ei-neutraali” viittaa yleisemmin mihin tahansa poikkeamaan Kuviossa 1 esitetystä tapauksesta.



Kuvio 2: Pääoman syveneminen (*capital deepening*)

Lähde: Hicks (1946), Figure 3.29

Periaatteessa teknologinen kehitys voisi ohjata tuotantoa pääoman syvenemisen sijasta kohti työvoimavaltaisempia tuotantoprosesseja, mutta teollisesta vallankumouksesta lähtien pääoman rajatuotos on useimmilla teollisuustoimialoilla kasvanut työpanoksen rajatuotosta nopeammin. Siten pääoman syveneminen on nykyisin pikemminkin normi kuin poikkeus.

Olipa teknologinen kehitys neutraalia tai pääomaa syventävää, tuotannon tehostuminen ajan myötä laskee työn ja pääoman rajakustannuksia ja myös yksikkökustannukset alenevat. Kilpailullisilla markkinoilla yksikkökustannusten lasku välittyy kilpailun myötä kuluttajahintoihin. Koska myös paikallisten monopoliyhtiöiden yksikkökustannukset laskevat teknisen edistyksen myötä, teknisen edistyksen aikaansaama kustannusrintaman siirtyminen on perusteltua huomioida tavalla tai toisella myös sähkön jakeluverkkoyhtiöiden mittatikkukilpailun perustuvassa regulaatiossa.

3. Teknologinen kehitys jakeluverkkoyhtiöiden tehostamiskannustimessa

Sähkön jakeluverkkoyhtiöiden tehostamiskannustimeen on alusta saakka sisältynyt dynaamisia elementtejä, jotka kannustavat verkkoyhtiötä hyödyntämään teknologisen kehityksen tarjoamia mahdollisuuksia parantaa kustannustehokkuutta yli ajan. Ensimmäisillä valvontajaksoilla 1-3 vuosina 2005-2015 sovellettiin nk. *yleistä tehostamistavoitetta*, joka perusteltiin nimenomaan teknologisen edistyksen aikaansaaman kustannusrintaman siirtymisen nojalla (ks. Kuosmanen ym., 2010, luku 7.3). Rintaman siirtymistä arvioitiin Malmquist-tuottavuusindeksin teknologista edistystä kuvaavan komponentin avulla, joka kykenee huomioimaan myös ei-neutraalin rintaman siirtymisen (Färe ym., 1997). Valvontamallissa yleisen tehostamiskannustimen arvo kuitenkin asetettiin kaikille yhtiöille samansuuruisiksi yhtiöiden pääomaintensiteetistä riippumatta. Vaikka yleisen tehostamistavoitteen arvioinnissa ei etukäteen oletettu Hicks-neutraalisuutta, yleisen tehostamistavoitteen toimeenpano kuitenkin perustui implisiittisesti Hicks-neutraaliin teknologiseen kehitykseen.

Edellisillä 4.-5. valvontajaksoilla vuosina 2016-2023 kustannusrintamamallin estimoinnissa ryhdyttiin hyödyntämään useamman valvontajakson kattavaa paneeliaineistoa.¹ Samalla yleisen tehostamistavoitteen arvoksi asetettiin nolla. Nykyisin sovellettava malli voidaan tulkita ns. rullaavaan estimointi-ikkunaan (rolling window) perustuvaksi lähestymistavaksi, jossa useamman kalenterivuoden kattavaa estimointi-ikkunaa siirretään eteenpäin valvontajakson vaihtuessa. Näin ollen toimialalla tapahtuva tekninen edistys huomioidaan kustannusrintaman päivityksen yhteydessä valvontajakson vaihtuessa 4 vuoden välein.. Kun aiemmin valvontajaksoilla 1-3 kustannusrintama siirtyi vuosittain yleisen tehostamiskannustimen myötä, 4. valvontajaksosta lähtien kustannusrintama pysyy kunkin valvontajakson ajan vakiona, mutta voi siirtyä kerralla enemmän valvontajakson vaihtuessa.

Rullaavan estimointi-ikkunan merkittävä etuna on se, että mallin estimointi tai toimeenpano ei lähtökohtaisesti vaadi etukäteisoletuksia Hicks-neutraalista teknologisesta edistyksestä, vaan kustannusrintaman muoto voi muuttua ajan kuluessa pääoman (tai työpanoksen) syvenemisen seurauksena. Toisaalta kuitenkin rullaava estimointi-ikkuna ”unohtaa” aiemmin teknisesti mahdolliset panos-tuotokombinaatiot, joita ei uusimmassa aineistossa enää havaita. Esimerkiksi jos vuosina 2011, 2013 ja 2015 koettuja mittavia sähkökatkoja ei enää vuoden 2016 jälkeen havaita, keskeytyskustannusten (KAH) varjohinnat voivat lähestyä nollaa, jolloin kustannusrintama ei enää välttämättä kunnolla kykene huomioimaan mahdollisesti tulevilla valvontajaksoilla kohdattavia myrskytuhoja. Tilastollisen estimoinnin näkökulmasta aikaikkunan tulisi olla riittävän pitkä, mielellään vähintään 2 valvontajaksoa. Toisaalta estimointi-ikkunan siirtyminen ajassa eteenpäin on avainasemassa, jotta kustannusrintama kykenee huomioimaan ei-neutraalin teknologisen edistyksen seurauksena tapahtuvan pääoman syvenemisen.

Kannustinjärjestelmän näkökulmasta rullaavaan estimointi-ikkunaan perustuva mittatikkukilpailu tarjoaa tehokkaimmille verkkoyhtiöille mahdollisuuden hyötyä teknologisen edistyksen aikaansaamista kustannussäästöistä. Koska kustannusrintama estimoidaan edellisten valvontajaksojen toteutuneiden tilastotietojen perusteella, teknologian eturintamassa olevat verkkoyhtiöt voivat teknologisen edistyksen ansiosta toimia kustannusrintamaa tehokkaammin ja siten hyötyä taloudellisesti teknisestä edistyksestä valvontamallin tehostamisbonusten ansiosta. Valvontajakson vaihtuessa kustannusrintama siirtyy eteenpäin, jolloin teknologisen edistyksen aikaansaama kustannussäästö siirtyy hieman viiveellä sähkön loppukäyttäjiltä perittäviin siirtohintoihin. Samalla verkkoyhtiöillä säilyy kannustin kehittää toimintaansa edelleen ja hyödyntää teknologista kehitystä myös tulevaisuudessa.

3. Empiirinen tarkastelu

Tässä raportissa tarkastellaan teknistä kehitystä ja pääoman syvenemistä EV:n soveltaman StoNED-menetelmän ja erityisesti Kuosmanen ym. (2022) selvityksessä ehdotetun mallispesifikaation viitekehityksessä. Keskeisimmät kehittämisehdotukset nykyisin EV:n soveltamaan mallispesifikaatioon

¹ Vaikka lukuisat akateemiset tutkimukset suosittelivat paneeliaineiston hyödyntämistä sähköverkkoyhtiöiden tehostamiskannustimessa (esim. Farsi & Filippini, 2004), EV on tietääksemme ainoa regulaattori maailmassa, joka käytännössä hyödyntää paneeliaineistoa kustannusrintaman estimoinnissa. Paneeliaineiston hyödyntämistä kuitenkin jo vakavasti harkitaan mm. muissa Pohjoismaissa.

koskevat pääomakannan mittarina käytetyn verkon jälleenhankinta-arvon (JHA) korvaamista nykykäyttöarvolla (NKA), joka huomioi poistot, sekä häviösähköprosentin huomioiminen kontrollimuuttujana. Lisäksi mallin ennustetarkkuuden parantamiseksi ehdotetaan estimoinnissa sovellettavaksi varjohinnoille ala- ja ylärajoja, jotka voidaan asettaa varjohintojen rajoittamattoman jakauman avulla: Kuosmanen ym. (2022) saavuttivat parhaan ennustetarkkuuden asettamalla ala-ajan rajoittamattomien varjohintojen alimman desiilin (alin 10%) suuruiseksi ja vastaavasti yläajan rajoittamattomien varjohintojen ylimmän desiilin (ylin 10%) suuruiseksi. Kustannusrintamamalli, estimointimenetelmä ja niihin tuleville valvontajaksoille ehdotetut kehittämistoimet on esitetty yksityiskohtaisesti Kuosmanen ym. (2022) raportissa, joten tässä raportissa keskitytään tarkastelemaan teknologisen kehityksen ja pääoman syventymisen vaikutusta uudemmalla aineistolla estimoituun kustannusrintamaan ja sen varjohintoihin.

Kuten edellä jo todettiin, teknologista kehitystä voidaan arvioida Malmquist-indeksin rintaman siirtymistä kuvaavan komponentin avulla (Färe ym., 1997; Kuosmanen ym., 2010). Malmquist-indeksi perustuu ns- etäisyysfunktioihin, jotka tässä yhteydessä voidaan tulkita yhtiökohtaisiksi tehokkuuslukuiksi. Koska EV:n soveltamassa StoNED-estimoinnissa tehokkuusluvussa ei sovelleta tehottomuusermin ehdolliseen odotusarvoon perustuvaa ns. JLMS-muunnosta vaan tehokkuusluku lasketaan suhteellisena etäisyytenä rintamasta siten, että tehokkuusluku voi olla suurempi kuin 100%, voidaan eri ajanjaksojen rullaavien estimointi-ikkunoiden tuottamia tehokkuuslukuja vertaamalla tutkia teknologisen edistyksen ja pääoman syvenemisen vaikutusta.

Koska 6. valvontajaksolla sovellettavan kustannusrintaman estimoinnin lähtödatana on tarkoitus soveltaa vuosien 2016-2022 paneeliaineistoa, mutta vuoden 2022 tiedot eivät vielä ole tämän selvityksen puitteissa käytettävissä, keskitytään seuraavassa tarkastelemaan ajanjaksoa 2015-2022, johon viitataan jatkossa lyhyesti termillä ”uusi ikkuna”. Tämän estimointi-ikkunan tuottamia tehokkuuslukuja verrataan aiemmassa selvityksessä Kuosmanen ym. (2022) raportoituihin tehokkuuslukuihin, joissa aikaikkunana oli 2008-2021; tähän viitataan jatkossa termillä ”vanha ikkuna”. Erityisesti keskitymme vertaamaan tehokkuuslukuja vuosina 2015-2021, jotka sisältyvät molempiin estimointi-ikkunoihin. Tässä tapauksessa teknologista kehitystä voidaan arvioida ns. teknologiakuilun (technology gap) avulla, joka tässä selvityksessä määritellään seuraavasti:

$$\text{Teknologiakuilu} = 100\% \times \left[\frac{\text{Yhtiön } i \text{ tehokkuus vuonna } t \text{ arvioituna vanhan estimointi-ikkunan perusteella}}{\text{Yhtiön } i \text{ tehokkuus vuonna } t \text{ arvioituna uuden estimointi-ikkunan perusteella}} - 1 \right]$$

Teknologiakuilu kuvaa kustannusrintaman siirtymistä ajan myötä teknologisen kehityksen ansiosta: positiivinen lukuarvo viittaa teknologiseen edistykseen, kun taas negatiivinen lukuarvo tarkoittaa teknistä taantumista. Teknologiakuilua tarkastellaan kunkin yhtiön oman panos-tuotos profiilin näkökulmasta: mikäli teknologiakuilu on likimain samansuuruinen yhtiöiden välillä, teknologinen edistys (tai taantuminen) on Hicks-neutraalia, kun taas yhtiöiden väliset erot teknologiakuilussa viittaavat ei-neutraaliin teknologiseen kehitykseen (pääoman syveneminen). Koko toimialan tasolla teknologiakuilua tarkastellaan yhtiökohtaisten suhdelukujen geometrisen keskiarvon perusteella.

Vanhemman aikaikkunan 2008-2021 keskimäinen vuosi on 2014. Uudemman aikaikkunan keskimäinen vuosi on puolestaan 2018. Siten aikaikkunan mediaani rullaa eteenpäin 4 vuodella. Toisaalta aikaikkuna myös lyhenee 6 vuodella. Ihannetapauksessa aikaikkunan pituus olisi täsmälleen sama molemmilla tarkastelujaksolla, mutta valitettavasti KAH-arvojen laskentaperusteisiin aiottu muutokset voidaan huomioida vasta vuodesta 2016 lähtien. Aikataulusyistä tässä selvityksessä joudutaan vertaamaan kahden eripituisen estimointi-ikkunan vaikutuksia tehokkuuslukuihin.

Tarkastellaan aluksi teknologista edistystä tehokkuuslukujen geometrinen keskiarvojen valossa, jotka esitetään Taulukossa 1. Keskimääräiset tehokkuusluvut pysyvät varsin vakaina yli koko tarkastelujakson, keskimäärin noin 79% tasolla uudemman aikaikkunan mukaan arvioituna ja vastaavasti noin 85% tasolla vanhemman aikaikkunan perusteella arvioituna.² Tämä viittaa siihen, että yhtiöiden tehokkuudessa ei keskimäärin tapahdu suuria muutoksia kummankaan aikaikkunan perusteella tarkasteltuna. Siten myös estimoitu teknologiaikuilu pysyy varsin vakaasti noin 8% tasolla vuodesta toiseen (pl. vuoden 2015 havainnot).

Koska uudemman aikaikkunan kuvaama teknologia on aiempaa kustannustehokkaampi, samoille yhtiöille samalla datalla lasketut tehokkuusluvut saavat alhaisempia lukuaroja kun vertailukohtana on uudempaan teknologiaan perustuva rintama (vrt. Kuviot 1 ja 2). Jos arvioidaan keskimääräistä teknologista edistystä aikaikkunan mediaanin 4 vuoden siirtymän perusteella, saadaan keskimääräiseksi vuosittaiseksi rintaman siirtymäksi teknologisen edistyksen ansiosta $(108.0\%)^{1/4} - 1 = 1.9\%$ vuodessa. Näin saatu keskimääräinen vuosittainen teknologinen kehitys on hyvin lähellä aiemmin 1.-3. valvontajaksolla sovellettua 2.06% yleisen tehostamistavoitteen tasoa. Hieman kärjistäen voidaan todeta, että vaikka teknologiselta kehitykseltä suljetaan ovi asettamalla yleinen tehostamistavoite nolaksi, se kampeaa sisään ikkunasta kustannusrintaman päivityksen yhteydessä.

Taulukko 1: Tehokkuusestimaattien geometrinen keskiarvo vuosina 2015-2021 uuden ja vanhan aikaikkunan mukaisesti estimoituna sekä niiden perusteella laskettu teknologiaikuilu

| Vuosi | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | geom.ka |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Vanha ikkuna 2008-2020 | 83,2% | 86,4% | 89,1% | 85,7% | 84,0% | 82,6% | 85,1% |
| Uusi ikkuna 2015-2021 | 79,1% | 79,7% | 82,2% | 78,9% | 77,5% | 75,9% | 78,8% |
| Teknologiaikuilu* | 5,2% | 8,3% | 8,5% | 8,7% | 8,5% | 8,7% | 8,0% |

* Teknologiaikuilu on laskettu yhtiökohtaisten teknologiakuilujen geometrisena keskiarvona, joten se poikkeaa hieman keskimääräisten tehokkuuslukujen osamäärän perusteella saadusta lukuarvosta.

Taulukossa 2 verrataan yhtiökohtaisten tehokkuuslukujen keskihajonnan kehitystä tarkastelujaksolla, kun tehokkuusluvut on estimoitu uuden ja vanhan aikaikkunan mukaisesti. Koska mallissa huomioitujen muuttujien tarkkuus paranee ajan myötä (vrt. esim. KAH laskentaperusteiden kehittäminen, häviösähköprosentteihin tehdyt korjaukset), mallin ennustetarkkuus paranee, jolloin tehokkuuslukujen hajonta yhtiöiden välillä pienenee.³ Käytännössä tehokkuuslukujen keskihajonnan pieneneminen

² Vastaavalla tavoin aiemmassa selvityksessä Kuosmanen (2022) todettiin, että ”Keskimääräisen yhtiön kohdalla kustannustehokkuuden muutos oli likimain nolla.”

³ Myös lyhyempi aikaikkuna voi parantaa ns. *in-sample* ennustetarkkuutta, jolloin tehokkuuslukujen hajonta pienenee.

tarkoittaa sitä, että uudemmassa aikaikkunassa supertehokkaiden yhtiöiden (>100%) tehokkuusluvut laskevat kaikkein eniten, vastaavasti tehottomimpien yhtiöiden osalta tehokkuusluvut voivat jopa nousta.

Taulukko 2: Tehokkuuslukujen keskihajonta vuosina 2015-2021 uuden ja vanhan aikaikkunan mukaisesti estimoituina

| Vuosi | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Uusi ikkuna 2015-2021 | 15% | 16% | 17% | 18% | 21% | 19% | 17% |
| Vanha ikkuna 2008-2020 | 16% | 18% | 20% | 22% | 25% | 23% | |

Tulevaa 6. valvontajaksoa ajatellen tehokkuuslukujen historiallista kehitystä olennaisempaa on tarkastella varjohintoja, joita on tarkoitus soveltaa seuraavan 4-vuotisen valvontajakson aikana. Taulukossa 3 verrataan tuotosten ja kiinteän panosten varjohintojen mediaaneja kun niiden estimoinnissa sovelletaan uudempaa ja vanhempaa aikaikkunaa (inflaatiokorjattuna vuoden 2021 hintatasoon).

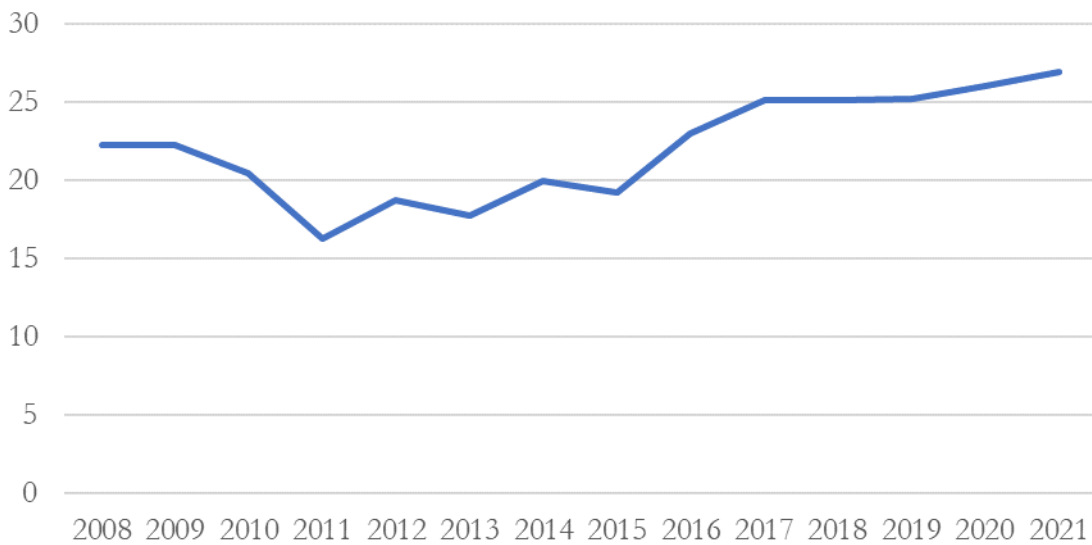
Taulukko 3: Tuotosten ja kiinteän panoksen varjohintojen mediaani uuden ja vanhan aikaikkunan mukaisesti estimoituina

| | Energia (s/kWh) | Verkko-pituus (€/km) | Käyttäjämäärä (€/käyttäjä) | NKA (€/€1000) | KAH (€/€) |
|------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Uusi ikkuna 2015-2021 | 1,550 | 142,52 | 51,08 | 3,384 | 0,004 |
| Vanha ikkuna 2008-2020 | 1,436 | 217,14 | 43,58 | 1,304 | -0,081 |

Uudemmassa aikaikkunassa käyttäjämäärän ja energian varjohintojen mediaanit kasvavat jonkin verran, kun taas verkkopituuden mediaanivarjohinta laskee merkittävästi. Erityisen suuri suhteellinen muutos havaitaan pääomakantaa kuvaavan NKA:n mediaanivarjohinnassa, joka nousee yli kaksinkertaiseksi vanhempaan aikaikkunaan verrattuna. Siten NKA:n mediaanivarjohinnan nousu uudemmassa estimointi-ikkunassa kielii teknologisesti edistyksestä, joka on yhteydessä pääoman syvenemiseen.⁴ Siten kustannusrintama siirtyy ajan myötä Kuviossa 2 havainnollistetulla tavalla.

Pääoman syveneminen ilmenee selkeästi myös pääomaintensiteetissä, jota tässä yhteydessä on mielekkäintä tarkastella suhdeluvun NKA/KOPEX avulla. Kuviossa 3 esitetään NKA/KOPEX suhdeluvun kehitys koko toimialan tasolla vuosina 2008-2021. Toisella valvontajaksolla 2008-2011 NKA/KOPEX suhdeluku aleni, mutta vuoden 2011 jälkeen havaitaan selkeä kasvava trendi. Vuonna 2011 toimialan pääomakannan NKA oli 16 kertaa suurempi kuin vuotuinen KOPEX, kun taas jakson viimeisenä vuonna 2021 NKA oli 27 kertaa KOPEX:a suurempi. Kun vuodet 2008-2014 jätetään estimointi-ikkunan ulkopuolelle ja aineisto rajataan korkeamman pääomaintensiteetin ajanjaksoon, estimoitu NKA:n mediaanivarjohinta kasvaa, kuten Taulukosta 3 havaitaan. Tilanne on analoginen Hicksin (1932) kuvaaman teknologisen edistyksen myötä tapahtuvaa pääoman syvenemisen kanssa (vrt. Kuvio 2).

⁴ Huom. Kuviossa 2 pääoma K on funktio työpanoksesta L, kun taas Taulukossa 3 KOPEX on funktio pääomasta NKA. Jos Kuviossa 2 vaihdettaisiin akselien L ja K paikkaa keskenään, tangenttisuoran kulmakerroin kasvaa vastaavalla tavoin kuin NKA:n varjohinta kasvaa Taulukossa 3.



Kuvio 3: Toimialan pääomaintensiteettiä kuvaava subdeluku NKA/KOPEX vuosina 2008-2021

4. Tulosten robustisuus

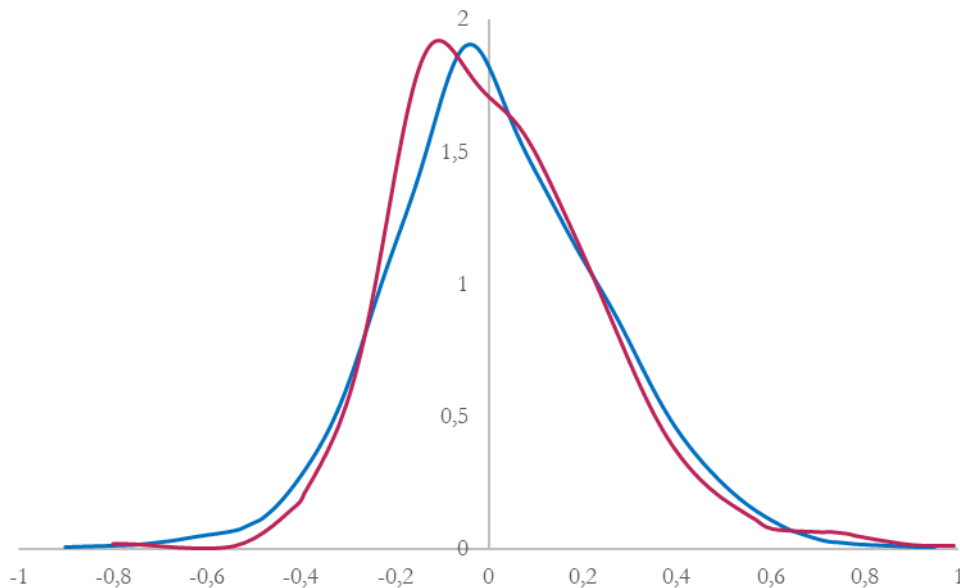
Tässä luvussa tarkastellaan voisiko Taulukossa 1 esitetty teknologiakuilu johtua mahdollisesti muista tekijöistä kuin teknologinen kehitys. Aloitetaan tutkimalla kustannusrintaman estimoinnissa sovelletun CNLS-regression laskentatarkkuutta.

Tässä selvityksessä CNLS-optimointitehtävä on ratkaistu uudemman aikaikkunan aineistolle GAMS ja Python ohjelmistoilla käyttäen Knitro ja Minos ratkaisutyökaluja (solver). Kaikki vertailut ratkaisimet tuottavat likimain identtiset regressioresiduaalit, mutta estimoidut varjohinnat poikkeavat hieman eri työkalujen välillä (CNLS-regressiotehtävän optimiratkaisu on yksikäsitteinen residuaalien suhteen, mutta ei välttämättä varjohintojen suhteen). Koska varjohintojen jakaumat voivat poiketa riippuen ratkaisutyökalusta, sillä voi olla vaikutusta seuraavassa vaiheessa sovellettaviin painorajoitetussa WR-CNLS mallissa käytettäviin varjohintojen ala- ja ylärajoihin, kun rajoitteet asetetaan rajoittamattoman varjohintajakauman alimman ja ylimmän desiilin perusteella. Tämä saattaa tuottaa jossakin määrin poikkeavia varjohinta- ja parametriestimaatteja kun sovelletaan eri ratkaisutyökaluja, samoin WR-CNLS mallin residuaalit voivat poiketa jonkin verran erilaisten painorajoitteiden takia.

Tässä selvityksessä vertailtujen ratkaisutyökalujen vaikutus yhtiökohtaisiin tehokkuusestimaatteihin jäi kuitenkin varsin vähäiseksi, alle yhden prosenttiyksikön. Näin ollen Taulukossa 1 esitetty poikkeama keskimääräisissä tehokkuusluvuissa uuden ja vanhan estimointi-ikkunan välillä täytyy johtua jostakin muusta kuin laskennallisesta tarkkuudesta eri ratkaisutyökalujen välillä.

Estimointi-ikkunalla on selvästi havaittava vaikutus regressiomallin residuaalien jakaumaan, kuten Kuvio 4 havainnollistaa. Kuvio esittää WR-CNLS regressiomallin residuaalien jakauman kernel-tiheysfunktioita uuden aikaikkunan (punainen käyrä) ja vanhan ikkunan (sininen käyrä) mukaisesti estimoituna. Jakaumien häntien osalta kuviossa ilmenee punaisen käyrän alhaisempi keskijajonta. Tämä tarkoittaa käytännössä

sitä, että kaikkein tehokkaimpien yhtiöiden tehokkuus laskee uudemman aikaikkunan mukaan estimoituna, kun taas kaikkein tehottomimpien yhtiöiden tehokkuus voi nousta (vrt. Taulukko 2).



Kuvio 4: WR CNLS-mallin residuaalien jakauma uuden aikaikkunan (punainen käyrä) ja vanhan ikkunan (sininen käyrä) mukaisesti estimoituna.

Punaisen käyrän kuvaama uudempi aikaikkuna tuottaa selvästi vinomman residuaalien jakauman, mikä kielii suhteellisesti korkeammasta tehottomuudesta kyseisen aikaikkunan sisällä. Kun ajan myötä malli kehittyy, muuttujat tarkentuvat ja regressiomallin selitysaste kasvaa, yhä suurempi osuus selittämättä jäävistä kustannuseroista näyttäisi kumpuavan teknisestä tehottomuudesta. Jos verrataan tehottomuusermin odotusarvoa uuden ja vanhan aikaikkunan mukaisesti estimoituna, havaitaan että tehottomuuden odotusarvo nousee vanhemman aikaikkunan lukuarvosta 0,12 lähes kaksinkertaiseksi arvoon 0,22. Tämä vastaa noin 8 prosenttiyksikön muutosta tehokkuuskertoimen odotusarvossa (vrt. Taulukko 1).

Mikä yhdistää residuaalien vinouden kasvun teknologiseen kehitykseen? Edellä Taulukon 1 tulosten perusteella havaittiin, että yhtiöiden keskimääräinen tehokkuus säilyy lähes muuttumattomana koko tarkastelujakson ajan sekä uuden että vanhan estimointi-ikkunan mukaisesti tarkasteltuna. Koska yhtiöiden tehokkuudessa ei havaita olennaista muutosta yli ajan, selkeä muutos residuaalien jakauman vinoudessa tukee osaltaan käsitystä rintaman siirtymisestä teknologisen kehityksen myötä.

Kuviossa 4 esitetyt empiiriset tiheysfunktiot on laadittu käyttäen molemmille jakaumille samaa sileysparametrin arvoa $b = 0,06$. Taulukossa 4 tarkastellaan tehokkuusestimaatin odotusarvon herkkyyttä sileysparametrin b suhteen. Taulukosta havaitaan, että pienet muutokset sileysparametrin arvossa eivät olennaisesti vaikuta tehokkuuden odotusarvoon, joten Taulukossa 1 havaittu rintaman siirtyminen ei voi johtua sileysparametrin muuttamisesta.

Taulukko 4: Kernel-tiheysfunktion sileysparametrin b vaikutus tehokkuuskertoimen odotusarvoon

| <i>b</i> | Tehokkuuden odotusarvo |
|----------|------------------------|
| 0,09 | 78,7% |
| 0,08 | 79,1% |
| 0,07 | 80,2% |
| 0,06 | 80,6% |
| 0,05 | 81,1% |

Kernel dekonvoluutio-menetelmän alkuperäiset kehittäjät Hall & Simar (2002) suosittelivat otoskoon muuttuessa päivittämään sileysparametrin arvoa b suhteessa $n^{-2/9}$. Koska uudemmassa aikaikkunassa aikajänne on lyhyempi ja otoskoko vastaavasti pienempi, tulisi sileysparametrin arvoa korottaa aiemmassa selvityksessä sovelletusta parametriarvosta $b=0,06$ lukuarvoon $b=0,07$, jotta lyhyemmän aikaikkunan takia pienentyvä otoskoko tulisi huomioiduksi tehottomuustermin odotusarvon estimoinnissa. Tämä laskisi tehokkuuslukuja uuden lyhyemmän estimointi-ikkunan tapauksessa noin 0,4 prosenttiyksiköllä, mikä vastaavasti myös kasvattaisi teknologiakuilua 0,4 prosenttiyksiköllä. Muutos ei olennaisesti vaikuta tämän selvityksen keskeisiin tuloksiin.

5. Kaupunki- ja maaseutuyhtiöiden teknologiakuilu

Tähän saakka teknologisen kehityksen vaikutusta on tarkasteltu koko toimialan tasolla keskimääräisten tehokkuuslukujen valossa. Pääoman syveneminen tarkoittaa kuitenkin sitä, että teknologinen edistys kohdistuu eri yhtiöihin eri tavalla, riippuen erityisesti niiden pääomaintensiteetistä. Kun tarkastelu syvennetään yksittäisten yhtiöiden tasolle, voidaan havaita, että teknologiakuilu saa kaikkein korkeimmat arvot suurissa kaupungeissa toimivien yhtiöiden kohdalla, kun taas Pohjois-Suomen alhaisen väestötiheyden alueilla toimivien yhtiöiden kohdalla teknologiakuilu voi olla jopa negatiivinen.

Kaikkiaan viiden verkkoyhtiön kohdalla teknologiakuilu on suurempi kuin 20%. Näistä viidestä yhtiöstä korkein yksittäisen vuoden teknologiakuilu on 25% ja korkein kuuden vuoden geometrinen keskiarvo on 22%. Jos arvioidaan keskimääräistä teknologista edistystä aikaikkunan mediaanin 4 vuoden siirtymän perusteella, saadaan korkeimmaksi keskimääräiseksi vuosittaiseksi teknologian edistykseksi näinollen $(122.0\%)^{1/4} - 1 = 5.1\%$ vuodessa, mikä on huomattavan korkea lukuarvo. Tämä ei automaattisesti tarkoita sitä, että kyseiset yhtiöt olisivat todellisuudessa kyenneet hyödyntämään kehittyvän teknologian tarjoamia mahdollisuuksia: estimoitu teknologiakuilu kuvaa ainoastaan kustannusrintaman siirtymän mahdollistamaa kustannustehokkuuden muutosta. Toisin sanoen teknologiakuilun perusteella näillä yhtiöillä on olleet suurimmat mahdollisuudet hyötyä teknologisesta kehityksestä ja pääoman syvenemisestä.

Kaikki edellä mainitut viisi yhtiötä toimivat Suomen suurimpiin lukeutuviin kaupungeissa. Vaikka kustannusrintaman päivittäminen valvontajakson vaihtuessa pyrkii korjaamaan edellä havaitun teknologiakuilun, monet korkean teknologiakuilun yhtiöt kykenivät edelleen toimimaan super-tehokkaasti yli 100% tehokkuuden tasolla tarkastelujakson viimeisenä vuonna 2021. Näin ollen huomattavan korkeakaan teknologiakuilu uuden ja vanhan estimointi-ikkunan välillä ei näytä viittaavan

siihen, että kaupunkiyhtiöiden olisi muita yhtiöitä vaikeampaa saavuttaa tehokkaan rintaman mukainen kustannustaso tulevan 6. valvontajakson aikana. Uudemmassa estimointi-ikkunassa korkein yksittäisenä vuonna saavutettu tehokkuusluku on 180%, joten kaikkein tehokkaimmat yhtiöt kykenevät edelleenkin toimimaan huomattavasti kustannusrintamaa alhaisemmin operatiivisin kustannuksin.

Toisaalta kaikkiaan 8 verkkoyhtiön kohdalla keskimääräinen teknologiakuilu on negatiivinen, mikä viittaa teknologiseen taantumaa. Näistä yhtiöistä kolme toimii Lapin maakunnassa. Koska rullaavaan estimointi-ikkunaan perustuvassa tarkastelussa vanhimmat ajanjaksot putoavat asteittain pois, malli käytännössä ”unohtaa” aiemmin teknisesti mahdollisia panos-tuotokombinaatioita. Tässä selvityksessä tarkastellusta uudemmassa aikaikkunasta jäävät pois erityisesti vuosien 2011 ja 2013 myrskyjen aiheuttamat korkeat KAH arvot, mikä saattaa vaikuttaa kustannusrintaman muotoon uudemmassa aikaikkunassa erityisesti ns. maaseutuyhtiöiden osalta.

Myös yhtiökohtainen teknologiakuilujen vertailu viittaa siihen, että teknologinen kehitys on yhteydessä pääoman syvenemiseen, jolloin pääoman rajatuotos kasvaa työpanoksen rajatuotosta nopeammin. Koska teknologinen kehitys kohtelee eri verkkoyhtiöitä eri tavoin, ajan myötä kasvava teknologiakuilu on syytä kuroa umpeen päivittämällä kustannusrintamamallin varjohinnat ja parametriarvot valvontajakson vaihtuessa. Säännöllinen kustannusrintaman päivittäminen ja rullaava estimointi-ikkuna käytännössä turvaavat sen, ettei teknologiakuilu ei pääse kasvamaan ajan myötä suhteettoman suureksi. Mikäli havaitut teknologiakuilut vaikuttavat huolestuttavan suurilta yhtiöiden tasapuolisen kohtelun näkökulmasta, luontevin ratkaisu olisi jatkossa päivittää kustannusrintamamallin varjohinnat ja parametrit nykyistä tiheimmällä syklillä myös valvontajakson aikana, esim. vuoden tai kahden välein.

Sähkön loppukäyttäjien kannalta pääoman syveneminen teknologisen kehityksen myötä todennäköisesti kasvattaa entisestään siirtohinnoissa havaittavia eroja ns. kaupunkiyhtiöiden ja maaseutuyhtiöiden välillä. Pääoman syveneminen laskee erityisesti kaupunkiyhtiöiden kustannuksia ja regulaation ansiosta myös loppukäyttäjiltä perittävät siirtohinnat tulevat teknologisen kehityksen ansiosta pysynemään alhaisempana tai laskemaan entisestään. Sen sijaan alhaisen asukastiheyden alueilla teknologinen edistys ei vastaavalla tavoin auta alentamaan kustannuksia, jolloin myös loppukäyttäjiltä perittävät siirtohinnat pysyvät korkeina tai nousevat edelleen. Siten teknologinen kehitys kohtelee sähkön loppukäyttäjää varsin epätasaisesti asuinpaikasta riippuen. Vastaavalla tavoin myös esimerkiksi rakennusteknologiassa tai liikenne- ja viestintäteknologiassa tapahtuva teknologinen kehitys vaikuttaa alueellisesti hyvin eri tavoin. Aluepolitiikka ei kuitenkaan kuulu tässä selvityksessä tarkasteltuun jakeluverkkoyhtiöiden tehostamiskannustimeen, joka pyrkii ennen kaikkea luomaan kaikille verkkoyhtiöille yhtäläiset ja tasapuoliset kannustimet toimia kustannusrintamaa tehokkaammin hyödyntämällä teknologisen kehityksen tarjoamia mahdollisuuksia. Tämä on viimekädessä myös sähkön loppukäyttäjien etu.

6. Johtopäätökset ja toimenpidesuosituks

Tässä selvityksessä on tarkasteltu kuinka teknologinen edistys vaikuttaa valvontamallin tehostamiskannustimessa sovellettavaan kustannusrintamaan. Empiirisen tarkastelun perustella toimialan

teknologinen kehitys on tarkastelujaksolla ollut varsin ripeätä, keskimäärin lähes 2% vuodessa.⁵ Toimialan teknologinen kehitys ei kuitenkaan ole Hicks-neutraalia, vaan on yhteydessä pääoman syvenemiseen. Tämä ilmenee mm. verkkoon sitoutuneen pääoman NKA:n varjohinnan kasvuna, NKA/KOPEX suhdeluvun kasvutrendinä vuosina 2011-2021, sekä yhtiökohtaisten teknologiakuilujen vertailun perusteella.

Neljännellä valvontajaksolla käyttöön otettu paneeliaineistoa hyödyntävä ns. rullaavan estimointi-ikkunan menettely korjaa ajan myötä mahdollisesti syntyvää teknologiakuilua siten, että valvontajakson vaihtuessa teknologisen kehityksen ja pääoman syvenemisen vaikutukset huomioidaan kustannusrintaman varjohintojen ja parametrien päivityksen yhteydessä. Sovellettu menettely ei vaadi rajoittavia etukäteisoletuksia teknologisen kehityksen suunnasta tai Hicks-neutraaliudesta, mikä on selkeä etu aiemmin sovellettuun yleiseen tehostamistavoitteeseen verrattuna. Selvityksen laatijan mielestä nykyisin sovellettu rullaavan estimointi-ikkunan menettely huomioi teknologisen edistyksen ja ei-neutraalin kustannusrintaman siirtymän paremmin kuin mikään toinen kirjallisuudessa esitetty tai kuviteltavissa oleva ratkaisu.

Pääoman syvenemisestä aiheutuva teknologinen kehitys näyttää tämän selvityksen tulosten perusteella suosivan erityisesti suurimmissa kaupungeissa toimivia yhtiöitä. Jotta teknologiakuilu ei ajan myötä pääsisi kasvamaan kohtuuttoman suureksi, tehostamiskannustimessa sovellettavia varjohintoja ja muita parametreja on tarpeellista päivittää riittävän tiheällä syklillä. Nykyisin vakiintunut menettely on päivittää varjohinnat ja parametrit valvontajakson vaihtuessa 4 vuoden välein.

Menettelyn hyvänä puolena voidaan pitää sitä, että seuraavalla valvontajaksolla sovellettava kustannusrintama on verkkoyhtiöiden tiedossa etukäteen, mikä mahdollistaa suunnittelun ja ennakoinnin. Tämän selvityksen tulosten perusteella teknologiakuilu voi kuitenkin joissakin tapauksissa nousta nelivuotisen valvontajakson aikana jopa 25% tasolle. Mikäli näin korkea teknologiakuilu koetaan ongelmalliseksi yhtiöiden tasapuolisen kohtelun näkökulmasta, kaikkein luontevin ratkaisu olisi päivittää kustannusrintaman varjohintoja ja parametreja nykyistä tiheämmällä syklillä myös valvontajakson aikana, esimerkiksi vuosittain tai kahden vuoden välein. Tiheampi päivityssykli auttaisi pehmentämään varjohintojen muutoksia valvontajakson vaihtuessa. Tämä auttaisi ehkäisemään teknologiakuilun syntymistä ja osaltaan parantaisi tehostamiskannustimen tasapuolisuutta, mutta toisaalta heikentäisi jossakin määrin kustannusrintaman ennakoitavuutta.

Rullaavan estimointi-ikkunan yksi mahdollinen heikkous on siinä, että malli ”unohtaa” aikaikkunan siirtyessä eteenpäin aikaisemmin havaitut panos-tuotosyhdistelmät, jolloin joidenkin yhtiöiden kohdalla kustannusrintama saattaa osoittaa kehityksen sijaan teknologista taantumista. Riittävän pitkä estimointi-ikkuna auttaisi luontevimmin torjumaan tätä ongelmaa. Erityisesti 2011, 2013 ja 2015 havaittavien korkeiden KAH-arvojen putoaminen estimointi-ikkunan ulkopuolelle voi vääristää mahdollisesti tulevilla valvontajaksolla koituvien keskeytysten vaikutusta KOPEX:iin.

⁵ Aiemmassa raportissa Kuosmanen (2022) ehdotetaan yleisen tehostamistavoitteen arvoksi tulevilla valvontajaksolla 2% vuodessa. Yleinen tehostamistavoite perustuu vastaavalla tavoin kustannusrintaman siirtymään teknologisen kehityksen myötä, mutta aiemmin sovellettu yleinen tehostamistavoite perustuu oletukseen Hicks-neutraalista teknologisesta kehityksestä. Tässä raportissa tarkasteltu vaihtoehtoinen tapa huomioida teknologinen kehitys varjohintoja päivittämällä ottaisi paremmin huomioon ei-neutraalin teknologisen kehityksen (ts. pääoman syvenemisen).

Vaikka havaittua teknologiakuilua ei voida selittää laskennallisella epätarkkuudella, selvityksessä havaittiin, että varjohintojen empiiriset jakaumat voivat jossakin määrin poiketa eri ratkaisutyökaluja sovellettaessa. Tällä saattaa olla vaikutusta erityisesti painorajoitetussa WR-CNLS mallissa sovellettaviin varjohintojen ala- ja ylärajoihin, kun rajoitteet asetetaan datalähtöisesti rajoittamattoman varjohintajakauman alimman ja ylimmän desiilin perusteella. WR-CNLS mallissa varjohinnoille asetettavien ala- ja ylärajojen robustisuus olisi tarpeellista varmistaa lopullisen 6. valvontajaksolla sovellettavan kustannusrintaman estimoinnin yhteydessä.

Lähteet

Acemoglu D. (2002) Directed Technical Change, *Review of Economic Studies* 69(4), 781–809.

Farsi, M., M. Filippini (2004) Regulation and Measuring Cost-Efficiency with Panel Data Models: Application to Electricity Distribution Utilities, *Review of Industrial Organization* 25, 1–19.

Färe, R., E. Grifell-Tatjé, S. Grosskopf, C.A.K. Lovell (1997) Biased Technical Change and the Malmquist Productivity Index, *Scandinavian Journal of Economics* 99(1), 119–127.

Hall, P., L. Simar (2002) Estimating a Change-point, Boundary, or Frontier in the Presence of Observation Error, *Journal of the American Statistical Association* 97(458), 523–534.

Hicks, J.R. (1932) *The Theory of Wages*. London, Macmillan.

Hicks, J.R. (1946), *Value and Capital*. 2nd ed., Oxford: Clarendon Press.

Kuosmanen, T. (2022) Yleinen tehostamistavoite sähkön ja maakaasun verkkotoiminnoissa 6. ja 7. valvontajaksoilla 2024–2031, Loppuraportti. ECKTA Oy 15.11.2022.

Kuosmanen, T., M. Kortelainen, K. Kultti, H. Pursiainen, A. Saastamoinen, T. Sipiläinen (2010) *Ehdotus tehostamistavoitteiden ja kohtuullisten kustannusten arviointiperusteiden kehittämiseksi kolmannella valvontajaksolla 2012-2015*. Loppuraportti, Sigma-Hat Economics Oy, 31.8.2010, Helsinki.

Kuosmanen, T., N. Kuosmanen, S. Dai (2022) *Kohtuullinen muuttuva kustannus sähkön jakeluverkko-yhtiöiden valvontamallissa: Ehdotus tehostamiskannustimen kehittämiseksi 6. ja 7. valvontajaksoilla vuosina 2024-2031*. Loppuraportti. ECKTA Oy 12.9.2022, Helsinki.

Sarvaranta, A. (2010) Älykkäät sähköverkot ja niiden kehitys EU:ssa ja Suomessa, Aalto-yliopisto, Energiatekniikan laitos.