

Öljyhuipun paluu: Riittääkö energian tarjonta vihreän siirtymän yli?

Tiivistelmä

Tässä luvussa luodaan linkki modernin taloustieteellisen kasvuteorian, suunnatun teknisen kehityksen, uusiutumattomien luonnonvarojen teorian ja nettoenergia-analyysin välille.

Viime vuosikymmeninä energia-analyysi on nostanut esiin huolia siitä, että vaikka fossiilisia polttoaineita on maaperässä runsaasti, voi helpoimmin hyödynnettävissä olevien varantojen ehtyminen kasvat-
taa energia-alan resurssitarvetta ja johtaa pitkittyneeseen talouden taantumaa. Tämä puolestaan voi tehdä siirtymästä uusiutuviin ener-
gialähteisiin haastavamman, sillä fossiilienergian tuotanto alkaa syr-
jäyttää yhä enemmän muuta globaalien talouden tuotantopotentiaalia.

Osoitan energia-analyysin keinoin, etteivät päästöt suinkaan ole ainoa relevantti fossiilienergiaan liittyvä haittapuoli, vaan myös va-
rantojen asteittainen ehtyminen aiheuttaa hyvinvointitappioita. Siksi optimaalinen energiapolitiikka pyrkii madaltamaan fossiilisten poltto-
aineiden tuotannon huippua riippumatta siitä, oletetaanko päästöjen vaikuttavan hyvinvointiin. Osoitan kuitenkin sekä teoreettisesti että numeerisilla simulaatioilla, että energia-analyysin esiin nostamat pa-
himmat taloudelliset uhkakuvat realisoituvat vain melko äärimmäisil-
lä oletuksilla.

Ero energia-analyysin ja taloustieteen johtopäätöksissä johtuu ta-
loustieteen mallien kyvystä mallintaa talouden kannusteiden muutoksia
yli ajan. Se, korostuuko energiapolitiikassa fossiilisten polttoaineiden
verotus vai puhtaasti energian innovoinnin tukeminen, riippuu vahvasti
siitä, kuinka helposti puhtaasti ja likaiset energialähteet ovat keskenään
korvattavissa. Optimaalisen energiasiirtymän polun ajoitukseen ja no-
peuteen vaikuttaa myös se, kuinka nopeasti fossiilisten polttoaineiden
tuotannon voidaan olettaa vaikeutuvan reservien ehtyessä.

Suosittelava lähdeviittaus tähän lukuun:

Aalto, Eljas (2024). *Öljyhuipun paluu: Riittääkö energian tarjonta vihreän siirtymän yli?* Luku 4 (sivut 73–96) kirjassa **Hyytinen**, Ari, **Maliranta**, Mika, **Rouvinen**, Petri ja **Tahvanainen**, Antti-Jussi (toim.) (2024). *Vihreä kasvu*. Taloustieto Oy (osana Business Finlandin, Laboren ja VTT:n ForGrowth-hanketta).

<https://ForGrowth.fi>

Eljas Aalto

on taloustieteen
väitöskirjatutkija
Turun yliopistossa.

Johdanto

Vihreä siirtymä on jo ottanut merkittäviä edistysaskelia ympäri maailmaa, mutta fossiiliset polttoaineet ovat edelleen voimakkaan hallitsevassa asemassa energiantuotannossa. Kansainvälisen energijärjestö IEA:n (2022) mukaan vuonna 2021 noin 80 prosenttia maailman primäärienergian tarjonnasta koostui fossiilienergiasta. Vaikka globaalisti vihreiden energialähteiden suhteellinen osuus on kasvanut nopeasti, on myös fossiilienergian absoluuttinen kulutus kasvanut. Siten myös hiilidioksidipäästöt ovat edelleen globaalisti lisääntyneet.

Päästöjen aiheuttamat ympäristöongelmat eivät kuitenkaan ole ainoa tai alkupe-
räinen syy sille, miksi nopeaa siirtymää uusiutuviin energialähteisiin on pyritty edis-
tämään. Fossiilisten energialähteiden rajallinen määrä maankuoressa on saanut men-
neinä vuosikymmeninä monet ennustamaan, että globaali öljyntuotanto saavuttaa
vääjäämättömän huippunsa jo lähitulevaisuudessa kääntyen sen jälkeen kiihtyvään
laskuun, mikä toisi mukanaan monenlaisia talousongelmia. Tätä alun perin Hubber-
tin (1956) kuvailemaa ja myöhemmin Campbellin ja Laherrèren (1998) uudelleen
popularisoimaa tuotannon maksimipistettä ja sitä seuraavaa laskua on usein kutsuttu
öljyhuipuksi (engl. *peak oil*). Koska historiallisesti fossiilisten polttoaineiden kulutus ja

Vaikka vihreän siirtymän analysoinnissa
päähuomio kohdistuu usein päästöihin,
aiheuttaa myös fossiilienergian
varantojen asteittainen ehtyminen
hyvinvointitappioita.

taloudellinen tuotanto ovat kulkeneet
käsi kädessä, ei pelko öljyhuiipun ai-
heuttamasta syvästä taantumasta ole
ollut lainkaan perusteeton.

Öljyhuiipun ajankohdalle annetut
ennusteet ovat kuitenkin kerta toi-
sensa jälkeen osoittautuneet vääriksi,

kun uudet teknologiat ovat mahdollistaneet aiemmin tavoittamattomissa olevien re-
servien, kuten liuskekaasun, hyödyntämisen. Kuten Bardi (2019) on huomauttanut,
on öljyhuippuun liittyvä kiistely hiljalleen laantunut ja unohtunut. Ilmaston ja ympä-
ristön kannalta vaikuttaakin olevan mielekästä todeta, että fossiilisten energialähteiden
ja muiden uusiutumattomien luonnonvarojen niukkuuden sijaan suurempi ongel-
ma on niiden suuri saatavuus (esim. Pretis ym., 2023; Covert ym., 2016; Schwerhoff
& Stuermer, 2015; Aguilera ym., 2012; Helm, 2011). Valtaosa maaperän hiilivedyistä
on edelleen louhimatta.

Toisaalta uusiutumattomien energiavarantojen täydellisen tyhjenemisen sijaan
energia-analyysi on viime vuosikymmeninä kiinnittänyt enemmän huomiota energia-
lähteiden nettomääräiseen tuotantoon. Tähän tarkoitukseen yksi käytetyimpiä indi-
kaattoreita on Hall ym. (1986) popularisoima EROI (*Energy Return On Investment*),
joka kuvaa tuotetun energian määrää suhteessa sen tuottamiseen itseensä käytettyyn
energiaan. Indikaattori on mahdollista laskea eri energialähteille erikseen, ja se an-
taa näin intuitiivisen tavan eri energiantuotantotapojen tehokkuuden keskinäiselle
vertailulle.

Esimerkiksi tuuliturbiinin pystyttäminen ja ylläpito vaatii suuria määriä käyttöenergiaa aina raaka-ainetuotannosta turbiinin lopulliseen käyttöön asti, eikä turbiinin tuottama sähkövirta välittömästi kompensoi itseensä liittyvää energiankulutusta. Onkin luontevaa, ettei energialähteitä vertailla vain niiden absoluuttisen tuotantopotentiaalin suhteen, vaan niiden tuottaman *nettoenergian* määrän suhteen, joka on muun talouden ja yhteiskunnan käyttöön hyödynnettävissä olevaa energiaylijäämää. Toisaalta indikaattori voidaan kuvata koko yhteiskunnan tasolla, ja se antaa näin tietoa energian saatavuudesta kokonaistaloudellisten systeemien läpi.

Vaikka fossiiliset energiavarannot eivät ole tyhjenemässä, on muodostunut vahva konsensus siitä, että fossiilienergian EROI on laskenut pitkällä aikavälillä huomattavasti (Delannoy ym., 2021a, 2021b; Brockway ym., 2019; Hall ym., 2014). Fossiilienergian tuotanto siis karnibalisoi yhä suuremman osan käyttöenergiasta itsestään, mikä on yksinkertaistettuna seurausta helpoiten saatavissa ja hyödynnettävissä olevien reservien tyhjenemisestä. Uusien esiintymien etsimiseen ja poraamiseen joudutaan käyttämään aiempaa enemmän resursseja, ja vaikka uudet innovaatiot ovat mahdollistaneet epätavanomaisten energiavarojen hyödyntämisen, ei teknologinen kehitys ole täysin kompensoinut geologisten lainalaisuuksien aiheuttamaa EROI:n laskua.

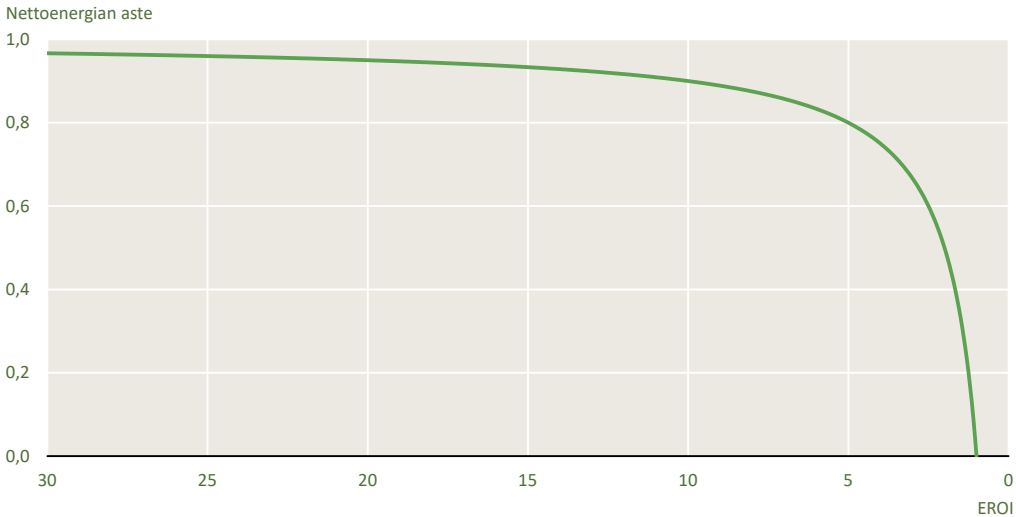
Sama pätee moniin muihinkin uusiutumattomiin luonnonvaroihin, joiden määrä itsessään maankuoressa saattaa olla suuri, mutta joita on jäljellä vain jatkuvasti alemman malmiluokan esiintymissä (Schwerhoff & Stuermer, 2015). Delannoy ym. (2021a) ovat laskeneet, että vuonna 2050 fossiilienergian tuotantoprosessi tulee globaalisti kuluttamaan käyttöenergiaa määrän, joka vastaa noin puolta tuotetusta fossiilienergian kokonaismäärästä. Siten fossiilienergian tuotannon *nettomääräinen* huippu, joka taloudellisen kokonaishyvinvoinnin kannalta lienee tärkeämpi kuin *absoluuttinen* huippu, voi tapahtua klassista öljyhuippua aiemmin, vaikka reservit itsessään eivät olisi loppumassa pitkiin aikoihin.

Biofysikaalisesti ajatellen fossiilienergian tuotanto ei muutu kokonaistaloudellisesti hyödyttömäksi vasta, kun varannot loppuvat tai kun tuotanto ei ole enää taloudellisesti kannattavaa. Sen sijaan koska energia on muun tuotannon välituote, sen tuotanto muuttuu biofysikaalisesti hyödyttömäksi silloin, kun fossiilisen energiantuotannon toimiala ei enää kykene tuottamaan positiivista määrää nettoenergiaa. Tällöin puhutaan *energianielusta* (engl. *energy sink*). Koska *nettoenergian aste*, eli nettoenergian suhteellinen määrä energian absoluuttisesta tuotannosta, riippuu epälineaarisesti EROI:sta, tarkoittaa EROI:n lasku nettoenergian määrän kiihtyvää laskua. Tällöin energiasektorin omat tarpeet alkavat hyvin nopeasti syrjäyttää muuta taloudellista toimintaa, ellei bruttoenergiantuotanto kasva hyvin voimakkaasti. Tähän ilmiöön viitataan joskus termillä *nettoenergiayrjänne* (engl. *net energy cliff*), ja se on esitetty kuviossa 4.1. Tämä ilmiö

EROI, energialähteen netto-tuotto, on fossiilisissa laskenut huomattavasti.

EROI:n kasvaessa energia-sektorin oma käyttö syrjäyttää loppukäyttöä.

Kuvio 4.1

Nettoenergiajyrkänne

Lähde: Kirjoittajan hahmotelma.

on aiheuttanut energia-alalla pelkoja jopa jonkinlaisesta syvästä taloudellisesta romahduksesta fossiilisen nettoenergian tarjonnan heikentyessä.

Vihreä siirtymä ja yhteiskunnan sähköistyminen edellyttävät suuria investointeja ja suurta määrää uutta energiaintensiivistä taloudellista tuotantoa. Fossiiliset polttoaineet ovat siis eräässä mielessä myös vihreän siirtymän mahdollistajia tuottaessaan puhtaan energian infrastruktuurin valmistamiseen ja ylläpitoon liittyvää käyttöenergiaa. EROI:n laskulla voi siten olla merkittäviä vaikutuksia sekä hyvinvoinnin että energiasiirtymän toteuttamisen kannalta. Taloustieteessä nettoenergia-analyysin käsitteitä, kuten EROI:ta, ei ole kuitenkaan tavattu suoraan hyödyntää tutkittaessa fossiilienergian ehtymistä ja vihreää siirtymää. Tässä luvussa osoitan energia-analyysin konsepteja hyödyntäen, etteivät päästöt suinkaan ole ainoa relevantti fossiilienergiiaan liittyvä haittapuoli, vaan myös varantojen asteittainen ehtyminen aiheuttaa hyvinvointitappioita energian tarjonnan kautta.

Koska energiasiirtymää tarkasteltaessa päähuomio kohdistuu usein päästöihin, on tämän luvun tavoitteena pohtia nimenomaan fossiilienergian varantojen asteittaisen ehtymisen vaikutuksia. Tämän takia päästöjen ja ympäristövaikutusten rooli tietoisesti pääosin sivuutetaan, mutta sanomattakin on selvää, ettei se tarkoita näiden vaikutusten merkityksen väheksymistä. Tarkastelun painopiste on teoreettisessa, hyvin pitkää aikaväliä kuvaavassa makrotaloudellisessa analyysissä.

Mitä fossiilienergian ehtymisestä tiedetään nettoenergia-analyysin ja kasvuteorian valossa?

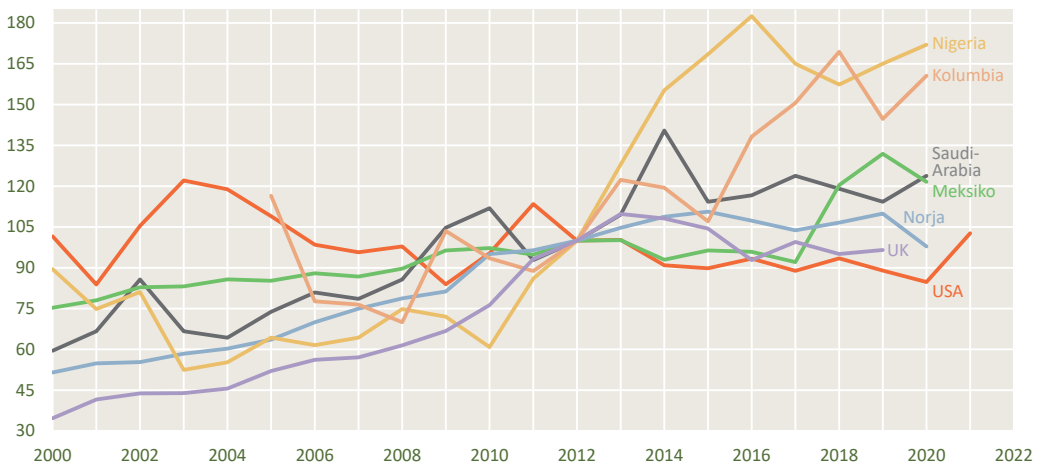
Taloustieteelle tutumpaa käsitteistöä hyödyntäen fossiilienergian EROI:n lasku voidaan kuvata toimialakohtaisella energiaintensiteetillä, joka saadaan suhteuttamalla toimialan energiankulutus sen bruttoarvonlisäykseen. Kuvioissa 4.2 ja 4.3 energiaintensiteetti on kuvattu indeksinä eräiden öljytuottajamaiden kaivostoiminnan ja louhinnan sekä öljyn ja kaasun tuotannon toimialoilta. Vaikka kaivostoiminta ja louhinta ei toimialana käsitä pelkästään fossiilista energiantuotantoa, antavat molemmat kuvaajat viitteitä laskevasta EROI:sta, sillä Yhdysvaltoja lukuun ottamatta voidaan havaita pitkäkestoinen energiaintensiteetin nousutrendi. Tämä on suurilta osin seurausta yllä mainitusta jäljellä olevien reservien käytettävyyden heikkenemisestä. Tärkeää on huomata, että samalla aikavälillä muun talouden energiaintensiteetti on lähes yksinomaan pienentynyt.

EROI:ta läheisesti muistuttava taloudellinen mittari on myös energiameinojen suhde kansantuotteeseen. Mitä matalampi tämä suhde on, sitä runsaammin ja helpommin energiaa voidaan sanoa olevan saatavilla. Esimerkiksi André ja Smulders (2014) tulkitsevat energian bkt-osuuden viittaavan talouden öljyriippuvuuden asteeseen.

Vaikka fossiilienergian EROI:n lasku luontaisesti kannustaa markkinoita siirtymään uusiutuviin energialähteisiin kustannusten noustessa, on ilmiön arvioitu aiheuttavan kolme keskeistä ongelmaa. Ensinnäkin on usein arvioitu, että uusiutuvien energia-

Kuvio 4.2

Kaivostoiminnan ja louhinnan energiaintensiteetti 2000–2021



Lähde: IEA (2023).

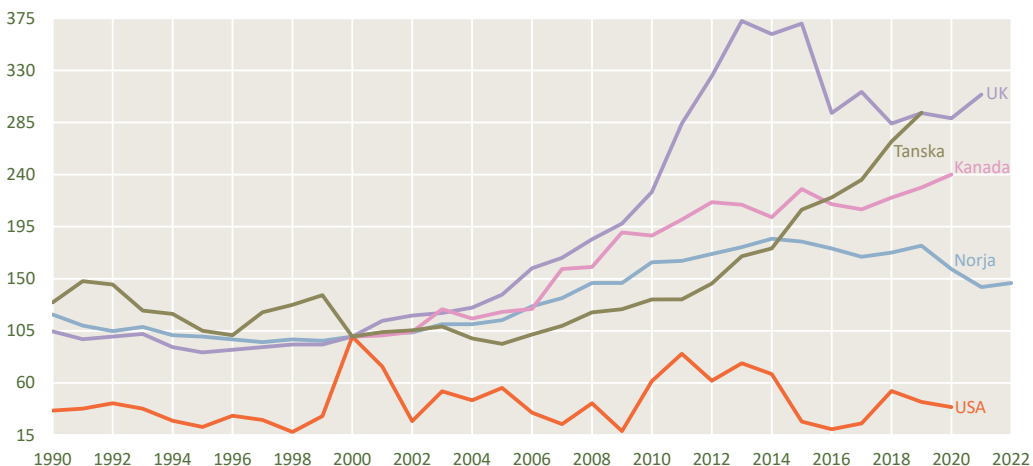
lähteiden EROI on fossiilienergiaa matalampi, ja näin ollen vihreä siirtymä edellyttää siirtymistä korkeamman EROI:n systeemistä matalamman EROI:n systeemiin aiheuttaen pitkäkestoisen taloudellisen laskukauden (Dumas ym., 2022; Capellán-Pérez ym., 2019; King & van den Bergh, 2018; Sers & Victor, 2018; Murphy, 2014; Hall ym., 2014). Esimerkiksi säättövoimaa tarjoavien biopolttoaineiden EROI:n on arvioitu olevan hyvin matala, jopa lähellä yhtä (esim. Prananta & Kubiszewski, 2021; Hall ym. 2014). Joidenkin näkemysten mukaan EROI:n arvolle on myös olemassa määrätty alaraja, jonka yläpuolella talouskasvu vasta on mahdollista (Fizaine & Court, 2016; Lambert ym., 2014; Hall ym., 2014).

Toisaalta myös toisenlaisia näkemyksiä on ilmaantunut, sillä uusiutuvien energialähteiden teknologisen kehityksen myötä niiden EROI on noussut huomattavasti, eikä tässä mielessä puhdas energia välttämättä olekaan enää kovin jälkeenjäänyttä fossiilienergiaan nähden (Murphy ym., 2022; Pahud & De Temmerman, 2022; Diesendorf & Wiedmann, 2020; Brockway ym., 2019; Raugei, 2019; Palmer, 2019). Vaikutelma fossiilienergian ylivertauisuudesta voi olla harhakuva myös siksi, että sen tuotantoa yhä tuetaan globaalisti enemmän kuin uusiutuvaa energiaa (Taylor, 2020). On toki myös huomattava, että vaikka EROI ja nettoenergia ovat käsitteellisesti yksinkertaisia ymmärtää, liittyy niiden mittaamiseen luonnollisesti edelleen huomattavia kiistanalaisuuksia ja määrittelyongelmia (esim. Pahud & De Temmerman, 2022; Giampietro ym., 2012).

Toinen nettoenergia-analyysin esiin nostama ongelma liittyy vihreän siirtymän omaan energiaintensiivisyyteen. Esimerkiksi vedyn tuottaminen suuressa mittakaa-

Kuvio 4.3

Öljyn ja kaasun tuotannon energiaintensiiteetti 1990–2022



Lähde: kansalliset tilastoviranomaiset ja kirjoittajan laskelmat.

vassa sekä siihen liittyvät investoinnit edellyttävät valtavia resursseja ja materiaalivirtoja (esim. Guevara-Ramírez ym., 2023; Mio ym., 2023; IEA, 2021). Siten siirtymän itsensä toteuttamiseen tarvitaan globaalisti riittävä määrä käyttöenergiaa, joka tois- taiseksi on vielä enimmäkseen fossiilisten polttoaineiden tuotannon varassa, vaikka esimerkiksi vety itsessään voidaankin tuottaa vihreällä sähköllä veden elektrolyysissä. Jos fossiilienergian EROI laskee, voi vihreän siirtymän taloudellisesti mielekkäällä toteuttamisella olla kiire riittävän käyttöenergian tarjonnan kannalta (esim. Dellannoy ym., 2021a).

Kolmanneksi, koska vihreän siirtymän energiaintensiivisyys aiheuttaa voimakkaan bruttoenergiatuotannon kasvupaineen erityisesti puhtaiden energialähteiden EROI:n ollessa matala, voi tämä siirtymän yhteydessä tarkoittaa ympäristön kannalta liiallisen päästöjen nousupainetta lyhyellä aikavälillä ja suurta kumulatiivista päästömäärää (Slameršak ym., 2022; Di Felice ym., 2018; Pehl ym., 2017). Tämä energiankulutuksen ei-toivottu kasvu muistuttaa läheisesti kuuluisaa Jevonsin paradoksia, jossa energian käytön tehokkuuden kasvu voi tietyissä tapauksissa lopulta kasvattaakin energian kysyntää, ja energiatehokkuuden parannukset näin voivat muuttua hyödyttömiksi (esim. Casey, 2023; Gillingham ym., 2016; Alcott, 2005).

Näiden uhkien tutkimisessa taloustieteen keinoin on käännyttävä modernin kasvuteorian puoleen. Kasvuteorian ja energian kontekstissa niin kutsutut suunnatun teknisen kehityksen mallit (Acemoglu, 2002; 1998) tarjoavat parhaan viitekehyksen energiasiirtymän analysointiin. Suunnatun teknisen kehityksen malleissa teknologinen kehitys ei vaikuta eri tuotantopanoksiin samalla tavalla, vaan se on suuntautunut johonkin niistä voimakkaammin kuin toisiin. Ympäristöä käsittelevissä malleissa (esim. Acemoglu ym., 2012) yleensä noudatetaan Aghion ym. (2014) hyvin kuvailemaa oletusta, jonka mukaan historialliset polkuriippuvuudet suosivat likaisia tuotantopanoksia suhteessa puhtaisiin. Näin teorian mukaan vihreän kasvun puute ei johdu itse asiassa siitä, että kasvu ja fossiilisten luonnonvarojen kulutus ovat aina linkittyneitä, vaan pikemminkin kyse on riippuvuudesta vääränlaisiin, saastuttaviin ja muilla tavoin kestäättömiin teknologioihin.

Useimmat suunnatun teknisen kehityksen mallit tuottavat huomattavasti optimistisempia näkemyksiä energiasiirtymän mahdollisuuksista verrattuna aiemmin mainittuun nettoenergia-analyysin kirjallisuuteen. Tämä johtuu esimerkiksi siitä, että fossiilivarantojen ehtyessä muodostuu markkinoilla luonnollinen kannustin suunnata innovointi kohti uusiutuvia energialähteitä. Casey (2023), Hassler ym. (2021) sekä André ja Smulders (2014) ovat myös osoittaneet energiatehokkuuteen liittyvän innovoinnin reagoivan energian hintasokkeihin: fossiilienergian kallistuessa (EROI:n laskiessa) taloudessa on kannusteita kehittää energiaa säästäviä teknologioita. Lemoine (2021) puolestaan argumentoi, että energia-alan polkuriippuvuus voi purkautua tietyn oletuksen itsestään myös ilman varantojen ehtymistä tai ympäristöpolitiikkaa. Toisaalta siirtymä ei todennäköisesti itsestään tapahdu ympäristön kannalta riittävän aikaisin (esim. Acemoglu ym. 2012).

EROI:n sijaan uusiutumattomien luonnonvarojen havaittuja hintoja ja tuotantomääriä on aihepiirin malleissa selitetty pääosin kahdella erilaisella teorialla. Ensimmäkin taloustieteen sisällä on laaja kirjallisuudenala liittyen niukkojen luonnonvarojen optimaalisiin loughintamääriin yli ajan (esim. Hotelling, 1931; Dasgupta & Heal, 1974). Tätä teoriaa hyödyntävät suunnatun teknologisen kehityksen mallissa esimerkiksi Hassler ym. (2021) ja André ja Smulders (2014). Toinen usein hyödynnetty teoria on oletus uusiutumattomien luonnonresurssien loughinnan kasvavista tuotantokustannuksista (esim. Pindyck, 1978; Slade, 1982). Näissä malleissa esimerkiksi öljynporaus muuttuu kalliimmaksi varantojen tyhjentyessä, ja tämänkaltaista oletusta on käyttänyt esimerkiksi Casey (2023) tutkimuksessaan.

Yllä mainituista vain jälkimmäinen teoria on sopusoinnussa havaittujen hintojen ja määrien kanssa, sillä monien uusiutumattomien luonnonvarojen tuotanto on kasvanut ja hinnat pysyneet melko stabiileina – toisin kuin optimaalisen loughinnan teoria ennustaa (Pretis ym., 2023; Casey, 2023; Schwerhoff & Stuermer, 2015). Toisaalta havaittu hintojen stabiilius yhdistettynä laskevaan EROI:n arvoon voidaan selittää sillä, että varantojen ehtyminen ei ole vaikuttanut fossiilienergian tuotantopanoksiin samalla tavalla, vaan on kasvattanut energian suhteellista tarvetta. Näin muiden panosten tuottavuuden kasvu selittäisi, miksi on tapahtunut kuvioissa 4.2 ja 4.3 havaittua energiaintensiivisyyden kasvua samalla, kun fossiilienergian hinta on pysynyt kohtuullisen vakiona ja tuotanto kasvanut.

Nettoenergian huomioiminen talouden kasvuteoriassa

Mistä voi johtua, ettei moderni talousteoria energia-analyysin tavoin ole huolestunut heikkenevästä energian tarjonnasta? Tavanomaiset makrotaloudelliset suunnatun teknisen kehityksen mallit eivät sellaisenaan sovi nettoenergia-analyysin konseptien analysointiin, eikä siten talousteorian ja energia-analyysin välisiä erilaisia johtopäätöksiä ole helppo vertailla. Olen tuonut nettoenergia-analyysin konseptit eksplisiittisesti mukaan vakiintuneeseen makrotaloudelliseen malliin, jossa teknologinen kehitys tapahtuu suunnatusti eri energialähteiden välillä (Aalto, 2023). Näin voidaan tutkia aiemmin mainittuja nettoenergia-analyysiin kytkeytyviä kysymyksiä talousteoreettisesti: Millaisia kasvu- ja hyvinvointivaikutuksia fossiilienergian laskevalla EROI:lla on? Voiko vihreä siirtymä aiheuttaa päästöjen kasvua laskevan EROI:n takia? Miten energiapolitiikan rakenne kytkeytyy nettoenergia-analyysin käsitteisiin?

EROI:n laskun hyvinvointivaikutukset

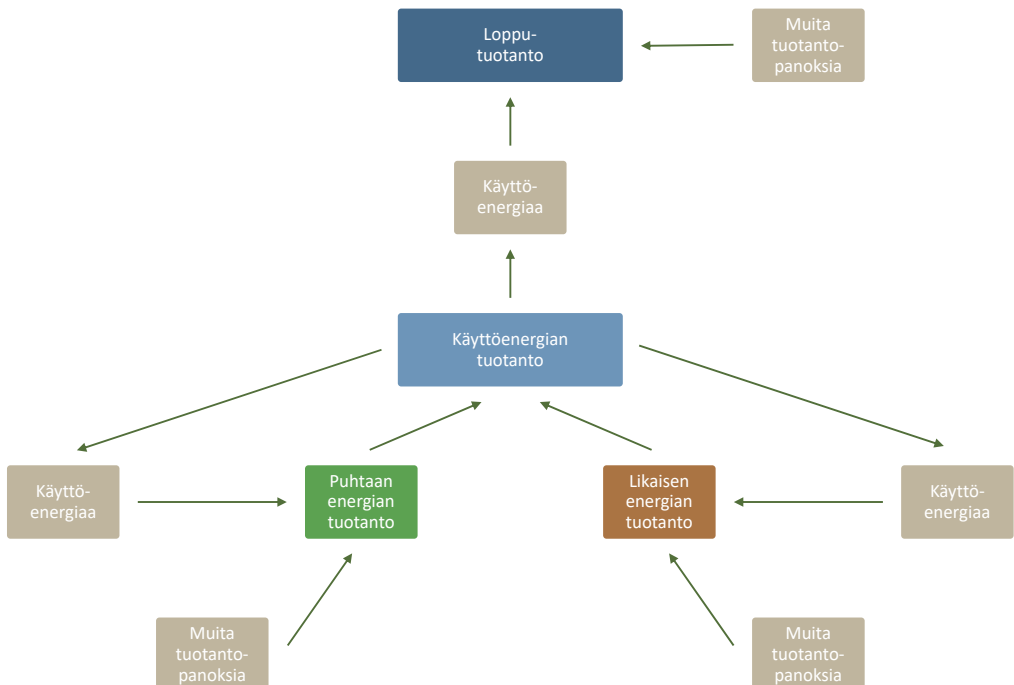
Mallissa lopputuotanto syntyy käyttöenergiasta (esimerkiksi sähkö ja polttoaineet) ja muista tuotantopanoksista. Käyttöenergia syntyy yhdistelemällä kahta energialähdettä: puhdasta (uusiutuvat energialähteet) ja likaista (fossiiliset polttoaineet). Nämä kaksi energialähdettä tuotetaan lopputuotannon tavoin käyttöenergian ja muiden pa-

nosten avulla. Tämä mahdollistaa kokonaistaloudellisen EROI:n laskemisen jakamalla käyttöenergian bruttotuotanto kahden energiasektorin yhteenlasketulla energiankulutuksella. Käyttöenergia ja ei-energia ovat mallissa toistensa *komplementteja* eli toisiaan täydentäviä tuotantopanoksia, eikä toista voida koskaan täysin korvata toisella. Energialähteet ovat kuitenkin keskenään toistensa *substituutteja*, eli niitä voidaan (ainakin osittain) korvata keskenään. Mallin pääpiirteittäinen rakenne on esitelty kuviossa 4.4.

Kuten muussa suunnatun teknologisen kehityksen kirjallisuudessa, toimialakohtainen teknologian taso määräytyy endogeenisesti, eli mallissa itsessään: taloudessa on tutkijoita, jotka päättävät odotettujen voittojensa perusteella, yrittävätkö innovoida puhtaan vai likaisen energian alalla. Onnistunut innovaatio antaa yhteen alan teknologiaan tietynmittaisen yksinoikeuden (patentin) ja näin mahdollisuuden tuottoihin. Odotettujen voittojen taso ja siten tutkijoiden allokaatio sektoreiden välillä riippuu useista erilaisista tekijöistä, kuten markkinoiden suhteellisesta koosta ja hinnoista. Näillä tekijöillä on helppo näyttää, miksi kannusteet energiasektoreiden välillä ovat olleet omiaan muodostamaan innovoinnin polkuriippuvuuksia, joiden seurauksena riippuvuus fossiilienergiaan on kehittynyt suureksi.

Kuvio 4.4

Mallin pääpiirteinen rakenne



Lähde: Kirjoittajan hahmotelma.

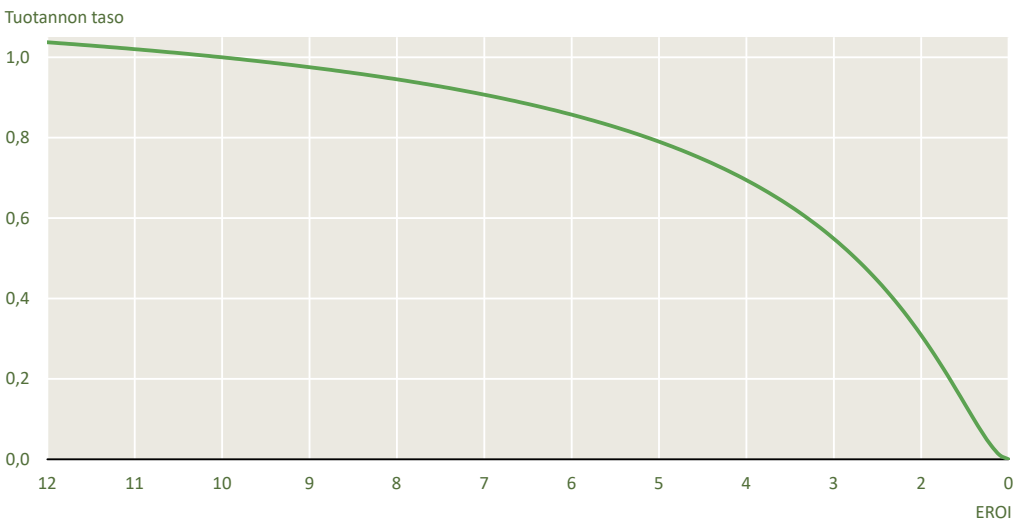
Fossiilienergian alalla tuottavuuteen vaikuttaa kuitenkin innovoinnin lisäksi myös toinen tekijä: likaista energiaa voidaan yli ajan tuottaa vain rajallinen määrä, ja reservien tyhjentäessä sen tuottaminen muuttuu vaikeammaksi. Toisin sanoen likaisen energian alalla tuottavuus jatkuvasti heikkenee. Alan innovointi ei pysty täysin kompensoimaan tätä kehitystä, ja siksi koko talouden tasolla EROI voi laskea innovoinnista huolimatta. Mitä kehittyneempää energiasektorin teknologia on ja mitä enemmän fossiilienergiaa on vielä saatavilla, sitä korkeampi on myös kokonaistaloudellinen EROI.

Kun energiasektorin oletetaan muiden sektoreiden tavoin käyttävän energiaa tuotantopanoksena, määrätty lopputuotannon taso teknologian ja tuottavuuden lisäksi myös talouden EROI:n perusteella. EROI:n laskulla on siten mallissa energia-analyysin esille tuomia jyrkkeneviä negatiivisia hyvinvointivaikutuksia, mikä johtuu energiasektorin suhteellisesta koosta ja syrjäytysvaikutuksesta: kun EROI on korkea, ei energiasektorin resurssien suuri kasvu syrjäytä suurta suhteellista määrää muun talouden resursseja. Sen sijaan, kun EROI on matala ja energiantuotannon käytössä on suuri määrä talouden resursseista, EROI:n suhteellinen lasku tarkoittaa hyvin suurta suhteellista syrjäytysvaikutusta muun talouden toiminnan suhteen. Mitä pienemmäksi EROI siis laskee, sitä suurempia ovat sen laskusta koituvat hyvinvointitappiot.

EROI:n tason vaikutus lopputuotantoon (eli kulutukseen) on esitetty kuviossa 4.5. Tuotannon tason vertailukohtana on tilanne, jossa kokonaistaloudellinen EROI on 10. Jos oletetaan EROI:n arvoksi aluksi 11, voidaan approksimoida yhden prosentin laskun EROI:ssa tarkoittavan noin 0,2 prosentin laskua kulutuksessa. Jos taas EROI

Kuvio 4.5

Tuotannon taso eri EROI:n arvoilla suhteutettuna tilanteeseen, jossa EROI=10



Lähde: Kirjoittajan hahmotelma.

on 5, tarkoittaa prosentin lasku jo noin 0,5 prosentin tappiota kulutuksessa. Mitä pienemmäksi EROI muuttuu, sitä suurempia ovat sen laskusta koituvat hyvinvointitappiot, vaikka muun talouden tuottavuuskehitys voikin kompensoida vaikutusta. Näin energia-analyysin johtopäätökset ja talousteoria ovat sopusoinnussa.

Koko talouden tasolla laskevan EROI:n tulisi tarkoittaa sitä, että käyttöenergia muuttuu kalliimmaksi ja siihen käytetyt menot suhteessa lopputuotantoon kasvavat. Näin ei kuitenkaan näytä tapahtuneen, sillä esimerkiksi OECD-maissa energiamenojen suhde bruttokansantuotteeseen on pysynyt melko vakaana, ja Andrén ja Smuldersin (2014) mukaan energian bkt-osuus on itse asiassa laskenut. Öljyvarantojen hupeneminen ei siis ainakaan vielä ole merkittävästi vaikuttanut energiamenojen bkt-osuuteen, eikä näin ollen voimakkaasta kokonaistaloudellisesta EROI:n laskusta välttämättä ole viitteitä.

Vihreän siirtymän aiheuttama *rebound*-ilmiö ja EROI

Voiko puhtaiden energialähteiden kehittyminen kasvattaa päästöjä, jos sen seurauksena bruttoenergiantuotanto kasvaa? Toisaalta voiko puhtaiden, matalamman EROI:n omaavien energialähteiden tukeminen kasvattaa myös fossiilienergian kysyntää puhtaaseen energiaan liittyvän resurssitarpeen seurauksena? Tähän niin kutsuttuun *rebound*-ilmiöön liittyviä kysymyksiä voidaan tutkia tarkastelemalla mallissa päästöjen joustoja puhtaan energian teknologian ja puhtaan energian hinta- tai tuotantotukien suhteen. Joustot kuvaavat taloustieteessä sitä, miten paljon jokin muuttuja suhteellisesti reagoi toisen muuttujan suhteelliseen muutokseen nähden.

Puhtaan energian teknologian kehitys aiheuttaa kaksi erilaista vaikutusta. Ensin kehitys laskee puhtaan energian suhteellista hintaa fossiilienergiaan nähden, mikä saa aikaan sen, että fossiilienergiata korvataan puhtaalla energialla ja jälkimmäisen suhteellinen kysyntä kasvaa (substituutiovaikutus). Mitä helpommin eri energialähteet ovat korvattavissa toisillaan, sitä voimakkaampaa substituutio ja fossiilienergian kysynnän pieneneminen on. Toiseksi teknologinen kehitys aiheuttaa skaalavaikutuksen, joka kasvattaa käyttöenergian bruttokysyntää. Tämä on seurausta käyttöenergian suhteellisen hinnan laskusta, mikä saa koko talouden käyttämään enemmän käyttöenergiaa suhteessa muihin tuotantopanoksiin (mikäli vain energia ja muut panokset ovat vähääkään korvattavissa toisillaan jollakin aikavälillä). Skaalavaikutuksen suuruus riippuu myös nettoenergian asteesta taloudessa: jos nettoenergian aste on matala, vaatii nettoenergian kasvaneen kysynnän tyydyttäminen suurempaa bruttoenergiantuotannon kasvua, koska suurempi osa käyttöenergiasta kuluu energialähteiden omassa tuotannossa. Tällä koko energiantuotannon skaalan kasvulla on positiivinen vaikutus myös fossiilienergian kysyntään. Lopullinen vaikutus fossiilienergian kysyntään ja päästöihin riippuu siitä, kumpi vaikutus on voimakkaampi.

Puhtaan energian suhteellisella hintatuella on täsmälleen samat kaksi vaikutusta kuin puhtaan teknologian kehityksellä. Toisaalta se saa aikaan substituutiota likaisesta

energiasta puhtaaseen energiaan, mutta toisaalta hintatuen aiheuttama käyttöenergian hinnan lasku kasvattaa myös koko energiantuotannon skaalaa vaikuttaen positiivisesti likaisen energian kysyntään. Jos nettoenergian aste on matala, voimistuu skaalavaikutus entisestään. On siis teoriassa mahdollista, että päästöjen kitkemiseksi tarkoitettu puhtaan energian hintatuki tai puhtaaseen energiaan liittyvä innovointi voimistaa myös fossiilienergian kysyntää.

Fossiilienergian kysynnän joustoja tarkastelemalla käy ilmi, että skaalavaikutus on substituutiovaikutusta voimakkaampi, jos eri energialähteet ovat heikosti toisiaan korvaavia, käyttöenergia ja muut panokset eivät ole toisiaan voimakkaasti täydentäviä ja samalla nettoenergian aste taloudessa on hyvin matala. Vaikka eri panosten makrotaloudellisen korvattavuuden ja täydentävyyden estimoimiseen liittyy suuria hankaluuksia, tukevat sekä intuitio että empiiriset tutkimukset johtopäätöstä siitä, että energialähteet ovat keskenään huomattavasti voimakkaammin korvaavia kuin energia ja muut panokset (ks. esim. Papageorgiou ym., 2017; Casey, 2023). Näitä tuloksia tulkiten rebound-ilmiötä alkaa esiintyä vasta, jos nettoenergian suhteellinen osuus energian tarjonnasta putoaa äärimmäisen matalaksi.

Optimaalinen energiapolitiikka nettoenergian perspektiivistä

Suunnatun teknisen kehityksen teoreettisissa malleissa optimaalinen siirtymä energialähteiden välillä saavutetaan yleensä kahden keskeisen politiikkainstrumentin avulla: fossiilienergian verotuksen ja puhtaan energian innovaatiotuen avulla. Nämä instrumentit kompensoivat kahta keskeistä ilmiötä: fossiilienergian päästöistä aiheutuvia negatiivisia hyvinvointivaikutuksia sekä puhtaan energian innovoinnin yli ajan tuottamia positiivisia hyvinvointivaikutuksia. Hyödyt ja haitat näistä kahdesta ilmiöstä eivät kohdistu kokonaisuudessaan yksittäiselle talouden toimijalle, joten ne ovat taloustieteen klassisia markkinaepäonnistumisia ja ulkoisvaikutuksia, joiden takia markkinatasapaino ei ole sosiaalisesti optimaalinen: fossiilienergiaa tuotetaan liian paljon, ja puhtaiden energialähteiden innovointia on liian vähän.

Perinteisesti taloustieteen tutkimukset ovat voimakkaammin korostaneet fossiilienergian verotuksen roolia energiasiirtymän kannalta (Lemoine, 2021; Hart, 2019; Fischer & Newell, 2008; Popp, 2006), mutta toisaalta joskus myös innovaatiotuen on tulkittu olevan merkittävämpi työkalu siirtymän aikaansaamiseksi (Greaker ym., 2018; Acemoglu ym., 2016; 2012). Esimerkiksi Acemoglu ym. (2012) mallissa liiallisia veroja tulee välttää, koska niillä voi olla liiallisen voimakas vaikutus nykyhetken kulu-tuksen tasoon. Fried (2018) puolestaan toteaa, että mallit, joissa teknologinen kehitys ei määräydy markkinoiden kannusteiden perusteella vaan eksogeenisesti, yleensä yliarvioivat vaadittujen hiiliverojen tason.

Tässä luvussa esitellyssä mallissa esiintyy muun aihepiirin kirjallisuuden tavoin useita ulkoisvaikutuksia, joihin puuttuminen edellyttää kahta instrumenttia: likaisen energian veroa sekä puhtaan energian innovaatiotukea. Suora puhtaan energian tuo-

tanto- tai hintatuki ei mallissa ole osa optimaalista energiapolitiikkaa, sillä se ei puutu suoraan yhteenkään mallin ulkoisvaikutukseen. On selvää, että todellisen energia- ja ympäristöpolitiikan työkalupakin tulisi sisältää monia muitakin instrumentteja sekä huomattavasti nyansoidumpia sektori- ja toimialakohtaisia analyyseja. Tämä luku keskittyy kuitenkin makrotaloudelliseen ”suureen kuvaan”.

Koska tämän luvun mielenkiinto on fossiilienergian varantojen tyhjenemisessä eikä ympäristövaikutuksissa, voidaan olettaa kuluttajan hyvinvoinnin tässä yhteydessä riippuvan ainoastaan kulutuksesta. Tällöin optimaalisen veron asettamisessa on keskeistä aivan toisenlaiseen likaisen energian kulutuksen aiheuttamaan ulkoisvaikutukseen puuttuminen kuin päästöihin. Tämä ulkoisvaikutus aiheutuu fossiilienergian tuotannon tehokkuuden laskusta, sillä tuottajat eivät mallissa huomioi kunkin periodin tuotannon negatiivista tuottavuusvaikutusta kaikkiin tuleviin periodeihin. Toisin sanoen, kunkin periodin likaisen energian tuotannolla on EROI:ta laskeva vaikutus tulevaisuudessa, mitä tuottaja ei huomioi maksimoidessaan kunkin periodin voittoa. Tällöin fossiilienergian verosta voidaan puhua itse asiassa ”ehtymisverona”. Ehtymisvero on mallissa luonnollisesti sitä suurempi, mitä voimakkaampi vaikutus varantojen tyhjenemisellä on likaisen energian tuottavuuteen.

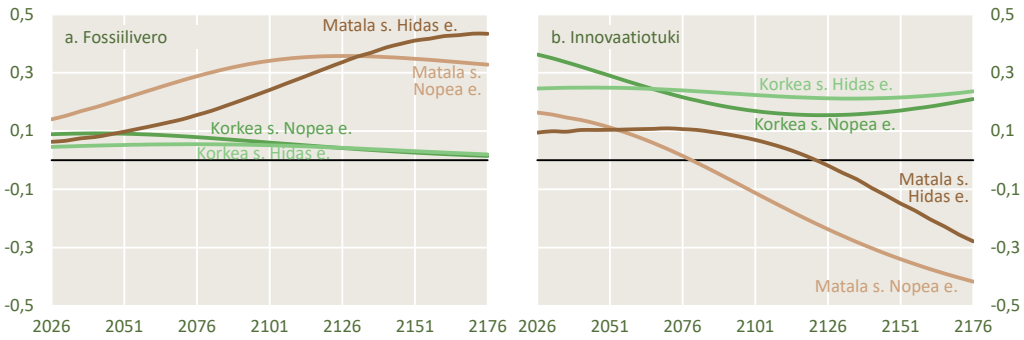
Seuraavaksi mallin sosiaalisesti optimaalista talouspolitiikkaa, joka maksimoi talouden kulutuksesta riippuvan hyvinvoinnin yli ajan, tarkastellaan mallin numeerisen kalibroinnin avulla. Fossiilisten varantojen ehtymisen oletetaan vaikuttavan likaisen sektorin käyttöenergian kysyntään: ehtyminen johtaa energiapanosten kasvuun suhteessa muihin tuotantopanoksiin, eli varantojen louhimiseen vaaditaan aiempaa enemmän energiaa suhteessa esimerkiksi työvoimaan ja pääomaan.

Kalibroinnissa mielenkiinnon kohteena on erityisesti kahden erilaisen parametrin vaikutus: puhtaan ja likaisen energian välinen korvaavuuden aste sekä fossiilienergian ehtymisen aste. Näistä jälkimmäisen perusteella määräytyy, miten nopeasti varantojen ehtyminen kasvattaa fossiilienergian tuotannon energiatarvetta. Kummallekin parametrille on annettu ”korkea” ja ”matala” arvo, ja näin kalibrointi on suoritettu yhteensä neljällä erilaisella oletuksella.

Perustuen Dumasin ym. (2022), Fizainen ja Courtin (2016), Dupontin ym. (2021) sekä Capellán-Pérezin ym. (2019) laskelmiin EROI:n arvoa 10 käytetään lähtötason valistuneena arvauksena. Koska mallissa käyttöenergiamenojen suhteen kokonaistuotantoon pitäisi vastata EROI:n käänteislukua, vastaa oletus hyvin myös havaittuja arvoja OECD-maissa viime vuosina (OECD, 2022). Loput kalibroinnin metodologiasta, parametrioletuksista ja muuttujien lähtöarvoista löytyvät viitatusta tutkimuksesta (Aalto, 2023).

Kuviossa 4.6 on esitetty energiapolitiikan instrumenttien optimaalinen taso, kun taas kuviossa 4.7 esitetään talouden keskeisten muuttujien kehitys suhteessa markkinatasapainoon erilaisilla parametrioletuksilla. Vaikka päästöjen aiheuttamia hyvinvointivaikutuksia ei ole mallissa huomioitu lainkaan, on optimaalisen energiapolitiikan rakenne huomattavan samanlaista suhteessa aiempiin tutkimuksiin. Kaikissa ta-

Kuvio 4.6

Energiapolitiikan instrumenttien optimaalinen taso

Lähde: Kirjoittajan laskelmat. Substituutio (s.) viittaa energialähteiden väliseen korvaavuuteen ja ehtyminen (e.) fossiilienergian varantojen tyhjenemisen vaikutukseen.

pauksissa optimaalinen energiapolitiikka melko voimakkaasti madaltaa fossiilienergian tuotannon maksimipistettä (öljyhuippua) ja kasvattaa aluksi puhtaan energian innovointia suhteessa markkinatasapainoon.

Intuitiivista on, että mitä voimakkaampaa on eri energialähteiden välinen substituoitio, sitä matalampi on vaadittu veron taso, joka saa aikaan halutunlaisen siirtymän puhtaaseen energiaan. Matalammalla kyseisen parametrin arvolla optimaalinen veron taso nousee monotonisesti vähintään yli vuosisadan ajan, kun taas korkeammalla parametrin arvolla vaadittu vero on huomattavasti matalampi ja laskee hiljalleen. Hitaampi varantojen ehtyminen puolestaan siirtää verotuksen huippua, energiasiirtymää ja fossiilienergian tuotannon huippua hieman myöhemmäksi, sillä siirtymällä ei ole yhtä ”kiire” vaimeampien negatiivisten tuottavuusvaikutusten takia.

Puhtaan energian innovaatiotuen taso riippuu puolestaan positiivisesti energialähteiden välisestä korvaavuudesta: kun substituution aste on korkea, on myös optimaalinen innovaatiotuki ja puhtaan innovoinnin suhteellinen osuus korkeampi. Matalalla substituutiolla korkeamman verotuksen vaikutus innovoinnin kannusteisiin on puolestaan niin merkittävä, ettei erillistä innovaatiotukea optimissa enää juuri vaadita. Itse asiassa käy ilmi, että vaikka puhtaan energian innovointia on myös matalan substituution tapauksessa aluksi optimaalista vähemmän, muuttuu innovaatiotuki vuosikymmenten mittaan puhtaan energian ”innovaatioveroksi”, joka kasvattaa likaisen energian innovointia suhteessa markkinatasapainoon. Tämä johtuu siitä, että matalamman substituution tapauksessa myös fossiilienergia on kohtuullisen tärkeä osa energiantuotantoa, ja varantojen ehtymisen aiheuttamaa tehokkuuden (EROI:n) laskua täytyy hidastaa likaisen energian innovoinnilla. On syytä myös huomioida, että matalan substituution tapauksessa energiapolitiikka ei ainoastaan madalla likaisen energiantuotannon huippua, vaan myös hidastaa sen liiallisen nopeaa romahdusta.

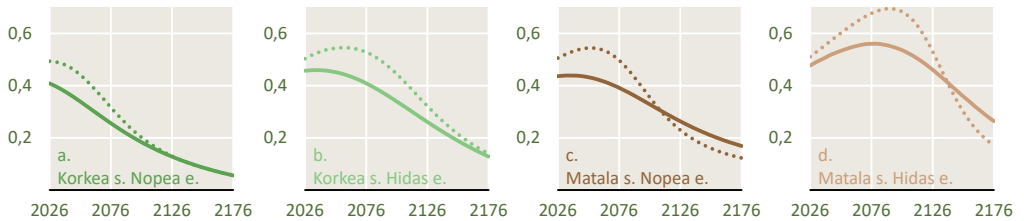
Olisi helppoa ajatella, että nopeampi EROI:n lasku voisi tarkoittaa myös korkeampaa likaisen energian innovoinnin määrää optimissa, koska on tärkeää ylläpitää hallitsevan energialähteen EROI:n tasoa mahdollisimman korkeana mahdollisimman kauan. Näin ei kuitenkaan ole vaan pikemminkin päinvastoin: voimakkaampi likaisen tuotannon tehokkuuden lasku fossiilivarantojen ehtyessä tarkoittaa mallissa sitä, että puhtaan energian alalla täytyy olla entistäkin enemmän tutkijoita, jotta puhtaan energian teknologia kehittyy riittävästi ja siirtymä on hyvinvoinnin kannalta riittävän nopea.

Lopuksi on vielä tärkeä havaita, miten EROI reagoi optimaaliseen energiapolitiikkaan. Koska ehtymisvero madaltaa fossiilienergian kumulatiivista tuotantoa, ei EROI pääse laskemaan sosiaalisessa optimissa yhtä paljon vaan pysyy melko stabiilina kääntymisen lopulta taas nousee. Lisäksi vero itsessään kannustaa talouden toimijoita säästämään energiaa, koska käyttöenergian hinta veron myötä nousee. Myös innovoinnin optimaalisemman allokaation takia kokonaistalouden EROI pysyy korkeammalla tasolla. Varsinkin kun energialähteiden välinen substituuutio on heikkoa, on EROI:n tason ero markkinatasapainoon hyvin merkittävä.

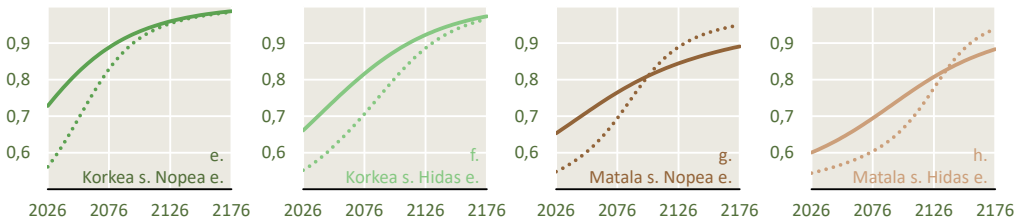
Kuvio 4.7

Mallin keskeisten muuttujien kehitys

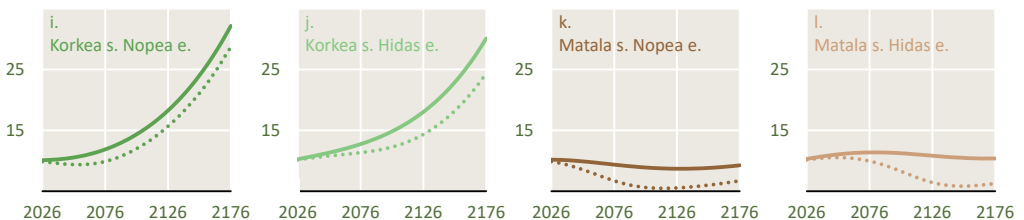
I. Fossiilipolttoaineiden tuotanto



II. Puhtaan innovoinnin osuus



III. Talouden EROI



Lähde: Kirjoittajan laskelmat. Pisteiviiva kuvaa markkinatasapainoa ja yhtenäinen talouden optima.

Johtopäätökset

Tässä luvussa on luotu linkki endogeenisen kasvuteorian, suunnatun teknologisen kehityksen mallien ja nettoenergia-analyysin välille. Vaikka nettoenergia-analyysi edustaa hyvin erilaista, biofysikaalista lähestymistapaa energia-alan ilmiöihin, on sen intuitiiviset konseptit kuten EROI ja nettoenergia helppo integroida moderniin makrotaloudelliseen malliin. EROI osoittautuu hyödylliseksi työkaluksi tutkittaessa vihreään siirtymään liittyvää makrotaloudellista dynamiikkaa ja optimaalista energiapolitiikkaa.

Öljyhuippuun liittyvän kiistelyn laannuttua on nettoenergia-analyysi nostanut esille monenlaisia öljyhuippua vastaavia uhkakuvia. Ensinnäkin energian tarjontaa hallitsevan fossiilienergian EROI:n laskun on pelätty vähentävän käytössä olevan nettoenergian määrää jyrkkenevästi ja syrjäyttävän muuta taloudellista toimintaa voimakkaasti. Koska joidenkin uusiutuvien energialähteiden EROI on arvioitu hyvin matalaksi, on tämän takia pelätty syvää taloudellista taantumaa ja äärimmillään jopa jonkinlaista yhteiskunnallista romahdusta määrätyllä aikavälillä. Toisaalta on pelätty sitä, että puhtaiden energialähteiden tarjoama nettoenergian määrä on niin niukka, että päästöt lisääntyvät, kun puhtaan teknologian tarjontaa pyritään tukemaan ja lisäämään ennen kuin niiden teknologia on riittävän korkealla tasolla.

Taloustieteellisten ja erityisesti suunnatun teknologisen kehityksen mallien suuri etu on siinä, että ne tarjoavat hyödyllisen viitekehityksen tutkia markkinoiden kannusteiden muutoksia yli ajan ja mallintaa talouden toimijoiden käyttäytymisen dynaamisia muutoksia näiden kannusteiden muuttuessa. Siten kyseiset mallit tarjoavat energia-analyysia nyansoidumman tavan tutkia nettoenergia-analyysin esille nostamia taloudellisia uhkakuvia, jotka eivät itsessään ole täysin perusteettomia. Taloustieteellisten mallien tuoma lisä nettoenergia-analyysiin on myös erityisesti tuotantopanosten *substituution* huomioiminen. Harvoja panoksia käytetään yli ajan kiinteässä suhteessa, vaan panoksia voidaan useimmiten korvata toisillaan ainakin joissain määrin. Siksi eri energialähteiden EROI ei ole pelkästään puhtaasti teknologian tasoa kuvaava muuttuja, vaan siihen vaikuttavat energiantuotannossa käytettyjen muiden tuotantopanosten suhteelliset hinnat sekä esimerkiksi energian verotus.

Tämän takia nettoenergia-analyysin mainitsemat uhkakuvat toteutuvat suunnatun teknologisen kehityksen mallissa ainoastaan hyvin äärimmäisillä parametrioletuksilla ja muuttujien alkuarvoilla. Monet riskeistä realisoituvat vain, jos EROI putoaa äärimmäisen alas, esimerkiksi alle kahden, ja jos samalla eri energialähteiden välinen substituutio on hyvin heikkoa. Monen uusiutuvan energialähteen EROI:sta saadut estimaatit antavat kuitenkin huomattavasti toiveikkaampia arvioita kuin aiemmin, ja pidemmällä aikavälillä fossiilienergian korvaaminen uusiutuvalla energialla oletettavasti helpottuu. Fossiilienergian EROI:n lasku myös kannustaa luontaisesti innovointia siirtämään painopisteen yhä vahvemmin kohti puhdasta energiaa, mikä todennäköisesti nopeuttaa puhtaan energian EROI:n kasvua entisestään. Malliin ei myöskään sisälly ajatusta siitä, että talouden ja hyvinvoinnin kasvu edellyttäi-

si jonkin tietyn alarajan ylittävää EROI:n arvoa. Sitä vastoin EROI:n marginaalisilla muutoksilla on itse asiassa sitä suurempi vaikutus hyvinvointiin, mitä matalammalla tasolla se taloudessa on.

Vaikka luku on antanut nettoenergia-analyysejä optimistisemmän kuvan vihreän siirtymän mahdollisuuksista, sisältyy aiheeseen kuitenkin vielä lukuisia käsittelemättä jääneitä yksityiskohtia. Ensinnäkin uusiutuvan energian tuotantoon liittyy yhtä lailla geologisia rajoitteita, sillä niihin liittyvä teknologia tällä hetkellä hyödyntää lukuisia niukkoja mineraaleja. Koska näiden mineraalien louhinnan energiaintensiteetti kasvaa kuten fossiilienergiankin tuotannossa (kuviot 4.2), voi samankaltainen paine energiaintensiteetin kasvulle koskettaa myös puhtaan energian sektoria. Toinen puhtaan energian skaalatuottoja ja EROI:n tasoa laskeva tekijä on sijainti: esimerkiksi tuulivoiman ja aurinkoenergian skaalatuottoja laskee se, että optimaaliset voimaloiden sijainnit hyödynnetään ensimmäisenä (esim. Dale ym., 2011; Honnery & Moriarty, 2009).

Malli jättää myös huomiotta niin kutsutun innovoinnin ekstensiivisen marginaalin eli sen, päättääkö tutkija ylipäänsä innovoida vai hakeutuuko esimerkiksi palkkatyöhön. Toisaalta myös muu talous kilpailee samoista tutkijoista kuin energiassektori, joten innovointi voi suuntautua itse asiassa lukuisille muillekin aloille, kuten energiatehokkuuteen tai muihin talouden teknologioihin. Lisäksi on selvää, että innovaatiot ”läikkyvät” myös toimialojen välillä.

Lopuksi on tärkeää huomioida, että kaikki energia ei luonnollisestikaan ole ominaisuuksiltaan samankaltaista. Toiset energialähteet vaihtelevat saatavuudeltaan (kuten tuuli- ja aurinkoenergia) ja toiset tarjoavat säätövirtaa (kuten polttoaineet ja vesivoima). Näiden hyvin erilaisten energian muotojen käsitteleminen yhtenä yksittäisenä tuotantopanoksena voi olla ongelmallista.

Suositukses

Kun energiasiirtymän tarkastelun painopiste on fossiilivarantojen tyhjenemisen vaikutuksissa energian tarjontaan, ei optimaalisen energiapolitiikan arvioinnissa vaadita erikseen oletuksia siitä, millä mekanismilla päästöt varsinaisesti vaikuttavat taloudelliseen tuotantoon ja hyvinvointiin. Numeeristen simulaatioiden avulla käy ilmi, että optimaalisen energiapolitiikan rakenne tässä tapauksessa on hyvin lähellä tilannetta, jossa painopisteenä ovat päästöjen ympäristövaikutukset: optimaalinen energiapolitiikka nojaa kummassakin tapauksessa fossiilisen energian verotukseen ja puhtaan energian innovaatiotukeen. Nämä instrumentit saavat optimissa talouden siirtymään puhtaasiin energialähteisiin huomattavasti markkinatasapainoa nopeammin ja vähentävät fossiilienergian kumulatiivista tuotantoa.

Jos eri energialähteet ovat heikommin toisiaan korvaavia, on energiapolitiikan painopiste voimakkaammin fossiilienergian verotuksessa, mutta kun energialähteet korvaavat toisiaan helpommin, on painopiste puhtaan energian innovaatiotuissa. Optimaalisen energiapolitiikan eräänä tärkeänä tavoitteena voidaan nähdä talouden

EROI:n pitäminen mahdollisimman korkealla tasolla, jolloin energiantuotanto syrjäyttää mahdollisimman vähän muuta tuotantoa.

Yhteiskunnallisesti polarisoituneena aikana on erityisen huomionarvoista, että optimaalinen energiapolitiikka on hyvin samansuuntaista riippumatta siitä, oletetaanko päästöillä olevan hyvinvointivaikutuksia. Näin ollen on sekä taloudellisesti että ympäristöllisesti järkevää kannustaa markkinoita vallitsevaa nopeampaan siirtymään kohti puhdasta energiaa, koska vihreällä siirtymällä näyttää olevan myös kulutukseen positiivinen vaikutus kohtuullisen lyhyellä aikavälillä. Koska aiemmassa luvussa esiteltyt simulaatiot jättivät huomiotta ympäristövaikutukset, voidaan niiden tulokset ymmärtää myös eräänlaiseksi optimaalisen verotuksen ja innovaatiopolitiikan tason minimirajaksi. Poliittisen taloustieteen näkökulmasta innovaatiotuen voidaan kuitenkin olettaa olevan suotuisampi painopiste.

On huomioitava, että vaikka nopeampi vihreä siirtymä on useimmissa alan malleissa nykytilaa parempi vaihtoehto, voi siirtymä olla kuitenkin myös ”liian” nopea. Sosiaalisesti optimaalinen allokaatio ottaa huomioon lukuisia erilaisia asioita yli ajan, kuten nykyisen hyvinvoinnin, tulevan hyvinvoinnin, ympäristön tilan ja kulutuksen tason. Ennen kuin vihreät teknologiat ovat riittävällä tasolla, ei välitön ja täydellinen siirtymä puhtaaseen energiaan välttämättä kannata, koska positiivinen vaikutus ympäristöön tai fossiilivarantojen riittävyyteen ei aina riitä kompensoimaan mahdollista negatiivista vaikutusta nykyiseen kulutuksen tasoon, koska siirtymä on niin resurssi-intensiivinen. Toisaalta on myös järkevää ylläpitää jonkin verran innovointia fossiilienergiiaan liittyen niin kauan, kun talous ja hyvinvointi osittain siihen nojautuvat. Keskeistä on se, miten tulevaisuuden kulutusta arvostetaan suhteessa nykyiseen kulutukseen.

Taloutta ja energian tarjontaa on usein syytä ajatella biofysikaalisena systeeminä, jossa energia virtaa talouden sektorilta toiselle. Tärkeää on huomioida, pystyykö kukin puhdas energialähde tuottamaan yhteiskunnalle riittävästi käyttöenergiaa suhteessa energialähteen omaan hiilijalanjälkeen. Esimerkiksi uusiutuvaa säätövirtaa tarjoavat biopolttoaineet ja vety ovat vielä toistaiseksi hyvin energiaintensiivisiä, joten niiden hiilijalanjälki saattaa tiettyjen tuotantotapojen kohdalla olla merkittävä. Siten energia-ala voi olla erityisen herkkä katteettomille lupauksille uusien teknologioiden oletetusta vihreydestä.

Havaintoja

- Fossiilienergiaa on maaperässä edelleen hyvin runsaasti.
- Fossiilienergian ja uusiutumattomien luonnonvarojen tuotanto kuitenkin syrjäyttää jatkuvasti enemmän energiaa ja resursseja muulta taloudelta. Näiden alojen resurssitarpeen ei voida enustaa vain pysyvän vakiona, ja tällä on makrotaloudellisia seurauksia.
- Nettoenergia-analyysin esittämät synkimmät uhkakuvat ovat intuitiivisia, mutta eivät kuitenkaan välttämättä kestä taloustieteellistä tarkastelua.
- Optimaalinen energiapolitiikka, joka esitellyssä mallissa nojaa fossiilienergian verotukseen ja puhtaan energian innovaatiotukiin, madaltaa fossiilienergian tuotannon huippua ja pysäyttää EROI:n liiallisen laskun.
- Optimaalisen energiapolitiikan rakenne on samanlainen riippumatta siitä, oletetaanko päästöjen vaikuttavan hyvinvointiin vai ei.
- Mitä nopeammin fossiilienergian tuotannon energiaintensiteetin voidaan olettaa kasvavan, sitä enemmän tarvitaan puhtaaseen energiaan liittyvää innovointia jo nyt.
- Markkinatasapainoa nopeampi siirtymä puhtaaseen energiaan on myös tulevan kulutuksen kannalta järkevää.

Suosituksia

- Fossiilienergiaa korvaavien energialähteiden EROI:n arvioiminen on tärkeää, kun näihin liittyvää tukipolitiikkaa suunnitellaan.
- Energiapolitiikan painopisteen on oltava sitä vahvemmin puhtaan energian innovointia tukevis- sa toimenpiteissä hiiliverojen sijaan, mitä helpommin fossiilienergia on korvattavissa puhtaalla energialla.
- Jos fossiilienergia ei ole helposti korvattavissa puhtaalla energialla, nousee fossiilienergian opti- maalinen vero asteittain vuosikymmenten kuluessa.
- Puhtaan innovoinnin tukeminen puhtaan energian suoran tuotanto- tai hintatuen sijaan on te- hokkaampi vaihtoehto.
- Energiapolitiikkaa suunnitellessa ei tule liiaksi pelätä vihreän siirtymän negatiivisia vaikutuksia ku- lutukseen, sillä siirtymä voi mahdollistaa korkeamman kulutuksen tason jo suhteellisen lyhyellä aikavälillä.

Lähteet

- Aalto, E. (2023). Net Energy and Directed Technical Change. Unpublished manuscript.
- Acemoglu, D. (1998). Why Do New Technologies Complement Skills? Directed Technical Change and Wage Inequality. *The Quarterly Journal of Economics* 113 (4), 1055–1089. <http://www.jstor.org/stable/2586974>
- Acemoglu, D. (2002). Technical Change, Inequality, and the Labor Market. *Journal of Economic Literature* 40 (1), 7–72. <http://www.jstor.org/stable/2698593>
- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L. & Hémous, D. (2012). The Environment and Directed Technical Change. *American Economic Review* 102 (1), 131–66. <https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131>
- Acemoglu, D., Akcigit, U., Hanley, D. & Kerr, W. (2016). Transition to Clean Technology. *Journal of Political Economy* 124 (1), 52–104. <https://doi.org/10.1086/684511>
- Aghion, P., Hepburn, C., Teytelboym, A. & Zenghelis, D. (2014). Path dependence, Innovation and the Economics of Climate Change. Contributing Paper to the New Climate Economy, Centre for Climate Change Economics and Policy, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment. https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2014/11/Aghion_et_al_policy_paper_Nov20141.pdf
- Aguilera, R. F., Eggert, R. G., Lagos G. C. C. & Tilton, J. E. (2012). Is Depletion Likely to Create Significant Scarcities of Future Petroleum Resources? Teoksessa Sinding-Larsen, R. & Wellmer, F.-W. (Eds.), *Non-Renewable Resource Issues: Geoscientific and Societal Challenges*, 45–82. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8679-2_4
- Alcott, B. (2005). Jevons' paradox. *Ecological Economics* 54 (1), 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.020>
- André, F. J. & Smulders, S. (2014). Fueling growth when oil peaks: Directed technological change and the limits to efficiency. *European Economic Review* 69, 18–39. <https://doi.org/10.1016/j.eurocorev.2013.10.007>
- Bardi, U. (2019). Peak oil, 20 years later: Failed prediction or useful insight? *Energy Research & Social Science* 48, 257–261. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.09.022>
- Brockway, P., Owen, A., Brand Correa, L. I. & Hardt, L. (2019). Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources. *Nature Energy* 4, 612–621. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0425-z>
- Campbell, C. J. & Laherrère, J. H. (1998). The End of Cheap Oil. *Scientific American* 278 (3), 78–83. <https://www.jstor.org/stable/26057708>
- Capellán-Pérez, I., de Castro, C. & Miguel González, L. J. (2019). Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews* 26, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>
- Casey, G. (2023). Energy Efficiency and Directed Technical Change: Implications for Climate Change Mitigation. *The Review of Economic Studies* 91(1), 192–228. <https://doi.org/10.1093/restud/rdad001>

- Covert, T., Greenstone, M. & Knittel, C. R. (2016). Will We Ever Stop Using Fossil Fuels? *Journal of Economic Perspectives* 30 (1), 117–38. <https://doi.org/10.1257/jep.30.1.117>
- Dale, M., Krumdieck, S. & Bodger, P. (2011). Net energy yield from production of conventional oil. *Energy Policy* 39 (11), 7095–7102. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.021>
- Dasgupta, P. & Heal, G. (1974). The Optimal Depletion of Exhaustible Resources. *The Review of Economic Studies* 41, 3–28. <https://www.jstor.org/stable/2296369>
- Delannoy, L., Longaretti, P.-Y., Murphy, D. J. & Prados, E. (2021a). Peak oil and the low-carbon energy transition: A net-energy perspective. *Applied Energy* 304, 117843. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117843>
- Delannoy, L., Longaretti, P.-Y., Murphy, D. J. & Prados, E. (2021b). Assessing Global Long-Term EROI of Gas: A Net-Energy Perspective on the Energy Transition. *Energies*, 14(16), 5112. <https://doi.org/10.3390/en14165112>
- Diesendorf, M. & Wiedmann, T. (2020). Implications of Trends in Energy Return on Energy Invested (EROI) for Transitioning to Renewable Electricity. *Ecological Economics* 176, 106726. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106726>
- Di Felice, L., Ripa, M. & Giampietro, M. (2018). Deep Decarbonisation from a Biophysical Perspective: GHG Emissions of a Renewable Electricity Transformation in the EU. *Sustainability* 10, 3685. <https://doi.org/10.3390/su10103685>
- Dumas, J., Dubois, A., Thiran, P., Jacques, P., Contino, F., Cornélusse, B. & Limpens, G. (2022). The Energy Return on Investment of Whole-Energy Systems: Application to Belgium. *Biophysical Economics and Resource Quality* 7 (4), 1–34. <https://doi.org/10.1007/s41247-022-00106-0>
- Dupont, E., Germain, M. & Jeanmart, H. (2021). Feasibility and Economic Impacts of the Energy Transition. *Sustainability* 13 (10), 5345. <https://doi.org/10.3390/su13105345>
- Fischer, C. & Newell, R. G. (2008). Environmental and technology policies for climate mitigation. *Journal of Environmental Economics and Management* 55 (2), 142–162. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2007.11.001>
- Fizaine, F. & Court, V. (2016). Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society. *Energy Policy* 95, 172–186. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.039>
- Fried, S. (2018). Climate Policy and Innovation: A Quantitative Macroeconomic Analysis. *American Economic Journal: Macroeconomics* 10 (1), 90–118. <https://doi.org/10.1257/mac.20150289>
- Giampietro, M., Mayumi, K. & Sorman, A. (2012). *Energy Analysis for a Sustainable Future: Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism* (First ed.). London: Routledge.
- Gillingham, K., Rapson, D. & Wagner, G. (2016). The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy. *Review of Environmental Economics and Policy* 10 (1), 68–88. <https://doi.org/10.1093/reep/rev017>
- Golosov, M., Hassler, J., Krusell, P. & Tsyvinski, A. (2014). Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium. *Econometrica* 82 (1), 41–88. <https://doi.org/10.3982/ECTA10217>
- Greaker, M., Heggedal, T.-R. & Rosendahl, K. E. (2018). Environmental policy and the direction of technical change. *The Scandinavian Journal of Economics* 120 (4) 1100–1138. <https://doi.org/10.1111/sjoe.12254>

- Guevara-Ramirez, W., Martinez-de Alegria, I. & Rio-Belver, R. M. (2023). Evolution of the conceptualization of hydrogen through knowledge maps, energy return on investment (EROI) and national policy strategies. *Clean Technologies and Environmental Policy* 25 (1), 69–91. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02388-w>
- Hall, C. A., Lambert, J. G. & Balogh, S. B. (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy* 64, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>
- Hall, C. A. S., Cleveland, C. J. & Kaufmann, R. (1986). *Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process*. New York, NY: John Wiley and Sons.
- Hart, R. (2019). To everything there is a season: Carbon pricing, research subsidies, and the transition to fossil-free energy. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 6 (2), 135–175. <https://doi.org/10.1086/701805>
- Hassler, J., Krusell, P. & Olovsson, C. (2021). Directed Technical Change as a Response to Natural Resource Scarcity. *Journal of Political Economy* 129 (11), 3039–3072. <https://doi.org/10.1086/715849>
- Helm, D. (2011). Peak oil and energy policy—a critique. *Oxford Review of Economic Policy* 27 (1), 68–91. <https://www.jstor.org/stable/43741262>
- Honnelly, D. & Moriarty, P. (2009). Estimating global hydrogen production from wind. *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (2), 727–736. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.001>
- Hotelling, H. (1931). The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy* 39 (2), 137–175. <https://www.jstor.org/stable/1822328>
- Hubbert, M. K. (1956). *Nuclear Energy and the Fossil Fuels*. Houston: Shell Development Company, Exploration and Production Research Division.
- IEA (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- IEA (2022). *World Energy Outlook 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- IEA (2023). Energy and Emissions per Value Added Database. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-and-emissions-per-value-added-database>
- King, L. C. & van den Bergh, J. C. J. M. (2018). Implications of net energy-return-on-investment for a low-carbon energy transition. *Nature Energy* 3 (4), 334–340. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0116-1>
- Lambert, J., Hall, C. Balogh, S., Gupta, A. & Arnold, M. (2014). Energy, EROI and quality of life. *Energy Policy* 64, 153–167. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.001>
- Lemoine, D. (2021). Innovation-led Transitions in Energy Supply. Working Paper 23420, National Bureau of Economic Research. https://www.nber.org/system/files/working_papers/w23420/w23420.pdf
- Lemoine, D. & Traeger, C. (2014). Watch Your Step: Optimal Policy in a Tipping Climate. *American Economic Journal: Economic Policy* 6 (1), 137–66. <https://www.jstor.org/stable/43189369>
- Mio, A., Barbera, E. A., Pavan, M., Danielis, R., Bertuccio, A. & Fermeiglia, M. (2023). Analysis of the energetic, economic, and environmental performance of hydrogen utilization for port logistic activities. *Applied Energy* 347, 121431. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121431>

- Murphy, D. J. (2014). The implications of the declining energy return on investment of oil production. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 372 (2006), 20130126. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0126>
- Murphy, D. J., Raugei, M., Carbajales-Dale, M. & Rubio Estrada, B. (2022). Energy Return on Investment of Major Energy Carriers: Review and Harmonization. *Sustainability* 14 (12), 7098. <https://doi.org/10.3390/su14127098>
- OECD (2022). *OECD Economic Outlook*, Volume 2022 Issue 2. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/16097408>
- Pahud, K. & De Temmerman, G. (2022). Overview of the EROI, a tool to measure energy availability through the energy transition. Teoksessa 2022 8th International Youth Conference on Energy (IYCE). <https://doi.org/10.1109/IYCE54153.2022.9857542>
- Palmer, G. (2019). Renewables rise above fossil fuels. *Nature Energy* 4 (7), 538–539. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0426-y>
- Papageorgiou, C., Saam, M. & Schulte, P. (2017). Substitution between Clean and Dirty Energy Inputs: A Macroeconomic Perspective. *The Review of Economics and Statistics* 99 (2), 281–290. https://doi.org/10.1162/REST_a_00592
- Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F., Popp, A., Hertwich, E. G. & Luderer, G. (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy* 2 (12), 939–945. <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0032-9>
- Pindyck, R. S. (1978). The Optimal Exploration and Production of Nonrenewable Resources. *Journal of Political Economy* 86 (5), 841–861. <https://www.jstor.org/stable/1828412>
- Popp, D. (2006). R&D subsidies and climate policy: Is there a “free lunch”? *Climatic Change* 77 (3), 311–341. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9056-z>
- Prananta, W. & Kubiszewski, I. (2021). Assessment of Indonesia’s Future Renewable Energy Plan: A Meta-Analysis of Biofuel Energy Return on Investment (EROI). *Energies* 14, 2803. <https://doi.org/10.3390/en14102803>
- Pretis, F., Hepburn, C., Pfeiffer, A. & Teytelboym, A. (2023). Are We Running Out of Exhaustible Resources? SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4457854>
- Raugei, M. (2019). Net energy analysis must not compare apples and oranges. *Nature Energy* 4 (2), 86–88. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0327-0>
- Schwerhoff, G. & Stuermer, M. (2015). Non-renewable resources, extraction technology, and endogenous growth. Working Paper 1506, Federal Reserve Bank of Dallas. <https://doi.org/10.24149/wp1506r1>
- Sers, M. R. & Victor, P. A. (2018). The Energy-emissions Trap. *Ecological Economics* 151, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.004>
- Slade, M. E. (1982). Trends in natural-resource commodity prices: An analysis of the time domain. *Journal of Environmental Economics and Management* 9 (2), 122–137. [https://doi.org/10.1016/0095-0696\(82\)90017-1](https://doi.org/10.1016/0095-0696(82)90017-1)

- Slameršak, A., Kallis, G. & O'Neill, D. W. (2022). Energy requirements and carbon emissions for a low-carbon energy transition. *Nature Communications* 13 (1), 6932. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33976-5>
- Taylor, M. (2020). Energy subsidies: Evolution in the global energy transformation to 2050. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_Energy_subsidies_2020.pdf?rev=123c8d330f694d53b26a43d43684204b