

# Suunnattu innovaatiotoiminta osana vihreää kasvua

7

## Tiivistelmä

Satojen vuosien teollinen historia on suosinut ympäristöä rasittavia teknologioita. Markkinavaikutuksien ja polkuriippuvuuksien takia tällä hetkellä harjoitettavan innovaatiotoiminnan painotus on vääristynyt. Markkinoilla muodostuvat hinnat eivät ole heijastelleet tuotannon kaikkia ulkoisvaikutuksia ja niihin liittyviä sosiaalisia kustannuksia.

Yksityisen innovaatiotoiminnan kääntäminen paremmin vihreää kasvua tukeväksi edellyttää selvästi suuntaavaa innovaatiopolitiikkaa ja siitä, että tämän politiikan tulee kytkeytyä sitä tukevaan muuhun ympäristöpolitiikkaan. Esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen verotuksen tai päästökaupan myötä tapahtuvan ulkoisvaikutusten sisäistämisen ensisijainen tarkoitus on nostaa päästöintensiivisten tuotteiden ja palveluiden hintoja ja siten vähentää niiden kysyntää.

Kirjallisuuden perusteella näyttää selvältä, että hintavaikutusten lisäksi päästökauppa ja päästöjen verotus lisäävät vähähiilisten ratkaisujen innovaatiotoimintaa, mikä entisestään voimistaa näiden politiikkatoimien tavoiteltua vaikutusta. Tästä huolimatta vaikuttaa siltä, että yksinomaan negatiivisten ympäristövaikutusten sisäistämisen kautta tulevat yksityiset kannustimet vihreälle innovaatiotoiminnalle eivät riitä, vaan lisäksi tarvitaan vihreään suuntaan ohjaavaa innovaatiopolitiikkaa.

Laajassa mielessä vihreän innovaatiopolitiikan vaikuttavuudessa on kyse maailmanlaajuisista elinkaarivaikutuksista ympäristöön. Kansallisesti on kyse myös yritysten ja toimialojen kilpailukyvästä vihreiden tuotteiden ja palveluiden tarjoajina. Sekä ympäristön että talouden, kotimaisten yritysten kilpailukyvyn, näkökulmasta näyttää houkuttelevalta olla mahdollisimman aikaisin vasta nousemassa olevilla teknologia-alueilla. Tosin, kuten tiedetään, keskeisten nousevien teknologioiden tunnistaminen etukäteen on vaikeaa, koska parhaat teknologiat seuloituvat monien kokeilujen ja markkinavalikoitumisen myötä.

Suosittelava lähdeviittaus tähän lukuun:

**Rouvinen**, Petri ja **Deschryvere**, Matthias (2024). *Suunnattu innovaatiotoiminta osana vihreää kasvua*. Luku 7 (sivut 149–168) 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>

## Petri Rouvinen

on Elinkeinoelämän tutkimuslaitoksen Etlan tutkimusneuvonantaja.

## Matthias Deschryvere

on Teknologian tutkimuskeskus VTT:n senioritutkija.

## Vihreä siirtymä ei onnistu ilman teknologisia läpimurtoja

Aghion ym. (2022, s. 1) toteavat, että ”Pariisin ilmastopimuksen tavoitteiden saavuttaminen edellyttää vallankumousta ilmastomuutosta sivuavissa teknologioissa.”<sup>1</sup> Kansainvälinen energiajärjestö IEA:n (2021, s. 15) mukaan ”... vuoteen 2050 mennessä lähes puolet [kasviuonekaasujen] vähennyksistä tulee teknologioista, jotka ovat tällä hetkellä vasta demonstraatio- tai prototyypivaiheessa. Tämän vuosikymmenen [2020-luvun] aikana on toteutettava merkittäviä innovaatioponnistuksia, jotta nämä uudet teknologiat saadaan markkinoille ajoissa.”<sup>2</sup> Acemoglu (2023) päätti taloustieteen vuosittaisessa päätapahtumassa pitämänsä kunnialuennon toteamalla, että meidän ”täytyy ajatella uudelleen [yksityisten] markkinoiden taikuutta, mitä tulee teknologiseen kehitykseen.”

Pureudumme tässä luvussa suunnatun teknologisen kehityksen tutkimuskirjallisuuteen siltä osin, kun se sivuaa vihreää kasvua.

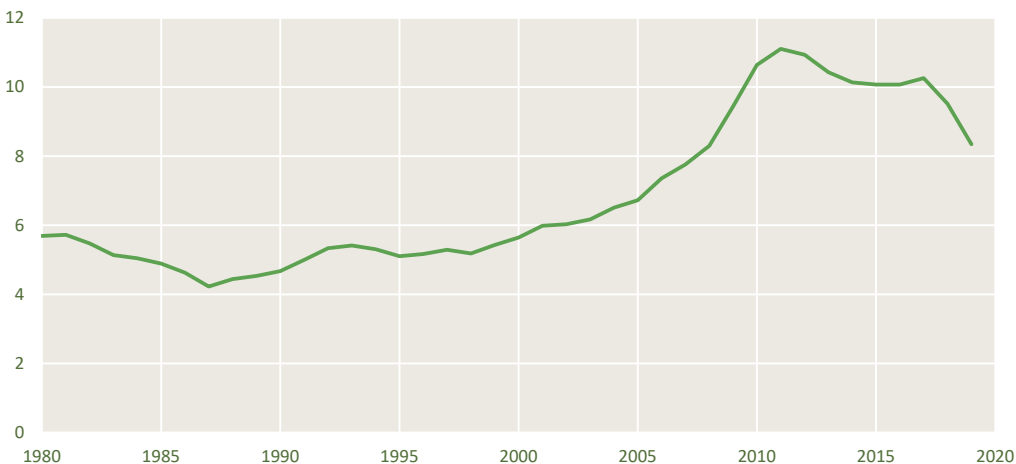
Vihreä siirtymä on oikeutetusti yhteiskunnallisen keskustelun kestoaiheita kaikkialla maailmassa. Niinpä saatamme ajatella, että siirtymää tukeva innovaatiotoiminta pitää huolta itsestään. Näin ei kuitenkaan näytä olevan (ks. kuvio 7.1).

Tavaroiden ja palveluiden loppumarkkinoilla vihreitä vaihtoehtoja edistävät ja ruskeita vaihtoehtoja haittaavat toimet tukevat loppumarkkinoilla tapahtuvaa kilpailua edeltävässä vaiheessa harjoitettavaa tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoimintaa (johon jatkossa viittaamme tki- tai vain innovaatiotoimintana).

Tämän luvun kirjallisuus viittaa kuitenkin siihen, ettei loppumarkkinakysynnän ja -hintojen kautta tuleva vaikutus yksinään riitä – lisäksi tarvitaan vihreän innovaatiotoi-

Kuvio 7.1

### Vihreiden osuus kaikista maailman patenteista, %



Lähde: Hasna ym. (2023, Figure 1, vasen, josta PF1-patentit; alkuperäisenä aineistolähteenä PATSTAT).

*minnan suoraa tukemista.* Perusteluina tähän ovat (a) kaikkeen tki-toimintaan liittyvät tiedolliset ulkoisvaikutukset ja rahoitusmarkkinapuutteet sekä (b) ruskeiden teknologioiden pitkästä etumatkasta kumpuavat polkuriippuvuudet.

Gugler ym. (2024, s. 2)<sup>3</sup> kvantifioivat, miten eri politiikkojen yhteispeli menee: ”... kaikki kolme tarkasteltua politiikkaa – ympäristöverot, ympäristöregulaatio ja vihreille teknologioille suunnattu t&k-tuki – ohjaavat innovaatiotoimintaa merkittävästi vihreän patentoinnin suuntaan. Toimialaan kohdistuvien ympäristöverojen tuplaaminen lisää vihreää patentointia 6,7 %. Toimialaan kohdistuvan ympäristöregulaation tiukkuuden tuplaaminen lisää vihreää patentointia 16,4 %. Julkisten t&k-tukien tuplaaminen lisää vihreää patentointia 9 %. T&k-verohelpotuksen kasvattaminen 1 prosenttiyksiköllä lisää vihreiden patenttihakemusten lukumäärää 0,3 %.”

”Optimiratkaisu on intensiivinen puhtaiden ratkaisujen tutkimus-periodi yhdistettynä hiiliveroon ja puhtaan tutkimuksen julkisiin tukiin.” Wiskich (2024, s. 1)

Vihreä innovaatio- ja muu ympäristöpolitiikka siis täydentävät toisiaan. Kirjallisuuden perusteella markkinapohjaiset politiikkainterventiot (kuten päästökauppa) täydentävät ei-markkinapohjaisia (kuten ruskeiden ratkaisujen kieltö) paremmin vihreää innovaatiopolitiikkaa.

Tämä on intuitiivisesti ymmärrettävää, sillä markkinapohjaiset instrumentit ovat usein laaja-alaisempia, niissä on sisäänrakennettuna keppi ja porkkana (siinä missä esim. kieltö tarjoaa pelkkää keppiä), ja ne ohjautuvat luontevammin innovaatiotoiminnan harjoittamista tehokkaimmille toimijoille.

Erityisesti vihreän kasvun tapauksessa on syytä miettiä myös ylikansallisia linkkejä. Päästökauppa muuta maailmaa korkeammilla hinnoilla saattaa edellyttää rajakompensaatiomekanismin käyttöönottoa, kuten EU parhaillaan tekeekin. Innovaatiopolitiikan osalta Martin ja Verhoeven (2023) havaitsevat, että globaalilla tasolla vihreän innovaatiotoiminnan tukemisen yhteiskunnallinen tuotto on kahdeksasosan muun innovaatiotoiminnan tukemista korkeampi. Innovaatiopolitiikan globaali koordinointi lisäisi näitä tuottoja 60 %.

Innovaatiotoimintaan liittyvien viiveiden takia teknologisen kehityksen suuntaamisessa ja siihen liittyvissä yhteiskunnallisissa ja poliittisissa päätöksissä on toimittava etupainotteisesti. Suomen kaltaisella pienellä avotaloudella pitäisi olla tähän erityisen voimakkaat kannustimet, koska vihreään innovaatiotoimintaan näyttää liittyvän, kuten myöhemmin tässä luvussa selitämme, voimakkaita polku- ja urariippuvuuksia.

Toisaalta päätöksentekoa jarruttavat epäselvyydet siitä, miten hyvinvointiyhteiskuntaa tukeva talouskasvu sopii yhteen niiden toimien kanssa, joita tarvitaan ilmastonmuutoksen pysäyttämiseksi ja talouskasvun kytkemiseksi irti ympäristökuormituksesta ja luonnonvarojen liikakäytöstä (ks. myös Hyytinen, 2022).

Siirtymäpuutteessa on kyse kaikille huonoon tilaan jumiutumuksesta.

## Ulkoisvaikutukset innovaatiopolitiikan keskeisimpänä perusteluna

Uusi idea on haastava taloudellinen hyödyke (Arrow, 1962). Se ei kulu käytössä ja sillä on taipumus levitä – tuottajansa näkökulmasta myös tahattomasti. Näiden ominaisuuksien takia ideoiden mahdollisimman laaja käyttö on yhteiskunnallisesti toivottavaa. Toisaalta ideoille saatavat yksityiset tuotot ovat yhteydessä siihen, että idea ei ole muiden hyödynnettävissä.

Yksityisten kannustimien ja yhteiskunnallisesti toivottavan käytön ristiriidasta seuraa se, että ilman erityisiä politiikkatoimia uusien ideoiden ja tiedon tuotanto jää liian vähäiseksi yhteiskunnallisesta näkökulmasta (ks. myös Takalo ym., 2021). Niinpä käytännössä kaikkien maailman maiden yhteiskuntapolitiikat puuttuvat monilla tavoilla uusien ideoiden markkinoihin: koulutus ja perustutkimus ovat julkisesti tuetuja; ideoille myönnetään väliaikaisia monopoleja tekijä- ja teollisoikeuksien muodossa; yksityisiä innovaatiotoiminnan harjoittajia kannustetaan lisäpanostuksiin julkisilla suorilla tuilla ja lainoilla sekä ylimääräisillä verovähennysoikeuksilla.

## Vihreän innovaatiotoiminnan markkinapuutteet

Tavanomaiseen verrattuna vihreä innovaatiotoiminta kohtaa ylimääräisen haasteen siltä osin, kun negatiivisiin ympäristövaikutuksiin liittyviä ulkoisvaikutuksia ei ole onnistuttu sisäistämään tai muutoin säätelemään. Niinpä mm. Jaffe ym. (2005) sekä OECD:n, Maailmanpankin ja YK:n (2018) yhteisjulkaisu puhuvatkin vihreän innovaatiotoiminnan **kaksois**markkinapuutteesta, johon vedoten suosituksena on poikkeuksellisen ohjaava ja laaja-alainen innovaatio- ja yhteiskuntapolitiikka.<sup>4</sup>

Yrityksissä innovaatiotoimintaa harjoittavat pääosin muualla oppinsa saaneet ihmiset ja monet yrityksissä syntyvät ratkaisut perustuvat vain rajatussa määrin yrityksen sisällä tuotettuun tietoon. Niinpä organisaation ulkopuolisella innovaatioympäristöllä on vaikutusta yrityksen sisäisiin päätöksiin ja tulemiin. Brown ym. (2022) tutkivat yrityksen innovaatiotoiminnan ”kaksia kasvoja” (Cohen & Levinthal, 1989, 1990) – yhtäällä itse innovointia ja toisaalla yrityksen ulkopuolelta oppimista – rikkidioksidipäästöjä koskevan regulaation tapauksessa. He havaitsivat, että regulaation tiukentuessa myös ne yritykset, jotka eivät tavoittele uusia innovaatioita lisäävät tutkimus- ja kehitystoimintaansa pystyäkseen vastaanottamaan lisääntyvää ulkopuolista tietoa.

Innovaatiotoimintaan liittyvät polku- tai urariippuvuudet innovaatioprosessin eri vaiheissa (Aghion ym., 2014): tutkijat työskentelevät niiden kysymysten parissa, joihin liittyvillä alueilla he ovat aiemminkin työskennelleet. Nämä alueet saattavat olla sellaisia, joihin on ollut hyvin saatavilla ulkopuolista rahoitusta ja joilla saa parhaiten tutkimusyhteisön tunnustusta.<sup>5</sup> Tutkimuksellista polkuriippuvuutta vahvistaa myös se, että aiemmin tuotettu tieto on uusien ideoiden raaka-aine ja se on myös konteksti-

Vihreää innovaatiotoimintaa vaivaa kaksoismarkkinapuute.

sidonnaista, jolloin se ruokkii parhaiten saman tai älyllisesti läheisen tutkimusalan kehitystä. Samanlaisia polkuriippuvuutta synnyttäviä ja vahvistavia vaikutuksia on myös sillä, että ideoiden soveltamisen nettohyödyt (ja siten yritysten innovointikannustimet) liittyvät niitä tukevan infrastruktuurin ja muutenkin otollisen käyttöympäristön olemassaoloon, ja sillä, että uusien ratkaisujen käyttöönottoon liittyy vaihtamiskustannuksia sekä mahdollisesti myös markkinoiden opettamista ja verkostovaikutuksia, jolloin käyttäjillä on taipumus pitäytyä vanhassa ja he haluavat hypätä vasta jo valmiiksi suosittuun ratkaisuun.

Teollisen vallankumouksen ensimmäiset kaksi ja puoli sataa vuotta ovat olleet ympäristöarvoja huomioiden ”ruskeiden” innovaatioiden aikaa. Niinpä vihreät innovaatiot lähtevät merkittävältä takamatkalta tavalla, jota meidän aikalaisten on vaikea edes hahmottaa, koska olemme kaikki kasvaneet ympäristössä ja olosuhteissa, joita teollinen historia on muokannut.<sup>6</sup> Niinpä kumuloitunut tieto ja käytännöt suosivat vahvasti nykyisiä elin- ja toimintatapojamme, jotka tiedämme ympäristön kannalta kestävämmiksi.

Weber ja Rohracher (2012) esittävät innovaatiotoiminnan markkina-, järjestelmä- ja siirtymäpuutteita tarkastelevan viitekehysten.<sup>7</sup> Siirtymäpuutteet (*transformational system failures*) ovat yhteydessä polku- ja urariippuvuuksiin ja viittaavat tilanteisiin, joissa sosioekonominen järjestelmä tai sen osa on juuttunut huonoon tasapainoon. Vaikka toinen olotila saattaisi olla jopa kaikkien osapuolten kannalta parempi, siihen ei päästä ilman ulkopuolelta tulevaa sysäystä. Tällaisessa tilanteessa yksi mahdollinen ratkaisu on missiolähtöinen innovaatiopolitiikka, jota esimerkiksi Mazzucato ym. (2020) käsittelevät. Toisaalta Bloom ym. (2019) tarkastelun mukaan pitävät näytöt missiolähtöisen politiikan tuloksellisuudesta ovat vähäisiä.<sup>8</sup> Weber ja Rohracher (2012) painottavat, että missiolähtöisissä prosesseissa julkinen valta toimii eräänlaisena moderaattorina sekä auttaa määrittelemään ja toteuttamaan sosiaalisesti hyväksyttävän siirtymäpolun parempaan tasapainoon. Julkisessa moderoinnissa on itsessään omat mittavat haasteensa (Cooper, 2005; Rodríguez-Clare ym., 2005; Sákovics & Steiner, 2012).

Schot ja Steinmueller (2018) huomauttavat, että markkina- ja järjestelmäpuuteajattelut sisältävät taustaoletuksen, että siirtymäpuutteet ratkeavat osana normaalia yhteiskunnallista kehitystä:

- Markkinapuuteajattelun ytimenä on tiedon ulkoisvaikutuksista ja informaatioepätäydellisyyksistä kumpuava yksityisen innovaatiotoiminnan yhteiskunnallisesta näkökulmasta liian alhainen taso.
- Järjestelmäpuuteajattelu painottaa puutteellista verkostoitumista (ja siihen liittyviä koordinaatio-ongelmia) ja siten mm. tiedon huonoa liikkuvuutta toimijoiden välillä.
- Siirtymäpuuteajattelu lähtee siitä, että ilman erityistoimia innovaatiotoiminta ei suuntaudu yhteiskuntaa parhaiten palvelevalla tavalla, ja haastaa siten markkina- ja järjestelmäpuuteajattelun keskeisen taustaoletuksen.

Ruskeilla innovaatioilla on 250 vuoden etumatka.

Siirtymäpuutteessa on kyse kaikille huonoon tilaan jumiutumista.

Vaikka missio-orientoituneeseen innovaatiopolitiikkaan liittyviä politiikkasuosituksia on identifioitu melko runsaasti, on epäselvää, millaiset innovaatiopoliittiset toimet tukisivat parhaiten laajaa yhteiskunnallista siirtymää. Schot ja Steinmueller (2018) väittävät, että tutkimustiedon tarjoama pohja on tältä osin lähes hyödytön; Faberberg (2018) ei ole aivan yhtä kriittinen mutta päätyy silti samaan johtopäätökseen.<sup>9</sup> Haddad ym. (2022) toteavat, että uusista rationaliteeteista on kyllä tutkimusta, mutta kirjallisuuden käytännön toiminnalle tarjoama työkalupakki on puutteellinen. Suomea koskien Pihlajamaa ja Merisalo (2021) käsittelevät missiopolitiikan käytännön toteutusta Tampereella.

Voidaankin ajatella, että OECD:n, Maailmanpankin ja YK:n (2018) tunnistaman vihreän innovaatiotoiminnan kaksoismarkkinapuutteen lisäksi päätöksenteon ja politiikkasuositusten pitäisi ottaa huomioon Weberin ja Rohracherin (2012) järjestelmä- ja siirtymäpuutteet. Järjestelmäpuute on parivertailussa enemmän nuoremman ja pienemmän teknologia-alueen taakka; päälukituksella vihreä-ruskea se koskee siis enemmän vihreää. Siirtymäpuutteessa on tässä kontekstissa kyse nimenomaan halusta syrjäyttää ruskea ja päätyä vihreään tasapainoon, joten tämä puutetyyppi koskee erityisesti vihreää innovaatiotoimintaa.

## Vihreän siirtymän innovaatiotoiminta tutkimuksen valossa

### Johdettu teknologinen kehitys

Taloustieteellisen tarkastelun perusajatuksena on, että suhteelliset hinnat johtavat innovaatioihin, joilla tähdätään suhteellisesti kalliimman tuotannon tekijän vähäisempään käyttöön (ks. Hicks, 1932, jossa korkeammat suhteelliset palkat johtavat ihmistyötä säästäviin laiteinvestointeihin). Tästä puolestaan seuraa johdettu (*induced*), suunnattu (*directed*) tai harhainen (*biased*) teknologinen kehitys.<sup>10</sup>

Koska esimerkiksi biologisen monimuotoisuuden väheneminen ja kasvihuonekaasujen synnyttäminen eivät ole olleet erikseen hinnoiteltuja panoksia ja tuotoksia, tähänastinen innovaatiotoiminta on käytännössä harhaantunut suuntaan, jossa näitä haittoja nimenomaan synnytetään. Toki näin tapahtuu vain siltä osin, kun tämä säästää jossain muussa varsinaisesti hinnoitellussa kehitys-, tuotanto- tai jättekustannuksessa.

Jos ja kun innovaatiotoiminnan panosten – käytännössä pitkälti paikallisesti saatavilla olevan soveltuvan työvoiman – tarjonta on ainakin lyhyellä aikavälillä joustamatonta, tuettaessa vihreän innovaatiotoiminnan laajentumista on mietittävä, mistä lisäpanokset ovat pois. Erityisen houkutteleva on tilanne, jossa ruskea innovaatiotoiminta vähenee, koska tämä ajan oloon nakertaa markkinoilla olevien ruskeiden ratkaisujen kilpailukykyä ja siten nopeuttaa vihreää siirtymää. Tilanteissa, jossa investoinnit vihreään innovaatio- ja muuhun toimintaan ovat vastakkain, investoinnit innovaatiotoimintaan voivat usein olla yhteiskunnallisesti toivottavampia niiden oletettavasti suurempien positiivisten ulkoisvaikutusten takia.

Pääosa innovaatiotoiminnan ulkoisvaikutuksia koskevasta tutkimuksesta on käytännössä tehty joko globaalista tai suuren talouden näkökulmasta. Suomen kaltaisten pienten avotalouksien kannalta keskeisiä ovat kansallisesti hyödyttävät läikkymis- ja ulkoisvaikutukset. Tosin vihreän innovaatiotoiminnan tapauksessa pienet maat hyötyvät myös ulkomaille valuvasta mutta kansallisesti tuotetusta uudesta tiedosta, jos se johtaa esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen vähentymiseen kansainvälisesti. Voitaneen kuitenkin sanoa, että pienen avotalouden tapauksessa on useimmiten (ellei peräti aina) niin, että innovaatiotoiminnan ylivoimaisesti keskeisin ulottuvuus on muualla tuotetusta tiedosta hyötyminen. Kyse on siitä, miten pieni talous voi hyötyä muissa maissa tuotetuista ideoista ja tiedosta (Hyytinen & Rouvinen, 2005). Silti myöhemmin tässä luvussa olevia tutkimustuloksia lukiessa on hyvä pitää mielessä, että innovaatiopolitiikan perusteluna on kansallisesti se, että yksityistä toimintaa tuetaan siinä suhteessa, kun se aiheuttaa kansallisia läikkymisvaikutuksia (Goulder & Schneider, 1999).

Suomen innovaatiopolitiikkaa motivoi kansalliset läikkymisvaikutukset.

Tämän luvun mielenkiinnon kohteena oleva teknologian kehitys on vain yksi ilmastomuutokseen liittyvistä rakenteellisista muutoksista. Ciarlin ja Savonan (2019) mukaan viisi muuta ovat: yritysraenteet, toimialat, työllisyys, loppukysyntä ja yhteiskunnalliset instituutiot. Integroitujen arviointimallien (*integrated assessment models*) ohella näitä muutoksia on analysoitu laskennallisilla yleisen tasapainon malleilla (*computable general equilibrium models*), keynesiläisillä ekologisilla makrotalousmalleilla (*Keynesian ecological macroeconomics models*) ja evolutionäärisillä agenttipohjaisilla malleilla (*evolutionary agent based models*). Mutta kuten Ciarli ja Savona (2019) toteavat, nämäkään mallit eivät käsittele ilmastomuutoksen ja teknologisen (tai muun) rakennemuutoksen suhdetta kovinkaan rikkaasti. Mikrotaloudellista rakennemuutosta käsitellessään Kuosmanen ja Maczulskij (2022) havaitsivat, että Suomessa kasvihuonekaasupäästöjen kohdentuminen yritysten kesken on tehotonta ja päästöjen suhteen yritysten välinen luova tuho ei siten näyttäisi toimivan (ks. myös Hyytinen, Maliranta ja Nippala tämän kirjan luvussa 6).

Grubb ym. (2021) käyvät systemaattisesti läpi energiatehokkuutta ja vähäisiä hiilidioksidipäästöjä sivuavan johdetun innovaatiotoiminnan (*induced innovation*) kirjallisuuden. Heidän keskeisimmät johtopäätöksensä ovat:

- Kaikki **kysyntä**puolen ”vetävät tekijät” (*demand-pull*), kuten fossiilisen energian korkea hinnat ja ilmakehään vapautuvien päästöjen hinnoittelu, lisäävät vihreää innovaatiotoimintaa. Tähän liittyen mutta nimenomaan hiilidioksidikaupan osalta van den Bergh ja Savin (2021) toteavat, että kysyntätekijöillä on ollut pienehkö positiivinen vaikutus vähähiiliseen innovaatiotoimintaan.
- Lähes kaikkien teknologioiden tapauksessa ja kaikilla ajanjaksoilla yksikkökustannukset laskevat teknologian soveltamisen – kumuloituvan investointikannan – lisääntyessä. Tässä syy–seuraus-suhde näyttää menevän nimenomaan suuren mittakaavan käyttöönnotosta aleneviin yksikkökustannuksiin, eikä toisinpäin.

- Kaiken kaikkiaan vihreän innovaatiotoiminnan vaikutukset ovat kumulatiivisia ja monitahoisia, ja sen suuntautumisen toimet ovat itseään vahvistavia (polkuriippuvia).

Grubb ym. (2021) periaatteessa kaikki tieteenalat kattava katsaus luo laajemman kontekstin seuraavassa tarkemmin käsiteltävälle lähinnä taloustieteelliselle kirjallisuudelle.

### Suunnatun teknologisen kehityksen tutkimuskirjallisuus

Lähinnä soveltuva teoreettinen viitekehys vihreän ja ruskean innovaatiotoiminnan vertailuun löytyy suuntautuvaa teknologista muutosta (*directed technological change*) käsittelevästä kirjallisuudesta (Acemoglu, 1998, 2002), jolla on läheinen yhteys uuteen-uuteen kasvuteoriaan (ks. luku 1).

Acemoglu ym. (2012) mallintavat likaisen (esim. fossiiliset polttoaineet) ja puhtaan (esim. uusiutuva energia) innovaatiotoiminnan vaikutuksia talouskasvuun. He osoittavat hintojen ja markkinakoon teknologista kehitystä ohjaavat vaikutukset. Heidän mallinsa mukaan innovaatiotoiminta kohdistuu suurempaan tai suhteellisesti kalliimpaan markkinaan. Silloin, kun innovaatiot ovat toisiaan korvaavia (Mattauch ym., 2015, käsittelevät substituutiovaikutuksia), kuten fossiilisen ja uusiutuvan energian tapauksessa, markkinakokovaikutus dominoi. Niinpä, ilman korjaavia politiikkatoimia, yksityinen innovaatiotoiminta suuntautuu liiaksi ympäristötuhoja aiheuttavan likaisen teknologian kehittämiseen, ja on mahdollista, että ilman julkista interventiota puhdas innovaatiotoiminta ei koskaan vilkastu riittävästi horjuttaakseen likaisen teknologian valta-asemaa. Koska innovaatiotoiminnan määrä on rajallinen ja koska likainen ja puhdas innovaatiotoiminta ovat toisiaan korvaavia, likaisen innovaatiotoiminnan

Ilman toimia yksityinen tki kohdistuu suurempaan ja kalliimpaan markkinaan.

riittävää horjuttaakseen likaisen teknologian valta-asemaa. Koska innovaatiotoiminnan määrä on rajallinen ja koska likainen ja puhdas innovaatiotoiminta ovat toisiaan korvaavia, likaisen innovaatiotoiminnan

suhteellisen osuuden kutistuminen toimii yhtenä puhtaan innovaatiotoiminnan julkisen tukemisen lisämotivaationa (Kivimaa ja Kern, 2016, ehdottavat, että puhtaan innovaatiotoiminnan tukemisen ohella luovaa tuhoa voisi kiihdyttää likaisten toimialojen toimenpide-edellytysten heikentämisellä). Popp ja Newell (2012) vahvistavat tämän empiirisesti tutkiessaan yhdysvaltalaisen yritysten t&k:ta ja patentointia: siirtymä kohti ympäristöystävällisempää innovaatiotoimintaa tapahtuu voittopuolisesti saman toimialan vähemmän ympäristöystävällistä innovaatiotoimintaa korvaamalla. Vihreillä innovaatioilla on siis suoran positiivisen vaikutuksen ohella epäsuora positiivinen vaikutus niiden syrjäyttäessä ruskeita innovaatioita ja niiden loppukysyntää. Acemoglun ym. (2012) mallissa vain vihreän innovaatiotoiminnan tulee saada julkista tukea. Tuntuu intuitiiviselta, että ruskean ja vihreän tasapainotilan välisessä siirtymässä saattaisi olla järkevää tukea siltateknologioita; Acemoglun ym. (2019) ja van der Meijdenin ja Smuldersin (2017) perusteella vaikuttaa kuitenkin siltä, ettei tämä ole yhteiskunnallisesta näkökulmasta järkevää. Kuten Durmaz ja Schroyen (2020) osoittavat, hiilen talteenoton ja varastoinnin (*carbon capture and storage*) lisääminen



Acemoglu ym. (2012) malliin tuo siihen omat komplikaationsa, kuten myös t&k:n mittakaavaedut (Greaker ym., 2018) ja kulttuurimuutokset (Bezin, 2019).

Acemoglu ym. (2016) mallintavat teoreettisesti ja analysoivat empiirisesti Yhdysvaltojen energiansektoria. He havaitsivat, että optimaalinen yhteiskuntapolitiikka rakentuu raskaasti ja pitkäaikaisesti hiilidioksidipäästöveron (tai -markkinan) ja vähähiilisen innovaatiotoiminnan julkisiin tukiin. Heidän mukaansa noin 90 % kaikesta vähähiilisten teknologioiden tutkimus- ja kehitystoiminnasta tulisi olla julkisesti rahoitettua noin kahden vuosikymmenen ajan, jotta ne saavuttaisivat korkeahiilisen teknologian riittävän ripeästi.

Hémous (2016) lisää Acemoglu ym. (2012) viitekehykseen kehittyneet ja kehittyvät maat (ks. myös van den Bijgaart, 2017). Jos päästöjen hinta kehittyneissä maissa on korkeampi, kehittyvistä maista muodostuu päästöparatiiseja. Poliitikassa tätä vaikutusta voi eliminoida esimerkiksi kehittyneiden maiden päästötulleilla. Yksi kompastuskivi kansainvälisissä ilmastoneuvotteluissa on se, että kehittyvät maat toteavat – sinänsä oikein – että kehittyneet maat ovat ensin vaurastuneet negatiivisia ympäristövaikutuksia tuottamalla ja ovat sitten edellyttämästä kehittyviltä mailta merkittäviä ja kalliita ympäristötoimia. Fossiilisen energian siivittämänä vaurastuneilla mailla onkin eettinen velvollisuus kantaa ylisuuri osa vihreän siirtymän kustannuksista. Taloudelliset, eettiset, poliittiset ja ympäristölliset seikat – Hémousin mallin hengessä – tuovatkin kehittyville maille ylimääräisen motivaation levittää vihreitä innovaatioita erityisesti kehittyviin maihin. Vihreän siirtymän kontekstissa innovaatiopolitiikka saattaakin tarvita tuekseen teknologiansiirtopolitiikkaa kehittyviin maihin (kuten IPCC korostaakin; ks. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>).

Aghion ym. (2016) analysoivat autoteollisuuden likaista (esim. polttomoottorit) ja puhdasta (esim. sähköautot) innovaatiotoimintaa 80 maassa useiden vuosikymmenien ajalta. Fossiilisten polttoaineiden korkeat hinnat valmistajan päämarkkina-alueilla ruokkivat puhdasta innovaatiotoimintaa: polttoaineiden 10 % hinnannousu lisää puhdasta innovaatiotoimintaa lähes 10 % ja vähentää likaista innovaatiotoimintaa noin 6 %. Suoran markkinavaikutuksen eli vähäisemmän kysynnän ohella hiilen hinnoittelu toimii siis myös epäsuorasti innovaatiotoiminnan kautta vieläpä mainiosti siten, että puhtaan ”vaihtoehtoiskustannus” on likaista leikkaava. Kansalliset läikkymisvaikutukset, joita mitataan likaisen ja puhtaan linjan tutkijoiden määrällä samassa maassa, vaikuttavat innovaatiotoiminnan painotukseen; vihreän innovaatiotoiminnan voimakkaammat kotimaiset läikkymisvaikutukset tekevät siitä poliittisesti houkuttelevan erityisesti Suomen kaltaisissa pienissä avotalouksissa. Myös polkuriippuvuutta havaitaan, eli valmistajat panostavat niihin tutkimuslinjoihin, joissa niillä on ennestään patenteja ja joissa ne ovat valmiiksi hyviä; polkuriippuvuus viittaa siihen, että innovaatiopolitiikan yhtenä erityistavoitteena voisi olla uusien vihreiden innovaattorien akti-

Päästöparatiisien kukoistusta voi hillitä päästötulleilla.

Vihreän tki:n merkittävät kansalliset läikkymisvaikutukset tekevät siitä Suomelle houkuttelevan.

voiminen, koska tällä olisi myös interventtion jälkeisiä pidempikestoisia vaikutuksia. Howellin (2017) yhdysvaltalaisen energiaturkien analyysi viittaa samaan suuntaan: julkisen tuen saaminen lisää myöhempää todennäköisyyttä saada yksityinen pääomasijoitus, ja tuella on positiivisia vaikutuksia myöhempään patentointiin ja myyntiin.

Dechezlepretre ym. (2017) analysoivat miljoonaa autoteollisuuden ja sähkötuotannon patenttia ja havaitsivat, että puhtaat innovaatiot tuottavat keskimäärin 43 % enemmän ulkoisvaikutuksia kuin likaiset innovaatiot. Puhtaan teknologian ulkoisvaikutukset ovat myös taloudellisesti merkittävämpiä. Erot selittyvät puhtaiden innovaatioiden laajemmalla sovellusalueella ja radikaalimmalla luonteella (mikä on samankaltainen muillakin nousevilla teknologia-alueilla eikä siten yksinomaan vihreän

Runsaampien ulkoisvaikutusten takia puhtaat innovaatiot ansaitsevat enemmän julkista tukea.

ominaisuus). Barbieri ym. (2020) havaitsivat vihreiden innovaatioiden olevan erityislaatuisempia (*novel*) ja mutkikkaampia (*complex*); niillä näyttää olevan pidempikestoisia (*pervasive*) vaikutuksia ja runsaampia ulkoisvaikutuk-

sia. Runsaampien ulkoisvaikutusten takia puhtaat innovaatiot ansaitsevat enemmän julkista tukea ja (ollessaan likaisten innovaatioiden kanssa samalla tasolla) niillä on myös suurempi talouskasvua ja hyvinvointia lisäävä vaikutus. Myöhempi tutkimus on osoittanut, että puhtaiden innovaatioiden ulkoisvaikutukset vaihtelevat niiden tyyppien mukaan ja myös alueittain (Guillard ym., 2021; Martin ym., 2020; Martin & Verhoeven, 2022; Rydge ym., 2018).

Calel ja Dechezleprêtre (2016) osoittavat, että Euroopan unionin päästökauppa-

mekanismi (*European Union Emission Trading Scheme*, EU ETS) on lisännyt vähähiilisten keksintöjen patentointia ilman, että tämä vähentää muuta patentointia. Niillä yrityksillä, joilla on vähintään yksi toimipaikka ao. mekanismin piirissä, on 36 % enemmän vähähiilisen tuotannon patenteja kuin muuten vastaavilla verrokkiyrityksillä. Vaikutus on suuri, mutta koska ao. mekanismi koskee vain pientä osaa yrityksistä, koko Euroopan tasolla mekanismi lisää vähähiilisyyspatenteja vain noin 0,38 %.

Uusiutuvaa energiaa suosivalla politiikalla on voimakkaampi vaikutus innovaatiotoimintaan maissa, joissa energiamarkkinakilpailu on vapautettu.

Aghion ym. (2023) tarkastelevat innovaatiotoiminnan ja kysynnän linkkiä. He havaitsivat, että yritykset investoivat puhtaisiin innovaati-

oihin kohdatessaan ympäristöllisesti valvutuneita kuluttajia ja että tämä vaikutus on voimakkaampi, jos kilpailu ylipäätään on kireää. Nesta ym. (2014) havaitsivat, että uusiutuvaa energiaa suosivalla politiikalla on voimakkaampi vaikutus innovaatiotoimintaan maissa, joissa energiamarkkinakilpailu on vapautettu. Amore ja Bennedsen (2016) havaitsivat, että huonompaa hallintotapaa (*corporate governance*) soveltavilla yrityksillä vihreä osuus kaikesta innovaatiotoiminnasta on alhaisempi.

Aghion ym. (2022) havaitsivat, että hiilidioksidipäästöjen verotus (tai hinnoittelu markkinamekanismin kautta) sekä t&k- ja riskipääomainvestoinnit (*venture capital*)

selittävät suuren osan maiden välisistä eroista vihreässä patentointi-intensiteetissä. Aghion ym. (2022) tapaan Baranzini ym. (2017) painottavat eri ympäristöpolitiikkojen toisiaan täydentävää luonnetta ja yhteiskäytön tarvetta. Tchorzewska ym. (2022) havaitsevat, että ympäristöveroilla ja julkisilla tuilla on toisiaan vahvistava vaikutus. Lopez ym. (2022) osoittavat, että yleisellä taloudellisella epävarmuudella on taipumusta syrjäyttää vihreitä asioita politiikka-agendalta.

### Vihreän regulaation ja innovoinnin kilpailukykyvaikutukset

Yksi ympäristöä sivuavan innovaatiokirjallisuuden keskeisistä käsitteistä on Porter-hypoteesi (Porter & van der Linde, 1995), jonka mukaan ympäristöregulaatio, ja markkinapohjaiset instrumentit erityisesti, lisää yritysten innovaatiotoimintaa ja mahdollisesti myös kilpailukykyä, jota yleensä mitataan tuottavuudella tai kannattavuudella. Ajatus siitä, että kansallinen muita maita tiukempi regulaatio on ylipäätään mahdollista ja jopa ”maksaa itsensä”, on houkutteleva.

Porter-hypoteesista on kolme muotoa (Jaffe & Palmer, 1997):

- **Heikko:** Tiukka ympäristöregulaatio lisää innovaatiotoimintaa.
- **Vahva:** Tiukka ympäristöregulaatio lisää innovaatiotoimintaa ja parantaa kilpailukykyä.
- **Kapea:** Jotkut ympäristöregulaation tyypit lisäävät innovaatiotoimintaan.

Cohen ja Tubb (2018) tekevät 103 artikkelin ja yli 2 000 yksittäisen estimointituloksen meta-analyysin Porter-hypoteesia koskevasta kirjallisuudesta (Hermundsdottir & Aspelund, 2021, tuoreemmassa katsauksessa rajausta ja lähestymistapa ovat hieman toisenlaiset, mutta havainnot ovat samankaltaisia). Vaikka lähtöaineistona olevien aiempien tutkimusten tulokset vaihtelevat voimakkaasti, ja yleisimmin tulos on ei tilastollisesti merkitsevä, Cohenin ja Tubbin (2018) tulokset viittaavat **vahvan** Porter-hypoteesin voimassaoloon – tiukka regulaatio näyttää siis lisäävän sekä innovaatiotoimintaa että kilpailukykyä. Positiivinen yhteys on todennäköisempää maa- kuin yritystasolla (mikä saattaa selittyä innovaatiotoiminnan ulkoisvaikutuksilla). Se liittyy todennäköisemmin joustavaan markkinapohjaiseen regulaatioon (esim. päästökauppaan) kuin joustamattomiin määräyksiin (esim. myyntikieltoihin). Positiiviset vaikutukset tuleva usein viiveellä (mikä on intuitiivista, koska niiden ajatellaan aiheuttavan innovaatiotoiminnasta).

### Yhteenveto ja johtopäätökset

Ympäristöpolitiikan tulee kulkea käsi kädessä vihreän innovaatiopolitiikan kanssa. Esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen sisäistämisestä ensisijainen tarkoitus on nostaa päästöintensiivisten tuotteiden ja palveluiden hintoja ja siten vähentää niiden kysyntää; kirjallisuuden perusteella näyttää selvältä, että tämän lisäksi vähähiilisten ratkaisujen innovaatiotoiminta lisääntyy, mikä entisestään voimistaa politiikan tavoiteltua vaikutusta.

tusta. Ylipäättään on niin, että käsillä oleva transformaatiohaaste vaatii kaikkien politiikkalohkojen yhteispelin. Kyse on politiikkatoimien komplementaarisuudesta eli siitä, miten ne vahvistavat toisiaan.

Yleensä yhteiskunta- ja erityisesti elinkeinopolitiikassa varotaan tilannetta, jossa julkinen sektori ottaisi kantaa yksityisten resurssien suuntautumiseen. Vihreän siirtymän edistämiseksi suuntaa pitää nimenomaan viitoittaa.

Usein markkinapohjaiset ratkaisut ovat tehokkaita, jos niitä verrataan määrävään ja rajoittavaan sääntelyyn. Käytännössä molemmilla on paikkansa, ja niiden yhtäaikainen käyttö on usein toivottavaa. Näin on mm. tilanteessa, jossa ympäristöhaittoja ei hinnoitella riittävästi ja jossa määrävää regulaatio onnistuu karsimaan ympäristön kannalta huonoimmat vaihtoehdot markkinoilta. Innovaatiotoiminnan kannalta markkinapohjaiset ratkaisut ovat tärkeitä siksi, että lähinnä niihin liittyvät kannustimet jatkuviin ja mahdollisimman suuriin parannuksiin; esimerkiksi yksi mahdollinen ja kenties todennäköinenkin kieltojen seuraus on juuri ja juuri aidan oikealla puolella olevan ratkaisun suosiminen, mikä ei ole omiaan ruokkimaan innovaatiotoimintaa.

On houkuttelevaa olla mahdollisimman aikaisin vasta nousemassa olevilla teknologia-alueilla.

Julkiset innovaatiopoliittiset interventiot ovat tähän asti painottuneet esikaupalliseen toimintaan. Grubb ym. (2021) viittaavat siihen, että vihreän siirtymän konteksteissa julkinen mielenkiinto ja tuki saattaa ulottua siihen pisteeseen, jossa uusi ratkaisu on toteutettu teollisessa mittakaavassa (*at scale*) tai jopa pisteeseen, jossa se on jo tullut vanhaan verrattuna kustannuskilpailukykyiseksi täydentävien innovaatioiden ja tekemällä oppimisen kautta.

Laajassa mielessä vihreän innovaatiopolitiikan vaikuttavuudessa on kyse globaaleista elinkaari-vaikutuksista ympäristöön. Kansallisesti on kyse myös yritysten ja toimialojen kilpailukykyistä vihreiden tuotteiden ja palveluiden tarjoajina. Sekä ympäristön että talouden – kotimaisten yritysten kilpailukykyyn – näkökulmasta näyttää houkuttelevalta olla mahdollisimman aikaisin vasta nousemassa olevilla teknologia-alueilla ja jatkaa sellaisia tukevalla laajalla politiikkavalikoimalla, kunnes uusi teknologia on itsessään hintakilpailukykyinen korvattavien aiempien ratkaisujen kanssa. Vihreän innovaatiotoiminnan voimakkaat havaitut polkuriippuvuudet viittaavat siihen, että uusien toimijoiden aktivoiminen ja runsas tuki yksittäisten innovaatioiden elinkaaren aikaisessa vaiheessa saattaisi olla erityisen kannattavaa. Pulmana tässä on nousevien teknologioiden tunnistaminen sekä politiikan instrumentointi siten, että yritysten välinen valikoituminen edelleen toimii ja teknologianeutraaliteetti täsmällisten ratkaisujen välillä säilyy.

## Suosituksia

- Vihreä siirtymä ei tule tapahtumaan ilman laaja-alaista yhteiskuntapoliittista työntöä. Tarvittavat toimet ovat kolmea päätyyppiä: negatiivisten ja positiivisten ympäristö(ulkois)vaikutusten hinnoittelu (mm. päästökauppa ja -verot), pakottava regulaatio (mm. ympäristön kannalta haitallisimpien tavaroiden ja palveluiden kieltäminen) ja vihreän innovaatiotoiminnan suosiminen mieluiten siten, että se edistyy nimenomaan ruskean kustannuksella. Kaikki nämä toimet ovat välttämättömiä. Poliittikkatoimien tulee olla laaja-alaisia ja toisiaan tukevia.
- Tutkimus puoltaa vihreän innovaatiotoiminnan runsasta rahoittamista vieläpä siten, että tämä rahoitus painottaa muuta (ei-vihreää) julkista innovaatiotoiminnan tukemista enemmän myös kaupallistamisvaihetta – jopa siihen pisteeseen asti, jossa vihreä tarjonta on, ilman julkista tukea, hintakilpailukykyinen verrattuna ruskeaan tarjontaan.
- Vaikka missiolähtöisessä innovaatiopolitiikassa ei mielestämme – käytännön toimenpiteiden tasolla – olekaan keksitty täysin toimivaa konseptia, käytännössä tässä luvussa visioitu innovaatiopolitiikka toteuttaa missiolähtöisyyden piirteitä.
- Vihreän siirtymän innovaatiotoiminta on muuta innovaatiotoimintaa kiinteämmin yhteydessä sekä pääomamarkkinoiden riskinotto-kykyyn että yksityisen ja julkisen kysynnän kehitykseen. Niinpä innovaatiotoimintaa laajempi elinkeinopoliittinen näkemys on tässä yhteydessä erityisen toivottavaa.

## Viitteet

- <sup>1</sup> Kirjoittajien vapaa käännös seuraavasta: *”Fulfilling the commitments embedded in the Paris Agreement requires a climate-technology revolution.”*
- <sup>2</sup> Kirjoittajien vapaa käännös seuraavasta: *”... in 2050, almost half the reductions come from technologies that are currently at the demonstration or prototype phase. Major innovation efforts must take place this decade in order to bring these new technologies to market in time.”*
- <sup>3</sup> Kirjoittajien vapaa käännös seuraavasta: *”... all three policies – environmental taxes, environmental regulation and state-subsidized R&D in green technologies – significantly direct innovation towards green patenting. Doubling environmental taxes in an industry, on average increases green patenting by 6.7%. Doubling the stringency of environmental regulation in a NACE2 industry sparks a 16.4% increase in green patenting. Doubling direct state R&D subsidies leads to a 9% increase in green patent applications. An increase of R&D tax deductions by 1 percentage point increases green patent applications by 0.3%.”*
- <sup>4</sup> OECD, Maailmanpankki ja YK (2018, s. 29) toteavat: *”To deliver the economic transformation required to address climate change, governments must accelerate the deployment of existing technologies, business models and services, and swiftly move the next generation of climate solutions from the lab to the market. To scale up climate solutions, governments should: Deploy targeted innovation policies to create and shape markets for climate innovations. Scale up public investment in research and development to create the next generation of climate solutions. Overcome the financial barriers to demonstration and early-stage commercialisation to bring existing technologies to scale. Promote international technology diffusion to ensure innovation benefits all.”*
- <sup>5</sup> Uusien ideoiden tuottajat suuntautuvat käytännössä sinne, missä he odottavat (riskikorjattujen) tuottojen – omien tulojen ja tiedeyhteisön arvostuksen – olevan korkeimpia. Vaikka tarkkaa tietoa ei ole saatavilla, voidaan arvioida, että tyyppillisen yrityksen ja tutkijan näkökulmasta nämä tuotot ovat korkeimpia melko vakiintuneissa tutkimuskysymyksissä. Kokonaan uusien tutkimusideoiden avaus voi johtaa jättipotteihin, mutta myös riski on suuri. Koska uusien ideoiden kehittelyyn liittyy oppimista muilta saman aihepiirin kanssa painivilta, yksinään tai pienellä joukolla uuteen suuntaan meneminen on erityisen riskipitoista.
- <sup>6</sup> Esimerkiksi auton polttomoottoria on tutkittu ja kehitetty yli sata vuotta samoin kuin moottoriöljyn ja polttoaineiden kemioita. Autojen vähittäismyynnin ja huollon sekä polttoaineiden jakelun ympärillä on massiiviset ekosysteemit. Merkittävä osa esimerkiksi eläkerahastojen sijoituksista globaalisti on (edelleen) fossiilisessa energiassa ja sen käyttöön perustuvilla teollisuus- ja palvelualoilla.
- <sup>7</sup> On mielenkiintoista, että muutoin kattavassa esityksessä Weber ja Rohrer sivuavat vain vähän innovaatiotoiminnan kohtaamia rahoitusmarkkinapuutteita, jotka tiedollisten ulkoisvaikutusten jälkeen ovat toiseksi yleisimmin mainittu motivaatio yritysten innovaatiotoiminnan julkiselle tukemiselle; ks. esim. Hall ja Lerner (2010).
- <sup>8</sup> Missiolähtöiselle innovaatiopolitiikalle ei ole yhtä kaiken kattavaa määritelmää, mikä johtuu sekä ilmiön tuoreudesta että sen monitahoisuudesta. Joka tapauksessa keskeiset määrittävät ulottuvuudet ovat jo nimessä: kyse on missiosta eli merkittävän haasteen ratkomisesta, ratkaisua haetaan laajasti ymmärretyn innovaatiotoiminnan kautta (mahdollisesti muiden

politiikkalohkojen tukemana) ja ainakin joiltain osin on kyse julkisten toimien ja voimavarojen suuntaamisesta (eli politiikasta).

- <sup>9</sup> Fagerberg (2018) toteaa: *”While it is easy to argue that innovation must play an important role in the transition towards sustainability, it is much more challenging to provide good models for how policy may help in mobilizing innovation for this purpose.”*
- <sup>10</sup> Hicks (1932, s. 124): *”A change in the relative prices of the factors of production is itself a spur to invention, and to invention of a particular kind – directed to economising the use of a factor that has become relatively expensive.”*

## Lähteet

- 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. (2023). Distorted Innovation: Does the Market Get the Direction of Technology Right? *AEA Papers and Proceedings*, 113, 1–28. <https://doi.org/10.1257/pandp.20231000>
- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L. & Hemous, D. (2012). The Environment and Directed Technical Change. *American Economic Review*, 102(1), 131–166. <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>
- Acemoglu, D., Hemous, D., Barrage, L. & Aghion, P. (2019). *Climate Change, Directed Innovation, and Energy Transition: The Long-run Consequences of the Shale Gas Revolution*. <https://ideas.repec.org/p/red/sed019/1302.html>
- Aghion, P., Bénabou, R., Martin, R. & Roulet, A. (2023). Environmental Preferences and Technological Choices: Is Market Competition Clean or Dirty? *American Economic Review: Insights*, 5(1), 1–20. <https://doi.org/10.1257/aeri.20210014>
- Aghion, P., Boneva, L., Breckenfelder, J., Laeven, L., Olovsson, C., Popov, A. & Rancoita, E. (2022). Financial Markets and Green Innovation. *European Central Bank Discussion Papers*, 2686.
- Aghion, P., Dechezleprêtre, A., Hémous, D., Martin, R. & Van Reenen, J. (2016). Carbon Taxes, Path Dependency, and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry. *Journal of Political Economy*, 124(1), 1–51. <https://www.jstor.org/stable/26549857>
- Aghion, P., Hepburn, C., Teytelboym, A. & Zenghelis, D. (2014). Path dependence, Innovation and the Economics of Climate change. *Centre for Climate Change Economics and Policy Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, a contributing paper to the New Climate Economy*. [https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2014/11/Aghion\\_et\\_al\\_policy\\_paper\\_Nov20141.pdf](https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2014/11/Aghion_et_al_policy_paper_Nov20141.pdf)
- Amore, M. D. & Bennesen, M. (2016). Corporate governance and green innovation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 75, 54–72. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2015.11.003>
- Arrow, K. J. (1962). Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention. Teoksesa Nelson, R. R. (Ed.), *The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors*, 609–626. Princeton University Press.
- Baranzini, A., van den Bergh, J. C. J. M., Carattini, S., Howarth, R. B., Padilla, E. & Roca, J. (2017). Carbon pricing in climate policy: seven reasons, complementary instruments, and political economy considerations. *WIREs Climate Change*, 8(4), e462. <https://doi.org/10.1002/wcc.462>



- Barbieri, N., Marzucchi, A. & Rizzo, U. (2020). Knowledge sources and impacts on subsequent inventions: Do green technologies differ from non-green ones? *Research Policy*, 49(2), 103901. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2019.103901>
- Bezin, E. (2019). The economics of green consumption, cultural transmission and sustainable technological change. *Journal of Economic Theory*, 181, 497–546. <https://doi.org/10.1016/j.jet.2019.03.005>
- Bloom, N., Van Reenen, J. & Williams, H. (2019). A Toolkit of Policies to Promote Innovation. *Journal of Economic Perspectives*, 33(3), 163–184. <https://doi.org/10.1257/jep.33.3.163>
- Brown, J. R., Martinsson, G. & Thomann, C. (2022). Can Environmental Policy Encourage Technical Change? Emissions Taxes and R&D Investment in Polluting Firms. *The Review of Financial Studies*, 35(10), 4518–4560. <https://doi.org/10.1093/rfs/hhac003>
- Calel, R. & Dechezleprêtre, A. (2016). Environmental Policy and Directed Technological Change: Evidence from the European Carbon Market. *The Review of Economics and Statistics*, 98(1), 173–191. [https://doi.org/10.1162/REST\\_a\\_00470](https://doi.org/10.1162/REST_a_00470)
- Ciarli, T. & Savona, M. (2019). Modelling the Evolution of Economic Structure and Climate Change: A Review. *Ecological Economics*, 158, 51–64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.008>
- Cohen, M. A. & Tubb, A. (2018). The Impact of Environmental Regulation on Firm and Country Competitiveness: A Meta-analysis of the Porter Hypothesis. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 5(2), 371–399. <https://doi.org/10.1086/695613>
- Cohen, W. M. & Levinthal, D. A. (1989). Innovation and Learning: The Two Faces of R & D. *Economic Journal*, 99(397), 569–596. <https://doi.org/10.2307/2233763>
- Cohen, W. M. & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation [Article]. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128–152. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=plh&AN=9603111655&site=ehost-live>
- Cooper, R. W. (2005). Economic Policy in the Presence of Coordination Problems. *Revue d'économie politique*, 115(4), 379–390. <https://doi.org/10.3917/redp.154.0379>
- Dechezlepretre, A., Martin, R. & Mohnen, M. (2017). *Knowledge Spillovers from clean and dirty technologies*. <https://ideas.repec.org/p/lsg/lsgwps/wp135.html>
- Durmaz, T. & Schroyen, F. (2020). Evaluating carbon capture and storage in a climate model with endogenous technical change. *Climate Change Economics*, 11(01), 2050003. <https://doi.org/10.1142/s2010007820500037>
- Fagerberg, J. (2018). Mobilizing innovation for sustainability transitions: A comment on transformative innovation policy. *Research Policy*, 47(9), 1568–1576. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.08.012>
- Goulder, L. H. & Schneider, S. H. (1999). Induced technological change and the attractiveness of CO2 abatement policies. *Resource and Energy Economics*, 21(3), 211–253. [https://doi.org/10.1016/S0928-7655\(99\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0928-7655(99)00004-4)
- 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>

- Grubb, M., Drummond, P., Poncia, A., McDowall, W., Popp, D., Samadi, S., Penasco, C., Gillingham, K. T., Smulders, S., Glachant, M., Hassall, G., Mizuno, E., Rubin, E. S., Dechezleprêtre, A. & Pavan, G. (2021). Induced innovation in energy technologies and systems: a review of evidence and potential implications for CO2 mitigation. *Environmental Research Letters*, 16(4), 043007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abde07>
- Gugler, K., Szücs, F. & Wiedenhofer, T. (2024). Environmental Policies and directed technological change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 124(forthcoming), 102916. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2023.102916>
- Guillard, C., Martin, R., Mohnen, P., Thomas, C. & Verhoeven, D. (2021). *Efficient industrial policy for innovation: standing on the shoulders of hidden giants*. <https://cep.lse.ac.uk/pubs/download/dp1813.pdf>
- Haddad, C. R., Nakić, V., Bergek, A. & Hellsmark, H. (2022). Transformative innovation policy: A systematic review. *Environmental innovation and societal transitions*, 43, 14–40. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2022.03.002>
- Hall, B. H. & Lerner, J. (2010). Chapter 14 - The Financing of R&D and Innovation. Teoksessa Hall, B. H. & Rosenberg, N. (Eds.), *Handbook of the Economics of Innovation*, Vol. 1, 609–639. North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0169-7218\(10\)01014-2](https://doi.org/10.1016/S0169-7218(10)01014-2)
- Hasna, Z., Jaumotte, F., Kim, J., Pienknagura, S. & Schwerhof, G. (2023). Green Innovation and Diffusion: Policies to Accelerate Them and Expected Impact on Macroeconomic and Firm-Level Performance. *IMF Staff Discussion Note, International Monetary Fund, Washington, DC, SDN/2023/008*. <https://www.elibrary.imf.org/view/journals/006/2023/008/article-A001-en.xml>
- Hémous, D. (2016). The dynamic impact of unilateral environmental policies. *Journal of International Economics*, 103, 80–95. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2016.09.001>
- Hermundsdottir, F. & Aspelund, A. (2021). Sustainability innovations and firm competitiveness: A review. *Journal of cleaner production*, 280, 124715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124715>
- Hicks, J. (1932). *The Theory of Wages*. Macmillan. <https://books.google.fi/books?id=P-1AAA-AAIAAJ>
- Howell, S. T. (2017). Financing Innovation: Evidence from R&D Grants. *American Economic Review*, 107(4), 1136–1164. <https://doi.org/10.1257/aer.20150808>
- Hyytinen, A. (2022). Pääkirjoitus: Näin tämä ei voi jatkua. *Kansantaloudellinen aikakauskirja*, 118(1), 3–6. [https://www.taloustieteellinenyhdistys.fi/wp-content/uploads/2022/02/31871983\\_KAK\\_1\\_2022\\_Taloustieteellinen\\_Yhdistys\\_WEB-5-8.pdf](https://www.taloustieteellinenyhdistys.fi/wp-content/uploads/2022/02/31871983_KAK_1_2022_Taloustieteellinen_Yhdistys_WEB-5-8.pdf)
- Hyytinen, A. & Rouvinen, P. (Eds.) (2005). *Mistä talouskasvu syntyy?* Etlä B214, Taloustieto Oy, Helsinki.
- IEA (2021). *Net Zero by 2050*. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- Jaffe, A. B., Newell, R. G. & Stavins, R. N. (2005). A tale of two market failures: Technology and environmental policy. *Ecological Economics*, 54(2), 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.12.027>

- Jaffe, A. B. & Palmer, K. (1997). Environmental Regulation and Innovation: A Panel Data Study. *The Review of Economics and Statistics*, 79(4), 610–619. <http://www.jstor.org/stable/2951413>
- Kivimaa, P. & Kern, F. (2016). Creative destruction or mere niche support? Innovation policy mixes for sustainability transitions. *Research Policy*, 45(1), 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.09.008>
- Kuosmanen, N. & Maczulskij, T. (2022). The Role of Firm Dynamics in the Green Transition: Carbon Productivity Decomposition in Finnish Manufacturing. *ETLA Working Papers*, 99. <http://pub.etla.fi/ETLA-Working-Papers-99.pdf>
- Lopez, R. E., Pastén, R. & Gutiérrez Cubillos, P. (2022). Climate change in times of economic uncertainty: A perverse tragedy of the commons? *Economic Analysis and Policy*, 75, 209–225. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2022.05.005>
- Martin, R., Unsworth, S., Valero, A. & Verhoeven, D. (2020). *Innovation for a strong and sustainable recovery*. <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2020/12/Innovation-for-a-Strong-and-Sustainable-Recovery.pdf>
- Martin, R. & Verhoeven, D. (2022). Knowledge Spillovers from Clean and Emerging Technologies in the UK. *London School of Economics and Political Science, Centre for Economic Performance Discussion Papers*, 1834. <https://cep.lse.ac.uk/pubs/download/dp1834.pdf>
- Martin, R. & Verhoeven, D. (2023). Knowledge spillovers from clean innovation. A tradeoff between growth and climate? *Centre for Economic Performance (CEP) Discussion Papers*, CEPDP1933. [https://cep.lse.ac.uk/\\_NEW/publications/abstract.asp?index=10290](https://cep.lse.ac.uk/_NEW/publications/abstract.asp?index=10290)
- Mattauch, L., Creutzig, F. & Edenhofer, O. (2015). Avoiding carbon lock-in: Policy options for advancing structural change. *Economic Modelling*, 50, 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2015.06.002>
- Mazzucato, M., Kattel, R. & Ryan-Collins, J. (2020). Challenge-Driven Innovation Policy: Towards a New Policy Toolkit. *Journal of Industry, Competition and Trade*, 20(2), 421–437. <https://doi.org/10.1007/s10842-019-00329-w>
- Nesta, L., Vona, F. & Nicolli, F. (2014). Environmental policies, competition and innovation in renewable energy. *Journal of Environmental Economics and Management*, 67(3), 396–411. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2014.01.001>
- OECD, The World Bank & UN Environment (2018). *Financing Climate Futures: Rethinking infrastructure*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264308114-en>
- Pihlajamaa, M. & Merisalo, M. (2021). Organizing innovation contests for public procurement of innovation – a case study of smart city hackathons in Tampere, Finland. *European Planning Studies*, 29(10), 1906–1924. <https://doi.org/10.1080/09654313.2021.1894097>
- Popp, D. & Newell, R. (2012). Where does energy R&D come from? Examining crowding out from energy R&D. *Energy Economics*, 34(4), 980–991. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.07.001>
- Porter, M. E. & van der Linde, C. (1995). Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97–118. <https://doi.org/10.1257/jep.9.4.97>

- Rodríguez-Clare, A., Rodríguez, F. & Fischer, R. (2005). Coordination Failures, Clusters, and Microeconomic Interventions [with Comments]. *Economía*, 6(1), 1–42. <http://www.jstor.org/stable/20065485>
- Rydge, J., Martin, R. & Valero, A. (2018). *Sustainable growth in the UK: seizing opportunities from technological change and the transition to a low-carbon economy*. <https://cep.lse.ac.uk/pubs/download/is07.pdf>
- Sákovics, J. & Steiner, J. (2012). Who Matters in Coordination Problems? *American Economic Review*, 102(7), 3439–3461. <https://doi.org/10.1257/aer.102.7.3439>
- Schot, J. & Steinmueller, W. E. (2018). Three frames for innovation policy: R&D, systems of innovation and transformative change. *Research Policy*, 47(9), 1554–1567. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.08.011>
- Takalo, T., Hyytinen, A. & Stevenson, A. (2021). Patenttien yksityinen arvo: kirjallisuuskatsaus and uusia tuloksia Suomesta. *Kansantaloudellinen aikakauskirja*, 117(3), 338–361.
- Tchorzewska, K. B., Garcia-Quevedo, J. & Martinez-Ros, E. (2022). The heterogeneous effects of environmental taxation on green technologies. *Research Policy*, 51(7), 104541. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2022.104541>
- van den Bergh, J. & Savin, I. (2021). Impact of Carbon Pricing on Low-Carbon Innovation and Deep Decarbonisation: Controversies and Path Forward. *Environmental and Resource Economics*, 80(4), 705–715. <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00594-6>
- van den Bijgaart, I. (2017). The unilateral implementation of a sustainable growth path with directed technical change. *European Economic Review*, 91, 305–327. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2016.10.005>
- van der Meijden, G. & Smulders, S. (2017). Carbon Lock-In: The Role of Expectations. *International Economic Review*, 58(4), 1371–1415. <https://doi.org/10.1111/iere.12255>
- Weber, K. M. & Rohracher, H. (2012). Legitimizing research, technology and innovation policies for transformative change: Combining insights from innovation systems and multi-level perspective in a comprehensive ‘failures’ framework. *Research Policy*, 41(6), 1037–1047. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.10.015>
- Wiskich, A. (2024). A carbon tax versus clean subsidies: Optimal and suboptimal policies for the clean transition. *Energy Economics*, 132(forthcoming), 107410. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107410>