

# Globaali hiilidioksidin hinta – välttämätön ja riittävä

John Hassler

*Viimeisten 10 vuoden aikana olen käyttänyt suurimman osan tutkimukseen käyttämästäni ajasta ilmastonmuutoksen taloustieteeseen. Käytännöllisesti katsoen kaiken tämän olen tehnyt yhdessä kollegoideni Per Krusellin (IIES) ja Conny Olovssonin (Sveriges Riksbank) kanssa. Koska kyseessä on todella poikkeittieteellinen tutkimusala, läheinen vuorovaikutus monien luonnontieteilijöiden, erityisesti Jonas Nycanderin (Tukholman yliopiston meteorologian laitos) kanssa on ollut ehdottoman välttämätöntä. Tässä artikkelissa kokoan yhteen sen, mitä olemme vuosien varrella oppineet. Toivottavasti siitä on hyötyä toisille tutkijoille ja myös päätöksentekijöille. Joka tapauksessa olen vakuuttunut, että taloustiede on keskeinen väline, kun etsitään ratkaisuja maapallon lämpenemiseen. Tärkein johtopäätös on, että maailmanlaajuinen sopimus fossiilisten hiilipäästöjen minimimisinnasta on välttämätön, riittävä ja tehokas ratkaisu ilmastonmuutoksen rajoittamiseksi.*

## Luonnontieteellinen tausta

Ilman auringon valoa elämä maapallolla tuntemassamme muodossa olisi mahdotonta. Keskimäärin yli ajan ja maapallon pinta-alan, maapallo vastaanottaa auringon energiaa 340 W/m<sup>2</sup>. Jotta maapallo ei lämpenisi, saman verran energiaa täytyy virrata maapallolta avaruuteen. Näiden kokonaisvirtojen tasetta kutsutaan

maapallon energiabudjetiksi. Kun budjetti on tasapainossa, energian sisään- ja ulosvirtaus ovat yhtä suuret eikä maapallo lämpene.

Energian sisäänvirtaus on suurelta osin näköalueen aallonpituuksien valoa. Lukuun ottamatta kolmasosaa ulosvirtauksesta (joka on välittömästi avaruuteen heijastuvaa näköalueen valoa), ulosvirtaus on sen sijaan suurelta osin infrapunasäteilyä. Ilmakehä läpäisee auringon

Ph.D. John Hassler (john.hassler@iies.su.se) on taloustieteen professori Tukholman yliopiston *Institute for International Economic Studies (IIES)* -tutkimuslaitoksessa. Hän oli Tampereella 6.–7.2.2020 pidettyjen Kansantaloustieteen päivien pääesitelmöitsijä. Artikkelin perustuu hänen siellä pitämäänsä esitelmään. Artikkelin on englannin kielestä suomentanut Juha Tarkka.

valon helposti, mutta ei infrapunasäteilyä, sillä ilmakehässä on kasvihuonekaasuja, jotka pidättävät infrapunasäteilyn. Tärkeimmät kasvihuonekaasut ovat vesihöyry, hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>) ja metaani. Ihmisen toiminta on lisännyt hiilidioksidin ja metaanin määrää ilmakehässä. Tämä aiheuttaa maapallon energiabudjettiin ylijäämän vähentämällä energian ulosvirtausta.<sup>1</sup>

Energiabudjetin ylijäämä johtaa energian kasaantumiseen lämmön muodossa – lämpötila kohoaa. Lämpötilan kohotessa yhä enemmän energiaa säteilee maapallolta avaruuteen, ja aikanaan budjetti palaa tasapainoon, mutta korkeamman lämpötilan vallitessa maapallolla.

Nykyaikaiset mallit, jotka ottavat huomioon sekä hiilen kierron<sup>2</sup> että sen, miten energiabudjetin muutokset vaikuttavat ilmastoon, osoittavat, että maapallon lämpeneminen on suoraan verrannollinen niihin kumulatiivisiin fossiilisen hiilen päästöihin, jotka ihmiset ovat aiheuttaneet (Matthews ym. 2009). Keskeistä tälle tulokselle on se, että huomattava osa hiilipäästöistä jää ilmakehään tuhansiksi vuosiksi. Toisaalta metaani, vaikka onkin tehokas kasvihuonekaasu, säilyy ilmakehässä vain lyhyen aikaa (suurin osa häviää muutamassa vuosikymmenessä). Näin ollen, toisin kuin hiilidiok-

sidin tapauksessa, metaanin vaikutus maapallon lämpenemiseen riippuu päästöjen virrasta eikä niiden kumulatiivisesta määrästä.

Vaikka mallit ovat yhtä mieltä kumulatiivisten päästöjen ja maapallon lämpenemisen verrannollisuudesta, ne eivät ole yksimielisiä tässä vaikuttavasta verrannollisuuskertoimesta (jota kutsutaan joskus nimellä CCR, Carbon Climate Response). Keskeinen selitys tähän erimielisyyteen on, että tiede on yhä epävarma siitä, miten päästöt fossiilisten polttoaineiden käytöstä vaikuttavat pilvien muodostumiseen. Muutokset siinä, missä ja milloin pilviä muodostuu, ovat tärkeitä sille, vahvistavatko vai heikentävätkö ne hiilidioksidin suoraa vaikutusta energiabudjettiin. Johtuen tästä (ja muista) takaisinkytkentämekanismeista, joita on vaikea kvantifioida, vallitsee suurta epävarmuutta kumulatiivisten päästöjen ja maapallon lämpenemisen välisestä verrannollisuuskertoimesta. YK:n ilmastopaneeli IPCC esittää kertoimen todennäköiseksi vaihteluväliksi 0,8–2,5 celsiusastetta hiiliteratonna kohti.<sup>3</sup> Tämä on erittäin suuri epävarmuusmarginaali. Tämän ymmärtää, kun otetaan huomioon, että ihmiskunnan tähänastiset hiilipäästöt ovat lähes 0,6 teratonna noin 150 vuoden ajalta. Jos verrannollisuuskerroin olisi 0,8 voisi ihmiskunta päästää ilmakehään hiiltä kolme kertaa enemmän kuin tähän saakka on tehty ennen kuin yllettäisiin 2 celsiusasteen suuruiseen globaalin lämpötilan kohoamiseen. Nykyisellä päästövauhdilla, joka on noin 0,01 teratonna vuodessa, tämä veisi aikaa parisataa vuotta. Toisaalta jos verrannollisuuskerroin on epävar-

<sup>1</sup> *Suurempi hiilidioksidin määrä ilmakehässä vaikuttaa siten, että se korkeus, jolta lämpö voi ”karata” avaruuteen siirtyä ulommas ilmakehän kylmempiin kerroksiin. Koska lämpösäteilyn määrä riippuu lämpötilasta, vähemmän energiaa pääsee tällöin avaruuteen. Suuremmat hiilidioksidipitoisuudet vaikuttavat siis kuin huopa maapallon ympärillä, Ensimmäinen tutkija, joka määritteli kvantitatiivisesti ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden ja lämpötilan välisen relation oli Svante Arrhenius (Arrhenius, 1896).*

<sup>2</sup> Tällä tarkoitetaan hiilen kiertokulkua eri hiilivarantojen (hiilinielujen) kuten ilmakehän, biosfäärin ja valtamerien välillä.

<sup>3</sup> *Teratonna hiiltä tarkoittaa 1000 miljardia tonnia hiiltä. Koska yhden hiilitonnin polttaminen tuottaa 3,67 tonnia hiilidioksidia, hiilen määrää kuvaavat numerot voidaan helposti muuntaa hiilidioksidiyksiköiksi.*

muusmarginaalin yläreunalla, voimme päästää enää 0,2 teratonnaa, jos haluamme pysytellä alle 2 asteen lämpenemisen. Tämä määrä päästetään nykyisellä päästövauhdilla 20 vuodessa.

Globaali lämpötilan nousu on ilmastonmuutoksen keskeinen mittari. Lämpötilan nousu on kuitenkin selvästi äärimmäisen monitahoinen ilmiö. Sama pätee myös ilmastonmuutoksen vaikutuksiin inhimilliseen hyvinvointiin. Ilmastonmuutoksen suora vaikutus voi olla vähäinen tai jopa positiivinen maailman joissakin osissa, kuten esimerkiksi Pohjoismaissa. Muualla, usein tiheästi asutuilla alueilla, ilmastonmuutoksella voi olla katastrofaaliset seuraukset. Myös epävarmuus ilmastonmuutoksen seurauksista ja mahdollisuuksista sopeutua siihen on hyvin suurta, samaa suuruusluokkaa kuin luonnontieteellinen epävarmuus CCR-kertoimesta. Sivilisaatiomme kuolema ilmastonmuutoksen seurauksena on tieteisfiktioita, mutta sitä ei voida loogisin tai tieteellisin perustein sulkea pois.

## Taloustiedettä ja taloustieteilijöitä tarvitaan

Useimmat tutkijat, jotka työskentelevät ilmastonmuutoksen parissa ovat luonnontieteilijöitä. Ekonomisteja kuitenkin tarvitaan tuottamaan ratkaisevat vastaukset kysymykseen, miten vähentää päästöjä. Jos olisi niin, että järkevä vastaus ilmastonmuutoksen ongelmaan olisi globaali, välitön ja ehdoton fossiilisten polttoaineiden käyttökielto, ekonomisteja ei tarvittaisi. Sellaisen hoitokuurin voi kuitenkin väittää tappavan potilaan eikä sitä siksi voida määrätä. Fossiiliset polttoaineet on poistettava käytöstä vähitellen, ehkä eri vauhtia talouden eri osissa ja eri tavoin eri polttoaineiden kohdalla. Tä-

män toteuttaminen keskitetyn suunnittelun kautta, jossa jokaisen päästölähteen päästöt sanellaan globaalin päästöviranomaisen toimesta ei ole käytännössä edes mahdollista.

Keskussuunnittelun sijaan on ymmärrettävä, että päästöt ovat seurausta kulutuksen, investointien ja tuotannon kaltaisista taloudellisista toiminnoista. Näiden toimintojen takana ovat yksilöt ja yritykset, jotka tekevät päätöksensä suurelta osin markkinoilla. Se, miten nämä päätökset tehdään ja miten niihin voidaan erilaisin politiikkatoimin vaikuttaa, on ekonomistien tutkimusalaa.

Keskeinen taloudellinen periaate, joka tunnetaan jo professori Pigoun tutkimuksista tasan 100 vuoden takaa on, että markkinat eivät tuota hyviä tulemia ulkoisvaikutusten vallitessa (Pigou 1920). Tällä tarkoitetaan tilannetta, jossa toiminta markkinoilla vaikuttaa suoranaisesti myös muihin tahoihin kuin niihin, joiden väliset liiketoimet ovat markkinoiden toiminnan taustalla. Hiilidioksidipäästöt ovat täydellinen esimerkki tällaisesta ulkoisvaikutuksesta. Kun ajan moottoripyörälläni polttaen bensiiniä, jonka olen ostanut huoltoasemalta, tästä seuraavat hiilidioksidipäästöt leviävät nopeasti (viikoissa) ilmakehään, vaikuttaen ilmastoon kaikkialla maapallolla hyvin pitkän aikaa. Nämä vaikutukset eivät sisälly bensiinistä maksamaani hintaan, ellei voimassa ole politiikkaa, joka pakottaa minut maksamaan niistä. Ilman hintaa, joka panee minut maksamaan ulkoisvaikutuksista, markkinat eivät tuota yhteiskunnallisesti oikeaa tulosta. Käytän liikaa bensiiniä.

Toinen tapa kuvata markkinoiden epäonnistumista on ottaa huomioon, että ilmakehän kyky absorboida hiilidioksidia on rajallinen luonnonvara. Jos kaikki voivat käyttää tätä luonnonvaraa ilmaiseksi, sitä käytetään liikaa, aivan samalla tavalla kuin vapaa kalastusoi-

keus tai vapaa metsien hakkuuoikeus johtavat liikakäyttöön. Taloustieteessä tätä kutsutaan yhteismaan ongelmaksi (*tragedy of the commons*).

Joskus väitetään, että ilmastonmuutoksesta johtuvien ongelmien syy on taloudellinen ja/tai väestönkasvu. Pitääkö tämä paikkansa? Kyllä ja ei. Ei, koska ongelman juuri-syynä on päästöjen hinnoittelun puuttuminen – ilmakehän kyky absorboida hiilidioksidi on vapaata riistaa. Kyllä, koska kasvu vahvistaa päästöjen hinnoittelun puuttumisen negatiivisia seurauksia. Tämä on taas hyvin samantapainen tapaus kuin merten kalakannat. Jos kaikki saavat kalastaa niin paljon kuin haluavat, ilmaiseksi tai ilman kiintiötä, tuloksena on ylikalastus. Mutta ylikalastuksen määrä varmasti kasvaa teknisen kehityksen (suurempien laivojen), väestön ja BKT:n kasvun seurauksena. Ongelman ratkaisu ei kuitenkaan ole paluu pienempiin, vain rannikoille sidottuihin laivoihin. Ratkaisu on säännellä kalastuselinkeinoja hinnoin tai kiintiöin. Sama pätee myös hiilidioksidipäästöihin.

## Integroidut arviointimallit

Arthur Pigou esitti sata vuotta sitten käsitteet, joita tarvitaan ulkoisvaikutusten hallinnan ymmärtämiseksi: niiden taloudellisten toimijoiden, jotka päättävät ulkoisvaikutuksia aiheuttavista toiminnoista, on maksettava aiheuttamia ulkoisvaikutuksia vastaava hinta. Mutta vaikka Pigoun ajatus oli nerokas, se ei riitä politiikkasuositusten antamiseen. Niihin tarvitaan kvantitatiivisia tuloksia siitä, kuinka korkea hinnan olisi oltava. Jotta poliittisilla päätöksentekijöillä olisi kannusteet seurata taloustieteilijöiden suosituksia, on tarpeen myös

näyttää, miten käy toisenlaisten, epäoptimaalisten politiikkojen tapauksessa. Tähän tarvitaan integroitua arviointimalleja (Integrated Assessment Models, IAM). William Nordhaus sai vuoden 2018 Nobelin taloustieteen palkinnon tunnustuksena siitä, että hän oli ensimmäinen, joka rakensi tällaisia malleja.

IAM-mallit koostuvat kolmesta lohkoista:

1. Hiilikiertoa kuvaava mallilohko, joka kuvaa hiilen kiertoa eri hiilinielujen välillä kuten ilmakehässä, biosfäärissä ja valtamerissä.
2. Ilmastolohko. Tämä rakentuu edellä selostamani energiabudjetin ympärille ja kuvaa, mitä ilmaston eri puolille ajan mittaan tapahtuu, kun energiabudjetti on epätasapainossa.
3. Maailmantaloutta kuvaava lohko, jossa tuotanto, kulutus ja päästöt sekä myös ilmastovahingot määräytyvät.

Lohkot kytkeytyvät toisiinsa seuraavasti. Taloutta kuvaavassa lohkoissa määräytyy hiilidioksidipäästöjen dynaaminen ura yhdessä muiden muuttujien kuten tulojen, tuotannon, kulutuksen ja investointien kanssa. Päästöt toimivat syöttötietoina mallin hiilikiertolohkoon, jossa määräytyy ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden aikaura. Tämä puolestaan viedään mallin ilmastolohkon energiabudjettiin, jossa ilmaston dynamiikka määräytyy. Silmukka sulkeutuu, kun ilmasto vaikuttaa mallissa lopulta talouteen, jossa syntyy ilmastonmuutoksen seurauksena erilaisia vaurioita.

Kaikki IAM-mallit on rakennettu tällä tavoin, mutta ne tietysti eroavat toisistaan muun muassa sen suhteen, miten monimutkaisia mal-

lien eri lohkot ovat. Tästä riippumatta kaikkien lohkojen on oltava yhtäpitäviä sekä havaintojen kanssa että sen kanssa, miten ymmärrämme maailman toimivan. Tämä on tietysti yhtä tärkeää sekä taloudellisten että luonnontieteellisten mallien osalta.

Aiemmassa työssämme (Golosov ym. 2014) olemme rakentaneet IAM-mallin joka perustuu Nordhausin perustavaa laatua oleviin kontribuutioihin (Nordhaus, 1994). Olemme käyttäneet sitä erityisesti tuottaaksemme yksinkertaisen laskukaavan päästöjen hinnoittelumiseksi. Keskeisiä tekijöitä, jotka määräävät optimaalisen päästöjen hintatason, ovat ilmaston herkkyyden päästöjen suhteen, hiilen säilymisaika ilmakehässä ja ilmastomuutoksen vahingollisuus inhimilliselle hyvinvoinnille. Kuten edellä kuvattiin, tietämyksemme näistä tekijöistä on valitettavasti varsin rajallinen. Vielä yksi merkittävä tekijä, joka vaikuttaa optimaalisen päästöveron määrittelyyn on, paljonko tulevien sukupolvien hyvinvointia diskontataan yli ajan. Tässä asiassa epämääräisyys johtuu siitä, että meillä kaikilla voi olla erilaisia mielipiteitä siitä, miten tämä diskonttaus olisi suoritettava.

Tuoreemmissa tutkimuksissa (Hassler ym. 2018 ja 2020) olemme käyttäneet mallia analysoimaan positiivisempia (ts. ei-normatiivisia) kysymyksiä. Näissä tutkimuksissa päädyttiin kolmeen johtopäätökseen.

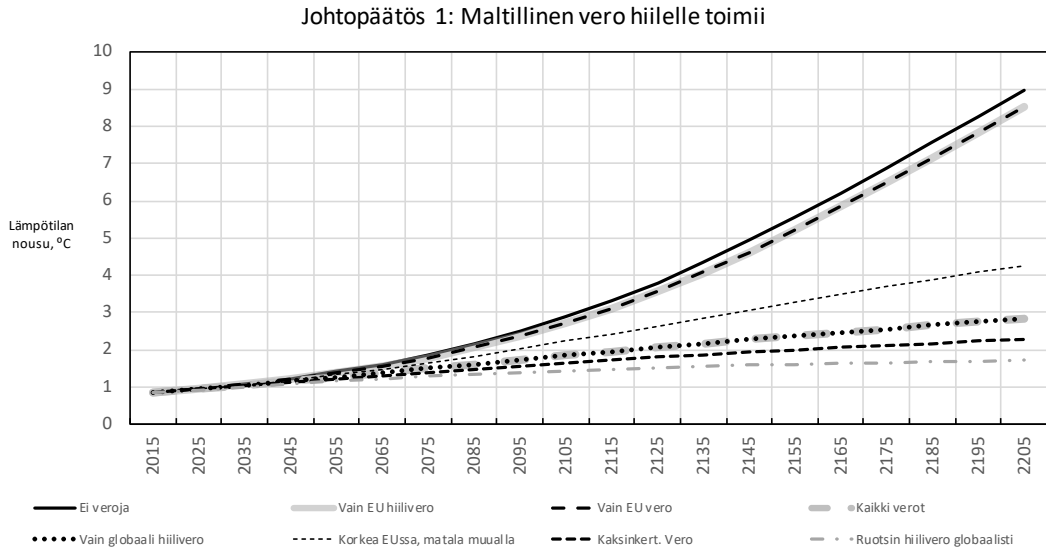
Ensinnäkin, jo vaatimatonkin maailmanlaajuinen päästöille asetettu hinta olisi tehokas rajoittamaan ilmastomuutosta. Jo 20 dollarin päästöhinnalla hiilidioksiditonta kohti olisi voimakkaita vaikutuksia päästöihin ja mallin peruskalibraatiossa se riittäisi pitämään lämpötilan kohoamisen alle 2 asteessa tällä vuosisadalla. Koska litra bensiiniä tuottaa noin 2,3 kilogrammaa hiilidioksidia, 20 dollarin pääs-

töhinta hiilidioksiditonta kohti tarkoittaa vain 4 eurosenttiä bensiinilitraa kohti. Kuviossa 1 osoitamme päästöjen eri hintavaihtoehtojen vaikutukset globaaliin lämpötilan kohoamiseen. Päävaihtoehto on 20 dollarin tonnihinta. On kuitenkin huomattava, että kaikissa simulaatioissa päästöjen hinta kohoaa samaa vauhtia maailman BKT:n kasvun kanssa. Tutkimuksemme (Golosov ym. 2014) osoitamme tämän olevan optimaalista.

Leijonanosa hinnoittelun vaikutuksesta päästöihin ei mallissa tule öljyn kulutuksen vähenemisestä, vaan kivihielestä. Aivan toisin kuin perinteisessä öljyntuotannossa, kivihieksen markkinahinta on lähellä sen louhinnan kustannuksia ja tuotannon pitkän aikavälin hintajousto on suuri. Näin ollen pienikin päästövero voi tehdä suuren osan kivihieksen perustuvaa energiantuotantoa kannattamattomaksi. Tämä on suotuista tilanne, sillä toisin kuin perinteisen öljyn ja maakaasun tapauksessa, maapallon kivihiekkavarat ovat valtavat ja suurimman osan niistä on pysyttävä maan uumenissa, jotta mitään järkevää ilmastotavoitetta voitaisiin saavuttaa. Perinteistä öljyä on sen sijaan niukasti, ja mallin tulokset selvästi osoittavat, että on todennäköisesti yhteiskunnallisesti optimaalista käyttää sitä myös ilmastolliset ulkoisvaikutukset huomioon ottaen. Palaan tähän tuonempana.

Tärkeä varauma on kuitenkin tässä kohtaa paikallaan. Jotta vaatimaton vero olisi tehokas, sen on oltava globaali. Jos esimerkiksi Kiina saa jatkaa ilmaista hiilen käyttöä, minkään ilmastotavoitteiden saavuttaminen ei ole käytännössä mahdollista. Vaikka koko muu maailma ottaisi käyttöön 20 kertaa korkeamman päästöveron kuin yllä tarkasteltu 20 dollaria tonnilta, tämä ei riittäisi kumoamaan Kiinan suuria päästöjä. Samantapaisia tuloksia saadaan, jos

Kuvio 1. Ilmaston lämpeneminen eri päästöhinnoin



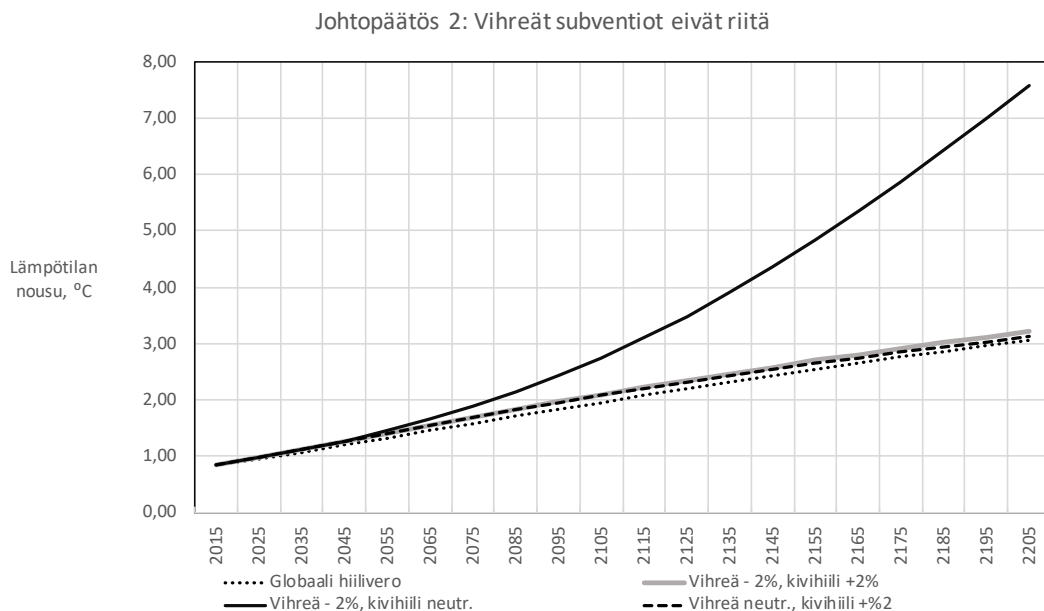
nopeasti kasvavat alueet, kuten Afrikka, jätetään hiilipäästöjen hinnoittelusopimuksen ulkopuolelle.

Toinen johtopäätöksemme on, että halvan vihreän energian subventiot eivät todennäköisesti ole tehokas hiiliveron korvike. Kuviossa 2 esitetään eräiden simulointikokeiden tuloksia. Ensimmäisessä subventoidaan vihreän energian teknologista kehitystä niin, että sen hinta laskee 2 prosentilla vuosittain. Samalla nostetaan kivihiilen hintaa 2 prosentilla vuosittain, joko verottamalla tai pysäyttämällä kivihiilen tuotannossa tapahtuva tekninen kehitys. Tämän kokeen tuloksia kuvaa kuvion 2 vihreä käyrä. Huomataan, että ilmaston lämpeneminen on tässä hyvin samanlaista kuin vaatimat-

toiman globaalin hiiliveron tapauksessa, jota edustaa punainen katkoviiva (joka on sama kuin sininen käyrä kuviossa 1). Toisessa kokeessa tehdään vain vihreä energia halvemmaksi. Tätä edustaa kuvion 2 ohut musta käyrä. Huomataan, että siitä ei ole ilmastolle mitään hyötyä.

Sen tuloksen, että halvempi vihreä energia ei pysty rajoittamaan ilmastonmuutosta, syynä on, että aggregaattitasolla eri energialähteiden välinen korvattavuus on kohtalaisen heikko. Empiiristen tutkimusten perusteella asetamme substitutiojouston tasolle 0,95. Tämä tarkoittaa, että halvempi vihreä energia johtaa kyllä sen suurempaan käyttöön, mutta ei vähennä fossiilisen energian kulutusta. Tämä vastaa si-

Kuvio 2. Ilmaston lämpeneminen erilaisilla vihreän ja fossiilisen energian hinnoilla



tä, mitä maailmanlaajuisestikin on toistaiseksi havaittu. Vihreän energian käyttö kasvaa nopeasti, mutta ei näytä syrjäyttävän fossiilisen energian käyttöä, ellei tätä veroteta.

On olemassa useita syitä sille, ehkä yllättävällekin, tulokselle, että substituutiojousto ei ole tätä suurempi. Yksi syy on, että tuuleen ja aurinkoon perustuva vihreä energia, toisin kuin fossiilisiin polttoaineisiin perustuvat energianlähteet, on mahdotonta kontrolloida. Tästä seuraa, että mitä isompi on tuulen ja auringon osuus energiacoctailissa, sitä vahvempi negatiivinen korrelaatio vallitsee tuotannon ja hinnan välillä. Hinta on alhaalla kun aurinko paistaa ja tuuli puhalttaa. Siksi tuuli- ja aurinkoenergian suurempi osuus heikentää sen

kannattavuutta suhteessa kontrolloitavissa oleviin vaihtoehtoihin. Selvää on, että energian varastointiteknologian kehitys ja kysynnän joustavuus voivat mahdollistaa paremman korvattavuuden eri energialähteiden välillä. Toivo, että se riittäisi auttamaan vihreää energiaa syrjäyttämään fossiilisen energian, ilman veroja, näyttää kuitenkin heikolta.

Kolmas ja viimeinen johtopäätöksemme koskee yllä jo kuvattua valtavaa epävarmuutta. Optimaalisen verotuksen arviointi perinteisin menetelmin vaatisi, että epävarmoille parametreille, kuten ilmaston herkkyydelle kumulatiivisten hiilipäästöjen suhteen, voitaisiin määrittellä todennäköisyysjakaumat. Luonnontieteet eivät pysty tuottamaan sellaisia todennäköi-

syysjakaumia luotettavasti, koska epävarmuus on seurausta siitä, että eri mallit tuottavat erilaisia tuloksia, eikä kukaan tiedä, mikä on oikea malli.

Väitämme kuitenkin, että IAM-mallit voivat tuottaa arvokasta tietoa myös tällaisen knightiläisen epävarmuuden vallitessa. Tämän havainnollistamiseksi toteamme, että epävarmuuden ollessa suurta mikä tahansa valittu politiikka osoittautuu varmuudella jälkikäteistarkastelussa epäoptimaaliseksi. Kaikki politiikkavirheet eivät kuitenkaan ole yhtä haitallisia, ja mallia voidaan käyttää tämän seikan arviointiin. Hyvä politiikkasuositus suuren epävarmuuden vallitessa on, että pitäisi valita robusti politiikkavaihtoehto eli sellainen, jonka seuraukset ovat suhteellisen riippumattomia niistä asioista, joista ollaan epävarmoja.

Sovellamme tätä ajatusta yksinkertaisella tavalla laskemalla kahden erilaisen politiikkavirheen seurauksia. Ensimmäinen on, että toivotaan parasta ja asetetaan hiilipäästöjen hinta matalalle tasolle, joka olisi optimaalinen, jos ilmaston herkkyys päästöille olisi pieni ja ilmastovahingot pieniä. Tämä politiikkavirhe realisoituu myöhemmin, kun osoittautuu, että ilmaston herkkyys päästöille onkin suuri ja myös ilmastovahingot suuria, niin että olisikin pitänyt valita korkea päästöjen hinta. Toinen politiikkavirhe on edellisen vastakohta: valitaan korkea hiilipäästöjen hinta, mutta jälkikäteen havaitaan, että tämä oli turhaa, koska ilmaston herkkyys päästöille ja ilmastovauriot ovatkin pieniä.

Näiden ajatusten operationalisoimiseksi asetamme laskelmissamme ilmaston matalan päästöherkkyyden ilmastopaneeli IPCC:n

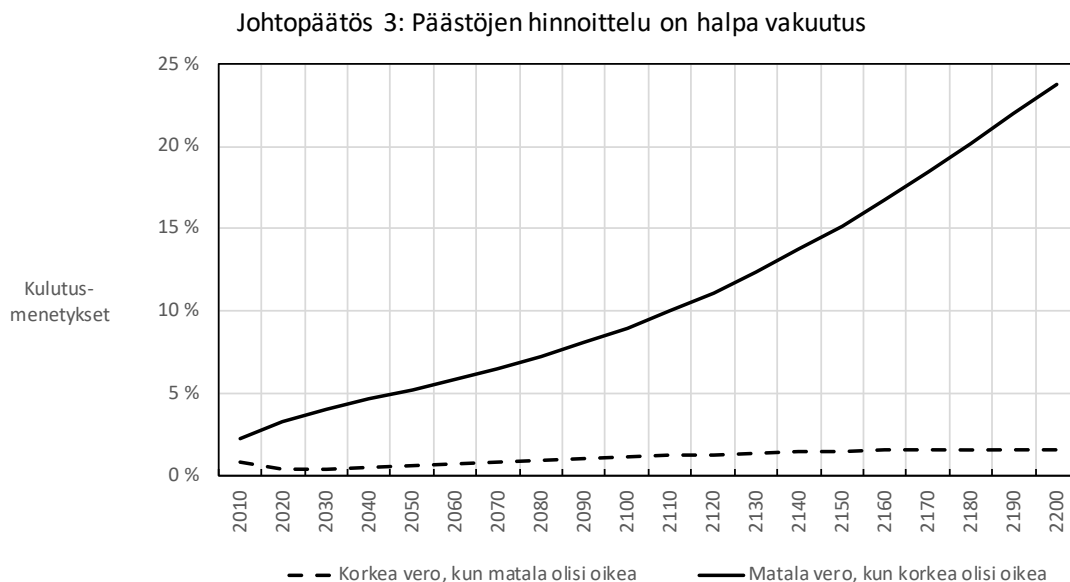
määrittelemän vaihteluvälin alarajalle.<sup>4</sup> Vastavasti asetamme ilmaston päästöherkkyyden ylärajan paneelin arvioiden ylärajalle. Käytämme sitten Nordhausin ja Moffat'n katsausta eri tutkimuksiin (Nordhaus ja Moffat 2017) muodostaaksemme vaihteluvälin myös vaurioiden herkkyydelle ilmastonmuutoksen suhteen (ks. tarkemmin Hassler ym. 2018). Käytämme tämän vaihteluvälin ääriarvoja määrittämään suuren ja pienen taloudellisen herkkyuden. Parhaassa tapauksessa ilmaston herkkyys päätöille on pieni ja taloudellisten vahinkojen herkkyys ilmastonmuutokselle on myös pieni. Jos asiat olisivat näin, optimaalinen hiilivero olisi matala, laskelmiemme mukaan vain 6,9 dollaria hiilitonnia kohti (1,9 dollaria hiilidioksiditonnia kohti). Päinvastaisessa tapauksessa, ilmaston suuren päästöherkkyyden ja talouden suuren ilmastoherkkyyden vallitessa optimaaliseksi veroksi tulee 264 dollaria hiilitonnia kohti (vastaten 74 dollaria hiilidioksiditonnia kohti). Ensimmäinen politiikkavirhe olisi nyt asettaa vero 6,9 dollariin hiilitonnilta parametrien ollessa sellaiset, että 264 dollaria olisi optimaalinen. Toinen virhe olisi määrätä vero 264 dollariksi hiilitonnilta, kun oikea vero olisi 6,9 dollaria.

Päädymme siihen, että näillä kahdella erilaisella politiikkavirheellä on hyvin erilaiset kustannukset. Ensimmäisellä virheellä, eli päästöjen hinnan asettamisella liian alhaiseksi, vaikka korkeampi hinta olisi ollut oikea, on paljon suuremmat haitalliset seuraukset kuin

<sup>4</sup> Käytämme tässä eri mittaa ilmaston päästöherkkyydelle kuin se, mistä aiempana oli puhuttu, nimittäin globaalin keskilämpötilan nousua, joka liittyy ilmaston CO<sub>2</sub>-pitoisuuden kaksinkertaistumiseen. IPCC'n mukaan todennäköinen vaihteluväli tälle arvolle on 1,5 – 4,5 celsiusastetta. Ks. tarkemmin Hassler ym. (2018).



Kuvio 3. Kahden politiikkavirheen kustannukset menetettynä kulutuksena, %



vastakkaisella virheellä. Kuviossa 3 esitetään kummankin politiikkavirheen kustannukset yli ajan, mitattuna globaalien kulutusmahdollisuuksien prosenttisella supistumisella. Kuten nähdään, vaihtoehtojen kustannukset ovat hyvin erilaiset.

On syytä huomata, että nämä ovat politiikkavirheiden kustannuksia. Lisäksi on niin, että hyvinvointi jää paljon matalammaksi mainittujen herkkyyksien ollessa suuria, millä tahansa annetulla politiikalla. Johtopäätös tästä on siis se, että kunnianhimoinen ilmastopolitiikka on hyvä vakuutus. Se ei maksa paljoa, vaikka osoittautuisikin, ettei sitä tarvittu, mutta se on hyvä olla olemassa, jos sitä tarvitaan. Pitää lisäksi huomata, että tämä argumentti perustuu

hiilipäästöjen globaalin hinnan käyttöön ilmastopolitiikan välineenä. Voidaan myös ajatella politiikkavaihtoehtoja, jotka toteuttavat ilmastoneutraaliuden tavoitteen hyvin kalliilla keinoilla. Niiden tapauksessa politiikan varovaisuusargumentti ei päde.

### Fossiilisten polttoaineiden käytön lopettamisen aikataulu

Pitkällä aikavälillä, sanokaamme tämän vuosisadan kuluessa, on kaikkien fossiilisten polttoaineiden käyttö lopetettava. Tässä jaksossa pohdin sitä, missä järjestyksessä polttoaineista on luovuttava ja miten tietty päästöjen määrä

pitäisi jakaa ajan kuluessa ja eri polttoaineiden kesken. Yksi tapa analysoida tätä kysymystä on ajatella, mitä tapahtuisi eri polttoaineiden käytölle, jos päästöjen ulkoisvaikutukset korjaava vero otettaisiin käyttöön. Polttoaineet, joiden hyödyntäminen jäisi kannattavaksi, vaikka oikeansuuruinen päästövero pantaisiin täytäntöön, ovat lähtökohtaisesti yhteiskunnallisesti hyödyllisiä käyttää. Asia on päinvastoin niiden polttoaineiden tapauksessa, jotka eivät kestä oikeansuuruista verotusta muuttumatta tappiollisiksi.

Kuten yllä todettiin, hiilipäästöjen verotuksen optimi riippuu erittäin epävarmoista parametreista ja on siksi vaikea määrittää tarkasti. Tämä analyysi ei kuitenkaan vaadi veron täsmällistä tasoa. Kivihiilen käyttö lämmitykseen ja sähkön tuotantoon on kannattamatonta jo hyvin vaatimattomankin veron tapauksessa. Päästöoikeuksien nykyinen hinta EU:n päästökauppajärjestelmässä (tätä kirjoitettaessa noin 25 euroa hiilidioksiditonnia kohti, mikä vastaa noin kuutta senttiä bensiinilitraa kohti) tekee kivihiilestä kannattamatonta. Kivihiiliteollisuus on kannattamatonta jopa Yhdysvalloissa. Dow Jonesin kivihiiliteollisuuden osakeindeksi on laskenut 99 % vuoden 2011 jälkeen. Huolimatta presidentti Donald Trumpin oletetun hiiliystävällisestä politiikasta kyseinen indeksi laski 70 % vuonna 2019 ja toiset 70 % tänä vuonna.

Perinteinen öljy ja maakaasu poikkeavat tästä. Edes fossiilisten liikennepolttoaineiden korkea verotus Länsi-Euroopassa ei tee diesel-polttoaineen ja bensiinin myyntiä kannattamattomaksi. Varmasti se vaikuttaa kulutukseen ja kannustaa kehittämään vaihtoehtoisia, vihreitä teknologioita. On kuitenkin todennäköistä, että perinteinen öljyntuotanto olisi kan-

nattavaa sellaisenkin globaalien hiiliveron oloissa, joka vastaisi Ruotsin tasoa.<sup>5</sup>

Öljyn ja maakaasun epätavanomaiset lähteet (esimerkiksi vesisärötys eli *fracking*, arktisten varantojen ja öljyhiekan hyödyntäminen) ovat verotukselle herkempiä. On todennäköistä että Ruotsin tasoinen hiilivero, ja ehkä sitä alempiakin, tekisi niistä kannattamattomia ja poistaisi kannustimet kehittää uutta tekniikkaa nykyään kannattamattomien fossiilisten polttoainevarantojen hyödyntämiseksi.

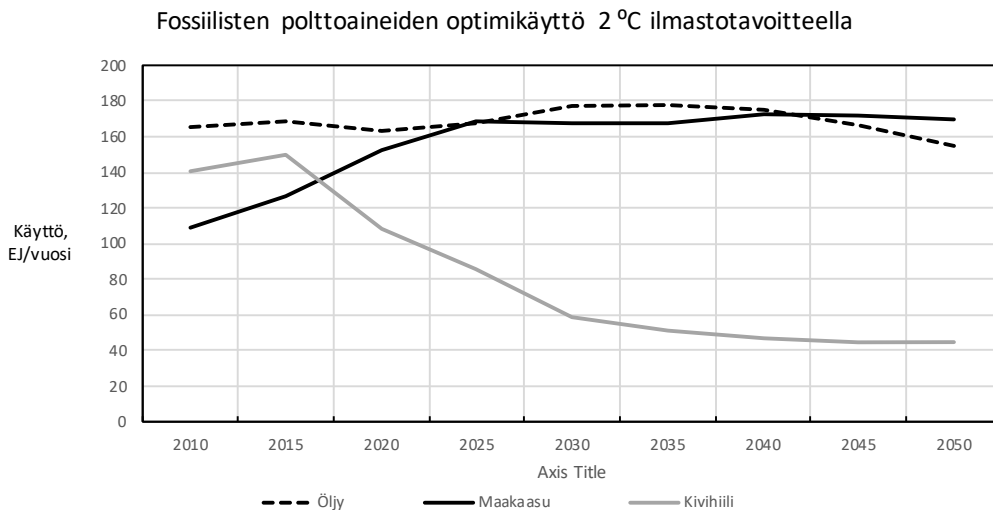
Johtopäätös tästä jossain määrin epämuodollisesta tarkastelusta on, että kivihiili on se fossiilinen polttoaine, josta pitäisi luopua ensimmäisenä, ja että suurimman osan jäljellä olevista kivihiilivarannoista pitäisi jäädä maan uumeniin. Perinteistä öljyä ja kaasua pitäisi käyttää todennäköisesti kunnes ne loppuvat.<sup>6</sup> Epätavanomaisten öljy- ja kaasuvarojen pitäisi jäädä maan uumeniin eikä uutta tekniikkaa niiden hyödyntämiseksi pitäisi kehittää.

Yksinkertainen analyysini voidaan tehdä hienostuneemminkin. Esimerkki tästä on McGlade ja Ekins (2015). He laskevat kivihiilen, maakaasun ja öljyn optimaaliset luopumisskenaariot, kun päästöille on asetettu rajat, jotka (jollakin todennäköisyydellä) pitäisivät

<sup>5</sup> Karkeana laskelmana voidaan todeta, että barreli öljyä sisältää noin 115 kg hiiltä, tuottaen poltettaessa 420 kg hiilidioksidia. Ruotsalainen hiilivero, joka on noin 100 euroa hiilidioksiditonnilta, vastaa noin 40 euron veroa per öljybarreli. Tämä on huomattavan suuri, mutta samaa suuruusluokkaa kuin perinteisen öljyntuotannon kustannusetu epätavanomaisiin öljyn lähteisiin verrattuna.

<sup>6</sup> Kenen pitäisi käyttää konventionaalisia öljy- ja maakaasuvaroja on toinen kysymys. Tasa-arvoperustein voitaisiin esittää, että meidän länsimaiden pitäisi jättää öljy Kiinan, Intian ja Afrikan kuluttajille.

Kuvio 4. Öljyn, maakaasun ja hiilen käytön lopettamisjärjestys



ilmaston lämpenemisen alle 2 celsiusasteen. Heidän analyysinsä tulokset on esitetty kuviossa 4.

### Politiikkajohdopäätökset

Esitän lopuksi joitakin poliittisten päättäjien kannalta relevantteja johdopäätöksiä, jotka perustuvat minun ja kollegoideni sekä monien muiden tekemään tutkimukseen.

1. Globaali sopimus hiilipäästöjen (minimi) hinnasta on välttämättömyys. Itse asiassa se on todennäköisesti myös riittävä rajoittamaan ilmastonmuutosta. Toistaiseksi kansainväliset neuvottelut ovat keskittyneet maakohtaisiin päästokiintiöihin. Kysymys

päästöjen hintaa koskevasta sopimuksesta ei ole ollut vakavasti neuvottelupöydällä. On selvää, että sellaiseen sopimukseen pääseminen ei ole helppoa, mutta muut ratkaisut eivät todennäköisesti ole sen helpompia.

Sillä, miten päästöille tuleva hinta pannaan täytäntöön, verolla vai kaupattavilla päästöoikeuksilla, ei ole niin suurta väliä. Ei myöskään sillä, mitä järjestelmästä tulevilla tuloilla tehdään. EU:n päästökauppajärjestelmä EU-ETS, siihen vuonna 2018 tehtyjen viimeisimpien uudistusten jälkeen, on malliesimerkki. Se osoittaa, että jopa laaja alue, johon kuuluu hyvin erilaisia maita, voi päästä sopimukseen tehokkaasta ilmasto-politiikasta, joka perustuu päästöjen hinnoitteluun.

2. Kivihiili on tärkein ilmasto-ongelma, ei öljy eikä maakaasu. Ellei Kiinaa saada vakuuttuneeksi kivihiiliriippuvuutensa lopettamisesta ja ellei varmisteta, etteivät Intia ja Afrikka seuraa samaa kivihiili-intensiivistä kehityspolkua, ei ilmasto-ongelmaa voida ratkaista.
3. Kansalliset ilmastopoliitikat on muotoiltava ottaen huomioon globaali perspektiivi. Monet hyvää tarkoittavat kansalliset ilmastotoimet vain siirtävät päästöt muihin maihin. Sellaiset politiikat ovat hyödyttömiä ja uhkaavat siirtää päähuomion pois globaalista ongelmasta. Ruotsin ja Suomen kaltaiset rikkaat maat voivat selvästi vaikuttaa muihin maihin ryhtymällä edelläkävijöiksi. Älykäs ja kustannustehokas siirtymä ilmastoneutraaliuteen, jota muut maat voivat seurata, kannustaa useampia seuraamaan sitä kuin kustannuksiltaan kallis linja.
4. Vihreän teknologian tuet voivat täydentää päästöjen hinnoittelua arvokkaalla tavalla, muutoksia helpottaen, mutta ne eivät korvaa päästöjen hinnoittelua. Subventiot teknologioille, joita voidaan käyttää muissa maissa hiiliriippuvuuden vähentämiseen, ovat arvokkaita. Tukia ei kuitenkaan pitäisi antaa teknologioille, jotka eivät ole skaalautuvia ja jotka helpottavat vain kansallisten päästötavoitteiden saavuttamista.
5. Lämpötilan nousun rajoittamisen, sanoakamme 2 – 2,5 celsiusasteeseen, ei tarvitse olla kallista eikä sen pitäisi todennäköisesti johtaa suuriin maailmanlaajuisiin vahinkoihin, vaikka alueelliset ilmastotuhot voi-

vat olla raskaita. Huonosti suunnitellut ja koordinoimattomat ilmastopoliitikat voivat kuitenkin tulla liian kalliiksi. □

## Kirjallisuus

- Arrhenius, S. (1896), “On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground”, *Philosophical Magazine and Journal of Science* 41: 237–276.
- Hassler, J., Krusell, P. ja Olovsson, C. (2018), “The consequences of uncertainty: Climate sensitivity and economic sensitivity to the climate”, *Annual Review of Economics* 10: 189–205.
- Hassler, J., Krusell, P., Olovsson, C. ja Reiter, M. (2018), “On the effectiveness of climate policies”, IIES WP.
- IPCC (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- McGlade, C. ja Ekins, P. (2015), “The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C”, *Nature* 517: 187–190.
- Matthews, H. D., Gillet, N. P., Stott, P. A. ja Zickfeld, K. (2009), “The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions”, *Nature* 459: 829–833.
- Nordhaus, W. D. (1994), *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge MA.
- Pigou, A. C., (1920), *The Economics of Welfare*, Macmillan, London.