

Hiilen yhteiskunnallinen kustannus vuonna 2020

Taloustiede
pro gradu -tutkielma

Laatija(t):
Riku Mikael Mellin

Ohjaaja(t):
Professori Timo Kuosmanen

12.5.2023
Turku

Turun yliopiston laatujajestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

Oppiaine: Taloustiede

Tekijä(t): Riku Mikael Mellin

Otsikko: Hiilen yhteiskunnallinen kustannus vuonna 2020

Ohjaaja(t): Professori Timo Kuosmanen

Sivumäärä: 72 sivua

Päivämäärä: 12.5.2023

Ilmastonmuutos on haastava ongelma sen havaitsemisesta hinnoitteluun. Vaikka sai akateemisen kiinnostuksen 1970-luvulta lähtien, laajamittainen tutkimustyö on korostanut ilmiön monimutkaisuutta. Kustannuksia on hankala mitata, sillä suurimmat vahingot uskotaan tapahtuvan kaukana tulevaisuudessa ja hajautuneesti ympäri Maapalloa.

Eräs lähestymistapa on arviointimallintaminen, jossa makrotaloudelliseen malliin lisätään ilmastonmuutoksen vahingot ja hyvinvointifunktiota optimoivat agentit hinnoittelevat ilmastonmuutoksen kustannukset tasapainottaen mieltymyksiään, rajoittaen päästöjä ja sopeutuen muutoksiin. Tutkielma tarkastelee FUND (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution) mallia, joka tarkastelee kustannuksia monimuotoisesti. Tätä vasten tarkastellaan DICE (Dynamic integrated climate-economy) mallia, jolla on paljon yksinkertaisempi kustannusfunktio.

Tutkielma tarkastelee nykyisen ilmastotieteen tilaa, joka alkoi joukosta erittäin hyviä arvauksia ilmastonmuutoksen syysseuraus suhteesta ja mahdollisista hiilidioksidipäästöjen pidemmän aikaisista luonnontieteellisistä vaikutuksista. Taloustiede käsittelee ilmastonmuutosta ulkoisvaikutuksena. Ihmiset tekevät epäoptimaalisia päätöksiä, koska heidän käyttämänsä hinnat eivät vastaa yhteiskunnassa tapahtuvia kärsimyksiä. Päätöksentekoa varten pitäisi tietää hiilidioksidipäästöjen elämänkaaren rajakustannus, eli hiilen yhteiskunnallinen kustannus.

Arviointimalleissa on suuri määrä tekijöitä, joita mallintaja voi valita ja motivoida melkein mielivaltaisesti. Näihin kuuluu ilmastoherkkyyden kaltaisia luonnontieteellisiä tekijöitä tai taloustieteellisiä, kuten korko. Tekijöihini kuuluu myös eettiset näkemykset, sillä vaikka ilmastonmuutos on maailmanlaajuinen ilmiö, vahingot eivät jakaannu tasapuolisesti. Kaikki tähän asti tuotetut yksiselitteiset rajakustannus arviot ovat kyseenalaisia. Jotta arviointimallintamista voidaan hyödyntää, täytyy mallintajien tehdä yhteistyötä luonnontieteilijöiden ja empiirisen taloudellisen tutkimustyön kanssa. Samoin mallintajat voivat ulkoistaa erityisesti eettisen päätöksenteon mallintamalla lyhyen ajan jo päätettyjä poliittisen päätöksenteon ratkaisuja. Lyhyemmän ajan tarkastelu pystyisi helpommin tuottamaan empiirisiä tuloksia joihin mallintamista voitaisiin verrata.

FUND-malli on ongelmallisempi arviointimalli. Sen dokumentaatio on huonossa kunnossa ja monimutkainen kustannusfunktio ei ole osittain motivoitu nykyisen tiedon perusteella. Vaikka arviointimallintamisella on selkeitä edistymisen mahdollisuuksia, FUND tarvitsee päivityksen ennen kuin sitä voidaan suositella vertausarvioituun hiilen rajakustannusten mallintamiseen.

Avainsanat: Hiilen yhteiskunnallinen kustannus, DICE, FUND, Ilmastonmuutos, Arviointimalli

SISÄLLYS

1	Johdanto	7
2	Ilmastonmuutos ja taloustiede	9
	2.1 Luonnontieteellisen ymmärryksen kehitys	10
	2.2 Taloustieteellinen lähtökohta	14
	2.3 Hiilen yhteiskunnallinen kustannus	19
	2.3.1 Arviointimallinnus	19
	2.3.2 Tuloksia	22
3	FUND opas	25
	3.1 Mallin resoluutio	25
	3.2 Päästöt ja kustannukset	26
	3.3 Ilmakehä ja ilmasto	28
	3.4 Vaikutukset	29
	3.4.1 Maatalous- ja metsätalous, sisätilat ja merenpinnan nousu	29
	3.4.2 Kuolevaisuus ja myrskyt	36
4	Mallin käytäntö	39
	4.1 Kehitys	39
	4.2 Hyödyntäminen	42
5	Arviointimallinnus nykypäivänä	46
	5.1 Rajakustannusarvojen tuottaminen	46
	5.2 Vahinkofunktioiden käytäntö	50
	5.3 Rajakustannukset vuonna 2020	52
6	Yhteenveto	58
	Lähteet	60

KUVIOT

Kuvio 1. Maailmanlaajuinen keskilämpötila poikkeama.	10
Kuvio 2. Kaavio pohjoisen pallonpuoliskon lämpötilamuutoksista.	12
Kuvio 3. Maapallon lämpötila rekonstruktio viimeiseen 200-vuoden ajan.	13
Kuva 4. Maanviljelijän tuotantofunktiot.	16
Kuvio 5. Hiilipäästöjen teoreettinen kustannus optimointi.	18
Kuvio 6. Energiaympäristöä optimoiva malli.	20
Kuvio 7. 1980-luvun arvioita hiiliveron vaikutuksista hiilipäästöihin.	23
Kuvio 8. FUND versio 1.5.	40
Kuvio 9. Maapallon ilmaston riskialueet.	54
Kuvio 10. Kioton pöytäkirjan toteuttamisen kustannukset.	55

TAULUKOT

Taulukko 1. Hiilidioksidin yhteiskunnallinen kustannus.	24
Taulukko 2. OECD-maiden päästötavoitteet ennen vuotta 2010.	44
Taulukko 3. FUND- ja DICE-mallin yhteiskunnallinen kustannus.	46
Taulukko 4. FUND-malli eri skenaarioilla.	47
Taulukko 5. FUND-malli oikeudenmukaisuuden ja Ramsey-koron kanssa.	49

1 Johdanto

Ilmastonmuutos on akateemisesta näkökulmasta haastava ilmiö. Hallitustenvälisen ilmastopaneelin ensimmäinen raportti (IPCC 1990, xii) pystyi hädin tuskin varmuudelle ilmaisemaan 1980-luvulla alkaneen lämpökauden syyseuraus suhteita. Taloustieteilijöille kysymys voi olla jopa hankalampi, sillä sosiaalitieteissä ei ole montaa pidemmän ajan säännönmukaisuutta ihmisen käytöksessä ja kansainvälinen talous ei ole kokenut tämänkaltaista ilmastoshokkia. Ihmiskunta itsessään ei ole kohdannut näin nopeasti muuttunutta ilmastoa sitten viime jäätiköitymisen loppumisen. Ekonometriset työkalut voivat auttaa lyhytaikaisten trendien löytämisen, mutta on vielä epäselvää, toimiiko tämä data tulevaisuudessa talouden ja ilmaston muuttuessa.

Esimerkkinä tästä voitaisiin pitää käänteistä muutosta. Jos ihmiskunta tuottaisi taloudellisella toiminnalla kaasua, joka kylmentäisi ilmastoa, miten hyvin me voisimme arvioida siitä syntyviä kustannuksia? Pystymmekö tarkkailemalla jo kylmenevää maailmaa antamaan hyvän arvion seuraavan 100-vuoden ajan muutoksista, uskoen muutoksien olevan säännönmukainen itse kylmenemisen kanssa? Entä jos mittaisimme alueessa tapahtuvia kustannuksia vertailemalla sitä kylmempään alueeseen ja tarkastelemalla, miten tämä alue on mukautunut kylmempiin olosuhteisiin? Mutta ilmastonmuutos ei ehkä vaikuta samoilla mekanismeilla talouteen, vaan ajan kanssa ilmiöön tulee ja poistuu tekijöitä. Esimerkiksi ilmaston kylmetessä tiettyyn lämpöasteeseen, ei Suomessa lumi sulaisi kesällä, keräten kohovia kasoja jäätä & lunta. Ajan myötä tämä tekisi Suomessa taloudentoiminnan ja asumisen hankalaksi. Mahdollista tarkastelua myös hankaloittaa tiedon vähyys, sillä nykypäivänä ei ole montaa teollista valtiota alueessa, joka olisi yksinomaisesti lumen peitossa koko vuoden.

Sama ongelma pätee ilmastonmuutoksen tarkastelussa. Miten me voimme tietää pidemmän ajan muutoksen kustannukset talouteen? Tämä on tärkeä, sillä muuten ei ole selkeää mittatikkua verrata eri toimintatapojen mielekkyyttä. Eräs lähestymistapa olisi hyödyntäen modernia tietokone voimaa ja yrittää mallintaa maailmanlaajuisen talouden muutos tulevien satojen vuosien aikana ja altistaa se ilmastonmuutoksen kustannuksille. Tästä voitaisiin saada yksiselitteinen raja-arvo tämän päivän päästöjen elämänkaaren tuottamista kustannuksista. Tämä hiilen yhteiskunnallinen kustannus olisi erinomainen työkalu päätöksentekijöille. Samoin akateemikoilla olisi tapa ajatella muita pidemmän ajan ympäristö ongelmia. Ei voida poissulkea mahdollisuutta, että talouden toiminta

nykypäivänäkin tuottaa muita haittavaikutuksia kansainvälisellä tasolla, jotka voidaan kunnolla arvioida tarkasti vasta tulevaisuudessa.

2 Ilmastonmuutos ja taloustiede

Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin viimeisin raportti päätöksentekijöille (IPCC 2023, 4) antaa selkeän syyseuraus suhteen ilmastonmuutoksesta. Viimeisen sadan vuoden aikana maailmanlaajuinen lämpötila on noussut hiukan yli yhden Celsius asteen. Mahdolliset luonnolliset tekijät ovat tasapainottaneet toisensa, antaen hyvin pienen yhteisvaikutuksen. Ihminen on taloustoiminnallaan vaikuttanut lämpötilaan kahdella merkittävällä tavalla: hiilidioksidipäästöt ja aerosolit. Kummatkin ovat ihmisen taloudellisen toiminnan sivutuotteita, mutta muuttavat lämpötilaa eri tavoilla. Hiilidioksidipäästöt syntyvät fossiilisten polttoaineiden polttamisesta, estävät infrapunasäteilyn (lämmön) karkaamista avaruuden. Aerosoleilla tarkoitetaan pieniä neste tai kaasu hiukkasia, jotka estävät auringonvalon saapumista planeetalla. Tällä uskotaan oleva negatiivinen vaikutus lämpötiloihin, mutta hiilidioksidi vaikutus on näistä kahdesta suuresti voimakkaampi. Kasvu on ollut voimakasta, hiilidioksidin määrän noustessa esiteollisesta noin 280 miljoonaosasta yli 400 miljoonaosasta ilmakehässä (Dietz 2007).

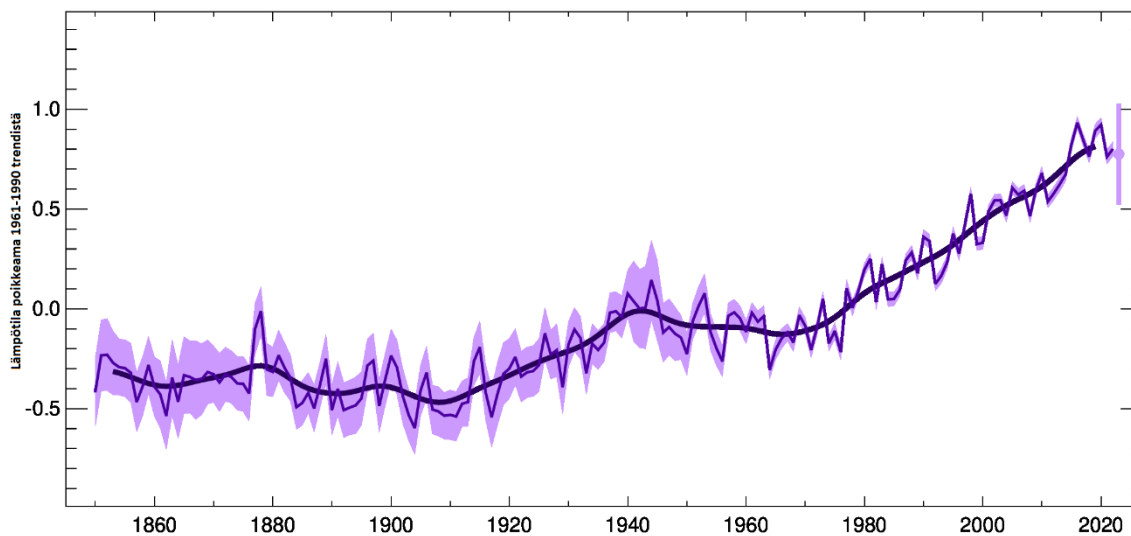
Sama raportti (IPCC 2023, 5–7) antaa myös kuvan jo tapahtuneesta ja mahdollisista tulevista vaikutuksista. Vuosien 1901–1971 välillä merenpinnan vuosittaisen nousun keskiarvo oli 1.3 millimetriä, nousten 1971–2006 välillä 1.9 millimetriin. Tämän uskotaan nousseen viime aikoina 3.7 millimetriin ja muutoksien johtuvan pääsääntöisesti ilmastonlämpenemisestä. Merten lämpeneminen vaikuttaa negatiivisesti kalasteluun, rasittaa rannikkoalueita ja vaarantaa puhtaan veden saatavuutta. Alueelliset korkea lämpötila tapahtumat nostavat kuolleisuutta, rasittavan urbaanialueiden infrastruktuuria ja mahdollistavat erilaisten sairauksien leviämisen. Samoin maailmanlaajuinen ekojärjestelmän häirintä on jo johtanut eläinlajien sukupuuttoon. Näiden riskitekijöiden uskotaan altistavan jopa 3.3 miljardia ihmistä ilmastonmuutoksen haittavaikutuksille seuraavan sadan vuoden aikana.

Vaikka voi olla kysymyksiä jo tapahtuneiden vaikutusten mittauksesta maailmalla muista tapahtuvista asioista, on jo huomattavissa julkisen ja yksityisen sektorin aloittaneen toimenpiteitä ilmastonmuutoksen vaikutusten hidastamiseen ja hillitsemiseksi. Ilmastonmuutospaneeli (IPCC 2023, 8–11) raportoi korkealla luottamuksella eri sektorien aloittaneen toimenpiteitä hiilidioksidipäästöjen rajoittamiseksi ja mahdollisten muutosten adaptaatioon. Ongelmana tällä hetkellä on

näiden toimenpiteiden hajallisuus ja pidättäytyvyys. Erityisesti julkisella päätöksentekijöillä ei ole yhtenäistä suunnitelmaa. Tämä on pahimmillaan tarkoittanut hyödyttömiä tai jopa ilmastonmuutosta voimistavia toimenpiteitä.

Mutta miten varmana voidaan pitää näiden vaarantekijöitä ja miten näihin johtopäätöksiin on päästy? Miten taloustieteilijät ovat osallistuneet ilmastonmuutoksen tieteelliseen keskusteluun ja mitä työkaluja he hyödyntävät?

2.1 Luonnontieteellinen kehitys



Kuvio 1. Maailmanlaajuinen keskilämpötila poikkeama.

Kuvio 1 (HadCRUT 2023) osoittaa Maapallon pinnalla tapahtuneen lämpötilamuutoksen Celsius asteissa vuodesta 1800-luvun puolesta välistä eteenpäin, kun lämpötilojen maanpäällinen asema mittaaminen aloitettiin. Toisen maailmansodan jälkeen käytäntö standardisoitiin ja mittausasemien maailmanlaajuinen kattavuus parantui, joten sitä edeltävän ajan suuremmat todennäköisyysalueet voidaan selittää asemien kattavuuden puutteella ja epäsymmetrisillä käytännöillä. 1970-luvun lopulla on alkanut positiivinen lämpötila trendi, joka on jatkunut nykypäivään asti (2022 tammikuu kuviossa). Ilmasto on monimutkainen järjestelmä, jossa keskilämpötilaa muuttuvia tekijöitä on useita. Mistä siis voitaisiin päätellä hiilidioksidin olevan pääsääntöisesti syy moderniin lämpötrendiin?

Svente Arrhenius (1896) esitti ensimmäisenä laskelmia hiilidioksidin positiivisesta vaikutuksesta lämpötilaan ja mahdollisena selittäjänä maailmanlaajuisiin ilmaston muutoksiin. Häntä erityisesti kiinnosti pitoisuuksien muuttuminen jääkausien selittäjänä.

Tutkimuksessa laskettiin pitoisuuden tuplaamisen aiheuttavan 3 °C lämpenemisen Arkisella alueella.

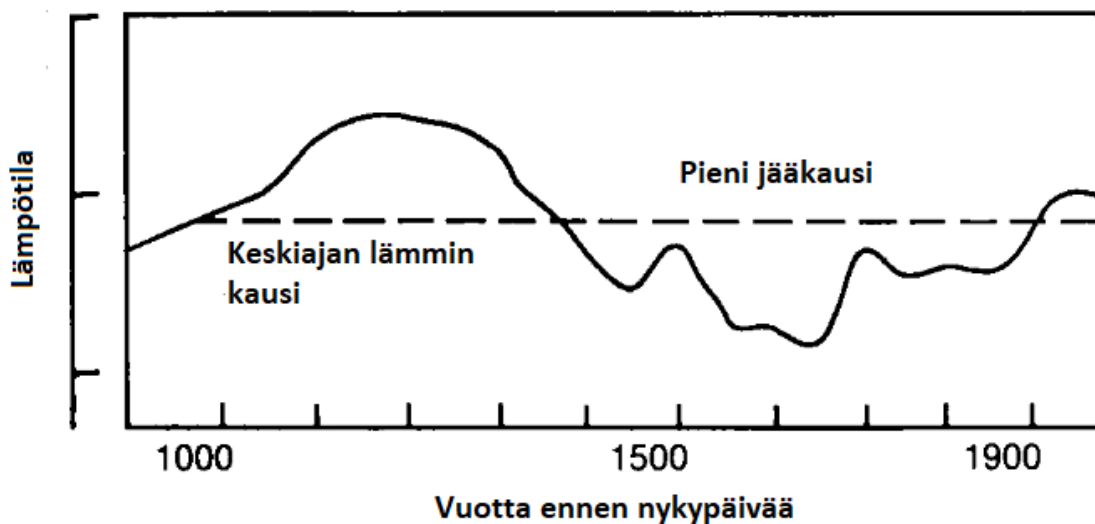
Arrheniuksen analyysi ei kuitenkaan ollut monimuotoinen. Laskelmat ja hiilidioksidille annetut ominaisuudet olivat yksinkertaisia. Varsinaisia kemikaalisia ominaisuuksia korkealla ilmakehässä ei ymmärretty tai muun ilmastojärjestelmän reaktiota mahdolliseen lämpövaikutukseen. Ensimmäiseen kysymykseen vastasi Ensimmäisen maailmansodan jälkeinen tutkimustyö, erityisesti Callendar (1941). Kaikista ilmakehän kaasuista, vesihöyryllä on suurin lämpövaikutus ottaa vastaan lähteviä infrapunasäteitä ja molekyylivärähtelyllä uudelleen sädettää tämä säteily ympäri ilmakehää. Mutta vedenmäärä ilmassa määrittää ilmankehän lämpötila, siinä missä hiilidioksidi pystyy sekoittumaan muihin kaasuihin ja pysymään kauemmin ilmakehässä. Callendar painottaa hiilidioksidin tärkeyttä heikompana lämmittävänä kaasuna sen täydentävän vesihöyryn värähtelytaajuus aluetta. Voimakkaampi vesihöyry ei siis syrjäytä hiilidioksidin lämmittävää vaikutusta ilmakehässä.

1970-luvulla ilmastotieteenyhteisö alkoi syntyä yhteinen näkemys hiilidioksidipäästöjen vaikutuksesta ilmastoon ja ilmaston tulevasta tilasta. Vuosien 1965–1979 välillä julkaistuista tutkimuksista, jotka tekijät ennusteita tulevien vuosikymmenien lämpötilan muutoksista, seitsemän ennusti kylmenemistä, 20 ei huomattavaa muutosta ja 44 lämpenemistä (Fleck, Connolley ja Peterson 2008). Hiilidioksidin yhteyttä potentiaaliseen lämpökauteen pidettiin tarpeeksi todistettuna, että mahdollisuus esitettiin Yhdysvaltojen presidentille esitetyssä luonnontieteilijöiden raportissa vuonna 1965 (Valkoinen talo 1965, 109–131). Raportin liitteen mukaan ihmisen toiminta oli jo lisännyt hiilidioksidi pitoisuutta 7 % esiteollisesta ajasta, voisi parhaimmillaan kolminkertaistua ja pitoisuuden tuplaaminen aiheuttaisi 2,4–16 °C lämpötilan nousun. Vaihteluväli arvioissa johtuu epävarmuudesta aikaisemmin mainittuun monimutkaiseen reaktioon hiilidioksidin tuottamaan lämpötilan nousuun. Tietokoneiden teho ei ollut vielä tarpeeksi voimakas ilmaston yksityiskohtaiseen mallintamiseen. Yhdysvaltojen tiedeakatemia laski kokonaisvaikutuksen olevan 1,5–4.5 °C, todennäköisimmän arvon olevan 3 °C (National Research Council 1979).

Vaikka seuraava vuosikymmen aloitti lämpökauden, oli sen syistä epävarmuuksia. Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin ensimmäinen raportti (IPCC 1990, xi–xii) ilmaisi Maapallon siirtyneen uuteen lämpenemisen ajanjaksoon, mutta ei voinut

yksiselitteisesti selittää tätä hiilidioksidin, Auringon ja tavanomaisen ilmaston sisäisen lämmönsiirtelyn (merestä maahan ja toisinpäin) välillä.

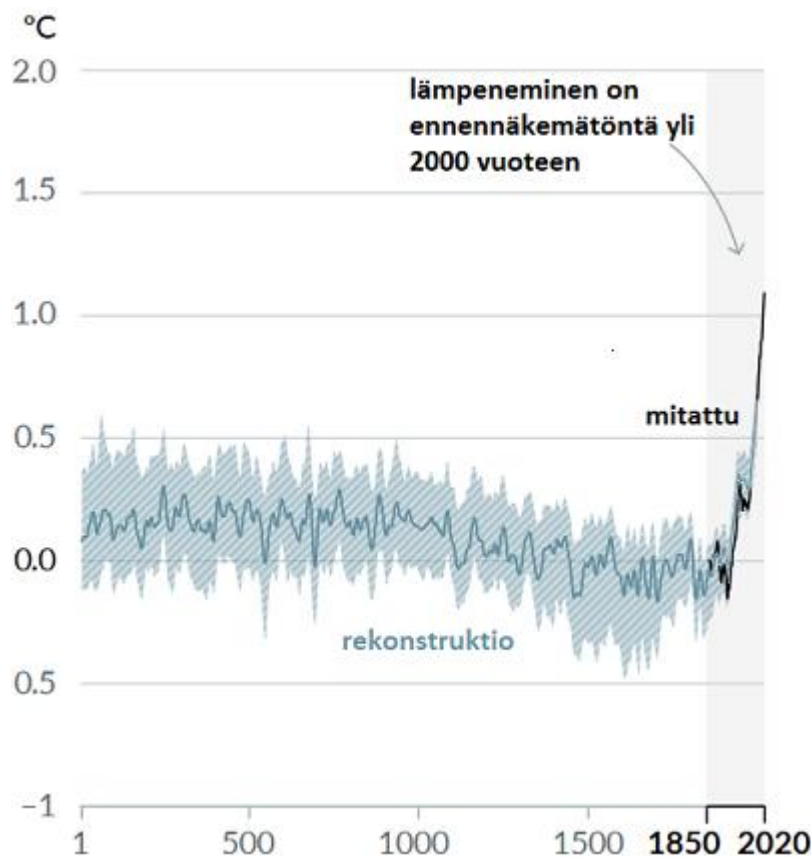
Samoin ensimmäinen raportti osoitti kansainvälisen tiedeyhteisön käytäntöjen alkukantaisuutta kootessa analyysia haastavasta kysymyksestä. Hyvä heuristiikka miettiä tapahtuman vakavuutta on tarkastella sitä muiden tapahtumien rinnalla. Kuvio 2 on ilmastopaneelin (IPCC 1990, 202) kaavio ilmastohistoriasta. Amatöörin näkökulmasta voisi helposti uskoa ilmaston käyvän suhteellisen usein voimakkaita lämpötilojen muutoksia. Kaaviota ei ollut oikein lähdeviitattu itse raportissa, mutta se on sittemmin liitetty Lamb (1965, 26) tutkimukseen. Vaikka Lamb oli tutkimassa Keskiajan lämmintä kautta, oli kaavio arvio Keski-Englannin lämpötilan muutoksista.



Kuvio 2. Kaavio pohjoisen pallonpuoliskon lämpötilamuutoksista.

Seuraavan 20 vuoden aikana lähestulkoon kaikkiin esitettyihin kysymyksiin löydettiin vastaus. Ilmastopaneelin viidennen raportin (IPCC 2015, 2–31) mukaan ilmamehän on lämmennyt 1980-luvulta asti ja hiilidioksidi on ainoa olemassa oleva selittävä tekijä. Aurinko on ollut viimeisen vuosikymmenen aja suhteellisen passiivinen ja jopa viilentänyt ilmastoa. Selkeitä positiivisia pidemmän ajan ilmaston sisäisiä vaikuttajia ei ole löytynyt ja kokeelliset testit ovat tukeneet hiilidioksidin olevan ilmastoa lämmittävä tekijä. Nykyinen lämpökausi on myös poikkeuksellinen, sillä alamme varmuudella lähestymään lämmintä maailmanlaajuista aikaa sitten ennen viime jäätiköitymisen aikaa 12000 vuotta sitten. Samoin ilmastonherkkyys hiilidioksidin tuplaamiselle on 2–4 °C, todennäköisin arvo 3 °C.

Myös ymmärryksemme suhteellisen lyhyemmistä ajoista on parantunut. Kuvio 3 (IPCC 2020, 6) osoittaa nykyisen lämpökauden olevan kuumin yli 2000-vuoteen. Ilmastohistorian rekonstruktiossa hyödynnetään useita historiallisia biologisia prosesseja, jotka korreloivat lämmön kanssa. Näitä ovat esimerkiksi happi molekyylit jääkerroksien välissä, puiden ikärenkaat ja järvien sedimentti kerrokset. Musta käyrä on maanpäällisten mittausasemien aikasarja.



Kuvio 3. Maapallon lämpötila rekonstruktio viimeisin 200-vuoden ajan.

Ilmastotieteilijöiden näkemys hiilidioksidin positiiviseen syysuraus suhteeseen lämpötilaan on siis ollut alusta alkaen hyvien johtopäätöksiensä nojassa. Vaikka ensimmäisiä arvioita voidaan pitää arvauksina, ei tämä ole estänyt luonnontieteilijöitä parantamasta menetelmiään ja etsimään lisää informaatiota ympäröivästä luonnosta ja sen historiasta.

2.2 Taloustieteellinen lähtökohta

Vaikka nykyistä ilmastonmuutosta pystyy kuvailemaan prosessina muutamalla virkkeellä, on sen vaikutukset maailmanlaajuisia. Tämä asettaa taloustieteilijöille hankalan haasteen mitata tai antaa normatiivisia ehdotuksia.

Ilmastonmuutoksen taloustieteellinen näkökulma alkaa ulkoisvaikutuksesta. Samuelsson ja Nordhaus (2010, 271–280) määrittelevät ulkoisvaikutuksen olevan positiivinen tai negatiivinen kustannus, jonka kolmannen osapuolen on otettava jonkun toiminnasta. Tavanomainen esimerkki tästä on koulutus. Ihminen kouluttautumalla ei hyödytä vain itseään kasvattamalla rajatuottavuuttaan ja saaden parempaa palkkaa, mutta myös ympäröivää yhteiskuntaa. Hänellä on mahdollisesti alempi todennäköisyys olla työtön ja näin tarvita yhteiskunnan apua työttömyysturvan muodossa. Tärkeä erotus ulkoisvaikutuksella ja tavanomaisella kustannuksella on tämän vaikutuksen olematon huomiointi markkina hinnassa tai käytöksessä. Yksilön tuotannon tai kulutuksen rajahyöty ja rajakustannus eivät täsmää muun yhteiskunnan rajahyötyä ja rajakustannusta.

Kustannuksena ilmastonmuutos on erinomainen esimerkki negatiivisesta ulkoisvaikutuksesta. Hiilidioksidi on ihmisen taloudellisen toiminnan sivutuote, jonka vaikutus havainnoidaan maailmanlaajuisessa näkökulmassa. Tämä kasvattaa haasteita edes huomioida ja mitata näitä kustannuksia. Tavanomaisemmassa esimerkissä voisi olla järvi, johon tehdas laskisi käsittelemättömän veden, näin aiheuttaen kustannuksia muilla järven käyttäjille. Tämänkaltainen ongelma on paljon helpompi käsitellä ja ratkaista, kuin ilmastonmuutoksen ongelma, jossa esimerkiksi suomalainen kuluttaa Kiinassa valmistettua tuotetta jonka hiilidioksidi päästöt vuosikymmenien päästä voisi ilmaston lämmitessä nostaa kuolevaisuutta Afrikassa ja Etelä-Amerikassa.

Kun 1960-luvun jälkimmäisellä puolella yhä useampi akateemikko alkoi kiinnostua ympäristö kysymyksistä, olivat taloustieteilijät myös siirtämässä aiheeseen. Tämä alustavasti tapahtui teollisen tuotannon päästöjen suorien ympäristö ja terveys vaikutuksen tarkasteluna. Esimerkiksi Kneese (1971) varoitti päästöjen teettämien raskaiden metallien negatiivisesta vaikutuksesta talouteen ja Heller (1971) mietti miten ekologien ja sosiaalitieteilijöiden pitäisi tehdä yhteistyötä tilanteissa, joissa tuotannon kasvattaminen aiheuttaisi vielä suurempia kustannuksia ympäristölle. 1970-luvulla myös alkoi taloustieteilijöiden pohdinta ilmastonmuutoksen vaikutuksista talouteen. Vaikka d'Argo (1975, 992–1050) käy raportissaan pääsääntöisesti saastumisesta syntyviä

likaantumisen kustannuksia, mainitaan hiilidioksidin tuottaman ilmastonmuutoksen mahdollisuus aiheuttaa kustannuksia yhdysvaltalaiselle maataloudelle.

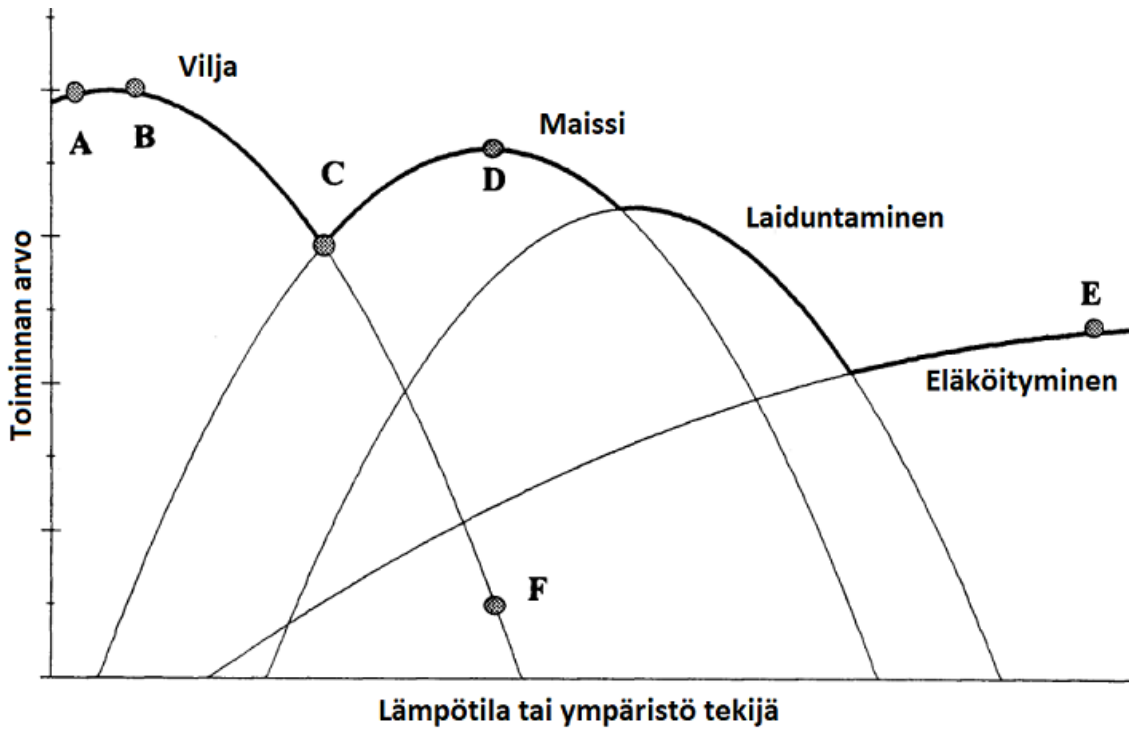
Vaikka taloustieteilijät voivat hyödyntää esimerkiksi pienimmän neliösumman tilastomenetelmää ja tarkastella ilmastonmuutosta lineaariregression tuloksena säälle, tämä voi mahdollisesti yliarvioida mahdollisia kustannuksia. Mendelssohnin, Nordhausin ja Shawn (1994) mukaan ilmastonmuutoksen olevan pitkän ajan prosessi, jossa yksilö ei tasapainota ainoastaan mahdollisia kustannuksia ja kustannusten välttämiseen, vaan myös joukon erilaisia strategioita.

Auffhammer (2018, 41–45) määrittelee kolme kustannuksien mittaamisen menetelmää: Ricardialainen poikkileikkaus menetelmä, paneeli data menetelmä ja pitkän muutoksen estimointi.

Ricardialainen poikkileikkaus menetelmä

Mendelssohn, Nordhaus ja Shaw (1994) laajensivat ilmastonmuutoksen aiheuttamien kustannuksien tarkastelua maataloudessa. He huomauttivat aikaisempien tutkimuksien kärsivän tarkastelun jättämisen ainoastaan yksi ulotteiseksi kustannukseksi. Poikkileikkaus mallissa maanviljelijä olosuhteiden muuttaessa voi valita monen vaihtoehdon välillä, näin lieventäen mahdollisia kustannuksiaan.

Kuviossa 4 (Mendelsohn, Nordhaus ja Shaw 1994, 754) näytetään, teoreettisella maanviljelijällä on mahdollisuus liikkua eri toiminnan arvo käyrästä toiseen. Liikkuessa A->B, lämpötilan nousu jopa hiukan kasvattaa hänen viljansa arvoa kasvukauden parantuessa. Sen sijaan siirtyminen pisteeseen C on poikkileikkauspiste, jossa maissin kasvattamisen arvo on yhtä suuri viljan kanssa ja tästä eteenpäin maanviljelijän kannattaa kasvattaa maissia. Piste D on B:n kaltainen huippupiste, mutta maissin kanssa, jonka jälkeen sen arvo laskee nopeammin suhteessa maan yksinkertaisen laiduntamisen kanssa. Viimein tarpeeksi korkeilla lämpötilalla maanviljelijän kannattaa siirtyä maan viljelystä eläkkeelle, mitä edustaa piste E. Piste F ilmaisee epäoptimia toimintaa maanviljelijän puolesta, jossa hän viljelee viljaa paljon arvokkaamman maissin sijasta.



Kuva 4. Maanviljelijän tuotantofunktiot.

Ricardialaisessa poikkileikkaus menetelmässä kerätään tutkittavan alan erilaisia toimintatapoja ja tarkastellaan miten halutun tekijän muuttaminen vaikuttaa eri agenttien käytökseen. Tämä antaa parempaa informaatiota kustannuksien tarkastelusta, verrattuna esimerkiksi pelkästään yksityiskohtaisempaan viljan kasvattajien tarkasteluun, jossa pois siirtyminen merkittäisiin kaiken arvon menettämiseksi.

Paneeli data menetelmä

Vaikka poikkileikkaus menetelmä oli suuri askel parempaan ilmastonmuutoksen kustannusanalyysiin, sitä ei pidetty täysin hyvänä ratkaisuna. Voi olla hankala erotella haluttu muuttuja muista vaikuttavista tekijöistä, antaen väärän kausaalisuuden. Ricardialainen poikkileikkaus menetelmä ilman vahvasti tarkasteltuja muita selittäviä muuttujia myös antaa virheellisen kuvan siirtymisen tuotantotavasta toiseen olevan kustannusvapaa. Menetelmä ei myös sisällytä tuottajien mahdollisia odotuksia, sillä nyt ja tulevaisuudessa maanviljelijän esimerkissä tuottajat sisällyttävät ilmastonmuutoksen odotuksiinsa. (Auffhammer 2018, 42–43.)

Auffhammer, Ramanathan ja Vincent (2006) ehdottivat sen sijaan pitkäaikaista paneeli vertailua eri alueiden välillä. Tutkimuksessa suoritettiin kustannus regressio yhdeksän eri Intian osavaltion välillä riisin viljelyssä. Intia on suuri maa, jossa eri osavaltiot nauttivat

erilaisista sääolosuhteista. Hyödyntämällä meteorologista dataa säästä ja maatalouden tilastoja kasvumääristä, voitaisiin lyhytaikaisempia sään muutoksia käyttää ilmastonmuutoksen korvikkeena ja erottelemaan alue kohtaiset selittävät muuttujat. Pidemmän ajan tarkastelussa voisi esimerkkinä käyttää Suomea ja eteläisempää eurooppalaista valtiota ja tarkastella mahdollisia vaikutuksia Suomeen vertaamalla lämpimämmän valtion lämmitessä. Vaikka menetelmä voi korjata poikkileikkaus menetelmän kausaalisuus ongelman, Auffhammer (2018, 44–45) myös myöntää paneeli data menetelmän kärsivän aikaisemmin mainitusta odotuksien sisällyttämisestä ja hyvän sää datan puuttumisesta erityisesti kehitysmaissa. Jos toimijat voivat muuttaa käyttäytymistään pidemmällä ajalla tavoilla, jotka eivät ole mahdollisia lyhyellä, voi Auffhammerin mukaan lyhyen ajan muutokset paisuttaa kustannuksia.

Pitkän muutoksen estimointi

Burke ja Emerick (2016) suorittivat tutkimuksen Yhdysvaltojen maatalouden tuotannon muutoksista pidemmällä ajalla. Yksittäisen alan vertailun ja ilmastonmuutoksen korvaamisen sijasta, Burke ja Emerick hyödynsivät suurta määrää informaatiota mitä kerätään Yhdysvalloissa mittaamaan jo tapahtuneen ilmastonmuutoksen vaikutuksia. Yhdysvallat ovat geologisesti heterogeeninen maa, joten ilmastonmuutos vaikuttaa eri alueisiin eri tavoilla. Tutkivat toivoivat näin pystyvänsä erottelemaan ilmastonmuutoksen datasta viimeisen 50 vuoden ajalta. Heidän estimaattiinsa perustui viiden vuoden muuttuvan keskiarvon eroihin säässä ja sadossa.

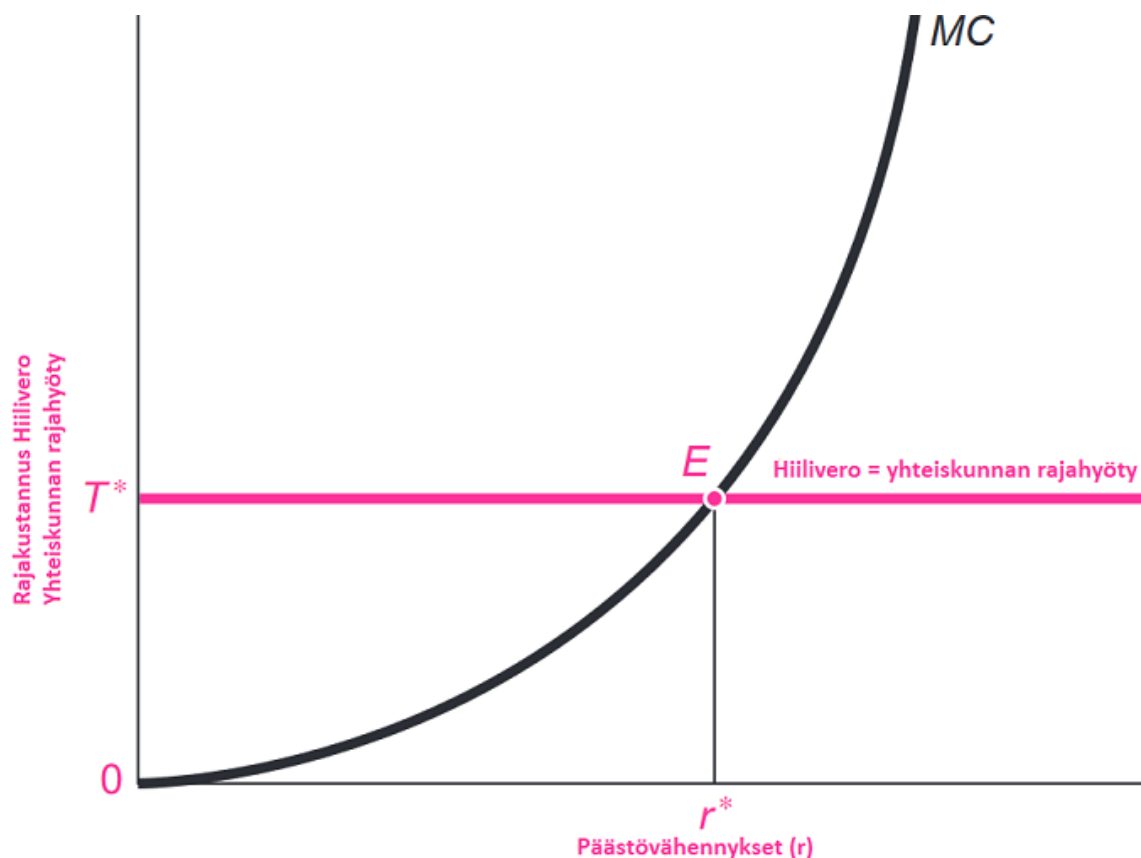
Vaikka menetelmä on erinomainen, Auffhammer (2018, 45) pitää sitä ongelmallisena hyödyntää eri maissa ja erityisesti muissa talouden osa-alueissa. Yhdysvallat on erityisesti poikkeuksellinen sieltä kerätystä tilastollisesta informaatiosta, joten Auffhammerin mukaan on hankala toteuttaa tämänkaltaista menetelmää informaation määrän vaatimuksen takia.

Menetelmien sekoitukset

Auffhammer (2018, 45–46) muistuttaa eri menetelmien yhdistämisen mahdollisuuksista. Esimerkiksi paneeli datan huomatuista tuloksista ja säästä voisi leikata kahteen periodiin ja tilastollisesti tarkastella eri periodien eroja. Samoin lyhyt aikaisen sään muutoksen paneeli datan voisi parantaa yhdistämällä sen poikkileikkaus menetelmän kanssa. Jos tarkastelun alaisuudessa olisi tarpeeksi monta yksikköä tarpeeksi suurella aikamäärällä

ja ilmasto olosuhteet olisivat tarpeeksi heterogeeniset, voisi yksiköiden reaktion tarkastella kausaalista sään tuottamasta muutoksesta.

Vaikka ilmastonmuutoksen mahdollisista kustannuksista olisi hyvää informaatiota, tarvittaisiin vielä teoreettinen tapa käsitellä optimaalista päästöjen vähennystä. Kuviossa 5 (Samuelsson & Nordhaus 2010, 278) nousee oikealla päästöjen vähentämisen rajakustannuskäyrä ja se poikkeaa vaakasuoran yhteiskunnan rajahyötykäyrän ja asetetun hiiliveron. Koska ilmastonmuutos on negatiivisen ulkoistuksen ongelma, se ei heijastu markkinahintoihin ja yksittäiset talouden toimivat epäilemättä pysyisivät teollaan rajahyötykäyrän alapuolella, jos edes ollenkaan origosta. Samoin huonosti suunniteltu julkisen sektorin ratkaisu voisi asettaa tavoitteen yli optimaalisen pisteen E, eli tuottaen yhteiskunnalle loppusummana enemmän haittaa päästöjen vähentämisestä kuin mitä vähentäminen hyödyntäisi yhteiskuntaa.



Kuvio 5. Hiilipäästöjen teoreettinen kustannus optimointi.

Akselin vaakasuora mittaa päästövähennyksien (r) määrää ja pystysuora alan rajakustannuksia (MC), yhteiskunnan rajahyötyä ja asetettua hiiliveroa (T).

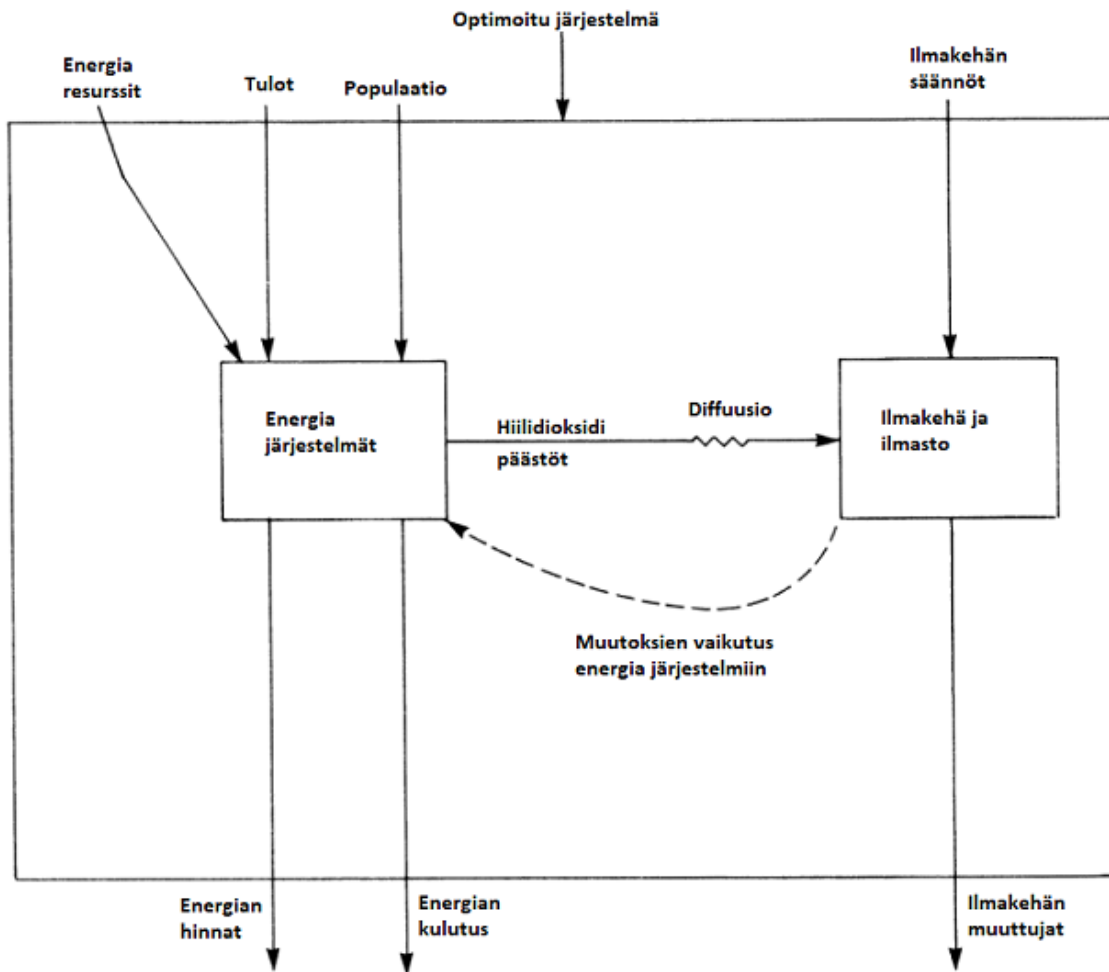
Miten taloustieteilijät ovat pyrkineet ottamaan ilmiön monimuotoisuuden huomioon ja antamaan mahdollisimman hyvän vertaustekijän, jolla saataisiin aikaan mahdollisen optimaalinen ilmastopolitiikka yhteiskunnalle?

2.3 Hiilen yhteiskunnallinen kustannus

2.3.1 Arviointimallinnus

Ilmastonmuutoksen kokonaisvaltaisen vaikutuksen mallintaminen aloitettiin yleisen akateemisen kiinnostuksen aloitettua 1970-luvulla. Nordhaus (1977) puheessaan Yhdysvaltojen taloustieteelliselle yhteisölle kävi läpi jo tiedettyä luonnontiedettä ja alustavia taloustieteilijöiden näkemyksiä mahdollisista kustannuksista, mutta kaikkein tärkeimmäksi kontribuutioksi jäi hänen alustava malli.

Nordhaus (1977, 343) esittää kuvio 6:ssa mallin sisäisen logiikan. Hän olettaa energia markkinoista syntyvien hintojen ja kulutuksen säätelevän hiilidioksidipäästöjä taloudessa, jossa hyödynnetään fossiilisia polttoaineita ja resurssien, tulojen ja populaation määrän toimivan syöttö tekijöinä. Kokonaisuutta energia järjestelmät voidaan myös pitää kuuluvan ne poliittiset tai julkisen sektorin päätökset, jotka vaikuttavat energian hintoihin tai kulutukseen. Päästöt ovat siis sivuvaikutus energiajärjestelmän toiminnasta. Ilmakehä ja ilmasto jo sisältävät jo niihin vaikuttavat luonnonlait ja tärkeämmin hiilidioksidi päästöjen vaikutukset. Ilmakehän säännöt syöttö tekijänä tarkoittaa julkisen sektorin tarkoituksen haluista politiikkaa. Mallilla siis voidaan myös tarkastella jonkinlaisten päästöjen vähentämisen strategioiden toimivuutta. Nordhaus pitää mielenkiinnon kohteena tarkastella, miten mahdolliset strategiat voivat toimia hajautetusti esimerkiksi kotitalouksien, tuottajien ja valtioiden välillä. Ilmakehän muuttujille tarkoitetaan malliajon aikana tapahtumia, kuten lämpötilaa. Kuvaelman uloin neliö merkitsee järjestelmän maksimoivan hyötyfunktioita, joka tässä asiayhteydessä merkitsee väestön energian kulutuksen maksimointia sen tuotannon tekemän negatiivisen ilmastonmuutoksen rinnalla.



Kuvio 6. Energiaympäristöä optimoiva malli.

Ilmastonmuutoksen tarkastelu energian käytön kautta taloudessa oli askel oikeaan suuntaan, mutta jätti useita tekijöitä mallintamatta. Ilmastonmuutos vaikuttaa useaan eri talouden osa-alueeseen, joista moni on selkeästi energia markkinoiden ja siihen liittyvän poliittisten sääntöjen ulkopuolella. Ilmiön rajaaminen vain energiaan jättää suuren osan taloudesta käsittelyn ulkopuolelle.

Nordhaus (1993) esittää vaihtoehdoksi DICE (Dynamic integrated climate-economy) mallin. Siinä pidettiin suhde taloudelliseen tekijään ja luonnontieteelliseen olettamukseen, jotka yhtenä toimivat ilmaston, mutta skaalaa laajennettiin koko talouteen. Energia sektorin sijasta mallissa tarkastellaan taloutta, joka koostuu kotitalous tuottajista, jotka valmistavat yhtä hyödykettä. Tuotannosta syntyvä hiilidioksidi vaikuttaisi ilmaston kautta tähän talouteen ja antaisi pohjan, johon voitaisiin vertailla erilaisia olettamuksia tai skenaarioita.

DICE-mallin julkaisu aloitti uusien yhdenmukaisesti arviointimallien hyödyntämisen taloustieteilijöiden keskuudessa. Vaikka DICE-malli oli ensimmäinen, se ei muodoltaan edusta kaikkia. Pindyck (2013, 862–863) listaa kuusi tekijää, jotka yhdistävät valtaosaa kaikista arviointimalleista, joita taloustieteilijät hyödyntävät. Ennuste talouden hiilidioksidipäästöistä (tai sen hyödy asteesta) kun taloudelle ei aseteta mitään rajoitteita sen käyttämisestä, luonnontieteellinen arvio tulevaisuuden hiilidioksidipäästöistä, luonnontieteellinen arvio hiilidioksidipäästöjen vaikutuksesta luonnolliseen järjestelmään, ennuste taloudellisista vaikutuksista (esimerkiksi bruttokansantuotteen tai kulutuksen menetys), arvio päästöjen lieventämisen kustannuksista koko malliajon elinkaaren aikana ja oletus sosiaalisesta hyödystä & diskonttauksesta. Esitetyt tekijät ovat sekoitus taloustieteellisiä ja luonnontieteellisiä ehtoja, joista erityisesti neljäs ja kuudes vaativat taloustieteilijän tekevän vahvan teoriaan perustuvan arvion tai hyvän oletuksen, sillä arvio talouden vaikutuksista ja yksilöiden halusta mieltää kustannuksia vaikuttavat hyvin suuresti loppusummaan. Näistä olettamuksista enemmän luvussa 5.

Seuraavassa luvussa tarkastellaan yksityiskohtaisemmin monimutkaisempaa yhdenmukaisesti arviointimallia, mutta tarkastellaan DICE-mallia vielä tarkemmin kolmen yhtälön kautta, jotka toivottavasti parantavat mallin taloustieteellistä logiikkaa (Nordhaus 2016, 1518–1521):

$$W = \sum_{t=1}^{Tmax} V[c(t), L(t)]R(t) = \sum_{t=1}^{Tmax} U[c(t), L(t)]R(t). \quad (1)$$

Yhtälö (1) on optimoitu sosiaalisen hyvinvoinnin funktio W . Tekijä V on välitön sosiaalinen hyvinvointi funktio ja U on hyvinvointi funktio. c on per henkilö kulutus, L on väestönmäärä ja $R(t) = (1 + \rho)^{-t}$ on hyvinvoinnin diskontto tekijä, jossa ρ on sosiaalisen aika preferenssin aste. Mallin kotitaloudet siis arvostavat talouden ainoata hyödykettä suhteessa omaan kulutus haluihinsa hyvinvointi funktion ja aika preferenssin kautta. Jos hiilidioksidipäästöjen lieventämisellä on kustannus, täytyy kotitalouksien ottaa tämä huomioon optimoinnissa.

$$D(t) = \varphi_1 T_{AT}(t) + \varphi_2 [T_{AT}(t)]^2. \quad (2)$$

Yhtälö (2) antaa meille ilmastonmuutoksesta syntyvän vahingon D . Tekijä T_{AT} on maailmanlaajuisen lämpöasteen nousun keskiarvo. DICE-mallissa siis ilmastonmuutoksen vaikutus talouteen voidaan selittää yksinkertaisella toisen asteen yhtälöllä, jossa suurempi ilmastonmuutos aiheuttaa yhä suurempia kustannuksia.

$$SCC(t) = \frac{\frac{\partial W}{\partial E(t)}}{\frac{\partial W}{\partial C(t)}} = \frac{\partial C(t)}{\partial E(t)} \quad (3)$$

Yhtälö (3) määrittelee hiilen yhteiskunnallisen kustannuksen SCC . Tekijä E on päästöt, jolla on lämpötilan nousulla suora vaikutus talouteen yhtälö (2) perusteella. Keskimmäisen termin yksinkertaistaminen jälkeen yhtälössä arvioidaan päästöjä kulutuksella, eli yhtälö (1) mukaisesti päästöongelma on kotitalouden kulutuksen optimointi ongelma. Tekijät täytyy aikaindeksoida derivoinnin lisäksi, koska kummatkin kulutus (ja näin sen suhteellinen arvo) ja päästöt muuttuvat malliajon aikana. Hiilen yhteiskunnallisella kustannuksella tarkoitetaan päästetyn hiilimolekyyli tonnin aiheuttamien kustannuksien nykyarvoa. Hiilen yhteiskunnallinen kustannus olisi siis tarkka arvo, jolla voitaisiin arvioida mahdollisten hiilidioksidipäästöjen rajoittamisen strategioita, eli haluamamme lopputulos arviointimalleista.

2.3.2 Tuloksia

Ilmastonmuutoksen kustannuksia laskevien tai optimoivien mallien kehitys on myös aloittanut keskustelun eri menetelmien tuottamista tuloksista. Mallintaja yhteisön varttuminen 1980-luvulla loi mahdollisuuden myös tarkastella eri ryhmien tuloksia.

Nordhaus (1991) painottaa mielenkiinnon olleen eri lieventämisstrategioiden toimeenpanon monimutkaisuudessa, sillä vaikka analysoitu ongelma oli maailmanlaajuinen, ovat taloudelliset agentit vähintään aluekohtaisia heidän päätöksenteossaan. Samoin lievennysstrategioiden ei tarvinnut poistaa kaikkia päästöjä, vaan päätöksenteko pystyy tapahtumaan asteissa. Tämä monimuotoisuus myös korostaa hiilidioksidin muista mahdollisista kaasuista. Millään muulla ihmisen tuotannon sivutuote kaasulla ei ole yhtä suurta roolia taloudessa. Sen takia kuvio 7:n (Nordhaus 1991, 50) esittämä tutkielma keräys ei käsittele hiilen yhteiskunnallista kustannusta, vaan tarkastelee hiilen käytön nousevan hinnan vaikutusta. Ekonometrisillä malleilla tarkoitetaan käyttäytymistutkimuksia, jossa hyödynnetään jo olemassa olevaa markkina dataa kysynnästä ja tarjonnasta. Manne-Richels optimointimallilla tarkoitetaan energiaympäristö mallia, johon on sisällytetty useita eri teknologioita poistaa hiilidioksidia ilmakehästä. Muut menetelmät ovat pääsääntöisesti teknologian ja energia muotojen substituuio vertailuja, esimerkiksi metaani päästää vähemmän hiilidioksidia

kuin öljyn poltto. Vaikka eri menetelmät antavat hyvin erilaisia tuloksia, antaa yhteinen regressio välin alle yhden ja neljän prosentin välillä per 10 dollarin hinnan nousu.

Prosentti muutos hiilidioksidi päästöissä						
Vero	Ekonometrinen malli		Optimointi mallit		Muu	Regressio
	Pieni	Suuri	Nordhaus	Manne-Richels		
0	0	0	0	0	0	0.0
10	3 [8]	10 [1]	5 [9]			6.6
20	7 [8]	18 [2]	9 [9]		10 [5]	10.9
30	10 [8]	40 [1]	17 [9]			15.0
40	13 [8]	36 [1]	20 [9]		28 [6]	18.9
50	15 [8]					22.6
60						26.1
70						29.5
80						32.8
90		40 [2]	43 [9]		20 [5]	35.9
100	27 [8]					38.8
110						41.6
120						44.3
130		50 [2]				46.8
140					30 [5]	49.3
150	36 [8]		60 [9]			51.6
160					63 [4]	53.8
170						56.0
180						58.0
190			92 [9]			59.9
200	43 [8]					61.7
210						63.5
220						65.2
230						66.8
240			78 [9]			68.3
250					74 [4]	69.8
260			90 [9]	82 [7]		71.1
270			94 [9]			72.5
280						73.7
290						74.9
300						76.1
310						77.2
320						78.2
330						79.2
340						80.2
350				76 [7]		81.1
360						82.0
370						82.8
380						83.6
390						84.3
400						85.1
410						85.7
420						86.4
430		50 [3]	98 [9]			87.0

Kuvio 7. 1980-luvun arvioita hiiliveron vaikutuksista hiilipäästöihin.

Lukujen esiintyessä pareina, ensimmäinen luku viittaa prosentti laskuun annetulla verolla ja sulkeinen luku, kuinka moneen tutkimukseen se perustuu. Sana vero tämän kuvion asiayhteydessä voi merkitä yleisemmin kustannuksien nousua. Vero mitataan vuoden 1988 Yhdysvaltojen dollareissa.

Arviointimallien yleistyttyä muuttui taloustieteilijöiden näkökulma hiilidioksidi päästöjen vähentämisen arvoista hiilen yhteiskunnalliseen kustannukseen. Koska optimoivat mallit alkoivat kattaa teoreettisesti koko talouden, alkoi myös

ilmastonmuutoksen vaikutus suoraa bruttokansantuotteeseen olla tavoiteltavia arvioita. Esimerkiksi Tol (2009) katsauksessa monessa eri tutkimuksessa 2,5 °C lämpötilan nousu aiheuttaisi yli prosentin laskun kansainvälisessä bruttokansantuotteessa. Taulukko 1 (Tol 2009, 41) osoittaa siihen asti tuotetut tulokset.

Taulukko 1. Hiilidioksidin yhteiskunnallinen kustannus.

Päästetyn hiilimolekyylitonin kustannus vuoden 1995 dollareissa. Prosentti arvo merkitsee diskonttokorkoa.

	Painoton				Painotettu			
	Kaikki	0 %	1 %	3 %	Kaikki	0 %	1 %	3 %
Diskontto korko								
Keskiarvo	105	232	85	18	151	147	120	50
Keskihajonta	243	434	142	20	271	155	148	61
Moodi	13	-	-	-	41	81	49	25
Mediaani	29	85	46	14	87	116	91	36
N	232	38	50	66	-	-	-	

Tol (2009, 39–43) samassa katsauksessa analysoi tuotettuja arvoja. Hän huomauttaa tuloksien suuresta hajaumasta, erityisesti joukosta hyvin korkeita arvoja ja diskonttokoron olevan eräs tärkeimmistä muuttujista. Muita selittäviä tekijöitä ovat suuri epävarmuus alustavasta kustannustekijöistä kyseisen ajan olemassa olevan tiedon niukkuuden takia. Painotetut arvot perustuvat Fisher-Tippett jakaumaan kaikkien tutkimuksien välillä.

Viimeisien vuosien aikana taloustieteilijöiden kiinnostus yksittäisiin hiilen kustannuksien raja-arvoihin on madaltunut erityisesti kirjallisuuskatsauksen muodossa. Erään viimeisimmistä tutkimuskokoelmista suoritti Wang ym. (2019, 1506), jotka antoivat 578 arvion aineistolle 200.57 dollarin keskiarvon ja 112.86 dollarin keskiarvon 3 % diskonttokorolla. Jakauma myös tässä tutkimuksessa oli suuri, -50 ja 8752 dollarin väliltä.

3 FUND opas

FUND-malli (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution) kehitti Richard S. J. Tol ja julkaistiin vuonna 1997. Mallissa on esimerkiksi DICE malliin (luku 2.3) verrattuna yksinkertaisemmat taloudelliset oletukset, analyysi keskittyy per henkilö tulo vertailuun. FUND keskittyy ilmastomuutoksen vaikutuksien monimuotoiseen tarkastukseen. (Tol 2007, 151–153.)

Mallia (MimiFUND 2022) kuvaillaan seuraavasti:

3.1 Mallin resoluutio

Mallin ajo on vuodesta 1950 vuoteen 3000, vuoden sykleissä. Maailma määritellään kuuteentoista alueeseen: Yhdysvallat, Kanada, Länsi-Eurooppa, Japani & Etelä-Korea, Australia & Uusi-Seelanti, Keski- & Itä-Eurooppa, entinen Neuvostoliitto, Lähi-Itä, Keski-Amerikka, Etelä-Amerikka, Etelä-Aasia, Kaakkois-Aasia, Kiina, Pohjos-Afrikka, Saharan etelänpuoleinen Afrikka ja pienet saari valtiot.

Mallin aineisto ei käsittele vain joukkoa yhtälöitä, mutta tuo suuren määrän dataa taulukko muodossa. Tästä eteenpäin erottelen mallin oman datan tutkielman omista taulukoista nimikkeellä 'FUND taulukko'. Kaikki on saatavilla oppaan (FUNDTables, 2022) tietokannasta.

FUND taulukot P ja Y määrittelevät mahdolliset käytettävät päästöskenaariot. Koska täyttä varmuutta tulevaisuuden ihmisen käyttäytymisestä ei ole, Hallitustenvälinen ilmastopaneeli on tuottanut joukon skenaariota, joiden uskotaan kattavan suurimman todennäköisyyksien tilanteet (Legget ym. 1992 ja Nakicenovic & Swart 2001). Nämä päästöskenaariot myös määrittelevät eri alueiden asukaslukujen ja per henkilö tulojen kehityksen. Ajanjakson 2301 ja 3000 välillä väestönmäärässä ei tapahdu muutoksia ja tulojen muutos pysyy samana.

Kaikki hinnat ovat vuoden 1995 Yhdysvaltojen dollareissa. Yhtälöissä on useita yhtenäisiä tekijöitä, näistä yleisimmät t (aika) ja r (alue), Y (bruttokansantuote), y (bruttokansantuote per henkilö) ja T (lämpötila). Yhtälöissä pääsääntöisesti parametrit ovat yhtälökohtaisia ja samannimiset parametrit eivät vaikuta vapaasti eri yhtälöissä.

3.2 Päästöt ja kustannukset

$$M_{t,r} = \frac{M_{t,r}}{E_{t,r}} \frac{E_{t,r}}{Y_{t,r}} \frac{Y_{t,r}}{P_{t,r}} P_{t,r} = \Psi_{t,r} \Phi_{t,r} Y_{t,r} \quad (4)$$

Yhtälö (4) kuvaa hiilidioksidipäästöjä (CO_2). M on kokonaispäästöt, E vastaa energian hyödyntämisen tasoa taloudessa ja P väkilukua. Muoto on hyvin samanlainen tavanomaisen bruttokansantuotteen tarkastelun kanssa, jossa väestön määrän ja tuotantopanoksen sijasta tarkastellaan päästöjä.

$$\Psi_{t,r} = g_{t-1,r}^{\psi} \Psi_{t-1,r} - \alpha_{t-1,r} \tau_{t-1,r} \quad (5)$$

Yhtälö (5) selventää tekijää ψ , hiilin käytön astetta energian käytössä. α on parametri ja τ julkisen politiikan muutosta. Poliitiikan muutos tarkoittaa hiili molekyylin päästöllä asetettua veroa. g on itsenäisen energia tehokkuuden parantumisen (AEEI) ja itsenäisen hiili tehokkuuden parantumisen (ACEI) mitta. Tämä on eksogeeninen ja saadaan skenaarioista.

$$\Phi_{t,r} = g_{t-1,r}^{\varphi} \Phi_{t-1,r} - \alpha_{t-1,r} \tau_{t-1,r} \quad (6)$$

Energian käyttöaste taloudessa, eli φ .

$$M_{t,r} = (\Psi_{t,r} - X_{t,r}^{\psi})(\Phi_{t,r} - X_{t,r}^{\varphi})Y_{t,r} \quad (7)$$

$$X_{t,r}^{\psi} = K_{\psi} X_{t-1,r} + (1 - \alpha_{t-1,r}) \tau_{t-1,r}^{\psi} \quad (8)$$

$$X_{t,r}^{\varphi} = K_{\varphi} X_{t-1,r} + (1 - \alpha_{t-1,r}) \tau_{t-1,r}^{\varphi} \quad (9)$$

Yhtälöt (7), (8) ja (9) tarkentavat julkisen politiikan vaikutusta päästöihin. Parametri α liikkuu 0 ja 1 välillä ja määrittelee mikä energian & hiilen käyttöasteen muutoksista johtaa pysyviin päästövähennyksiin. Tällä tarkoitetaan muutosta, joka säilyy tulevaan ajanjaksoihin. Tekijä K ilmaisee tämän suhteen muutosta ja on asetettu perusmallinnuksessa $K_{\varphi} = K_{\psi} = 0.9$.

$$\alpha_{t,r} = 1 - \frac{\tau_{t,r}/100}{1 + \tau_{t,r}/100} \quad (10)$$

Tarkastellaan parametria α tarkemmin. Jos τ (valtion asettama hiilivero) on 100 dollaria per tonni päästettyä hiilimolekyyliä, olisi $\alpha = 0.5$. Tarkastelua kyseisen hetken ja

pysyvien päästövähennyksien välillä voidaan myös arvioida miettimällä, mitkä vähennykset pysyisivät, jos valtio laskisi hiiliveroa. FUND-mallin parametrit ovat tässä tapauksessa rakennettu heijastamaan muita samankaltaisia malleja (esimerkiksi Weyant 2004 ja Weyant ym. 2006).

$$\frac{C_{t,r}}{Y_{t,r}} = \frac{\beta_{t,r}\tau_{t,r}^2}{H_{t,r}H_t^g} \quad (11)$$

Yhtälö (11) tarkastelee päästöjen vähentämistä annettuna vuonna. Tekijä C on päästöjen vähentämisen kustannukset. H on kyseisen hetken tietotaso. Tämä käytännössä tarkoittaa kustannuksien alentumista ajan myötä. Käsitellään seuraavaksi parametri β :tä.

$$\beta_{t,r} = 0.784 - 0.084 \sqrt{\frac{M_{t,r}}{Y_{t,r}} - \frac{M_{t,r}}{Y_{t,r}}} \quad (12)$$

Yhtälö (12) kuvailee päästöjen vähentämisen suhteellista kalleutta eri alueiden päästöasteen perusteella. Tekijä M merkitsee kokonaispäästöjä ja Y bruttokansantuotetta. Suuren hiilen hyötyasteen alueella on suhteellisesti matala marginaali kustannus vähentää hiilen käyttöä matalan hyötyasteen alueeseen verrattuna.

$$H_{t,r} = H_{t-1,r} \sqrt{1 + \gamma_R \tau_{t-1,r}} \quad (13)$$

$$H_t^G = H_{t-1}^G \sqrt{1 + \gamma_G \tau_{t,r}} \quad (14)$$

Yhtälöt (13) ja (14) kuvaavat alueellista ja maailmanlaajuisia tietotasoa. Suurempi tietotaso laskee päästöjen vähentämisen kustannuksia. Parametri γ ilmaisee tiedon pysymistä alueella tai sen leviämistä muihin. Tavanomaisessa mallituksessa nämä on asetettu $\gamma_R = 0.9$ ja $\gamma_G = 0.1$. Yhtälöiden rakenne ja arvot heijastelee aikaisempaa tutkimustyötä (esimerkiksi Goulder & Schneider, 1999 ja Goulder & Mathai, 2000).

Maanäytön muutokseen ja metsä hävittämiseen liittyviä päästöjä ei voi lievittää, vaan ne otetaan eksogeenisesti (FUND taulukko CO2F).

$$E_t^B = \beta(T_t - T_{2010}) \frac{B_t}{B_{max}} \quad (15)$$

$$B_t = B_{t-1} - E_{t-1}^B \quad (16)$$

Jossa E^B on hiilipäästöt miljoonissa tonneissa (GtC), T on maailmanlaajuinen keskilämpötila, B_t on jäljellä oleva hiilivaranto, B_{max} kaikki mahdollinen päästettävä hiilivaranto (oletettuna 1900 miljoonaa tonnia hiiltä), B_{max} kaikki mahdollinen päästettävä hiilivaranto (oletettuna 1900 miljoonaa tonnia hiiltä) ja $\beta = 2.6 \frac{GtC}{C}$ on asetettu parametri.

Päästöt ennen vuotta 2010 on säädetty nollassi, joka on hienosäätö Denman ym. (2007) katselmuksesta.

Muut kasvihuonekaasut

Malli myös käsittelee metaania (CH_4), dityppioksidia (N_2O) ja rikkiheksafluoridia (SF_6). Toisin kuin hiilidioksidi, näitä kaasuja käsitellään eri säännöillä. Metaanin ja dityppioksidin päästöt kasvavat eksogeenisesti (FUND taulukot CH_4 ja N_2O), kasvumuutoksien pysyen vakiona vuosien 2301-3000 välillä. Kummankin päästöjen vähentämisen kustannukset liikkuvat toisen asteen yhtälön mukana (toisin sanoen paraabelin muodossa). Rikkiheksafluoridin päästöt kasvavat lineaarisesti bruttokansantuote per ihmisen mukaan (FUND taulukko SF_6) ja päästöjen supistamiselle ei ole erillistä mahdollisuutta.

3.3 Ilmakehä ja ilmasto

Hiilidioksidia lukuun ottamatta, kaikilla päästetyillä kaasuilla on rajallinen elinkaari ilmakehässä ja lopulta laskeutuvat Forster ym. (2007) tutkimuksen mukaan esiteolliselle tasolle. Sen sijaan hiilidioksidilla on monimutkaisempi elinkaari. Maier-Reimer & Hasselmann (1987) ja Hammitt ym. (1992) mukaisesti hiilidioksidi liikkuu ilmakehässä viidessä eri kerroksessa ja lopulta poistuu ilmakehästä mereen. Monimuotoisempi hiilidioksidin ilmakehä käsittely mallissa painostaa tämän kaasun tärkeyttä mallintamisen kohteena.

Ramaswamy ym. (2001) ja Forster ym. (2007) kuvaavat päästettyjen kaasujen kykyä imeä lähtevää infrapuna säteilyä ja uudelleen lähettää se ympäri ilmakehää. Mallissa kaasuilla on logaritminen positiivinen painostus maailmanlaajuisen keskilämpötilan nousuun, eli niiden vaikutus vähenee suurissa määrissä ilmakehässä. Tämä muuttaa keskilämpötilan tasapainopistettä, johon ilmasto liikkuu geometrisesti lämpötilan nousulla. Perusskenaariossa hiilidioksidi määrän tuplaaminen ilmakehässä aiheuttaa

tasapainopisteen 3°C nousun. Mendelsohn ym. (2000) tutkimusta hyödynnetään tämän maailmanlaajuisen lämpötilan muuttamiseen alueelliseksi lämpötilaksi. Tämä tehdään kertomalla maailmanlaajuinen arvo FUND taulukko RT:stä saatavalla korjaustekijällä.

Kattenberg ym. (1996) tutkimuksesta saadaan hienosäätö suoralle yhteydelle lämpötilan nousun ja merenpinnannousun välillä. Merenpinta nousee ei vain veden määrän lisäämisen mukana (esimerkiksi maanpäällisten jäätiköiden sulamisen kautta), mutta myös suoran lämpölaajenemisen kautta.

3.4 Vaikutukset

3.4.1 Maatalous- ja metsätalous, sisätilat ja merenpinnan nousu

$$A_{t,r} = A_{t,r}^r + A_{t,r}^l + A_{t,r}^f \quad (17)$$

Yhtälö (24) mittaa ilmastonmuutoksen kustannuksia maataloudessa. Kokonaisvaikutukset syntyvät summaamalla ilmastonmuutoksen kehittymisen asteen ($A_{t,r}^r$), ilmastonmuutoksen tason ($A_{t,r}^l$) ja hiilidioksidin lannoite ($A_{t,r}^f$) vaikutukset. Ensimmäisen on aina negatiivinen, sillä maanviljelijöille on epätäydellisiä suunnitelmia, joista osa on hankala muuttaa. Toinen voi olla positiivinen, negatiivinen tai neutraali, sillä alueiden eri menetelmät ja teknologiat voivat erota mahdollisesta alueen maatalouden optimista. Kasvatavat lämpötilat voivat aiheuttaa maatalousongelmia Tunisiassa, mutta voivat jopa parantaa olosuhteita Lapissa. Kolmas on aina positiivinen, lannoituksen ansiosta kasvit kasvavat nopeammin ilman apua.

$$A_{t,r}^r = \alpha_r \left(\frac{\Delta T_t}{0.04} \right)^\beta + \left(1 - \frac{1}{\rho} \right) A_{t-1,r}^r \quad (18)$$

Tekijä A^r on maatalouden vahingot fraktionaa johtuen ilmastonmuutoksen asteesta. Parametri α on 0.04°C aiheuttamasta alueellisesta maatalouden tuotannon muutoksesta (FUND taulukko A, kolumni 2-3), $\beta = 2.0$ on lämpötila muutoksen reaktion epälineaarisuuden ilmaiseva parametri ja $\rho = 10$ mittaa adaptaation nopeutta.

$$A_{t,r}^l = \delta_r^l T_t + \delta_r^q T_t^2 \quad (19)$$

Tekijä A^l ilmaisee maatalouden vahinkoja fraktionaa, jotka johtuvat ilmastonmuutoksen tasosta. Parametrit δ_r^l ja δ_r^q tulevat prosentuaalisesta alueellisesta maatalouden tuotannon muutoksesta keskilämpötilan ollessa yli 3.2°C esiteollisesta ajasta ja alueen maatalouden optimaalisesta lämpötilasta. (FUND taulukko A.)

$$A_{t,r}^f = \frac{\gamma_r}{\ln 2} \ln \frac{CO2_t}{275} \quad (20)$$

Tekijä A^f on maatalouden tuotantoa fraktiona johtuen hiilidioksidin lannoite vaikutteesta. Tekijä $CO2$ on ilmakehän hiilidioksidi pitoisuus ja parametri γ on hiilidioksidin tuplaamisen vaikutus. (FUND taulukko A, kolumni 8-9) ja 275 miljoonaa on esiteollinen hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä. Yhtälön logaritminen muoto merkitsee positiivisen vaikutuksen heikkenevän korkeammilla hiilidioksidin asteilla.

$$\frac{GAP_{t,r}}{Y_{t,r}} = \frac{GAP_{1990,r}}{Y_{1990,r}} \left(\frac{y_{1990,r}}{y_{t,r}} \right)^\epsilon \quad (21)$$

Yhtälö (21) selventää maatalouden osuutta tulosta. Aikaisemmat yhtälöt (17–20) mittaavat maatalouden muutosta tuotannon prosentti muutoksina ja tämä tulos täytyy yleistää tulon osuudeksi. Tekijä GAP on brutto maataloustuotanto ja parametri $\epsilon = 0.31$ on bruttokansantuotteen maatalouden osan tulojousto.

$$F_{t,r} = \alpha_r \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\epsilon \left(0.5 \left(\frac{T_t}{1.0} \right)^\beta + 0.5 \gamma \ln \left(\frac{CO2_t}{275} \right) \right) \quad (22)$$

Tekijä F vastaa metsätalouden kuluttajan & tuottajan ylijäämän muutosta. Parametri α mittaa $1^\circ C$ vaikutusta taloudelliseen hyvinvointiin. (FUND taulukko EFW.) Parametri $\epsilon = 0.31$ on maatalouden tulojousto, $\beta = 1$ on asiantuntija arvio ja $\gamma = 0.44$ (0.29–0.87) on parametri, joka vastaa hiilidioksidin tuplaamisen vaikuttavan metsien arvoon 15% . (Gitay ym. 2001.)

Parametri α on Perez-Garcia ym. (1995) ja Sohngen ym. (2001) tutkimuksien arvioiden keskiarvo. Tulokset on liitetty FUND alueisiin yhdenmukaistamalle ne suoraan bruttokansantuotteeseen.

Taloudelliset vaikutukset – vesiresurssit ja sisätilat

Ilmastonmuutos tuottaa hankaluuksia ihmisten kyvylle saada vettä. Tämä on tietenkin tärkeä resurssi oman elämän ylläpidosta usean taloudellisen toiminnan ylläpitämiseksi. Lämpötilojen nousu muuttaa luonnollisen veden saannin muotoa (esimerkiksi hyvin käytetyt joet tai järvet ehtyvät) ja tämän ympärille rakennettu infrastruktuuri eri alueissa altistuu kovan paineen alla tarjota vettä.

$$W_{t,r} = \min \left\{ \alpha_r Y_{1990,r} (1 - \tau)^{t-2000} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\beta \left(\frac{P_{t,r}}{P_{1990,r}} \right)^\eta \left(\frac{T_t}{1.0} \right)^\gamma, \frac{Y_{t,r}}{10} \right\} \quad (23)$$

Yhtälö (23) kuvaa vesi resurssin arvon muuttumista. Tekijä W vastaa vesi resurssien muutosta dollareissa. Parametrit α määrittää talouden reaktion prosenteissa vuoden 1990 bruttokansantuotteesta per °C (FUND taulukko EFW), $\beta = 0.85$ tarkoittaa vaikutukset talouskasvuun, $\eta = 0.85$ vaikutukset väkiluvun kasvuun, $\gamma = 1$ on reaktio tapahtuviin muutoksiin ja $\tau = 0.005$ on teknologian kehitys.

Parametrien β , η , γ ja τ arvot on hienosäädetty Downing ym. (1995; 1996) tutkimuksien mukaan.

Ilmastonlämpeneminen aiheuttaa sisätilojen lämmönsäätelyyn haasteita. Vaikka kylmiä tiloja ei tarvitse lämmittää, lämpimiä tiloja täytyy kylmentää. Liian kuuma sisätila voi pahimmillaan tarkoittaa ihmiselämän menettämistä. Kysynnän oletetaan olevan lineaarinen ihmisten määrän ja kotitalouksien määrän kanssa ja energiatehokkuuden kehittymisen oletetaan olevan sama talouden keskiverto energiatehokkuuden kehittymisen kanssa.

$$SH_{t,r} = \frac{\alpha_r Y_{1990,r} \frac{\text{atan } T_t}{\text{atan } 1.0} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\epsilon \left(\frac{P_{t,r}}{P_{1990,r}} \right)}{\prod_{s=1990}^t AEEI_{s,r}} \quad (24)$$

Tekijä SH on tilan lämmityksen kulutuksen vähenemistä. Parametrit α määrittää talouden reaktion lämpötilan muutokseen (FUND taulukko EFW), $\epsilon = 0.8$ kuvaa kysynnän tulojoustavuutta. Tekijä $AEEI$ ilmaisee itsenäisen energiatehokkuuden parantumista, mikä mittaa teknologian kehitystä energia sektorilla (FUND taulukko AEEI). Tämä on maailmanlaajuisesti noin 1 % per vuosi vuonna 1990 ja konvergoituu arvoon 0.2 % vuoteen 2200 mennessä.

$$SC_{t,r} = \frac{\alpha_r Y_{1990,r} \left(\frac{T_t}{1.0} \right)^\beta \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\epsilon \left(\frac{P_{t,r}}{P_{1990,r}} \right)}{\prod_{s=1990}^t AEEI_{s,r}} \quad (25)$$

Tekijä SC ilmaisee tilan viilentämisen kulutuksen kasvua. Parametrit α , $\beta = 1.5$, ja $\epsilon = 0.8$ mittaavat kysynnän tulojoustoa (FUND taulukko EFW kolumni 8-9). Tekijä $AEEI$ ilmaisee itsenäisen energiatehokkuuden parantumista, mikä on teknologian kehityksen mittatikka. Tämä on maailmanlaajuisesti noin 1 % per vuosi vuonna 1990 ja konvergoituu 0.2 % vuoteen 2200 mennessä.

Yhtälöt on hienosäädetty Downing ym. (1995; 1996) mukaan. Lämmitys ja viilentämisen kysynnän tulojousto on otettu Hodgson & Miller (1995) tutkimuksesta.

Taloudelliset vaikutukset – merenpinta ja maa

Ilmastonmuutos aiheuttaa merenpinnan nousua, joka uhkaa rannikkoalueita ja niissä asuvia ihmisiä. Meren alla maa on arvotonta ja ihmisten täytyy muuttaa muualle. Tarkastelu ei mallissa kuitenkaan rajoitu vain rannikoiden tutkimiseen tai yksiselitteisesti maan menetykseen. Ranta-alue voi myös kärsiä puristuksista, jossa merenpinnan nousu ei suoraan uhkaa aluetta, mutta tuhoaa sen kyvyn ylläpitää eläinlajeja ja olla hyödynnettävissä muuten taloudelliseen käyttöön.

Kostealla maalla tarkoitetaan rannikkojen lähellä olevaa maata, joka ei ole suorasti uhattuna merenpinnan nousulla. Esimerkiksi Lontoo on kaupunkina hyvin lähellä rannikkoa, mutta merenpinnan nousun uhka voi mahdollisesti realisoitua sen läpikulkevan joen noustessa korkeammalle. Kuivalla maalla tarkoitetaan aluetta näiden kahden alueen määritelmän ulkopuolella. Nämä voivat silti kärsiä merenpinnan noususta joki esimerkin muodossa ja lyhyessä ajassa ihmisten muuttaessa sinne muilta alueilta.

Agenteilla on vaihtoehtoja merenpinnan nousun ottamisen sijasta. He voivat käyttää tuloja ja suojella rannikkoa.

$$CD_{t,r} = \min[\delta_r S_t^{\gamma_r}, \zeta_r] \quad (26)$$

Yhtälö (26) kuvaa kuivan maan katoa. Tekijä CD mittaa potentiaalisen suojaamattoman kuivan maan häviämistä, δ_r yhden metrin merenpinnan nousun aiheuttama kuivan maan katoa (neliökilometri per metri), S_t on esiteollisen ajan jälkeinen merenpinnan nousu, ζ_r mittaa maksimaalista kuivan maan katoa. Parametri γ_r on säädetty mallin sisäiselle eri alueille annetuilla maan määrillä.

$$D_{t,r} = CD_{t,r} - C D_{t-1,r} \quad (27)$$

Tekijä D on mahdollinen kuivan maan häviäminen, CD on mahdollinen kumulatiivinen menetetty kuiva maan mikä tapahtuisi ilman suojelua ja $C D$ on realisoitu kumulatiivinen kuiva maan häviäminen.

$$D_{t,r} = (1 - P_{t,r}) D_{t,r} \quad (28)$$

Tekijä D on kuivan maan häviö, P on suojellun rannikon osuus ja D on mahdollinen menetetty kuiva maa.

$$CD_{t,r} = CD_{t-1,r} + D_{t,r} \quad (29)$$

Tekijä CD on realisoitu kumulatiivinen kuivan maan kato ja D on kuivan maan kato.

$$VD_{t,r} = \varphi \left(\frac{Y_{t,r}}{A_{t,r}} \right)^{\epsilon} \left(\frac{A_{t,r}}{YA_0} \right) \quad (30)$$

Tekijä VD on kuivan maan yksikköarvo (miljoona dollaria per neliökilometri), A on alue (neliökilometreissä) ja $YA_0 = 0.635$ on OECD maiden tulo tiheyden keskiarvo vuonna 1990 (miljoonaa dollaria per neliökilometri). Parametrit $\epsilon = 1$ on tulo tiheyden joustavuus maan arvolle ja $\varphi = 4$ miljoonaa dollaria per neliökilometri. (Darwin ym. 1995.)

$$W_{t,r} = \omega^S \Delta S_t + \omega^M P_{t,r} \Delta S_t \quad (31)$$

Yhtälö (31) ilmaisee rannikon menetystä merenpinnan nousulle. Tekijä W on rannikon kato, P vastaa osaa rannikosta, mikä on suojeluksen alaisuudessa, ΔS on merenpinnan nousu. Parametrit ω^S ilmaisee vuotista rannikon yksikköä mikä häviää merenpinnan nousuun ja ω^M vastaa vuosittaista rannikon määrää mikä katoaa puristukseen.

$$W_{t,r}^C = \min(W_{t-1,r}^C + W_{t-1,r}, W_r^M) \quad (32)$$

Tekijä W^C on kumulatiivinen rannikon häviö ja parametri W^M mittaa mahdollisesti uhattuna olevaa rannikkoaluetta. Tämän oletetaan olevan pienempi, kuin kaikki rannikkoalue vuonna 1990. Rannikon häviö muuttuu nolllaksi, kun kaikki uhattu kostea maa on menetetty.

$$VW_{t,r} = \alpha \left(\frac{y_{t,r}}{y_0} \right)^{\beta} \left(\frac{d_{t,r}}{d_0} \right)^{\gamma} \left(\frac{W_{1990,r} - W_{t,r}^C}{W_{1990,r}} \right)^{\delta} \quad (33)$$

Tekijä VW on rannikkoalueen arvo (dollaria per neliökilometri), d vastaa asukasmäärän tiheyttä, W^C on kumulatiivinen rannikon häviö ja W_{1990} on rannikkoalueen määrä vuonna 1990. Parametri α vastaa kosteiden alueiden palvelujen elinkaaren nykyarvoa, $\beta = 1.16$ on rannikkoalueen arvon tulojousto, $\gamma = 0.47$ mittaa rannikon arvon asukasmäärän tiheyden joustavuutta ja δ vastaa rannikon arvon joustavuutta. Normalisointi vakio $y_0 = 25000$ dollaria per henkilö per vuosi ja $d_0 = 27.59$.

Parametrit ja niiden tarkat arvot on otettu Brander ym. (2006) meta-analyysistä. Tutkimus tarkentaa menetetyn rannikon nyky- ja tulevaisuus arvoa menetettynä vuonna $\alpha = \alpha' \frac{1+\rho+\eta g_{t,r}}{\rho+\eta g_{t,r}} = \alpha' \frac{1+0.03+1 \times 0.02}{0.03+1 \times 0.02} = 21\alpha'$. Laskettu keskiarvo on $\alpha' = 280000 \frac{\$}{km^2}$

Rannikon menetykset aiheuttaa alueelta maahanmuuttoa, joka johdetaan alueen asukasmäärän tiheyden keskiarvosta. Arvo on asetettu 3 muuttavan henkilön tulot (Tol 2005). Vastaanottaja alueelle kustannukset ovat 40 % alueen per henkilö tulo per maahanmuuttaja (Cline 1992).

$$P_{t,r} = \max \left\{ 0, 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{NPVVP_{t,r} + NPVW_{t,r}}{NPPVD_{t,r}} \right) \right\} \quad (34)$$

Yhtälö (34) aloittaa maan suojelemisen kustannuksien mittaamisen tarkastelun arvioimalla suojeltavan rannikkoalueen koon. Tekijä P on osuus suojelusta rannikosta, $NPVVP$ on kaiken rannikon suojelun nettonykyarvo, $NPVW$ on kaiken suojatun rannikon menetyksen nettonykyarvo (suoja ei ole täydellistä) ja $NPPVD$ on menetetyn maan nettonykyarvo, jos ei olisi mitään suojelua. $NPVVP$ lasketaan olettamalla vuosittaisten kustannusten olevan vakio. Tämä perustuu kolmeen oletukseen: päätöksentekijät uskovat lineaariseen merenpinnan nousuun, rannikon suojeleminen perustuu suuriin infrastruktuuri projekteihin, joiden valmistuminen kestää monta kymmentä vuotta ja vain suoria investointeja harkitaan kustannuksina. (Fankhauser 1994.)

$$NPVVP_{t,r} = \sum_{s=t}^{\infty} \left(\frac{1}{1 + \rho + \eta g_{t,r}} \right)^{s-t} \pi_r \Delta S_t = \frac{1 + \rho + \eta g_{t,r}}{\rho + \eta g_{t,r}} \pi_r \Delta S_t \quad (35)$$

Tekijä $NPVVP$ vastaa rannikon suojelun nettonykykustannuksia, π_r on rannikon suojelun vuosittaiset yksikkökustannukset, ΔS mittaa merenpinnan nousua ja g on per ihmisen tulojen kasvuaste. Parametri $\rho = 0.03$ on puhtaan aikapreferenssin aste ja $\eta = 1$ merkitsee kulutuksenjouston rajahyötyä.

$$\begin{aligned} NPVW_{t,r} &= \sum_{s=t}^{\infty} W_{t,r} V_{W_{s,r}} \left(\frac{1}{1 + \rho + \eta g_{t,r}} \right)^{s-t} \\ &= W_{t,r} V_{W_{t,r}} \frac{1 + \rho + \eta g_{t,r}}{\rho + \eta g_{t,r} - \beta g_{t,r} - \gamma p_{t,r} - \delta \omega_{t,r}} \end{aligned} \quad (36)$$

Yhtälö (36) tarkastelee rannikon suojelun aiheuttamaa rannikon menettämistä. Tekijä $NPVW$ on menetetyrannikkoalueen nettonykyarvo, ω on rannikon suojelun aiheuttama vuosittainen rannikkoalueen kato, ΔS vastaa merenpinnan nousua, g on per ihmisen tulojen kasvuaste, p mittaa väestönkasvun astetta ja w on rannikkoalueen vuosittainen (negatiivinen) kasvuaste. Parametri $\rho = 0.03$ on puhtaan aikapreferenssin aste. $\eta = 1$ merkitsee kulutuksenjouston rajahyötyä, $\beta = 1.16$ on rannikon arvon tulojousto, $\gamma = 0.47$ on rannikkoalueen arvon väestön tiheyden joustavuus ja $\delta = -0.11$ on rannikon arvon joustavuus. Parametrit β , γ ja δ saavat arvonsa Brander ym. (2006) meta-analyysistä.

$$\begin{aligned} NPVVD_{t,r} &= \sum_{s=t}^{\infty} D_{t,r} V D_{t,r} \left(\frac{1 + \epsilon_{t,r}}{1 + \rho + \eta g_{t,r}} \right)^{s-t} \\ &= D_{t,r} V D_{t,r} \frac{1 + \rho + \eta g_{t,r}}{\rho + \eta g_{t,r} - \epsilon_{t,r}} \end{aligned} \quad (37)$$

Tekijä $NPVVD$ on kuivan maan menetyksen nettonykyarvo, D on nykyinen suojelemattoman kuivan maan menetys, VD on nykyisen kuivan maan arvo ja g on per ihmisen tulojen kasvuaste. Parametri $\rho = 0.03$ on puhtaan aikapreferenssin aste, $\eta = 1$ merkitsee rajahyödyn kulutus joustoa, $\epsilon = 1.0$ on kuivan maan arvon tulojousto ja d mittaa nykyistä tulo tiheyden kasvuastetta.

$$E_{t,r} = \alpha P_{t,r} \frac{\frac{y_{t,r}}{y_r^b}}{1 + \frac{y_{t,r}}{y_r^b}} \frac{\frac{\Delta T_t}{\tau}}{1 + \frac{\Delta T_t}{\tau}} \left(1 - \sigma + \sigma \frac{B_0}{B_t} \right) \quad (38)$$

Yhtälö (38) tarkastelee ekosysteemin kustannuksia. Malli olettaa biodiversiteetin, lajien ja ekosysteemin vaikutuksien arvotuksen tapahtuvan epäsuorasti ihmisten mielihyvän kadon kautta (Tol 2002b). Tekijä E on ekosysteemin menetyksen arvo ja B on biodiversiteetti, joka kasvaa eläinlajien vähentyessä. Tämä saadaan Weitzman (1998) sijoitus kriteeristä ja Weitzman (1992 & 1993) biodiversiteetti indeksistä. $B_0 = 14000000$ eli eläinlajien määrä ennen vuotta 2000. Parametri $\alpha = 50$ joka antaa arvonsa, jos per yksilö tulot vastaavat vuoden 1990 OECD keskiarvoa (Pearce & Moran 1994).

$$B_t = \max \left\{ \frac{B_0}{100}, B_{t-1} \left(1 - \rho - \gamma \frac{\Delta T^2}{\tau^2} \right) \right\} \quad (39)$$

Jossa yhtälön (38) B biodiversiteetti tekijän selittäjäksi lisätään parametrit $\rho = 0.003$ ja $\gamma = 0.001$ asiantuntija arviot.

3.4.2 Kuolevaisuus ja myrskyt

Kuolleisuutta aiheuttavat taudit mallissa ovat ripulikuolemat, vektoritaudit ja verisuoni- & hengitystaudit. Vaikka vesi on elintärkeä ihmisille, huonon laatuinen vesi voi olla hyväksyttävä substituutio. Tämä levittää tauteja. Samoin ihmiset, jotka asuvat alhaisen tulojen alueissa ovat alttiimpia taudeille. Ilmaston lämmetessä myös useiden hyönteislajien elinkelpoiset alueet leviävät, tuoden mukanaan tauteja kuten malaria.

$$D_{t,r}^d = \mu_r^d P_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\varepsilon \left(\frac{T_{t,r}}{T_{pre-industrial,r}} \right)^\eta \quad (40)$$

Yhtälö (40) tarkastelee ilmastonmuutoksen vaikutuksia terveyteen ripulikuolemasta. Tekijä D^d on ripulikuolemien määrä. Parametri μ merkitsee WHO:n ripuli kuolevaisuuden astetta vuonna 2000 (FUND taulukko HD, kolumni 3.), $\varepsilon = -1.58$ tarkoittaa ripuli kuolevaisuuden tulojousto ja $\eta = 1.14$ vastaa ripulikuolevaisuuden reaktion epälineaarista astetta.

$$D_{t,r}^v = D_{1990,r}^v \alpha_r^v T_t^\beta \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\gamma \quad (41)$$

Tekijä D_{1990}^v on vektorisyntyisen sairauden kuolleisuus vuonna 1990. Parametri α on vektorisyntyisten sairauksien reaktio (FUND taulukko HV, kolumni ”impact”), $\beta = 1.0$ on lämmöstä tapahtuneen kuolleisuuden epälineaarinen aste ja $\gamma = -2.65$ on kuolevaisuuden tulojousto.

Parametri α arvo saadaan Martin & Lefebvre (1995), Martens ym. (1995; 1997) ja Morita ym. (1995) tulosten keskiarvona, β arvo on hienosäädetty Martens ym. (1997) tulosten mukaan ja γ saadaan Link & Tol (2004) regression perusteella.

$$D^c = \alpha^c + \beta^c T_B \quad (42)$$

Tekijä D^c mittaa kuolevaisuuden muutosta yhden asteen lämpenemisen vuoksi (per 100000 ihmistä), c indeksoi sairauden ja T_B on alueen nykyisen lämpötilan kuumin tai kylmin kuukausi. Parametrit α ja β saadaan FUND taulukosta HC.1. Hyödynnetyt sairaudet ovat yli & alle 65-vuotiaiden lämpöjohteiset verisuonisairaudet ja yli & alle 65-vuotiaiden kylmäjohteiset verisuonisairaudet.

$$D_{t,r}^c = \alpha_r^c T_t + \beta_r^c T_t^2 \quad (43)$$

Yhtälö (43) jatkaa aikaisemman yhtälön tarkastelua, mutta ilmastonmuutoksen näkökulmasta. D^c ilmaisee ilmastonmuutoksesta johtuvaa kuolevaisuutta taudista c , c indeksoi tauteja. Parametrit α ja β saadaan FUND taulukoista HC.2-4.

Kuten yhtälöistä (24) ja (25) todettiin, ilmastonmuutos aiheuttaa sisätilan viilentämisen ongelman. Tämä voi pahimmillaan merkitä kuolemaa.

$$U_{t,r} = \frac{\alpha\sqrt{y_{t,r}} + \beta\sqrt{PD_{t,r}}}{1 + \alpha\sqrt{y_{t,r}} + \beta\sqrt{PD_{t,r}}} \quad (44)$$

Kuumuuteen liittyvä kuolema oletetaan tapahtuvan vain kaupungeissa asuville ihmisille. Tekijä U vastaa kaupungeissa asuvan väestön osuus ja PD mittaa väestön tiheyttä. Parametrit $\alpha = 0.031$ ja $\beta = -0.011$ perustuvat Tol (2002b).

Ilmastonmuutos vaikuttaa sääjärjestelmään lisäämällä energian määrää. Tuulet ja myrskyt syntyvät energian siirtyessä kuumemmalta alueelta kylmemmälle. Meren lämpiminen aiheuttaa voimakkaampia hurrikaaneja, tornadoja ja muita merestä maahan liikkuvia hirmumyrskyjä. Tästä syystä merkittävät myrskyt siirtyvät trooppisilta alueilta pois päin joko etelään tai pohjoiseen. Mahdolliset kustannukset myös määrittyvät maan arvon mukaan. Mitä enemmän myrsky kohtaa rannikkokaupunkeja ja niiden arvo nousee, niin myös nousee trooppisten hirmumyrskyjen aiheuttamat kustannukset.

$$TD_{t,r} = \alpha_r Y_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\varepsilon [(1 + \delta T_{t,r})^\gamma - 1] \quad (45)$$

Yhtälö (45) tarkastelee trooppisen ääri-ilmiöiden (esimerkiksi hurrikaanit ja hirmumyrskyt) aiheuttamia kustannuksia. Tekijä TD on trooppisten myrskyjen aiheuttamat vahingot (dollaria per vuosi). Parametrit α mittaa nykyisten vahinkoja osuutta bruttokansantuotteesta (FUND taulukko TS), $\varepsilon = -0.514$ on myrskyvahinkojen tulojousto (Toya & Skidmore, 2007), $\delta = 0.04$ per °C (WMO 2006), $\gamma = 3$ antaa tuulen voimakkuuden nopeuden kuutiona.

$$TM_{t,r} = \beta_r P_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\eta [(1 + \delta T_{t,r})^\gamma - 1] \quad (46)$$

Tekijä TM on trooppisten myrskyjen tuottama kuolleisuus. Parametri β on sen hetkinen kuolleisuuden osa väestöstä, $\eta = -0.501$ vastaa vahinkojen tulojoustavuutta (Toya & Skidmore, 2007).

$$ETD_{t,r} = \alpha_r Y_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\varepsilon \delta_r \left[\left(\frac{C_{CO_2,t}}{C_{CO_2,pre}} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (47)$$

Tekijä ETD on extratrooppisten myrskyjen vahingot, $\varepsilon = -0.514$ vahinkojen tulojousto (Toya & Skidmore, 2007), δ on myrskyjen herkkyys ilmakehän hiilidioksidi pitoisuudelle, C_{CO_2} vastaa ilmakehän hiilidioksidi pitoisuutta, $C_{CO_2,pre}$ on esiteollinen hiilidioksidi pitoisuus ja $\gamma = 1$.

$$ETM_{t,r} = \beta_r P_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\varphi \delta_r \left[\left(\frac{C_{CO_2,t}}{C_{CO_2,pre}} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (48)$$

Tekijä ETM on extratrooppisten myrskyjen tuottama kuolevaisuus. Parametri β on peruspiste extratrooppisen hirmumyrskyn kuolevaisudelle, $\varphi = -0.501$ vastaa kuolevaisuuden tulojousto (Toya & Skidmore, 2007).

$$VSL_{t,r} = \alpha \left(\frac{y_{t,r}}{y_0} \right)^\varepsilon \quad (49)$$

Yhtälö (49) antaa elämän arvon. Tekijä VSL on tilastollisen elämän arvo ja $y_0 = 24963$ on normalisoiva tekijä. Parametri $\alpha = 4992523$ ja $\varepsilon = 1$ on tulojousto. Tämä antaa menetetyn elämän arvoksi 200 kertaa henkilön elämänkaaren tulot (Cline, 1992).

$$VM_{t,r} = \beta \left(\frac{y_{t,r}}{y_0} \right)^\eta \quad (50)$$

Yhtälö (50) antaa sairausvuoden menetyksen arvon. Tekijä VM on tilastollisen elämän arvo ja $y_0 = 24963$ on normalisoiva tekijä. Parametri $\beta = 19970$ ja $\eta = 1$ ovat tulojousto. Tämä antaa sairausvuoden arvoksi 0.8 henkilön vuoden tulo (Navrud, 2001).

4 Mallin käytäntö

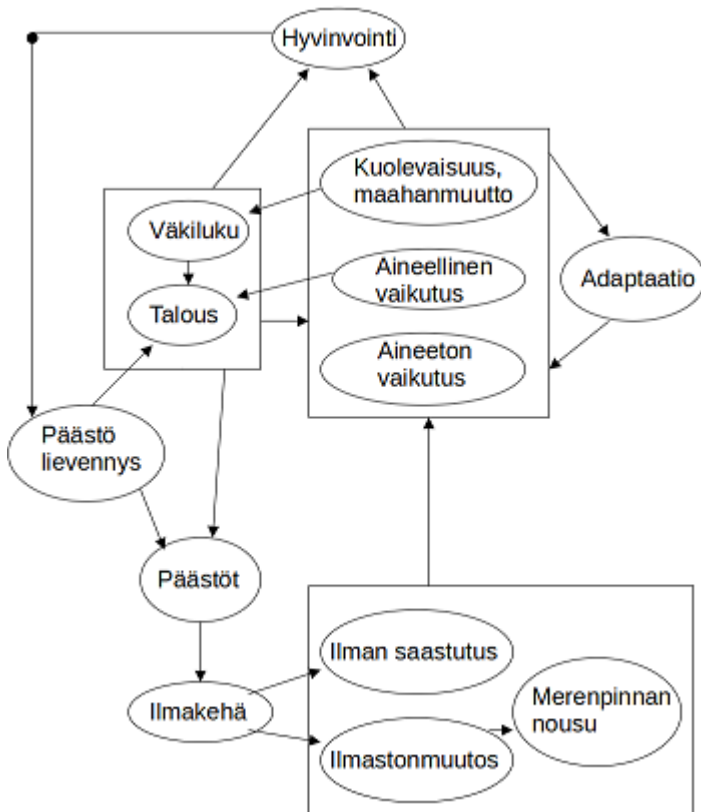
Tolin aloittama FUND-malli ei ollut identtinen luvussa 3 olevan version (3.11) kanssa, vaan se on julkaisun jälkeen saanut päivityksiä tieteen ja arviointimallien kehittyessä. Samoin mallin hyödyntäminen ei ole rajoittunut vain hiilen tai muun päästön rajakustannuksen laskemiseen.

4.1 Kehitys

Kuvio 8 (Tol 1997, 151–157) havainnollistaa FUND-mallin versio 1.5 sisäisen rakenteen, joka on selkeästi muokkaus DICE-mallin aloittamasta arviointimalli tyypistä. Kuten kuvio osoittaa, taloudellisen tarkastuksen lähtökohta on hyvinvoinnin optimointi, joskin mittatikkuna pidetään per henkilö tuloja kulutuksen sijasta, mutta nämä ovat melkein substituutioita toisilleen. Muuten Tol itse pitää itse taloudellista mallintamista yksinkertaisempaan kuin DICE-mallissa, mutta tätä en voi varmentaa täysin mallien eri välillä välillä, sillä tässä julkaisussa ja luvussa 3 itse taloutta ei tarkastella yksityiskohtaisesti.

Malleilla on kuitenkin kaksi eroa, aluejako ja kustannustarkastelu. Maapallo on jaettu yhdeksään alueeseen, kolmeen OECD jäsenmaa alueeseen (Pohjois-Amerikka, Eurooppa ja Aasia), Lähi-itä, Etelä-Amerikka, Itä- & Kaakkois-Aasia, Keski-Aasia (Kiina, Indokiina, Mongolia ja Vietnam), Afrikka ja entiset eurooppalaiset kommunistiset valtiot. Vaikka tämä on vähemmän nykyisestä 16, DICE-malli käsitteli maailmanlaajuista taloutta yhtenä kokonaisuutena. Aluetuloksia sai erillisessä RICE-mallilla, mutta tämän Nordhaus (2016) on yhdistänyt yhdeksi malliksi.

Toinen on ilmastonmuutoksen vaikutuksien monimuotoisuus. Siinä missä vahingot ovat DICE-mallissa yksinkertainen toisen asteen yhtälö, FUND-mallissa tämä muutos jatkuu moneen eri talouteen ja hyvinvointiin vaikuttavaan mekanismiin.



Kuvio 8. FUND versio 1.5.

Rakenteeltaan voidaan mainita yksittäinen ero, vaikutusten jaottelu aineellisiin ja aineettomiin. Aineellisilla tarkoitetaan suoraan markkinahinnoiteltuja vaikutuksia, kuten maatalouden tuotannon menetys, maahanmuutto tai kuolevaisuus. Nämä mallissa vaikuttavat kumpaakin talouden investointiin ja yksilöiden hyvinvointiin. Aineettomilla vahingoilla sen sijaan merkitään menetyksiä, jotka eivät suoraan liity talouteen, kuten luvussa 3.4.1 mainittu eläinlajien sukupuuttoon katoaminen, joka mallissa oletetaan aiheuttavan vahinkoa ihmisten mielihyvystä saamasta hyvinvoinnin menetyksestä. Malliajo on vain 1990-2200 välillä, mutta DICE liikkuu mallissa 10 vuoden askeleissa yhden vuoden sijasta. Tol oli valinnut mallin perusskenaariossa hiilidioksidin tuplaamisen aiheuttavan 2,5 °C lämpenemisen, mikä on hiukan matalampi kuin mitä luonnontieteilijät pitivät todennäköisimpänä arvona luvussa 2.1. Teknologian ollessa alkeellisempi ja ohjelmoinnin ollessa hankalampi oppia 1990-luvun loppupuolella kuin tänään, olisi kiinnostuneen akateemikon hankalampi muuttaa haluttuja muuttujia ja suorittaa useita malli ajoja tutkimusta varten. Suurimmat muutokset mallin nykypäivään perustuu yksittäisiin ominaisuuksiin, jotka puuttuvat mallista myöhempisiin iteraatioihin verrattuna.

Kuvio 8 FUND-mallin loogiseen rakennelmaan pääsääntöiset päivitykset olivat kustannustekijöiden lisääminen ja olemassa olevien päivitys. Versio 1.6 yksinkertaisti kustannus analyysia muuttamalla kustannuspohjaksi toisen asteen yhtälön ja tuntemattomien tekijöitä yritettiin mallintaa uusilla kustannuksilla (Tol 1995c; 1996). Vuoteen 2001 mennessä Tol (2002a) oli käynyt uudestaan läpi maatalouden, metsätalouden, ekosysteemin, vesi resurssit, energian kulutuksen, veden pinnan nousun ja kuolevaisuuden kirjallisuus katsauksella. Mallin siirtyessä versioon 2.6 (Tol 2008; Tol 2004) oli alueiden määrä lisätty kuuteentoista, malaria tautien lisäksi malliin tuotiin vektorisyntyiset taudit ja yhtälöt (41) & (42). Tietotason käsittelyä paranneltiin lisäämällä endogeeninen teknologian muutos. Version 2.7 (Tol 2006) lisäsi metaanin ja rikkiheksafluoridin lisäksi dityppioksidin mahdolliseksi tarkasteltavaksi kaasuksi. Pääsääntöisesti alueiden kustannukset perustuvat summaamalla alueen eri valtioiden kustannukset yhteen, joten Tol (2008) toteutti 2.8n version, jossa eri maiden kustannukset eroteltiin takaisin alueista ja ripulikuolevaisuus lisättiin. Vaikka vektorisyntyiset taudit ovat mallin nykyisessä versiossa, 3.2 (Anthoff ja Tol 2009) tämä vaihdettiin väliaikaisesti Denguekuumeeksi. Vaikka mallissa tähän asti käsiteltiin ääri-ilmiöitä, trooppiset myrskyt lisättiin versiossa 3.4 (Anthoff, Narita ja Tol 2009) ja trooppisten alueiden ulkopuoliset myrskyt 3.5 (Anthoff, Narita ja Tol 2010). Versio 3.7 päivitti ilmastoherkkyyden 3 °C (Anthoff ja Tol 2013) ja päivitys 3.9 (Anthoff ym. 2014) uudestaan määritteli metaanin & dityppioksidin elinkaarin toimintaa. Vaikka tämän jälkeen ei ole julkaistu tutkimusta uudella versiolla, perustuu muutokset 3.9 ja uusimman version 3.11 välillä koodin siirtäminen Julia koodikielelle.

FUND-malli myös sisältää dokumentoimattomia työkaluja. Esimerkiksi luku 3 oppaan tarkastuksessa ei mainita, miten mallin talouden ja ympäristön mallintamisesta lasketaan hiilen yhteiskunnallinen kustannus. Tämän selventää Anthoff ym. (2009, 7) seuraavasti:

$$SCC_r = \frac{D_{tr} \sum_{trs} (E_s + \delta_s) - D_{tr} (\sum E_s)}{\prod 1 + \rho + \eta g_{sr}} / \sum \delta_t \quad (51)$$

jossa SCC_r on alueellinen hiilen yhteiskunnallinen kustannus. Tekijä D on ilmastonmuutoksen vaikutus rahana, E päästöt ja δ on lisätty päästö. Tekijät ρ puhdas aikapreferenssi, η kulutuksen rajahyödyn joustavuus ja g per henkilö kulutuksen kasvuaste kuuluvat kokonaisuuteen nimeltä Ramseyn korko, josta enemmän myöhemmin. Tämä muoto hiilen yhteiskunnallisen kustannuksen arvosta siis mittaa niitä

säästöjä, jos seuraavaa tonnia hiiltä ei päästetä. Lopullinen arvo saadaan summaamalla eri alueiden arvot yhteen.

Anthoff, Hepburn ja Tol (2009, 838–841) lisäävät hyvinvointi funktioon mahdollisuuden tasapainottaa kulutusta oikeudenmukaisuuden mukaan. Yksilöt siis optimoivat pitäen yksittäisen alueen kulutusta optimaalisena tasona.

$$V_x(r) = \sum_{t=r}^T \sum_{i=i}^{n(t)} D(t, i, r) \left[\frac{C(0, x, E)}{C(t, i, E)} \right]^\varepsilon (1 + \rho)^{-t} \quad (52)$$

Yhtälö (58) eroaa yhtälö (1) hyvinvointi käsittelyn kanssa rahatarkastelun mielessä. Tekijä x merkitsee yksilöä ja $V(r)$ mittaa netto nykyisen sosiaalisen hyvinvoinnin rajamuutosta päästöjen rajamuutokseen rahassa. Tekijä ε , joka on tavanomaisesti rajahyödyn kulutusjoustavuus, antaa myös arvon millä sosiaalisen suunnittelija on vastahaluton agenttien epätasaiseen kulutukseen.

Toinen dokumentoimaton työkalu on mahdollinen Ramsey koron asettaminen. Heal (2017, 1046–1048) selventää korkoa seuraavasti:

$$r = \delta + \eta g \quad (53)$$

jossa r on kulutuksen diskonttokorko, δ on puhdas aikapreferenssin aste, η mittaa rajahyödyn joustavuutta ja g on kulutuksen kasvuaste. Healin mukaan aikapreferenssin valinta on hankala, jopa eettinen valinta. Anthoff ym. (2009) korostavat kysymyksen olevan monimutkaisempi. Parhaimmallakin nykypäivän mallilla, ilmastonmuutoksen vaikutukset nostavat epävarmuuksia, joihin ei ole vielä selkeitä vastauksia ja ihmiset täysin erilaisissa paikoissa ja tulotasoissa ovat sen vaikutuksen alaisuudessa. Heidän mukaansa parametri η vastaa kolmesta parhaiten näihin ongelmiin. Se auttaa määrittelemään kuinka paljon yhden dollarin lisäys kasvattaa hyvinvointia tulon kasvaessa, miten verrataan dollarin kasvua köyhän & rikkaan ihmisen välillä ja suhteellisen riski kaihtamisen.

4.2 Hyödyntäminen

FUND-mallia on hyödynnetty luvun 2.3.2 eri hiilen yhteiskunnallisen kustannuksen arvioissa. Wang ym. (2019, 1503) mukaan DICE-mallia oli käytetty 43 % ja FUND-mallia 35 % saaduista arvoista. Arviointimallien käyttö ei rajoitu vain hiilen

rajakustannuksien mittaamiseen, vaan niitä voidaan myös käyttää esimerkiksi erilaisten strategioiden vertailuun.

Mallia ja sen vaikutuksien monimuotoisuutta voidaan hyödyntää yksittäisen alueen tarkasteluun. Tol (2008) toteutti mallinnuksen, jossa tarkasteltiin malarian mahdollisuutta vaikuttaa Afrikan talouskasvuun negatiivisesti. Mallintamatta teknologian muutoksia, Tol asetti mahdollisuuden pysyvälle talouden hidastumiselle pieneksi.

Analyysi voidaan myös suorittaa mahdollisiin tulevaisuuden tapahtumiin. Link ja Tol (2010) mallinsivat termohaliinikierron mahdollista pysähtymistä, siis lämpöä siirtävää valtamerien virtauksia. Vuosituhannen alkupuolella useimmat tutkijat olivat huolissaan mahdollisen Arkisen jään sulamisen tuovan suolatonta vettä Atlantin valtamerelle ja hidastavan lämpimän veden siirtymistä Eurooppaan (kts. Stouffer ym. 2006 ja Marotzke 2000). Pohjois-Afrikan hyvinvointi kasvaisi ja Euroopassa laskisi paikallisen ilmaston kylmetessä, antaen -0.1 % bruttokansantuotteen yhteisvaikutuksen, joskin tiedon niukkuuden takia tuloksissa on hyvin suuria epävarmuuksia.

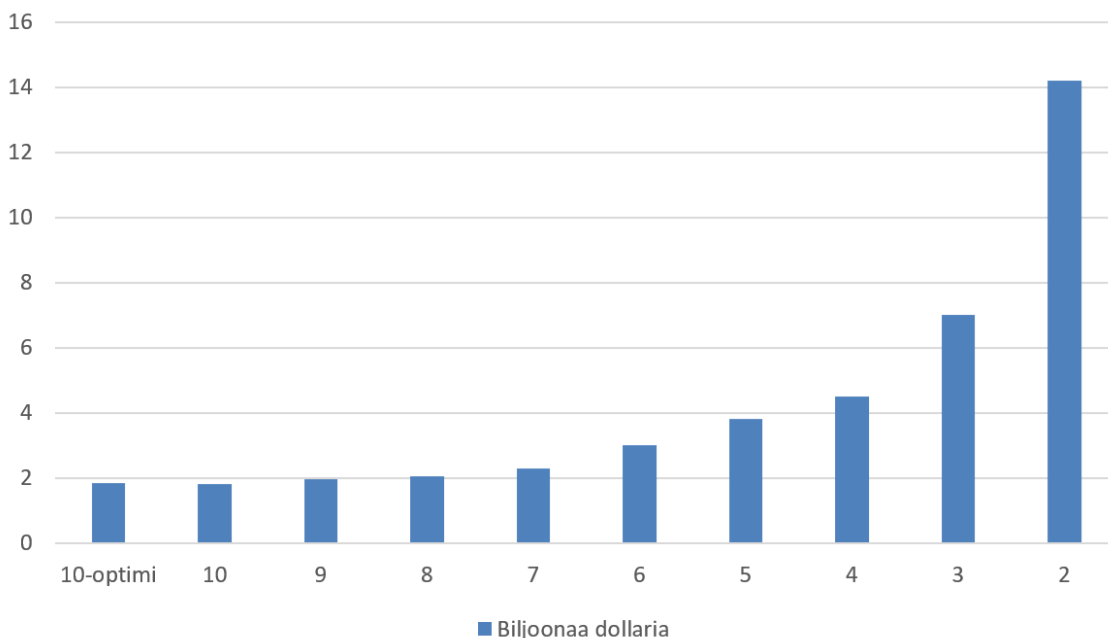
Nicholls, Tol ja Vafeidis (2008) mallinsivat täysin teoreettinen tapahtumakulun, jossa Läntinen-Antarktis sulaisi kokonaan. Jopa 70 % rannikkoalueista voisi jäädä merenpinnan nousun alapuolelle, mutta todennäköisempi arvio 50 % suojellusta rannikosta pelastaisi 95 % rannikolla asuvista ihmisistä muuttamasta ja rannikolta muuttavien määrä jäisi 15 miljoonaa. Joskin mallissa valtioiden käyttämät resurssit rannikkojen suojelemiseksi olisivat suuret, esimerkiksi Alankomaat käyttäisi yli 3 % bruttokansantuotteesta.

Arviointimalleja on myös käytetty kansainvälisten sopimusten ja raporttien arvioimiseen. Telesetsky (1999) ilmoittaa Kioton pöytäkirjan olevan vuonna 1992 perustettu kansainvälinen sopimus, jossa vuodesta 2005 eteenpäin osanottajien pitäisi pyrkiä rajoittamaan kahdeksan kaasua, jotka aiheuttavat ilmastonmuutosta. Pöytäkirja asetti eri maille eri tavoitteita. Kahdesta sitoumus ajanjaksosta (2008–2012 ja 2012–2020) ainoastaan Euroopan Unionilla, Neuvostoliiton entisillä mailla (pois lukien Venäjä) ja Australialla oli sitovia tavoitteita. Japanilla ja Venäjällä oli vain ensimmäisenä ajanjaksona sitovia tavoitteita, Kanadan ja Yhdysvaltojen irtaantuen pöytäkirjasta. Muilla mailla ei ollut sitovia tavoitteita. Tol (1999) analysoi, olivatko pöytäkirjan tavoitteet taloudellisesti soveliaita. Ehdot mallinnettiin -8 %–6 % päästövähennyksenä riippuen valtiosta OECD maissa vuoteen 2010 mennessä ja 0 % muille. Pöytäkirjan tavoite

pidemmällä ajalla hiilidioksidin jäämisestä 550 miljoonaosaan ilmakehästä olisi 0,5–1,5 biljoonaa diskontattua dollaria kalliimpaa kuin optimaalinen rajoitusstrategia ja maksavan jopa 12 biljoonaa OECD maille, jos sopimuksen jälkeen valtiot kutistaisivat hiilipäästöjä 2 % vuodessa. Tol uskoo siis pöytäkirjan tavoitteiden olevan tehottomampia kuin kustannustehokkaan yhteistyö strategia ja hidastelun toteuttaa pöytäkirjan tavoitteet vain nostavan tulevaisuuden kustannuksia. Taulukko 2 (Tol 1999, 152) osoittaa tätä. Aikamääreen lyhentyessä kuudennesta vuodesta alaspäin, alkaa pöytäkirjan toimeenpanon kustannukset kasvavat voimakkaasti.

Taulukko 2. OECD-maiden päästötavoitteet ennen vuotta 2010.

Kustannukset ovat vuosittaiset kulutus menetykset vuosien 1990–2100 väliltä ja diskontattu vuoteen 1990 5 % diskonttokorolla. Ensimmäisessä palkissa päästövähennykset ovat tehty optimaalisesti eri alueiden välillä ja toisesta palkista eteenpäin prosessi tehdään tasaisesti vuodesta vuoteen.



Vuonna 2006 Nicholas Stern julkaisi työryhmänsä raportin (The Stern Review). Kyseessä oli 700 sivuinen teksti, jonka tarkoituksena oli antaa Iso-Britannian poliitikoille uusin tieto ilmastonmuutoksesta, sen vaikutuksista ja mahdollisista kustannuksista. Raportista tuli hyvin tunnettu sen tuottaman arviointimallinnuksen yli 300 dollarin hiilen yhteiskunnallinen kustannus. (Dietz 2007.) Anthoff, Tol ja Yohe (2009) kritisoivat raportin puhtaan aikapreferenssin ja riskin kaihtamisen astetta. Näitä hallitsemalla ja eri maiden tuloeroja korjaamalla saatiin 60–200 dollariin kustannusalue.

FUND-malli on myös ollut osana Yhdysvaltojen ministeriöiden välisen työryhmän (IWG 2016, 7–16) hiilen yhteiskunnallisen kustannuksen arvioinnin raporteissa vuosina 2010,

2013 ja 2016. Työryhmä laskee hiilen rajakustannukset vuosien 2010 ja 2050 väliltä viiden vuoden hypyissä, pitäen ilmastoherkkyyden 3 °C. Valiten 5 %, 3 % ja 2.5 % diskonttokoron välillä vuonna 2010 saadaan arvon 10–50 dollarin väliltä ja vuonna 2050 26–95 dollarin väliltä. Kummatkin luvut ovat 2007 vuoden dollareissa.

5 Arviointimallinnus nykypäivänä

5.1 Rajakustannusarvojen tuottaminen

Lukujen 3 ja 4 perusteella voidaan todeta, että arviointimalleihin täytyy tehdä paljon olettamuksia ympäröivästä luonnosta, sen herkkyydestä ilmastonmuutokseen, talouden eri osa-alueiden herkkyydestä tähän muutokseen ja yleisistä taloudellisista käsitteistä. Tol (2009, 39–43) kommentoi oman meta-analyysin tuloksia toteamalla arvojen hajonnan johtuvan muutamasta korkean arvon tuloksesta. Tarkastellaan kysymystä tarkemmin malliajoilla.

Taulukko 3 havainnollistaa kahden eri tässä tutkielmassa käydyin mallin antamien arvojen eroja ja perustuvat MimiFUND (2022) ja MimiDICE2013 (2023) projekteihin. FUND-mallin perusskenaario antaa matalampia tuloksia samoilla ilmastoherkkyys ja diskontto koron arvoilla kuin DICE. Tämän voisi selittää yksinkertaisempi yhtälö (2) kustannusfunktio, mutta tämä ei itsessään selittä FUND-mallin negatiivisia kustannuksia. Selitys on yhtälössä (24) eli maatalouden kustannuksissa. Mallissa ilmastonmuutos antaa joillekin alueille positiivista maatalouden tuloja lämpimämmän sään ja lannoitevaikutuksen takia. Tämä voi merkitä korkeammilla koroilla näiden etujen olevan parempi kuin myöhemmin tulevaisuudessa tapahtuvat vahingot. DICE-mallin kustannusfunktion antaessa vain vahingoittavia arvoja, saadaan kaikilla koron arvoilla vain positiivisia kustannuksia.

Taulukko 3. FUND- ja DICE-mallin yhteiskunnallinen kustannus.

Prosentti arvo merkitsee diskontto korkoa ja Celsius aste ilmastoherkkyttä. Kaikki arvot ovat laskettu vuodelle 2020 ja ovat vuoden 1995 Yhdysvaltojen dollareita.

FUND 3.8.6	0 %	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %
2 °C	4,88	1,75	0,65	0,17	-0,06	-0,17
3 °C	11,66	3,61	1,12	0,17	-0,23	-0,41
4 °C	17,19	4,80	1,35	0,16	-0,31	-0,50
DICE 2013	0 %	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %
2 °C	43,4	17,83	9,82	6,26	4,35	3,19
3 °C	90,48	33,15	16,72	10,02	6,64	4,7
4 °C	152,03	50,18	23,43	13,33	8,52	5,88

Nämä huomiot eivät kuitenkaan selitä kaikkia mallituloksien eroja. Ensimmäisenä ehtona pitäisi olla diskontto koron pitäminen nollassa ja toisena ilmastoherkkyden pitäminen

korkeampana kuin 4 °C. Vaikka luvussa 2.1 osoitettiin hyväksytyimmän arvon olevan 2–4 °C välillä, olemassa olevan todistusaineisto antaa mahdollisuuden korkeampien arvojen tutkimiseen. Esimerkiksi Wagner ja Weitzman (2018) pohtivat mahdollisuuden yli 4,5 °C arvoon olevan jopa viisi prosenttia. Ei voida siis hylätä tutkimuksia, joissa ilmasto on hyvin herkkä hiilidioksidipäästöille.

Diskonttokorko ja ilmastoherkkyys eivät ole kuitenkaan ainoita syötettäviä arvoja. Luvussa 3.1 todettiin mallin tarvitsevan luonnontieteellisen ilmaston ja kustannusfunktion lisäksi olettaus tulevaisuuden ihmisen toiminnasta väestönmuutoksesta taloudenkasvuun. Ihmiskunnan tulevaisuus on vielä määrittelemätön ja taloustieteilijät eivät tavanomaisesti yritä ennustaa tulevan vuoden talouskasvua vertausarvioituissa tiedelehti julkaisussa. Hiilen rajakustannuksen arvion tuottaminen vaatii kuitenkin olettamuksia.

Taulukon 4 perustuu Yhdysvaltojen ministeriöiden välisen työryhmän versioon FUND-mallin versiosta 3.8 (MimiIWG 2023). Heidän tavoitteensa oli antaa Yhdysvaltojen politiikkaa ohjaava hiilen rajakustannus.

Taulukko 4. FUND-malli eri skenaarioilla.

Prosentti arvo merkitsee diskontto korkoa ja malli on asetettu 3 °C ilmastoherkkyydelle. Nimi tarkoittaa skenaariota, "kaikki" merkitsee maailmanlaajuisia tulosta ja "USA" vain Yhdysvalloissa tapahtuneita kustannuksia. Kaikki arvot ovat laskettu vuodelle 2020 ja ovat vuoden 1995 Yhdysvaltojen dollareita.

IMAGE	0 %	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %
Kaikki	678,19	120,87	19,47	8,59	2,33	0,09
USA	19,96	4,93	1,8	0,86	0,48	0,3
MERGE Optimistic	0 %	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %
Kaikki	465,05	95,21	27,13	9,40	3,41	1,01
USA	18,37	4,61	1,69	0,79	0,43	0,27
MESSAGE	0 %	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %
Kaikki	501,41	90,74	22,69	6,70	1,74	-0,1
USA	15,33	3,75	1,37	0,66	0,38	0,24
MiniCAM Base	0 %	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %
Kaikki	644,53	120,91	31,59	10,21	3,49	0,95
USA	20,74	5,14	1,86	0,87	0,48	0,30
USG 5	0 %	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %
Kaikki	443,23	68,90	13,62	2,45	-0,47	-1,32
USA	13,62	3,21	1,15	0,55	0,32	0,20

Yhdysvalloissa perustettu Energian mallinnus foorumin (Energy Modeling Forum) 22:n kokouksen aiheena oli arviointimallien skenaarioiden luominen ja tarkastelu. 17 arviointimallintaja ryhmälle annettiin tehtäväksi luoda skenaarioita ja tarkastella heidän erikoisosaamiseensa liittyviä kysymyksiä. (Clarke ja Weyant 2009). Ensimmäiset nimet viittaavat foorumin ryhmien lähettämiin skenaarioihin (Clarke ym. 2009). Poikkeuksena on USG 5, mikä on työryhmän oma skenaario, jossa maailma pyrkii Kioton pöytäkirjan 550 miljoonaosan hiilidioksidi pitoisuuteen. Kaikki skenaariot antavat matalalla koroilla korkeampia arvoja kuin FUND pohjaskenaario ja kykenevät ylittämään alkupuolella tapahtuvan hyödyn. Työryhmä teki myös mahdolliseksi laskemaan vain Yhdysvalloissa tapahtuvat kustannukset. Vaikka alueellinen arviointimalli on kyvykäs tarkastelemaan tarvittaessa tätä, on poikkeuksellista tehdä siitä mallin alustava ominaisuus.

Ympäristöministeriö kykeni antamaan poliittisesti motivoitun hiilen rajakustannus arvon. Auffhammer (2018, 35) mainitsee ministeriön antaneen vuonna 2016 7 dollarin arvon nostamalla diskonttokoron seitsemään ja rajaamalla vahingot vain Yhdysvaltoihin.

FUND-mallissa on sisäänrakennettuja ominaisuuksia normatiivisen päätöksenteon asettamisesta malliin. Taulukko 5 ajot perustuvat MimiFUND (2023) mallin ajoihin. Rivien 3–5 tuloksissa on yhtälön (52) mukaisesti oikeudenmukaisesti tasapainotettu kulutusta. Korkeamman kulutuksen omaava alue antaa korkeamman hiilen rajakustannuksen. Rivistä kuusi eteenpäin puhtaasta aika preferenssin perustuvasta diskontto korko vaihdetaan yhtälö (63) Ramsey korkoon. Ensimmäisen sarakkeen diskontto korot ovat samat, kasvuaste g saadaan itse malliajosta ja rajahyödyn joustavuus η täytyy asettaa. Joustamaton rajahyöty antaa samankaltaisia tuloksia kuin OECD-maan kulutuksen nostaminen rivin 4 mukaan, paitsi korkeammilla koroilla, joissa kulutuksen tulevaisuuden menettäminen on kalliimpaa nykypäivän hyödyn sijasta. Evans (2006) kirjallisuuskatsaus antaa todennäköiseksi arvoksi 1,4 OECD-maissa ja sitä käyttämällä voidaan huomata raja-arvon olevan suhteellisen lähellä puhdasta diskontto koron saamia tuloksia. Vaikka Ramsey korossa on kysymys tuloerojen huomioiminen, on joustavuus kuitenkin jotenkin mitattavissa ja ei aseta niin vakavaa eettistä kysymystä kuin oikeudenmukainen kulutuksen painottaminen.

Taulukko 5. FUND-malli oikeudenmukaisuuden ja Ramsey-koron kanssa.

Prosentti arvo merkitsee diskontto korkoa ja Celsius aste ilmastoherkkyyttä. Riveissä 3–5 ja 6 malliajossa tasapainotetaan kulutuksen oikeudenmukaisuutta mainitun alueen painolla. Rivistä 6 eteenpäin käytetään Ramsey korkoa, jossa lämpöasteen seuraava arvo on rajahyödyn joustavuus. Kaikki arvot ovat laskettu vuodelle 2020 ja vuoden 1995 Yhdysvaltojen dollareita

FUND 3.8.6	0 %	3 %	5 %
3 °C	11,66	0,17	-0,17
3 °C Globaali kulutus.	38,59	0,38	-1,85
3 °C Länsi-Euroopan kulutus	562,03	5,5	-26,9
3 °C Saharan eteläpuolisen Afrikan kulutus	1,5	0,01	-0,07
3 °C ja $\eta = 0,01$	245	6,39	0,73
3 °C ja 1	26,1	0,81	-0,29
3 °C ja 1,4	12,69	0,22	-0,4
3 °C Itä-Euroopan entisten kommunististen maiden kulutus ja 1,4	14,12	0,19	-0,6

Mallintaja voi tarvittaessa käyttää hyvinvointi taloustieteen sääntöjä. Voidaan esimerkiksi todeta teko Hicks-Kaldor tehokkaaksi, jos teon tuotoilla voidaan korvata häviäjät (Hicks 1939) tai Pareto optimaaliseksi, jos yhden agentin hyöty ei vähennä muiden agenttien hyvinvointia (Blair ja Chatfield 1974, 94–95). Ilmastonmuutos on kuitenkin monimutkainen ilmiö, johon on hankala asettaa tavanomaisia optimaalisuuden ehtoja tai hyvinvointi sääntöä. Se on prosessina jatkunut yli sata vuotta ja toimii maailmanlaajuisella tasolla, joten yksittäisten agenttien hyödyn ja muiden agenttien saamat ulkoisvaikutukset ovat melkein mahdoton mitata. Voi olla mahdollista mitata eri valtioiden päästöhistoriaa ja talouskasvua, kuka on hyötynyt hiilen saamasta halvasta energiasta, hedelmällisestä maataloudesta ja hiilipohjaisten kemikaalien teollisesta hyödyistä. Ei voida yksiselitteisesti poissulkea kulutuksen oikeudenmukaista tasapainotusta, koska ilmastonmuutoksesta tulevat kustannukset ja hyödyt eivät jakaannu hyvinvointitaloustieteen näkökulmasta tehokkaasti.

Arviointimallien eri syötettävät arvot vaikuttavat valtavasti lopputulokseen ja tutkija, jolla on mielessään haluttu arvo, pystyy yksinkertaisesti muuttamaan mallia ja puolustamaan kyseistä arvoa verrattuna muihin mahdollisiin arvoihin. Ei ole siksi ihmeteltävää, miksi alan taloustieteilijät eivät ole julkaisseet hiilen rajakustannuksista meta-analyyseja viime vuosien aikana. Mallien annetut arvot kyseenalaistavat yksiselitteisen raja-arvon ja niitä tutkivan meta-analyysin merkityksen. Edes tulokset, joissa kaikki muut tekijät ovat samoja paitsi ilmastoherkkyys ei voida arvostella yhtä

merkittävinä. Esimerkiksi valitessa yli 4,5 °C ilmastoherkkyyden ilman noin 95 % painoarvon menetystä antaisi mahdollisessa katsauksessa hyvin poikkeavan kuvan mahdollisista raja-arvoista.

5.2 Vahinkofunktioiden käytäntö

FUND-mallin vahingot mitataan suhteellisen yksityiskohtaisesti. Erityisesti verrattuna DICE-mallin kustannusfunktioon (yhtälö 2), kustannuksia tarkastellaan hyvin monesta talouden osa-alueesta. Mallin ylläpitäjien täytyy olla tarkkana kirjanpidossaan ja tarkkailla ilmastonmuutoksen liittyvää ekonometrista ja teoreettista kirjallisuutta.

FUND-mallin version ilmoitustapa on ristiriitainen. Palvelin tarjoaa tällä hetkellä versiota 3.8.6, mutta itse opas ei mainitse mallin versiota, ja internet sivu itse ilmoitti uusimman version olevan 3.11. Viimeisin vertausarvioidussa tutkimuksessa käytetty versio on FUND 3.9 (Anthoff ym. 2014). On siis epäselvyyksiä missä kehitysvaiheessa malli on tällä hetkellä.

Oppaan lähdeluettelossa on usea virheellinen merkintä, jotka tekevät mallin teoreettisten johtopäätösten ja tarkkojen arvojen arvioinnin hankalaksi. ”Perez-Garcia, J., Joyce, L. A., Binkley, C. S., & McGuire, A. D. *Economic Impacts of Climatic Change on the Global Sector: An Integrated Ecological/Economic Assessment*, Bergendal” osoittautui Perez-Garcia ym. (1997) kirjan luvuksi, jonka nimi oli kirjoitettu rikkinäisenä lähdeluetteloon. ”Nakicenovic, N. – R.J. Swart (eds.) (2001), IPCC Special Report on press” osoittautui Nakicenovic ja Swart (2000) painojulkaisuksi, joka keskittyi päästöskenaarioihin ja sillä ei ollut mitään tekemistä lehdistön kanssa. Ihminen ei tietenkään voi välttää virheiden tekemiseltä, mutta tätä kyseistä lähdeluetteloa on kirjoitettu melkein 30 vuotta ja mallin aihe vaatii tarkkaa kirjanpitoa.

Osan aineiston analysointia on tehnyt hankalaksi sen vanhentuminen tai varmistumattomuus. Yhtälö (40) antaa meille kustannukset liittyen ripulikuolemaan. Oppaassa mainitaan ripulikuolleisuuden tulojouston (ϵ) ja paikallisen lämpenemisen tuottaman kuolevaisuuden epälineaarisen asteen (η) perustuvan Maailman terveysjärjestön dataan, mutta heidän linkkinsä (WHO 2022) vie vain WHO:n nettisivulle. Samoin on hankala uskoa, että WHO olisi suorittanut ja ylläpitänyt datansa tarvittavaa analysointia FUND-mallia varten, joten oppaan tekstistä ei selviä miten näihin parametreihin päädyttiin.

Mallin haasteena on antaa teoreettinen muoto mahdollisen talouden osa-alueen muutokselle, josta ei ole olemassa hyvää tutkimustietoa. Erityisesti maatalouden liittyvä mallintaminen (yhtälöt 17–21) ja maan muutoksen mallintaminen (yhtälöt 26–37) osoittavat hyvin monipuolisen kustannuksien tarkastelun. Maanviljelyn lyhytaikaiset positiiviset vaikutukset hiilidioksidipäästöjen ansiota on luonnontieteellinen huomio ja vaikka se tekee arvioinnista hankalaa, täytyy tämä ottaa huomioon arviointimallissa. Kuivan, kostean & rannikko alueiden erot ja niiden hinnoittaminen myös on tärkeää aluemuuton analysoinnin perusteella.

Sen sijaan ekosysteemin menetyksen kustannuksien (yhtälö 38) motivointi on puutteelliselta. Opas argumentoi Tolin (2002b, 53–55) katsauksessa motivoivan kustannuksia seuraavilla ehdoilla: Ilmastonmuutoksella on aina negatiivinen vaikutus, ainoastaan uskomus muutoksella on merkittävä ja menetystä voidaan mitata ihmisten halukkuudella maksaa suojelusta. Varsinaisesti ekosysteemin vahingoittuminen ei vahingoita taloutta, mutta ihmisten tunteita, jota approksimoidaan heidän halukkuudellaan maksaa tunteistaan. On kuitenkin olemassa ekosysteemejä, jotka ovat suorassa yhteydessä taloudelliseen toimintaan. Esimerkiksi koralliriutat valtamerien lämmitessä valkenevat ja menettävät kykynsä erottaa hapen vedestä (Burn ym. 2023) ja tämä voi vaarantaa kansainvälistä kalastamista (Kjerfve ym. 2021). Chain-Guadarrama ym. (2019) motivoi ekosysteemin ja talouden yhteyttä palveluina. Kun villit mehiläiset pölyttävät kahvipensaan kukkia, ekosysteemi tuottaa palvelun maanviljelijälle. Samoin ekosysteemi palvelujen tuottajana on oma mallintaja yhteisönsä. Drechsler (2020) tarkasteli katsauksessaan 83 eri mallia, jotka integroivat ekologista ja sosioekonomista tietoa. Motivointi ihmisten maksuhalukkuudella on ongelmallista, mallissa agenteille ei synny suoria kustannuksia tästä muutoksesta. Tämä motivointi menetelmä on mallin olettamuksista vanhentunut.

Robert Lucas ja Sargent (1978) kritisoivat aikansa makrotaloudellisia malleja kömpelöiksi, joissa on paljon oletuksia talouden toiminnasta, jotka eivät olleet läpäisseet edes lyhytaikaisia ennustamisen testejä. Koska kyseisissä malleissa ei ollut vankkaa ekonometristä pohjaa, edes suuret kehitykset eivät voisi auttaa taloustieteilijöitä ymmärtämään rahataloutta tai finanssipolitiikka. Heidän ehdotuksensa oli tehdä yksinkertaisempia tasapaino malleja, joiden pohjajaksikkö olisi rationaaliset agentit. Samassa konferenssissa Fair (1978) esitti työttömyyttä ja inflaatiota selittävää mallia, jolla tahdottiin puolustaa aikansa tavanomaista makrotaloudellista lähestymistapaa.

Mallissa oli 33 tekijää, muun muassa julkisen työvoiman ero siviili ja sotilas työpaikkoihin. Tarkasteltaessa makrotaloustieteellisiä oppikirjoja (kts. Romer 2012, 514–516) on yksittäisen agentin makrotaloustieteellisten mallien rakentamisen lähtökohtana. Vaikka kummatkin DICE ja FUND ovat hyvinvointifunktiota maksimoivia malleja, joissa agentit optimoivat kulutusta, niiden kustannusfunktioiden erilaisuus asettavat ne vastakkain. Miksi taloustieteilijöiden kannattaisi käyttää resursseja tutkiakseen mahdollisen ekonometrisen tarkkaa rajakustannus mallia, jos erinomainen yksinkertaistus antaa tarpeeksi hyviä vastauksia?

Nordhaus ja Sztorc (2013, 10–11) ilmoittavat DICE-mallin kustannusfunktion olleen aikaisemmin monimutkaisempi. He vetoavat Tol (2009) meta-analyysiin. Myönnytys tehdään sen hetkiseen tietämättömyyteen mahdollisista biodiversiteetin, meren happamoitumisen, poliittisten reaktioiden, ääri-ilmiöiden ja epävarmuuden vaikutuksista kustannuksiin ja korvaavat nämä tekijät 25 % kustannuksien nostamisella. Arvon määrittelyssä vedotaan muihin tutkimuksiin, mutta myönnetään päätöksen olevan ainakin osittain mielivaltainen. Toisen asteen yhtälömuotoa puolustetaan ”Lenton et al. (2008)” katsauksella. Yleisesti tavoitettavista versioista Nordhausin ja Sztorcin (2013) oppaassa ei ole lähdeluetteloja. He varmaan tarkoittivat Yhdysvaltojen tiedeakatemia julkaisemaa Lentonin ym. (2008) katsausta. Tutkimus kuitenkin varoittaa useasta luonnollisesta tekijästä, jotka voisivat tehdä ilmastonmuutoksen tai sen vaikutuksen kovemmaksi seuraavan sadan vuoden aikana epä johdannollisesti verrattuna paraabeli muotoiseen yhtälöön. Selitys Nordhausin ja Sztorcin näkemykselle voisi johtua usean tekijän vaikutuksen alkavan vasta 3 °C ilmastonlämpenemisen jälkeen ja jäljelle jäävien (kesällä jäävapaa Arktinen jäätikkö ja Grönlannin jäätikön sulaminen) jo kuuluvan 25 % kustannus nousuun. Erimielisyys luonnontieteilijöiden ja mallintajien välillä pahimmillaan antaa kuvan mielivaltaisesta valinnasta kustannusfunktion luomisessa.

5.3 Rajakustannukset vuonna 2020

Arviointimallien mielivaltaisen kustannusfunktion valinnan vuoksi Pindyck (2013, 870) argumentoi arviointimallien olevan täysin hyödyttömiä arvioimaan ilmastonmuutoksen taloudellisia vaikutuksia tai vertailla mahdollisia strategioita.

Hyvinvointia optimoivat mallien ongelmat voidaan jakaa kahteen. Tiedon epävarmuus ilmastonmuutoksen vaikutuksista taloudelliseen järjestelmään ja epäselvyys valittavista sosiaalisesti tai eettisistä tekijöistä. Ensimmäinen ongelma on looginen jatko luvussa 2.2

esitettyillä ekonometrisille menetelmille havainnoida ilmastonmuutoksen aiheuttamia ongelmia muista tekijöistä ja todeta varmuudella samankaltaisten ilmiöiden jatkumisen ilmaston lämmetessä. Kukaan taloustieteilijä ei väitä maagisen tekniikan olemassaoloa, joka voisi antaa meille tarkkoja arvioita taloudesta vuodelta 2300. DICE- tai FUND-mallin kustannusfunktion muotojen tai tekijöiden merkittävyys voidaan varmentaa vasta kun ihmiskunta on käynyt enemmän ilmastonmuutoksia läpi aikakautena, jossa on taloustieteilijöitä ottamassa ekonometrisiä tilastoja tapahtuvista muutoksista. Teoria kuitenkin seuraa empiiristä dataa eikä toisinpäin.

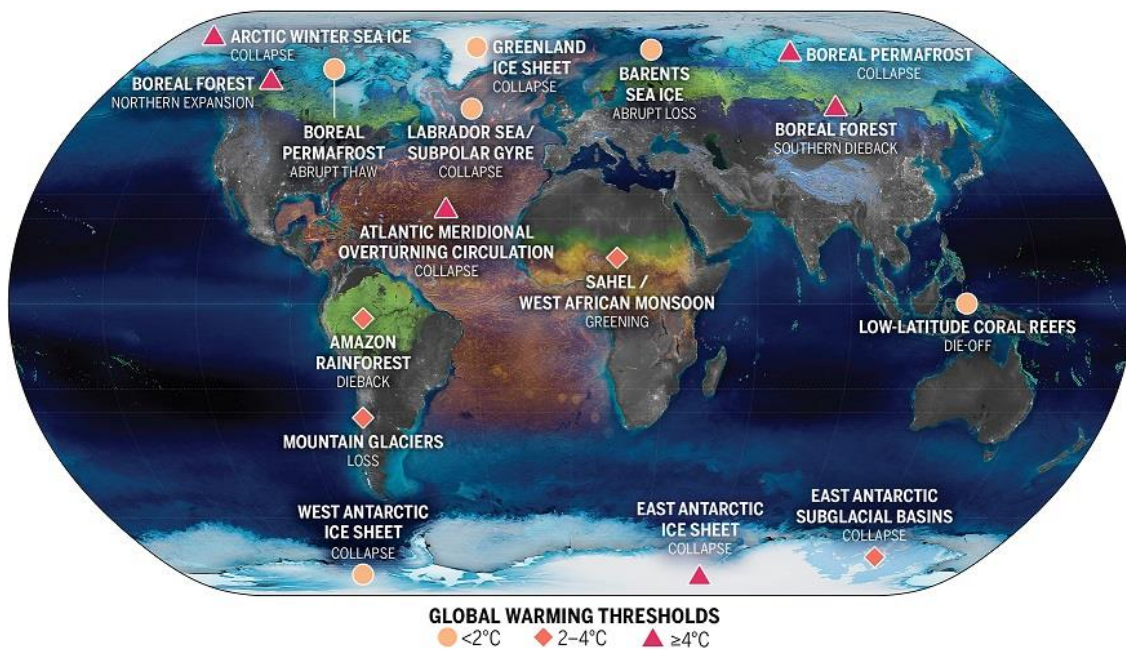
Jotta hiilen rajakustannus arvoja voitaisiin hyödyntää jatkossa ei pelkästään akateemisena mielenkiintona, mutta myös työkaluna päätöksentekijöille, pitää kaikki tähän asti saadut tulokset pitää hyvin kyseenalaisina. Raja-arvojen meta-analyysien Tol (2009, 39–43) ja Wang ym. (2019, 1506) tulokset ja yksittäisestä skenaarioista tai ilmastoherkkyydestä saadut arvot ovat selkeästi nykyisen tiedon valossa spekulatiivista. Samoin maailman bruttokansantuotteen menetys arviot, jotka perustuvat arviointimallintamiseen täytyy pitää hyvin spekulatiivisina, sillä tutkijan on täytynyt valita monia tekijöitä mielenvaltaisesti.

Tol (2009) tutkimus julkaistiin *Journal of Economic Perspectives* tiedelehdessä, joka poikkeuksellisesti ei vertausarvioi uutta tutkimustietoa, vaan pyytää eri alojen tunnetuimmilta taloustieteilijöiltä alan tilasta. Kirjoittajilla on tavoitteena tehdä artikkeleja suuremmalle yleisölle ja hiilen rajakustannusarvojen meta-analyysin arvotaulukko voi tiedemiehen parhaimmasta yrityksestä huolimatta antaa amatööri lukijalle haluamansa yksityiskohdat. Tol (2018) oli valmis hyödyntämään hänen 2009 artikkelin tuloksia melkein sanasta sanaan yhdysvaltalaisen ajatushautomon raportissa. Vaikka samalla raporttiin kopioitiin meta-analyysin huomiot mahdollisten tulosten epävarmuudesta, Tolin mukaan analyysi osoittaa ilmastonmuutoksen olevan liioiteltu ja halvasti korjattavissa.

Tulevaisuuden tarkastelun ongelmassa verrattuna muihin taloudellisiin kysymyksiin, luonnontiede antaa ainutlaatuisen ankkurin. Luvusta 2.1 voidaan painottaa nykyisen luonnontieteiden erinomaista ymmärrystä ilmastonmuutoksesta. Esimerkiksi vuosien 2019–2020 välillä Australiassa puhkesi suuret maastopalot, jotka polttivat yli 2,7 hehtaaria maata ja yli 600 taloa (Yu ym. 2020). Samoin Kaakkois-Australian maastopalojen vakavuudessa on ollut nouseva trendi vuosikymmenien ajan. Syy on

kuivuvassa metsässä, joka on kaukana asutuksesta tai teiltä. Yhdenkin salaman iskiessä voi syttyä tulipalo, joka voi erämaassa levitä ilman vastusta tuhansia hehtaareja. Luonnontieteilijöille mahdollinen maastopalojen vakavuus ei tullut yllätyksenä, sillä jo yli 10 vuotta sitten ymmärrettiin Australian kuivuuden kasvaminen johtuvan Intian valtameren tuomasta kuivasta ilmasta (Ummenhofer ym. 2009) ja ilmatonmuutoksen vaikuttavan Intian valtameren lämpimiin liikkeisiin (Cai, Sullivan ja Cowan 2009). Mahdollisen kustannus mallintamisen täytyy pysyä jatkuvasti kehittyvän luonnontieteellisen ymmärryksen perässä.

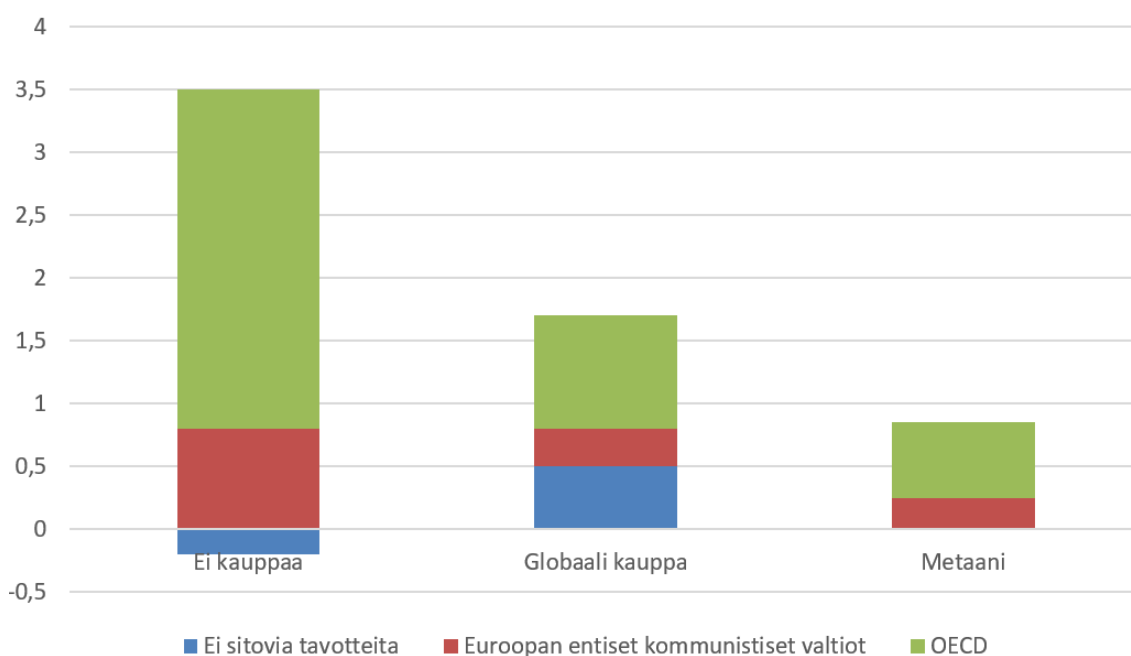
On myös tärkeää ylläpitää selkeä yhteisymmärrys luonnontieteilijöiden ja mallintajien välillä. Vaikka Nordhausin johtopäätökset luonnon epäjohtonmukaisuuksien poissaolosta voitiin motivoida, erosi nämä näkemykset suuresti itse luonnontieteilijöiden näkemyksestä, joiden tutkimukseen viitattiin. Osapuolien näkemykset havainnoista täytyy olla yhteisymmärryksessä, jos luonnontieteet pitäisi olla selkeä aloitus myöhemmälle taloustieteelliselle mallintamiselle. Tiede on kuitenkin jatkanut kehitystä ja osa Lenton ym. (2008) tutkijoista ovat tehneet jatkokatsauksen. McKay ym. (2022) totesivat Länsi-Antarktisen jäätikön sulamisen, Tyynenmeren koralliriutan kuoleamisen ja Pohjois-Kanadan ikeroudan sulamisen olevan alle 2 °C lämmönousun sisällä. Kuvio 9 osoittaa katsauksen kaikki riskialueet.



Kuvio 9. Maapallon ilmaston riskialueet.

Arviointimallinnuksen valikointiongelmaan ei ole yksiselitteistä ratkaisua. Ilmastoherkkyys on näistä yksinkertaisin, koska siitä saa selkeätä tutkimustietoa. Sen sijaan kysymykset korosta tai oikeudenmukaisesta tasapainosta ovat enemmän eettisiä, ja näistä ei ole yksimielisyyttä mallintajien välillä. Erityisesti diskontto koron valinta on tuottanut monta kymmentä vuotta keskustelua (Heal 2017, 1048). Koska tietokone voima tai ohjelmiston käytön kynnyks ei rajoita mallintamista samalla tavalla kuin vuosikymmeniä sitten, yksi lähestymistapa voisi olla antaa mahdollisimman paljon tuloksia, joissa voidaan ottaa huomioon erilaiset tekijät.

Toinen näkökulma voisi olla tarkastelun kohteen rajaus. Kansainvälisen hiilen rajakustannus mittaaminen on laaja kysymys, joka avaa itsensä hyvin monelle eri näkökulmalla ja arvokysymykselle. Tol (1999) tutkimuksen Kioton pöytäkirjan analysoinnista oli hyvä esimerkki rajatusta kysymyksestä taloustieteilijälle. Kyseessä oli selkeästi valittu tavoite ja osa valtioiden välisestä tuloeron painavuuden harkinnan ongelmasta oli ratkaistu antamalla eri valtioille erilaiset sitovat tavoitteet. Akateemisen mallintaja siirtyi samasta ongelmallisesta paikasta vaikkapa julkisen sektorin päättäjän kanssa, jonka täytyy miettiä oikeudenmukaisuutta, vertailijaksi. Kuviossa 10 nähdään Tolin (1999, 153) pöytäkirja analyysin vertailu sen tavoitteiden toteuttamistapojen välillä.



Kuvio 10. Kioton pöytäkirjan toteuttamisen kustannukset.

Palkit mittaavat vuosittaista kulutuksen menettämistä biljoonissa dollareissa verrattuna 1990–2100 mallinnukseen ilman toimenpiteitä. Ensimmäinen palkissa valtiot toteuttavat päästörajoitukset itsenäisesti, toisessa yhteistyössä ja kolmannessa yhdessä metaani päästöjen

rajoittamisen kanssa. Diskontto korko on 5 % ja arvot on mitattu vuoden 1995 Yhdysvaltojen dollareissa.

Koska hiilen vähentäminen on halvempaa maasta toiseen, pystytään yhteistyön kanssa saamaan aikaiseksi kaikille halvempi tie pöytäkirjan tavoitteiden toteuttamiseksi. Mutta koska tämä nostaisi kustannuksia maille, joilla ei ole sitovia päästövähennys vaatimuksia, tekisi se hankalaksi suostutella näitä maita tekemään yhteistyötä. Tol sen sijaan ehdottaisi metaani päästöjen rajoittamisen tiukentamista, koska kaasu lämmittää ilmastoa voimakkaammin, mutta sillä ei ole samanlaista roolia taloudessa kuin hiili. Arviointimalleilla voisi pöytäkirjan toteuttamisen vaihtoehtojen vertailun tavoin tutkia kysymyksiä, joissa hankalimmat arvovalta kysymykset on jo päätetty päätöksentekijän puolesta.

Kysymyksen rajaaminen ja päätöksenteon ulkoistaminen ei ole kuitenkaan yksiselitteinen ratkaisu tapa. Esimerkiksi Kioton pöytäkirja ja sen tavoitteiden toteuttaminen on jo sen alkuperäisessä muodossa toteutettu. Lyhytaikaisemmassa skenaario työssä mallintajien täytyy tarkastella empiirisen tutkimuksen tuloksia tarkasti tarkasteltavan kohteen lopulta toteutettua. Jos mallit jatkuvasti antaisivat vääränlaisia arvioita positiiviseen tai negatiiviseen suuntaan jatkuvasti, pitäisi harkiten miettiä miten arviointimallit voisivat antaa hyviä arvoja tavanomaisessa pidemmän ajan mallinnuksessa.

On myös mahdollista myös korjata valinnan ongelmaa arviointimallinnuksessa niiden kehityksellä. Vaikka DICE ja FUND ovat suosituimmat arviointimallit hiilen yhteiskunnallisten kustannuksien mittaamisessa, eivät ne ole ainoat. Esimerkiksi Rennert ym. (2022) kritisoivat Yhdysvaltojen ministeriöiden välisen työryhmän valitsemia skenaarioita. Niiden bruttokansantuote, väkiluku ja päästö tekijöissä ei ole epävarmuutta. Heidän ratkaisunsa oli toteuttaa kirjallisuuskatsaus, tiedustella eri alojen asiantuntijoilta ja luoda yksittäinen skenaario, joka antaa tekijöiden muutoksille eri todennäköisyys suuntia eikä yksiselitteisiä arvoja. Mallintajan ei tarvitse tehdä normatiivista päätöstä skenaariosta. Myös ilmastonmuutoksen mahdollista epäjohtonmukaisuutta on tutkittu arviointimalleilla ja todettu olevan positiivisen vaikutus hiilen rajakustannukseen. Dietz ym. (2021) suorittivat synteisiraportin olemassa olevasta mallinnustyöstä. Heidän katsauksessansa löytyi myös DICE ja FUND malliajoja, he löysivät 25 % hiilen rajakustannuksen nousun ja pystyivät erottelemaan Iso-Britannian, Ranskan, Japanin, Turkin, Ukrainan ja Etelä-Korean hyvin alttiiksi tästä syntyvästä kustannuksien noususta.

Vaikka arviointimallintamisella voi olla paljon annettavaa taloustieteelle ja päätöksentekijöille heidän vertaillessa ilmastonmuutoksen mahdollisia strategioita tai kustannuksia, FUND-mallin tämänhetkinen tila ei ole hyvä hiilen rajakustannuksien arvioimiseen. Sitä ei ole päivitetty vuosiin, mikä on melkein ehdoton vaatimus mallille, jonka kustannusfunktio on riippuvainen uudesta tutkimustyön integroinnista.

FUND-mallin mahdollista tulevaisuutta voi vaarantaa myös ylläpitäjien huomion muutos. Viimeisin paperi (Anthoff ym. 2014), jossa hyödynnettiin FUND-mallia keskittyä eri alueiden hiilen rajakustannuksen laskemiseen, mutta poikkeavasti tutkimuksessa hyödynnettiin useita arviointimalleja. Tämän jälkeen Tolin arviointimalli työ on keskittynyt DICE-mallin ja sen yksinkertaisemman kustannusfunktion hyödyntämiseen. Hwang, Tol ja Hofkes (2019) tarkastelivat agenttien käytösten muutosta, jos lisättiin ilmastonmuutoksen tiedon lisääminen investointi muotona ja Srikrishnan ym. (2022) tutkimuksessa Tol työryhmän kanssa analysoivat tulevan vuosisadan hiilipäästö todennäköisyyksiä skenaarioissa. Samoin toinen FUND-mallia kehittänyt David Anthoff on siirtynyt hyödyntämään muita malleja. Scovronick ym. (2021) tutkivat DICE-mallilla ilmastopolitiikan tuottaman puhtaamman ilman positiivisia vaikutuksia ja Anthoff oli myös mukana Rennert ym. (2022) tutkimuksen mallin kehittämisessä. Oppaan tilan huomioon ottaen voidaan kuvailla mallin kehittämisen olevan tällä hetkellä tauolla.

6 Yhteenveto

Ilmastonmuutoksen luonnontiede on hyvällä pohjalla. Jo 1960-luvun puolivälistä ilmastotieteilijöillä oli erinomaiset alkuarvaukset tulevasta lämpökaudesta ja hiilidioksidin roolista tästä muutoksesta. Tulevien vuosikymmenien aikana yksittäiset tuntemattomuuden kohdat ratkaistaan ja hiilidioksiditeorialla ei tällä hetkellä ole muita varteenotettavia vaihtoehtoja nykyisen lämpökauden selittäjän.

Taloustieteilijät alkoivat tutkia ympäristön ja ilmaston vaikutuksista talouteen 1970-luvulla muun tiedeyhteisön kanssa. Teoreettisesti talouden tuottamat haita luonnolle voidaan sisällyttää julkishyödykkeen ja erityisesti ulkoisvaikutteen näkökulmaan. Tuotannon ja kulutuksen välituotteena syntyy hiilidioksidia, joka levitessään ilmakehään muuttaa ilmastoja nostamalla maailmanlaajuisia lämpötilaa ja luo kustannuksia kaikille. Tästä siirtyminen ekonometristen työkalujen käyttöön on ollut haastavaa, koska ilmiö on pitkä aikainen maailmanlaajuinen muutos, mutta tutkimukset voidaan pääsääntöisesti toteuttaa lyhyt aikaisina ja paikallisina.

Arviointimallinnus on makrotaloudellinen työkalu, jossa talouteen lisätään ilmastonmuutoksen kustannus. Näin voidaan tutkia hiilidioksidin pidemmän ajan vaikutuksia talouteen tai jopa hiilidioksidin rajakustannusta eli hiilen yhteiskunnallista kustannusta. Tutkimussuuntauksen aloituksesta 1990-luvun puolesta välistä se on viimeisen kymmenen vuoden aikana menettänyt kiinnostusta. Yksittäisen rajakustannusarvon hyöty on kyseenalainen, sillä mallittaja pystyy helposti tekemään ja motivoimaan haluamansa arvon monesti eri mallin syötteistä. Näistä yksiselitteisimmät ovat huomiot luonnontieteestä, keskihankalat ihmisen käyttäytymisen oletukset ja hankalimmat mahdolliset eettiset huomiot nykypäivän kulutuksen arvosta verrattuna huomiseen tai eri maiden kulutuksen vertailu.

Tolin aloittama FUND-malli on kunnianhimoinen projekti, jolla 1990-luvun puolesta välistä yksittäinen tiedemies on yrittänyt ottaa aikansa yksinkertaisen arviointimallin ja sisällyttää siihen aikaansa ymmärryksen ilmaston vaikutuksista talouteen. Tämä monipuolisempi näkökulma alistaa sen suuremmille riskeille. Sillä on monimutkaisempi kustannusfunktio muihin arviointimalleihin verrattuna, joka on riippuvainen teoreettisesta ja empiirisestä ajankohtaisuudesta. Mallin epäselvän dokumentaation vuoksi on hankala tietää, onko malli edes aktiivisesti käytössä tänä päivänä.

Arviointimallien kyky saada yksiselitteinen tulos ilmastonmuutoksen pidemmän ajan kustannuksille on ongelmallinen, mutta ei tee malleista hyödyttömiä. Jos tutkijat ja lukijat ovat tietoisia hiilen rajakustannuksen arvoista ja niiden rajoitteista, voidaan malleja hyödyntää ja kehittää. Nojaamalla uuteen dataan voidaan osa päätöksenteosta ulkoistaa eri tapahtumasarjojen todennäköisyyksille, kuin mallintajan valinnalle. Samoin mallintajat voivat tarkastella kysymyksiä, joissa poliittinen päätöksentekijä on jo tehnyt osan normatiivisista tai eettisistä päätöksistä ja pyrkiä mallintamaan lyhyemmän ajan skenaariota.

FUND-mallia sen sijaan ei voida suositella tällä hetkellä hiilen rajakustannuksien arvioimiseen. Se vaatii yleisen päivityksen ja kustannusfunktion eri osien motivaation tarkastelun. Erityisesti ekosysteemin kustannukset, jotka eivät perustu suoran taloudellisen hyödyn menettämisestä, vaan ihmisten mielihyvän menetyksestä, ei ole nykyisen vertausarvioidun kirjallisuuden mukainen. Jää nähtäväksi pysyykö mallintaja yhteisön mielenkiinto monimutkaisissa kustannusfunktioissa vai siirtyykö huomio yksinkertaisimpiin yhtälöihin.

Lähteet

- Adger, W.N. – Bijlsma, Luitzen – Bilan, Du – Brown, B.E. – Ehler, C.N. – Elder, D.L. – Gornitz, V.M. – Hofius, K. – Holligan, P.M. – Hoozemans, F.M.J. – Hopley, D. – Hosokawa, Y. – Klein, R.J.T. – Kulshrestha, S.M. – Maul, G.A. – McInnes, K. – McLean, R.F. – Mimura, N. – Nicholls, R.J. – Nurse, L.A. – Nieto, H. Pérez – Richardson, D. – Subak, S. – Sullivan, M. – Stakhiv, E.Z. – Turner, R.K. – Vallianos, L. – Warrick, R.A. – White, W.R. – Woodworth, P.L. – Yang Huating (1996), *Climate Change 1995 Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses Contributions of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, 300–335.
- Ackerman, Frank – Stanton, Elizabeth (2010) The social cost of carbon. *real-world economics review*, Vol. 53, 129–144.
- Anthoff, David – Narita, Daiju – Tol, Richard S. J. (2009) Damage costs of climate change through intensification of tropical cyclone activities: an application of FUND. *Climate Research*, Vol. 39, 87–97.
- Anthoff, David – Narita Daiju – Tol, Richard S. J. (2010) Economic costs of extratropical storms under climate change: an application of FUND. *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 53 (3), 371–384.
- Anthoff, David – Hepbrun, Cameron – Tol, Richard S. J. (2008) Equity weighting and the marginal damage costs of climate change. *Ecological Economics*, Vol. 68, 836–849.
- Anthoff, David – Tol, Richard S. J. – Yohe, Gary W. (2009) Discounting for Climate Change. *Economics*, Vol. 3.
- Anthoff, David – Tol, Richard S. J. (2009) The Impact of Climate Change on the Balanced Growth Equivalent: An Application of FUND. *Environmental and Resource Economics*, Vol. 43, 351–367.
- Anthoff, David – Tol, Richard S. J. (2013) The uncertainty about the social cost of carbon: A decomposition analysis using fund. *Climatic Change*, Vol. 117, 515–530.
- Anthoff, David – Rose, Steven – Tol, Richard S. J. – Waldhoff, Stephanie (2014) The Marginal Damage Costs of Different Greenhouse Gases: An Application of

- FUND. *Economics – The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, Vol. 8, 1–33.
- Auffhammer, Maximilian (2006) Integrated Model Shows That Atmospheric Brown Clouds and Greenhouse Gases Reduced Rice Harvests in India. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 103 (52), 19668–19672.
- Auffhammer, Maximilian (2018) Quantifying Economic Damages from Climate Change. *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 32 (4), 33–52.
- Arrhenius, Svente (1896) On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 5 (41), 237–276.
- Blair, John P. – Chatfield, Walter (1974) Pareto Optimal Growth. *Public Choice*, Vol. 17, 93–97.
- Burke, Marshall – Emerick, Kyle (2016) Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture. *American Economic Journal: Economic Policy*, Vol. 8 (3), 106–140.
- Burn, D. – Hoey, A. S. – Matthews, S. – Harrison, H. B. – Pratchett, M. S. (2023) Differential bleaching susceptibility among coral taxa and colony sizes, relative to bleaching severity across Australia’s Great Barrier Reef and Coral Sea Marine Parks. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 191, 114907.
- Callendar, Guy Stewart (1941) Infra-red absorption by carbon dioxide, with special reference to atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 67 (291), 263–275.
- Cai, W. – Sullivan, A. – Cowan, T. (2009) Climate change contributes to more frequent consecutive positive Indian Ocean Dipole events. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36.
- Chain-Guadarrama, Adina – Martínez-Salinas, Alejandra – Aristizábal, Natalia – Ricketts, Taylor, H. (2019) Ecosystem services by birds and bees to coffee in a changing climate: A review of coffee berry borer control and pollination. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 280, 53–67.
- Cline, W.R. (1992), *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Yhdysvallat.

- Clarke, Leon – Edmonds, Jae – Krey, Volker – Richels, Richard – Rose, Steven – Tavoni Massimo (2009) International climate policy architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios. *Energy Economics*, Vol. 31, S64–S81.
- Clarke, Leon – Weyant, John (2009) Introduction to the EMF 22 special issue on climate change control scenarios. *Energy Economics*, Vol. 31, S63.
- d'Arge, Ralph C. (1975) Economic and Social Measures of Biologic and Climatic Change. *Institute for Defense Analysis*, Vol. 6.
- Darwin, R.F. – Tsigas, M. – Lewandrowski, J. – Raneses, A. (1995) *World Agriculture and Climate Change – Economic Adaptations*, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 703.
- Darwin, R.F. – Tsigas, M. – Lewandrowski, J. – Raneses, A. (1996) Land use and cover in ecological economics, *Ecological Economics*, Vol. 17, 157–181.
- Dietz, Simon – Rising, James – Stoerk, Thomas – Wagner, Gernot (2021) Economic impacts of tipping points in the climate system. *The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 118 (34).
- Dietz, Simon (2007) The Impacts of Climate Change: Perspectives from the "Stern Review". *The Brown Journal of World Affairs*, Vol. 13 (2), 173–175.
- Downing, T.E. – Greener, R.A. – Eyre, N. (1995) *The Economic Impacts of Climate Change: Assessment of Fossil Fuel Cycles for the ExternE Project*. Environmental Change Unit and Eyre Energy Environment, Oxford and Lonsdale, United Kingdom
- Downing, T.E. – Eyre, N. – Greener, R. – Blackwell, D. (1996) *Full Fuel Cycle Study: Evaluation of the Global Warming Externality for Fossil Fuel Cycles with and without CO₂ Abatement and for Two Reference Scenarios*, Environmental Change Unit, University of Oxford, Oxford.
- Drechler, Martin (2020) Model-based integration of ecology and socio-economics for the management of biodiversity and ecosystem services: State of the art, diversity and current trends. *Environmental Modelling and Software*, Vol. 134.
- Fair, Ray C. (1978) Inflation and Unemployment in a Macroeconometric Model. *After The Phillips Curve: Persistence of High Inflation and High Unemployment*, Conference Series Number. 19, 164–200.
- Fankhauser, S. (1994) Protection vs. Retreat – The Economic Costs of Sea Level Rise, *Environmental and Planning A: Economy and Space*, Vol. 27, 299–319.

- Fischer, G. – Frohberg, K. – Parry, M.L. – Rosenzweig, C. (1993) Climate Change and World Food Supply, Demand and Trade. Teoksessa: *Costs, Impacts, and Benefits of CO2 Mitigation*, toim. Kaya, Y. – Nakicenovic, N. – Nordhaus, W.D. – Toth, F.L., 133–152. International Institute for Applied Systems Analysis, Australia.
- Fischer, G. – Frohberg, K. – Parry, M.L. – Rosenzweig, C. (1996) Impacts of Potential Climate Change on Global Regional Food Production and Vulnerability. Teoksessa: *Climate Change and World Food Security*, toim. Downing, T.E., 115–159. Springer-Verlag, Berlin.
- Fleck, John – Connolley, William M. – Peterson, Thomas C. (2008) The Myth of the 1970's Global Cooling Scientific Consensus. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 89 (9), 1325–1338.
- Forster, P. – Ramaswamy, V. – Artaxo, P. – Berntsen, T. – Betts, R. – Fahey, D.W. – Haywood, J. – Lean, J. – Lowe, D.C. – Myhre, G. – Nganga, J. – Prinn, R. – Raga, G. – Schulz, M. – Dorland, R.V. (2007) Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Iso-Britannia.
- Frisvold, G. B. – Kuhn, B. – Tsigas, M. E. (1996) Global Climate Change in Agriculture. Teoksessa: *Global Trade Analysis: Modelling and Applications*, toim. Hertel, T. W., Cambridge University Press, Cambridge.
- FUND 3.9 (2014) THE CLIMATE FRAMEWORK FOR UNCERTAINTY, NEGOTIATION AND DISTRIBUTION (FUND), TECHNICAL DESCRIPTION, VERSION 3.9. <<http://www.fund-model.org/files/documentation/Fund-3-9-Scientific-Documentation.pdf>>, otettu 15.3.2023
- FUNDTables (2022) Tables R, P.FUND, P.A1B, P.A2, P.B1, P.B2, Y.FUND, Y.A1, Y.A2, Y.B1, Y.B2, AEEI.FUND, AEEI, A1B, AEEI.A2, AEEI.B1, AEEI.B2, ACEI.FUND, ACEI.A1B, ACEI.A2, ACEI.B1, ACEI.B2, CO2F.FUND, CO2F.A1B, CO2F.A2, CO2.B1, CO2F.B2, CH4, N2O, OC, SF6, C, RT, A, EFW, SLR, I, HD, HV, HC.1, HC.2, HC.3, HC.4, HM, TS, ETS, MC for the FUND model, <<http://www.fund-model.org/MimiFUND.jl/latest/tables/>>, otettu 1.12.2022.

- Gitay, H. – Brown, S. – Easterling, W. – Jallow, B.P. – Antle, J.M. – Apps, M. – Beamish, R. – Chapin, T. – Cramer, W. – Frangi, J. – Laine, J. – Lin, E. – Magnuson, J.J. – Noble, I. – Price, J. – Prowse, T.D. – Root, T.L. – Schulze, E.D. – Sitotenko, O. – Sohngen, B.L. – Soussana, J.F. (2001) Ecosystems and their Goods and Services. Teoksessa: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability – Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, toim. McCarthy, J.J., 235–342. Cambridge University Press, Cambridge.
- Goulder, L.H. – Mathai, K. (2000) Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change. *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 39, 1–38.
- Goulder, L.H. – Schneider, S.H. (1999) Induced technological change and the attractiveness of CO₂ abatement policies. *Resource and Energy Economics*, Vol. 21, 211–253.
- HadCRUT (2023), Itä-Anglian yliopiston ja Iso-Britannian meteorologisen järjestön maailman keskilämpötilan aikasarja.
<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis_300.png>, haettu 1.3.2023.
- Hammit, J.K. – Lempert, R.J. & Schlesinger, M.E. (1992), A Sequential-Decision Strategy for Abating Climate Change. *Nature*, Vol. 357, 315–318.
- Heal, Geoffrey (2017) The Economics of the Climate. *Journal of Economic Literature*, Vol. 55 (3), 1046–1063.
- Heller, Walter W. (1971) Economic growth and ecology—an economist’s view. *Monthly Labor Review*, Vol. 94 (11), 14–21.
- Hicks, J. R. (1939) The Foundations of Welfare Economics. *The Economic Journal*, Vol. 49 (196), 696–712.
- Hodgson, D. – Miller, K. (1995), Modelling UK Energy Demand. Teoksessa: *Global Warming and Energy Demand*, toim. Barker, T. – Ekins, P. – Johnstone, N. Routledge, Lontoo.
- Hoozemans, F.M.J. – Marchand, M. & Pennekamp, H.A. (1993), *A Global Vulnerability Analysis: Vulnerability Assessment for Population, Coastal Wetlands and Rice Production and a Global Scale (second, revised edition)*, Delft Hydraulics, Yhdysvallat.

- Hourcade, J. – Halsneas, K. – Jaccard, M. – Montgomery, W.D. – Richels, R.G. – Robinson, J. – Shukla, P.R. – Sturm, P. (1996) A Review of Mitigation Cost Studies. Teoksessa *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions – Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, toim. Bruce, J.P – Lee, H. – Haites E.F, 297–366. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hourcade, J. – Shukla, P.R. – Cifuentes, L. – Davis, D. – Edmonds, J.A. – Fisher, B.S. – Fortin, E. – Golub, A. – Hohmeyer, O. – Krupnick, A. – Kverndokk, S. – Loulou, R. – Richels, R.G. – Segenovic, H. – Yamaji, K. (2001) Global, Regional and National Costs and Ancillary Benefits of Mitigation. Teoksessa: *Climate Change 2001: Mitigation – Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, toim. Davidson, O.R. – Metz, B. 499–559. Cambridge University Press, Cambridge, Iso-Britannia.
- Hwang, Chang – Tol, Richard S. J. – Hofkes, Marjan W. (2019) Active Learning and Optimal Climate Policy. *Environmental and Resource Economics*, Vol. 73, 1237–1264.
- IMAGE Team (2001) The IMAGE 2.2 Implementation of the SRES Scenarios: A Comprehensive Analysis of Emissions, Climate Change, and Impacts in the 21st Century, National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, 481508018.
- IPCC (1990) *CLIMATE CHANGE The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, Iso-Britannia.
- IPCC (2015) *CLIMATE CHANGE 2014 Synthesis Report*. World Meteorological Organization, Geneva, Sveitsi.
- IPCC (2021) Summary for Policymakers. Teoksessa: *Climate Change 2021: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, toim. Masson-Delmotte, V. – Zhai, P. – Pirani, A. – Connors, S. L. – Péan, C. – Berger, S. – Caud, N – Chen, Y. – Goldfarb, L. – Gomis, M. I. – Huang, M. – Leitzell, K. – Lonnoy, E. – Matthews, J.B.R. – Maycock, T. K. – Waterfield, T. – Yelekçi, O. – Yu, Y. – Zhou, B. Cambridge University Press, Cambridge, Iso-Britannia.
- IPCC (2023) Summary for Policymakers. Teoksessa: *Synthesis Report of the IPCC Assessment Report (AR6)*, toim. Paola Arias – Mercedes Bustamante – Ismail

Elgizouli – Gregory Flato – Mark Howden – Carlos Méndez – Joy Pereira – Ramón PichsMadruga – Steven K Rose – Yamina Saheb – Roberto Sánchez – Diana Ürge-Vorsatz – Cunde Xiao – Noureddine Yassaa.

<https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf>, haettu 1.3.2023.

IWG (2016) Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis. *Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government.*

<https://www.epa.gov/sites/default/files/201612/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf>, haettu 2.12.2020.

Kane, S. – Reilly, J.M. – Tobey, J. (1992) An Empirical Study of the Economic Effects of Climate Change on World Agriculture, *Climatic Change*, Vol. 21, 17–35.

Kattenberg, A. – Giorgi, F. – Grassl, H. – Meehl, G.A. – Mitchell, J.F.B. – Stouffer, R.J. – Tokioka, T. – Weaver, A.J. – Wigley, T.M.L. (1996) Climate Models - Projections of Future Climate. Teoksessa: *Climate Change 1995: The Science of Climate Change – Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, toim. Houghton, J.T. ym., 285–357. Cambridge University Press, Cambridge.

Keen, Steve (2021) The appallingly bad neoclassical economics of climate change. *Globalizations*, Vol. 18 (7), 1149–1177.

Kjerfve, Björn – McField, Melanie – Thattai, Deeptha – Giró, Ana (2021) Coral reef health in the Gulf of Honduras in relation to fluvial runoff, hurricanes and fishing pressure. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 172.

Kneese, Allen V. (1971) Background for the Economic Analysis of Environmental Pollution, *The Swedish Journal of Economics*, Vol. 73 (1), 1–24.

Lamb, H. H. (1965) THE EARLY MEDIEVAL WARM EPOCH AND ITS SEQUEL. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 1, 13–37.

Leatherman, S.P. – Nicholls, R.J. (1995) Accelerated Sea-Level Rise and Developing Countries: An Overview, *Journal of Coastal Research*, Vol. 14, 1–14.

Leggett, J. – Pepper, W.J. – Swart, R.J. (1992) Emissions Scenarios for the IPCC: An Update. Teoksessa: *Climate Change 1992 - The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, toim. Houghton, J.T. – Callander, B.A. – Varney, S.K., 71–95. Cambridge University Press, Cambridge, Lontoo.

- Lenton, Timothy, M. – Held, Hermann – Kriegler, Elmar – Hall, Jim W. – Lucht, Wolfgang – Rahmstorf, Stefan – Schellnhuber, Hans Joachim (2008) Tipping elements in the Earth's climate system. *The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 105 (6), 1786–1793.
- Link, Michael P. – Tol, Richard S.J. (2004) Possible Economic Impacts of a Shutdown of the Thermohaline Circulation: An Application of FUND. *Portuguese Economic Journal*, Vol. 3, 99–114.
- Link, Michael P. – Tol, Richard S. J. (2011) Estimation of the economic impact of temperature changes induced by a shutdown of the thermohaline circulation: an application of FUND. *Climatic Changes*, Vol. 104, 287–304.
- Lucas, Robert E. – Sargent, Thomas J. (1978) After Keynesian Macroeconomics. *After The Phillips Curve: Persistence of High Inflation and High Unemployment*, Conference Series Number. 19, 49–82.
- Maier-Reimer, E. – Hasselmann, K. (1987) Transport and Storage of Carbon Dioxide in the Ocean: An Inorganic Ocean Circulation Carbon Cycle Model. *Climate Dynamics*, Vol. 2, 63–90.
- Marotzke, Jochem (2000) Abrupt Climate Change and Thermohaline Circulation: Mechanism and Predictability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 97 (4), 1347–1350.
- Martens, W.J.M. – Jetten, T.H. – Focks, D.A. (1997) Sensitivity of Malaria, Schistosomiasis and Dengue to Global Warming. *Climatic Change*, Vol. 35, 145–156.
- Martens, W.J.M. – Jetten, T.H. – Rotmans, J. – Niessen, L.W. (1995) Climate Change and Vector-Borne Diseases – A Global Modelling Perspective. *Global Environmental Change*, Vol. 5 (3), 195–209.
- Martens, W.J.M. (1998) Climate Change, Thermal Stress and Mortality Changes. *Social Science and Medicine*, Vol. 46 (3), 331–344.
- Martin, P.H. – Lefebvre, M.G. (1995) Malaria and Climate: Sensitivity of Malaria Potential Transmission to Climate. *Ambio*, Vol. 24 (4), 200–207.
- McKay, David I. Armstrong – Staal, Arie – Abrams, Jesse F. – Winkelmann, Ricarda – Sakschewski, Boris – Loriani, Sina – Fetzer, Ingo – Cornell, Sarah E. – Rockström, Johan – Lenton, Timothy M. (2022) Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, Vol. 377 (6611).

- Mendelshon, Robert – Nordhaus, William D. – Shaw, Daigee (1994) The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *The American Economic Review*, Vol. 84 (4), 753–771.
- Mendelsohn, R.O. – Schlesinger, M.E. – Williams, L.J. (2000) Comparing impacts across climate models. *Integrated Assessment*, Vol. 1, 37–48.
- MimiDICE2013 (2023) Mimi-DICE-2013.jl.
<<https://github.com/anthofflab/MimiDICE2013.jl>>, haettu 20.3.2023.
- MimiFUND (2022) MimiFUND.jl. <<https://github.com/fund-model/MimiFUND.jl>>, haettu 1.12.2022.
- MimiIWG (2023) MimiIWG.jl. <<https://github.com/rffscghg/MimiIWG.jl>>, haettu 1.4.2023
- Morita, T. – Kainuma, M. – Harasawa, H. – Kai, K. – Dong-Kun, L. – Matsuoka, Y. (1994) *Asian-Pacific Integrated Model for Evaluating Policy Options to Reduce Greenhouse Gas Emissions and Global Warming Impacts*. National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japani.
- Nakicenovic, N. – Swart, R. (2000) Emissions scenarios – special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Iso-Britannia.
- Navrud, S. (2001) Valuing Health Impacts from Air Pollution in. *Environmental and Resource Economics*, Vol. 20 (4), 305–329.
- Nicholls, R. J. – Leatherman, S. P. (1995) The Implications of Accelerated Sea-Level Rise for Developing Countries: A Discussion. *Journal of Coastal Research*, Vol. 14, 303–323.
- Nicholls, Robert J. – Tol, Richard S. J. – Vafeidis, Athanasios T. (2008) Global estimates of the impact of a collapse of the West Antarctic ice sheet: an application of FUND. *Climatic Change*, Vol. 91, 171–191.
- Nordhaus, William D. (1977) Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem. *The American Economic Review*, Vol. 67 (1), 341–346.
- Nordhaus, William D. (1991) The Cost of Slowing Climate Change: a Survey. *The Energy Journal*, Vol. 12 (1), 37–65.
- Nordhaus, William D. (1993) Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the “DICE” Model. *The American Economic Review*, Vol. 83 (2), 313–317.
- Nordhaus, William D. (2016) Revisiting the social cost of carbon. *The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 114 (7), 1518–1523.

Nordhaus, William D. – Sztorc, Paul (2013) DICE 2013R: Introduction and User's Manual. Second Edition.

<https://raw.githubusercontent.com/psztorc/DICE/master/documentation/DICE_Manual_100413r1.pdf>, haettu 1.2.2023.

Paul, Romer (2012) *Advanced Macroeconomics*. 4.p. McGraw-Hill Irwin, New York.

Pearce, D.W. – Moran, D. (1994) *The economic value of biodiversity*. EarthScan, London.

Perez-Garcia, John – Joyce, Linda A. – Binkley, C.S. – McGuire, A. D. (1997) *Economic Impacts of Economic Impacts of Climatic Change on the Global Forest Sector: An Integrated Ecological/Economic Assessment*. Teoksessa: *Economics of Carbon Sequestration in Forestry*, toim. Logan, Terry J. CRC Press, Boca Raton.

Pindyck, Robert S. (2013) *Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us?* *Journal of Economic Literature*, Vol. 51 (3), 860–872.

Ramaswamy, V. – Boucher, O. – Haigh, J. – Hauglustaine, D. – Haywood, J. – Myhre, G. – Nakajima, T. – Shi, G.Y. – Solomon, S. (2001) *Radiative Forcing of Climate Change*. Teoksessa: *Climate Change 2001: The Scientific Basis – Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, toim. Houghton, J.T. – Ding, Y., 349–416. Cambridge University Press, Cambridge.

Reilly, J.M. Hohmann, N. – Kane, S. (1994) *Climate Change and Agricultural Trade: Who Benefits, Who Loses?* *Global Environmental Change*, Vol. 4 (1), 24–36.

Rennert, Kevin – Errickson, Frank – Prest, Brian, C. – Rennels, Lisa – Newell, Richard G. – Pizer, William – Kingdon, Cora – Wingenroth, Jordan – Cooke, Roger – Parthum, Bryan – Smith, David – Cromar, Kevin – Diaz, Delavane – Moore, Frances C. – Müller, Ulrich K. – Plevin, Richard J. – Raftery, Adrian E. – Ševčíková, Hana – Sheets, Hannah – Stock, James H. – Tan, Tammy – Watson, Mark – Wong, Tony E. – Anthoff, David (2022) *Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO2*. *Nature*, Vol. 610, 687–700.

Scovronick, Noah – Anthoff, David – Dennig, Francis – Errickson, Frank – Ferranna, Maddalena – Peng, Wei – Spears, Dean – Wagner, Fabian – Budolfson, Mark (2021) *The importance of health co-benefits under different climate policy cooperation frameworks*. *Environmental Research Letters*, Vol. 16.

- Samuelson, Paul A. – Nordhaus, William D. (2010) *Economics International Edition*. 19. p. McGraw Hill, Singapore.
- Smith, Gregor W. (2008) Japan's Phillips Curve Looks Like Japan. *Journal of Money, Credit and Banking*, Vol. 40 (6), 1325–1326.
- Sohngen, B.L. – Mendelsohn, R.O. – Sedjo, R.A. (2001) A Global Model of Climate Change Impacts on Timber Markets. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, Vol. 26 (2), 326–343.
- Srikirishnan, Vivek – Guan, Yawen – Tol, Richard S. J. – Keller, Klaus (2022) Probabilistic projections of baseline twenty-first century CO₂ emissions using a simple calibrated integrated assessment model. *Climatic Change*, Vol. 170 (37).
- Stouffer, R. J. – Yin, J. – Gregory, J. M. – Dixon, K. W. – Spelman, M. J. – Hurlin, W. – Weaver, A. J. – Eby, M. – Flato, G. M. – Hasumi, H. – Hu, A. – Jungclaus, J. H. – Kamenkovich, I. V. – Levermann, A. – Montoya, M. – Murakami, S. – Nawrath, S. – Oka, A. – Peltier, W. R. – Robitaille, D. Y. – Sokolov, A. – Vettoretti, G. – Weber, S. L. (2006) Investigating the Causes of the Response of the Thermohaline Circulation to Past and Future Climate Changes. *Journal of Climate*, Vol. 19 (8), 1365–1387.
- Sutton, Paul C. – Anderson, Sharolyn J. – Costanza, Robert – Kubiszewski, Ida (2016) The ecological economics of land degradation: Impacts on ecosystem service values. *Ecological Economics*, Vol. 129, 182–192.
- Telesetsky, Anastasia (1999) The Kyoto Protocol. *Ecology Law Quarterly*, Vol. 26 (4), 797–813.
- Tol, Richard S. J. (1995a) On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND. *Environmental Modeling & Assessment*, Vol. 2, 151–163.
- Tol, Richard S. J. (1995b) The Damage Costs of Climate Change Toward More Comprehensive Calculations. *Environmental and Resource Economics*, Vol. 5, 353–374.
- Tol, Richard S. J. (1997) On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND. *Environmental Modeling and Assessment*, Vol. 2, 151–163.
- Tol, Richard S. J. (1999) Kyoto, Efficiency, and Cost-Effectiveness: Applications of FUND. *The Energy Journal*, Vol. 20, 131–156.
- Tol, Richard S. J. (2002a) Estimates of the Damage Costs of Climate Change – Part 1: Benchmark Estimates. *Environmental and Resource Economics*, Vol. 21, 47–73.

- Tol, Richard S. J. (2002b) Estimates of the Damage Costs of Climate Change - Part II: Dynamic Estimates. *Environmental and Resource Economics*, Vol. 21, 135–160.
- Tol, Richard S.J. (2004) An emission intensity protocol for climate change: an application of FUND. *Climate Policy*, Vol. 4, 269–287.
- Tol, Richard S. J. (2008) Climate, development and malaria: an application of FUND. *Climatic Change*, Vol. 88, 21–34.
- Tol, Richard S. J. (2009) The Economic Effects of Climate Change. *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 23 (2), 29–51.
- Tol, S. J. Richard (2018) *An Analysis of Mitigation as a Response to Climate Change*. Copenhagen Consensus Center, Yhdysvallat.
- Toya, H. – Skidmore, M. (2007) Economic Development and the Impact of Natural Disasters. *Economics Letters*, Vol. 94, 20–25.
- Ummenhofer, Caroline C. – England, Matthew H. – McIntosh, Peter C. – Meyers, Gary A. – Pook, Michael, J. – Risbey, James S. – Gupta, Alexander Sen – Taschetto, Andréa S. (2009) What causes southeast Australia’s worst droughts? *Geophysical Research Letters*, Vol. 36.
- USEPA (2003), International Analysis of Methane and Nitrous Oxide Abatement Opportunities: Report to Energy Modeling Forum, Working Group 211, Environmental Protection Agency, D.C.
- Van den Bergh, J.C.J.M. – Botzen, W.J.W. (2015) Monetary valuation of the social cost of CO₂ emissions: A critical survey. *Ecological Economics*, Vol. 114, 33–46.
- Wagner, Gernot – Weitzman, Martin L. (2018) Potentially large equilibrium climate sensitivity tail uncertainty. *Economic Letters*, Vol. 168, 144–146.
- Wang, Pei – Deng, Xiangzheng – Zhou, Huimin – Yu, Shangkun (2019) Estimates of the social cost of carbon: A review based on meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 209, 1494–1507.
- Wang, Tianpeng – Teng, Fei – Deng, Xu – Xie, Jun (2022) Climate module disparities explain inconsistent estimates of the social cost of carbon in integrated assessment models. *One Earth*, Vol. 5 (7), 767–778.
- Waldhoff, Stephanie – Anthoff, David – Rose, Steven, Richard, R.S.J. (2014) The Marginal Damage Costs of Different Greenhouse Gases: An Application of FUND. *Economics*, Vol. 8 (1).
- Weitzman, M.L. (1992) On Diversity. *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 107 (2) 364–405.

- Weitzman, M.L. (1998) The Noah's Problem. *Econometrica*, Vol. 66 (6), 1279–1298.
- Weitzman, M.L. (1993) What to preserve? An application of diversity theory to crane conservation. *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 108 (1), 157–183.
- Weyant, J.P. (2004) Introduction and overview. *Energy Economics*, Vol. 26, 501-515.
- Weyant, J.P. De la Chesnaye, F.C. – Blanford, G.J. (2006) Overview of EMF-21: Multigas Mitigation and Climate Policy. *Energy Journal (Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy Special Issue)*, 1–32.
- WHO (2022) FUND-opiaan linkki Maailman terveystietojen dataan, joka ei toimi. <http://www.who.int/health_topics/global_burden_of_disease/en/>, otettu 1.12.2022.
- WMO (2006), Summary Statement on Tropical Cyclones and Climate Change, World Meteorological Organization. <http://www.wmo.ch/pages/prog/arep/tmrrp/documents/iwtc_summary.pdf>, otettu 20.12.2022.
- Yu, Pei – Xu, Rongbin – Abramson, Michael J. – Li Shanshan – Guo, Yuming (2020) Bushfires in Australia: a serious health emergency under climate change. *The Lancet Planetary Health*, Vol 4 (1), E7–E8.