

VAHINKOFUNKTION VAIKUTUS HIILEN SOSIAALISIIN KUSTANNUKSIIN DICE-MALLISSA

**Jyväskylän yliopisto
Kauppakorkeakoulu**

Pro gradu -tutkielma

2020

**Tekijä: Henri Lokkila
Oppiaine: Taloustiede
Ohjaaja: Heikki Lehtonen**



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

TIIVISTELMÄ

| | |
|---|-----------------------------------|
| Tekijä Henri Lokkila | |
| Työn nimi Vahinkofunktion vaikutus hiilen sosiaalisiin kustannuksiin DICE-mallissa | |
| Oppiaine Taloustiede | Työn laji Pro gradu -tutkielma |
| Aika (pvm.)25.11.2020 | Sivumäärä 47 |
| Tiivistelmä – Abstract <p>Tässä pro gradu -tutkielmassa tutkitaan DICE-mallia ja sen vahinkofunktion vaikutusta mallin arvioon hiilen sosiaalisista kustannuksista (HSK). Tutkimusosiossa alkuperäisen vahinkofunktion tuloksille muodostettiin herkkyysanalyysi, jonka perusteella havaittiin, että HSK on herkkä vahinkofunktion muutoksille. Tämän jälkeen kirjallisuuden muita vahinkofunktioita tutkittiin soveltamalla niitä DICE-malliin. Kirjallisuuden vahinkofunktiot tuottivat merkittävästi korkeampia arvioita HSK:sta. Lopuksi kirjallisuuden vahinkofunktioiden avulla muodostettiin uusia vahinkofunktiota PNS-regressiota hyödyntäen. Tulosten perusteella monilla DICE-mallin alkuperäistä vahinkofunktiota korkeampia kustannuksia tuottavilla vahinkofunktiolla on vain pieni vaikutus HSK:siin, jos niiden tulokset suhteutetaan tuloksien taustalla olevaan tutkimuksen määrään. Merkittävästi DICE-mallin vahinkofunktiota korkeampien kustannusten mahdollisuutta ja siten korkeampia arvioita HSK:sta ei voi kuitenkaan sivuuttaa tutkimuksen puutteen ja vahinkofunktioiden taustalla vaikuttavien kiistanalaisten metodologisten valintojen johdosta. Tutkielman lopussa keskustellaan tulosten merkityksestä aiemman kirjallisuuden valossa. Johtopäätöksenä on, että DICE-mallin tuloksiin HSK:n suhteen tulee suhtautua huomattavalla varauksella. Tulosten todetaan tukevan aiempia havaintoja, joiden mukaan arvioit HSK:sta ovat erittäin epävarmoja.</p> | |
| Asiasanat Ilmastonmuutos, IA-mallit, DICE-malli, hiilen sosiaaliset kustannukset | |
| Säilytyspaikka Jyväskylän yliopiston kirjasto | |

SISÄLLYS

| | |
|--|-----------|
| TIIVISTELMÄ..... | 2 |
| 1 JOHDANTO | 5 |
| 2 ILMASTONMUUTOS ONGELMANA | 7 |
| 2.1 YLEISKATSAUS ILMASTONMUUTOKSEN VAIKUTUKSISTA | 7 |
| 2.2 ILMASTONMUUTOKSEN TALOUSTIEDE | 8 |
| 3 ILMASTONMUUTOKSEN TALOUDELLINEN MALLINTAMINEN | 10 |
| 3.1 IA-MALLIT | 11 |
| 3.1.1 DICE-malli..... | 11 |
| 3.1.2 Muut keskeiset IA-mallit | 13 |
| 3.2 ILMASTONMUUTOKSEN KUSTANNUKSET | 14 |
| 3.3 DISKONTTAUS..... | 17 |
| 3.3.1 Ramseyn sääntö..... | 18 |
| 3.3.2 Ramseyn säännön rajoitukset..... | 21 |
| 3.4 VAHINKOFUNKTIOT, ARVIOT KOKONAISKUSTANNUKSISTA JA HIILEN SOSIAALISISTA KUSTANNUKSISTA | 21 |
| 3.5 EPÄVARMUUS..... | 24 |
| 3.6 IA-MALLIEN RAJOITUKSET JA VAIHTOEHDOT | 25 |
| 4 DICE-MALLIN VAHINKOFUNKTION ANALYSOINTI | 27 |
| 4.1 AINEISTO JA MENETELMÄT | 27 |
| 4.2 DICE-MALLIN VAHINKOFUNKTIO JA SEN SENSITIIVISYYS | 28 |
| 4.3 KIRJALLISUUDEN MUUT VAHINKOFUNKTIOT..... | 31 |
| 4.4 UUSIEN VAHINKOFUNKTION MUODOSTAMINEN | 35 |
| 4.5 TULOSTEN ARVIOINTI JA VERTAUS AIEMPAAN TUTKIMUKSEEN | 38 |
| 4.6 TULOSTEN RAJOITUKSET..... | 39 |
| 5 JOHTOPÄÄTÖKSET | 41 |
| LYHENTEET..... | 43 |
| LÄHTEET | 43 |
| LIITE..... | 47 |

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos on yksi suurimpia ihmiskunnan kohtaamia haasteita. Ilmastonmuutokseen liittyvät uhkatekijät on tunnettu jo vuosikymmeniä tieteellisessä keskustelussa, mutta erityisesti viime vuosina keskustelu ilmastonmuutoksen vaikutuksista on lisääntynyt. IPCC:n syksyllä 2018 julkaisema erityisraportti ilmastonmuutoksesta on kiristänyt entisestään suosituksia päästöjen vähentämiseksi, jotta lämpeneminen pysyisi 1.5°C asteessa entisen 2°C asteen tavoitteen sijaan (IPCC 2018). Toisaalta taloustieteelle luonteva sopeutuksen kustannuksia ja hyötyjä tarkasteleva kustannus-hyöty -analyysi on jätetty uusimassa raportissa pois. Tätä valintaa perustellaan niin vaikeudella laittaa hinta ihmisten elämille, kulttuurille ja muille arvoille kuin myös epävarmuudelle vaikutuksista ja päästöjen lämmittävistä kerrannaisvaikutuksista (IPCC 2018, 76).

Taloustieteellistä kustannus-hyöty -analyysia lähestytään usein ns. IA (*integrated assesment*) -mallien näkökulmasta, mitkä yhdistävät tietoa ilmasto- ja taloustieteestä. Mallien avulla voidaan suosittaa politiikkaa, joka ottaa huomioon sekä lämpenemisen haitat kuin myös lämpenemisen estämisen kustannukset. Kustannus-hyöty näkökulmasta ilmastonmuutos on ristiriitainen aihe. Lämpenemistä estävät toimenpiteet tapahtuvat monien vuosikymmenien aikana ja vaikuttavat ihmisiin ja ympäristöön pitkälle tulevaisuuteen. Toisaalta tiedetään, että vuosisatojen aikavälillä ihmisten materiaallinen elintaso mitattuna tuloilla on moninkertaistunut. Jos tämä elintason nousutrendi jatkuu, on ilmastonmuutoksen sopeutustoimissa ainakin osin kyse siitä, miten paljon nyt elävien suhteellisesti köyhien ihmisten tulisi maksaa estääkseen tulevaisuudessa rikkaammille ihmisille aiheutuvia vahinkoja (Liski 2007). Toisaalta ei-antroposentrisestä näkökulmasta ilmastonmuutos pakottaa kysymään, miten paljon arvotetaan luontoa itsessään, muita eläimiä, joita ilmastonmuutos vahingoittaa.

Tässä tutkielmassa keskitytään yhteen keskeiseen IA-malliin, William Nordhausin kehittämään DICE-malliin. Erityisesti tutkielmassa tarkastellaan, miten DICE-mallin vahinkofunktio vaikuttaa ilmastonmuutoksesta koituviin hiilen sosiaalisiin kustannuksiin (HSK). Vahinkofunktio kuvaa lämpenemisen

suhdetta ilmastonmuutoksen kokonaisvahinkoihin. Hiilen sosiaaliset kustannukset taas viittaavat marginaalisen hiilitonnin aiheuttamiin vahinkoihin. HSK on keskeinen mittari, kun ilmastopolitiikkaa suunnitellaan, koska se kertoo, kuinka suuri ongelma lisäpäästöt ovat ja siten vaikuttaa siihen, miten kireisiin ilmastonmuutoksen vastaisiin toimiin kannattaa ryhtyä. Näin DICE-mallin dynamiikan ja sen vahinkofunktion vaikutuksen tutkiminen on myös yhteiskunnallisesti merkittävää.

Tutkielman rakenne seuraa tavanomaista esitystapaa: ensin käsitellään ilmastonmuutoksen ongelman luonnetta ja miten ilmastonmuutokseen suhtaudutaan IA-mallien näkökulmasta samalla käyden läpi kirjallisuudessa keskeisiä käsitteitä ja viitekehyksiä. Tämän jälkeen tutkitaan eri vahinkofunktioiden vaikutusta hiilen sosiaalisiin kustannuksiin DICE-mallissa ja verrataan tuloksia aiempaan kirjallisuuteen. Lopuksi pohditaan tulosten merkitystä IA-kirjallisuuden kannalta.

2 ILMASTONMUUTOS ONGELMANA

2.1 Yleiskatsaus ilmastonmuutoksen vaikutuksista

Ihmisten aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen arvioidaan aiheuttaneen noin 1°C maapallon keskilämpötilan nousemisen esiteolliseen aikaan verrattuna. Lisääntyvien päästöjen ennustetaan nostavan lämpenemisen 1.5°C asteeseen muutamassa kymmenessä vuodessa, jos päästömäärät kasvavat nykyistä tahtia. Esiteolliselta ajalta nykypäivään kertyneet päästöt eivät todennäköisesti ole itsessään riittäviä nostamaan maapallon keskilämpötilaa 1.5°C asteella, vaikka kasvihuonepäästöjen lämmittävä vaikutus ilmakehässä kestää sadoista vuosista vuosi tuhanteen. (IPCC 2018, 4-5). Lämpeneminen on siis todennäköisesti vielä mahdollista rajoittaa 1.5°C asteeseen.

Lämpeneminen on epätasaista eri alueilla ollen suurempaa napa-alueilla ja mantereiden yllä (IPCC 2018, 4). Kuten lämpeneminen, vahingot ilmastonmuutoksesta jakautuvat epätasaisesti. Suurimmat riskit koituvat arktisille alueille, kuivien alueiden asukkaille ja vähiten kehittyneiden maiden asukkaille (IPCC 2018, 9). Ilmastonmuutoksen vahingot aiheutuvat siten suhteettomasti erityisesti jo ennestään heikossa asemassa oleville. Toisaalta ilmastonmuutos voi ainakin osin hyödyttää pohjoisilla leveysasteilla maataloutta ja vähentää esimerkiksi kylmästä ilmasta johtuvia vahinkoja sekä vähentää lämmittämiseen tarvittavia resursseja (Stern 2007; Tol 2018). Ilmastonmuutoksesta tähän saakka aiheutuneet aggregaattikustannukset ovat jokseenkin kiistanalainen kysymys kirjallisuudessa. Vaatimaton lämpeneminen esiteolliselta ajalta saattaa kokonaiskuvassa tuoda enemmän hyötyjä kuin haittoja, mutta on yleisesti hyväksyttyä, että kustannukset kokonaisuudessaan ovat aggregaattitasolla negatiiviset, kun lämpeneminen voimistuu (Tol 2018; Nordhaus 2013, 140-141).¹

IPCC:n mukaan ilmastonmuutoksen kustannukset 2°C asteen lämpenemiselle ovat suuremmat kuin 1.5°C lämpenemiselle. Taloudellisia

¹ Pienellä lämpenemisellä viitataan esim. 1 asteen lämpenemiseen, joka on jo tapahtunut.

kustannuksia aiheutuu muun muassa merenpinnan kohoamisesta ja siitä seuraavista ongelmista ihmisen toiminnalle. Lisäksi ilmastonmuutos aiheuttaa merkittäviä haasteita esimerkiksi ruuan tuotannolle vähentäen useiden tärkeiden viljelykasvien satoja, millä on vaikutusta erityisesti jo huonosta ruokaturvasta kärsivillä alueilla. (IPCC 2018, 8). Herkkyys ilmastonlämpenemisen aiheuttaville haitoille vaihtelee ekosysteemeittäin ja talouden toimialoittain riippuen esimerkiksi sopeutumismahdollisuuksista. Herkimpiä riskeille ovat korallit ja niihin perustuvat elinkeinot ja eläinlajit. Toisaalta ihmisen toiminnasta riippuvat elinkeinot, kuten turismi, voivat mukautua helpommin lämpenemisen aiheuttamiin uhkiin (IPCC 2018, 11).

Ilmastonmuutoksen vaikutuksiin liittyy merkittäviä epävarmuuksia ja siten myös vahingot ovat epävarmoja. Mitä pidemmälle tulevaisuuteen ennustetaan, sitä epävarmemmiksi ennusteet muuttuvat. Vahinkojen ja potentiaalisten vahinkojen ehkäisy vaatii merkittäviä ja nopeita toimia. (IPCC 2018).

2.2 Ilmastonmuutoksen taloustiede

Taloustieteen näkökulmasta ilmastonmuutos nähdään usein esimerkkinä erityisen vakavasta markkinahäiriöstä.² Markkinahäiriö viittaa tilanteeseen, jossa markkinavaihdanta ei tuota tehokasta lopputulosta ja tilannetta voidaan mahdollisesti parantaa interventiolla markkinoille (Stern 2007). Markkinat eivät ehkäise ilmastonmuutosta riittävästi tai tasapainottele saastuttamisen haittoja hyötyjen kanssa, koska saastuttamiselle ei itsessään ole hintaa eikä hintamekanismi näin tuota kannustetta saastuttajille hillitä päästöjä. Näissä tilanteissa markkinamekanismi ei tuota tehokkuuden näkökulmasta toivottavaa tilannetta, koska kaikkia vahinkoja ei huomioda transaktioissa: esimerkiksi suomalainen auton ostaja ei huomio kenialaiselle viljelijälle koituvaa riskiä aavikoitumisesta tehdessään kauppaa autoliikkeen kanssa. Lyhyesti sanottuna, saastuttaminen aiheuttaa ulkoisvaikutuksen transaktion ulkopuolisille.

Markkinahäiriön korjaamiseksi voidaan esittää kaksi päävaihtoehtoa. Ensinnäkin omistusoikeudet voidaan määritellä tavalla, joka mahdollistaa saastuttajien ja saastuttamisesta kärsivien väliset sopimukset, joilla saastuttamisen hyväksyttävästä tasosta voidaan sopia molempia tyydyttävällä tavalla (Coase 1960). Ilmastonmuutoksen yhteydessä tämä voisi tarkoittaa tilannetta, jossa kenialainen viljelijä voi myydä päästöoikeuden suomalaiselle autoilijalle hinnalla, joka kompensoi lisäpäästöjen aiheuttamasta aavikoitumisriskistä. Tällöin aiemmasta ulkoisvaikutuksesta tulee kaupankäynnin väline ja se sisällytetään hintoihin kaikkia osapuolia tyydyttävällä tavalla.

Käytännössä yksityiskohtaisen omistusoikeuksien määrittelyminen ilmastonmuutoksen suhteen on hankalaa, eikä minkään yksittäisen vahingon

² Stern (2007) kuvaa ilmastonmuutosta historian suurimmaksi markkinahäiriöksi.

aiheuttajia voida jäljittää. Toinen tapa on kolmannen osapuolen interventio markkinoille. Keskeisiä tämän lähestymistavan esimerkkejä ovat hiiliverot ja päästökauppa. Hiiliveron ajatus on verottaa päästöjä niiden aiheuttamien vahinkojen verran ja näin korjata markkinahäiriö. Päästökaupassa päästöille asetetaan maksimi, jonka lisäksi maksimin rajoissa päästöoikeuksia myydään tai annetaan saastuttajille, kuten yrityksille. Päästöoikeuksien omistajilla on mahdollisuus myydä päästöoikeuksia niitä tarvitseville. Näin päästöt suuntautuvat sektoreille, joissa saastuttavan toiminnan ajatellaan ylittävän saastutuksen haitat ja toisaalta päästöjä vähennetään enemmän sektoreilta, joissa päästöjä on kustannustehokasta vähentää. (Nordhaus 2008, 11-12). Molemmat tavat korjata markkinahäiriö ovat jo käytössä. Esimerkiksi Kioton pöytäkirjan mukaiset tavoitteet päästöjen vähentämiseksi perustuvat päästökaupalle ja monissa maissa on käytössä jonkin tyyppinen hiilivero (Carbon Tax Center 2020).

Vaihtoehtoinen ja täydentävä tapa puuttua ilmastonmuutokseen on kiellot ja sääntelyt, jotka eivät perustu markkinaperusteisiin ratkaisuihin toisin kuin hiilivero ja päästökauppa. Näitä ns. *command and control* -keinoja on perusteltu ilmastonmuutoksen torjunnan kiireydellä, vaikka näitä keinoja pidetään usein lähtökohtaisesti kalliimpana tapana vähentää päästöjä (Dietz ym. 2018). Myös ilmastonmuokkausta on ehdotettu kustannustehokkaana tapana vastata ilmastonmuutokseen. Esimerkki ilmastonmuokkauksesta on vähentää maahan tulevan säteilyn määrää levittämällä ilmakehään säteilyä heijastavia pienhiukkasia (IPCC 2018, 350). Tämän strategian rajoitteita ovat kuitenkin epävarmuus toimenpiteiden toimivuudesta ja mahdollisista odottamattomista seurauksista. Lisäksi ilmastonmuokkaus ei vaikuta kasvihuonepäästöjen aiheuttamiin muihin ongelmiin kuten merien happamoitumiseen (IPCC 2018, 12-13).

3 ILMASTONMUUTOKSEN TALOUDELLINEN MALLINTAMINEN

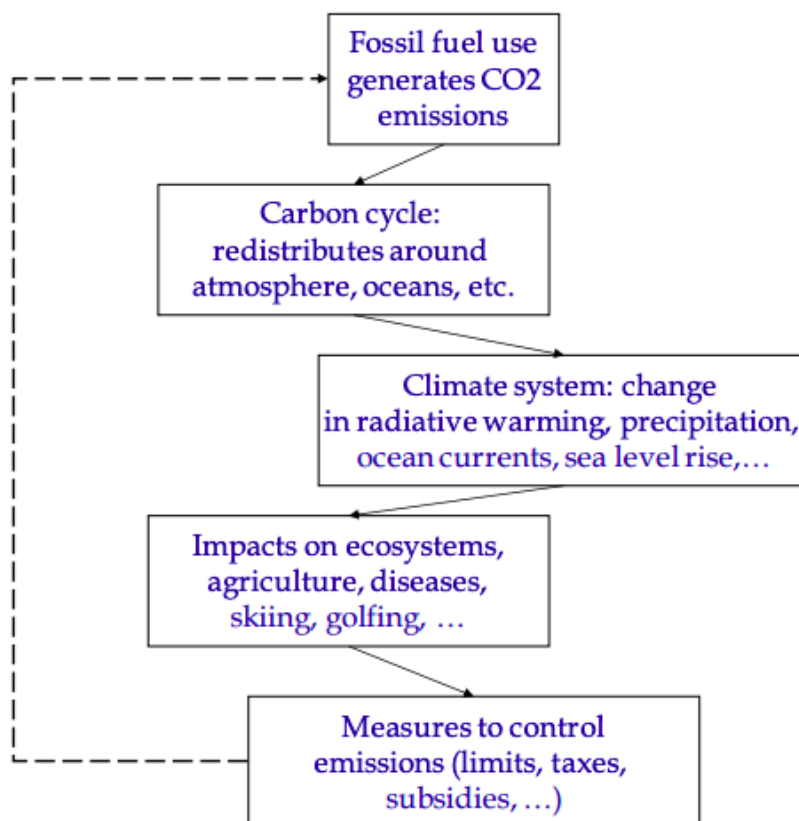
Ilmastonmuutoksen kustannuksia ja vaikutuksia pyritään estimoimaan ekonometrisilla malleilla. Näissä malleissa talousteoriaa yhdistetään ilmastotieteelliseen tietoon ja luodaan näin ennusteita ilmastonmuutoksen taloudellisista vaikutuksista ja optimaalisesta ilmastopolitiikasta. Näitä malleja kutsutaan usein IA-malleiksi (*integrated assesment models*). Mallit voidaan jakaa niiden tarkoituksen perusteella malleihin, joiden on tarkoitus suositella optimaalista ilmastopolitiikkaa jonkin hyvinvointifunktion perusteella ja malleihin, joilla ennustetaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia talouteen (Nordhaus & Sztorc 2013, 5). Tässä tutkielmassa keskitytään Willam Nordhausin kehittämään DICE-malliin. Mallia käytetään useimmiten optimaalisen ilmastopolitiikan tutkimiseen.

Mallien hyödyllisyys perustuu niiden antamaan analyttiseen viitekehykseen, jossa ilmastopolitiikka voidaan arvioida. Tässä osiossa esitellään DICE-malli, jota käytetään tutkimusosiossa. Lisäksi lyhyesti esitellään PAGE ja FUND mallit, joihin DICE-mallia usein verrataan. Mallien jälkeen paneudutaan malleja koskeviin keskeisiin kysymyksiin kuten vahinkojen mittaamiseen, vahinkojen vertailuun ajassa, eli diskonttotehtävän valintaan, ja epävarmuuden merkitykseen IA-kirjallisuudessa ja ilmastonmuutoksessa yleisesti. Kappaleen lopuksi arvioidaan IA-mallien heikkouksia ja roolia ilmastopolitiikassa keskustellen samalla vaihtoehtoisista tavoista lähestyä ilmastonmuutoksen asettamia haasteita.

3.1 IA-mallit

3.1.1 DICE-malli

DICE-malli (*dynamic integrated model of climate and economy*) on IA-malli, jota on kehitetty 1990-luvulta lähtien ja josta on julkaistu useita versioita. Viimeisin merkittäviä muutoksia sisältävä mallin versio on vuodelta 2016.



KUVIO 1 Ilmastonmuutoksen vaikutusten kiertokultu. IA-mallit pyrkivät selvittämään ilmastonmuutoksen optimaalista rajoittamista ilmasto- ja taloustieteen pohjalta Lähde: Nordhaus & Sztorc (2013)

Kuviossa 1 on kuvattu yksinkertaistettu kiertokuvio ilmastonmuutoksen ongelmasta, joka havainnollistaa DICE-mallin lähestymistapaa. Alussa ihmisen toiminnan johdosta syntyy päästöjä, jotka vaikuttavat ilmaston dynamiikan mukaisesti maan lämpötilaan, joka osaltaan aiheuttaa kustannuksia taloudelle ja ekosysteemeille. Näiltä kustannuksilta taas voidaan suojautua pyrkimyksillä rajoittaa päästöjä. DICE-mallissa päästöjen vähentäminen tapahtuu uusklassisen kasvuteoria kehikossa. Ajatuksena on, että taloudessa voidaan tehdä investointeja ilmastopolitiikkaan, jotta tulevaisuudessa saavutetaan suurempi hyvinvoinnin taso vältettyjen vahinkojen johdosta. Mallissa ilmastonmuutosta ajatellaan erityisesti tulevaisuudessa materialisoituvana kustannuksena, joka vähentää yhteiskunnan kulutusmahdollisuuksia ja siten

hyvinvointia, koska hyvinvointi käsitetään kulutusmahdollisuuksien kautta.³ Näistä lähtökohdista voidaan kysyä, miten paljosta muiden asioiden kulutuksesta kannattaa nyt luopua ja käyttää ilmastonmuutoksen torjuntaan, jotta hyvinvointi maksimoituu? DICE-malli pyrkii vastamaan tähän kysymykseen globaalista näkökulmasta.

Yhteiskunnan maksimoitava hyvinvointifunktio on DICE:n kannalta oleellinen, koska sen avulla arvioidaan optimaalista ilmastopolitiikkaa. Hyvinvointifunktio saa seuraavan muodon:

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

Yhtälössä (1) $c(t)$ kuvaa *per capita* kulutusta, $L(t)$ kuvaa ihmisten määrää ja näiden työpanosta. Kulutusten ja työpanosten arvoa vertaillaan ajassa diskonttotehtäjä $R(t)$. Yhtälössä (1) hyöty U määritellään tarkemmin yhtälön (2) avulla:

$$U[c(t), L(t)] = L(t)[c(t)^{1-a} / (1-a)] \quad (2)$$

Yhtälöstä (2) huomataan kuinka väestön kokoa kuvaava parametri $L(t)$ kertoo kulutusta kuvaavan parametrin $[c(t)^{1-a} / (1-a)]$. Näin DICE-mallin hyvinvointifunktio painottaa eri kulutusmahdollisuuksiin johtavia politiikkatoimia sen perusteella, kuinka suuren ihmisjoukon kulutusmahdollisuuksiin se vaikuttaa. Yhtälössä (2) a kuvaa kulutuksen marginaalihuudyn joustoa, jonka perusteella eri kulutusmahdollisuuksien arvoa vertaillaan. Esimerkiksi, jos $a=0$, niin rikkaiden ja köyhien lisäkulutuksesta saamaa hyötyä pidetään yhtä suurena. Toisaalta jos a on korkea, ajatellaan kulutuksen marginaalihuudyn olevan voimakkaasti laskeva.⁴

Yhtälössä (1) diskonttotehtäjä $R(t)$ saa muodon:

$$R(t) = (1 + p)^{-t} \quad (3)$$

Yhtälössä (3) p kuvaa puhdasta aikapreferenssiä, jolla tulevaisuuden ihmisten hyvinvointia voidaan diskontata. Jos p on positiivinen, kauempana tulevaisuudessa ($-t$) elävien ihmisten kulutuksesta saamaa hyvinvointia pidetään vähemmän arvokkaana.⁵

Hyvinvointifunktio on konkaavi kuvastaen kulutuksen alenevaa marginaalihuudyä. Koska tulotason oletetaan nousevan tulevaisuudessa ja koska hyvinvointifunktio on konkaavi, mallin näkökulmasta nykyisen sukupolven tulee tehdä vähemmän sopeutustoimia kuin jos tulotaso ei nousisi, koska ilmastonmuutoksen vahingot aiheutuvat rikkaammille sukupolville, joilla on enemmän varoja sopeutua lämpenemisen aiheuttamiin haittoihin.

³ Kulutus käsitetään laajasti taloustieteelle tyypillisesti sisältäen myös ei-markkinapohjaiset hyödykkeet Nordhaus & Sztorc (2013).

⁴ Ks. osio 3.3.1.2.

⁵ Ks. osio 3.3.1.1.

DICE-mallin diskonttoteikijän $R(t)$ kalibroidaan havaittujen markkinakorkojen ja ihmisten käyttäytymisen avulla (Nordhaus & Sztorc 2013, 6). Näin sen oletukset edustavat positiivista, mahdollisimman arvovapaata, lähestymistapaa näiden parametrien valintaan.⁶ DICE on kalibroitu 5% diskonttoteikijälle lähivuosisikymmenille, joka laskee 4.5% pitkällä aikavälillä (Nordhaus & Sztorc 2013 38). Mallin korko perustuu marginaalihyödyn joustolle $\eta=1.45$ ja aikapreferenssille $\delta=1.5$, jotka tuottavuus ja tulokasvun kanssa antavat yllä esitetyt diskonttoteikijän.

Koska ilmastonmuutos on satojen vuosien aikavälillä tapahtuva ilmiö, on DICE-mallin taustalla oletukset myös pitkän aikavälin oletuksia talouden dynamiikasta. Mallin oletukset perustuvat IMF:n ja YK:n oletuksille tulevaisuuden talouden tuotannosta ja väestön koosta. Pitkän aikavälin ennustamiseen tarvittavat oletukset ovat luonnollisesti erityisen epävarmoja ja perustuvat niukalle todistusaineistolle (Nordhaus & Sztorc 2013, 8). Tulevan talouskasvun oletus on kuitenkin mallin kannalta keskeinen, koska se osaltaan määrittää tulevaisuudessa vallitsevan kulutustason, joka taas määrittää hyvinvoinnin.

Mallin sisältämän ilmastotieteen kannalta keskeistä on hiilenkiertokulku. Hiilen kiertokululla tarkoitetaan sitä, miten hiiltä on sitoutunut meriin, maaperään ja eläimiin ja millä tapaa hiili kiertää sitoutumalla ja vapautumalla näiden välillä suhteessa ilmakehään. Hiilen sitoutuminen on keskeistä lämpenemisen kannalta, koska sitoutuminen vähentää ilmakehässä olevia päästöpitaisuuksia. Päästöjen sitoutuminen, päästöjen kasvu ja exogeeniset tekijät kuten auringon säteily yhdessä määrittävät maapallon lämpenemisen (Nordhaus & Sztorc 2013). Tämä lämpeneminen taas määrittää taloudellisten oletusten kanssa ilmastonmuutoksesta aiheutuvat vahingot.

DICE-malli on aggregoitu malli, jonka on tarkoitus kuvastaa koko maailmaa. Mallista on kuitenkin aluekohtaisempi RICE-malli (*Regional dynamic integrated model of climate and economy*), jolla voidaan tarkastella paikallisemmin ilmastopolitiikan suunnittelua. (Nordhaus 2008, 32-32)

3.1.2 Muut keskeiset IA-mallit

DICE-mallin keskeisiä kilpailijoita ovat PAGE ja FUND, joihin DICE-mallia usein verrataan. Tutkielman tutkimusosiossa hyödynnetään näiden mallien vahinkofunktioita, joten on mielekästä käsitellä malleja lyhyesti.

3.1.2.1 PAGE

PAGE-malli korostaa enemmän epävarmuutta kuin DICE. Malli perustuu Monte Carlo -simulaatioille, jotka on kalibroitu ilmastotieteen tulosten perusteella. Malli tuottaa siten tuhansia simuloituja tuloksia valiten keskeiset parametrit satunnaisesti malliin syötettyjen arvojen vaihteluvälien sisältä. PAGE-mallia käyttää muun muassa Stern (2007), joka perustelee mallin valintaa sen sensitiivisyydellä epävarmuudelle. Mallissa on kuitenkin samoja rajoitteita

⁶ Aihetta käsitellään enemmän osiossa 3.3.

kuten DICE-mallissa, koska se perustuu pitkän aikavälin ennustamiseen, joka välttämättä perustuu niukkaan tietoon. (Stern 2007, 153). Tutkielman käyttötarkoituksen kannalta on kuitenkin useampi syy tutkia DICE-mallia enemmän kuin PAGE-mallia. DICE on yleisimmin käytetty IA-malli ja siten sen tuloksilla on erityisen suuri merkitys. Toiseksi PAGE-mallia ei ole päivitetty sitten vuoden 2009 (Hope 2011), joten sen ajantasaisuus mallina on oletettavasti DICE:ä heikompi.

3.1.2.2 FUND

Richard Tol on aktiivisesti kehittänyt FUND-mallia, jonka uusin versio on vuodelta 2014 (Pizer ym. 2014). FUND-malli eroaa DICE-mallista erityisesti siten, että se tutkii erityisesti ilmastonmuutoksen vaikutusta alueellisesti ja talouden sektoreittain (Pizer ym. 2014). Mallissa maapallo jaetaan 16 eri alueeseen, joihin ilmastonmuutoksen vaikutuksia tutkitaan. Tällä tapaa se muistuttaa enemmän RICE-mallia kuin DICE-mallia. Kuten PAGE, FUND hyödyntää Monte Carlo -simulaatiota eri skenaarioiden simuloinnille. Monissa tutkimuksissa on havaittu, että FUND tuottaa alempia arvioita ilmastonmuutoksen kustannuksista kuin DICE tai PAGE (esim. Weyant 2017; tämä tutkielma). Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että mallissa oletetaan, että ihmiset pystyvät muun muassa nousevien tulojen kautta sopeutumaan paremmin ilmastonmuutoksen asettamiin haasteisiin ja koska malli on joskus nähty olevan vähemmän sensitiivinen ilmastonmuutoksen katastrofaalisille riskeille, jotka vaikuttavat merkittävästi kustannusarvioihin (Weyant 2017). Näistä tekijöistä johtuen FUND:in vahinkofunktio ennustaa pienempiä vahinkoja lämpenemisestä kuin esim. DICE ja PAGE. Tässä tutkielmassa syyt keskittyä DICE-malliin ovat lähinnä käytännönläheisiä: suurempi tunnettavuus ja helposti saatavilla oleva ja ymmärrettävä mallin dokumentointi.

3.2 Ilmastonmuutoksen kustannukset

Ilmastonmuutoksen kustannukset viittaavat lämpenemisen aiheuttamiin vahinkoihin, jotka aiheutuvat esimerkiksi sään äärioloista ja meren pinnan noususta. Nordhaus ja Sztorc (2013) jaottelevat vahingot kätevästi markkinapohjaisiin ja ei-markkinapohjaisiin kustannuksiin. Ensimmäisellä tarkoitetaan kustannuksia, joita voidaan helposti mitata rahassa, koska näille hyödykkeille on markkinat, joiden hintoja voidaan havainnoida. Esimerkiksi ilmastonmuutoksen seurauksena pienenevät viljasadot voidaan mitata rahassa helposti markkinahintojen avulla. Jos esimerkiksi ilmastonmuutos vähentää viljasatoja miljoonalla tonnilla vuodessa ja viljakilon markkinahinta on 0.5€, on ilmastonmuutoksen markkinakustannukset viljantuotannolle siten 500 miljoonaa euroa vuodessa.

Ei-markkinapohjaisia hyödykkeitä on vaikeampi arvottaa ja tätä puolta ilmastonmuutoksen vahingoista pidetään usein suurena epävarmuuden lähteenä kustannuslaskelmissa (Nordhaus 2013, 133). Esimerkiksi

ihmishengelle asetettu hinta tai biodiversiteetille laskettu hinta eivät määrydy markkinoilla. Siten näille aiheutuville vahingoille on vaikeampi asettaa hintaa, mutta ne myös vaikuttavat edellyttävän enemmän eettistä kannanottoa näiden vahinkojen arvosta. (Stern 2007, 145).

Esimerkkinä tarpeesta ottaa kantaa eettisiin kysymyksiin voidaan ajatella realistinen tilanne, jossa satojen miljoonien länsimaalaisten päästöt aiheuttavat alavien saarivaltioiden asukkaiden kotien tuhoutumisen ja joidenkin ihmisten kuoleman hirmumyrskyjen takia. Tätä ongelmaa voidaan lähestyä monesta erilaisesta normatiivisesta näkökulmasta. Utilitaristinen näkökulma voisi vain pyrkiä arvioimaan ihmisille koituvan haitan, esimerkiksi ihmisten havaittujen riskipreferenssien mukaan lasketun elämän arvon, ja vertaamalla tätä saastuttajien saamaan hyötyyn. Tämä lähestymistapa vaikuttaa olevan monien IA-mallien mallien taustalla. Esimerkiksi FUND sisältää arviot ihmiselämän arvosta, joka on asetettu 200 kertaiseksi maan *per capita* tuloihin verrattuna (Anthoff & Tol 2013, 518).

Tämä lähestymistapa on perusteltu, jos saarivaltioiden asukkailla ei ole mitään tiukkaa oikeutta omaan omaisuuteen, tai elämäänsä, jotka voidaan sivuuttaa, jos tarpeeksi moni hyötyy näiden oikeuksien rikkomisesta. Ajatukset vahinkojen oikeutetusta vahingoittamisesta vaihtelevat merkittävästi eri normatiivisten teorioiden välillä. Utilitarismiin verrattuna eräät yksilönoikeuksia painottavat normatiiviset lähestymistavat, kuten libertarismi, pitävät vahinkojen aiheuttamista muille kestäättömänä, huolimatta kollektiivisesta hyödystä (Swolinski 2014). Onhan tilanteita, joissa vain estämme ihmisten muille aiheutuvat vahingot emmekä pyri painottamaan vahingon aiheuttajan ja vahingon kärsiän samaa hyötyä. Kukaan tuskin esimerkiksi ajattelee, että rattijuoppous voi olla hyväksyttävää vain, jos rattijuoppo itse saa paljon hyötyä humalassa ajamisesta, vaikka tämä tulee muiden hyvinvoinnin kustannuksella. Ehkä ilmastonmuutostakin tulisi ajatella vahvemmin ihmisten oikeuksien ja velvollisuuksien kautta, eikä kustannus-hyöty -mielessä. Toisaalta kaikki ihmisen toiminta aiheuttaa riskejä ja vahinkoja muille. Ei ole siis selvää, pitäisikö esimerkiksi ilmastonmuutoksen haittoja ajatella vain utilitaristisesta näkökulmasta vai oikeuksien näkökulmasta. Kysymys on merkittävä, koska jos utilitaristinen näkökulma ei ole kestävä, monien IA-mallien tausta-ajatus vahinkojen aggregoinnissa voi olla pahasti virheellinen. IA-mallien kirjallisuudessa näihin ongelmaan ei ole kiinnitetty riittävästi huomiota.

Eettisestä hankaluudesta huolimatta ympäristötaloustieteessä on pyritty saamaan rahaksi muutettuja arvioita ei-markkinapohjaisten hyödykkeiden arvosta. Yksi tapa arvottaa näitä vahinkoja on ehdollisen arvostuksen lähestymistapa. Ajatuksena on, että monien ei-markkinapohjaisten hyödykkeiden arvoa voidaan arvioida kysymällä ihmisiltä, miten paljon he ovat valmiita maksamaan, että nämä hyödykkeet ovat jatkossakin saatavilla. Esimerkkinä voi olla halukkuus maksaa siitä, että jääkarhut eivät kuole sukupuuttoon. (Nordhaus 2013, 130). Ehdollinen arvottaminen on kuitenkin kiistanalainen lähestymistapa. Usein ei ole selvää, miten hyvin ihmiset

ymmärtävät kysymyksen asetelut tai heijastaako halukkuus maksaa todellista halukkuutta, jos arvostuksen perusteella määritelty hinta tulisi todella maksaa. Tutkimuksissa on muun muassa havaittu yllättävän suurta halukkuutta maksaa monien ei-markkinapohjaisten hyödykkeiden osalta, mikä osaltaan herättää kysymyksen tämän metodin soveltuvuudesta (Nordhaus 2013, 131-132).

Ehdollista arvottamista voidaan soveltaa myös ihmiselämien arvottamiseen. Tällöin puhutaan tilastollisen elämän arvosta (TEA). Ihmisiltä voidaan esimerkiksi kysyä, miten paljon he olisivat valmiita maksamaan tietyn kuoleman riskin välttämiseksi ja tästä voidaan laskea ihmisten implisiittinen elämälleen antama arvo rahassa. Jos esimerkiksi ihminen on valmis maksamaan 5 euroa yhden miljoonasta kuolemanriskin välttämiseksi, tulee TEA:n arvoksi 5 miljoonaa euroa (Cropper, Hammitt & Robinson 2011, 3). Toisaalta TEA:ta voidaan tutkia epäsuorasti ihmisten paljastettujen preferenssien kautta tutkimalla, minkälaisia kompromisseja rahan ja riskin välillä ihmiset todellisuudessa tekevät esimerkiksi riskipitoisten ammattien kanssa (Cropper, Hammitt & Robinson 2011, 5). Tämän lähestymistavan etu on, että se vastaa ihmisten todellista käyttäytymistä, eikä siten kärsi samoista ongelmista, joita ehdollisessa arvottamisessa on.

IA-mallit ottavat ei-markkinapohjaiset vahingot eri tavoin huomioon. DICE-mallissa on päädytty arvioimaan näitä vahinkoja yksinkertaisesti lisäämällä vahinkoarvioon 25%. Tämän valinnan taustalla ei kuitenkaan ole mitään ilmeisen vahvaa perustetta, jonka Nordhaus myöntää (Nordhaus & Sztorc 2013, 11). Ylipäätään kaikkien vahinkojen aggregointi yhdeksi luvuksi on nähty yhtenä heikkoutena mallissa.⁷ Nordhaus (2018) tunnustaa ongelman puolustaen aggregointia käytännöllisenä, vaikkakin mahdollisesti virheellisenä, menetelmävalintana: on parempi sisällyttää jokin arvio kuin ei mitään. Tämä perustelu on vakuuttava niin kauan kuin ilmastonmuutoksen ongelmaa lähestytään IA-mallien kustannus-hyöty -näkökulmasta, joka voidaan nähdä kuvastavan yllä eriteltyä utilitaristista näkökulmaa.

Malleihin sisällytettyjen kustannusten lisäksi ilmastonmuutokseen liittyy merkittäviä mahdollisia vahinkoja, joita mallit eivät huomioi. Yksi tärkeimmistä on ilmastonmuutoksen dynaamiset vaikutukset eli vaikutukset talouskasvuun ja kykyyn kehittää ihmisten elintasoja. Dynaamisten vaikutusten huomioiminen on ollut eräs merkittävä kritiikin kohde IA-mallien suhteen (esim. Revesz ym. 2014). Dynaamisten vaikutusten arviointi on hankalaa eikä vaikutuksista ole yksimielisyyttä (Tol 2018).⁸ Dynaamisten vaikutusten lisäksi ilmastonmuutoksesta aiheutuu runsaasti pieniä kustannuksia, joita mallit eivät ota huomioon. Näihin voivat lukeutua esimerkiksi lämpötilamuutoksien vaikutus ihmisten vaatetustarpeisiin ja vaikutukset talviurheiluun (Nordhaus 2013, 143). Vaikka nämä yksittäiset vaikutukset ovat usein pieniä, saattavat ne

⁷ Stern (2007) keskustelee samasta ongelmasta DICE-mallista riippumatta suosien lähestymistapaa, joka erottelee eri vahingot paremmin ja joka pyrkii olemaan sensitiivinen aggregoinnin ongelmiin.

⁸ Dynaamisia vaikutuksiin palataan tutkielman tutkimusosiossa, jossa Burke ym. (2015a) perusteella muodostettu vahinkofunktio edustaa tutkimusta, jossa on keskitytty dynaamisiin vaikutuksiin, jotka on arvioitu suuriksi.

kokonaisuudessaan olla merkittävä kustannusten lähde. Ennakoitavissa olevien kustannusten lisäksi ilmastonmuutokseen liittyy tuntemattomia riskejä, joita ei voitaisi tiedon puutteen johdosta edes periaatteessa sisällyttää malleihin.

3.3 Diskonttaus

Diskonttauksella viitataan kulujen ja tulojen arvon vertailuun ajassa ja se on siten olennainen aihe ilmastonmuutoksen kustannuksista keskusteltaessa. Diskonttotekijällä tarkoitetaan korkoa, jolla rahamääräistä kulua tai tuloa voidaan vertailla ajassa. Yksityisten investointien diskonttaus on tarpeellista, koska muuten varojen vaihtoehtokustannusta ei huomioida. Esimerkiksi ajatellaan talous, jossa on yksi 6% korko, jolla kaikki voivat aina lainata riskittömästi. Tässä taloudessa kaikkien muiden yksityisten investointien tulisi tuottaa vähintään 6%, koska alemmilla tuotoilla varat voisi vain sijoittaa vallitsevalla 6% korolla ja saada korkeamman tuoton. Näin myös nettonykyarvolla vertailtavien sijoitusten diskonttotekijäksi muodostuu 6%. Tätä samaa tausta-ajatusta käytetään usein myös julkisten hankkeiden kannattavuuden vertailuun ajassa, jolloin tarkoitus on selvittää yhteiskunnan diskonttotekijä julkisten hankkeiden arviointiin.

On kuitenkin epävarmaa, miten järkevistä yksityisten investointien päätöksenteosta voidaan soveltaa julkisiin investointeihin kuten ilmastonmuutoksen torjuntaan. Yhteiskunnan diskonttotekijän määrittämistä voidaan lähestyä deskriptiivisesti ja normatiivisesta näkökulmasta. Deskriptiivinen näkökulmaseuraa pitkälti yllä selitettyä logiikkaa yhteiskunnallisen diskonttotekijän valintaan perustuen havaittuihin korkoihin ja määrittäen näin myös yhteiskunnallisilta hankkeilta vaaditun tuoton. Tämäntapaista lähestymistapaa on puolustanut muun muassa Nordhaus (2007, 2011). Tämä on myös DICE-mallin taustalla oleva lähestymistapa diskonttaukselle.

Vaihtoehtoinen tapa painottaa diskonttausta normatiivisena kysymyksenä. On esitetty useita syitä sille, miksi yksityistä päätöksentekoa mukaileva tapa ei sovellu julkiseen päätöksentekoon. Koska yhteiskunnallinen päätöksenteko koskee useita sukupolvina eri aikoina ja jakaa toiminnan hyötyjä ja haittoja eri ihmisille eri aikoina epätasaisesti, voisi deskriptiivinen tapa kohdella ihmisiä eri aikoina epäoikeudenmukaisesti aiheuttamalla heille lisävahinkoja vain sen takia, että elävät eri aikoina. Tätä normatiivisia seikkoja painottavaa näkökulmaa on puolustanut esimerkiksi Stern (2007).

Diskonttaamista koskeva debatti on keskeinen kiistakysymys ilmastonmuutoksen taloustieteessä ja sillä on ilmeisiä vaikutuksia myös hiilen sosiaalisiin kustannuslaskelmiin (TAULUKKO 1). Vaikka tässä tutkielmassa keskitytään vahinkofunktion vaikutuksiin hiilen sosiaalisiin kustannuksiin, on diskonttauksen käsitteleminen tärkeää myös DICE-mallin tulosten ja käytettävyyden arvioinnissa. Jos DICE-mallin tulokset riippuvat monelta osin kiistanalaisille oletuksille ja metodologisille valinnoille, vähentää tämä mallin

käytettävyyttä ja tulosten hyväksyttävyyttä niille, jotka eivät allekirjoita oletuksia. Siksi on hedelmällistä käsitellä diskonttausta ja siihen liittyviä kysymyksiä. Seuraavaksi käsitelen diskonttausta Ramseyn säännön kautta, joka on yleinen tapa lähestyä diskonttotekijän valintaa.

TAULUKKO 1 Lähde: Nordhaus (2017)

Diskonttotekijän vaikutus hiilen sosiaalisiin kustannuksiin DICE2016-mallissa

| Korko | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|--------|------|------|------|------|------|
| 2,50 % | 129 | 140 | 152 | 165 | 236 |
| 3 % | 79 | 87 | 96 | 105 | 157 |
| 4 % | 36 | 41 | 46 | 51 | 82 |
| 5 % | 20 | 23 | 26 | 29 | 49 |

3.3.1 Ramseyn sääntö

Ilmastonmuutoksen vastaiset investoinnit vaativat uhrauksia nykyiseltä sukupolvelta, jotta erityisesti tulevaisuudessa eläville ihmisille aiheutuisi vähemmän vahinkoja. Tämä herättää ilmeisen kysymyksen siitä, miten eri sukupolvien välisiä hyötyjä ja haittoja tulisi vertailla. Tyypillisesti hyvinvointitaloustieteessä ongelmaa lähestytään ensin esittämällä yhteiskunnan hyvinvointifunktio, jonka perusteella valintoja voidaan vertailla tavoitteena ollen funktion arvon maksimointi. Tyypillisesti funktio saa utilitaristisen muodon (Gollier 2013):

$$W = u(c_0) + e^{-\delta t} E u(c_t) \quad (4)$$

missä c_0 kuvaa nykyistä (ja nykyisen sukupolven) kulutusta ja c_t on tulevaa kulutusta. U on yhteinen hyvinvointifunktio. Tässä utilitaristisessa kehikossa eri vaihtoehtoja arvioidaan siten, mikä maksimoi (mahdollisesti diskontatun δ) kokonaishyvinvoinnin. Nykysukupolven kannattaa luopua kulutuksesta esimerkiksi ilmastonmuutosta hillitsevien investointien takia, jos tämä johtaa suurempaan ylisukupolviseen hyvinvointiin. Haluamme tietää, miten tässä kontekstissa ylisukupolvisia haittoja hyötyjä käytännössä pitäisi vertailla: miten määritetään diskonttotekijä?

Standardi lähestymistapa tähän kysymykseen on ns. Ramseyn sääntö. Ramseyn sääntö on kaava, jolla diskonttotekijän suuruutta voidaan arvioida kolmen parametrin avulla:

$$r = \delta + \eta g \quad (5)$$

Kaavassa r on diskonttotekijä, jota pyritään selvittämään. Kaavassa g kuvaa yhteiskunnan tulojen kasvua. δ kuvaa yhteiskunnan aikapreferenssiä ja η kulutuksen marginaalihyödyn joustoa eli yhteiskunnan hyötyfunktion konkaaviutta. Intuitiivinen ajatus Ramseyn säännön taustalla on, että yhteiskunnallisten investointien tulee ottaa huomioon mahdollinen yhteiskunnallinen halu kuluttaa nyt eikä myöhemmin (δ) ja ottaa huomioon,

että tulevat sukupolvet todennäköisesti ovat rikkaampia (g) ja siten, jos kulutuksen marginaalihujo on laskeva, heidän lisäkulutuksesta saama hyöty on pienempi (η). Ramsey'n sääntö siis pyrkii määrittämään, miten eri sukupolvien kulutusta pitäisi painottaa, kun nämä seikat otetaan huomioon.

Parametrien η ja δ valintaa pidetään usein arvovalintana, kun taas g on empiirinen kysymys. Parametreja η ja δ on kuitenkin myös pyritty arvioimaan ihmisten oman käyttäytymisen perusteella. Näin voidaankin erottaa kaksi lähestymistapaa parametrien tutkimiseen: normatiivinen ja positiivinen. Seuraavaksi esittelen Ramsey'n säännön keskeiset parametrit ja niiden arvoille annettuja argumentteja niin normatiivisesta kuin positiivisesta näkökulmasta.

3.3.1.1 Puhdas aikapreferenssi δ

Yhteiskunnan aikapreferenssi (δ), kuvaa yhteiskunnan halua painottaa eri ajankohtina elävien ihmisten hyvinvointia eri tavalla. Esimerkiksi, jos parametri on 0, tarkoittaa se, että eri ajankohtina elävien ihmisten hyvinvointia painotetaan lähtökohtaisesti samalla tavalla: se että vahinko tapahtuu tulevaisuudessa ei ole *itsessään* syy painottaa vahinkoja vähemmän.

Aikapreferenssin valinta on kiistanalainen kysymys. Aikapreferenssin asettaminen nolaksi on ollut perinteisesti yleinen näkemys, jota ovat kannattaneet ainakin Ramsey (1928) ja Pigou (1920). Tausta-ajatuksena temporaaliselle neutraaliudelle on, että ajan eri hetkillä olevien ihmisten hyvinvointi on lähtökohtaisesti yhtä arvokasta: miksi sen, että joku on sattunut syntymään nyt eikä sadan vuoden päästä, tulisi vaikuttaa siihen, miten paljon välitämme tämän hyvinvoinnista itsessään? Joskus tämä ajatus neutraaliudesta yhdistetään klassiseen utilitarismiin (Nordhaus 2007; Drupp ym. 2015), jonka mukaan oikea teko tuottaa vaihtoehtoista eniten onnellisuutta kokonaisuudessaan.

Toiset tutkijat kannattavat positiivista aikapreferenssiä ja painottavat, että diskonttotehtäjän tulee olla sopusoinnussa markkinoilla havaittujen korkojen kanssa (Nordhaus 2011). Tästä näkökulmasta Ramsey'n säännön normatiiviset parametrit pitää kalibroida niin, että sääntö vastaa havaittuja markkinakorkoja. Jos markkinoilta voidaan saada esimerkiksi 5% tuotto, on alemman tuottovaatimuksen käyttö tuhlailevaa, koska se ei ota huomioon sijoituksen vaihtoehtoiskustannusta: ilmastonmuutoksen torjunnan sijaan voisimme käyttää osan varoista esimerkiksi koulutukseen, jos siitä saadaan korkeampi tuotto. Näin myös aikapreferenssistä tulisi positiivinen.

3.3.1.2 Kulutuksen marginaalihujoyn jousto η

Parametri η kuvaa kulutuksen marginaalihujoyn joustoja. Usein kirjallisuudessa ajatellaan, että tämä kuvaa sitä, miten paljon arvostetaan sukupolvien ja ihmisten välistä tasa-arvoa (Ulph ja Pearce 1995; Nordhaus 2011). Jos jousto saa alhaisen arvon, arvostetaan rikkaampien ihmisten ja sukupolvien kulutusta lähes yhtä paljon kuin köyhien. Toisaalta suuri arvo johtaa tasa-arvoisempaan tulokseen, jossa rikkaampien ihmisten kulutusta ei arvosteta paljoa köyhempien ihmisten kulutukseen nähden.

Miten suuren arvon η saa voidaan lähestyä normatiivisesta tai positiivisesta näkökulmasta. Normatiivisesta näkökulmasta kysymys on siitä, miten yhteiskunnan tulisi painottaa eri tulotason ihmisten saamien lisävarojen tuomaa hyötyä. Normatiivinen lähestymistapa edellyttää normatiivista teoriaa siitä, miten yhteiskunnan hyötyä tulisi painottaa. Nordhaus (2007) huomauttaa, että näitä teorioita on lukuisia kuten eri eettisten teorioiden kannat kuin myös eri uskontojen kannat.

Kaksi yleisesti hyödynnettyä teoriaa ovat utilitarismi ja John Rawlsin teoria oikeudenmukaisuudesta. Keskityn lyhyesti näihin teorioihin, koska ne havainnollistavat, miten erilaisten normatiivisten valintojen merkittävät vaikutukset parametrien valintaan. Utilitarismin mukaan kaikkien ihmisten hyöty on yhtä arvokasta ja lisätulojen vaikutus on laskeva. Utilitaristisesta näkökulmasta marginaalihyödyn joustoa voidaan arvioida "ajatuskokeilla", joissa ajatellaan, mitä eri joustojen arvot käytännössä tarkoittaisivat hyötyfunktion kannalta. Ulph & Pearce (1995) esittävät laskelmat jouston arvon käytännön vaikutuksista (TAULUKKO 2).

TAULUKKO 2 Jousto-oletuksen vaikutus ryhmien hyödyn painotukseen. Rikkaampi ryhmä on kaksi kertaa varakkaampi kuin köyhempi. Köyhemmän ryhmän hyöty oletettu vakioksi. Tiedot Ulph ja Pearce (1995).

Jousto-oletuksen vaikutus ryhmien hyödyn painotukseen

| | | | | | | | |
|--------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|----------|
| Jousto-oletus (η) | 0,5 | 0,7 | 1 | 1,5 | 2 | 5 | 10 |
| Köyhemmän ryhmän hyöty | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Rikkaamman ryhmän hyöty | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,35 | 0,25 | 0,03 | olematon |

Kuten taulukosta nähdään, jos η on esimerkiksi 1, on kaksi kertaa rikkaamman ryhmän lisätuloille annettu arvo puolet siitä, mitä se on köyhemmälle ryhmälle. Voidaan huomata myös, että jos jousto on suuri, kuten 5, ei rikkaamman ryhmän lisäkulutukselle anneta juuri mitään merkitystä. Ulphin ja Pearcen mukaan tämä on vakuuttava syy olla valitsematta näin suurta jouston arvoa.

Toisaalta Rawlsin teorian eroperiaatteen mukaan yhteiskunnan varojen ja tulojen eriarvoisuuden voi oikeuttaa vain se, että nämä eriarvoisuudet edistävät huonoimmassa asemassa olevien asemaa (Freeman 2019). Tästä näkökulmasta ainut peruste sallia varakkaiden suurempi varallisuustaso on, että se lisää taloudellisia kannusteita tehdä työtä ja näin edistää kaikkien hyvinvointia. Tämän näkemyksen johdosta on esitetty, että Rawlsin teorian näkökulmasta pitäisi olla ääretön (Dasgupta 2008). Dasguptan esittämä argumentti ei kuitenkaan vaikuta huomioivan rikkaamman ryhmän hyödyn painottamista sen työhön motivoivien vaikutusten takia: rikkaampien hyötyä voidaan painottaa, jos se on myös köyhimpien etu.

Deskriptiiviset lähestymistavat jouston arvioimiseen perustuvat tutkimuksiin ihmisten käyttäytymisestä. Yleinen tapa on tutkia ihmisten säästämiskäyttäytymistä ja johtaa tämän käyttäytymisen kanssa

johdonmukaisia jouston arvoja (Ulph & Pearce 1995, 12). Yleisimmät arviot ja näkemykset jouston arvolle kirjallisuudessa ovat välillä 1-4 moodin ollen 2 (Gollier 2013).

3.3.1.3 Tulojen kasvu g

Empiirisenä kysymyksenä tulojen kasvua pyritään arvioimaan muun muassa historian perusteella (esim. Ulph & Pearce 1995). Tämän lähestymistavan ongelma on, että tutkittavan aikavälin valinnalla on suuri vaikutus ennustuksiin. Esimerkiksi Britanniassa kasvu 1885-1992 oli 1.3 %/p.a. mutta 1951-1992 2.2%/p.a. (Ulph & Pearce 1995, 17). Toinen tapa on hyödyntää ekonometrisia malleja ennusteiden tekemiseen. Näihin malleihin lisätään tekijöitä kuten maan koulutustaso tai ikärakenne, jotka vaikuttavat talouskasvuun ja pyritään siten arvioimaan tulevaisuuden tulokehitystä (Cuaresma 2017). Projektiot tulevaisuuden kasvusta ovat luonnollisesti hyvin varovaisia. IPCC (2000) on arvioinut, että vuoteen 2100 mennessä *per capita* tulojen kasvu on 1.3%-2.8% välillä. Tämä vastaa hyvin historiallista kasvua viime vuosisatoina.

3.3.2 Ramseyn säännön rajoitukset

Yksi Ramseyn säännön suurimmista rajoituksista on, että se ei ota huomioon epävarmuutta. Tämä on yksi keskeinen syy, miksi suurin osa asiantuntijoista ei suoraan määritä diskonttoteleijää säännön mukaan (Drupp ym. 2015). Epävarmuuden vaikutus korkoihin on laskeva ja diskonttausta käsittelevässä kirjallisuudessa ajatellaankin nykyään usein, että ajassa laskeva korko on samana pysyvää korkoa perustellumpi tapa vertailla hyötyjä ja haittoja ajassa (Groom 2014). Ajatuksena laskevissa koroissa on, että jos tulevaisuudessa ovat diskonttoteleijät voivat olla esimerkiksi 2% ja 6%, vaikka epävarmuudesta tulojen kasvun suhteen johtuen, tulee tämä sisällyttää malleihin. Tämä epävarmuus otetaan huomioon määrittämällä epävarmuusekvivalentti diskonttoteleijä, joka on mahdollisten korkojen eri ajankohtina saama keskimääräinen implisiittinen diskonttoteleijä. Esimerkiksi, jos diskonttataan 1€ 10 vuotta 2% saadaan nykyarvoksi 0,82€ ja 6% diskonttattuna saadaan 0,56€. Nykyarvojen keskiarvo on 0,69€ ja tähän nykyarvoon päästäisiin suoraan diskonttaamalla 1€ 3,8% korolla, joka on korkojen epävarmuusekvivalentti diskonttoteleijä. Samalla menetelmällä 100 vuoden päästä epävarmuusekvivalentti korko olisi 2,7% ja 400 vuoden kuluttua 2,2%. (Hepburn 2005).

3.4 Vahinkofunktiot, arviot kokonaiskustannuksista ja hiilen sosiaalisista kustannuksista

Ilmastonmuutoksen kustannusten esittämiseen on muutama vakiintunut tapa. Yleisin tapa esittää aggregaattikustannukset on suhteuttaa kustannukset

BKT:hen. Tol (2018) katsauksen perusteella ilmastonmuutoksen seuraavaan sadan vuoden kustannukset kokonaisuudessaan, kun mukaan otetaan epävarmuus, ovat tuskin suuremmat kuin vuosikymmenen menetetty talouskasvu tuloiksi muutettuna.⁹ Suurimman osan tutkimuksista paras arvio ilmastonmuutoksen kustannuksille on kuitenkin tätä merkittävästi pienempi vastaten noin vuoden menetettyä talouskasvua (TAULUKKO 3).

TAULUKKO 3 Arvioita ilmastonmuutoksen kustannuksista %/BKT. Tiedot: Tol (2018)

| Tutkimus | Lämpeneminen (°C) | Kustannukset (% BKT) | | | |
|---|-------------------|----------------------|--------------|--------------|----------------|
| | | Paras arvio | Keskihajonta | Korkea arvio | Alhainen arvio |
| <i>d'Arge 1979</i> | -1.0 | -0.6 | | | |
| <i>Nordhaus 1982</i> | 2.5 | -3.0 | | -12.0 | 5.0 |
| <i>Nordhaus 1991</i> | 3.0 | -1.0 | | | |
| <i>Nordhaus 1994b</i> | 3.0 | -1.3 | | | |
| <i>Nordhaus 1994a</i> | 3.0 | -3.6 | | -21.0 | 0.0 |
| | 6.0 | -6.7 | | | |
| <i>Fankhauser 1995</i> | 2.5 | -1.4 | | | |
| <i>Berz ei päivämäärää</i> | 2.5 | -1.5 | | | |
| <i>Tol 1995</i> | 2.5 | -1.9 | | | |
| <i>Nordhaus and Yang 1996</i> | 2.5 | -1.4 | | | |
| <i>Plambeck and Hope 1996</i> | 2.5 | -2.9 | | -13.1 | -0.5 |
| <i>Mendelsohn et al. 2000</i> | 2.5 | 0.0 | | | |
| | 2.5 | 0.1 | | | |
| <i>Nordhaus and Boyer 2000</i> | 2.5 | -1.5 | | | |
| <i>Tol 2002</i> | 1.0 | 2.3 | 1.0 | | |
| <i>Maddison 2003</i> | 2.5 | 0.0 | | | |
| <i>Rehdanz and Maddison 2005</i> | 0.6 | -0.2 | | | |
| | 1.0 | -0.3 | | | |
| <i>Hope 2006</i> | 2.5 | -1.0 | | -3.0 | 0.0 |
| <i>Nordhaus 2006</i> | 3.0 | -0.9 | 0.1 | | |
| | 3.0 | -1.1 | 0.1 | | |
| <i>Nordhaus 2008</i> | 3.0 | -2.5 | | | |
| <i>Maddison and Rehdanz 2011</i> | 3.2 | -5.1 | | | |
| <i>Bosello et al. 2012</i> | 1.9 | -0.5 | | | |
| <i>Roson and van der Mensbrugghe 2012</i> | 2.9 | -2.1 | | | |
| | 5.4 | -6.1 | | | |
| <i>Nordhaus 2013</i> | 2.9 | -2.0 | | | |

Arviot kokonaiskustannukset ovat keskeisessä asemassa vahinkofunktion muodostamisessa. Vahinkofunktiolla tarkoitetaan tässä tutkielmassa, ja DICE-mallissa, lämpenemisen ja ilmastonmuutoksen aiheuttamien

⁹ Tol (2018) tulokset ovat vain esimerkki vahinkoarvioista, joita käytetään myös tutkimusosiossa vahinkofunktion muodostamiseen. Tutkimusosiossa käsitellään myös muita tuloksia, joiden pohjalta vahinkofunktioita.

aggregaattivahinkojen yhteyttä. Esimerkiksi DICE2016R-mallissa vahinkofunktio saa muodon:¹⁰

$$V(t) = (0.236 \cdot Tat(t)^2) \quad (6)$$

missä Tat viittaa lämpötilaan. Lämpenemisen arvioidut vahingot saadaan sijoittamalla $Tat(t)$ paikalle haluttu lämpeneminen. Esimerkiksi 6°C lämpeneminen esiteolliseen aikaan verrattuna aiheuttaisi DICE:n arvion mukaan n. 8.5% vahingot suhteutettuna BKT:hen.

Toinen keskeinen tapa on määrittää päästöjen aiheuttamat vahingot päästettyä hiilitonnia kohden. Tätä lukua kutsutaan hiilen sosiaalisiksi kustannuksiksi. Analyyttisemmin, HSK:ta kuvaa kaava (Nordhaus 2017):

$$HSK(t) = \frac{\partial W}{\partial E(t)} / \frac{\partial W}{\partial C(t)} \equiv \frac{\partial C(t)}{\partial E(t)} \quad (7)$$

Yhtälössä (5) keskimmäisen termin osoittajassa kuvataan päästöjen marginaalivaikutusta hyvinvointiin ja jakajassa kulutuksen marginaalista vaikutusta hyvinvointiin. Jakamalla osoittaja nimittäjän käänteisluvulla päästään kolmanteen termiin, jossa osoitetaan, että tarkasti määriteltynä HSK kuvaa marginaalisten päästöjen vaikutusta kulutusmahdollisuuksiin aikaan t .

HSK on keskeinen kiistanaihe ilmastotaloustieteessä, koska sen avulla voidaan suunnitella politiikkatoimia hiiliverojen kireydestä. Tällöin hiilivero asetettaisiin vastaamaan HSK:tä ja näin saastuttaminen sallittaisiin vain, jos niiden hyödyt ovat haittoja suuremmat. (Nordhaus 2008, 11-12). Juuri HSK:n soveltuvuus ilmastopolitiikan suunnitteluun tekee siitä kiinnostavan ilmastopolitiikan kannalta. Vahinkofunktio taas kuvaa aggregaattivahinkoja, jota on vaikeampi soveltaa suoraan ilmastopolitiikan soveltamiseen, koska se ei tarjoa suoraan lukua johon, seuraavan, marginaalisen, päästötonnin haitat ja haittoja ehkäisevä ilmastopolitiikan hyödyt voidaan suhteuttaa. Koska talouden koko ja rakenne muuttuvat ajassa, myös HSK muuttuu ajankohdan mukaan.

Arviot hiilen sosiaalisista kustannuksista vaihtelevat merkittävästi. Wang ym. (2018) 578 estimaattiin perustuvassa meta-analyysissä kustannukset vaihtelivat -50\$ ja 8752\$ välillä. Keskimäärin kustannukset arvioitiin olevan n. 200\$. Suuri vaihtelu arvioiden välillä johtuu muun muassa diskonttorosta, vahinkofunktioista ja muista eroista mallien ja kalibrointien välillä. Asiantuntijakyselyssä HSK:n kustannusarvioksi saatiin keskimäärin 291\$ kaikille vastaajille, 173\$ taloustieteilijöille ja 316\$ ilmastotieteilijöille (Pindryck 2016). Tuloksista huomataan, että DICE-malli arvioi ilmastomuutoksen kustannukset selvästi pienemmiksi kuin suurin osa asiantuntijoista. Syitä erolle voi olla esimerkiksi se, että monet tutkijat suosivat alemmaa diskonttoteijää tai eivät ylipäätään perusta arviotaan DICE:n tulosten

¹⁰ (4) vahinkofunktiota on yksinkertaistettu selkeyden vuoksi.

pohjalle. DICE-malliin verrattuna esimerkiksi PAGE-malli tuottaa monte carlo -simulaation avulla keskimääräiseksi HSK:n estimaatiksi noin 100\$ 2010-luvun alussa (Hope 2011).

TAULUKKO 4 Arvioita ja näkemyksiä hiilen sosiaalisista kustannuksista. DICE2016 ja 2013 kuvaavat HSK:ta vuonna 2015.

| Arvioita hiilen sosiaalisista kustannuksista | | |
|--|----------|--------------------|
| Lähde | HSK (\$) | Arvion lähde |
| Pindyck (2016) | 291\$ | Asiantuntijakysely |
| Wang ym. (2018) | 200\$ | Meta-analyysi |
| DICE2016 | 31\$ | IAM |
| DICE2013 | 17\$ | IAM |

3.5 Epävarmuus

Epävarmuus ilmaston lämpenemisen vaikutuksista on diskonttauksen lisäksi merkittävä kysymys ilmastonmuutoksen taloustieteessä. Kirjallisuudessa on perinteisesti ollut tapana erotella epävarmuuden ja riskin käsitteet toisistaan. Epävarmuudella viitataan tilanteeseen, jossa valintojen mahdollisten vaikutusten todennäköisyyksiä ei tunneta. Riskillä taas tarkoitetaan tilannetta, jossa valintojen todennäköisyydet voidaan suurin piirtein selvittää ja valinnat tehdään nämä todennäköisyydet huomioon ottaen (Stern 2007, 34). Esimerkiksi uhkapelaaja, joka voittaa kolikonheitossa klaavalla ja häviää kruunalla, ottaa riskin tunnettujen todennäköisyyksien (50/50) vallitessa. Toisaalta lääkäri, joka yrittää miettiä ennestään tuntemattoman taudin saaneen potilaan selviämismahdollisuuksia on tekemisissä epävarmuuden kanssa. Ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat lähempänä epävarmuutta, koska emme tunne hyvin todennäköisyyksiä ilmastonmuutoksen vaikutuksista tai todennäköisyysjakauman muotoa kuten sitä, miten paksut vaikutusten todellisen todennäköisyysjakauman hännät ovat (Heal & Millner 2014).

Tarve perustaa ilmastopolitiikka muullekin kuin keskimääräisille arvioille tai oletuksille lämpenemisen vaikutuksista on ilmiselvää, kun mietitään muuta toimintaamme epävarmoissa ja riskipitoisissa tilanteissa. Harva esimerkiksi ajattelee, että laivojen on turha sisältää pelastusveneitä, koska niitä ei yleensä tarvita, eikä muita esimerkkejä ole vaikea keksiä. Seuraavaksi käyn läpi, miten epävarmuus aiheuttaa vaikeuksia ilmastonmuutoksen vahinkojen arvioinnille ja miten nämä vaikeudet voivat vaikuttaa ilmastopolitiikkaan.

Keskeinen kysymys epävarmuudesta ilmastonmuutoksen kontekstissa koskee kysymystä siitä, miten paljon ilmasto lämpenee, kun kasvihuonekaasujen määrä ilmakehässä tuplaantuu ja toiseksi, miten suuret vahingot lämpeneminen aiheuttaa. Ilmaston herkkyyttä päästöille kutsutaan usein tasapainoilmaherkkyydeksi ja se on keskeinen ilmaston lämpenemisherkkyyden mittari. Arviot herkkyydestä vaihtelevat suuresti ollen

keskimäärin n. 3 astetta, kun todennäköinen vaihteluväli on IPCC:n mukaan 1.5-4 astetta (Weitzman 2011, 53). Tämä arvio todennäköisestä tasapainoherkkyydestä on pysynyt samana 1970-luvulta lähtien, joten se vaikuttaa luotettavalta. IPCC:n arvioissa ”todennäköinen” on kuitenkin spesifi termi, joka viittaa 66% todennäköisyyteen, että herkkyys on tällä välillä (Weitzman 2011, 53). Todennäköinen arvio jättää siten vielä 34% mahdollisuuden, että herkkyys on tämän jakauman ulkopuolella.

Jos keskimääräinen arvio lämpeneminen on 3 astetta, on aiheellista kysyä, miten suuri vaikutus voisi olla todennäköisyysjakauman hännissä. Weitzman (2011) esittää kaksi vaihtoehtoista jakaumaa, joilla arvioida jakauman häntien herkkyyttä tilanteissa, jotka ovat kaukana aiemmin koetusta ilmastonlämpenemisestä. Ensimmäinen näistä on normaalijakauma, jossa hännät ovat ohuemmat ja toinen on pareto-jakauma, jossa hännät ovat paksummat. Vaikka molempien jakaumien odotusarvo on 3 astetta, niiden häntätapahtumien todennäköisyys radikaalisti erilaiset. Esimerkiksi pareto-jakaumaa käytettäessä todennäköisyys yli 6 asteen lämpenemiselle on yli 10% kun taas normaalijakaumassa se on n. 2,5%. Aiemmat arviot jakauman muodosta ja häntätapahtumien todennäköisyyksistä ovat epävarmoja, mutta eivät sulje pois mahdollisuutta pareto-jakauman implikoimia erittäin suuria herkkyyksiä Weitzman (2011, 278-279). Mikäli ilmaston herkkyys on 3 asteen sijaan 6 astetta, ovat ilmastonmuutoksen kustannuksetkin merkittävästi korkeammat. Häntäpäiden tapahtumien mahdollisuuden kannalta on oleellista, kysyä miten suuret vahingot olisivat esimerkiksi 6°C asteen tilanteessa.¹¹ Tästä ei kuitenkaan ole juuri tutkimusta ja olemassa oleva tutkimus on spekulatiivista. Epävarmuus ja tutkimuksen puute ovat keskeiset syyt, miksi tässä tutkielmassa tarkastellaan myös Weitzman (2010) ehdottamaa vahinkofunktiota, joka ei perustu tutkimuspohjaisiin havaintoihin lämpenemisen ja vahinkojen yhteydestä, vaan teoreettiseen argumenttiin, joka voidaan perustella mahdollisena erityisen huonon tilanteen skenaariona.

3.6 IA-mallien rajoitukset ja vaihtoehdot

Yllä on käsitelty useita keskeisiä ongelmakohtia, joita IA-malleihin liittyy. Näistä mainittiin muuan muassa eettiset ongelmat vahinkojen määrittelyssä ja mittaamisessa, epävarmuus ja mallien tulosten sensitiivisyys mallien parametreille, kuten diskonttotekijälle. Näitä ongelmia käsitellään lisää tutkimusosiossa vahinkofunktion osalta.

IA-malleihin liittyvät ongelmat pakottavat kysymään, miten näihin ongelmiin pitäisi vastata ottaen huomioon, että tarvitsemme ilmastopolitiikan tueksi muun muassa arvion hiilen sosiaalisista kustannuksista. Ilman HSK:ta ilmastopolitiikka on hankala mitoittaa sopivan kireäksi, ettei ilmastopolitiikan

¹¹ Ks. tutkimus-osio.

toimenpiteitä toisaalta aliarvioida, muttei myöskään yliarvioida ja siten tuhlata rajallisia resursseja.

Yksi vaihtoehto on etsiä vaihtoehtoisia tapoja määrittää HSK. Pindyck (2016) esittää IA-mallien vaihtoehdoksi asiantuntijakyselyitä, joilla arvioida esimerkiksi hiilen sosiaalisia kustannuksia. Pindyckin ajatus lienee, että tarpeeksi monen asiantuntijan mielipiteen avulla voidaan saada jonkinlainen konsensus-näkemyks, arvio, jonka pohjalta sivuuttaa IA-mallien tulokset ja mahdollistaa silti keskeisten mittarien käyttö ilmastopolitiikassa.

Pindyckin lähestymistavalle on mahdollista nähdä joitain etuja. Ensinnäkin on mahdollista, että kymmenien yksittäisten epävarmojen asiantuntija-arvioiden kokonaisuus muodostaa kuitenkin perustellun arvion ilmiön todellisesta luonteesta.¹² Ehkä suuren asiantuntijajoukon näkemys voisi toimia totuuden pätevänä mittarina. Tämä argumentti perustuu kuitenkin oletukseen, ettei asiantuntijoilla itsessään ole tiettyyn suuntaan vinoutuneita näkemyksiä esimerkiksi juuri IA-mallien parissa tehdyn tutkimuksen johdosta. Tässä tilanteessa IA-mallien vaikutus olisi silti merkittävä.

Toinen vaihtoehto IA-mallien pohjalta tehdylle ilmastopolitiikalle, ja kustannus-hyöty -analyysille yleisesti, on asettaa tavoite lämpenemiselle, joka ei suoraan perustu IA-malleille. IPCC:n lähestyminen ilmastopolitiikkaan on pitkään perustunut tämän tapaiselle lähestymistavalle lämpenemistavoitteen ollen ensin 2°C ja sittemmin 1.5°C (IPCC 2018). IPCC:n lähestymistapaa perustelee epävarmuus ilmastopolitiikasta: ehkä on parempi asettaa tavoite, johon pyrkii ottaen huomioon IA-mallien ja kustannus-hyöty -analyysin ongelmat sekä ilmastopolitiikkaan liittyvä epävarmuus (IPCC 2018, 76). IPCC:n antamat perusteet kustannus-hyöty -analyysia vastaan ovat kuitenkin suppeat ja itsessään ongelmalliset. Esimerkiksi se, että tavoitellaan tiettyä lämpenemistavoitetta vaikuttaa itsessään implisiittisesti oletettavan, että lämpenemisen haitat ovat tarpeeksi suuria aktiivisen ilmastopolitiikan kustannuksiin verrattuna, että esimerkiksi 1.5°C ilmastopolitiikka on perusteltua. Nordhaus (2018) kuitenkin arvioi, että DICE:ssä lämpötilan rajoittaminen alle 1.5 °C asteeseen ei ole edes mahdollista ja lämpenemisen rajoittaminen 2°C asteeseen vaatisi vuonna 2015 225\$ hiiliveroa per päästötonni. Tästä voidaan huomata, että vaikka lämpenemistavoite ei sisällä eksplisiittistä näkemystä kustannus-hyöty -analyysin mielessä, täytyy sen sisältää implisiittinen arvostus päästöjen haitoille, jota voitaisiin käyttää myös periaatteessa kustannus-hyöty -pohjaisessa IA-mallinnuksessa.

Lopuksi voidaan todeta, että IA-malleille on mahdollisia vaihtoehtoja, mutta nämä vaihtoehdot ovat itsessään myös ongelmallisia. Vaikka IA-malleihin liittyy ongelmia, on niiden tuloksilla käytännön merkitystä, eikä niille vaikuta olevan selvästi parempia vaihtoehtoja. Useat eri lähestymistavat eivät sulje pois toistensa relevanssia ja kykyä nostaa esiin kiinnostavia, joskin kilpailevia, näkökulmia julkiseen ja tieteelliseen keskusteluun.

¹² Klassinen esimerkki on ihmisten arviot härän painosta: vaikka yksittäisen ihmisen arvio on epätarkka, ei kaikkien arvioiden keskiarvon tarvitse olla kaukana härän todellisesta painosta (Galton 1907).

4 DICE-MALLIN VAHINKOFUNKTION ANALYSOINTI

Tässä osiossa tutkitaan DICE-mallin vahinkofunktion vaikutusta mallin antamaan arvioon hiilen sosiaalisista kustannuksista. Tutkimusosiossa on kolme osaan. Ensimmäisessä tarkastellaan HSK:n sensitiivisyyttä DICE:n alkuperäisen vahinkofunktion muutoksille. Tarkoitus on tutkia, miten sensitiivinen HSK on muutoksille vahinkofunktiossa alkuperäisen vahinkofunktion kertoimen lähiarvoilla. Toisessa osassa tarkastellaan kirjallisuudessa esitettyjä muita vahinkofunktioita ja miten DICE:n tulokset HSK:n suhteen muuttuvat, jos DICE-mallissa käytetään vaihtoehtoisia vahinkofunktioita. Kolmannessa osiossa näiden vaihtoehtoisten muodostetaan uusia vahinkofunktioita aiemman kirjallisuuden perusteella. Uudet vahinkofunktiot muodostetaan pienimmän neliösumman menetelmän (PNS) soveltamisella toisessa osiossa esiteltyjen vahinkofunktioiden havaintopisteiksi muutettuun aineistoon.

4.1 Aineisto ja menetelmät

Tutkimuksen pohjana käytetään DICE2016R-mallin sovellusta Matlabissa.¹³ Alkuperäinen DICE-malli perustuu GAMS-koodiin ja siitä on myös Excel-versio. Matlab-sovellus sisältää samat tiedot kuin mallin GAMS tai Excel versiot, mutta ei vaadi hintavaa lisenssiä toisin kuin GAMS ja Excel.

Mallin lisäksi Matlabia ja R-ohjelmistoa on käytetty aineistojen analysoinnissa. Taulukossa 6 on kuvattu tutkimus-osion vahinkofunktiot ja niiden lähteet. Kolmannessa osiossa tehtyjen vahinkofunktioiden muodostamisesta on kerrottu enemmän liitteessä.

¹³ <https://github.com/cmkellett/DICE2013R-mc>

4.2 DICE-mallin vahinkofunktio ja sen sensitiivisyys

Aggregaattikustannusten yhteyttä lämpenemiseen kutsutaan vahinkofunktioksi. Suurin osa kirjallisuudessa esitetystä vahinkofunktioista on konvekseja lämpenemisen haittojen kasvaessa merkittävästi lämpenemisen kasvaessa.¹⁴ DICE-mallin vahinkofunktio on myös konvekseja ja se kuvaa vahinkojen ja lämpenemisen yhteyttä neliöfunktiolla.

$$V(t) = (0.236 \cdot T \Delta t(t)^2) \quad (8)$$

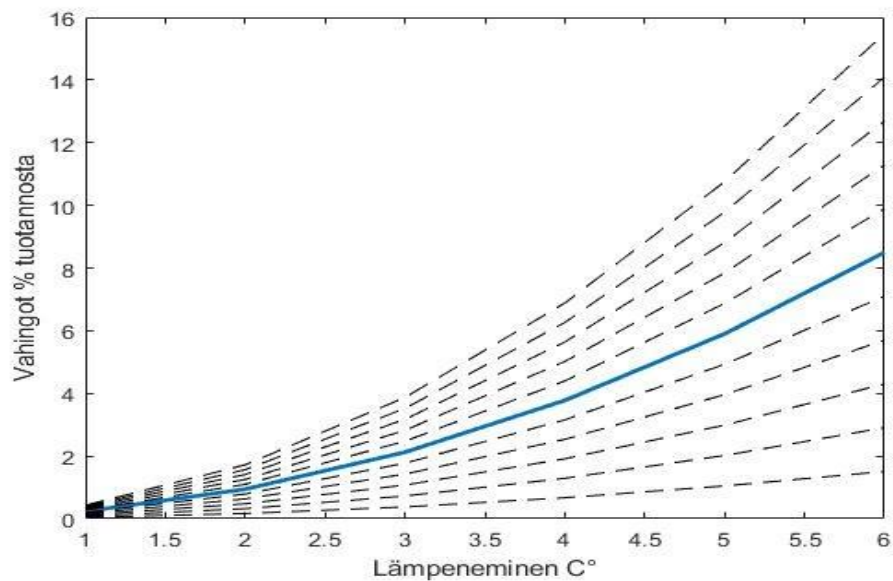
DICE2016-mallin vahinkofunktio on muodostettu 36 tutkimukseen perustuvien itsenäisen vahinkoestimaatin perusteella. Arvioita on painotettu Nordhausin ja Moffatin tekemän subjektiivisen arvion tutkimuksen laadusta perusteella (Nordhaus & Moffat 2017). Vahinkofunktion muoto määritetään näiden arvioiden perusteella siten, mikä funktio vastaa regressioanalyysissä parhaiten havaintoja. Tähän arvioon on lisätty 25% korjaus kuvaamaan vaikeasti arvioitavia ei-markkinapohjaisia vahinkoja. Tämän lisäksi 36 tutkimuksesta on poisjätetty arviot yli 8°C asteen ja alle 2°C asteen lämpenemiselle. Perusteena rajauksille Nordhaus ja Moffat antavat korkean lämpenemisen tutkimusten spekulatiivisuuden ja alhaisten arvioiden vähäisen relevanssin. Näin muodostettu parhaiten aineistoa vastaava regression kerroin on neliöfunktio, jonka kerroin on 0.236. Tällä vahinkofunktiolla ennustettuna ilmastonmuutoksen vahingot ovat 2.1%/BKT 3°C asteen lämpenemiselle ja 8.5%/BKT 6°C asteen lämpenemiselle.

Tässä osiossa vahinkokertoimen vaikutusta HSK:hen tutkitaan tarkastelemalla parametrin muutosten vaikutusta HSK:hen. Lähtökohtana analyysille käytetään arviota kertoimen epävarmuudesta. Nordhaus (2017) arvioi parametrin 0.236 keskihajonnaksi 0.118%. Näiden arvioiden perusteella parametrin 95% havainnoista asettuu välille (0.43011, 0.04189).¹⁵

Kertoimen sensitiivisyyden selvittämiseksi kerrointa muutettiin 10 keskiarvon 0.236 ympärillä niin, että alin ja ylin estimaatti suuntaansa vastaavat 5% ja 95% persentiiliä.

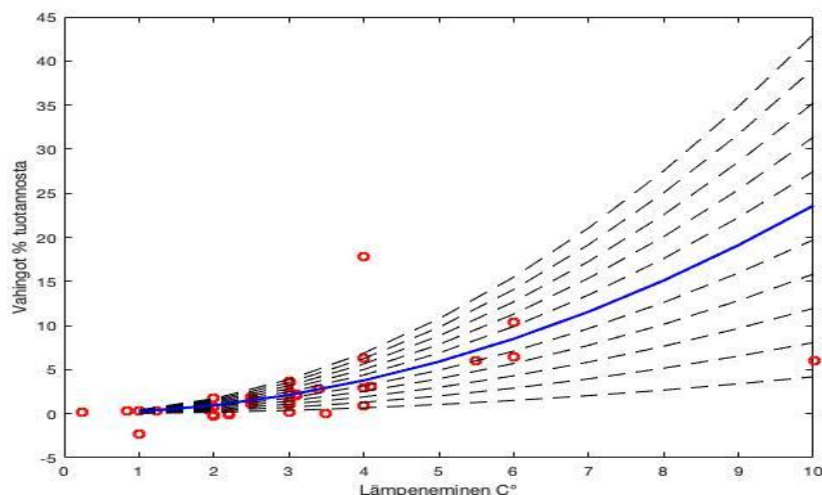
¹⁴ Seuraava osio.

¹⁵ z-arvo=1.645



KUVIO 2 Alkuperäinen vahinkofunktio sinisellä ja muodostetut vahinkofunktiot.

Kuviosta 2 nähdään, miten vahinkofunktio muuttuu kertoimen muuttuessa. Odotetusti vahinkojen hajonta kasvaa lämpenemisen voimistuessa. Näin ollen pienen lämpenemisen vaikutukset ovat varmempia epävarmuuden kasvaessa ajan myötä. Tämä vastaa hyvin aiempaa tutkimusta, jossa pidemmän aikavälin vaikutuksista on vähemmän tutkimusta. Kuviossa 3 on esitetty muodostetut vahinkofunktiot itsenäisten vahinkoarvioiden kanssa. Huomataan, että muodostetut vahinkofunktiot vastaavat hyvin aineistoa ja tuottavat ymmärrettävästi suuren jakauman mahdollisia vahinkoarvioita korkeilla lämpötiloilla.



KUVIO 3 Kuvion vahinkofunktiot asetettu Nordhaus ja Moffat (2017) vahinkoarvioiden päälle. Kuvion vahinkofunktiot sisältävät jo 25% korjauksen, mutta kuvioista ei ole jätetty pois alle 2°C ja yli 8°C arvioita.

Taulukko 5 esittää hiilen sosiaalisten kustannusten muutosta muodostettujen ja kuviossa esitettyjen vahinkofunktioiden perusteella. Taulukossa 5 korkein kerroin 0,43011 vastaa kuvion 2 korkeinta vahinkofunktiota ja 0,391288 toiseksi korkeinta ja niin edelleen. 0,236 kuvaa DICE-mallin alkuperäistä vahinkofunktiota. Taulukosta huomataan, että kustannukset kasvavat tasaisesti, kun kerrointa kasvatetaan ja laskee kerrointa laskettaessa. Kerrointa kasvatettaessa korkein kerroin tuottaa lähes kaksinkertaisen HSK:n vuonna 2015 ja pienin kerroin tuottaa arvion, joka on vain noin 15% alkuperäisestä arviosta. Jos pieni- ja korkeakertoisinta vahinkofunktiota tarkastellaan kuviossa 3. huomataan, että kumpikaan ei ole täysin aineistosta irrallaan. Pienimmän vahinkofunktion arvio vahingoista 10°C asteen lämpenemiselle on esimerkiksi lähinnä ainoaa arviota, joka jätetty huomiotta alkuperäistä funktiota muodostettaessa. Lisäksi, kun otetaan huomioon muun muassa mallista pois jätetyille vahingoille annettu kovin tentatiivinen 25% vahinkoarvio ja seuraavan osion muut vahinkofunktiot ja niiden epävarmuus, ei pienempiä tai suurimpia funktioita voida pitää poissuljettuina mahdollisuuksina. Havainto tukee käsitystä, jonka mukaan epävarmuus oikeasta vahinkofunktiosta on merkittävää.

TAULUKKO 5 HSK vahinkofunktion mukaan. Suurin kerroin kuvaa korkeinta katkoviivaista vahinkofunktiota kuviossa 1 ja pienin alinta. Tulokset HSK(\$).

| | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Kerroin | | | | | |
| 0,43011 | 56 | 67 | 93 | 126 | 144 |
| 0,391288 | 51 | 61 | 85 | 115 | 132 |
| 0,352466 | 46 | 55 | 77 | 103 | 119 |
| 0,313644 | 41 | 49 | 68 | 92 | 106 |
| 0,274822 | 36 | 43 | 60 | 81 | 93 |
| 0,236 | 31 | 37 | 51 | 69 | 91 |
| 0,197178 | 26 | 31 | 43 | 58 | 76 |
| 0,158356 | 20 | 24 | 34 | 46 | 61 |
| 0,119534 | 15 | 18 | 26 | 35 | 45 |
| 0,080712 | 10 | 12 | 17 | 23 | 30 |
| 0,04189 | 5 | 6 | 9 | 12 | 15 |

4.3 Kirjallisuuden muut vahinkofunktiot

Tässä osiossa esittelen kirjallisuudessa muita ehdotettuja vahinkofunktioita, niiden taustaa ja vaikutusta DICE-mallin vaihtoehtoisena vahinkofunktiona. Vahinkofunktioita verrataan DICE:n alkuperäiseen vahinkofunktioon ja tarkastellaan, mitä vaikutuksia vaihtoehtoisilla vahinkofunktioilla on HSK:hon. Kirjallisuus sisältää useita mahdollisia vahinkofunktioita, joten on tarpeellista rajata tarkasteltavia funktioita. Analyysiin on valittu DICE:n lisäksi keskeisimpien IA-mallien PAGE:n ja FUND:in vahinkofunktiot. Näiden mallien taustalla olevin vahinkofunktioiden tarkastelu on kiinnostavaa, koska nämä mallit muodostavat yleisimmin käytetyt IA-mallit, joita verrataan DICE-malliin. IA-mallien taustalla olevien vahinkofunktioiden lisäksi vertailuun on valittu kirjallisuuden katsausartikkelin Tol (2018) perusteella muodostettu vahinkofunktio (TAULUKKO 3).

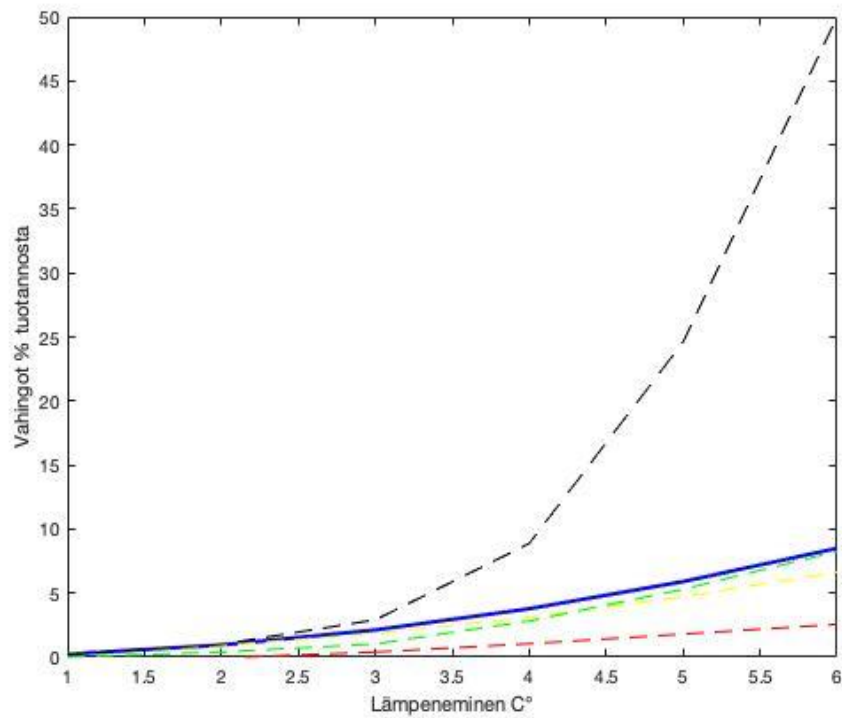
IA-mallien ja Tol (2018) taustalla oleva tieto perustuu paljolti kuitenkin tutkimuksiin, jotka ovat usein vanhoja. Dietz ym. (2018) huomauttavat, että jotkut uudemmat tutkimukset tuottavat huomattavasti korkeampia arvoja vahingoista viitaten tutkimukseen Burke, Hsiang & Miguel (2015a). Näkemyksen, jonka mukaan nykyiset IA-mallit aliarvioivat ilmastomuutoksen vahinkoja, jakaa myös moni muu tutkija (Revesz ym. 2014). Tästä syystä on mielekästä tarkastella, miten merkittävästi tulokset hiilen hinnasta muuttuvat, jos käytetään tämän uudemman tutkimuksen tuloksia. Viimeinen tutkimukseen valittu vahinkofunktio on Weitzman (2010) ehdottama vahinkofunktio, jossa vahingot ovat IA-malleja korkeammat. Weitzmanin funktion vaikutusta on tutkittu ennenkin (esim. Botzen & Van Den Bergh (2012), joten on kiinnostavaa tutkia sen vaikutusta verraten tämän tutkielman tuloksia aiempaan tutkimukseen. Lisäksi Weitzmanin funktio on erityinen siinä mielessä, että se soveltuu erityisen hyvin epävarmuuden tarkasteluun, koska tutkimuksia korkean lämpenemisen vaikutuksista vahinkoihin on vähän ja ne ovat luonteeltaan erityisen epävarmoja.

Taulukossa 6 on esitelty tutkimukseen valitut vahinkofunktiot ja niiden perustiedot. Kuten DICE:n vahinkofunktio, muiden IA-mallien vahinkofunktiot perustuvat kokoelmaan aiemmista tutkimuksista vahinkojen ja lämpenemisen yhteydestä. Toisin kuin DICE, FUND:in vahinkofunktio ei perustu aggregaattitason aineistoille, vaan sektorikohtaisille tutkimuksille vahingoista, joista kokonaisvahingot on muodostettu. Tol (2018) katsauksen muodostettu vahinkofunktio perustuu samantyylliseen analyysiin kuin DICE:n taustalla oleva vahinkofunktio. Weitzman (2010) toisaalta ei perustu empiiriseen tutkimukseen vaan vahinkofunktio perustuu vaihtoehtoiseen käsitykseen vahinkofunktiosta, jota motivoi tutkimuksen puute ja epävarmuus.

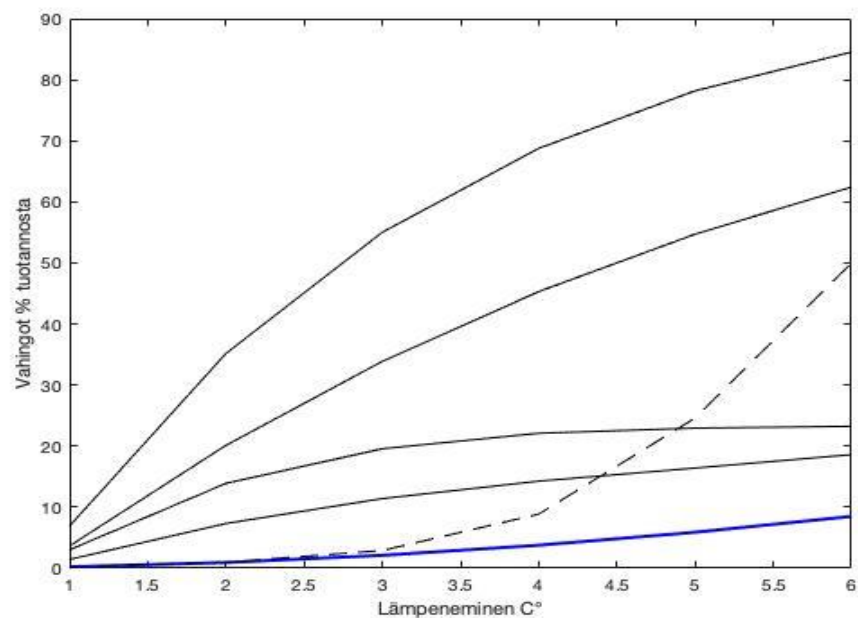
TAULUKKO 6 Vahinkofunktioiden tiedot.

| | DICE2016 | FUND3.8 | PAGE09 | Tol (2018) | Burke, Hsiang & Miguel (2015a) | Weitzman (2010) |
|---|--|---|--|--|---|---|
| Vahinkofunktion perusta | Nordhaus & Moffat (2017) meta-analyysi, jossa 36 estimaattia 27 tutkimuksesta. Vahinkofunktio valinta painotetulla regressiolla, joka vastaa parhaiten aineistoa. Tutkimusten painotukset perustuvat tekijöiden arvioon tutkimuksen laadusta ja relevanssista. | Sektorikohtaiset arviot vahingoille pääosin vuosilta 1992-1998. | Aluekohtaiset aggregoidut arviot. | 27 arvion katsausartikkeli. Vahinkofunktio valinta painottamatto malla regressiolla. | Neljä eri vahinkofunktiota eri skenaarioille. Perustana tuottavuuden yhteys lämpötilaan. Sisältää eri arviot perustuen oletuksiin lämpötilan vaikutuksesta rikkaiden ja köyhien maiden tuottavuuteen poolattuna ja eriteltynä sekä aikadimension vaikutuksesta. | Ehdotus mahdolliselle vaihtoehtoiselle vahinkofunktiolle, jossa erityisesti korkeamman lämpenemisen skenaariossa vahingot vaihtoehtoisia vahinkofunktioita korkeammat. Motivoi tutkimuksen puute vahinkojen yhteydestä lämpötilaan, kun lämpeneminen korkeaa. |
| Vahingot kun lämpeneminen esiteollisesta ajasta 2°C ja 3°C | 0,9% ; 2,1% | n.0% ; 0,4% | 0,25% ; 1,09% | 0,9% ; 1,8% | n.8% - 38% ; n.12%-57% | n.3,9 ; n.8,4% |
| Vahinkofunktuon muodostus tässä tutkimuksessa | Vahinkofunktio valmiina | Muodostettu aineistosta | Muodostettu aineistosta | Vahinkofunktio valmiina | Muodostettu aineistosta | Vahinkofunktio valmiina |
| Vahinkofunktion tai aineiston lähde tähän tutkimukseen | Valmiina mallissa | Burke, Hsiang & Miguel (2015a) - replikointiaineisto | Burke, Hsiang & Miguel (2015a) - replikointiaineisto | Tol (2018) | Burke, Hsiang & Miguel (2015a) - replikointiaineisto | Weitzman (2010) |

Kuvioissa 4 on esitetty vahinkofunktiot graafisesti, pois lukien Burke ym. (2015a), jonka vahinkofunktiot kuvaavat merkittävästi korkeampia vahinkoja. Kuvioista nähdään, että vahinkojen ja lämpenemisen yhteys kolmessa IA-mallissa on hyvin samansuuntainen. Myös Weitzmanin ehdottama vahinkofunktio muistuttaa muita funktioita, mutta ehdottaa merkittävästi korkeampi vahinkoja erityisesti, jos lämpeneminen on merkittävää. Kuviossa 5 on esitetty Burke ym. (2015a) tutkimuksen neljä eri vahinkofunktiota ja vertailuksi Weitzman (2010) ja DICE. Uudessa tutkimuksessa vahingot ovat hyvin merkittävästi korkeammat kuin muissa tutkimuksissa, vain Weitzmanin funktion ollen lähellä matalamman vahingon skenaarioita tutkimuksessa.



KUVIO 4 Vahinkofunktiot sininen DICE, musta Weitzman (2010), vihreä PAGE09, keltainen Tol (2018), punainen FUND 3.8. Muut kuin DICE katkoviivalla.



KUVIO 5 Burke ym. (2015a) neljä vahinkofunktiota (musta) verrattuna DICE:n (sininen) ja Weitzman (2010) (musta katkoviiva) vahinkofunktioihin.

Toisin kuin muissa tutkimuksissa Burke ym. (2015a) vahinkofunktio ei ole konvekssi vaan konkaavi. Burke ym. (2015a) mukaan selitys konkaaville

vahinkofunktiolle on, että lämpeneminen vaikuttaa maiden talouskasvuun heikentävästi, mutta lämpenemisen marginaalihaitta kasvulle on laskeva johtaen konkaaviin vahinkofunktioon (Burke, Hsiang & Miguel 2015b). Burke ym. (2015a) tarkastellut neljä eri skenaariota, muodustuvat kahden eri muuttujan eri yhdistelmistä. Toisaalta aineistoja kohdellaan poolattuna tai eriteltyinä rikkaiden ja köyhien maiden välillä ja lämpötilan vaikutusta tuottavuuteen tarkastellaan yhtenä vuotena tai pidemmällä aikavälillä. Selitys Burke ym. (2015a) korkeammille vahingoille vaikuttaa löytyvän juuri sen keskittymisessä ilmastonmuutoksen dynaamisiin vaikutuksiin tuottavuuteen. Tol (2018) huomauttaa, että nämä dynaamiset vaikutukset saattavat olla suurempia kuin kertaalleen aiheutuvat vahingot kuten hirmumyrskyt, eikä näitä vahinkoja ole sisällytetty malleihin. Tol:n mukaan muihin dynaamisiin vaikutuksiin keskittyviin tutkimuksiin verrattuna Burke ym. (2015a) edustaa korkeaa arviota vahingoista.

Osa vahinkofunktioista kerättiin aiemmasta kirjallisuudesta suoraan funktiomuotoisena ja osa on muodostettu aiemmasta aineistosta pienimmän neliösumman regressiolla ja valitsemalla aineistoa parhaiten vastaava funktio. Aineistosta muodostettujen funktioiden osalta funktiot eivät vastaa täysin alkuperäistä vahinkofunktiota, mutta erot ovat pieniä (Liite).

Vahinkofunktioiden muodostamisen jälkeen ne lisättiin DICE-malliin alkuperäisen vahinkofunktion tilalle. Taulukossa 7 on esitetty hiilen sosiaalisten kustannusten kehitys eri vahinkofunktioilla vuosina 2015 - 2050. Kuvioista havaitaan, että DICE:n alkuperäisen vahinkofunktion tuottamat hiilen kustannukset ovat korkeammat kuin jos käytetään muiden IA-mallien vahinkofunktioita, mutta odotetusti pienempi kuin Weitzmanin vahinkofunktiolla. Suurin ero nähdään Burke ym. (2015a) vahinkofunktioilla, jotka tuottavat tuloksia, jotka ovat odotetusti merkittävästi korkeampia kuin muilla funktioilla. Tulokset osoittavat, että IA-mallit ja Tol (2018) ennustavat samansuuntaisia vahinkoja ja ovat siten konsistentteja suurin piirtein yhtä kireän ilmastopolitiikan kanssa. Burke ym. (2015a) ja Weitzman (2010) taas tuottavat huomattavasti korkeampia kustannuksia.

TAULUKKO 7 HSK 2015-2050

| HSK(\$) | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| DICE2016 | 31 | 37 | 51 | 69 | 91 |
| FUND3.8 | 10 | 12 | 18 | 25 | 32 |
| PAGE09 | 24 | 30 | 43 | 63 | 90 |
| Tol (2018) | 24 | 29 | 40 | 53 | 70 |
| Weitzman (2010) | 54 | 66 | 97 | 138 | 192 |
| Burke, Hsiang & Miguel (2015) | | | | | |
| Alin | 330 | 355 | 410 | 481 | 574 |
| Ylin | 1339 | 1431 | 1621 | 1850 | 2131 |

4.4 Uusien vahinkofunktion muodostaminen

Tässä osiossa aiempien tarkasteltujen vahinkofunktioiden perusteella muodostetaan uusia vahinkofunktioita. Tarkoitus on selvittää, miten vaihtoehtoisten vahinkofunktioiden perusteella voidaan muodostaa uusia vahinkofunktioita, jotka kuvastavat kaikkien funktioiden sisältämää tietoa. Tämä tapa voidaan nähdä myös eräänlaisena kompromissina eri funktioiden välillä.

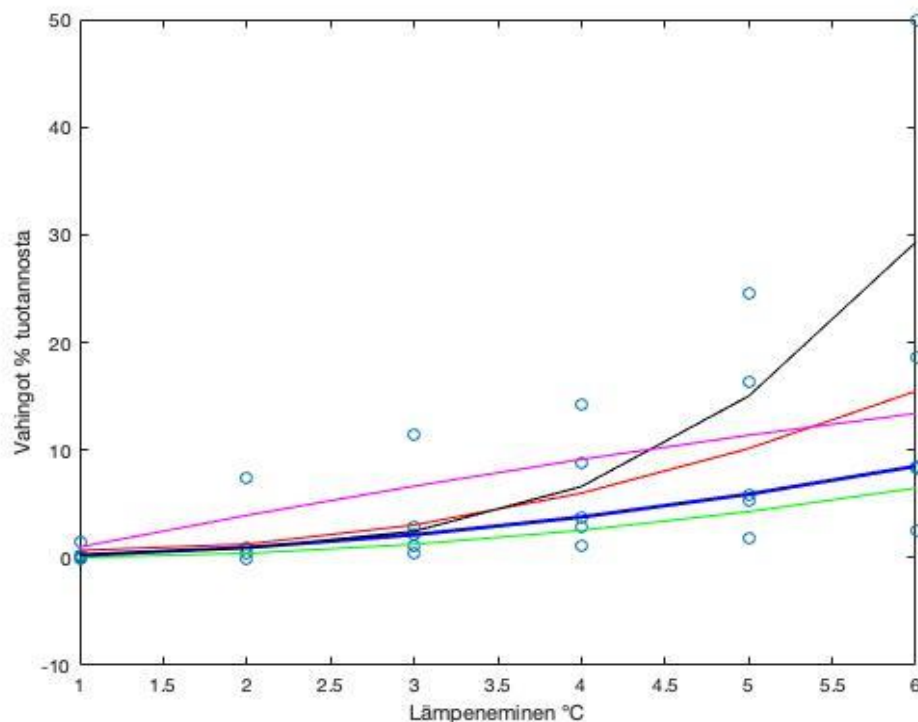
Edellisessä osiossa esitellyistä vahinkofunktioista on tässä osiossa muodostettu kolme erilaista funktiota painotetun ja painottamattoman pienimmän neliösumman menetelmällä (PNS). Eri funktiot on muutettu diskreeteiksi pisteiksi välillä 1 – 6 °C. Näin pisteiksi muutettuja funktioita voidaan käyttää aineistona, johon PNS-menetelmää sovelletaan.

Aineistosta muodostettiin seitsemän erilaista funktiota. Funktiot vertaavat kaikkien funktioiden, IA-mallien, Weitzman (2010) ja DICE:n ja Burke ym. (2015a) ja DICE:n vahinkofunktioiden avulla saatuja tuloksia. Esimerkiksi IA-mallien välillä tehdyssä regressiossa vain DICE-, FUND- ja PAGE-mallien tiedot sisällytetään regressioon ja muodostetaan PNS-menetelmällä uusi funktio. Funktioita muodostetaan joko painottamatta havaintoja tai painottamalla niitä havaintojen taustalla vaikuttavien tutkimusten lukumäärän mukaan. Painottamaton tilanne tavallaan kuvaa näkemystä, jossa eri funktioita pidetään yhtä luotettavina. Tämä lähtökohta ei kuitenkaan ole kovin hyvin perusteltavissa, koska kuten taulukosta 5 nähdään, eri funktioiden taustalla on eri määrä tutkimusta. Siten tasapuolinen painotus antaa saman painoarvon funktioille, joilla on erilainen määrä näyttöä, joka ei välttämättä ole perusteltua.

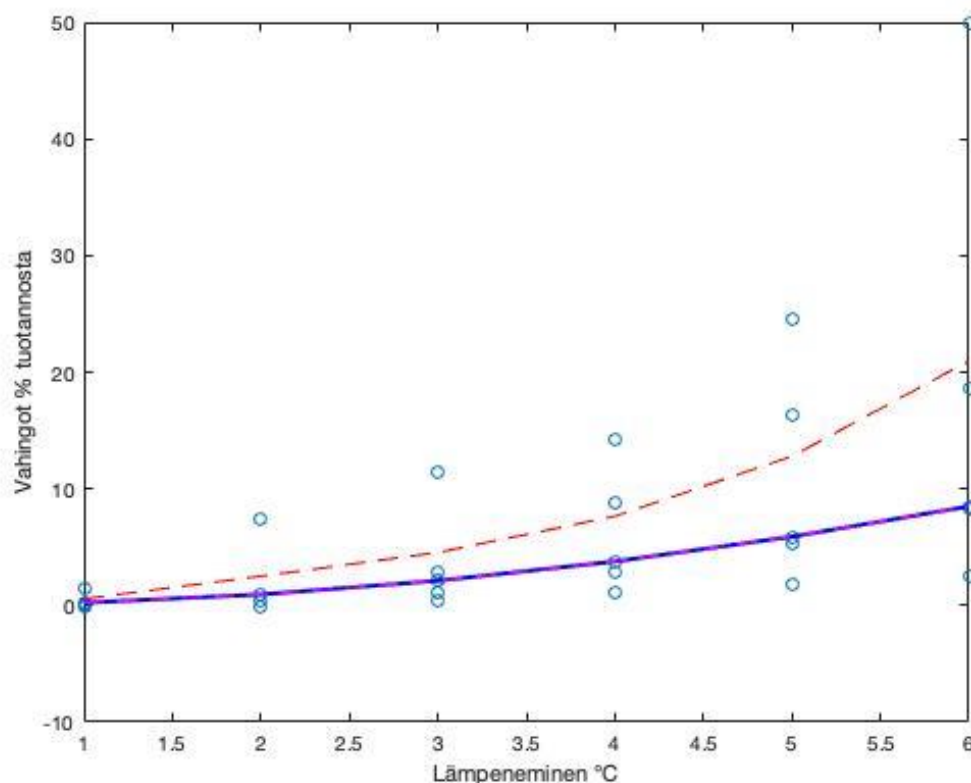
Verrattuna painottamattomaan regressioon, painotetussa PNS-regressiossa DICE:n alkuperäinen funktio vakioidaan arvoksi 1 ja esimerkiksi Tol (2018) saa painotuksen 0.75, koska DICE perustuu 36 estimaattiin ja Tol 27, josta saadaan jakamalla vertaamalla tutkimusten lukumääriä painotukset. IA-mallien välistä regressiota lukuun ottamatta kaikista regressioista on muodostettu painottamaton ja painotettu versio. IA-malleista on vain painottamaton regressio, koska PAGE09 ja FUND 3.8 eivät sisällä aggregaattitason estimaatteja vahinkojen ja lämpenemisen suhteesta, joita voitaisiin painottaa tutkimusten lukumäärällä, joka hankaloittaisi painottamista. Esimerkiksi FUND3.8 perustuu sektorikohtaisiin tutkimuksiin, joita olisi vaikea sisällyttää perustellusti painotettuun regressioon aggregaattitason vahingoista. Lisäksi yksinkertaisuuden takia Burke ym. (2015a) vahinkofunktioista on valittu vain yksi neljästä vahinkofunktiosta PNS-regressioon. Funktio vastaa funktiota, jota Burke ym. kutsuvat lähtökohta-arvioksi (ns. baseline-skenaario). Funktio on esitetty kuviossa 4 graafisesti toiseksi alimpana yhtenäisenä mustana viivana.

Kuvio 6 kuvaa painottamattoman ja kuvio 7 painotetun regression tuloksia graafisesti. Kuvioista 6 huomataan, että kuviossa sinisellä kuvattuun DICE:n alkuperäiseen vahinkofunktioon verrattuna IA-mallien välinen regressio ennustaa pienempiä vahinkoja, mutta muut regressiot suurempia

vahinkoja lämpenemisen suhteen kuin DICE. Kuviosta 6 toisaalta huomataan vain, että kaikki havainnot huomioon ottava regressio tuottaa korkeammat vahingot lämpenemisen suhteen, mutta muita ei voi juurikaan erottaa DICE:n alkuperäisestä vahinkofunktiosta. Tulos ei ole yllättävä, koska painotetussa funktiossa, johon sisällytetään Weitzman (2010) ja DICE ja Burke ym. (2015a) ja DICE, saavat Weitzman ja DICE molemmissa regressioissa painoarvon $1/36$, koska ne perustuvat vain yhteen tutkimukseen Burke ym. (2015a) tapauksessa ja vain teoreettiseen argumenttiin Weitzmanin tapauksessa.



KUVIO 6 Painottamattomat regressiot. Musta=Weitzman ja DICE, pinkki=Burke ym. (2015a) ja DICE, punainen= Kaikki, Sininen=DICE, Vihreä=IA.



KUVIO 7 Painotetut regressiot. Kaikki DICE:n alkuperäistilannetta lukuunottamatta katkoviivalla. Punainen=Kaikki, sininen = DICE, pinkki=Burke ym. (2015a) ja DICE, musta=Weitzman ja DICE.

Taulukossa 8 on kuvattu tulokset HSK:n kannalta, kun kuvioiden 5 ja 6 vahinkofunktiot syötetään DICE-malliin. Verrattuna DICE:n alkuperäiseen vahinkofunktioon, IA-mallien välinen vahinkofunktio ennustaa odotetusti pienempiä vahinkoja kuin alkuperäinen vahinkofunktio ja yllä kuvatut painotetut funktiot, jotka eivät juuri eroa alkuperäisestä funktiosta tuottavat samat tulokset kuin DICE. Muut funktiot tuottavat suuremmat vahingot. Huomionarvoista tuloksista on erityisesti Weitzmanin ja Burke ym. (2015a) vaikutus tuloksiin. Molemmissa tapauksissa vahingot ovat merkittävästi korkeampia, mutta vaikutukset häviävät, jos tuloksia painotetaan. Kuitenkin kuviosta 3 nähdään, että DICE:n vahinkofunktio esimerkiksi 6 °C asteen lämpenemiselle perustuu vain kahdelle tutkimukselle. Vaikka tutkimukset eivät tällä hetkellä näytä tukevan yhtä suurta vahinkoa lämpenemisestä, perustuu tieto pieneen määrään tutkimusta ja mahdollisesti kiistanalaisiin arvioihin siitä, miten vahinkoja tulisi mitata ja mitä laskelmista jätetään pois. Näiden seikkojen pohjalta on perusteltua nähdä näiden funktioiden korkeammat vahingot mahdollisena arviona vahingoista tilanteessa, jossa vahingot käsitetään laajemmin tai jossa epävarmuutta painotetaan tavalla, jossa pahimmat mahdolliset ilmastonmuutoksen skenaariot halutaan välttää, vaikka tämä saattaisi merkitä liian tiukkaa ilmastopolitiikkaa optimistiseen suuntaan kehittyvässä skenaariossa.

TAULUKKO 8 HSK eri regressioilla.

| HSK(\$) | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| DICE2016 | 31 | 37 | 51 | 69 | 91 |
| Kaikki painottamaton | 44 | 55 | 80 | 112 | 151 |
| Kaikki painotettu | 61 | 70 | 93 | 122 | 158 |
| IAM | 22 | 27 | 38 | 53 | 71 |
| Weitzman ja DICE painottamaton | 46 | 56 | 82 | 119 | 165 |
| Weitzman ja DICE painotettu | 31 | 37 | 51 | 69 | 91 |
| Burke ym. ja DICE painottamaton | 79 | 89 | 111 | 138 | 170 |
| Burke ym. ja DICE painotettu | 31 | 37 | 51 | 69 | 91 |

4.5 Tulosten arviointi ja vertaus aiempaan tutkimukseen

Aiemmat tutkimukset vahinkofunktion vaikutuksesta DICE-mallissa tukevat käsitystä, että vahinkofunktion pienillä muutoksilla on merkittävä vaikutus hiilen sosiaalisiin kustannuksiin. Nordhaus (2018) vertasi DICE2016R3:n vahinkofunktiota ja vaihtoehtoiseen vahinkofunktioon, jonka kerroin on 3.5 kertaa alkuperäisen. Kustannukset olivat vuonna 2015 37\$ alkuperäisellä kalibroinnilla ja 91\$ vaihtoehtoisella kalibroinnilla ja vuonna 2050 108\$ ja 249\$.

Botzen & Van Den Bergh (2012) vertasivat DICE:ssä tyypillisesti käytettävää neliöfunktiota Weitzmanin ehdottamaan, ja myös tässä tutkielmassa käsiteltyyn, eksponentiaaliseen funktioon. Odotetusti Weitzmanin vahinkofunktiolla kalibroitu DICE tuotti vuonna 2015 optimaaliseksi hiiliveroksi 42\$ ja vuonna 2055 121\$ vuoden 2007 DICE:n versioon. Tässä tutkielmassa samalla funktiolla DICE2016 saatiin vuonna 2015 54\$ ja jo vuonna 2050 192\$. Uudempi DICE tuottaa siis suurempia vahinkoja kuin aiempi malli. Ero on merkittävä erityisesti kauempana tulevaisuudessa.

Li, Kellermann ja Zhang (2019) huomauttavat, että koska DICE on niin sensitiivinen taustalla olevalle vahinkofunktiolle, sitä tulisi käyttää vain karkeana työkaluna ilmastopolitiikan suunnittelussa. Tämän tutkielman tulokset voidaan nähdä antavan lisätukea tälle käsitykselle. Epävarmuuden vahinkofunktiosta tulisi lisätä myös epävarmuutta mallin suosittamasta ilmastopolitiikasta. Tulosten perusteella tämä epävarmuus ei ainakaan lähtökohtaisesti tue kunnianhimoisempaa tai hillitympää ilmastopolitiikkaa, koska toisaalta yhdistetyt regressiot IA-mallien kesken tuottavat pienemmän kustannukset kuin alkuperäinen vahinkofunktio, mutta painotettu- ja painottamaton regressio tuottavat korkeammat vahingot. Keskeistä on siten kiinnittää huomiota vahinkofunktioiden hajontaan.

Tuloksissa on merkillä pantavaa, että IA-mallien tulokset tuottavat alhaisia tuloksia. Tulos on merkittävä IA-mallien suuren painoarvon kannalta. Kuten aiemmin mainittua, malleja on syytetty vahinkojen aliarvioimisesta

(Revesz ym. 2014). Tulosten valossa tämä näkemys ei ole yllättävä ja aiemmin käydyn vahinkojen mittaamista, etiikkaa ja epävarmuutta käsittelevän kirjallisuuden perusteella näkemykselle voidaan antaa vakuuttavia perusteita. Paljon kuitenkin riippuu juuri näiden debattien yksityiskohdista. Eräs kiinnostava mahdollisuus on, että ilmastonmuutoksen kustannuksista ei voida antaa edes täysin tieteellistä totuutta. Esimerkiksi ilmastonmuutoksen aiheuttavan kuoleman arvottaminen on hankala kysymys, eikä se selvästi ole puhtaan tieteellinen kysymys. Siten on epäselvää, tuleeko erimielisyys ilmastonmuutoksen rahaksi muutetuista vahingoista tai ilmastopolitiikan kireydestä selviämään tieteellisten tutkimustulosten perusteella.

Tässä tutkielmassa korkeimmat vahingot tuottivat Burke ym. (2015a) neljä eri vahinkofunktiota. Kuten aiemmin huomautettiin, nämä funktiot perustuvat erityisesti ilmastonmuutoksen dynaamisiin vaikutuksiin kuten tuottavuuteen. Dynaamisten vaikutusten parempi sisällyttäminen malleihin voisi siten tuottaa merkittävästi korkeampia vahinkoja. Vahingot tuskin kuitenkaan olisivat yhtä suuria kuin tässä tutkielmassa raportoidut, koska monet muut tutkimukset ennustavat pienempiä dynaamisia vaikutuksia (Tol 2018). Tämän tutkielman tulokset dynaamisten vaikutusten osalta saattavatkin edustaa pahinta mahdollista skenaariota, jonka mahdollisuutta ei voida kuitenkaan sulkea pois.

Vahinkofunktion vaikutus kustannuksiin on itsessään suuri. Tarkasteltaessa suurta kuvaa vaikuttaa epävarmuus ja sensitiivisyys oletuksille entistä ongelmallisemmalla, koska myös muut mallin oletukset lisäävät tulosten epävarmuutta. Taulukko 1 raportoi diskonttotekijän vaikutuksen HSK:hen, jonka voidaan huomata olevan suuri. Diskonttotekijän lisäksi epävarmuutta lisäävät eettiset kysymykset vahinkojen mittaamisesta, ilmastoherkkyyden epävarmuus ja yleinen tutkimuksiin liittyvä epävarmuus. Ongelmat ovat merkittäviä IA-mallien pohjalta tehtävän kustannus-hyöty -analyysin kannalta ja heikentävät mallien kykyä antaa relevanttia tietoa ilmastopolitiikan tueksi. Tarkkaa arviota ilmastonmuutoksen aiheuttamista aggregaatti vahingoista tai hiilen sosiaalisista kustannuksista ei tällä hetkellä voi antaa.

4.6 Tulosten rajoitukset

Tutkielman tuloksiin liittyy useita rajoituksia. Vahinkofunktioiden valinta tutkimukseen rajoittaa osaltaan kaikkien funktioiden perusteella muodostetun regression relevanssia: on muitakin vahinkofunktioita, joita tutkielmaan voitaisiin käsitellä. Tämän rajoitus on kuitenkin olennainen vain kaikkien funktioiden välisen regression osalta. IA-mallien, Weitzmanin ja Burke ym. (2015a) osalta sisällyttämiselle on itsenäisiä perusteita, jotka on selitetty yllä.

Toinen tulosten rajoite perustuu myös tutkimuksen kolmanteen vaiheeseen. Tutkimuksia ei ole tässä yhteydessä arvioitu sen enempää kuin painottamalla tutkimusten lukumäärällä. Tämä ei kuitenkaan ole täysin tyydyttävä ratkaisu, koska itse tutkimukset saattavat erota laadultaan

merkittävästi. Esimerkiksi Nordhaus ja Moffat (2017) painottavat analyysissään tutkimuksia niiden laadun perusteella, joka on DICE:n vahinkofunktion pohjana. Tämä seikka on merkittävä, mutta ei ole ongelma tulosten suuntaa antavan luonteen kannalta. Tämän lisäksi itse tutkimusten painottaminen niiden laadun mukaan on kiistanalaista. Ei ole yleisesti hyväksyttyä tapaa painottaa tutkimuksia laadun perusteella ja siten painottaminen itsessään nostaa esiin uusia ongelmia, joita ei ole tämän tutkielman puitteissa voitu käsitellä.

Kolmas rajoitus on, että tutkimusvaiheessa osa funktioista on muodostettu aiemmista piste-estimaateista regression avulla. Tämä osaltaan saattaa luoda epävarmuutta tuloksiin, koska piste-estimaateista regression avulla muodostettu funktio ei aina täysin vastaa täydellisesti alla olevaa aineistoa. Tätä seikkaa ei ole kuitenkaan nähty tässä tutkielmassa raskauttavana ongelmana, koska HSK ja vahinkofunktiot itsessään ovat luonteeltaan aina epävarmoja, eikä tutkielman täten tutkimusalueen luonteen takia tarvitse olla täsmälleen piste-estimaatteja vastaava. Tutkimusvaiheessa piste-estimaattien avulla muodostetut regressiot todettiin riittävän tarkoiksi tutkimusongelman kannalta (Liite).

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kiinnostus ilmastonmuutoksen ympärillä niin tieteellisesti kuin poliittisesti ja yhteiskunnallisestikin on lisääntynyt merkittävästi viime vuosina. Tässä tutkielmassa keskityttiin osaan tätä keskustelua tieteellisestä näkökulmasta tarkastelemalla keskeistä ilmastonmuutoksen taloudellista DICE-mallia. Tutkielmassa keskityttiin mallin vahinkofunktioon ja sen vaikutukseen hiilen sosiaalisiin kustannuksiin, jota käytetään usein ilmastopolitiikan suunnittelussa. Näin tieteellinen tutkimus kytkeytyy poliittiseen ja yhteiskunnalliseen keskusteluun.

Eri vahinkofunktioista ja niiden avulla saaduista tuloksista HSK:n suhteen voidaan todeta tutkimuskentän olevan hyvin heterogeeninen. Tulosten epävarmuudella on osaltaan merkitystä laajemmassa yhteiskunnallisessa kontekstissa, sillä tieteilijöitä pyydetään usein antamaan lausuntoja ilmastopolitiikkaan liittyen. Tulosten vaihtelevuus voi osaltaan rohkaista erilaisia näkemyksiä ilmastopolitiikan virityksestä, koska epävarmuudesta johtuen on vaikea löytää kiistatonta totuutta siihen, miten kireää politiikan tulisi olla. Näin tieteelliset tutkimustulokset voivat osaltaan rohkaista julkista keskustelua ja politisoida myös ilmastonmuutoksen ympärillä käytävää tieteellistä keskustelua. Esimerkiksi Jason Hickel *Foreign Policy* -lehden kolumnissaan paljonpuhuvalla otsikolla *The Nobel Prize for Climate Catastrophe* kommentoi Willia Nordhausin samaa Nobel-palkintoa. Hickelin mukaan Nordhausin DICE-malli ja kustannuksia-hyöty -analyysin kehikko ovat hidastaneet toimia ilmastonmuutoksen vastustamiseksi, koska DICE-malli ja Nordhaus eivät tue yhtä tiukkoja päästövähennyksiä kuin monet muut tutkijat tai IPCC.

Tutkielman tärkeimpiin havaintoihin ja kontribuutioihin kuuluu ilmastonmuutoksen dynaamisten vaikutusten mahdollisesti suuret vahingot. Tätä näkökulmaa tutkielmassa edusti Burke ym. (2015a) vahinkofunktiot, jotka tuottivat poikkeuksellisen suuret hiilen sosiaaliset kustannukset. Tutkimusosiossa tutkimuksen sisällyttämistä perusteltiin sillä, että se edustaa uudempaa tutkimusta, jonka esimerkiksi Dietz ym. (2018) on huomauttanut

tuottavan korkeampia vahinkoja ja ollen mahdollisesti merkittävä tulos. Tämän tutkielman mukaan uudet korkeat dynaamiset vahingot voivat olla merkittäviä, mutta painotettu regression mukaan suhteutettuna muuhun tutkimuskirjallisuuteen, niillä ei välttämättä ole niin suurta merkitystä kuin Burke ym. (2015a) perusteella voisi ajatella. On myös huomioitava, että tämän tutkimuksen tulokset edustavat korkeampia arvioita kuin joissain muissa dynaamisia vaikutuksia tarkastelleissa tutkimuksissa (Tol 2018).

Tulokset korostavat epävarmuutta keskeisenä käsitteenä IA-kirjallisuudessa ja ilmastonmuutoksen kontekstissa yleisesti. Tutkimusosiossa todettiin, kuinka monet vahinkofunktiot ja niiden avulla muodostetut arviot hiilen sosiaalisista kustannuksista perustuvat vain kouralliselle tutkimuksia korkeilla lämpötiloilla. Tätä näkemystä tutkimuksessa edustanut Weitzmanin vahinkofunktio tuotti myös korkeita arvioita HSK:sta ollen sopusoinnussa aiemman kirjallisuuden kanssa (Botzen & Van Den Bergh 2012). Tulevan tutkimuksen kannalta onkin oleellista saada uutta tutkimustietoa korkean lämpenemisen vaikutusta. Korkean lämpenemisen tutkiminen on kuitenkin ilmeisistä syistä hankalaa. Tutkimustiedon saaminen korkean lämpenemisen vaikutuksista kertoo tarpeesta soveltaa empiirisen tiedon lisäksi esimerkiksi yleistä päätöksenteon teoriaa epävarmuuden vallitessa. Näin IA-malleja ja vahinkofunktioita koskeva kirjallisuus kytkeytyy laajempaan tieteellis-yhteiskunnalliseen keskusteluun. Myös tutkielman kustannuksia käsittelevässä osiossa huomattiin, että vahinkojen mittaaminen itsessään nostaa esiin merkittäviä eettisiä ja metodologisia ongelmia. Nämä havainnot tukevat käsitystä tarpeesta poikkitieteellisemmälle tutkimukselle ilmastonmuutoksen vahingoista, malleista ja suositelluista politiikkatoimista.

LYHENTEET

HSK = hiilen sosiaaliset kustannukset (engl. the social cost of carbon)

IA-mallit = Integrated assessment-mallit.

DICE = Dynamic Integrated Climate-Economy (IA-malli)

PAGE = policy Analysis of the Greenhouse Effect (IA-malli)

FUND = The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (IA-malli)

PNS = Pienimmän neliösumman menetelmä

TEA = Tilastollisen elämän arvo (engl. value of statistical life)

LÄHTEET

Anthoff, D. & Tol, R. S. 2013. The uncertainty about the social cost of carbon: A decomposition analysis using fund. *Climatic Change* 117 (3), 515-530.

Groom, B. 2014. Discounting, teoksessa Markandya, A., Galarraga, I., & de Murieta, E.S. *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation*. Routledge.

Botzen, W. W. & van den Bergh, Jeroen CJM 2012. How sensitive is Nordhaus to Weitzman? Climate policy in DICE with an alternative damage function. *Economics Letters* 117 (1), 372-374.

Burke, M., Hsiang, S. M., & Miguel, E. 2015a. Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527(7577), 235-239.

Burke, M., Hsiang, S. M., & Miguel, E. 2015b. Global non-linear effect of temperature on economic production. *Supplementary Materials*.

URL:http://web.stanford.edu/~mburke/climate/BurkeHsiangMiguel2015_SI.pdf

Coase, R. H. (1960). The problem of social cost. In *Classic papers in natural resource economics* (pp. 87-137). Palgrave Macmillan. London.

- Cropper, M., Hammitt, J. K. & Robinson, L. A. 2011. Valuing mortality risk reductions: progress and challenges. *Annu.Rev.Resour.Econ.* 3 (1), 313-336.
- Cuaresma, J. C. 2017. Income projections for climate change research: A framework based on human capital dynamics. *Global Environmental Change* 42, 226-236.
- Dasgupta, P. 2007. The Stern Review's economics of climate change. *National institute economic review* 199 (1), 4-7.
- Dietz, S., Bowen, A., Doda, B., Gambhir, A. & Warren, R. 2018. The economics of 1.5 C climate change. *Annual Review of Environment and Resources* 43, 455-480.
- Drupp, M., Freeman, M., Groom, B. & Nesje, F. 2015. Discounting disentangled: an expert survey on the determinants of the long-term social discount rate. *Centre for Climate Change Economics and Policy Working Paper* 195.
- Freeman, Samuel, "Original Position", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2019 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/sum2019/entries/original-position/>>.
- Galton F. 1907. *Vox populi*. *Nature* 75:7
- Gollier, C. 2013. *Pricing the planet's future: the economics of discounting in an uncertain world*. Princeton University Press.
- Heal, G. & Millner, A. 2014. Reflections: Uncertainty and decision making in climate change economics. *Review of Environmental Economics and Policy* 8 (1), 120-137.
- Hickel, J. 2018. The nobel prize for climate catastrophe. *Foreign Policy*.
URL: <https://foreignpolicy.com/2018/12/06/the-nobel-prize-for-climate-catastrophe/>
- Hope, C. 2011. The social cost of CO2 from the PAGE09 model. *Economics discussion paper*. (2011-39).
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2018. *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report*. IPCC.
- Kellett, C. M., Faulwasser, T. & Weller, S. R. 2016. DICE2013R-mc: A Matlab/CasADi Implementation of Vanilla DICE 2013R. *arXiv preprint arXiv:1608.04294* . URL: <https://github.com/cmkellett/DICE2013R-mc>
- Liski, M. 2007. *Sternin raportti ja sen kritiikki*. Helsingin kauppakorkeakoulu .

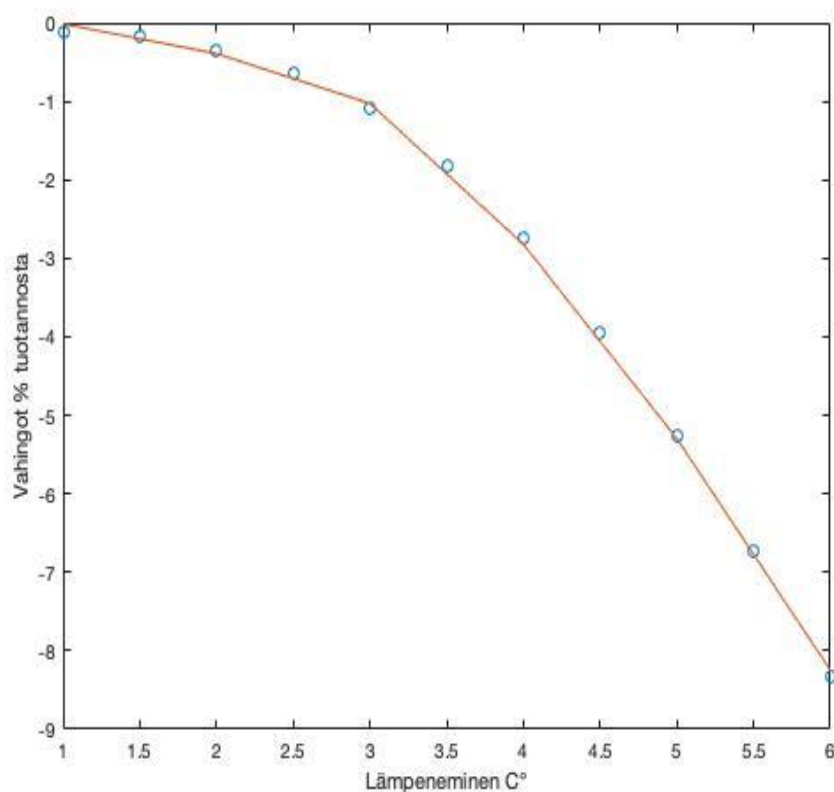
- Li, X., Kellermann, F., & Zhang, T. 2019. An Analysis of the DICE Model: The Impacts of Damage Function and Social Rate of Discount. Resource Economics & Policy Analysis Research Group. Department of Economics. University of Victoria.
- Nordhaus, W.D & Moffat, A. 2017. A survey of global impacts of climate change: replication, survey methods, and a statistical analysis. National Bureau of Economic Research.
- Nordhaus, W. D. & Satorc, P. 2013 DICE 2013R: Introduction and User's Manual.
URL:http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf
- Nordhaus, W. D. 2017. Revisiting the social cost of carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (7), 1518-1523.
- Nordhaus, W. D. 2013. *The climate casino: Risk, uncertainty, and economics for a warming world*. Yale University Press.
- Nordhaus, W. D. 2008. *A question of balance: economic modeling of global warming*. Yale University Press.
- Nordhaus, W. D. 2007. A review of the Stern review on the economics of climate change. *Journal of economic literature* 45 (3), 686-702.
- Pearce, D. W. & Ulph, D. 1995. *A social discount rate for the United Kingdom*. CSERGE Norwich.
- Pigou, A. 1920. *The economics of welfare*. Routledge.
- Pindyck, R. S. 2016. The social cost of carbon revisited. National Bureau of Economic Research.
- Pizer, W., Adler, M., Aldy, J., Anthoff, D., Cropper, M., Gillingham, K. & Rowell, A. (2014). Using and improving the social cost of carbon. *Science*, 346 (6214), 1189-1190.
- Ramsey, F. P. 1928. A mathematical theory of saving. *The economic journal* 38 (152), 543-559.
- Revesz, R. L., Howard, P. H., Arrow, K., Goulder, L. H., Kopp, R. E., Livermore, M. A., & Sterner, T. 2014. Global warming: Improve economic models of climate change. *Nature News*, 508(7495), 173.
- Stern, N. H. 2007. *The economics of climate change: the Stern review*. Cambridge University Press.

- Tol, R. S. 2018. The economic impacts of climate change. *Review of Environmental Economics and Policy* 12 (1), 4-25.
- Wang, P., Deng, X., Zhou, H. & Yu, S. 2019. Estimates of the social cost of carbon: A review based on meta-analysis. *Journal of Cleaner Production* 209, 1494-1507.
- Weitzman, M. L. 2011. Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 5(2), 275-292.
- Weitzman, M. L. 2010 GHG Targets as Insurance Against Catastrophic Climate Damages, Mimeo, Department of Economics, Harvard University.
- Weyant, J. 2017. Some contributions of integrated assessment models of global climate change. *Review of Environmental Economics and Policy* 11 (1), 115-137.
- Zwolinski, M. 2015. *Libertarianism and pollution*, teoksessa Hale, B. & Light, A. *The Routledge Companion to Environmental Ethics*. Routledge.

LIITE

Tässä liitteessä kuvataan tutkielmassa käytettyjen vahinkofunktioiden muodostaminen niiden funktioiden osalta, jotka on muodostettu piste-estimaattien avulla. Esimerkkinä käytetään PAGE-mallin vahinkofunktiota.

Funktiot muodostettiin soveltamalla PNS-regressiota piste-estimaatteihin. Regression polynomien lukumäärä valittiin regression residuaalin perusteella valiten alhaisin alhaisimman residuaalin polynomi. Esimerkiksi PAGE:n tapauksessa regressiossa on 10 polynomia. Näin suuri polynomien lukumäärä valittiin, jotta funktioista saadaan tarkkoja. Kuviossa 8 on esitetty PAGE:n piste-estimaatit ja niihin sovitettu regressio, joka vastaa tässä tutkielmassa käytettyä vahinkofunktiota PAGE:n osalta. PAGE:n ja FUND:in osalta aineistoista on myös poistettu muutama poikkeava havainto, etteivät ne vaikuta liikaa tuloksiin.



KUVIO 8 PAGE-vahinkofunktion piste-estimaatit sinisellä ja niihin sovitettu regressio, joka vastaa tässä tutkielmassa käytettyä vahinkofunktiota PAGE:n osalta.