

Musta on uusi vihreä Varantokaupan kautta kohti optimaalista ympäristöpolitiikkaa hiilimarkkinoilla

Kansantaloustiede
Maisterin tutkinnon tutkielma
Jorge Soria Ruiz-Ogarrio
2014

Tiivistelmä

Tässä tutkielmassa tarkastellaan ympäristöpolitiikan mahdollisuuksia kivihiilen varantokaupan näkökulmasta. Hiilimarkkinoiden ympäristöpolitiikkaa vaikeuttavat erityisesti hiilivuoto ja vapaamatkustaminen. Alan tutkimuskirjallisuuteen perustuen tutkielmassa lähdetään liikkeelle oletuksesta, että vain osa valtioista on valmiina sitoutumaan ympäristöhaittojen minimoimiseen. Jos vain osa maista harjoittaa ympäristöpolitiikkaa, markkinoilla syntyy hiilivuotoa. Jos maiden yhteenliittymä (koalitio) yrittää alentaa hiilenkulutustaan, markkinahinta laskee, minkä johdosta muut maat kuluttavat enemmän. Samoin jos yhteenliittymä alentaa hiilen tarjontaa, hinta nousee ja inframarginaalisia varantoja tulee kannattavaksi, mikä lisää muiden maiden tarjontaa. Näin ollen koalition optimaalinen vaihtoehto on vääristää markkinahintaa ja pyrkiä minimoimaan ympäristöhaittoja. Tässä tutkimuksessa osoitetaan, että sallimalla varantokauppa voidaan estää hiilivuodon esiintymistä ja koalitio voi saavuttaa sosiaalioptimin.

Tutkielmassa kehitetään malli, jonka avulla voidaan määrittää optimaalista ympäristöpolitiikkaa. Käymällä kauppaa hyödyntämättömillä varannoilla, koalitio pystyy tekemään muiden maiden tarjontafunktioista paikallisesti joustamattomia (*locally inelastic*), mikä estää hiilivuotoa. Lisäksi vetämällä pois markkinoilta osan niistä varannoista koalitio voi nostaa hintaa ja implementoida sosiaalisen optimin (*first best*).

Tuloksina saadaan, että tasapainossa kaikkien maiden yhteenlaskettu hyöty maksimoituu, rajahyöty on sama kaikille ja hinta sisältää ympäristöhaittojen kustannukset. Näin ollen todetaan, että koalition kannattaa keskittyä varantojen ostamiseen ja tarjontapuolen politiikkaan, mikä ilman varantokauppaa olisi ollut epätehokasta. Lopuksi mallia täydennetään esittämällä mahdollinen tapa mitata kivihiilen käytöstä syntyviä hyötyjä ja haittoja, kivihiilen louhintakustannuksia ja teknologian kehityksen vaikutuksia sosiaalioptimiin.

Avainsanat: kivihiihi, varantokauppa, hiilivuoto, yhteisresurssin ongelma, ympäristöpolitiikka, Coasen teoreema, ilmastonmuutos, *Dynamic Integrated Climate-Economy model* (DICE), *Integrated Assessment Model* (IAM), teknologia, vihreä paradoksi

Sisällys

Tiivistelmä.....	2
Sanasto.....	5
1. Johdanto.....	6
2. Hiilestä lyhyesti	7
2.1. Hiilimarkkinat	8
3. Ongelman mallintaminen	11
3.1. Teoreettinen tausta ja kirjallisuuskatsaus.....	11
3.2. Mallin matemaattinen muoto	13
3.2.1. Kaupankäynti varannoilla	15
3.2.2. Ympäristöpolitiikka	15
3.2.3. Hiilimarkkinat.....	15
4. Pelin kulku.....	16
4.1. Hiilimarkkinat	16
4.2. Ympäristöpolitiikka.....	17
4.3. Kaupankäynti varannoilla	19
5. Tulokset.....	19
6. Mallin soveltaminen käytännössä	22
6.1. Haitan mittaaminen	22
6.2. Hyödyt	28
6.3. Tuotantokustannukset ja varannot	29
7. Vastaavia mekanismeja ja mallin rajoitteita	31
7.1. Käytössä olevia luonnonvarakaupan malleja	31
7.1.1. Conservation Reserve Program	32
7.1.2. REDD, UN-REDD ja REDD+	32
7.1.3. Yleishyödyllisiä yhteisöjä	33
7.1.4. Debt-for-Nature Swaps (DFNS).....	33
7.2. Soveltamisen ongelmia.....	34
7.2.1. Vapaamatkustaminen	34

7.2.2.	Hiilenkäyttäjien liikkuvuus	34
7.2.3.	Poliittisia haasteita	35
7.2.4.	Teknologisia haasteita.....	35
8.	Mallin laajentaminen.....	36
8.1.	Teknologia	36
8.2.	Pelin toisto ja vihreä paradoksi	41
8.3.	Heterogeenisiä polttoaineita.....	46
8.4.	Jaettu haitta	47
9.	Johtopäätökset.....	49
	Lähdeluettelo	51
	Liitteet	54
	Liite 1: Energian kulutus lähteittäin.....	54
	Liite 2: Energian tuotanto lähteittäin.....	55
	Liite 3: Ihmisen aiheuttamia CO ₂ päästöjä.....	56
	Liite 4: Hiilivarannot.....	57

Sanasto

Btu (*British thermal unit*): käytössä mm. Yhdysvalloissa, vastaa 1055,056 joulea.

DFNS (*Debt-for-nature swaps*): kansainvälinen sopimus, jolla lunastetaan osa kehitykseen velasta ja vastikkeena velallinen investoi ympäristöystävällisiin kohteisiin tai säilyttää hyödyntämättä luonnonvaroja.

DCL ja ICL (*direct/indirect coal-to-liquid*): hiilen käyttö nesteellisen polttoaineen saamiseksi. Yleensä prosessi alkaa hiilen muuttamisella kaasuksi, mitä seuraa GTL-prosessi (ks. GTL).

Euraasia: tässä tutkielmassa käytetään British Petroleumin julkaisua (2013), jossa Euraasiaan katsotaan kuuluvaksi entisen Neuvostoliiton maat.

GTL (*Gas-to-liquids*): maakaasun jalostaminen nesteelliseksi polttoaineeksi. Joukkoon kuuluu mm. diesel, nafta ja vastaavat nesteelliset polttoaineet, jotka saadaan maakaasusta.

Höyryhiili: hiili, jota käytetään pääsääntöisesti sähköntuotantoon. Yleensä kyseessä on ruskohiili, vaikka teoriassa sähköntuotantoon voi käyttää sekä alempia että ylempiä hiililajeja.

Koksi: bitumipitoinen hiili, jota korkean hinnan takia käytetään pääsääntöisesti terästeollisuudessa.

Lähi-itä: BP:ta (2013) mukailten Lähi-itään kuuluvat Arabian niemimaan maat sekä Iran, Irak, Israel, Jordania, Libanon ja Syyria.

Pohjois-Amerikka: Kanada, Meksiko ja Yhdysvallat (sis. Puerto Rico).

TOE (*Tonnes of Oil Equivalent*): öljykvivalenttonni. Polttoaineiden mittausyksikkö, joka vastaa yhden tonnin raakaöljyn polttamisesta saatua energiamäärää. Sen arvo on 42 gigajoulea tai 11 630 kWh. Se vastaa noin kolmea tonnia ruskohiiltä.

Tonni (hiiltä): ellei toisin mainita, kyseessä on SI-järjestelmän mukaisesti 1000 kg, eikä Pohjois-Amerikassa käytössä oleva *short ton* (2000 paunaa eli n. 907,2 kg).

Aasian ja Tyynenmeren alue: BP:n (2013) mukaan Afganistan, Bangladesh, Brunei, Etelä-Korea, Filippiinit, Hongkong, Indonesia, Intia, Japani, Kambodža, Kiina, Laos, Macao, Malesia, Mongolia, Myanmar, Nepal, Pakistan, Pohjois-Korea, Singapore, Sri Lanka, Taiwan, Thaimaa, Vietnam ja Oseanian maat.

Wh: Wattitunti eli 3600 kilojoulea; energian määrä, joka vastaa yhden watin työntehoa kun toimii tunnin verran. Tekstissä käytän useimmiten joko kWh (kilowattituntia, eli 10^3 Wh) tai TWh (terawattitunti, eli 10^{12} Wh).

1. Johdanto

Ympäristöpolitiikka on eräs nykypolitiikan vaikeimmista aloista. Kansantalouden hyvinvointi riippuu suuressa määrin onnistuneesta ja tilanteeseen sopivasta ympäristöpolitiikasta. Valitettavasti ympäristöpolitiikalla joskus saadaan aikaan enemmän haittaa kuin hyötyä.

Perinteisesti ympäristöpolitiikka on keskittynyt vaikuttamaan kysyntäpuoleen tekijöihin asettamalla päästöille hinnan, joka vastaa päästöjen aiheuttamia ulkoisvaikutuksia. Päästokiintiöt ja -verot toimivat hyvin teoriassa, mutta käytännössä niillä saadaan harvoin toivottuja tuloksia. Ympäristöverojen osalta epäonnistuminen johtuu usein siitä, ettei veroteta suoraan saastuttavaa toimintaa vaan alaa kokonaisuudessaan, jolloin verot eivät välttämättä vaikuta suoraan saastuttamiseen. Toinen ongelma syntyy silloin kun saastuttajat ovat muualla, eikä täten niitä voi verottaa. Päästokiintiöiden osalta ongelma on useimmiten siinä, että valvonta on käytännössä hankalaa ja kallista.

Tarjonnan puolella ympäristöpolitiikka keskittyy usein teknologian kehityksen edistämiseen. Toisaalta teknologiasta voi esiintyä myös ongelmia. Kun kehitetään vaihtoehtoja saastuttaville resursseille, käytännössä kannustetaan resurssien omistajia lisäämään hyödykkeen tarjontaa ja myymään kapasiteettinsa nopeammin. Ympäristöystävällisempi vaihtoehtoinen teknologia pienentää tulevien hyötyjen arvoa, mikä kannustaa käyttämään resurssit kokonaan jo nykyään (Sinn 2008). Tätä ilmiötä kutsutaan yleisesti vihreäksi paradoksiksi (*green paradox*). Tämän lisäksi kun ympäristön säilyttämiseen sitoutuneet toimijat siirtyvät käyttämään puhtaampaa teknologiaa, muut osapuolet saavat silloin saastuttavaa resurssia halvemalla, jolloin ne lisäävät sen kuluttamista. Tätä seurausta kutsutaan hiilivuodoksi, ja se on keskeinen tekijä vihreässä paradoksissa. Niin kauan kuin suurin osa maista ei sitoudu harjoittamaan tarjontaa alentavaa ympäristöpolitiikkaa, tarjonnan alentamisen vaikutuksesta esiintyy hiilivuotoa (Eichner & Pethig 2011).

Valitettavasti harvat maat ovat valmiita sitoutumaan kansainväliseen ympäristöpolitiikkaan. Dohan YK:n ympäristöpaneelissa vain 36 maata¹ 192 maasta hyväksyi sitovia päästöjenalentamistavoitteita Kioton ilmasopimuksen yhteydessä. Nämä olivat EU:n 28 jäsenmaata, Australia, Islanti, Liechtenstein, Sveitsi, Norja, Valko-Venäjä, Kazakstan ja Ukraina. Toisin sanoen: vaikka ne onnistuisivat alentamaan päästöjään, hiilivuodon takia kokonaisvaikutus ympäristön kannalta voi jäädä vähäiseksi.

Ongelman ratkaisemiseksi seuran Bård Harstadin esittämää mallia (Harstad 2012). Kyseinen malli tarjoaa kehyksen, jolla on mahdollista samanaikaisesti keskittyä ympäristöpolitiikan tarjontapuoleen ja samalla estää hiilivuotoa. Tämä saadaan aikaan käymällä kauppaa hiilivarannoilla ennen niiden hyödyntämistä. Varantokaupalla ympäristövaikutusten alentamiseen sitoutunut koalitio maita pystyy

¹ Itse asiassa sopimuksessa on 37 osapuolta, sillä sekä EU että sen 28 jäsenmaata ovat asianosaisia, eli kokonaisuudessa ne muodostavat 28 maan ryhmän mutta 29 sopimuksen osapuolta.

toteuttamaan sosiaalisen optimin hiilimarkkinoilla, vaikka osa maista ei liittyisi koalitioon. Koalition tulee ostaa muiden maiden hiilivarantoja tai niiden hyödyntämisoikeuksia. Tällä tavalla varantojen alkuperäisten omistajien tarjontafunktiot muuttuvat paikallisesti joustamattomiksi. Sen jälkeen koalitio vetää pois markkinoilta osan varantoja nostaten hinnat optimiin. Koalition kannattaa siis ostaa marginaalivarantoja, jotka kustannustensa vuoksi ovat saatavilla alhaisella hinnalla.

Tämä tutkielma alkaa lyhyellä esityksellä hiilimarkkinoiden taustoista (kappale II) sekä Harstadin mallin teoreettisesta perustasta ja sen yleisistä piirteistä (kappaleet III-V). Kappale VI laajentaa Harstadin mallia sisällyttämällä päästöhaittojen matemaattisen mallin, rakentamalla energiankäytön hyötyfunktion ja arvioimalla maailman tärkeimpien kivihiielen kaivosten tuotantokustannukset. Kappale VII kertoo käytössä olevista vastaavista yhteisresurssin ongelman ratkaisemismekanismeista. Lisäksi siinä tarkastellaan lyhyesti Harstadin malliin liittyviä rajoituksia, joita esiintyy vapaamatkustamisen, poliittisen päätöksenteon ja teknologian kehityksen vuoksi. Kappale VIII laajentaa perusmallia sisällyttämällä pelin toistoa, teknologian kehitystä, heterogeenisiä energianlähteitä ja jaettua haittaa. Kappale IX esittää johtopäätökset ja päättää artikkelin.

2. Hiilestä lyhyesti

Hiilen alkuperä on kasvimateriaali, joka hajoaa turpeeksi. Paineen, lämmön, mädäntymisen ja ajan seurauksena turpeesta tulee ruskohiiltä ja ligniittiä. Ruskohiili on hiilen lajeista se, joka sisältää vähiten hiiltä (C) ja eniten happea (O). Sitä käytetään pelkästään sähköntuotannossa ja yleensä sitä löytyy lähellä maan pintaa. Kehittyneempiä hiilityyppejä, jotka ovat yleensä syvemmissä maan kerroksissa, ovat bituminoushiili (>70% hiiltä) ja antrasiitti (ainakin 92% hiiltä). Matalalaatuisiin hiililajeihin luokitellaan ruskohiili ja sub-bitumipitoinen hiili. Korkealaatuiset ovat bitumipitoinen hiili (esim. koksi ja antrasiitti, jotka sisältävät eniten hiiltä (C) ja vähiten vetyä ja happea. Arvioiden mukaan turpeen alkuperäinen volyyymi on noin kymmenen kertaa bitumipitoisen hiilen volyyymia suurempi (University of Kentucky 2012), toisin sanoin jokaisesta kymmenestä turpeen tonnista saadaan yksi tonni bitumipitoista hiiltä.

Noin 17 prosenttia maailman hiilestä on ruskohiiltä. Sub-bitumipitoisen hiilen osuus on noin 30 prosenttia ja sitä käytetään pääsääntöisesti sähköntuotannossa sekä teollisuuskäyttöön. Korkealaatuisten hiililajien osuus on 53 prosenttia, josta antrasiittia on vain yksi prosentti. Antrasiittia kulutetaan länsimaissa erityisesti kotikäyttöön. Kiinassa antrasiittia käytetään myös teollisuudessa. Bitumipitoisista hiilistä saadaan koksia, jota käytetään teräksen valmistuksessa. Bitumipitoista hiiltä käytetään myös sähköntuotantoon, betonin valmistukseen ja teollisuuskäyttöön. (World Coal Institute 2005).

Hiiltä louhitaan kahdella eri menetelmällä: maanalainen louhinta ja pintalouhinta. Pintalouhinta on nopeampi, halvempi ja tehokkaampi, mutta sen käyttöä rajoittavat varannon ominaisuudet.

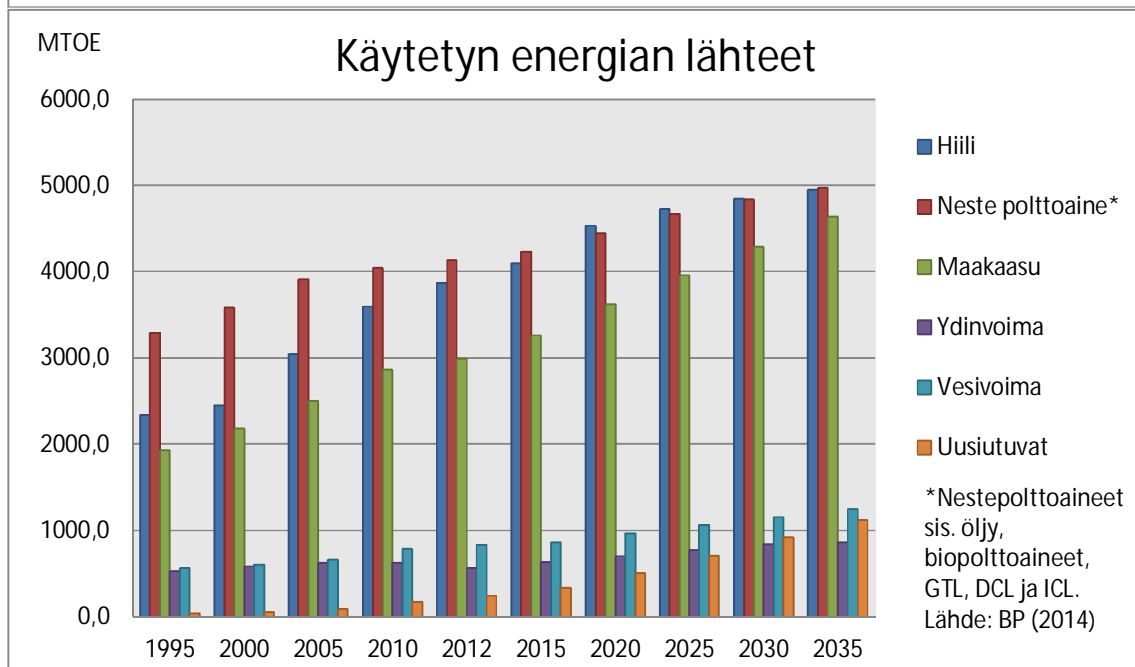
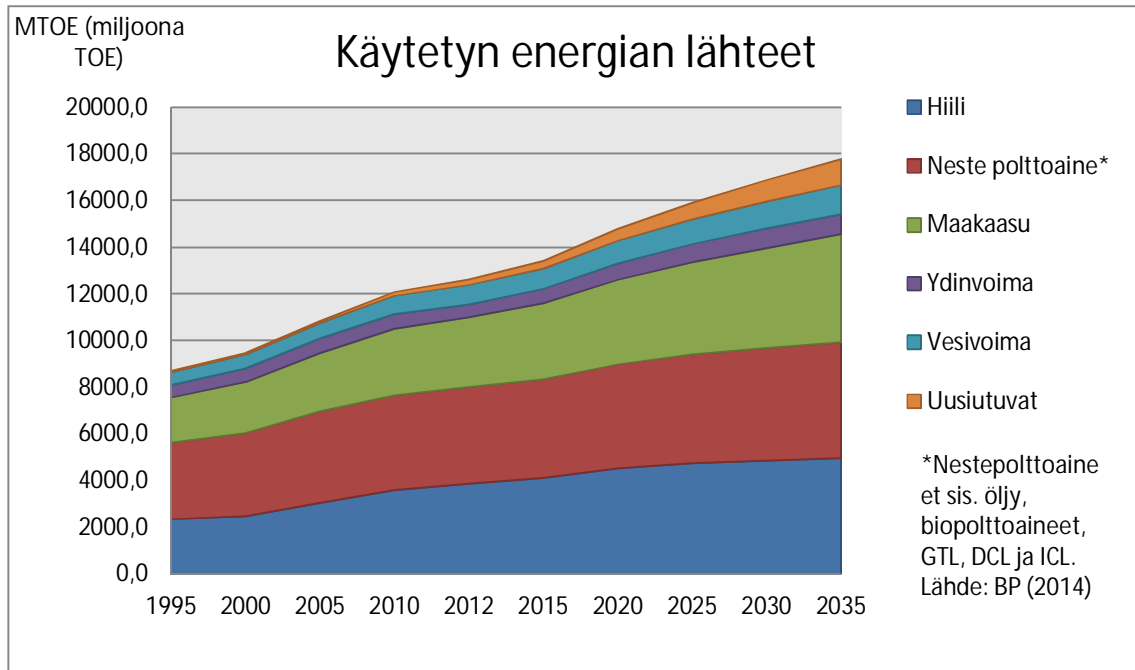
Pintalouhinta edellyttää, että varanto sijaitsee lähellä maan pintaa. Pintalouhinnassa jopa 90 prosenttia hiilestä hyödynnetään. Pintalouhinta tehdään räjäyttämällä ja poistamalla hiilen päällä olevia kivi- ja maaperäkerroksia, minkä jälkeen hiilivaranto on esillä. Hiiltä silputaan kerroksittain (World Coal Institute 2005).

Maanalaiseen louhintaan kuuluu kaksi tekniikkaa, joita voidaan kutsua kammiolouhinnaksi (*room-and-pillar mining*) ja kerroslouhinnaksi (*longwall mining*). Kammiolouhinnassa jätetään louhimatta pilareita, jotka tukevat kaivoksen tasoja muodostaen kammioita ja huoneita. Jopa 40% malmista jää louhimatta, vaikka osa siitä voidaan hyödyntää vetäytyessä, kun eri alueita voi antaa romahtaa. Kerroslouhinnassa kaivetaan ja hyödynnetään noin 100-350 metriä leveitä ja jopa kolmen kilometrin pituisia hiilikerroksia. Katon annetaan romahtaa sen mukaan kuin edetään tai sitä tuetaan tukipilareilla ja annetaan koko tason romahtaa vetäytyessä. Tällä tekniikalla voi hyödyntää yli 75 prosenttia malmista. Toisaalta alkuinvestointi on paljon korkeampi ja se vaatii tarkkaa tietoa alueen geologisista ominaispiirteistä ennen kuin työ voi alkaa (World Coal Institute 2005) (IEA 2011).

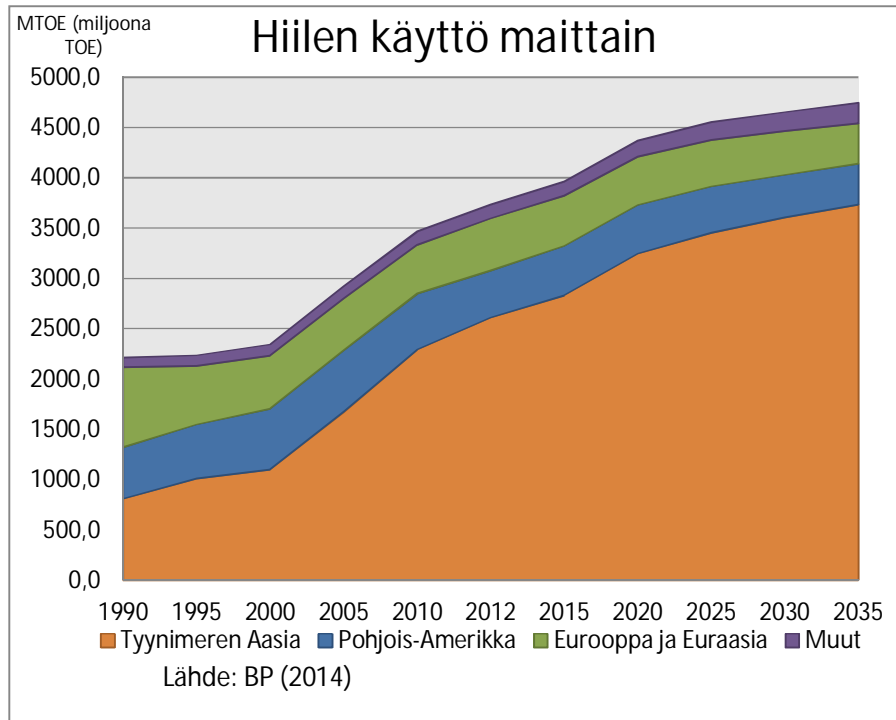
2.1. Hiilimarkkinat

Maailmassa hiiltä käytetään pääsääntöisesti sähkön- ja lämmöntuotannossa. Viimeisten 20 vuoden aikana hiilen osuus energiantuotannosta on pysynyt lähellä 27 prosenttia. Toisaalta viime vuonna se kohosi 29,9 prosenttiin, saavuttaen suurimman tason sitten vuoden 1970. Kasvu johtuu erityisesti Kiinan ja muiden Aasian ja Tyynenmeren alueen maiden kasvusta. Näissä maissa kivihiilen käyttö on kolminkertaistunut viimeisen 20 vuoden aikana ja sen osuus energianlähteistä on peräti 52 prosenttia. Vertailun vuoksi todettakoon, että Pohjois-Amerikassa vastaava luku on 17 prosenttia ja Euroopassa 21 prosenttia. Euroopassa ja Yhdysvalloissa hiilen käyttö energianlähteenä on hiipunut viime vuosina, mikä on auttanut jarruttamaan hiilen kulutusta maailman tasolla.

Vuoteen 2035 mennessä arvioiden mukaan 27 prosenttia energiasta on hiiliperäistä. Edelleenkin Aasian ja Tyynenmeren maissa sen osuus on jopa 45 prosenttia kun taas OECD maissa sen odotetaan supistuvan 14 prosenttiin (BP 2014).

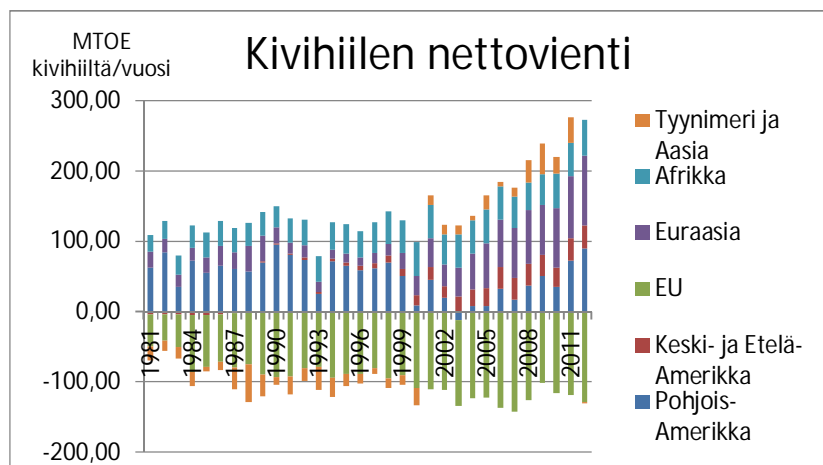


Hiilen käyttö on kasvanut viimeisen kymmenen vuoden aikana 4,4 prosenttia vuodessa, vaikka vuonna 2012 kasvu hiipui 2,5 prosenttiin (Liite 1: Energian kulutus lähteittäin). Siitä huolimatta kivihiili on edelleenkin nopeimmin kasvava fossiilinen polttoaine. Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa sen käyttöä on korvattu viime vuosina pitkälti maakaasulla ja uusiutuvilla energianlähteillä, silti Kiinan johdosta hiilen kokonaiskäyttö kasvaa nopeasti. Vuonna 2012 ensimmäistä kertaa Kiinan osuus hiilen käytöstä oli jo puolet maailman kulutuksesta (BP 2013). Vuoden 2035 maailman kokonaiskulutus on arvioiden mukaan 4743 miljoona öljykvivalenttitonniä (MTOE:a), eli noin 9700 miljoona tonnia hiiltä.



Tuotannon puolella Kiina on maailman suurin hiilen tuottaja 1825 MTOE:lla. Kiinan jälkeen toisena tulee Yhdysvallat 515,9 MTOE:lla (Liite 2: Energian tuotanto lähteittäin). Seuraavilla sijoilla ovat Australia, Intia ja Indonesia, joiden tuotanto on 230 ja 240 MTOE:n välillä. Vuonna 2012 maailman kokonaistuotanto oli 3845,3 MTOE:a kivihiiltä eli noin 7864,5 miljoona tonnia hiiltä. Maailman tuotanto kasvoi vuonna 2012 kaksi prosenttia, pääsääntöisesti Kiinan (+3,5%) ja Indonesian (+9%) tuotannon johdosta. Vastapainoisesti Yhdysvaltojen tuotanto tippui 7,5 prosentilla (BP 2013).

Vaikka Kiina on maailman suurin kivihiilen tuottaja, se on silti hiilen nettotuojia. Maailman suurin nettoviejä on Australia 191,81 MTOE:lla. Heti perässä on Indonesia 186,96 MTOE:lla. Tuonnin puolella suurin nettotuojia on EU, joka toi vuonna 2012 noin 128,6 MTOE:a. Samanlainen tuonti oli Japanilla. Seuraavia ovat Etelä-Korea, Intia, Kiina ja Taiwan.



Euroopan hiilimarkkinoilla hinnat ovat kasvaneet 1980-luvun lopun 40 dollarista tonnilta 100 dollarin per tonni keskiarvohintaan 2010-luvulla. Samanlainen kehitys on tapahtunut Yhdysvaltojen ja Aasian markkinoilla. Maailman markkinoiden keskiarvohinta on tällä hetkellä noin 100 dollaria per tonni, halvimman hinnan ollen Yhdysvaltojen (72,06 \$/tonni) ja korkeimman Japanin hinta (133,6 \$/tonni)². Suurin hinnanmuutos tapahtui vuonna 2008, jolloin Euroopassa hinnat kasvoivat 60 prosentilla, Yhdysvalloissa peräti 130 prosentilla ja Aasian markkinoilla 75 prosentilla (BP 2013). Joka tapauksessa hinnat laskivat merkittävästi vuonna 2009 finanssikriisin siirtyessä realitalouteen. Vuoden 2008 hintojen kasvun taustalla oli kulutushyödykkeiden hintojen nousu, Kiinan kasvava kysyntä, laivojen pulasta syntyneet kuljetuskustannukset, ongelmat Venäjällä ja Etelä-Afrikassa junakuljetuksissa sekä Australian pääkaivoksen Queenslandin vesitulvat (IEA 2011). Vuonna 2012 Euroopan markkinoilla höyryhiilen keskiarvoinen hinta oli 92,50 \$/tonni, Aasian markkinoissa (Japania lukuun ottamatta) hinta oli jopa 105,5 \$/tonni.

Varantojen kannalta on huomionarvoista, että toisin kuin öljyvarannot, hiilivarannot voivat kestää vielä ainakin sata vuotta nykyisellä louhintatahdilla. Pohjois-Amerikassa sijaitsee vajaa 30 prosenttia maailman todetuista varannoista. Euraasian mantereen varannot ovat peräti 36 prosenttia ja Tyynenmeren alueiden ja Aasian varannot muodostavat noin 30 prosentin osuuden maailman käytettävissä olevista hiilivarannoista. Lisää tietoa hiilivarannoista ja niiden odotetusta ehtymisestä löytyy Liite 4: Hiilivarannot.

3. Ongelman mallintaminen

3.1. Teoreettinen tausta ja kirjallisuuskatsaus

Harstadin malli perustuu yhteisresurssin analyysiin (*common-pool*). Yhteisresurssipeleissä itsenäisesti toimivat osapuolet käyttävät resurssia optimimäärää enemmän, mikä aiheuttaa kaikille haittaa, joka on suurempi kuin jos osapuolet päättäisivät yhdessä yhteisresurssin käytöstä. Yhteisresurssin ongelman esittämiseksi seuraan Harstadin ja Liskin esitystä aiheesta (Harstad & Liski 2012).

Jokaisen osapuolen (i) hyötyfunktio (U) on

$$U(x_i, z_i, s) = u(x_i, z_i) + v(s)$$

jossa z_i on resurssin käyttö, x_i on i :n käyttämä teknologia ja s on resurssin varannot. Resurssin varannot kehittyvät seuraavan kaavan mukaisesti

$$s = s_0 + \sum_I z_i$$

² Laskelmissa on jätetty pois Japanin koksen hinta. Japani tuo koksia, mutta sen hinta ei ole verrattavissa muiden hiililajien kanssa. Tekstissä käytetyt määrät ovat höyryhiilen hintoja.

Kun maksimoidaan kaikkien osapuolten yhteenlaskettu hyöty, optimissa saadaan, että jokainen osapuoli käyttää resursseja, kunnes oma rajahyöty vastaa kaikkien yhteenlaskettuja rajakustannuksia.

$$\frac{\partial u(x_i, z_i)}{\partial z_i} = n \frac{\partial v(s)}{\partial s}$$

Samalla teknologia asetetaan tasolle, jossa teknologian rajahyöty on nolla, eli

$$\frac{\partial u(x_i, z_i)}{\partial x_i} = 0$$

Kun jokainen osapuoli ottaa huomioon vain oman hyötynsä ja toimii itsenäisesti, osapuolet käyttävät resursseja, kunnes sen rajahyöty vastaa sen rajahaittaa osapuolelle itselleen. Tietysti käyttöaste on korkeampi kuin edellä mainitussa tapauksessa, jossa otettiin huomioon kaikkien rajahaitat:

$$\frac{\partial u(x_i, z_i)}{\partial z_i} = \frac{\partial v(s)}{\partial s}$$

Tässä tutkielmassa analysoin tilannetta, jossa maiden koalitio kärsii kaikkien maiden hiilipäästöistä. Liittoon kuulumattomat maat eivät ota huomioon hiilipäästöjen haittoja omassa hyötyanalyysissään. Näin ollen nämä maat saastuttavat optimia enemmän. Sen lisäksi liiton maat kärsivät hiilivuodon seurauksista, eli jos ne alentavat omaa kulutustaan, tasapainohinta laskee ja sen seurauksena muut maat kuluttavat enemmän. Samoin jos ne alentavat omaa tarjontaansa, hinta nousee ja muut maat tarjoavat enemmän hiiltä.

Yhteisresurssin ongelman keskeinen teoria on Coasen teoreema (1960), jonka mukaan ongelma voidaan ratkaista kaupankäynnillä. Haittoja kärsivien maiden kannattaa maksaa haittoja aiheuttaville valtioille, jotta nämä eivät harjoittaisi haitallista toimintaa. Optimissa maksuhalukkuus haittojen estämiseksi vastaa haittoja aiheuttavien tahojen rajahyötyä ja lopputulos on optimaalinen. Lisäksi Coasen mukaan tällaisia markkinoita pitäisi syntyä spontaanisti. Coasen teoreema toi uutta valoa kyseiseen ongelmaan, ja se onkin toiminut päästökaupan mekanismin teoreettisena perustana. Toisaalta Coasen teoreema edellyttää tiettyjä piirteitä, jotka tekevät sen toteuttamisesta käytännössä hankalaa. Coasen teoreeman mukaisesti sosiaalioptimin toteutumiseksi kaupassa ei saa olla transaktiokustannuksia, omistusoikeuksien tulee olla selkeästi määriteltäviä (Cooter 1982) ja sopimusten yleisesti sitovia. Tämän takia Coasen teoreeman käytännöllinen merkitys on asetettu usein kyseenalaiseksi tutkimuskirjallisuudessa, sen teoreettisesta tärkeydestä huolimatta. Erityisesti näin on ympäristöpolitiikassa, jossa omistusoikeudet ja valvonta sopimusten kunnioittamiseksi ovat luonteeltaan puutteellisia. Konkreettisesti päästöjen tapauksessa transaktiokustannukset ovat väistämättä olemassa, sillä päästöjen mittaaminen ja valvominen on kallista. Lisäksi päästöt tapahtuvat paikallisella tasolla, mutta vaikuttavat globaalisti. Sopimusten valvominen edellyttäisi jonkinlaista kansainvälistä valvojaa, mikä on tällä hetkellä utopiaa. Tämän takia voidaan todeta, että Coasen

teoreeman vastaisesti päästökaupat eivät synny luonnollisesti ilman ulkopuolista asian ajamista (Cooter 1982). Lisäksi nykyisessä poliittisessa tilanteessa maailmanlaajuinen sitoutuminen päästöjen alentamiseen lienee epärealistista.

Tämän johdosta kirjallisuudessa lähdetään useimmiten oletuksesta, että vain pieni koalitio maita on sitoutunut päästöjen alentamiseen ja pyrkii resurssien optimikäyttöön tästä näkökulmasta. Jos vain pieni koalitio maita sitoutuu korjaamaan luonteeltaan globaalisen ongelman, syntyy väistämättä vapaamatkustamista. Coasen teoreema ei voi toteutua, jos politiikan seurauksia kärsiviä osapuolia jää päätöksenteosta pois (Berck, Helfand & Maull 2003). Tässä viitekehyksessä keskeisin ongelma on hiilivuoto. IPPC määrittelee hiilivuodon hiilidioksidipäästöjen lisääntymisenä päästöjenalennuksen politiikkaa harjoittavien maiden ulkopuolella ympäristöpolitiikan seurauksena (IPCC: International Panel on Climate Change 2007). Erityisesti hiilivuodon takia voidaan todeta, että päästöjen kohdalla Coasen teoreema ei tuo sosiaalioptimia ja maiden kannattaa keskittyä vaikuttamaan omalla ympäristöpolitiikallaan tasapainoon ja savuttamaan toiseksi parhaan (*second best*) tasapainon. Tässä merkittävin löytö on Hoelin malli optimiympäristöpolitiikasta (Hoel 1994), jota analysoin syvemmin myöhemmin (ks. kappale 4.2). Hoelin malli silti voi johtaa tilanteisiin, jossa ympäristövaikutusten minimoimisen lisäksi koalitio pyrkii parantamaan omia kauppaehtojaan. Täten mailla voi olla kannustimia esittää omia protektionistisia tavoitteita ympäristösuojeluna (Liski & Tahvonen 2004), mikä aiheuttaa syvempää poikkeamaa sosiaalioptimista

Harstad (2010, 2012) täydentää Hoelin mallia lisäämällä siihen varantokauppamahdollisuudet. Vaikka päästöt ovat vaikeasti mitattavissa ja ilmakehän omistusoikeudet eivät ole selkeitä, ne syntyvät resurssista, joka alkuvaiheessaan (eli varannossa) on selkeästi jonkun omistuksessa ja helposti vaihdettavissa kaupankäynnin kautta. Varantokauppa siis mahdollistaa hiilivuodon estämisen, minkä johdosta sosiaalioptimi on toteutettavissa.

3.2. Mallin matemaattinen muoto

Oletetaan, että hiilimarkkinoilla toimii kahdenlaisia osapuolia: ympäristötavoitteisiin sitoutuneiden maiden koalitio (M) ja koalitioon kuulumattomia maita ($i \in N$).

Jokaisella maalla on omat hiilivarantonsa, joiden hyödyntäminen on kallista. Sen lisäksi maat voivat myydä tai ostaa hiiltä markkinoilta tasapainohinnalla p . Jos x_i on maan i :n kivihiilen tuotanto ja y_i sen kivihiilen kulutus, niiden ero on nettovienti/tuonti. Sen lisäksi liittoon kuuluvat maat ottavat huomioon hiilipäästöt ja muut maat eivät. Näin maiden hyötyfunktiot ovat

$$U_i = B_i(y_i) - C_i(x_i) - p(y_i - x_i), \quad i \in N \quad (1)$$

$$U_i = B_i(y_i) - C_i(x_i) - p(y_i - x_i) - H\left(\sum_{MUN} x_i\right), \quad i = M \quad (2)$$

Jossa B_i on kivihiilen käytöstä syntyvä hyötyä, C_i on louhimiskustannukset ja H päästöistä syntyvät taloudelliset haitat.

Näin ollen optimille olisi kaksi ehtoa: (i) tasapainokulutustasolla jokaisen maan rajahyödyn täytyy olla sama kuin muiden maiden rajahyöty ja (ii) koalitiolle rajahyödyn täytyy vastata kaikkien maiden hiilipäästöjen aiheuttamaa rajahaittaa plus omia rajakustannuksia. Näiden kahden ehdon lisäksi markkinatasapainoehdona on, että käytetyn määrän täytyy vastata louhittua määrää.

$$\sum_{M \cup N} x_i = \sum_{M \cup N} y_i$$

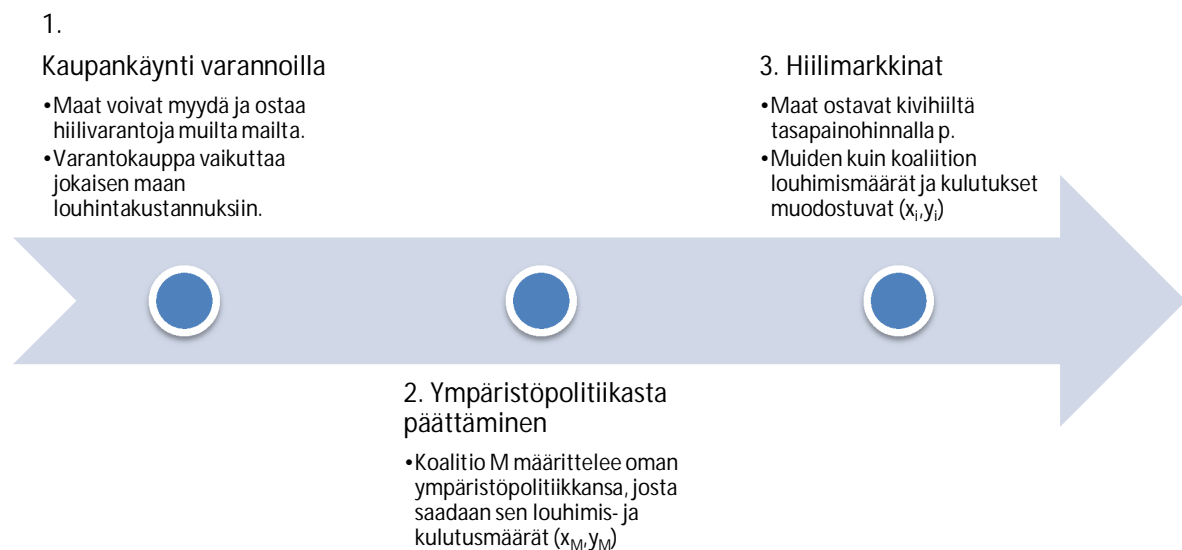
$$(i) B_i'(y_i^*) = B_j'(y_j^*)$$

$$(ii) B_i'(y_i^*) = C_i'(x_i^*) + H' \left(\sum_{M \cup N} x_i^* \right)$$

$$\forall i, j \in M \cup N$$

Mallissa on kolme pelivaihetta: kaupankäynti varannoilla, ympäristöpolitiikka ja hiilimarkkinat.

Kronologisesti ne toimivat niin kuin kuvassa 1.



Kuva 1: pelin vaiheet

3.2.1. Kaupankäynti varannoilla

Olkoon jokaisen maan louhimiskustannukset $C_i(x_i)$. Kustannusfunktio olisi luonnollisesti kasvava, sillä jos maan i tavoite on saada esimerkiksi määrä x_i , se louhisi ensin helpommin hyödynnettäviä hiilivarantoja ja vasta sen jälkeen kalliimpia varantoja. Toisin sanoen $C_i(x_i)$:n arvo on aina matalin kustannus, jolla voidaan tuottaa tietty hiilimäärä (x_i). Käytännössä $C_i(x_i)$ järjestää hiilivarannot louhimiskustannusten mukaisesti.

Otetaan esimerkiksi pieni hiilivaranto, joka sisältää $\Delta \equiv x_i'' - x_i'$ hiiltä, silloin sen kustannukset olisivat $c \equiv [C_i(x_i'') - C_i(x_i')]/\Delta$. c ei siis ole rajakustannus vaan marginaalisen varannon todelliset yksikkökustannukset. Jos M ostaa i :ltä tämän varannon louhimisoikeudet i :n kustannukset $C_i'(\cdot)$ siirtyisivät vasemmalle ja koalition kustannukset $C_M'(\cdot)$ oikealle. Näin ollen M voi tuottaa määrä x'' nyt halvemmalla ja i :lle tämän määrän tuottaminen tulee kalliimmaksi kuin ennen varannon kauppaa.

Varantojen kauppa loppuu vasta silloin kun ei ole olemassa enää kahta maata, jotka voisivat sopia hinnasta ja saada hyötyä varannon oikeuksien vaihtamisesta. Kappale 4.3 esittää, miten maat käyvät kauppaa tasapainossa.

3.2.2. Ympäristöpolitiikka

Niin kuin todettiin aikaisemmin, optimissa kokonaislouhimisen täytyy vastata kokonaiskäyttöä, eli

$$\sum_{MUN} x_i = \sum_{MUN} y_i \quad (3)$$

Tästä yhtälöstä voidaan erottaa coalition M osuus, eli

$$x_M + \sum_N x_i = y_M + \sum_N y_i \quad (4)$$

Hinnan muutokset varmistavat, että edellä mainittu yhtälö pätee. Tämä tarkoittaa, että koalitio (M) voi vaikuttaa tasapainohintaan ympäristöpolitiikallaan, eli päättämällä omasta louhimis- tai kulutusmäärästään.

3.2.3. Hiilimarkkinat

Hiilimarkkinat ovat pelin viimeinen vaihe ja tässä vaiheessa toteutuvat sekä hiilen käyttö että ympäristöhaitat M :lle. Maat optimoivat hyötyfunktionsa (2). Eli $i \in N$ kohdalla

$$U_i = B_i(y_i) - C_i(x_i) - p(y_i - x_i), \quad i \in N$$

Maat ostavat tai myyvät hiiltä hinnalla p sekä tuottavat ja kuluttavat omien preferenssiensä mukaan. M pystyy vaikuttamaan tasapainoon kahdella eri tavalla: (i) hiilivarantojen ostaminen ensimmäisessä vaiheessa siirtää omaa ja muiden kustannusfunktiota ja (ii) ympäristöpolitiikalla se pystyy vaikuttamaan tasapainohintaan, mikä vaikuttaa sekä hiilen louhimiseen että hiilen käyttöön. Toisin sanoen M voi vaikuttaa tasapainoon ja mahdollisesti toteuttaa optimaalisen politiikan myös ilman muiden maiden sitoutumista ympäristöpolitiikkaan. Toisaalta tässä mallissa muut maat ottaisivat myös huomioon M :n tavoitteet varantojen kaupassa huomaten kaupankäynnin vaikutukset hiilimarkkinoihin ja omaan loppuhyötyyn.

4. Pelin kulku

Pelin ratkaisemiseksi analysoidaan jokainen pelivaihe, mutta käänteisessä järjestyksessä, eli etsitään jokaisessa vaiheessa kunkin osapelin täydellinen tasapaino (*subgame perfect equilibrium*), joka kuvaa osapuolten käyttäytymistä jokaisessa pelin vaiheessa. Sitä varten jokaisessa vaiheessa oletetaan, että edellisen vaiheen päätökset on jo tehty ja ratkaistaan osapelin tasapaino niiden perusteella. Edellisessä vaiheessa huomioidaan tämän vaiheen päätösten vaikutukset tulevaan vaiheeseen ja näin ensimmäiseen vaiheeseen asti. Täten pelin ratkaiseminen alkaa viimeisestä vaiheesta.

4.1. Hiilimarkkinat

Kun maksimoidaan i :n ($i \in N$) hyötyfunktio hiilenkäytön (y_i) suhteen saadaan, että optimissa i kuluttaa hiiltä, kunnes sen rajahyöty vastaa hiilen markkinahintaa. Tästä voidaan saada i :n hiilen kysyntäfunktio hinnan suhteen.

$$B'_i(y_i) = p \Rightarrow y_i = B_i'^{-1}(p) \equiv D_i(p)$$

Samoin kustannusten puolelta saadaan tuotantofunktio. Oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi³, että $C'_i(x_i)$ -funktiolla on vain yksi tulos jokaiselle määrälle x_i . Näin ollen tarjontafunktio olisi

$$C'_i(x_i) = p \Rightarrow x_i = C_i'^{-1}(p) \equiv S_i(p)$$

Tasapainossa M :n nettotuonti (I) vastaa muiden maiden yhteenlaskettua kokonaisvientä, eli

$$y_M - x_M \equiv I = \sum_N S_i(p) - \sum_N D_i(p) \quad (5)$$

Toisin sanoen asettamalla oman kulutusmäärän tai louhimistavoitteet koalitio (M) pystyy vaikuttamaan kokonaiskulutukseen. M ottaa tämän huomioon päättäessä ympäristöpolitiikastaan (ks. 4.2)

³ Samat tulokset saadaan vaikka rajakustannusfunktio $C'_i(x_i)$ epäsingulaari (*nonsingular*), mutta yksinkertaisuuden vuoksi voidaan rajata analyysi tähän tapaukseen.

4.2. Ympäristöpolitiikka

Tässä vaiheessa M optimoi oman hyötyfunktionsa ottaen huomioon omien päätöstensä vaikutukset muiden maiden käyttäytymiseen.

Sekä M :n käyttämä hiilen määrä (y_M) että louhiminen (x_M) vaikuttavat hintaan. Derivoimalla i :n kysyntä- ja tarjontafunktiot hinnan suhteen nähdään miten i ($\in N$) reagoi hintamuutoksiin. Kun derivoidaan y_i hinnan suhteen, saadaan

$$dy_i = D'_i(p) dp \quad (6)$$

samoin louhiminen hinnan suhteen tuottaa

$$dx_i = S'_i(p) dp \quad (7)$$

Tiedetään myös, että

$$y_M - x_M = \sum_N S_i(p) - \sum_N D_i(p) \text{ , jossa } S_i = x_i \text{ ja } D_i = y_i$$

ja näin ollen

$$dy_M - dx_M = \sum_N dx_i - \sum_N dy_i$$

joten

$$dy_M - dx_M = \sum_N S'_i(p) dp - \sum_N D'_i(p) dp$$
$$\frac{dy_M - dx_M}{dp} = S'(p) - D'(p) \text{ ,} \quad (8)$$

$$\text{jossa } S'(p) - D'(p) = \sum_N S'_i(p) - \sum_N D'_i(p)$$

ja kun lasketaan (6) ja (7) jaettuna (8), saadaan i :n reaktio M :n ympäristöpolitiikkaan

$$\frac{dy_i}{dy_M - dx_M} = \frac{D'_i(p)}{S'(p) - D'(p)} \quad (9)$$

$$\frac{dx_i}{dy_M - dx_M} = \frac{S'_i(p)}{S'(p) - D'(p)} \quad (10)$$

Ottaen huomioon nämä vaikutukset, kun M maksimoi hyötyfunktionsa $U_M = B_M(y_M) - C_M(x_M) - p(y_M - x_M) - H(\sum_{M \cup N} x_i)$ saadaan

$$\begin{aligned}\frac{dU_M}{dy_M} &= B'_M(y_M) - \frac{H(y_M + \sum_N y_i)}{dy_M} - \frac{dp(I)}{dI} \frac{dI}{dy_M} (y_M - x_M) - p \\ &= B'_M(y_M) - \frac{H(y_M + D(p))}{d(y_M + D(p))} \frac{d(y_M + D(p))}{dy_M} - \frac{dp(I)}{dI} \frac{dI}{dy_M} (y_M - x_M) - p\end{aligned}$$

jossa $I=y_M-x_M$ ja vastaavasti $dI/dy_M=1$. Sen lisäksi, kun (8):n mukaan $dp/dI=1/[S'(p)-D'(p)]$, voidaan todeta, että

$$\begin{aligned}&= B'_M(y_M) - H'(y_M + D(p)) \left[1 + \frac{D(p)}{dp} \frac{dp}{d(y_M - x_M)} \frac{d(y_M - x_M)}{dy_M} \right] - (y_M - x_M)p' - p \\ &= B'_M(y_M) - \left[1 + \frac{D'(p)}{S'(p) - D'(p)} \right] H'(y_M + D(p)) - \frac{(y_M - x_M)}{S'(p) - D'(p)} - p\end{aligned}$$

ja kun tarkastellaan nollakohdassa, saadaan

$$B'_M(y_M) - p = \left[\frac{S'(p)}{S'(p) - D'(p)} \right] H'(y_M + D(p)) + \frac{(y_M - x_M)}{S'(p) - D'(p)} \quad (11)$$

Vastaavasti kun tehdään sama x_M :n suhteen, saadaan

$$p - C'_M(x_M) = \left[1 - \frac{S'(p)}{S'(p) - D'(p)} \right] H'(x_M + S(p)) - \frac{(y_M - x_M)}{S'(p) - D'(p)} \quad (12)$$

On huomattava, että tulos on sama kuin Hoelin samaa tulos (Hoel 1994) polttoaineiden hinnoittelusta, kun markkinoilla on vapaamatkustajia (tässä tapauksessa N). Hoelin analyysi jää silti lyhyeksi, sillä tämän vaiheen lopputulos onnistuu yhdenmukaistamaan hinnat, rajahyödyt ja rajakustannukset pelkästään liittoon kuulumattomien kohdalla. M :n kohdalla voidaan huomata, että niin kauan kun $H'(\sum_{M \cup N} x_i) > 0$ (eli aina jos M :lle koituu haittaa hiilen käytöstä) niin $B'_M(y_M) - p$ ja $p - C'_M(x_M)$ ovat positiivisia. Tämä siis tarkoittaa, että M ei ole optimissaan ja niin koalitio käyttää vähemmän hiiltä kuin sen määrän, joka olisi asettanut rajahyödyt hinnan tasolle. Vastaavasti M louhii vähemmän kuin optimissa, eli ympäristöpolitiikkansa asettamalla tasolla M :n rajakustannukset ovat alle maailmanmarkkinahinnan. Silti tämä politiikka maksimoi M :n hyödyt sen takia, että kuluttamalla vähemmän ja vähentämällä omaa louhimistaan se minimoi saastuttamista globaalisti.

Näiden ongelmien ratkaisemiseksi voidaan tässä vaiheessa tutkia, miten M :n tulisi toimia pelin ensimmäisessä vaiheessa eli varantojen kaupankäynnin vaiheessa.

4.3. Kaupankäynti varannoilla

Jotta kauppa syntyisi, $U_M + U_i$ täytyy olla isompi kaupan jälkeen. Seuraavan ehdon pitää täyttyä

$$\max\{0, c + H' - B'_M(y_M)\} + (x_i - y_i) \frac{\partial p}{\partial \Delta} > 0 \quad (13)$$

Analysoidaan hieman edellä olevaa ehtoa tarkastamalla kaksi mahdollista vaihtoehtoa: i omavaraisena ja i nettoviejänä tai -tuojana. Oletetaan aluksi, että kaupan jälkeen i olisi omavarainen (eli $x_i \approx y_i$). Silloin i ei ota huomioon tasapainohinnan muutoksia ($\partial p / \partial \Delta$) ja kauppa syntyy, jos $c \in (B'_M(y_M) - H', p)$ toisin sanoen, jos louhimiskustannukset ylittävät M :n koituvan rajahaitan sen käytöstä (tai rajahyödyn sen säästämistä) mutta ovat alle tasapainohinnan. Jos kustannukset olisivat alle M :n kärsimän rajahaitan, liiton ei kannata pyrkiä säästämään tätä varantoa. Samoin, jos kyseisen varannon louhimiskustannukset olisivat tasapainohintaa korkeampia, M :n ei kannattaisi ostaa varantoa, sillä i olisi itse säästänyt sen.

Jos kaupan jälkeen i ei olisi omavarainen, se olisi joko nettoviejä tai nettotuoja. Seuraavaksi analysoidaan molemmat vaihtoehdot.

- i viejänä ($x_i > y_i$)

Jos i on viejä, $(x_i - y_i) \frac{\partial p}{\partial \Delta}$ on positiivinen. Toisin sanoen i :lle maailmanmarkkinahinnan nousu on hyvä, sillä se myy tulevaisuudessa kalliimmalla. i tietää, että M aikoo säästää ostamiaan varantoja, minkä johdosta tasapainohinta nousee ja oman viennin arvo nousee. Jos $x_i \gg y_i$ kauppa on erityisen hyödyllinen molemmille. Samoin, jos varannon kustannukset c ovat korkeita, molemmat hyötyvät kaupankäynnistä, sillä i :lle louhiminen olisi ollut kallista ja M :lle varannon hiilivuotopotentiaali olisi ollut haitallista.

- i tuojana ($y_i > x_i$)

Tilanne on monimutkaisempi, jos i on tuoja. Silloin vaikka c olisi korkea tai M olisi ollut valmis maksamaan tämän varannon säästämistä, silti i ottaa huomioon tulevan hinnannousun ja voi päättää pitää varannon.

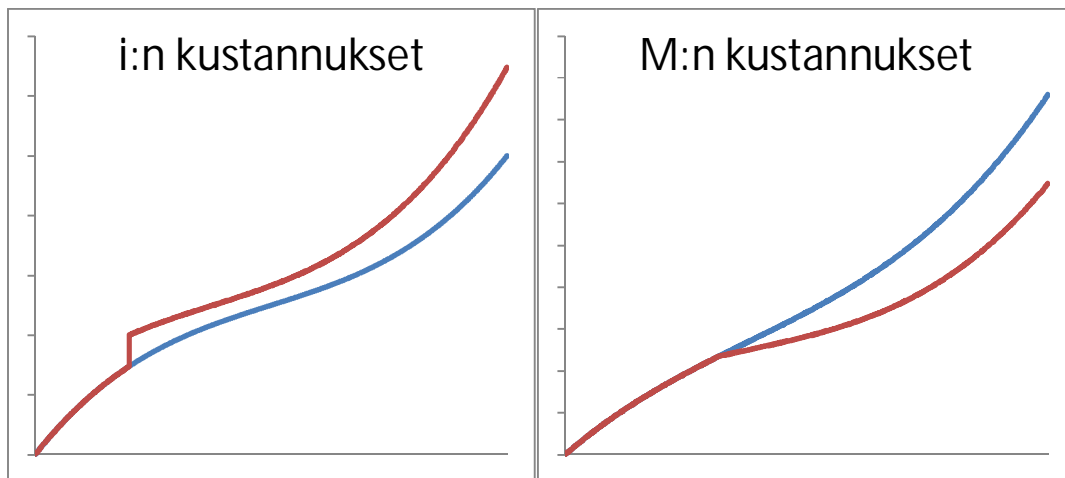
Seuraavassa kohdassa todistetaan, että tasapainossa i ei voi olla nettoviejä tai -tuoja vaan kaupankäynnin jälkeen se on omavarainen.

5. Tulokset

Tasapainolla on jokseenkin yllättäviä ominaisuuksia.

Ensinnäkin se, että tasapainossa joka ikinen maa on omavarainen, eli jokaisen maan kohdalla $x_i = y_i$. Tämä väite, joka voi kuulostaa yllättävältä, ei itse asiassa ole lainkaan yllättävää. Lyhyesti voidaan todeta, että tässä vaiheessa jokaisen maan kannattaa käydä kauppaa niillä määrillä, joita muuten olisivat ostaneet tulevaisuudessa. Sen lisäksi voidaan osoittaa, että vaihtoehto $x_i \neq y_i$ on teoriassa mahdoton. Olemme jo todenneet, että jos i olisi nettoviejä, se olisi valmis myymään M :lle ylimääräisiä varantojaan. Tämän johdosta i myisi M :lle varantoja, kunnes se ei ole enää nettoviejä. Vastaavasti, jos i olisi nettotuojaa, sen kannattaa ostaa varantoja muilta mailta, kunnes $x_i = y_i$. Näin ollen tasapainossa i ei voi olla viejä eikä myyjä, *Q.E.D.* Joka tapauksessa tämä ehto saattaa olla epärealistinen todellisilla markkinoilla. Myöhemmin todetaan, että tätä ehtoa voidaan heikentää ja silti saavuttaa optimaalinen tilanne (ks. Tasapainoehojen heikentäminen).

Toisena ominaisuutena tasapainossa on, että $S'_i(p) = 0, \forall i \in N$, toisin sanoen tasapainossa muiden maiden tarjontafunktio on paikallisesti joustamaton ja täten ne eivät lisää tarjontaansa hinnan noustessa (Kuva 2) tiettyyn raja-arvoon asti. Tämä perustuu siihen, että M ostaa marginaalisia varantoja eli ne varannot, joissa $c \approx p$ ja tasapainohinnalla i jättäisi louhimatta. Silti liiton kannattaa ostaa, sillä $H' > p - c \approx 0$. Tämä käytännössä tarkoittaa, että i :n kustannusfunktio $C'_i(x_i)$ on epäjatkuvuuspisteessä x_i ja näin ollen tarjontakäyrä on paikallisesti joustamaton (*locally inelastic*) kyseisessä pisteessä.



Kuva 2: i :n ja M :n louhimiskustannukset ennen kauppaa (sininen) ja kaupan jälkeen (punainen).

Näin ollen, jos liittoon kuulumattomien tarjontakäyrät ovat paikallisesti joustamattomia, hiilivuoto ei ole enää ongelma ja M voi vaikuttaa tarjontaan ja tasapainohintaan. M :n tulee ostaa ja pitää louhimatta niitä varantoja, jotka ovat kannattavia mutta haitallisia yhteiskunnallisella tasolla. Kun M toimii tällä tavalla se voi asettaa maailmanmarkkinahinnan niin, että saavutetaan sosiaalinen optimi. Toisin sanoen jokaisessa tasapainossa saavutetaan optimi. On silti tärkeä pitää mielessä, että kyseessä ei ole yksi tasapaino vaan joukko tasapainoja, sillä maat voisivat vaihtaa keskenään varantoja ja silti saavuttaa saman lopputuloksen.

Tasapainoehtojen heikentäminen

Aiemmin todettiin, että tasapainossa jokainen maa on omavarainen. Tämä ominaisuus, joka matemaattisessa mallissa toteutuu automaattisesti, tuskin pätee reaali maailmassa. Omistukseen voi liittyä muitakin tavoitteita, kuten esimerkiksi poliittista vastustusta varojen myymisestä ulkopuolisille tai ostajien huoli sopimusten kunnioittamisesta, mikä tekee omavaraisuudesta haasteellista.

Toisaalta tämä ominaisuus ei olekaan ehto tasapainon toteuttamiselle, vaan enemmänkin tasapainon piirre. Jotta tasapaino olisi optimissa riittää, että muiden maiden tarjontakäyrä on paikallisesti joustamaton eli $S'_i(p) = 0 \forall i \in N$, ja että M on omavarainen ($x_M = y_M$) tai muista syistä tasapainohinnasta riippumaton (esim. jos liitto on solminut etukäteen termiinin hiilen hinnasta). Tärkeintä siis on, että M :n ympäristöpolitiikka ei ole ristiriidassa oman edun kanssa, eikä M pyrkisi politiikallaan vaikuttamaan omiin kauppaehtoihinsa. Jos M on siis p :sta riippumaton ja muiden osapuolten kysyntäkäyrät ovat paikallisesti joustamattomia, M :n ympäristöpolitiikka

$$B'_M(y_M) - p = \left[\frac{S'(p)}{S'(p) - D'(p)} \right] H'(y_M + D(p)) + \frac{(y_M - x_M)}{S'(p) - D'(p)}$$
$$p - C'_M(x_M) = \left[1 - \frac{S'(p)}{S'(p) - D'(p)} \right] H'(y_M + D(p)) - \frac{(y_M - x_M)}{S'(p) - D'(p)}$$

kun $y_M - x_M = 0$ ja $S'(p) = 0$ muuttuu seuraavalla tavalla

$$B'_M(y_M) = p$$

$$p = C'_M(x_M) + H'(y_M + D(p))$$

koska kaikissa tasapainoissa $p = B'_i(y_i) \forall i \in N$ ja muistaen, että $y_M + D(p) = \sum_{M \cup N} x_i^*$ voidaan todeta, että sosiaalioptimi toteutuu, eli

$$(i) B'_i(y_i^*) = B'_j(y_j^*)$$

$$(ii) B'_i(y_i^*) = C'_i(x_i^*) + H' \left(\sum_{M \cup N} x_i^* \right)$$

$$\forall i, j \in M \cup N$$

Tällä ostopolitiikalla M voi vaikuttaa tasapainoon ja saavuttaa sosiaalioptimin. Ostamalla marginaalisia varantoja ja säilyttämällä osan niistä M voi estää hiilivuotoa, joka oli Hoelin mallissa (Hoel 1994) ratkaisematon ongelma. Näin M voi keskittyä tarjontapolitiikkaan, eikä sen tarvitse säännellä kysyntää. Tämän mallin saavutus on, että sillä voidaan toteuttaa sosiaalioptimia, vaikka

suurin osa maista jäisi liiton ulkopuolelle. Tällainen peliasettelu lienee todennäköisin skenaario nykyisessä kansainvälisessä poliittisessa ympäristössä.

6. Mallin soveltaminen käytännössä

Tähän asti on käsitelty tutkimusongelmaa hiileen näkökulmasta, mutta samaa mallia voidaan soveltaa esimerkiksi öljyyn, metsäteollisuuteen, kalastukseen, veden kulutukseen tai muihin vastaaviin resursseihin, joissa yksityisten osapuolten yhteisresurssien käyttö aiheuttaa haittaa kaikille osapuolille ja joissa kauppa varannoilla alkuvaiheessa olisi teoreettisesti mahdollista. Peliasettelu esitettiin yleisesti ottamatta kantaa mallin sisältämien funktioiden mahdolliseen muotoon. Seuraavaksi täydennän esitettyä mallia lisäämällä konkreettisia tapoja laskea hiilenkäytöstä syntyviä hyötyjä ja haittoja sekä hiilituotantokustannuksia. Tämän osion tarkoitus on toimia pohjana tuleville tutkimuksille, joissa esittämieni kaavojen muotoa tulisi kehittää luonnontieteiden, makrotaloustieteen ja maantieteen valossa.

6.1. Haitan mittaaminen

Tähän asti malli on ollut pääsääntöisesti staattinen, mutta hiilipäästöjen haitat tapahtuvat erityisesti tulevaisuudessa. Kun otetaan huomioon hiilenkäytön haitat, on tärkeä tarkastella niitä kokonaisuutena. Toisaalta osa hiilestä jää vaikuttamaan ilmakehään, mutta osa palaa maahan hiilen kiertokulun kautta (kuva 3). Tässä osiossa seuraan Reyer Gerlaghin ja Matti Liskin analyysiä hiilen hinnoittelusta (Gerlagh & Liski 2013; Gerlagh & Liski 2014). Täytyy silti ottaa huomioon, että heidän analyysinsä keskittyy Markovin tasapainoon, jossa tarkoitus on vaikuttaa jokaisen sukupolven päätöksiin. Tämän tutkimuksen mallin kannalta tämä ei ole tässä vaiheessa olennaista, sillä keskityn tulevien haittojen arvon huomioonottamiseen nykytilanteessa. Silti seuraan heidän artikkeliaan, sillä se yhdistää IAM:n (*Integrated Assessment Model*) DICE:n (*Dynamic Integrated Climate-Economy model*) lähestymistavan ympäristöön ja uskottavan analyysin ajan vaikutuksista. Gerlaghin ja Liskin artikkelissa on oman tutkimukseni kannalta erityisen kiinnostava heidän analyysinsä hiilidioksidin kiertokulusta ilmakehästä maailman ympäristösysteemin muihin osiin.

Kun halutaan sisällyttää ympäristövaikutusten haitat johonkin malliin, ensimmäinen haaste on se, miten tulevat haitat pitäisi hinnoitella. Ihmisten preferenssit painottavat nykypäivää paljon enemmän kuin tulevaisuutta. Muun muassa Nordhaus (2007) seuraa tätä mallia, jossa tulevat haitat diskontataan havaittavilla diskonttokoroilla, jolloin johtopäätöksenä saadaan, että tulevat ympäristöongelmat esimerkiksi 100 vuoden päästä ovat melko merkittävempiä nykyisyydessä (Nordhaus 2007). Toisaalta voidaan myös painottaa enemmän tulevia haittoja, jolloin saadaan melko päinvastaisia tuloksia. Esimerkiksi Nicholas Sternin raportin antama hiilen hinnan suositus on melkein 30 kertaa Nordhausin antamaa suurempi (Stern 2006). Gerlagh ja Liski vastaavat haasteeseen kehittämällä mallin, joka ottaa huomioon, miten diskonttokorko muuttuu riippuen siitä, analysoidaanko lähi- vai

kaukotulevaisuutta. Gerlaghin ja Liskin käyttävät samanlaista menetelmää kuin Nordhaus, mutta hyperbolisella diskonttokorolla. Heidän mallinsa on siis verrattavissa Nordhausin malliin, mutta silti pitkällä tähtäimellä tulokset lähestyvät Sternin saamia arvoja.

Gerlagh-Liski -malli toimii siten, että menneiden vuosien päästöt vaikuttavat tuotantoon. Muuntaen hieman heidän merkintätapaansa voidaan kirjoittaa ympäristöhaitat seuraavasti

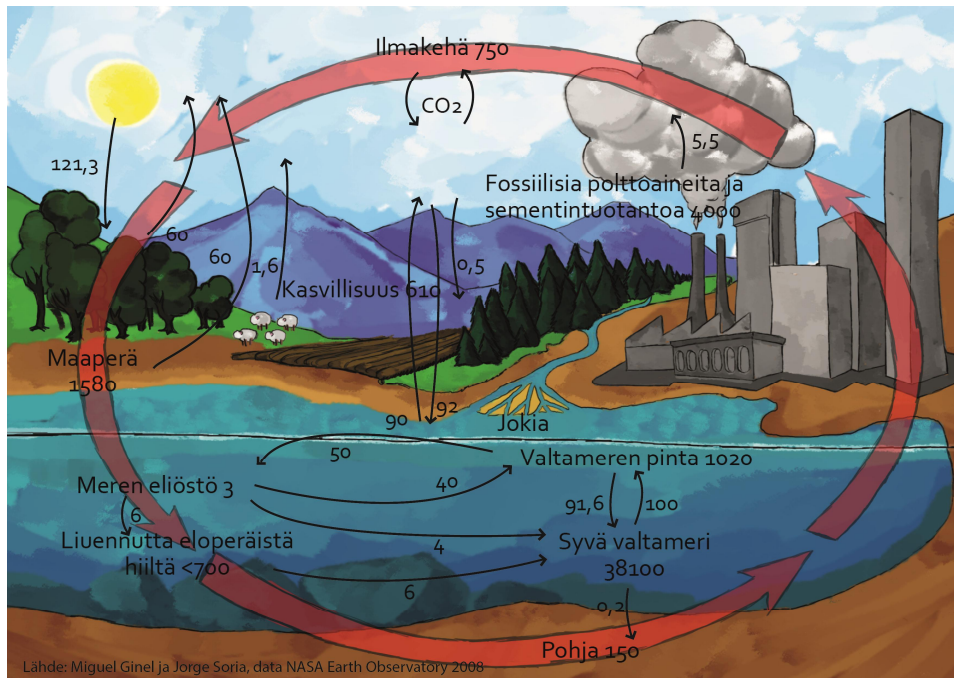
$$Y_t = K_t^\alpha A_t(e_t) \exp(-D_t)$$

$$D_t = \sum_{\tau=1}^t \theta_\tau z_{t-\tau}(x_{t-\tau})^4$$

jossa $e^{-\sum_{\tau=1}^t \theta_\tau z_{t-\tau}(x_{t-\tau})} \in (0,1)$ on päästöjen vaikutus talouteen. z_t kuvaa CO₂ -päästöjä, ja se on x_t :n funktio, niin että x_t on edelleen hiilen tuotanto, josta syntyy käytön takia päästöjä. Näin ollen D arvioi lämpötilan muutoksen entisten päästöjen perusteella. Jos $D \rightarrow \infty$ sitten $\exp(-D_t)$ lähestyy nollaa ja jos $D \rightarrow 0$ lämpötila säilyy ennallaan ($\exp(-D_t) = 1$) ja päästöillä ei ole vaikutusta talouteen. θ_τ on päästöjen haitat, siten että $\frac{d \sum_{\tau=1}^{\infty} \theta_\tau z_{t+\tau}(x_{t+\tau})}{dz_t(x_t)} = \theta_\tau$. θ_τ voidaan ymmärtää marginaalisena

lämpömuutoksena päästöyksikköä kohden. Sen muoto seuraa hiilen kiertokulkua (Kuva 3).

Ilmakehään päätyneistä päästöistä osa siirtyy pois ilmakehästä esimerkiksi kasvien ja bakteerien yhteyttämisen kautta. θ_τ :n muodon tulee sisältää tämä ilmiö.



Kuva 3: hiilen kiertokulku (varannot GtC, virrat GtC/vuosi)

⁴ Gerlaghin ja Liskin (2013) artikkelissa olevasta painovirheestä johtuen tässä käyttämäni kaava poikkeaa hieman heidän kaavastaan.

Tarkastellaan maapalloa suljettuna systeeminä, josta hiilipäästöt eivät pääse pois eikä maapallon ulkopuolelta tule lisää hiiltä. Lisäksi voimme jakaa maapallon hiilidioksidin varannot kolmeen osastoon: ilmakehä sekä pintavedet, syvät meret ja biomassa. Nämä kolme osastoa vaihtavat keskenään hiiltä hiili kierto kulkun mukaisesti. Esimerkiksi ilmakehän hiilidioksidia siirtyy pintavesiin, josta se ajan kuluessa siirtyy meren syvyyksiin. Toinen esimerkki on, että kasvit ottavat hiilidioksidia ilmakehästä ja muuttavat sitä eloperäiseksi materiaaksi siirtäen hiiltä ilmakehän osastosta biomassaan. Kierto toimii myös toisin päin, esimerkiksi hengittämisen kautta biomassasta lähtee jatkuvasti hiiltä ilmakehään.

Kun kivihiiltä käytetään päästöt menevät suoraan ilmakehään, josta ne pikku hiljaa siirtyvät systeemin muihin osiin. Näin ollen hiilen määrää systeemissä tietyssä vuotena voidaan kuvailla 3×1 matriisilla $L_t = (L_{1,t}, L_{2,t}, L_{3,t})$. $L_{1,t}$ kuvailee ilmakehän ja pintavesien hiilimäärät vuonna t , $L_{2,t}$ esittää biomassan hiilimäärää ja vastaavasti $L_{3,t}$ kuvaa merien syvyyksien hiiltä.

Ilmaston lämpenemisen kannalta meitä kiinnostaa ennen kaikkea ilmankehän hiilipitoisuus, eli se osuus $L_{1,t}$ joka löytyy ilmasta ottaen pois pintavedessä olevan osuuden. Tämän johdosta voidaan korjata kaavaa määrittelemällä ilmakehän osuus seuraavasti:

$$S_t = \frac{L_{1,t}}{1 + \mu} \quad (14)$$

Hiilen kokonaismäärä kehittyy vuodesta toiseen seuraavalla tavalla:

$$L_{t+1} = ML_t + bz_t$$

jossa M on 3×3 matriisi, joka kuvaa, miten hiili liikkuu yhdestä systeemin osasta toiseen. b on 3×1 matriisi, jonka kolme elementtiä (b_1, b_2, b_3) jakavat kyseisen vuoden (tai jakson) hiilipäästöt näiden kolmen osaston välille. Esimerkiksi jos kaikki päästöt jäävät ilmakehään $b = [1 \ 0 \ 0]$. Ominaisarvoilla voidaan muuttaa M -matriisi diagonaalimatriisiksi käyttämällä 1×3 Q -matriisia, joka koostuu ominaisvektoreista niin, että

$$Q^{-1}MQ = \Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \text{ ja voidaan määritellä } H_t = Q^{-1}L_t$$

Näin ollen voidaan todeta, että $H_{t+1} = Q^{-1}L_{t+1} = Q^{-1}(ML_t + bz_t) = Q^{-1}(MQH_t + bz_t)$ ja täten $H_{t+1} = \Lambda H_t + Q^{-1}bz_t$ jos määritellään $c \equiv Q^{-1}b$. Näin jos $q_{1,i}$ on Q -matriisin arvo, pintaveden ja ilmakehän hiilen määrän muuttamiseksi voidaan todeta, että (14):n mukaisesti

$$S_t = \frac{\sum_i q_{1,i} H_{i,t}}{1 + \mu} \quad (15)$$

ja täten $S_{i,t} = \frac{q_{1,i} H_{i,t}}{1 + \mu}$, joten $S_t = \sum_{i \in I} S_{i,t}$, jossa I on osastojen joukko. Jos määritellään $a \equiv$

$$\frac{q_{1,i}}{1 + \mu} c = \frac{q_{1,i}}{1 + \mu} Q^{-1} b \text{ ja } \eta_i = 1 - \lambda_i \text{ niin } S_{i,t+1} = (1 - \eta_i) S_{i,t} + a_i z_t.$$

a on matriisi, joka kuvaa miten uudet päästöt käyttäytyvät ilmakehässä. Esimerkiksi jos $a = (1, 0, 0)$ se tarkoittaisi, että uudet päästöt eivät poistu ilmakehästä, kun taas jos $a = (0, 0, 1)$, niin päästöt poistuisivat kokonaan ilmakehästä jakson aikana.

Tällä tavalla meillä on käytössä ilmakehän hiilidioksidimäärän systeemi, joka perustuu alkuperäisen systeemin ominaisarvoihin. Koska tiedetään, että hiili ei lähde systeemistä, on yhden ominaisarvoista oltava $\lambda_i = 1$ ja täten yhden systeemin osan $i \in I$ poistoluku η_i on nolla. Lisäksi tiedämme, mikä osuus päästöistä menee jokaiseen systeemin osaan (a_i), ja miten hiilipäästöt poistuvat niistä (η_i).

Kun meillä on tieto siitä, miten hiilidioksidi liikkuu osastoiden välillä ja päättyy/jää ilmakehään, voi laskea miten se vaikuttaa lämpenemiseen ja sen kautta aiheuttaa taloudellista vahinkoa.

Määritellään lämpötilan sopeuttamisluku ε , joka kuvaa kuinka nopeasti ilmakehänpäästöt vaikuttavat lämpötilaan ja sen kautta talouteen. Lisäksi voidaan likimääräisesti kuvata lämpenemisen ja vahingon yhteydet arvolla π , jonka arvo tulee lämpötilan riippuvuudesta hiilimäärästä tasapainotilassa $T = \varphi(S)$ ja lämpötilamuutoksesta syntyvistä vahingoista $D_t = \psi(T_t)$. Näin ollen voimme määritellä $D_t = \psi(\varphi(S_t))$ ja approksimoida vahingon riippuvuuden lämpötilamuutoksista $\pi \approx \psi'(\varphi(S_t))\varphi'(S_t)$

Nyt meillä on kaikki tarvittavat ainekset taloudellisen vahingon mallintamiseen seuraavasti

$$D_t = D_{t-1} + \varepsilon(\pi S_t - D_{t-1})$$

Edellä mainittiin, että

$$S_{i,t+1} = (1 - \eta_i) S_{i,t} + a_i z_t$$

ja täten

$$S_{i,t+1} = (1 - \eta_i)^t S_{i,1} + \sum_{\tau=0}^{t-1} a_i (1 - \eta_i)^\tau z_{t-\tau}$$

eli

$$S_{i,t} = (1 - \eta_i)^{t-1} S_{i,1} + \sum_{\tau=1}^{t-1} a_i (1 - \eta_i)^{\tau-1} z_{t-\tau}$$

Koska $S_t = \sum_{i \in I} S_{i,t}$ ja $D_t = D_{t-1} + \varepsilon(\pi S_t - D_{t-1})$ voidaan kirjoittaa D_t :n dynamiikka seuraavalla tavalla

$$D_t = (1 - \varepsilon)D_{t-1} + \varepsilon\pi S_t$$

ja näin ollen

$$D_t = (1 - \varepsilon)^2 D_{t-2} + (1 - \varepsilon)\varepsilon\pi S_{t-1} + \varepsilon\pi S_t$$

jos jatketaan sarjaa ensimmäiseen periodiin asti saadaan

$$D_t = (1 - \varepsilon)^{t-1} D_1 + \varepsilon\pi \sum_{\tau=2}^t (1 - \varepsilon)^{t-\tau} S_\tau$$

kun otetaan huomioon, että $S_t = \sum_{i \in I} S_{i,t}$ ja että jokainen $S_{i,t} = (1 - \eta_i)^{t-1} S_{i,1} + \sum_{\tau=1}^{t-1} a_i (1 - \eta_i)^{t-1-\tau} z_{t-\tau}$ D_t :n muodoksi tulee

$$D_t = (1 - \varepsilon)^{t-1} D_1 + \varepsilon\pi \left[\sum_{i \in I} \frac{(1 - \eta_i)^t - (1 - \eta_i)(1 - \varepsilon)^{t-1}}{\varepsilon - \eta_i} S_{i,1} + \sum_{i \in I} \sum_{\tau=1}^{t-1} a_i \frac{(1 - \eta_i)^\tau - (1 - \varepsilon)^\tau}{\varepsilon - \eta_i} z_{t-\tau} \right] \quad (16)$$

Jos analysoidaan hieman tätä kaavaa huomataan, että jokaisen vuoden vahinko perustuu ensinnäkin ensimmäisen periodin vahinkoon, joka vaikuttaa vuosi vuodelta vähemmän muuttumisnopeudella ε , lisäksi ensimmäisen jakson hiilipäästöt vaikuttavat sen mukaan, kun ne ovat siirtyneet osastosta toiseen ($(1 - \eta_i)^t$ ja kuinka paljon on jäljellä $((1 - \eta_i)(1 - \varepsilon)^{t-1})$ jokaisessa osastossa. Vahinko riippuu π :stä ja ε :stä. π kuvaa vahingon riippuvuuden lämpömuutoksista ja ε edellä mainitulla tavalla kuvaa millä nopeudella lämpötilamuutokset vaikuttavat lämpötilaan ja sen kautta talouteen. Esimerkiksi jos π olisi nolla se tarkoittaisi, että päästöillä ei ole vaikutusta ilmastoon. ε on aina nollan ja yhden välillä, jossa nolla tarkoittaisi, että lämpötila ei muokkautu hiilimääriin kun taas 1 tarkoittaisi, että lämpötila seuraa välittömästi hiilidioksidimäärää. Lopuksi voidaan huomata, että nykyinen tilanne riippuu alkuperäisestä hiilidioksidimäärästä $S_{i,1}$ ja sen jälkeen tulevista päästöistä $\sum_{\tau=1}^{t-1} z_{t-\tau}$.

Nyt mallia voidaan yksinkertaistaa merkittävästi olettamalla, että hiilen määrät ilmankehässä ennen teollisen ajan alkua vastaavat luonnollista tasapainoa, toisin sanoen, että niillä ei ollut positiivista eikä negatiivista vaikutusta talouteen vaan, että ne toimivat lähtötasona. Tällä oletuksella voimme korjata

mallin asettamalla, että ihmisperäiset päästöt ennen tätä kautta ovat nolla. Täten malli yksinkertaistuu seuraavaan

$$D_t = \varepsilon \pi \sum_{i \in I} \sum_{\tau=1}^{t-1} a_i \frac{(1 - \eta_i)^\tau - (1 - \varepsilon)^\tau}{\varepsilon - \eta_i} z_{t-\tau}$$

Nyt määrittelemällä $\theta_\tau = \varepsilon \pi \sum_{i \in I} a_i \frac{(1 - \eta_i)^\tau - (1 - \varepsilon)^\tau}{\varepsilon - \eta_i}$ voidaan kirjoittaa vahingot seuraavalla tavalla

$$D_t = \sum_{\tau=1}^t \theta_\tau z_{t-\tau} \quad (17)$$

Kun haluamme johtaa nykypäivän päästöjen marginaalihaitat tulevaisuuteen on helppo huomata, että

$$\frac{dD_{t+\tau}}{dz_t} = \theta_\tau = \sum_{i \in I} \varepsilon \pi a_i \frac{(1 - \eta_i)^\tau - (1 - \varepsilon)^\tau}{\varepsilon - \eta_i} \quad (18)$$

Täten voidaan arvioida kivihiilen käytön haitat yksikköä kohden. Tätä varten oletetaan kuten Gerlagh ja Liski (Gerlagh & Liski 2013) ja Nordhaus (2001), että tasapainon hiilimäärän kaksinkertaistuminen aiheuttaa 2,56 prosentin tuotantotappiot. Lisäksi käytetään Gerlagh-Liski mallia⁵ laskemalla 10 vuoden hiilikäytöstä syntyneet tuotantotappiot. Hiilen määrän pohjana käytän British Petroleumin arvioita (BP 2014), joiden mukaan vuonna 2012 hiiltä käytettiin 3865,7 miljoona TOE:ta (ks. Liite 1), lisäksi vuodesta 2012 vuoteen 2015 hiilen käyttö kasvaa vuosittain noin 1,98% ja kaksi prosenttia vuodesta 2015 vuoteen 2020. Oletetaan sitten, että vuosina 2012-2022 kasvu on kaksi prosentti vuodessa, eli koko kymmenen vuoden jakson kulutus olisi 42328,34 miljoona TOE:ta.

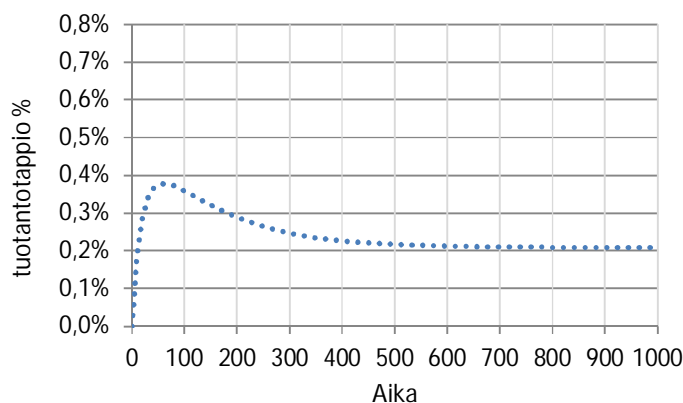
Päästöjen laskemiseksi käytän World Coal Instituten tietoja hiilen käytöstä (World Coal Institute 2005) ja EIA:n arvioita hiilen päästöistä käytön mukaan (Hong & Slatick 1994). Tästä saadaan, että jos n. 13% hiilestä käytetään terästeollisuudessa ja 87% energiantuotannossa hiilipäästöjen faktorina parhaiten toimisi, että miljoonan Btu:n käytöstä syntyy 207,505 paunaa hiilidioksidia⁶. Toisin sanoen 42328,34 miljoonasta hiilen TOE:sta syntyisi noin 0,1581 TtCO₂, mikä on suunnilleen 16% antropogeenisistä hiilidioksidipäästöistä 25 vuoden aikana. Tämä antaa arvion päästöistä louhinnan funktiona $z_t(x_t)$, jonka mukana päästöt $z_t = 3,74x_t$, jossa x_t on mitattu TOE:ina ja kerroin 3,74 on tonnia hiilidioksidia TOE:ta kohti. Niiden aiheuttama haitta on Gerlaghin ja Liskin mallin mukaan noin 0,023% tuotannosta. Vertailun vuoksi todettakoon, että 0,023 prosenttia vuoden 2013 maailmantuotannosta (International Monetary Fund 2014) edustaa 17 miljardin dollarin tappiot.

⁵ Saatavilla tästä: <https://www.dropbox.com/sh/q9y9112j311ac6h/dgYpKVvCMg>

⁶ 1 TOE hiiltä on suunnilleen 39,7 miljoona British thermal yksikköä (Btu), 1 punta on noin 0,454 kg. Laskelmissa käytän tarkkoja virallisia muuntokertoimia, edellä mainitut luvut ovat vain suunnan antavia.

Jos hiilipäästöjen kaksinkertaistaminen aiheuttaa 2,56% tuotantotappiot ja 10 vuoden kivihiihenkäytön päästöt aiheuttavat 0,023% tuotantotappiot saadaan vahingon haavoittuvuudeksi lämpömuutoksiin $\pi = 1,28\%$, joka on lähellä sitä arvoa, joka Gerlagh ja Liski (2012 ja 2014) esittävät artikkeleissaan etsiessään eri skenaarioiden keskiarvovaikutuksia.

Kuva 4 näyttää miten näiden laskelmien perusteella yhden teratonnin hiilidioksidin lisäys ilmakehään vaikuttaa talouteen tuhannen vuoden aikana



Kuva 4: tuotantotappiot 1 TtCO₂ lisäyksen seurauksena

Kuvio poikkeaa hieman Gerlaghin ja Liskin kuviosta (Gerlagh & Liski 2013) sen takia, että haavoittuvuuden π säätöarvot perustuvat 0,1581 TtCO₂ ja 2,13 teratonnin lisäyksen vaikutusten keskiarvoon, kun taas he käyttävät lisäysarvoina 1 TtCO₂ ja 2,13 TtCO₂. Päätin poiketa Gerlaghin ja Liskin menetelmästä sen takia, että tämän tutkimuksen tarkoituksena on laskea vahingot yksikköä kohden ja täten on järkevä käyttää lähtötasona pienempää päästölisäystä eikä 1 TtCO₂, joka vastaa 25 vuoden ihmisperäisiä päästöjä.

6.2. Hyödyt

Seuraavaksi voidaan analysoida hiilenkäytön hyötyjä. Sitä varten oletan, että jokaisen osapuolen päätavoite on maksimoida oman talouden tuottoa $Y_i, i \in M \cup N$. Tietysti tätä samaa ongelmaa voitaisiin tarkastella kuluttajan näkökulmasta niin, että maat maksimoivat kuluttajien hyötyfunktiot ($U_i(c_t)$), joissa kulutus on $c_t = Y_i + K_{i,t} - K_{i,t+1}$ tai $c_t = Y_i - K_{i,t+1}$ jos pääoman arvon poistuu kokonaan jakson lopussa. Käytän silti tuotantoa Y_i hyödyn mittarina sillä näin ei tarvitse antaa tiettyä muotoa kuluttajien hyötyfunktiolle, josta syntyyneen mallintamiseen liittyviä ongelmia.

Jokaisessa periodissa maa $i \in M \cup N$ tuottaa

$$Y_t = K_t^\alpha A_t (l_{y,t}, e_t)^{1-\alpha} \exp(-D_t)$$

Yksinkertaisuuden vuoksi voidaan eritellä haitat ja hyödyt niin, että

$$Y_t = K_t^\alpha A_t(l_{y,t}, e_t)^{1-\alpha} - (1 - \exp(-D_t))K_t^\alpha A_t(l_{y,t}, e_t)^{1-\alpha}$$

jossa $K_t^\alpha A_t(l_{y,t}, e_t)^{1-\alpha}$ on energiankäytön hyödyt ja $(1 - \exp(-D_t))K_t^\alpha A_t(l_{y,t}, e_t)^{1-\alpha}$ edellisen osion mukaisesti haitat.

Analysoidaan nyt tuotantofunktiota, jonka muoto seuraa Cobb-Douglas-funktion muotoa. $K_{i,t}$ on jokaisen ajanjakson pääoma ja sen kontribuutio on tuttuun tapaan $\alpha \in (0,1)$. $A_t(l_{y,t}, e_t)$ on työvoima-energia yhdistelmä, joka sisältää teknologian, ihmispääoman ja energian panokset talouteen niin, että ilman energia-työvoimapanosta ei synny tuotantoa ja vastaavasti ilman teknologiaa, energiaa ja ihmispänsästä tuotanto on nolla pääomasta riippumatta. A_t on energian (e_t) ja $l_{y,t}$ funktio, jossa $l_{y,t}$ on se osuus työvoimasta, joka on töissä energia-alan ulkopuolella. Energia on luonnollisesti energialähteiden ja energia-alan työvoiman funktio, eli $e_t = E_t(z_t, l_{e,t})$. Näin ollen kokonaistyövoima $l_t = l_{y,t} + l_{e,t}$. Energiefunktiossa z_t voidaan mitata edellisen osion tapaan esim. TOE:illa. Tässä vaiheessa on riittävä todeta, että A_t voisi mahdollisesti toimia Leontief-funktiona, jossa energia ja työvoima eivät ole substituutteja, eli $A_t = \min[A_{y,t} l_{y,t}, A_{e,t} e_t]$ (Gerlagh & Liski 2012) niin, että $A_{i,t}, i = (y, e)$ on jokaisen alan tuottavuus tietynä vuotena.

6.3. Tuotantokustannukset ja varannot

Kerran kun meillä on hyötyjen ja haittojen funktiot, puuttuvaksi palaksi mallin ratkaisemiseksi jää arvio tuotantokustannuksista. Tämä on ehkä haastavin osa tästä tutkimuksesta, sillä tarkkaa dataa hiililouhinnan kustannuksista on vaikeaa saada. Tämä perustuu luonnollisesti siihen, että tämä tieto on sisäpiiritietoa, jolla on taloudellista arvoa tuottajille. Tieto eri maiden tai yritysten hiilituotantokustannuksista toisi päättäjille tai kilpailijoille taloudellista etua. Tästä syystä on hankala kerätä luotettavaa tietoa kustannuksista. Jos joku taho haluaa panna käyttöön tämän mallin todellisuudessa se todennäköisesti joutuisi maksamaan tästä tiedosta. Tässä kontekstissa voi osoittautua hyvin ajankohtaiseksi Juan Pablo Monteron totuudenmukaista raportointia suosiva (*truthful reporting*) huutokauppan menetelmä (Montero 2008), jonka avulla päättäjät voivat saada toimijat paljastamaan omia kustannuksia. Monteron mallin *heikkoutena* on se, että tiedon saamiseksi *verottaja* joutuu luopumaan hyödystään, sillä huutokauppa toimii Vickrey-Clarke-Goves -menetelmän tavoin niin, että informaation julkistamisesta syntyvät hyödyt jaetaan takaisin informaation alkuperäisille omistajille. Silti mallin etuna on se, että jokaisen toimijan kannattaa raportoida omat todelliset kustannuksensa muiden käyttäytymisestä riippumatta eikä se edellytä toimijoilta tietoa muiden tuotantofunktioista. Valitettavasti tämän mekanismin yhdistäminen Harstadin malliin menee selkeästi tämän tutkielman ulkopuolelle.

Tuotantokustannusten arvioina käytän COALMOD-World mallin arvioita maailman tärkeimpien kivihiilikäivosten marginaalikustannuksista (Haftendorn, Holz & von Hirschhausen 2010).

COALMOD-World on malli, joka laskee tulevia kauppavirtoja hiilimarkkinoissa vuosille 2006-2030. Mallin avulla lasketaan markkinatasapaino, joka sisältää hintojen kehityksen, varantojen muutokset, tuotantopaikkojen siirrot maasta toiseen sekä investoinnit. Lisäksi malli sisältää arvion tärkeimpien hiilikäivosten rajatuotantokustannuksista täydentäen tämän tutkimuksen puuttuvan palan. Seuraava taulukko esittää eri kaivosten rajakustannukset ja tuotantokapasiteetit.

Taulukko 1: maailman tärkeimpien kivihiilikaivosten rajakustannukset

Maa	Tuottajat	leikkauspiste USD/t	kulmakerroin	kapasiteetti (Mt)	rajakustannus täystuotannolla
Yhdysvallat	Powder River Basin	6	0,02	491,62	15,8324
	Appalachian	21	0,09	102,64	30,2376
	Rocky Mountains	25,2	0,09	112,89	35,3601
	Illinois Basin	32,9	0,04	425,69	49,9276
Kolumbia		22	0,03	72,3	24,169
Venezuela		18	0,47	8,6	22,042
Puola		30	0,44	90	69,6
Ukraina	Ukrainan ja Venäjän Donets	10	0,36	45	26,2
Kazakstan	Kazakstan ja Ekibastuz	5	0,13	80	15,4
Venäjä	Kemerovo/Kuznets	5	0,09	170	20,3
Etelä- Afrikka		10	0,05	311,96	25,598
Intia	Pohjois-Intia	7,53	0,11	251,71	35,2181
	Orissa	4,5	0,14	77,33	15,3262
	Maharashtra	12,4	0,28	48	25,84
	Andhra Pradesh	12	0,5	40,16	32,08
Vietnam		10	0,43	35	25,05
Indonesia		13,8	0,07	170	25,7
Kiina	Shanxi, Shaanxi, Mongolia ja Hebei	5,2	0,03	1156,55	39,8965
	Liaoning, Jilin, Heilongjiang	15	0,05	205,56	25,278
	Henan, Shandong, Jiangxi, Fujian ja Jiangsu	20	0,04	417,72	36,7088
	Guizhou, Hunan, Chongqing ja Sichuan	20	0,05	306,55	35,3275
Australia	Queensland	18,3	0,24	57,07	31,9968
	New South Wales	24,5	0,19	89,95	41,5905
Mongolia		5,2	0,01	2,2	5,222
Mosambik		10	0,05	1	10,05

Kuva 5 näyttää, missä kyseiset kaivokset sijaitsevat. On huomattava, että suurin osa maailman kaivoksista sijaitsee Tyynenmeren alueella.



Kuva 5: tärkeimmät kivihiilikaivokset

Liite 4 sisältää lisää tietoa varannoista. Käytännössä kivihiilen varannot ovat sen verran isoja, että Aasiaa lukuun ottamatta muualla ei ole odotettavissa, että ne loppuisivat lähivuosina. Toisaalta Aasian ja Australian tuotanto on 66,3 prosenttia maailman tuotannosta, joten niiden loppuminen aiheuttaisi suuria muutoksia kivihiilen markkinoihin. Jos louhinta kasvaa BP:n arvioiden mukaisesti (BP 2014) Aasian varannot voisivat loppua jo vuonna 2050, jos louhinta pysyy nykytasolla ne kestäisivät ainakin 2065 asti (ks. BP (2013) ja omia laskelmia, liite 4). Vaikka tuotannosta 66,3 prosenttia tulee Tyynenmeren alueilta, niiden osuus maailman todetuista varannoista on vajait 30,88 prosenttia (22 prosenttia ilman Australiaa). Tämä tuo toivoa Harstadin mallille, sillä jos kuvitellaan esimerkiksi, että koalitioon kuuluisivat Australia, EU ja Yhdysvallat niillä on käytännössä jo vajaat 43 prosenttia todetuista varannoista ja vain 24,6 prosenttia tuotannosta, joten ainakin mallin omavaraisuusehtoa pitäisi olla helppo noudattaa.

7. Vastaavia mekanismeja ja mallin rajoitteita

Edellä on määritelty selkeästi malli ja toteutumistapa, joten seuraavaksi voidaan siirtyä analysoimaan vastaavia käytössä olevia malleja ja niiden pohjalta käydään läpi analyysin rajoja. Tämä kappale antaa pohjan seuraavalle, jossa mallia laajennetaan niin, että osa mallin ongelmista ratkaistaan sisältämällä ne itse malliin.

7.1. Käytössä olevia luonnonvarakaupan malleja

Harstadin mallin edellytykset voivat vaikuttaa jossain määrin epärealistisilta ja poliittisesti mahdottomilta. Kysymys kuuluu, voidaanko odottaa, että koalitio maita ryhtyisi ostamaan hiilivarantoja, joita liittoon kuuluvat maat eivät aio hyödyntää. Tosiaan tällainen järjestely edellyttää vahvaa sitoutumista hiilen ympäristöhaittojen pysäyttämiseen. Toisaalta jos nämä haitat ovat todellisia ja mitattavia, niistä kärsivien maiden kannattaa ehdottomasti toimia Harstadin mallin mukaisesti, sillä tällä mekanismilla koalitio optimoi omaa hyötyään. Hyötyanalyysin lisäksi vahvin argumentti Harstadin mallin puolesta on, että sen pääidea on ollut käytössä jo pitkään. Seuraavaksi esittelen

lyhyesti vastaavia hankkeita, joissa erilaisia julkisia tai yksityisiä tahoja ostavat luonnonvaroja tarkoituksena säilyttää niitä hyödyntämättä.

7.1.1. Conservation Reserve Program

Yhdysvalloissa toimiva ohjelma, joka syntyi 1956 Agriculture Act -lain yhteydessä. Vuonna 1956 Yhdysvallat perusti Soil Bank -ohjelman, jolla valtio maksaa maanomistajille, jotta he eivät viljelisi eroosiovaarassa olevia maita tiettyyn määrättyyn aikaan. Täten maanomistajilla on mahdollisuus tehdä sopimus Yhdysvaltojen valtion kanssa, jos viljelyn sijaan maatilalla kasvatetaan paikallisia eroosiota pysäyttäviä lajeja. Vuodesta 1985 alkaen Farm -lain seurauksena ohjelma kasvoi niin, että sopimusten tuli kestää 10-15 vuotta (Farm Service Agency 2014).

Mielenkiintoisena piirteenä tässä ohjelmassa on, että sen toimintatapa on yllättävän samanlainen kuin Harstadin malli. Ohjelmaan kuuluu vain marginaaliset maat, jotka tässä kontekstissa ovat ne maat, josta viljelystä syntyvän eroosion haitat ovat korkeita. Haitan kärsivät maksavat resurssin säilyttämisestä ja vetämisestä pois markkinoilta. Ero on tietysti siinä, että tässä ohjelmassa ei ole tarkoitus vaikuttaa sen enempää tietyn tuotteen tasapainohintaan tai -määrään, vaan pelkästään pitää kunnossa vaarassa olevia maa-alueita.

7.1.2. REDD, UN-REDD ja REDD+

REDD -ohjelmalla YK pyrkii pysäyttämään metsien hävittämisen kehitysmaissa. Ohjelma on ollut käytössä YK:n tasolla vuodesta 2008. Vuonna 2011 ohjelman kautta myönnettiin tukea 108,1 miljoonan euron edestä kehitysmaille (UN-REDD 2011). Ohjelmaan osallistuu 49 maata, joista 18 maassa toimii kansallinen metsien hävittämisen pysäyttämishjelma (UN-REDD 2009). REDD -ohjelman rahoituksen tarkoitus on tarjota metsän käyttäjille ja omistajille taloudellisesti kannattava vaihtoehto, jotta nämä tahot siirtyisivät pois metsän hyödyntämisestä. Tällä mekanismilla maat, jotka kärsivät biomassan vähentämisen haitoista voivat estää niitä pysäyttämällä metsän hävittämisen. REDD -ohjelma on esimerkki tilanteesta, jossa Coasen teorian mukaan (Coase 1960) ulkoisvaikutuksia voidaan estää tai alentaa optimaaliseen tasoon käymällä neuvotteluja osapuolten kesken. Tosiaan REDD -ohjelman liittyy monenlaisia sopimusongelmia, transaktiokustannuksia, valvonnan puutteita ja ongelmia omistusoikeuksien määrittelemisessä, jotka tekevät ohjelmasta haastavan (Alston & Andersson 2011). Nämä ovat tyypillisiä ongelmia Coasen ”määritä-ja-käy-kauppaa” (*cap-and-trade*) menetelmille ympäristöön liittyvissä tilanteissa (Pethig 1999). Toisaalta ohjelma on toiminut suhteellisen hyvin, osittain sen vuoksi, että rahaa on siirretty useimmiten metsän käyttäjille eikä omistajille, ja valvonta on ollut paikallista. Toinen kysymys, johon tämä tutkimus ei voi ottaa kantaa, on kuinka tehokas ohjelma on tai olisiko tehokkaampia tapoja saada sama tulos. Sitä huolimatta ohjelmaa jatketaan ja kehitetään yhä. Jos vertailemme REDD -ohjelmaa Harstadin malliin, jälkimmäisen etuna on se, että hiilivarannot ovat usein valtion omistamia ja niitä louhitaan valtion

valvonnan alla, joten omistusoikeusongelmat ja valvonnan kustannukset eivät ole merkittäviä esteitä mallin soveltamiseen.

7.1.3. Yleishyödyllisiä yhteisöjä

Toimijoiden joukossa on myös yleishyödyllisiä yhteisöjä, jotka keräävät varoja eri tahoilta ja käyttävät niitä luonnonvarojen säilyttämiseen ostamalla niitä ja vetämällä niitä pois markkinoilta. Seuraavaksi luettelen muutamia. Tietysti luettelo on rajallinen, joten keskityn vaikutusvaltaisimpiin niistä.

The Nature Conservancy

Vuonna 1951 perustetun The Nature Conservancy nimisen yleishyödyllisen yhdysvaltalaisen ympäristöjärjestön tarkoitus on ”antaa perinnöksi tuleville sukupolville kestävä maailma” ”säilyttämällä maa- ja vesivarat, josta kaikki elämänmuodot riippuvat”. The Nature Conservancy yhteisö muun muassa kerää rahaa ja ostaa maa- ja vesialueita sekä asettaa suojeltuja puistoja ja vesireservejä. Vuonna 2013 heidän ohjelmaansa kuului osallistuminen 81 000 km² metsän säilyttämiseen Australiassa, ensimmäisen Kiinassa olevan suojelupuiston avaaminen ja osallistuminen Meksikon ja Yhdysvaltojen neuvotteluihin Colorado -joen puhdistamisesta (The Nature Conservancy 2013). Sen lisäksi The Nature Conservancy on osallistunut kolmen osapuolen Debt-for-Nature swap (DFNS) -sopimukseen (Sheikh 2010).

WWF

Maailman luonnonsäätiö WWF on vuonna 1961 perustettu kansainvälinen ympäristöjärjestö. Sen toimintaan kuuluu erilaisia ympäristösuojeluun liittyviä ohjelmia, joiden joukossa on ollut alueiden ostaminen niiden säilyttämiseksi. Esimerkiksi Espanjassa 50-luvulla WWF:n perustajat tutustuivat Doñanan alueeseen ja huomasivat sen tärkeyden lukuisten lintulajien levähdyspaikkana Euroopan ja Afrikan välillä. 1960-luvulla WWF osallistui yhteistyössä hänen Francon hallituksen kanssa alueen ostamiseen ja vuonna 1969 perustettiin Doñanan luonnonpuisto, josta ajan myötä on tullut Espanjan suurin luonnonpuisto (Junta de Andalucía: Consejería de Medio Ambiente y ordenación del territorio. n.d.).

Vastaavan järjestelyn WWF järjesti Kongon demokraattisessa tasavallassa. WWF on myös toiminut osapuolena DFNS -sopimuksissa.

7.1.4. Debt-for-Nature Swaps (DFNS)

DFNS on Thomas E. Lovejoyn vuonna 1984 kehittämä idea (Thapa 1998). Sen tarkoitus on lunastaa kehitysmaiden velkoja, minkä vastikkeena maa sitoutuu jättämään hyödyntämättä tiettyjä luonnonvaroja. Ensimmäinen tämäntyyppinen sopimus oli Bolivian ja Conservation International -yhdistyksen välillä tehty järjestely vuonna 1987. Vuoteen 1993 mennessä 128 miljoona dollaria oli siirretty DFNS -muodossa. Niiden suosio on laskenut, ainakin Yhdysvalloissa Brady Plan -ohjelman

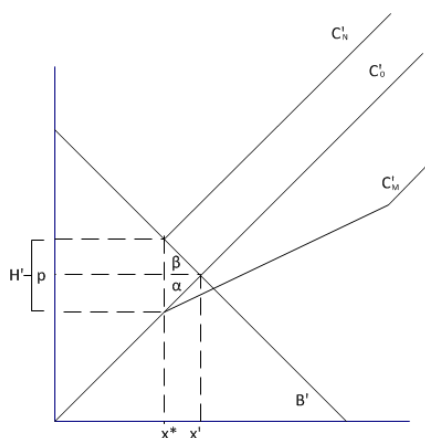
lopettamisen johdosta. Brady -ohjelman kautta oli mahdollista armahtaa osa lainojen arvosta ja muuttaa loppusumma myytäväksi arvopaperiksi. Ohjelman päätyttyä lainojen hinta jälkimarkkinoilla kasvoi, minkä takia niiden ostaminen ei ollut enää kannattava vaihtoehto ympäristöjärjestöille (Sheikh 2010). Tästä ja muista syistä viime vuosina DFNS:n merkitys on laskenut. Silti vuoteen 2010 mennessä niiden kautta oli armahdettu noin 1034 miljoonaa dollaria ja saajien joukossa oli 37 maata (Didia 2001).

7.2. Soveltamisen ongelmia

7.2.1. Vapaamatkustaminen

Barrett osoitti, että ilman varantokauppaa vain kolme maata osallistuu koalitioon tasapainossa (Barrett 2005). Niin kuin edellä mainittiin, yhteisresurssipelissä vapaamatkustaminen on iso ongelma myös niille, jotka kokevat haittoja suoraan. Kustannusfunktioiden ja haittojen suuruudesta riippuen osapuolten saattaa kannattaa odottaa, että muut liittoutuvat, jolloin ne itse hyötyvät ympäristöpolitiikasta kustannuksetta.

Ongelma ei täysin ratkea sillä, että voidaan käydä kauppaa hiilivarannoilla. Vaikka osallistujat saavat enemmän hyötyä varantokaupalla kuin ilman sitä (sillä ne voivat implementoida optimia), ostopolitiikan myötä koalition jäsenten kustannukset ovat suurempia ja vapaamatkustaminen tulee houkuttelevammaksi. Osallistuminen riippuu varantomarkkinoiden ominaisuuksista. Vain kaksi maata liittyy koalitioon, jos koalitio joutuu maksamaan jokaiselle osapuolelle kokonaan niiden hyvinvointitappion (alue $\alpha + \beta$ Kuva 6) tasapainossa. Toisaalta jos M korvaa vain hiilituottajien tappion, sen tulee maksaa vain alue α , jolloin hinta on pienempi ja kysyntä- ja tarjontakäyrien muodosta riippuen on mahdollista, että kaikkien osapuolten kannattaisi liittyä koalitioon.



Kuva 6: varantokauppa kun $C'_i = C'_j \forall i, j \in N \cup M$

7.2.2. Hiilenkäyttäjien liikkuvuus

Hoelin artikkelissa hiiltä käyttävien yritysten käyttäytyminen on suuri haaste ympäristöpolitiikalle. Jos koalitio toteuttaa onnistuneesti oman ympäristöpolitiikkaansa, hiilen hinta nousee jäsenmaissa. Näin

ollen liittoon kuulumattomille syntyy kilpailullinen etu (*competitive advantage*). Tämän johdosta ympäristöpolitiikka voi epäonnistua, sillä edellä mainitun hiilivuodon lisäksi hiili-intensiivisiä yrityksiä siirtyisi liittoutumattomiin maihin, mikä nostaisi hiilivuodon tasoa (Babiker 2005).

Harstadin malli onnistuu estämään tämän ongelman. Varantokaupan jälkeen maailmanmarkkinahinta on sama liittoon kuuluville ja kuulumattomille. Tämän johdosta hiili-intensiiviset yritykset eivät voi uhata poliittisia päättäjiä. Tämä, verrattuna Hoelin malliin, voi auttaa saamaan enemmän maita liittoutumaan.

7.2.3. Poliittisia haasteita

Mallin toteuttamiseksi on suuria poliittisia haasteita. Olen puhunut jo lyhyesti niistä, jotka koskevat koalitioon liittymistä. Niiden lisäksi varantokaupan vaiheessa voi todennäköisesti syntyä esteitä sopimuksille. Suurin niistä lienee hiiltä omistavien maiden haluttomuus myydä omia resurssejaan ulkopuolisille.

Toinen suuri haaste on sopimusten toimeenpano. Nykyisessä kansainvälisessä oikeusjärjestelmässä jokainen maa on suvereeni ja näin ollen muut maat eivät periaatteessa voi puuttua suvereenin valtion päätöksiin. Tämä käytännössä tarkoittaa, että sopimuksia maiden välillä voi olla hankala toimeenpanna tai valvoa. Myyjä saattaa rikkoa sopimuksia ja kansallistaa myytyjä varantoja jälkikäteen sen takia, ettei M louhi ostamiaan varantoja ja näin ollen varannoilla on edelleenkin arvoa. Tämän ongelman mallintaminen menee tämän tutkimuksen laajuuden ulkopuolelle, mutta lyhyesti voidaan todeta, että myyjän intressit rikkoa tai jättää noudattamatta sopimuksia kasvavat sitä mukaa kun louhimisteknologiat kehittyvät, hiilen hinta nousee tai ostajan sanktiomahdollisuudet ovat vähäisiä. Toisin sanoen ostajalla täytyisi olla mahdollisuus rangaista sopimusrikkureita sopimusten kunnioittamisen takaamiseksi. Yksi mahdollinen ratkaisu tähän ongelmaan on maksaa vuokraa, jolloin maksu suoritetaan jokaisen periodin alussa. Täten, ainakin kunnes vuokra ylittää louhimisen hyödyt, sopimusta kannattaa kunnioittaa.

7.2.4. Teknologisia haasteita

Niin kuin edellisessä osiossa tuotiin esille, teknologian kehittyessä sopimusten hyödyt laskevat. Jos teknologia on komplementaarinen hiilen käytölle, uuden teknologian seurauksena marginaalivarantojen hyödyntäminen tulee houkuttelevammaksi. Näin ollen myyjät voivat jättää myymättä varantoja, kun ne pitävät mahdollisena, että tulevaisuudessa niistä tulisi kannattavia varantoja.

Periaatteessa voidaan sanoa, että varannot kannattaa myydä heti, jos tulevien odotettujen voittojen nykyarvo on alle tarjotun hinnan. i :n kannattaa myydä, jos

$$c + H' - B'_M(y_M) + (x_i - y_i) \frac{\partial p}{\partial \Delta} > E_t \left[\frac{p_t - c \prod_{t=0}^{\tau} (1 - g_{i,t})}{\prod_{t=0}^{\tau} (1 + \beta_{i,t})} \Delta \right]$$

eli jos nykyinen varannon hinta on suurempi kuin odotettu hinnan ja kustannusten ero $(p_{t+\tau} - c \sum_{t=t}^{\tau} (1 - g_{i,t+\tau}))$ kertaan määrä (Δ) diskontattuna nykypäivään. $(1 - g_{i,t+\tau})$ kuvaa teknologian kehitystä, siten että kustannukset seuraavat $c_1 = (1 - g_0)c_0$ ja näin ollen, $c_t = c_0 \prod_{t=0}^{\tau} (1 - g_{i,t})$.

Tämä siis tarkoittaa, että varannon omistaja olisi valmis myymään, jos (i) teknologian kehitys on hidasta ($g \approx 0$), (ii) odotettu voitto on pieni ($E_t(p_t - c_t) \approx 0$) tai (iii) nykypäivän hyödyille annetaan enemmän painoa kuin tulevaisuuden hyödyille.

Toisaalta jos teknologia on vaihtoehtoinen hiilien käytölle, silloin vihreä paradoksi kääntyy tässä kontekstissa toisin päin. Näin maiden kannattaa myydä marginaalivarantoja jopa halvemmalla, sillä ne tietävät, että niiden arvo laskee teknologian kehittyessä päästöttömämpään suuntaan.

Lisäksi varantokauppa tuottaa myös ongelmia liittyen varantojen etsimisen kannustimiin. Varantokaupan takia liittoon kuulumattomien kannattaa investoida enemmän varantojen etsimiseen, sillä vaihdannan kautta inframarginaalivarannoistakin on mahdollistaa hyötyä.

8. Mallin laajentaminen

Tähän asti teksti on keskittynyt mallin yksinkertaisempaan versioon, joka yksinkertaisuudestaan riippumatta tuottaa selkeitä ja suoraviivaisia tuloksia. Yksinkertaisuuden epäkohtana on, että mallin ulkopuolelle jää monia tekijöitä, jotka reaali maailmassa pitäisi huomioida. Seuraavaksi esitetään Harstadin esittämiä laajennuksia (Harstad 2012, kohta IV), joiden avulla voidaan sisällyttää malliin investointi vihreään teknologiaan, monikertainen aika, erilaisia polttoaineita ja mahdollisuus siitä, että myös osa liittoon kuulumattomista valtioista kärsisi päästöjen seurauksista.

8.1. Teknologia

Kappaleessa 7.2.4 esitettiin teknologiaan liittyviä ongelmia. Osa niistä voidaan välttää sisällyttämällä malliin teknologian kehitys endogeenisena tekijänä. Malli voidaan laajentaa niin, että teknologia toimii polttoaineen substituuttina. Näin ollen investoinnit alentavat polttoaineen tarvetta laskemalla päästöjä. Teknologiana voi käytännössä toimia mikä tahansa tapa saada aikaan enemmän energiaa tuottamatta ylimääräisiä päästöjä. Se voi olla esimerkiksi sähkövoimaloiden tehostaminen niin, että sähkön hiilijälki laskee, tai siirtyminen aurinkopaneelisiin, joilla saadaan päästötöntä energiaa.

Nimetään teknologiaan investointi r_i , $i \in M \cup N$ ja investoinnin kustannukset $k_i(r_i)$ niin, että k on konvekssi ja $k'_i(r_i), k''_i(r_i) > 0$. Sen takia, että r toimii polttoaineen substituuttina, hyötyfunktio muuttuisi seuraavaan muotoon: $\tilde{B}_i(y_i + r_i)$, jossa y on edelleen maan polttoainekulutus.

Käymällä uudestaan pelin vaiheet voidaan todistaa, että kaikissa varantokaupan tasapainoissa lopputulos on optimaalinen ja tasapaino vastaa yksinkertaisen pelin tasapainoa, niin kuin seuraavaksi todetaan.

Ensinnäkin huomataan, että jos maa $i \in M \cup N$ ei voi vaikuttaa teknologian hintoihin, teknologia asetetaan tasolle, jossa sen rajahyödyt ja rajakustannukset kohtaavat, eli

$$\tilde{B}'_i(y_i + r_i) = k'_i(r_i)$$

Koalitio asettaa r_M tämän mukaan. Tämän sivutuloksena koalition polttoainekulutus laskee, mikä alentaa tasapainohintaa p . Joka tapauksessa koalition kannattaa asettua teknologia tälle tasolle, sillä ympäristöpolitiikan vaiheessa (toinen pelivaihe) se pystyy asettamaan p optimaaliseen tasoon. p :n laskun vaikutus koalitioon kuulumattomiin riippuu siitä, ovatko ne ryhmänä nettotuojia vai -veijä. Jos koalitio M on nettotuojia, se tarkoittaa, että loput muodostavat nettoviejänä toimivan ryhmän ja toisin päin. Näin ollen, jos M on tuoja, p :n lasku on haitallista muille. Vastaavasti jos M on nettoviejä, p :n lasku on hyvä muille, sillä ne voivat tuoda matalammalla hinnalla. Koska M ei sisäistä tätä efektiä, voidaan todeta, että r_M on yhteiskunnan näkökulmasta optimaalista suurempi M :n ollessa nettotuojia ($x_M - y_M < 0$) ja optimaalista pienempi M :n ollessa nettoviejä ($x_M - y_M > 0$).

Seuraavaksi voidaan analysoida, onko $r_i (i \in N)$ optimaalisella tasolla. i :n teknologian päätöksen vaikutus hintoihin ei ole yhteiskunnan näkökulmasta tärkeää, sillä nettona sen efekti on nolla. M :n kohdalla tilanne on toinen, sillä M :n ympäristöpolitiikka vaikuttaa tasapainoon kokonaisuuteen, kun taas i :n aiheuttama vaikutus kauppamääriin hintojen kautta tuo hyötyä tietyille ja tappiota toisille, mutta päätöksen vaikutukset kumoutuvat keskenään. i :n päätöksellä on hinnan muutoksen seurauksena vaikutus tarjontaan, jos tarjonta on joustava. Näin jos teknologian johdosta i kuluttaa vähemmän ja hinnat laskevat, tarjottu määrä laskee ja päästöt laskevat, josta M saa hyötyä. Koska M :n hyöty ei siirry i :lle, tämä ei ota tätä efektiä huomioon päättäessään, minkä johdosta $r_i (i \in N)$ on optimia pienempi, kun $S'(p) > 0$ (eli kun tarjonta on joustavaa).

i :n päätöksen vaikutus M :lle on

$$\frac{\partial U_M}{\partial r_i} = \frac{\partial B_M(y_M + r_M)}{\partial r_i} - \frac{\partial C(x_M)}{\partial r_i} - \frac{\partial p (y_M - x_M)}{\partial r_i} - \frac{\partial H(\sum_{i \in N} x_i)}{\partial \sum_{i \in N} x_i} \frac{\partial \sum_{i \in N} x_i}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial r_i}$$

jossa ensimmäiset kaksi termiä ovat nolla ja $\sum_{i \in N} x_i = S(p)$

Näin olleen yhtälöstä tulee

$$\frac{\partial U_M}{\partial r_i} = -(y_M - x_M) \frac{\partial p}{\partial r_i} - H'(\cdot) S'(p) \frac{\partial p}{\partial r_i} \quad (19)$$

Jotta saataisiin i :n teknologian vaikutus hintaan, voidaan laskea sen osat erikseen:

Ensinnäkin hinnan tulee vastata rajahyötyä ja näin ollen

$$\bar{B}'_i(y_i + r_i) = p$$

joten

$$(dy_i + dr_i)\bar{B}''_i(p) = dp \Rightarrow dy_i = \frac{dp}{\bar{B}''_i(p)} - dr_i \quad (20)$$

samoin tarjonnan puolella, jos

$$S_i(p) = x_i$$

sen derivaatta on

$$dx_i = S'_i(p)dp \quad (21)$$

lopuksi markkinan tyhjentämisehdosta (*market clearing*) saadaan

$$dy_i = \sum_{j \in N} dx_j - \sum_{j \in N \setminus i} dy_j \quad (22)$$

Yhdistämällä (20), (21) ja (22) saadaan

$$\frac{dp}{\bar{B}''_i(p)} - dr_i = \sum_{j \in N} S'_j(p)dp - \sum_{j \in N \setminus i} \left(\frac{dp}{\bar{B}''_j(p)} - dr_j \right)$$

asettamalla $dr_j = 0 \forall j \in N \setminus i$ saadaan

$$\frac{dp}{\bar{B}''_i(p)} - dr_i = dp \left[\sum_{j \in N} S'_j(p) - \sum_{j \in N \setminus i} \frac{1}{\bar{B}''_j(p)} \right] \quad (23)$$

ja sisällyttämällä $\bar{B}''_i(p)$ summakaavaan saadaan

$$-dr_i/dp = \left[\sum_{j \in N} S'_j(p) - \sum_{j \in N} \frac{1}{\bar{B}''_j(p)} \right]$$

tästä seuraa, että i :n teknologian vaikutus M :n kokonaishyötyfunktioon on

$$\frac{\partial U_M}{\partial r_i} = \frac{(y_M - x_M)}{\left[\sum_{i \in N} S'_i(p) - \sum_{i \in N} \frac{1}{B''_i(p)} \right]} + H'(\cdot) \frac{S'(p)}{\left[\sum_{j \in N} S'_j(p) - \sum_{i \in N} \frac{1}{B''_i(p)} \right]} \quad (24)$$

Jälkimäinen osa on i :n teknologian vaikutus ympäristöhaittaan. Se on positiivinen, sillä teknologian seurauksena i tuottaa vähemmän päästöjä, minkä takia M :n kärsimä haitta laskee. Ensimmäinen osa on i :n teknologian johdosta syntyneen kysynnän laskun vaikutus hintaan M :n näkökulmasta. Tämän osan merkki riippuu siitä onko M tuoja vai viejä. Jos $(y_M - x_M) > 0$, M on nettotuojaja ja vaikutus on positiivinen. Toisaalta jos M on viejä, vaikutus on tältä osin negatiivinen. Toisin sanoen i :n kehittämällä teknologialla on M :n näkökulmasta hyvä efekti ympäristöhaittojen kannalta, mutta negatiivinen efekti M :n vientitulojen kohdalla. Pahimmassa tapauksessa M voisi jopa pyrkiä estämään i :tä kehittämästä vihreää teknologiaa, jos sen nettovienti ($-I$) olisi yhtä suuri kuin rajahaitat kertaa N :n kokonaistarjonnan derivaatta. Muissa tapauksissa M :n kannalta i :n teknologian kehitys on positiivinen ja M toivoisi, että i investoisi enemmän vihreään teknologiaan.

Nyt voidaan tutkia kaksi vaihtoehtoa riippuen siitä, tapahtuuko investointi ennen tai jälkeen M :n ympäristöpolitiikkaa. Jos investointi vihreään teknologiaan tapahtuu ennen kuin M päättää määräistään (ja sen johdosta hinnoista), M seuraa perusmallin tapaan Hoelin esittämää politiikkaa (Hoel 1994). Tämä on helppo huomata jos ajatellaan, että tässä vaiheessa r_i on upotettu kustannus. Tästä seuraa

$$y_i = D_i(p) = \tilde{B}_i^{-1}(p) - r_i \text{ ja } \frac{\partial y_i}{\partial p} = D'_i(p) = \frac{1}{\tilde{B}_i''(y_i + r_i)}$$

ja (24) mukaan

$$\frac{\partial U_M}{\partial r_i} = \frac{(y_M - x_M)}{\sum_{i \in N} [S'_i(p) - D'_i(p)]} + H'(\cdot) \frac{S'(p)}{\sum_{i \in N} [S'_i(p) - D'_i(p)]}$$

eli

$$\frac{\partial U_M}{\partial r_i} = \frac{(y_M - x_M)}{S(p) - D(p)} + \frac{S'(p)}{S(p) - D(p)} H' \quad (25)$$

mikä vastaa (11):n oikeapuolta (RHS). Toisin sanoen⁷

$$\frac{\partial U_M}{\partial r_i} = \tilde{B}'_M(y_M + r_M) - p$$

⁷ Harstadin (2012) artikkelissa tämän yhtälön kohdalla on painovirhe. Huomatessa tekijä otti yhteyttä Harstadiin, joka vahvisti, että sen tulisi olla yllä olevassa muodossa.

Ja näin ollen M hyötty i :n teknologian kehityksestä ja olisi valmis maksamaan, jotta i investoisi enemmän⁸.

Nyt jos investointi tapahtuu vasta silloin kun koalition politiikka on määritelty, M :n politiikka vaikuttaa suoraan investointiin. Nostamalla hintoja M luo kannusteita investoida vihreään teknologiaan. Samalla logiikalla kuin edellisessä esimerkissä todetaan, että

$$y_i = D_i(p) = \tilde{B}_i'^{-1}(p) - r_i \quad (26)$$

mutta tässä tapauksessa i voi päättää r_i :sta, joten se asettaa sen optimitasoon. Tietysti teknologiaan kannattaa investoida kunnes sen rajakustannus vastaa hiilen rajahyötyä, eli kunnes $p = k_i'(r_i)$. Näin ollen kysynnän derivaatasta p :n suhteen tulee

$$\frac{dy_i}{dp} = D_i'(p) = \frac{1}{\tilde{B}_i''(y_i + r_i)} - \frac{1}{k_i''(r_i)}, \quad \text{jossa } \frac{1}{k_i''(r_i)} \text{ on } (\partial p / \partial r_i)^{-1}$$

Nähdään siis, että molemmissa tapauksissa M seuraa samaa politiikkaa kuin perusmallissa. Erona on, että i :n tarjonta on joustavampi, mikäli investointi tapahtuu politiikan jälkeen. Täten, jos M päättää politiikastaan ennen kuin investointi tapahtuu, sen kannattaa asettaa korkeampi hinta, jolloin muiden maiden hiilenkulutus (y_i) laskee ja investointi vihreään teknologiaan (r_i) kasvaa. Sen sijaan jos muiden maiden kulutus laskee, M :n täytyy joko louhia vähemmän tai kuluttaa enemmän, koska optimaalinen politiikka on riippuvainen maiden kysynnästä. Näin M tuottaa vähemmän hiiltä, ja muut maat keskittyvät kehittämään omaa teknologiaa (r_i). Toisaalta kerran kun muut maat ovat investoineet, M :n ei enää kannata ottaa huomioon muiden maiden teknologiaa vaan sen kannattaa muuttaa oma politiikka sellaiseksi, niin kuin jos investoinnit olisivat tapahtuneet ennen ympäristöpolitiikan asettamista. Toisin sanoen M :n ympäristöpolitiikka on ajallisesti epäkonstistentti, mikäli siitä päätetään ennen investointeja. Tällöin M ei voi sitoutua päätöksiinsä. Tämä tilanne muuttuu varantokaupan takia.

Jos mailla on mahdollisuus investoida vihreään teknologiaan, varantokaupan hyödyt ovat itse asiassa perusmallia korkeampia. Kun M ostaa ja poistaa markkinoilta varantoja, hinta nousee ja muiden maiden kannattaa keskittyä vahvemmin vihreän teknologian kehittämiseen.

Tasapainon ominaisuudet ovat samanlaisia kuin perusmallissa. Aiemmin todettiin, että jos M on nettotuojaa, teknologian taso on optimia isompi, ja jos on nettoviejä, se investoi liian vähän. M :n ollessa omavarainen, se asettaa oman teknologian tason optimiin. Lisäksi varantokaupan tuloksena i :n

⁸ Tai, niin kuin Harstad toteaa tekstissä, M voisi investoida itse i :n teknologiaan tai jakaa sen kanssa omaa teknologiaa.

tarjontakäyrä on edelleen paikallisesti joustamaton ($S'_i(p) = 0, \forall i \in N$), josta seuraa, että myös muiden maiden investointi vihreään teknologiaan on optimaalinen. Lisäksi koska optimiympäristöpolitiikka on riippumaton jokaisen maan marginaalisesta kysynnästä, M :n politiikka ei riipu siitä, päätetäänkö investoinnista ennen tai politiikan jälkeen. Eteenkin jos maat ovat käytännössä omavaraisia⁹ ja niiden tarjonta on paikallisesti joustamaton, niin $\frac{\partial U_M}{\partial r_i} = 0$, eli muiden maiden teknologian vaikutus koalition hyötyyn on olematon, eikä M ota sitä huomioon ympäristöpolitiikkapäätöksessä. Tasapaino on siis yhtäläinen kuin perusmallin tulos. Erona on, että teknologian positiivisen vaikutuksen seurauksena varantokaupan potentiaaliset hyödyt ovat molemmille entistä korkeampia: päästöjä alennetaan perusmallia enemmän, yhteiskunnan hyötyjen summa on entistä isompi ja koalition kulumattomien tappiot ympäristöpolitiikan seurauksena laskevat, sillä osa menetetyistä hyödyistä saadaan takaisin vihreää teknologiaa käyttämällä.

8.2. Pelin toisto ja vihreä paradoksi

Malli voidaan laajentaa myös niin, että se ottaa huomioon pelin toistoa eri jaksoissa. Tämä on tärkeää, sillä suurin osa haitoista koituu tulevaisuudessa (Gerlagh & Liski 2013), hiilivarannot ovat sen verran isoja, että ne voivat kestää jopa satoja vuosia (ks. liite 4), ja muutenkin ongelman laatu on dynaaminen luonteeltaan. Tietysti koska kyseessä on ehtyviä resursseja, ei ole syytä tarkastella tätä ongelmaa jatkuvasti toistuvana pelinä vaan sen toistumiskertoja voidaan rajoittaa.

Ongelman dynamiikan sisältäminen malliin tuo myös uuden ongelman, nimittäin interpolaarisen hiilivuodon, joka aiheuttaa vihreää paradoksia. Odotetun kysynnän lasku tulevaisuudessa tuo mukanaan sen, että tulevat hinnat ovat odotetusti matalampia niin, että maksimoinnissa osapuolten kannattanee louhia ja käyttää enemmän hiiltä jo nykyään. Ympäristöpolitiikan seurauksena tulevat haitat siirtyvät nykypäivään ja pahentavat tilannetta. Tämän johdosta koalition arvostus ympäristöpolitiikkaa kohtaan laskee ja lopputulos on mikä todennäköisimmin epätehokas. Toisaalta Harstad osoittaa, että tässäkin tapauksessa varantokauppa auttaa poistamaan tämän epätehokkuuden lähteen ja saavuttamaan sosiaalioptimia.

Tämän osoittamiseksi oletetaan, että pelissä on kaksi jaksoa. Diskonttokorkona toimii $\delta \in (0,1)$.

Oletetaan lisäksi, että päästöjen ympäristövaikutukset esiintyvät vasta tulevaisuudessa, eli pelin toisessa vaiheessa. Lopuksi oletetaan, että jokaisessa vaiheessa markkina tyhjentyy, eli

$$\sum_{M \cup N} x_{i,t} = \sum_{M \cup N} y_{i,t} \text{ ja } I_t \equiv y_{M,t} - x_{M,t} = \sum_M (x_{i,t} - y_{i,t}).$$

Näin ollen hyötyfunktiot näyttäisivät seuraavalta

⁹ tässä puhutaan käytännön omavaraisuudesta, joka tarkoittaa, ettei kaikkien maiden tarvitse olla omavaraisia varantokauppavaiheen jälkeen vaan, esimerkiksi riittää, että etukäteen ne sopivat keskenään hinnoista.

$$U_i = B_{i,1}(y_{i,1}) - C_i(x_{i,1}) - p_1(y_{i,1} - x_{i,1}) \quad (27)$$

$$+ \delta [B_{i,2}(y_{i,2}) - C_i(x_{i,1} + x_{i,2}) + C_i(x_{i,1}) - p_2(y_{i,2} - x_{i,2})] \quad i \in N$$

$$U_M = B_{M,1}(y_{M,1}) - C_M(x_{M,1}) - p_1(y_{M,1} - x_{M,1}) \quad (28)$$

$$+ \delta \left[B_{M,2}(y_{M,2}) - C_M(x_{M,1} + x_{M,2}) + C_M(x_{M,1}) - p_2(y_{M,2} - x_{M,2}) \right.$$

$$\left. - H \left(\sum_t \sum_{j \in MUN} x_{j,t} \right) \right]$$

Etenkin maiden kysyntä riippuu hinnoista joten $y_{i,t} = D_{i,t}(p_t) \equiv B'_{i,t}{}^{-1}(p_t) \quad \forall t \in (1,2)$. Tarjonnan puolella täytyy muistaa, että kustannusfunktio on kartoitus siitä, miten kustannukset kasvavat sitä mukaan, kun louhitaan vaikeampia ja kalliimpia varantoja. Näin ollen $x_{,1} + x_{i,2} = S_i(p_2) \equiv C'_i{}^{-1}(p_2)$, eli kustannusfunktio ja tarjonta eivät riipu ajasta vaan suoraan määristä ja hinnoista. Ensimmäisessä periodissa tarjonta seuraa Hotelling -sääntöä (Hotelling 1931), eli MRS seuraa $p_1 - c = \delta(p_2 - c)$, jossa c on louhimisen rajakustannukset. Siksi $x_{,1} = S_i\left(\frac{p_1 - \delta p_2}{1 - \delta}\right) \equiv C'_i{}^{-1}\left(\frac{p_1 - \delta p_2}{1 - \delta}\right)$.

Tästä seuraa, että

$$dy_{i,t} = dp_t D'_{i,t} \quad (29)$$

$$dx_{i,1} + dx_{i,2} = dp_2 S'_i(p_2) \quad (30)$$

$$dx_{i,1} = \left(\frac{dp_1 - \delta dp_2}{1 - \delta} \right) S'_i \left(\frac{p_1 - \delta p_2}{1 - \delta} \right) \quad (31)$$

ja markkinan tyhjentämisehdon differentiaali

$$\sum_N (dx_{i,t} - dy_{i,t}) = dI_t, \quad \forall t \in (1,2)$$

Yhdistämällä tyhjentämisehdon ja 29-31 saadaan

$$dI_1 = \sum_N \left[\left(\frac{dp_1 - \delta dp_2}{1 - \delta} \right) S'_i \left(\frac{p_1 - \delta p_2}{1 - \delta} \right) - dp_1 D'_{i,1} \right] \quad (32)$$

$$dI_2 = \sum_N \left[dp_2 S'_i(p_2) - \left(\frac{dp_1 - \delta dp_2}{1 - \delta} \right) S'_i \left(\frac{p_1 - \delta p_2}{1 - \delta} \right) - dp_2 D'_{i,2} \right] \quad (33)$$

ja määrittelemällä

$$S'_1 \equiv \sum_N S'_i \left(\frac{p_1 - \delta p_2}{1 - \delta} \right)$$

$$S'_2 \equiv \sum_N S'_i(p_2)$$

$$D'_t \equiv \sum_N D'_{i,t} \quad , \forall t \in (1,2)$$

todetaan

$$dI_1 = \left(\frac{dp_1 - \delta dp_2}{1 - \delta} \right) S'_1 - dp_1 D'_1 \quad (34)$$

$$dI_2 = dp_2 S'_2 - \left(\frac{dp_1 - \delta dp_2}{1 - \delta} \right) S'_1 - dp_2 D'_2 \quad (35)$$

josta saadaan eri periodien hintojen differentiaalit

$$dp_2 = \frac{dI_2 + dI_1 S'_1 / [S'_1 - D'_1(1 - \delta)]}{S'_2 - D'_2 - \delta D'_1 S'_1 / [S'_1 - D'_1(1 - \delta)]}$$

$$dp_1 = \frac{dI_1(1 - \delta)}{S'_1 - D'_1(1 - \delta)} + \frac{\delta S'_1}{S'_1 - D'_1(1 - \delta)} dp_2$$

Näillä tiedoilla on yksinkertaista saada M :n ympäristöpolitiikka. M maksimoi hyötyfunktionsa (28)

$x_{,1}, y_{M,1}, x_{M,2}$ ja $y_{M,2}$ suhteen.

$$\frac{\partial U_M}{\partial x_{M,2}} = -C'_M(x_{M,2} + x_{M,1}) + \frac{dp_2}{dI_2} I_2 + p_2 - \frac{dH(S_2 + x_{M,1} + x_{M,2})}{d(S_2 + x_{M,1} + x_{M,2})} \left(1 - S'_2 \frac{dp_2}{dI_2} \right) + \frac{1}{\delta} \frac{dp_1}{dI_2}$$

$$\frac{\partial U_M}{\partial y_{M,2}} = -\frac{dp_1}{dI_2} I_1 + \delta \left[B'_{M,2} - \frac{dp_2}{dI_2} I_2 - p_2 - \frac{dH(S_2 + x_{M,1} + x_{M,2})}{d(S_2 + x_{M,1} + x_{M,2})} \frac{d(S_2 + x_{M,1} + x_{M,2})}{y_{M,2}} \right]$$

$$\frac{\partial U_M}{\partial x_{M,1}} = -(1 - \delta) C'_M(x_{M,1}) + \left(\frac{dp_1}{dI_1} - \frac{dp_1}{dI_2} \right) I_1 + p_1$$

$$+ \delta \left[\left(\frac{dp_2}{dI_1} - \frac{dp_2}{dI_2} \right) I_2 - p_2 - \frac{dH(S_2 + x_{M,1} + x_{M,2})}{dx_{M,1}} \right]$$

$$\frac{\partial U_M}{\partial y_{M,1}} = B'_{M,1} - \frac{dp_1}{dI_1} I_1 - p_1 + \delta \left[-\frac{dp_2}{dI_1} I_2 - \frac{dH(S_2 + x_{M,1} + x_{M,2})}{d(S_2 + x_{M,1} + x_{M,2})} \frac{d(S_2 + x_{M,1} + x_{M,2})}{y_{M,1}} \right]$$

Tarkastamalla nollakohdassa, *FOC* toisessa periodissa ovat

$$C'_M(x_{M,2} + x_{M,1}) = \frac{dp_2}{dI_2} I_2 + p_2 + \frac{1}{\delta} \frac{dp_1}{dI_2} - \left(1 - S'_2 \frac{dp_2}{dI_2}\right) H' \quad (36)$$

$$B'_{M,2} = \frac{1}{\delta} \frac{dp_1}{dI_2} I_1 + \frac{dp_2}{dI_2} I_2 + p_2 + S'_2 \frac{dp_2}{dI_2} H' \quad (37)$$

ja ensimmäisessä periodissa FOC ovat

$$(1 - \delta)C'_M(x_{M,1}) \quad (38)$$

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{dp_1}{dI_1} - \frac{dp_1}{dI_2}\right) I_1 + p_1 - \delta p_2 + \delta \left(\frac{dp_2}{dI_1} - \frac{dp_2}{dI_2}\right) I_2 \\ &\quad - \delta \left(\frac{dp_2}{dI_2} - \frac{dp_2}{dI_1}\right) S'_2 H' \\ B'_{M,1} &= \frac{dp_1}{dI_1} I_1 + \delta \frac{dp_2}{dI_1} I_2 + p_1 + \delta S'_2 \frac{dp_2}{dI_1} H' \end{aligned} \quad (39)$$

Toisen periodin FOC on selkeästi erilainen kuin perusmallissa (11 ja 12). Tämä aiheuttaa politiikan ajallista epäkonsistenssia. Ensimmäisessä periodissa M päättää politiikastaan molemmissa vaiheissa niin, että toisen periodin politiikka vaikuttaa myös ensimmäiseen periodiin. Toisaalta ensimmäisen periodin loputtua M voi muuttaa politiikkaansa, paitsi jos sillä on mahdollisuus sitoutua ensimmäiseen periodin päätökseen. Ensimmäisessä periodissa M pyrkisi sitoutumaan korkeampaan hiilihintaan tulevaisuudessa ja näin estämään vihreästä paradoksista syntyvää periodivälistä hiilivuotoa toisesta periodista ensimmäiseen periodiin. Toisaalta kerran kun tämä politiikka on onnistunut ja ensimmäisessä periodissa muut maat ovat louhineet vähemmän, M :lla on intressiä päivittää politiikkaansa ja alentaa myös toisen periodin louhintaa. Täten jos M :lla ei ole mahdollisuutta sitoutua päätökseen, sen ympäristöpolitiikka on ajallisesti epäkonsistentti. Harstad (2012) osoittaa myös, ettei epäkonsistenssi katoa M :n ollessa omavarainen.

Silti varantojen vaihdanta voi estää tämän ongelman syntymisen. Argumentti toimii seuraavasti: M olisi edelleenkin omavarainen molemmissa periodeissa, eli $I_t = 0 \forall t \in (1,2)$. Lisäksi koska M ostaa ja vetää pois markkinoilta niitä varantoja, joissa louhimiskustannukset ovat korkeita ja lähellä hintatasoa, eteenkin i :n ($\forall i \in N$) tarjonta on paikallisesti joustamaton (eli $S'_{2,i} = 0$). Asettamalla nämä luvut toisen periodin FOC:hin saadaan

$$C'_M(x_{M,2} + x_{M,1}) = p_2 - H' \quad (40)$$

$$B'_{M,2} = p_2 \quad (41)$$

ja näin ollen

$$C'_M(x_{M,2} + x_{M,1}) = B'_{M,2} - H' \quad (42)$$

$$B'_{M,2} = p_2 = B'_{i,2}, \forall i \in N \quad (43)$$

jotka vastaavat optimiehtoja. Näin ollen M harjoittaa toisessa periodissa vain tarjontapolitiikkaa. Nähdään, että tämä tulos saadaan riippumatta siitä, voiko M sitoutua ensimmäisen periodin päätökseen. Kysymys kuuluu, miten M toimii ensimmäisessä periodissa. Edelleenkin varantokaupan takia M keskittyy tarjontapolitiikkaan, ja M :n politiikka on ajallisesti konsistentti. Tämä johtuu siitä, että toisen periodin politiikka on sama riippumatta M :n sitoutumismahdollisuuksista, ja täten toisen periodin politiikan vaikutusta ensimmäiseen periodin politiikkaan ei tarvitse ottaa huomioon. Edelleenkin varantokaupan seurauksena M on omavarainen ja lisäksi toisessa periodissa liittoon kuulumattomien tarjontakäyrä on paikallisesti joustamaton, eli $I_1 = I_2 = S'_2 = 0$ ja näin ollen 40 ja 41 muuttuvat seuraavasti

$$(1 - \delta)C'_M(x_{M,1}) = p_1 - \delta p_2 \quad (44)$$

$$B'_{M,1} = p_1 \quad (45)$$

44 on yksi kahdesta optimiehdosta. Lisäksi kun asetetaan $B'_{M,t} = p_t$ $t \in (1,2)$ yhtälöön 45, saadaan

$$C'_M(x_{M,1}) = \frac{B'_{M,1} - \delta B'_{M,2}}{(1 - \delta)}$$

ja käänteisesti

$$x_{M,1} = C'^{-1}_M \left(\frac{B'_{M,1} - \delta B'_{M,2}}{(1 - \delta)} \right) \quad (46)$$

Edellä mainittiin, että ensimmäisessä vaiheessa optimissa i :n hyötymaksimoinnin FOC on $x_{i,1} = S_i \left(\frac{p_1 - \delta p_2}{1 - \delta} \right) \equiv C_i'^{-1} \left(\frac{p_1 - \delta p_2}{1 - \delta} \right)$, joka selkeästi on sama kuin edellinen ehto (46), silloin kun $B'_{i,t} = p_t$, $t \in (1,2)$. Näin ollen voidaan todeta, että myös ensimmäisessä periodissa louhinta on optimitasolla, ja että kauppavarannolla M voi toteuttaa sosiaalioptimia sitoutumismahdollisuuksista riippumatta. Samaan tapaan kuin perusmallissa M toteuttaa sosiaalioptimia joko vetämällä varantoja pois markkinoilta tai asettamalla Pigoun louhintaveron niin, että louhinta sisältää rajahaittojen vaikutuksen, eli

$$\frac{\tau_{x,1}}{\delta} = \tau_{x,2} = H' \quad (47)$$

Koko argumentti kauppavarannon puolesta pätee myös, vaikka olisi enemmän kuin 2 periodia. Toisaalta tietyn ehtoin jos on enemmän periodeja, M :n kannattanee lykätä varantojen ostamista, josta syntyy epäkohtia (Harstad 2011). Esimerkiksi jos päästöjen alentamisen lisäksi M ottaa huomioon, milloin päästöt syntyivät. Periaatteessa silloin M :n saattaa kannattaa käydä varantokauppaa jokaisen periodin alussa. Täten M saattaa poiketa optimilouhintatahdistaan vaikuttaakseen sen tuleviin kauppaehtoihin, jolloin lopputulos ei välttämättä ole optimaalista (Harstad 2010).

8.3. Heterogeenisia polttoaineita

Tähän asti malli on keskittynyt yhdenlaiseen polttoaineeseen eli kivihiileen. Harstadin malli voidaan soveltaa myös toisenlaisiin polttoaineisiin, esimerkiksi öljyyn, maakaasuun tai vastaaviin. Polttoaineiden välillä on suuria eroja muun muassa siinä, paljonko hiilidioksidia ja muita ilmastomuutosta aiheuttavia päästöjä tuottavat per energiayksikkö. Lisäksi polttoaineiden sisällä on suuria eroja. Tekstissä on mainittu lyhyesti eroja esimerkiksi ruskohiilen ja mustahiilen välillä. Harstad esittää, miten mallia voidaan laajentaa niin, että se sisältäisi erilaisia polttoaineita, tai samanlaisia polttoaineita, joiden hiilijälki energiayksikköä kohti on erilainen.

Malli laajennetaan ensinnäkin sisällyttämällä polttoaineiden päästöjä. Perusmallin tapaan c on pienen varannon Δ louhinnan marginaalikustannukset. Nimetään varannon marginaalipäästöt e :ksi niin, että $e \cdot \Delta$ on varannon hyödyntämisestä syntyvät päästöt. Samaan tapaan kuin kustannusten kohdalla kokonaispäästöjen funktio riippuu x :stä niin, että $E_i(x_i)$ on $i \in M \cup N$ kokonaispäästöt ja $E'_i(x_i)$ on x_i -varannon marginaalipäästöt. M :n haittaa mitataan nyt E :n mukaan niin, että $H(\sum_{M \cup N} E_i(x_i))$.

Tietysti M järjestää omia varantoja tässä tapauksessa sekä louhimiskustannusten että päästöjen mukaan. Itse asiassa M :n kannattaa louhia varantoja järjestyksessä rajahaitan mukaan, eli $c + eH'$ mukaan. Toisaalta $i \in N$ ei kärsi päästöistä, joten edelleenkin i järjestää varantoja pelkästään louhimiskustannusten mukaan, eikä päästöjen mukaan.

Nyt optimi tilanne on samanlainen kuin perusmallissa, eli optimissa kaikkien maiden rajahyödyt ovat samoja. Lisäksi sosiaalisesta näkökulmasta varanto louhitaan vain jos sen aiheuttamat rajahaitat M :lle ovat rajahyötyä pienempiä, eli

$$c + eH' \leq B'_i(y_i) = B'_j(y_j) \quad \forall i, j \in M \cup N \quad (48)$$

Muuten malli on samanlainen kuin perusmalli. M :n ympäristöpolitiikka, jolla M maksimoi hyötynsä on

$$B'_M(y_M) - p = \sum_{i \in N} E'_i(x_i) \left[\frac{S'(p)}{S'(p) - D'(p)} \right] H' + \frac{(y_M - x_M)}{S'(p) - D'(p)} \quad (49)$$

$$p - C'_M(x_M) = \left[E'_M(x_M) - \frac{\sum_{i \in N} E'_i(x_i) S'(p)}{S'(p) - D'(p)} \right] H' - \frac{(y_M - x_M)}{S'(p) - D'(p)} \quad (50)$$

eli samanlainen kuin perusmallissa (11 ja 12).

Edelleenkin varantokaupalla saadaan aikaan se, että muiden maiden tarjontakäyrät tulevat paikallisesti joustamattomiksi ($S'_i(p) = 0$), joten jos M on omavarainen 49 ja 50 mukaan

$$p = B'_i(y_i) = B'_j(y_j) \quad \forall i, j \in M \cup N \quad (51)$$

Lisäksi perusmallin tapaan M ostaa i :ltä ne varannot, joissa ostamisen hyödyt M :lle ylittävät i :n tappiot myymisestä, tai joiden myynnissä nettoviejä i hyötyy hinnan noususta, eli

$$\max\{0, c + eH' - B'_M(y_M)\} + (x_i - y_i) \frac{\partial p}{\partial \Delta} > 0 \quad (52)$$

Tämän takia kaikki nämä varannot siirtyvät M :lle ja ympäristöpolitiikan mukaisesti M säilyttää osan niistä. Tällöin $c + eH' \leq B'_M(y_M)$ ja yhdistämällä 51 on helppo nähdä, että lopputulos on optimaalinen (48), eli $c + eH' \leq B'_i(y_i) = B'_j(y_j) \quad \forall i, j \in M \cup N$.

8.4. Jaettu haitta

Perusmallin oletuksena oli, että vain liittoon kuuluvat kärsivät haitoista. Toinen tapa tarkastella tilannetta on, että kaikki maat, jotka kärsivät haittoja päästöistä, liittyvät koalitioon. Toisaalta voidaan myös kuvitella tilanteita, joissa esim. kaikki maat tai koalitioon kuulumattomista maista jotkut maat ottavat haitat huomioon. Esimerkiksi voisimme kuvitella tilanne, jossa kuvitteelliset Länsi ja Itä kärsivät haittoja, mutta poliittisista syistä ne eivät voi muodostaa koalitiota ja toimia yhdessä. Tällöin perusmalli ei enää kuvaa optimitilannetta, sillä ympäristöpolitiikassaan M ei huomioi liittoon kuulumattomien haittoja.

Liittoon kuulumattoman maan päästöhaitat olisivat $H_i(\cdot) \quad i \in N$. Kokonaishaitta $H(\cdot)$ vastaisi kaikkien maiden yhteenlaskettuja haittoja, eli $\sum_{i \in M \cup N} H_i(\cdot)$. Optimiehdoksi saadaan

$$c + H' \leq B'_i(y_i) = B'_j(y_j) \quad \forall i, j \in M \cup N \quad (53)$$

Tästä voidaan saada optimi louhimismäärä x_i^* . Jokaisen maan osuus kokonaishaitoista määritellään seuraavasti

$$\alpha_i \equiv \frac{H'_i(\sum_{i \in M \cup N} x_i^*)}{H'(\sum_{i \in M \cup N} x_i^*)} \quad (54)$$

Selkeästi jos α_i ulottuu $[0,1]$ niin, että jos $\alpha_i = 1$, tilanne on niin kuin perusmallissa.

Tällaisessa tilanteessa, jossa haitat koituvat erilaisille maille, tasapaino vaatii, että myös varantojen omistusta voidaan jakaa. Tämä ei ole epätodennäköinen oletus, sillä niin kuin Harstad tuo esille, öljykerätyt omistetaan usein esimerkiksi osakkeilla. Niinpä erilaiset yritykset saattavat jakaa omistusta (Harstad 2012). Vastaavaa lienee mahdollista maiden kohdalla¹⁰.

Tasapaino on lopulta aika samanlainen kuin perusmallissa. Haittoja kärsivät maat ostavat osuuksia varannoista, joissa rajahaitat ylittävät rajahyödyt, toisin sanoen

$$B'_i(y_i) - c - H'_i < 0$$

Tietysti i :n kannattaa ostaa jokaisesta sellaisesta varannosta vain sen verran, kuin se kärsii kokonaishaittoista, eli α_i . Tämä on helppo huomata jos ajatellaan tilannetta peliteorian näkökulmasta. Mikäli i ostaa alle α_i , se kantaa riskin siitä, että varanto louhitaan. Toisaalta jos se ostaa osuuden $\gamma > \alpha_i$, se ostaa turhaan: joku maa j , joka kärsii myös haittoja, voisi ostaa $\gamma - \alpha_i$ ja lopputulos i :n näkökulmasta olisi sama. Eli tasapainossa i :n kannattaa (i) omistaa osuus α jokaisessa varannossa ja (ii) α on tasapainossa täsmälleen i :n osuus haittoista.

Nyt tarkastellaan pientä varantoa Δ . Jos sen louhimiskustannukset $c > B'_i(y_i^*)$, mikään maa ei louhisi sitä. Toisaalta jos $c \in (p - H'(\sum_{i \in M \cup N} x_i^*), p)$, omistaja louhisi sen, vaikka sosiaalisesta näkökulmasta haitat ylittävätkin hyödyt. Lopuksi jos $c < p - H'(\sum_{i \in M \cup N} x_i^*)$, on kaikkien kannalta järkevää louhia.

Tarkastellaan siis varantoja, joissa $c \in (p - H'(\sum_{i \in M \cup N} x_i^*), p)$. On mainittu, että jokainen haittoja kärsivä i hankkii $\alpha_i \in [0,1]$ tällaisista varannoista. Jos varanto Δ louhitaan, i hyötyy $\alpha_i [B'_i(y_i^*) - c - H'_i] \Delta < 0$. Täten jokainen i haluaisi estää varannon käyttöä. Koska varanto on täysin haittoja kärsivien omistuksessa, louhimispäätöstä tehdessä ne jättäisivät varannon louhimatta. Seurauksena on, että varannot joissa $c + H'(\sum_{i \in M \cup N} x_i^*) \leq B'_i(y_i^*)$ jäävät louhimatta. Lisäksi tuttuun tapaan tasapainossa $p = B'_i(y_i^*) = B'_j(y_j^*) \quad \forall i, j \in M \cup N$ ja näin ollen

$$c + H' \leq B'_i(y_i) = B'_j(y_j) \quad \forall i, j \in M \cup N$$

Toisin sanoen on mahdollista toteuttaa optimi kun jokainen haittoja kärsivä maa omistaa α_i jokaisesta varannosta, jossa rajahaitat ylittävät rajahyödyt.

¹⁰ Itse asiassa usein öljy-yhtiöt ovat käytännössä valtioiden omistamia (esim. Venäjän Rosneft, Saudi Arabian Saudi Aramco öljyn markkinoissa tai ChinaCoal, Venäjän Arktikugol hiilen kohdalla)

Valitettavasti pelissä on muita tasapainoja, jos $N > 2$. On mahdollista ajatella tilanne, jossa vaikka haittoja kärsivien maiden kannattaa ostaa varanto, ne jättävät hankkimatta sen takia, että ne eivät tiedä varmuudella miten muut maat toimivat. Toisin sanoen, ensimmäisen siirron tekijän loukun (*first mover disadvantage*) pelon takia ne voivat jättää ostamatta sellaisia varantoja, jota nykyinen omistaja aikoo louhia, vaikka louhinta onkin sosiaalisesti haitallista. Silti kenenkään maan ei kannata lähteä yksin ostamaan osuuden ellei oma osuus haitoista $\alpha_i > \frac{1}{2}$. Jos α_i on tätä pienempi, i ei saa automaattisesti enemmistö päätöstä ja hankinta voi osoittautua turhaksi.

Tällaisessa tilanteessa, elleivät maat voi koordinoitua, on olemassa tasapainoja, joissa louhitaan sosiaalisesti haitallisia varantoja. Ratkaisuksi tähän ongelmaan näen mahdollisuutta, että i ostaisi heti päätösvaltaista osuutta $\beta_i > \alpha_i$ ja sen jälkeen myisi osanomaisille ylimääräisen osuuden $\beta_i - \alpha_i$. Tämä edellyttäisi i :n sitoutumista siihen, että ellei muut osanomaiset osta osuuttansa se louhii kyseistä varantoa, vaikka olisi itselle haitallinen. Ellei i voi sitoutua tähän päätökseen muut maat eivät ostaisi osuuttaan, sillä i :n uhka olisi peliteorian mukaan tyhjä uhka (*non-credible threat*).

9. Johtopäätökset

Usein tarjontapolitiikkaa pidetään mahdottomana ilmastopolitiikassa, pääsääntöisesti hiilivuodon ja vapaamatkustamisen takia. Hiilivuoto tekee tehottomiksi sekä tarjonta- että kysyntäpolitiikat: ensimmäinen johtaa korkeampiin hintoihin ja korkeampaan varantojen hyödyntämiseen, jälkimmäinen isompaan kysyntään ympäristöpolitiikkaan sitoutuneiden maiden rajojen ulkopuolella.

Esittämäni malli ratkaisee nämä ongelmat lisäämällä peliasetteluun varantokaupan ennen niiden louhimista. Ostamalla marginaalivarantoja koalitiio maita voi tehdä muiden maiden tarjontakäyristä paikallisesti joustamattomia. Täten koalitiio voi toteuttaa tarjontapuolen ympäristöpolitiikkansa vetämällä pois markkinoilta varantoja pelkäämättä hiilivuotoa. Tällä menetelmällä pieni koalitiio maita voi saavuttaa sosiaalisen optimin (*first best*), vaikka muut maat eivät yhtyisi ympäristöpolitiikkaan.

Toisaalta malliin liittyy tiettyjä ongelmia, jotka edellyttävät sen laajentamista. Ensinnäkin teknologian kehitys heikentää merkittävästi sopimusten kannattavuutta ja kannustaa solmittujen sopimusten rikkomiseen. Tämä efekti voidaan sisällyttää vaivattomasti malliin lisäämällä hyötyfunktioon teknologian vaikutukset. Malliin voidaan lisätä myös heterogeenisten polttoaineiden käyttöä ilman, että se vaikuttaisi mallin tuloksiin. Tutkielman johtopäätökseksi saadaan, että hiilivuodon lisäksi varantokauppa edesauttaa estämään vihreän paradoksin esiintymisen monivaiheisissa peliasetelmissa.

Perusmallin rajoitteena on, että saavuttaakseen tavoitteensa kaikkien päästöistä kärsivien maiden tulisi toimia yhtenäisenä rintamana hiilimarkkinoilla. Tutkielmassa todetaan, että tätä rajoitetta voidaan heikentää sallimalla haitan jakautuminen eri osapuolten kesken ilman, että tämä muuttaisi merkittävästi mallin tuloksia. Toisaalta jos haittaa on jakamassa enemmän kuin kaksi osapuolta, on

olemassa tasapainoja, joissa vangin dilemman tapaan lopputulos ei ole optimaalinen. Edellä olen esittänyt yhden tavan tämän ongelman estämiseksi, joka perustuu varantojen epätehokkaalla käyttämisellä uhkaamiseen. Tämän tavan rajoitteena on kuitenkin se, että se edellyttää mailta mahdollisuutta sitoutua epätehokkaisiin päätöksiin pakottaakseen muita osallistumaan yhteiseen ratkaisuun, mikä tietyissä olosuhteissa voi olla tyhjä uhka (*empty threat*).

Tutkimuksessa laajennan Harstadin mallia (2012) antamalla raamit hiilenkäytön hyötyjen ja haittojen arvioimiseksi, joka perustuu Gerlaghin ja Liskin analyyseihin aiheesta (2012, 2013, 2014).

Tutkittavaksi jää, kuinka kannattavaa tällainen ratkaisu olisi käytännössä. Lisäksi liittoutumisen ja varantokaupan poliittiset ongelmat sekä sopimusten toimeenpanomenetelmä jäävät tutkimatta, sillä niitä pitäisi tarkastella kansainvälisen politiikan näkökulmasta. Lopuksi tekstissä todettiin, että varantokauppa saattaa toimia kannustimena allokoida resursseja uusien varantojen etsimiseen, mikä heikentää mallin lopputulosta. Silti, ainakin teoriassa, tästä olisi mahdollista sopia erikseen osapuolten kesken. Näistä rajoitteista huolimatta varantokaupan mahdollisuus tuo lisää vaihtoehtoja koalitiolle ja tekee helpommaksi optimin saavuttamisen, mikä on tämän tutkielman tärkein tulos.

Lähdeluettelo

- Alston, LJ & Andersson, K 2011, 'Reducing Greenhouse Gas Emissions by Forest Protection: The Transaction Costs of REDD', *NBER Working paper series*.
- Babiker, MH 2005, 'Climate Change Policy, Market Structure and Carbon Leakage', *Journal of International Economics*, pp. 421-445.
- Barrett, S 2005, 'The Theory of International Environmental Agreements', in KGMAJR Vincent (ed.), *Handbook of Environmental Economics*, Elsevier Sci., Amsterdam.
- Berck, P, Helfand, GE & Maull, T 2003, 'The Theory of Pollution Policy', in KG Mäler, JR Vincent (eds.), *Handbook of Environmental Economics*, I edn, Elsevier Science, Amsterdam.
- BP 2013, 'BP Statistical Review of World Energy', British Petroleum.
- BP 2014, 'BP Energy Outlook 2035', British Petroleum.
- Coase, RH 1960, 'The Problem of Social Cost', *Journal of Law and Economics*, vol 3, pp. 1-44.
- Cooter, RD 1982, 'The Cost of Coase', *Journal of Legal Studies*, vol 11, no. January, pp. 1-33.
- Didia, D 2001, 'Debt-for-Nature Swaps, Market Imperfections, and Policy Failures as Determinants of Sustainable Development and Environmental Quality', *Journal of Economic Issues*, vol 35, no. 2, pp. 477-486.
- Eichner, T & Pethig, R 2011, 'Carbon Leakage, The Green Paradox, and Perfect Future Markets', *International Economic Review*, vol 52, no. 3, pp. 767-805.
- Farm Service Agency 2014, *FSA Conservation Programs*, viewed 14 February 2014, <<http://www.fsa.usda.gov/FSA/webapp?area=home&subject=copr&topic=crp>>.
- Gerlagh, R & Liski, M 2012, 'Carbon prices for the next thousand years (long version)', <http://hse-econ.fi/liski/papers/CarbonPrices_Sep_24GL.pdf>.
- Gerlagh, R & Liski, M 2013, *Carbon prices for the next thousand years*, <<http://hse-econ.fi/liski/papers/CarbonPrices.pdf>>.
- Gerlagh, R & Liski, M 2014, 'Carbon prices for the next hundred years', <<http://hse-econ.fi/liski/papers/CarbonLearning.pdf>>.
- Haftendorn, C, Holz, F & von Hirschhausen, C 2010, 'COALMOD-World: A Model to Assess International Coal Markets until 2030', *German Institute for Economic Research (DIW Berlin) Discussion Papers*.

- Harstad, B 2010, 'Buy Coal! Deposit market prevent carbon leakage', *NBER working papers*, no. nro. 16119.
- Harstad, B 2011, 'The Market for Conservation and Other Hostages', *NBER Working papers*, vol Nro. 17409.
- Harstad, B 2012, 'Buy Coal! A Case for Supply-Side Environmental Policy', *Journal of Political Economy*, vol 120, no. 1, pp. 77-115.
- Harstad, B & Liski, M 2012, 'Games and Resources', *NBER Working Paper 18519*.
- Hoel, M 1994, 'Efficient Climate Policy in the Presence of Free Riders', *Journal of Environmental Economics and Management*, vol 27, no. 3, pp. 259-274.
- Hong, BD & Slatick, ER 1994, 'Carbon Dioxide Emission Factors for Coal', Energy Information Administration, Quarterly Coal Report, Washington DC.
- Hotelling, H 1931, 'The Economics of Exhaustible Resources', *The Journal of Political Economy*, vol 39, no. 2, pp. 137-175.
- IEA 2011, 'World Energy Outlook', International Energy Agency, OECD/IEA, Paris.
- International Monetary Fund 2014, 'World Economic Outlook 2014', IMF.
- IPCC: International Panel on Climate Change 2007, 'IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Contribution of Working Group III', IPCC: International Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge ja New York.
- Junta de Andalucía: Consejería de Medio Ambiente y ordenación del territorio., *Historia del parque Nacional de Doñana*, viewed 01 February 2014,
<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/porta/web/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnextoid=2b1c57b64d228310VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=a250ee9b421f4310VgnVCM2000000624e50aRCRD> >.
- Liski, M & Tahvonen, O 2004, 'Can Carbon Tax Eat OPEC's Rents?', *Journal of Environmental Economics and Management*, vol 47, pp. 1-12.
- Montero, J-P 2008, 'A Simple Auction Mechanism for the Optimal Allocation of the Commons', *American Economic Review*, vol 98, no. 1, pp. 496-518.
- Nordhaus, WD 2007, 'A Review of The Stern Review on the Economics of Climate', *Journal of Economic Literature*, vol 45, no. 3, pp. 686-702.

- Pethig, R 1999, 'On the Future of Environmental Economics', *Universität Siegen, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Wirtschaftsinformatik und Wirtschaftsrecht*.
- Sheikh, PA 2010, 'Debt-for-Nature Initiatives and the Tropical Forest Conservation Act: Status and Implementation', Report for the United States Congress, Congressional Research Service.
- Sinn, H-W 2008, 'Public Policies against Global Warming', *International Tax and Public Finance*, vol 14, pp. 360-394.
- Stern, N 2006, 'Stern Review on the Economics of Climate Change', Cambridge, Cambridge University Press.
- Thapa, B 1998, 'Debt-for-Nature Swaps: An Overview ', *International journal of sustainable development and world ecology*, vol 5, pp. 249-262.
- The Natural Conservancy 2013, 'Annual Report 2013', Annual Report, The Natural Conservancy, Arlington.
- University of Kentucky 2012, *Kentucky Geological Survey*, viewed 2 Helmikuu 2014, <<http://www.uky.edu/KGS/coal/coalform.htm>>.
- UN-REDD 2009, *UN-REDD Programme*, viewed 31 January 2014, <http://www.un-redd.org/Partner_Countries/tabid/102663/Default.aspx>.
- UN-REDD 2011, '2011 Year in Review UN-REDD programme', Vuosikertomus, YK:n kehitysohjelma UNDP, Geneve.
- World Coal Institute 2005, 'The Coal Resource: A Comprehensive Overview of Coal', World Coal Institute, London.

Liitteet

Liite 1: Energian kulutus lähteittäin

Energian kulutus lähteittäin										
Miljoona TOE	1995	2000	2005	2010	2012	2015	2020	2025	2030	2035
Pohjois-Amerikka	952,6	1062,0	1130,5	1037,3	1016,8	1013,8	996,5	976,2	937,4	894,9
Muu Amerikka	203,1	229,5	241,0	286,1	302,2	324,6	355,8	384,7	408,9	431,2
Eurooppa^	948,4	929,4	962,0	904,7	879,8	854,0	846,5	833,8	809,6	780,0
Lähi-itä	210,1	242,9	292,7	356,1	375,8	395,4	440,8	490,8	543,7	582,9
Afrikka	106,0	118,8	138,5	163,6	166,5	178,3	200,9	226,4	254,5	283,0
Tyynimeri ja Aasia	867,3	998,9	1146,9	1290,5	1389,4	1460,7	1606,8	1758,5	1882,4	1995,2
Neste polttoaine*	3287,6	3581,4	3911,6	4038,2	4130,5	4226,7	4447,3	4670,5	4836,5	4967,3
Pohjois-Amerikka	673,8	720,6	711,5	770,1	820,0	835,1	876,7	915,6	942,7	991,7
Muu Amerikka	67,6	85,6	111,5	137,0	148,6	161,4	186,9	217,6	246,8	277,5
Eurooppa^	823,0	889,9	990,5	1016,6	975,0	1002,7	1055,1	1097,8	1143,9	1188,9
Lähi-itä	128,1	168,1	251,3	339,1	370,6	441,9	504,5	577,2	649,1	725,6
Afrikka	42,7	52,0	77,1	97,0	110,5	133,4	146,6	169,3	199,8	230,2
Tyynimeri ja Aasia	191,1	261,2	357,7	504,4	562,5	683,4	853,0	981,2	1102,5	1217,0
Maakaasu	1926,3	2177,4	2499,5	2864,1	2987,1	3257,8	3622,7	3958,7	4284,9	4631,0
Pohjois-Amerikka	537,1	605,2	613,3	557,5	468,5	491,5	482,8	460,1	421,8	403,7
Muu Amerikka	18,0	20,0	20,5	25,4	28,2	32,4	31,3	30,9	32,1	32,8
Eurooppa^	583,7	526,4	514,5	484,8	516,9	497,7	479,4	460,9	433,8	400,4
Lähi-itä	5,6	7,4	9,3	8,8	9,9	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4
Afrikka	79,3	82,8	93,5	97,4	97,5	98,2	119,5	136,0	147,9	162,7
Tyynimeri ja Aasia	1010,8	1100,3	1672,1	2290,2	2609,1	2830,4	3245,2	3453,6	3605,5	3734,0
Hiili	2337,4	2452,4	3046,6	3595,6	3865,7	4099,7	4527,7	4727,3	4839,8	4948,0
Pohjois-Amerikka	184,3	197,8	209,4	213,8	206,9	220,0	228,9	228,4	224,7	176,7
Muu Amerikka	2,2	2,8	3,8	4,9	5,0	5,6	6,7	8,0	8,7	9,5
Eurooppa^	243,7	267,4	285,4	272,9	266,9	257,5	250,6	253,0	266,2	274,8
Lähi-itä	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,4	0,8	3,4	4,8	7,2
Afrikka	2,7	3,1	2,9	3,1	3,2	3,2	3,1	3,1	4,4	6,3
Tyynimeri ja Aasia	93,0	113,3	125,2	131,7	78,1	142,8	214,3	275,1	330,1	385,5
Ydinvoima	525,9	584,3	626,7	626,4	560,4	629,5	704,3	770,9	838,9	859,9
Pohjois-Amerikka	152,9	151,2	150,1	147,2	156,3	155,4	158,2	160,6	162,6	165,4
Muu Amerikka	105,5	125,8	141,5	158,6	165,7	169,6	198,7	225,1	245,9	266,7
Eurooppa^	178,8	189,3	180,2	197,9	190,8	193,4	206,5	219,0	230,9	243,0
Lähi-itä	2,8	1,8	5,3	4,0	5,1	5,2	6,3	7,4	8,2	9,1
Afrikka	13,8	16,9	20,4	23,4	24,1	26,5	34,7	42,8	52,3	61,9
Tyynimeri ja Aasia	109,2	117,3	164,6	251,0	289,0	309,2	359,6	410,0	454,8	499,7
Vesivoima	562,9	602,4	662,2	782,1	831,1	859,3	963,9	1064,8	1154,8	1245,8
Pohjois-Amerikka	18,9	21,2	25,0	45,0	57,0	72,3	98,5	138,3	193,8	235,8
Muu Amerikka	2,8	4,0	6,5	11,0	15,6	20,7	30,4	37,6	46,2	59,7
Eurooppa^	7,2	14,8	35,1	71,1	99,1	127,6	173,4	219,5	266,1	312,3
Lähi-itä	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,5	2,3	4,6	9,2	16,5
Afrikka	0,2	0,4	0,7	1,2	1,4	3,0	7,1	12,0	21,6	32,7
Tyynimeri ja Aasia	7,7	11,1	17,2	40,2	64,1	108,6	193,9	293,0	381,6	461,9
Uusiutuvat	36,8	51,5	84,6	168,6	237,4	332,7	505,5	705,0	918,4	1118,9
Kokonaiskulutus	8676,8	9449,4	10831,1	12075,0	12612,2	13405,8	14771,5	15897,1	16873,2	17770,9
josta: OECD #	5007,3	5441,6	5676,4	5593,1	5488,9	5566,9	5676,7	5746,1	5764,0	5745,7
EU #	1650,6	1723,9	1810,3	1745,6	1673,4	1646,3	1635,3	1619,5	1600,2	1574,1
Yhdysvallat	2121,9	2313,7	2351,2	2281,2	2208,8	2256,6	2287,6	2312,4	2302,9	2273,4
Kiina	886,5	980,3	1601,2	2338,0	2735,2	3105,8	3741,8	4166,2	4458,3	4671,6
Intia	236,2	295,8	366,8	511,6	563,5	621,1	786,1	938,6	1110,6	1307,5

Ennusteet kursivoituna

* öljy, biopolttoaineet, GTL, DCL ja ICL

Jäsenet 01.01.2014 mennessä

^Eurooppa sis. Euraasia

Lähde: BP (2014)

Liite 2: Energian tuotanto lähteittäin

Energian tuotanto lähteittäin										
Miljoona TOE	1995	2000	2005	2010	2012	2015	2020	2025	2030	2035
Pohjois-Amerikka	645,7	642,6	637,9	638,8	721,4	839,5	953,7	986,5	999,6	1023,2
Muu Amerikka	300,1	343,8	374,9	377,9	378,0	383,3	429,9	480,3	528,5	550,3
Eurooppa [^]	669,4	728,1	849,8	861,0	836,4	839,5	817,7	802,4	785,3	795,0
Lähi-itä	979,2	1151,1	1226,0	1217,2	1336,8	1302,7	1298,6	1456,4	1579,2	1625,4
Afrikka	339,3	370,1	471,1	480,6	449,0	434,4	471,8	467,3	462,1	465,3
Tyynimeri ja Aasia	352,4	384,1	383,3	402,3	397,3	392,5	395,6	375,7	360,1	356,8
Nestepolttoaine*	3286,1	3619,8	3943,1	3977,8	4118,9	4191,9	4367,3	4568,6	4714,9	4816,0
Pohjois-Amerikka	651,7	694,0	683,1	745,2	812,7	827,8	924,0	1009,3	1069,4	1119,3
Muu Amerikka	68,0	91,1	126,5	150,0	159,6	171,6	192,8	214,1	232,9	261,3
Eurooppa [^]	789,2	843,0	926,2	928,0	931,9	985,3	1047,5	1093,3	1143,4	1194,9
Lähi-itä	134,6	187,3	287,9	425,4	493,6	586,3	647,8	715,7	781,2	856,6
Afrikka	76,7	116,6	159,3	192,8	194,6	217,4	236,5	291,4	367,3	424,6
Tyynimeri ja Aasia	190,3	244,9	326,7	437,8	441,2	503,0	637,2	675,4	703,5	790,2
Maakaasu	1910,5	2176,9	2509,6	2879,3	3033,5	3291,4	3685,9	3999,2	4297,8	4647,0
Pohjois-Amerikka	602,3	614,6	620,7	591,5	556,2	550,7	537,2	515,3	480,3	448,0
Muu Amerikka	22,8	33,9	46,3	51,5	59,7	61,7	61,8	61,8	61,8	61,7
Eurooppa [^]	499,2	430,4	441,2	425,9	452,7	453,3	439,9	427,2	414,5	404,0
Lähi-itä	0,7	0,7	1,0	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6
Afrikka	129,4	137,2	148,2	151,2	150,9	161,3	173,3	186,2	200,0	214,9
Tyynimeri ja Aasia	993,5	1076,7	1692,2	2261,9	2520,8	2757,0	3169,2	3391,6	3522,1	3641,1
Hiili	2247,8	2293,4	2949,5	3482,5	3741,0	3984,8	4382,0	4582,6	4679,3	4770,4
Pohjois-Amerikka	184,3	197,8	209,4	213,8	206,9	220,0	228,9	228,4	224,7	176,7
Muu Amerikka	2,2	2,8	3,8	4,9	5,0	5,6	6,7	8,0	8,7	9,5
Eurooppa [^]	243,7	267,4	285,4	272,9	266,9	257,5	250,6	253,0	266,2	274,8
Lähi-itä	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,4	0,8	3,4	4,8	7,2
Afrikka	2,7	3,1	2,9	3,1	3,2	3,2	3,1	3,1	4,4	6,3
Tyynimeri ja Aasia	93,0	113,3	125,2	131,7	78,1	142,8	214,3	275,1	330,1	385,5
Ydinvoima	525,9	584,3	626,7	626,4	560,4	629,5	704,3	770,9	838,9	859,9
Pohjois-Amerikka	152,9	151,2	150,1	147,2	156,3	155,4	158,2	160,6	162,6	165,4
Muu Amerikka	105,5	125,8	141,5	158,6	165,7	169,6	198,7	225,1	245,9	266,7
Eurooppa [^]	178,8	189,3	180,2	197,9	190,8	193,4	206,5	219,0	230,9	243,0
Lähi-itä	2,8	1,8	5,3	4,0	5,1	5,2	6,3	7,4	8,2	9,1
Afrikka	13,8	16,9	20,4	23,4	24,1	26,5	34,7	42,8	52,3	61,9
Tyynimeri ja Aasia	109,2	117,3	164,6	251,0	289,0	309,2	359,6	410,0	454,8	499,7
Vesivoima	562,9	602,4	662,2	782,1	831,1	859,3	963,9	1064,8	1154,8	1245,8
Pohjois-Amerikka	21,4	24,3	32,6	71,3	85,3	104,1	133,1	173,6	230,8	276,5
Muu Amerikka	8,9	9,3	14,6	28,9	32,3	41,3	55,9	65,5	78,6	96,8
Eurooppa [^]	7,5	15,5	38,3	82,2	109,1	136,6	185,7	233,5	280,1	326,3
Lähi-itä	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,5	2,3	4,6	9,2	16,5
Afrikka	0,3	0,4	0,8	1,3	1,4	3,2	7,5	12,6	22,6	37,1
Tyynimeri ja Aasia	7,7	11,2	18,0	44,3	69,3	113,0	199,9	302,4	395,2	482,0
Uusiutuvat¹	45,8	60,7	104,3	228,1	297,6	398,6	584,3	792,3	1016,5	1235,1
Kokonaistuotanto	8579,0	9337,6	10795,3	11976,2	12582,5	13355,4	14687,8	15778,4	16702,1	17574,2
josta: OECD #	3666,1	3841,9	3841,5	3888,6	3924,6	4141,1	4529,6	4721,9	4863,0	4959,8
EU #	908,5	894,8	840,5	780,1	745,9	733,3	723,3	708,4	706,4	710,0
Yhdysvallat	1669,7	1676,4	1633,0	1749,8	1854,5	1998,8	2169,5	2276,2	2340,0	2295,3
Kiina	892,4	934,0	1504,0	2066,2	2320,4	2581,3	3073,3	3372,5	3560,3	3736,8
Intia	190,7	213,8	253,7	337,2	344,0	380,1	455,0	538,5	626,8	729,4

Ennusteet kursivoituna

* öljy, GTL, DCL ja ICL

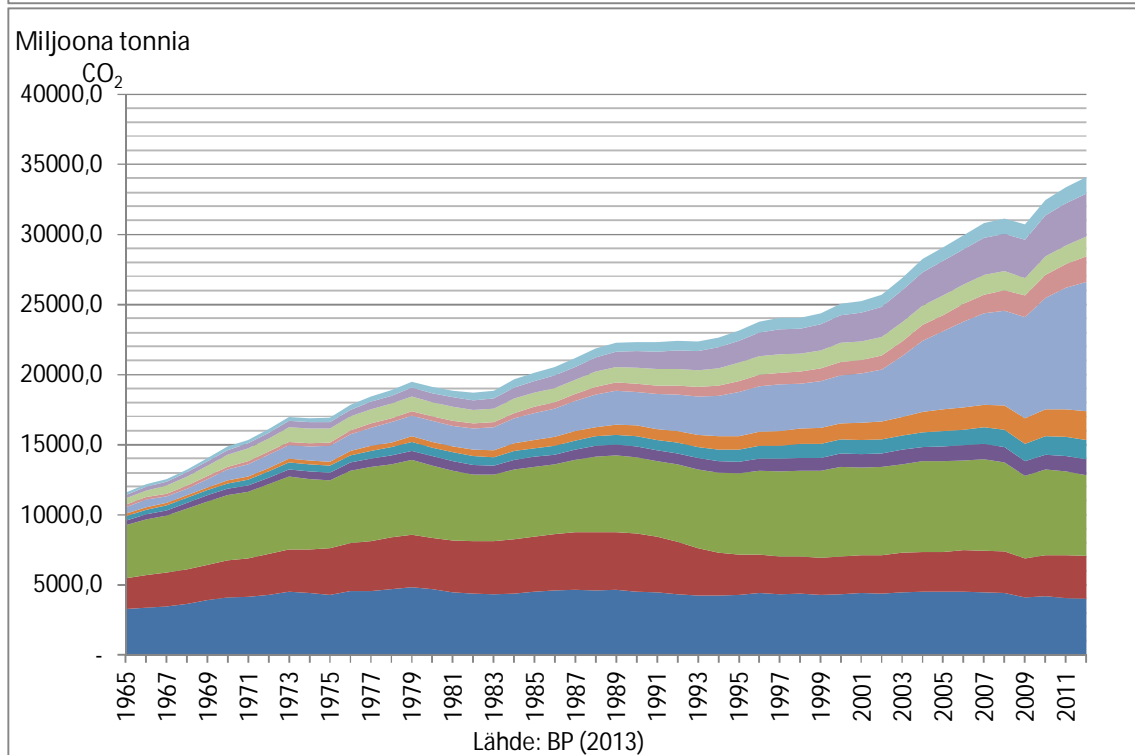
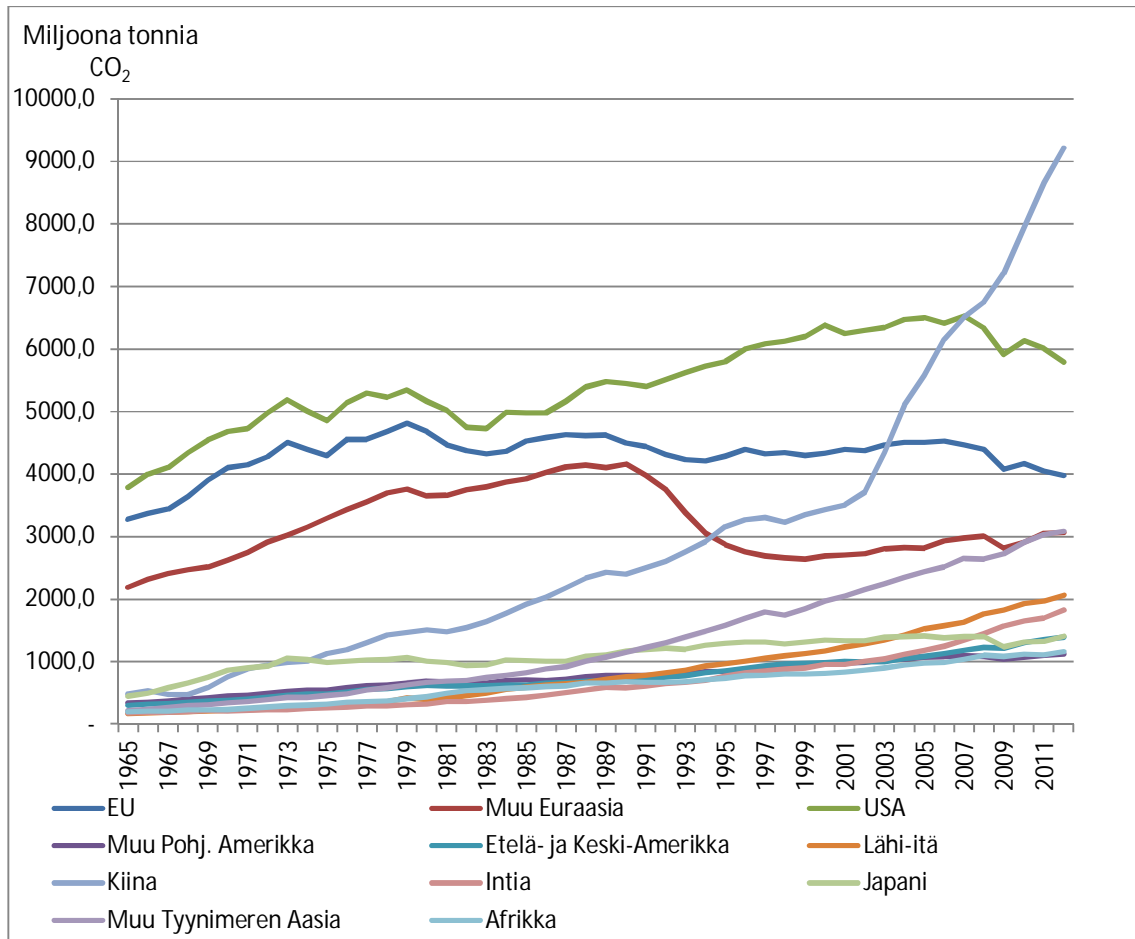
Jäsenet 01.01.2014 mennessä

[^]Eurooppa sis. Euraasia

¹Uusiutuvat sis. Biopolttoaineet, tuulivoima, aurinkovoima ja muita vastaavia.

Lähde: BP (2014)

Liite 3: Ihmisen aiheuttamia CO₂ päästöjä



Liite 4: Hiilivarannot

Miljoona tonnia	Antrasiitti ja bitumipitoinen	Sub-bit. tai ruskohiili	Yhteensä	Osuus	R/P ratio	R/P 35
Yhdysvallat	108501	128794	237295	27,6%	257	-
Kanada	3474	3108	6582	0,8%	98	-
Meksiko	860	351	1211	0,1%	88	-
Pohjois-Amerikka	112835	132253	245088	28,5%	244	278
Brasilia	-	4559	4559	0,5%	*	-
Kolumbia	6366	380	6746	0,8%	76	-
Venezuela	479	-	479	0,1%	292	-
Muut	45	679	724	0,1%	*	-
K- ja Etelä-Amerikka	6890	5618	12508	1,5%	129	104
Bulgaria	2	2364	2366	0,3%	72	-
Tšekki	192	908	1100	0,1%	20	-
Saksa	99	40600	40699	4,7%	207	-
Kreikka	-	3020	3020	0,4%	50	-
Unkari	13	1647	1660	0,2%	179	-
Kazakstan	21500	12100	33600	3,9%	289	-
Puola	4338	1371	5709	0,7%	40	-
Romania	10	281	291	*	9	-
Venäjä	49088	107922	157010	18,2%	443	-
Espanja	200	330	530	0,1%	85	-
Turkki	529	1814	2343	0,3%	33	-
Ukraina	15351	18522	33873	3,9%	384	-
Yhdistynyt kuningaskunta	228	-	228	*	14	-
Muut	1440	20735	22175	2,6%	234	-
Eurooppa ja Euraasia	92990	211614	304604	35,4%	238	247
Lähi-itä	1203	-	1203	0,1%	*	1119
Afrikka ja Lähi-itä	32721	174	32895	3,8%	124	64
Australia	37100	39300	76400	8,9%	177	-
Kiina	62200	52300	114500	13,3%	31	-
Intia	56100	4500	60600	7,0%	100	-
Indonesia	1520	4009	5529	0,6%	14	-
Japani	340	10	350	*	265	-
Uusi Seelanti	33	538	571	0,1%	115	-
Pohjois-Korea	300	300	600	0,1%	19	-
Pakistan	-	2070	2070	0,2%	*	-
Etelä-Korea	-	126	126	*	60	-
Thaimaa	-	1239	1239	0,1%	68	-
Vietnam	150	-	150	*	4	-
Muu Aasia ja Oseania	1583	2125	3708	0,4%	88	-
Tyyneimeri ja Aasia	159326	106517	265843	30,9%	51	15
Yhteensä	404762	456176	860938	100,0%	109	66
josta: OECD	155926	222603	378529	44,0%	186	-
EU #	5101	51047	56148	6,5%	97	-

* Alle 0,05%. R/P ratio - varantojen ennustettu kestoaika vuosina, jos louhinta jatkuu samalla tahdilla.

R/P 35: varantojen kestoaika vuodesta 2035 alkaen, jos louhinta BP (2035) tahdin mukaisesti (Tekijän omat laskelmat).

Lähteet: Survey of Energy Resources 2010, World Energy Council, BP (2013, 2014)

