

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2023

Ville Hakkarainen

Ympäristönsuojelu ja peliteoria



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2023 | 46 sivua

Ville Hakkarainen

Ympäristönsuojelu ja peliteoria

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan ympäristönsuojelua peliteorian näkökulmasta. Työssä keskitytään vangin dilemmaan ja yhteistyöpeliin. Tavoitteena on esitellä aiheesta tehtyä tutkimusta ja havainnollistaa kuinka peliteorian avulla voidaan lisätä ymmärrystä ympäristönsuojeluun liittyvistä haasteista.

Työn aluksi käydään läpi peliteorian perusteita yleisellä tasolla. Seuraavaksi peliteoriaa sovelletaan kansainvälisiin ilmastoneuvotteluihin, joihin liittyviä ongelmia voidaan kuvata vangin dilemman avulla. Dilemmalle esitetään ratkaisuksi vaihtoehtoisia malleja ja mekanismisuunnittelua. Lopuksi tarkastellaan otsonikatoa aiheuttavia aineita rajoittavaa Montrealin pöytäkirjaa, ja verrataan sitä kasvihuonekaasuja rajoittaviin sopimuksiin.

Peliteoreettiset mallit eivät kuvaa ympäristönsuojeluun liittyviä ongelmia tyhjentävästi, mutta niiden avulla on mahdollista analysoida eri toimijoiden välistä vuorovaikutusta ja tasapainotiloja. Työn tarkastelun perusteella erityisen haastavia ovat tilanteet, joita kuvaa vangin dilemma. Tällöin lopputulos voi olla kaikkien toimijoiden kannalta epäsuotuisa, ja dynamiikkaa on vaikea purkaa. Yksi mahdollinen selitys Montrealin pöytäkirjan menestykselle onkin, että tilanne oli lähtökohtaisesti suotuisa otsonikatoa aiheuttavien yhdisteiden rajoittamiselle, eikä sopimusta voida soveltaa sellaisenaan muihin ympäristöongelmiin.

Asiasanat:

Ympäristönsuojelu, peliteoria, vangin dilemma, kansainväliset sopimukset, ilmastonmuutos

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and Environmental Technology

2023 | 46 pages

Ville Hakkarainen

Environmental protection and game theory

This thesis examines environmental protection from the perspective of game theory. The focus is on prisoner's dilemma and the coordination game. The main goal is to present research on the topic and illustrate how game theory can be utilized to understand challenges related to environmental protection.

The thesis covers some basics of game theory on a general level. Next, these concepts are applied to international negotiations on climate change. Problems related to these negotiations can be described with the prisoner's dilemma, and alternative models and mechanism design are proposed as possible solutions to the dilemma. Finally, the Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer is examined and compared to treaties restricting greenhouse gases.

Game theoretical models do not describe problems related to environmental protection completely, but they enable the analysis of interactions and equilibriums between different agents. Based on the topics covered in this thesis, situations characterized by the prisoner's dilemma are especially challenging. They may result in outcomes that are adverse for everyone, and it is difficult to dismantle the dynamics. One possible explanation for the success of Montreal Protocol is that the situation was inherently favorable for restricting the substances depleting the ozone layer, and the agreement cannot be applied as such to other environmental problems.

Keywords:

Environmental protection, game theory, prisoner's dilemma, international treaties, climate change

Sisältö

1 Johdanto	6
2 Peliteorian perusteita	7
2.1 Vangin dilemma ja pelien analysoimisen perusteita	7
2.2 Nashin tasapaino ja yhteistyöpelit	12
2.3 Satunnaistetut strategiat ja pelien toistaminen	14
2.3.1 Satunnaistetun strategian Nashin tasapaino kertapelissä	14
2.3.2 Toistetut pelit	18
3 Soveltaminen ympäristönsuojeluun	21
3.1 Kansainväliset ilmastoneuvottelut ja vangin dilemma	21
3.2 Vaihtoehtoiset mallit ja mekanismit	23
3.2.1 Yhteistyöpelit	23
3.2.2 Vangin dilemman toistaminen	25
3.2.3 Sakkomekanismi	28
3.3 Montrealin pöytäkirja otsonikerrosta heikentävistä aineista	31
4 Pohdinta	36
Lähteet	43

Kuvat

Kuva 1. Otsonikatoa aiheuttavien yhdisteiden käytön kehitys (UNEP, 2023b). 32

Taulukot

Taulukko 1. Vangin dilemma.	8
Taulukko 2. Vangin dilemma, tummennettu (Petos, Yhteistyö).	8
Taulukko 3. Vangin dilemma, tummennettu sarake Petos.	10
Taulukko 4. Vangin dilemma, tummennettu sarake Yhteistyö.	10

Taulukko 5. Yleinen vangin dilemma.	11
Taulukko 6. Yhteistyöpelii	13
Taulukko 7. Battle of sexes.	15
Taulukko 8. Battle of sexes, satunnaistettu strategia.	16
Taulukko 9. Battle of sexes, satunnaistettu strategia, tummennettu sarake Elokuvaa.	16
Taulukko 10. Battle of sexes, satunnaistettu strategia, tummennettu sarake Urheilu.	17
Taulukko 11. Battle of sexes, satunnaistettu strategia lasketuilla arvoilla.	17
Taulukko 12. Esimerkki yhteistyöpelistä.	19
Taulukko 13. Vangin dilemma ja päästövähennykset.	21
Taulukko 14. Yhteistyöpelii ja ilmastoneuvottelut.	23
Taulukko 15. Vangin dilemma yleisessä muodossa.	25
Taulukko 16. Vangin dilemma esimerkki a.	26
Taulukko 17. Vangin dilemma esimerkki b.	26
Taulukko 18. Rajatun resurssin käyttö ilman sääntelyä.	29
Taulukko 19. Rajatun resurssin käyttö sakkomekanismilla.	29
Taulukko 20. Sakon valinta.	30

1 Johdanto

Ilmastonmuutosta ja luontokatoa on pyritty hillitsemään kansainvälisillä sopimuksilla ja kansallisilla toimilla jo vuosikymmeniä, mutta saavutukset eivät ole vastanneet tieteellisten suositusten tasoa, eivätkä välttämättä edes sovittuja tavoitteita (UNEP, 2023a). Mistä tavoitteiden ja saavutusten välinen kuilu johtuu? Miksi osa toimista, kuten Montrealin pöytäkirja otsonikatoa vastaan, ovat olleet onnistuneempia kuin toiset? Yksi tapa lisätä ymmärrystä aiheesta on hyödyntää tarkasteluun peliteoriaa.

Peliteoriaa voidaan kuvata matemaattiseksi työkaluksi strategisen toiminnan analysoimiseen (Wood, 2010, 3). Tutut käsitteet on ymmärrettävä laajasti, sillä peliteorian kontekstissa peleillä voidaan tarkoittaa esimerkiksi huutokauppoja, evoluutiota tai ruuhkia (Binmore, 1992, 3). Yleisesti ottaen sen avulla voidaan kuvata ja tarkastella erilaisia vuorovaikutustilanteita, toimijoiden insentiivejä ja intressejä, sekä tunnistaa mahdollisia tasapainotiloja. Lisäksi mekanismisuunnittelua voidaan hyödyntää esimerkiksi sääntelyn ja sopimusten suunnittelun tukena, jotta toivotut lopputulokset voitaisiin saavuttaa.

Peliteorian juuret ovat pitkälti taloustieteessä (Myerson, 1991), mutta sitä on sovellettu laajasti myös ympäristöongelmien tutkimiseen, erityisesti kansainvälisten ilmastoneuvotteluiden (esim. Barrett, 2003; Kopec, 2017) ja kalastuksen (esim. Groenbaek ym., 2020) parissa. Peliteoreettista tutkimusta on tehty myös Suomen näkökulmasta globaalien ja kansallisten ympäristöhaasteiden parissa jo pitkään (esim. Kaitala ym., 1992; Kyllönen, 2011).

Tässä opinnäytetyössä käydään lyhyesti läpi peliteorian perusteita ja sovelluksia ympäristönsuojeluun. Työssä keskitytään erityisesti vangin dilemmaan ja yhteistyöpeliin kansainvälisten sopimusten ja kansallisen sääntelyn näkökulmasta.

2 Peliteorian perusteita

Peliteoriassa rationaalinen päätöksentekijä on sellainen toimija, jonka intressit mahdollisia lopputuloksia kohtaan voidaan asettaa jonkinlaiseen järjestykseen siten, että tämän voidaan olettaa pyrkivän johdonmukaisesti maksimoimaan toiminnastaan seuraama hyöty. Pelinä voidaan taas ymmärtää kahden tai useamman rationaalisen toimijan välinen tilanne, jossa tapahtuu jonkinlaista vuorovaikutusta. (Myerson 1991, s. 2–3).

On hyvä huomata, että kun peliteoriaa sovelletaan, niin hyödyn maksimoiminen ei siis tarkoita välttämättä itsekästä oman edun ajamista, vaan johdonmukaista omien intressien mukaista toimimista, riippumatta siitä millaiset nämä intressit ovat. Kokeissa onkin havaittu, että pelaajat eivät esimerkiksi pyri vain maksimoimaan taloudellista hyötyään, vaan myös kokemuksella reiluudesta on merkittävä vaikutus lopputulokseen (esim. Bland ym., 2017).

2.1 Vangin dilemma ja pelien analysoimisen perusteita

Yksi kanonisimmista esimerkeistä peliteoriassa on niin kutsuttu vangin dilemma. Peliä havainnollistetaan usein seuraavan tarinan avulla: kaksi rikollista on syytettynä kahdesta rikoksesta, ja pienempään rikokseen heitä vastaan on pitävät todisteet, mutta vakavammasta rikoksesta heidät voidaan tuomita vain, jos ainakin toinen tunnustaa. Pelaajat voivat valita tekevänsä toistensa kanssa yhteistyötä, tai pettää, mutta heitä kuulustellaan erikseen. He siis valitsevat toimintansa yhtäaikaisesti ja toisistaan tietämättä.

Jos molemmat rikolliset tekevät keskenään yhteistyötä, eikä kumpikaan petä toista, niin molemmat saavat pienemmästä rikoksesta vuoden tuomiot. Jos yksi pelaaja valitsee yhteistyön, ja toinen pettää, niin pettäjä pääsee palkinnoksi vapaaksi, ja toinen saa vakavammasta rikoksesta kolmen vuoden vankeustuomion. Jos kumpikin pettää toisensa, niin molemmat joutuvat kahdeksi vuodeksi vankeuteen. (Jackson, 2011, 3)

Taulukossa 1 kyseinen peli on kuvattu matriisimuotoisena, jossa ensimmäisessä pystysarakkeessa on pelaaja 1:n toimintaprofiili, ensimmäisellä vaakarivillä pelaaja 2:n toimintaprofiili. Eri toimintojen yhdistelmiä vastaavat seuraukset ovat taulukossa muodossa (1:n tuomio, 2:n tuomio).

Taulukko 1. Vangin dilemma.

	Yhteistyö	Petos
Yhteistyö	(-1,-1)	(-3,0)
Petos	(0,-3)	(-2,-2)

Taulukkoa luetaan niin, että jos esimerkiksi 1 valitsee petoksen, ja 2 tekee yhteistyötä, niin tulos on (0,-3), eli 1 pääsee vapaaksi ja 2 saa kolme vuotta vankeutta. Tämä lopputulos on tummennettu taulukossa 2.

Taulukko 2. Vangin dilemma, tummennettu (Petos, Yhteistyö).

	Yhteistyö	Petos
Yhteistyö	(-1,-1)	(-3,0)
Petos	(0,-3)	(-2,-2)

Tämä lopputulos voidaan ilmaista myös kirjoittamalla kummallekin pelaajalle pelin *hyötyfunktio* u , joka määrää jokaiselle toimintojen yhdistelmälle kullekin pelaajalle niistä seuraavan tuloksen.

$$u_1(\text{petos}, \text{yhteistyö}) = 0$$

$$u_2(\text{petos}, \text{yhteistyö}) = -3$$

Vangin dilemma on esimerkki *normaalimuotoisesta* pelistä: pelaajat eivät tiedä, mitä toinen pelaaja tekee, he valitsevat toimintansa yhtä aikaa ja jokaista toimintojen yhdistelmää vastaa jokin tunnettu lopputulos.

Vangin dilemmasta on helppo havaita, että molempien pelaajien yhteistyö johtaa pienimpään mahdolliseen yhteenlaskettuun tuomioon $(-1,-1)$, ja verrattuna molempien petokseen $(-2,-2)$ se on myös molemmille pelaajille suotuisampi lopputulos.

Jos siirtymällä jostain lopputuloksesta x toiseen lopputulokseen y ainakin yksi pelaajista hyötyisi, eikä kukaan häviäisi, niin lopputuloksen y sanotaan *pareto-dominoivan* lopputulosta x . Vangin dilemmassa strategia (yhteistyö, yhteistyö) siis *pareto-dominoi* lopputulosta (petos, petos), sillä siihen siirtyminen ei haittaisi kumpaakaan pelaajista, ja hyödyttäisi ainakin toista pelaajaa – tässä erikoistapauksessa molempia. Strategia (petos, petos) on itse asiassa pelin ainoa strategia, joka on pareto-dominoitu. Mistään muusta lopputuloksesta ei voi siirtyä ilman, että siitä seuraisi ainakin toiselle pelaajalle huonompi lopputulos. Jos jotain strategiaa ei pareto-dominoi mikään muu strategia, se on silloin *pareto-optimaalinen*. Vangin dilemmassa voidaan siis sanoa, että kaikki muut strategiat paitsi (petos, petos) ovat *pareto-optimaaleja*. (Ingham, 2023).

Jos jokin strategia on pelaajalle paras mahdollinen riippumatta siitä, kuinka muut pelaavat, niin strategia on *vahvasti dominantti*. Siitä ei siis kannata poiketa missään tapauksessa, sillä sen noudattaminen johtaa aina pelaajan kannalta parhaaseen lopputulokseen. Jos kaikille pelaajille löytyy vahvasti dominantti strategia, niin tätä voidaan pitää pelin ratkaisuna; rationaaliset pelaajat valitsevat aina vahvasti dominantin strategian, joten lopputulos voidaan ennustaa varmasti. Strategia voi olla myös *heikosti dominantti*, jolloin sitä strategiaa pelaamalla pelaaja saa aina yhtä suuren, tai suuremman hyödyn kuin millään muulla strategialla riippumatta siitä mitä muut pelaajat tekevät. (Jackson, 2011, 4–5)

Vastaavasti, strategia voi olla vahvasti tai heikosti *dominoitu*, eli joku toinen strategia vastaavasti dominoi sitä vahvasti tai heikosti. Vahvasti dominoitu strategia voidaan käytännössä pudottaa tarkastelusta kokonaan pois ja jatkaa näin syntyneen pienemmän pelin iteratiivista analysointia.

Peliteoriassa pyritään usein ennustamaan, kuinka pelaajat tulevat toimimaan, tai toisin sanoen ratkaisemaan pelejä. Dominanssin käsite on tässä tehtävässä hyödyllinen. Tarkastellaan vangin dilemmaa pelaajan 1 näkökulmasta. Koska 1:n hyöty riippuu myös siitä mitä 2 tekee, niin vaihtoehtoja on tutkittava vaihe vaiheelta. Mikäli 2 valitsisi petoksen, niin voidaan keskittyä tarkastelemaan viimeistä saraketta, joka on tummennettu taulukossa 3.

Taulukko 3. Vangin dilemma, tummennettu sarake Petos.

	Yhteistyö	Petos
Yhteistyö	(-1,-1)	(-3,0)
Petos	(0,-3)	(-2,-2)

Havaitaan että tällöin tekemällä itse yhteistyötä 1 saa kolmen vuoden tuomion (-3,0), ja pettämällä vain kahden vuoden tuomion (-2,-2). Hyötyfunktion avulla ilmaistuna:

$$u_1(\text{yhteistyö}, \text{petos}) = -3, \text{ ja}$$

$$u_1(\text{petos}, \text{petos}) = -2$$

Tässä tapauksessa siis petos on 1:lle yksiselitteisesti parempi toiminto.

Mikäli 2 valitsisi yhteistyön, niin voidaan vastaavasti keskittyä tarkastelemaan keskimmäistä saraketta, joka on tummennettu taulukossa 4.

Taulukko 4. Vangin dilemma, tummennettu sarake Yhteistyö.

	Yhteistyö	Petos
Yhteistyö	(-1,-1)	(-3,0)
Petos	(0,-3)	(-2,-2)

Nyt tekemällä itse yhteistyötä 1 saisi vuoden tuomion (-1,-1), ja pettämällä pääsisi vapaaksi (0,-3). Tällöin siis

$$u_1(\text{yhteistyö}, \text{yhteistyö}) = -1, \text{ ja}$$

$$u_1(\text{petos}, \text{yhteistyö}) = 0$$

Jälleen petos on 1:lle yksiselitteisesti kannattavampi vaihtoehto. Koska pelaajan 1 kannattaa valita petos riippumatta siitä mitä pelaaja 2 tekee, niin se on siis vahvasti dominoiva strategia pelaajalle 1. Koska peli on symmetrinen molemmille pelaajille, niin pettäminen on myös pelaajalle 2 vahvasti dominoiva strategia. Lopputulos (petos, petos) on siten pelin ratkaisu.

Vangin dilemmasta tekee dilemman se, että sen ratkaisu on itse asiassa molemmille pelaajille yksiselitteisesti huonompi lopputulos kuin yhteistyön tekeminen, ja johtaa tässä tapauksessa myös kaikista lopputuloksista huonoimpaan mahdolliseen yhteenlaskettuun tulokseen. Petos-petos on myös ainoa lopputulos, joka ei ole pareto-optimaalinen. Vangin dilemman tärkeä implikaatio onkin, että tietyissä tilanteissa yksilön sinänsä järkevä ja omien etujen mukainen toiminta voi johtaa hänen itsensä ja yhteisen hyvän kannalta huonoon lopputulokseen.

Alkuperäisessä esimerkissä pelaajien hyödyt kuvataan negatiivisina lukuina, mutta yleisemmin vangin dilemman määrittää mahdollisten lopputulosten keskinäinen suuruusjärjestys.

Taulukko 5. Yleinen vangin dilemma.

	Y	P
Y	(a,a)	(b,c)
P	(c,b)	(d,d)

Eli taulukossa 5 on vangin dilemma, kunhan $c > a > d > b$. Pelistä on lisäksi olemassa myös ei-symmetrinen versio.

2.2 Nashin tasapaino ja yhteistyöpelit

Yksi peliteorian tärkeimmistä konsepteista on *Nashin tasapaino*. Täydellisen informaation peleissä, joissa kaikkien pelaajien kaikki toiminnot ja lopputulokset ovat kaikkien tiedossa, pelaajat voivat analysoida peliä myös muiden näkökulmasta. Jos pelaajilla on syytä odottaa muiden pelaajien toimivan tietyllä tavalla, eikä kukaan voisi hyötyä vaihtamalla omaa strategiaansa olettaen, että muut pelaavat odotetusti, niin kyseessä on Nashin tasapaino. Se on nimetty John Nashin mukaan, joka formalisoi tämän idean matemaattisesti ja todisti että jokaisesta äärellisestä normaalimuotoisesta pelistä on löydettävistä vähintään yksi Nashin tasapaino. Niitä voi olla pelissä myös useampi. Hänen tutkimuksensa edisti peliteoreettista tutkimusta merkittävästi laajentamalla tarkastelun kenttää yksittäisistä pelaajista kokonaisvaltaisempaan analyysiin. (Myerson 1991, s. 105.)

Nashin tasapainon mukainen strategia ei siis välttämättä ole paras mahdollinen vastaus toisen pelaajan jokaiseen mahdolliseen toimintoon, eli se ei ole pelaajalle välttämättä dominantti strategia. Sitä ei voi myöskään pitää pelin ratkaisuna samalla tavalla kuin dominantteja strategioita. Nashin tasapaino on kuitenkin luonteeltaan vakaa, sillä kukaan pelaaja ei voi hyötyä poikkeamalla strategiasta yksipuolisesti. Kääntäen, jos joku pelaaja voisikin hyötyä poikkeamalla jostain strategiasta, niin tämä olisi selvää kaikille pelaajille, jotka taas muuttaisivat omia strategioitaan tämän tiedon perusteella, jolloin kyseessä ei olisi missään tapauksessa vakaa lopputulos. Hyvin harvoista peleistä löytyy kaikille pelaajille dominantteja strategioita, joten Nashin tasapainon käsite auttaa laajentamaan tarkasteltavien pelien kenttää merkittävästi. Siitä on erityisen paljon hyötyä, kun tarkasteluun otetaan myös toistetut pelit.

Yksi klassinen esimerkki pelistä, jossa on kaksi Nashin tasapainoa, eikä yhtään dominanttia strategiaa, on niin kutsuttu hirvijahti (*stag hunt*), joka tunnetaan nykyään yleisemmin yhteistyöpelinä (*coordination game*) (esim. DeCanio & Fremstad, 2013). Siinä pelaajat ovat metsästävässä, mutta he eivät voi kommunikoida keskenään eivätkä he ole aivan varmoja siitä mitä toinen pelaaja

aikoo tehdä. Yhteistyötä tekemällä he voivat kaataa hirven, joka johtaa suurimpaan palkkioon (5,5), mutta pelissä on mahdollista metsästää myös jänistä, jolloin jahdin lopputulos ei riipu toisen pelaajan toiminnasta. Huonoin lopputulos on pyrkiä itse metsästämään hirveä, jos toinen metsästääkin jänistä. Peli on kuvattu matriisimuotoisena taulukossa 6.

Taulukko 6. Yhteistyöpelin

	Hirvi	Jänis
Hirvi	(5,5)	(0,3)
Jänis	(3,0)	(3,3)

Pelistä on helppo huomata, ettei pelaajilla ole dominoivia strategioita, vaan suotuisa toimintatapa riippuu siitä mitä toinen pelaaja tekee.

Tarkastellaan nyt peliä Nashin tasapainon näkökulmasta. Otetaan ensimmäiseksi strategia (hirvi, hirvi). Mikäli kyseessä on Nashin tasapaino, niin kummankaan pelaajan ei kannata muuttaa strategiaansa, jos toinen pelaaja pysyttelee kyseisessä strategiassa.

Jos pelaaja 1 olettaa, että pelaaja 2 aikoo metsästää hirveä, niin silloin hänen hyötynsä pelaamalla hirveä on 5 ja pelaamalla jänistä 3, eli strategiasta (hirvi, hirvi) ei kannata poiketa. Symmetriasta johtuen sama pätee myös pelaajaan 2, eli kyseessä on Nashin tasapaino.

Samoin jos pelaajan on syytä olettaa, että toinen pelaaja aikoo metsästää jänistä, niin silloin hänenkin kannattaa metsästää jänistä. Näin strategiat (hirvi, hirvi) sekä (jänis, jänis) ovat molemmat Nashin tasapainoja.

Tarkastellaan vielä esimerkin vuoksi strategiaa (hirvi, jänis). Jos pelaaja 1 olettaa, että 2 pelaa jänistä, niin hänen hyötynsä pelaamalla hirveä on 0, ja pelaamalla jänistä 3. Strategiasta (hirvi, jänis) kannattaa siis itse poiketa, ja tämä on selvää myös toiselle pelaajalle, eikä kyseessä siten ole Nashin tasapaino.

2.3 Satunnaistetut strategiat ja pelien toistaminen

Peliteoriassa voidaan myös tarkastella sellaisia pelejä, joissa pelaajat eivät yksiselitteisesti valitse jotain toimintaa, vaan asettavat kullekin toiminnalle jonkun todennäköisyyden väliltä $[0,1]$ siten, että todennäköisyyksien summa on 1. Tällaisia strategioita kutsutaan *satunnaistetuiksi strategioiksi (mixed strategies)* ja vastaavasti yksittäisten toimintojen valintaa tässä kontekstissa *puhtaiksi strategioiksi (pure strategies)*. Satunnaistettujen strategioiden hyödyksi lasketaan odotusarvo. (Jackson, 2011, 9–11).

Kovinkaan usein peleistä ei löydy Nashin tasapainoa puhtaille strategioille, mutta laajentamalla tarkastelua myös satunnaistettuihin strategioihin tilanne muuttuu. Nash on todistanut kuuluisassa lauseessaan, että jokaisessa äärellisessä normaalimuotoisessa pelissä on ainakin yksi Nashin tasapaino. Tämä tekee Nashin tasapainosta erittäin hyödyllisen työkalun pelien analysointiin.

Satunnaistettujen strategioiden todennäköisyydet voidaan ymmärtää myös tilastolliseksi todennäköisyydeksi, kun esimerkiksi tarkastellaan, kuinka joukko eri pelaajia toimii, tai kuinka yksi pelaaja toimii, kun peliä toistetaan monta kertaa. Satunnaistettujen strategioiden avulla peliteoriaa onkin mahdollista soveltaa paremmin todellisiin tilanteisiin, joihin usein liittyy epävarmuutta ja toistuvuutta.

2.3.1 Satunnaistetun strategian Nashin tasapaino kertapelissä

Tarkastellaan esimerkiksi erästä muunnelmaa yhteistyöpelistä, jossa pelaajien intressit ovat osittain ristiriitaiset. Peli tunnetaan yleisesti nimellä "Battle of sexes" (esim Kyllönen, 2011), ja siinä pariskunta pyrkii päättämään, vietetäänkö yhteistä aikaa urheilun vai elokuvan parissa. Molemmilla on omat preferenssinsä, mutta kummatkin tahtovat ennen kaikkea viettää aikaa yhdessä. Oletetaan vielä pelin kanonisesta muodosta poiketen, että urheilua

suosiva pelaaja 2 saisi jonkin verran hyötyä, vaikka valitsikin sen yksipuolisesti. Peliä voidaan kuvata taulukon 7 avulla:

Taulukko 7. Battle of sexes.

	Elokuva	Urheilu
Elokuva	(8,5)	(0,3)
Urheilu	(0,0)	(5,8)

Tässäkin yhteistyöpelissä on kaksi puhtaiden strategioiden Nashin tasapainoa: (Elokuva, Elokuva) sekä (Urheilu, Urheilu), eli jos on syytä olettaa toisen valitsevan jommankumman vaihtoehdon, niin silloin on kaikkein kannattavinta valita itse sama. Mutta kuinka peliä kannattaisi siis pelata, mikäli oletusten mukaisesti kommunikointi ei ole mahdollista, ja molemmat tietysti tahtoisivat ensisijaisesti tavoitella omaa suosikkiaan? Yksiselitteisen toiminnan sijaan, pelaajat voivatkin pelata satunnaistettua strategiaa.

Yksi keino löytää satunnaistetuista strategioista muodostuva Nashin tasapaino on etsiä molemmille pelaajille sellainen strategia, jota pelatessa toiselle pelaajalle on yhdentekevää, minkä toiminnan tämä valitsee. Toisin sanoen tällöin toinen pelaaja ei voi hyötyä muuttamalla omaa strategiaansa yksipuoleisesti, ja kun molemmat pelaajat pelaavat näin, niin kyseessä on määritelmällisesti Nashin tasapaino. (Jackson, 2011, 12).

Lähestymistapa voi tuntua hieman nurinkuriselta, sillä voisi kuvitella, että pelaajat keskittyisivät ensisijaisesti oman hyötynsä maksimoimiseen. Kyseessä on kuitenkin pikemminkin metodi Nashin tasapainon löytämiseen, kuin pyrkimys kuvata pelaajien valintaprosessia. Lisäksi on hyvä muistaa, että peliteoriassa pelaajien hyöty riippuu aina myös toisista pelaajista, jolloin oman strategian valintaan liittyy jatkuvaa vastavuoroista toisen pelaajan strategian arviointia: jos oletan, että toinen pelaaja toimii tietyllä tavalla, niin kuinka se vaikuttaa, jos toinen pelaaja olettaa minun olettavan näin?

Oletetaan nyt siis, että pelaaja 1 valitsee Elokuvan todennäköisyydellä p ja Urheilun todennäköisyydellä $1-p$. Vastaavasti pelaajalle 2 todennäköisyydet ovat q ja $1-q$. Merkitään nämä taulukkoon 8.

Taulukko 8. Battle of sexes, satunnaistettu strategia.

		q	$1-q$
		Elokuva	Urheilu
p	Elokuva	(8,5)	(0,3)
$1-p$	Urheilu	(0,0)	(5,8)

Nyt siis pelaajan 2 hyöty riippuu paitsi hänen omasta valinnastaan, niin myös pelaajan 1 strategiasta. Jos pelaaja 2 valitsee Elokuvan, niin hänen hyötynsä on todennäköisyydellä p 5, ja todennäköisyydellä $1-p$ 0. Nämä vaihtoehdot on tummennettu taulukossa 9.

Taulukko 9. Battle of sexes, satunnaistettu strategia, tummennettu sarake Elokuva.

		q	$1-q$
		Elokuva	Urheilu
p	Elokuva	(8,5)	(0,3)
$1-p$	Urheilu	(0,0)	(5,8)

Valitsemalla Elokuvan pelaajan 2 hyödyn odotusarvo olisi siis

$$p * 5 + (1 - p) * 0 = 5p.$$

Ja vastaavasti valitsemalla Urheilun pelaajan 2 hyöty olisi todennäköisyydellä p 3 ja todennäköisyydellä $1-p$ 8. Nämä lopputulokset on tummennettu taulukossa 10.

Taulukko 10. Battle of sexes, satunnaistettu strategia, tummennettu sarake Urheilu.

		q	1-q
		Elokuva	Urheilu
p	Elokuva	(8,5)	(0,3)
1-p	Urheilu	(0,0)	(5,8)

Pelaajan 2 hyödyn odotusarvo valitsemalla Urheilu olisi nyt siis

$$p * 3 + (1 - p) * 8 = -5p + 8.$$

Nashin tasapaino löydetään, kun etsitään pelaajan 1 strategian p :lle arvo, jolla pelaajan 2 valinnalla ei ole merkitystä, eli hyödyn odotusarvot ovat yhtä suuret:

$$5p = -5p + 8$$

$$p = 0,8.$$

Jolloin siis $1 - p = 0,2$.

Vastaavasti löydetään arvo q :lle merkitsemällä pelaajalle 1 elokuvan tai urheilun valitsemisesta seuraavat hyödyn odotusarvot yhtä suuriksi:

$$q * 8 + (1 - q) * 0 = q * 0 + (1 - q) * 5$$

$$8q = -5q + 5$$

$$q = 5/13 \approx 0,385.$$

Ja vastaavasti $1 - q = 8/13 \approx 0,615$. Sijoitetaan nyt lasketut arvot taulukkoon 11.

Taulukko 11. Battle of sexes, satunnaistettu strategia lasketuilla arvoilla.

		0,385	0,615
		Elokuva	Urheilu
0,8	Elokuva	(8,5)	(0,3)

0,2	Urheilu	(0,0)	(5,8)
-----	---------	-------	-------

Nyt siis pelaamalla näiden strategioiden mukaan kumpikaan pelaajista ei voi hyötyä poikkeamalla yksipuolisesti, joten kyseessä on Nashin tasapaino.

Strategioiden hyödyn odotusarvot voidaan laskea summaamalla yhteen kunkin lopputuloksen todennäköisyyden ja hyödyn tulot. Tässä pelissä siis

$$u_1 = 0,8 * 0,385 * 8 + 0,8 * 0,615 * 0 + 0,2 * 0,385 * 0 + 0,2 * 0,615 * 5 = 3,079,$$

ja vastaavasti

$$u_2 = 0,8 * 0,385 * 5 + 0,8 * 0,615 * 3 + 0,2 * 0,385 * 0 + 0,2 * 0,615 * 8 = 4.$$

Satunnaistetut strategiat voidaan ymmärtää myös tilastollisina jakaumina. Kun peliteoriaa on sovellettu esimerkiksi biologiaan (esim. Ray-Murkherjee & Murkherjee, 2016), tai jalkapallossa rangaistuspotkujen tilastollisten jakaumien tarkasteluun (Palacio-Huerta, 2003), on huomattu, että vuorovaikutustilanteissa usein päädytään kohti Nashin tasapainoa. Näissä tapauksissa taustalla tuskin on peliteoreettista analyysia, mutta tämä kuvaa hyvin Nashin tasapainon vakaata luonnetta.

2.3.2 Toistetut pelit

Peliteoriassa voidaan myös tarkastella mitä tapahtuu, kun pelejä toistetaan. Pelejä voidaan toistaa tietyn määrän verran, äärettömän monta kertaa, tai pelin toistaminen voi esimerkiksi loppua tietyllä todennäköisyydellä jokaisen kierroksen jälkeen. Kaikkiin näihin tarkastelutapoihin liittyy omia piirteitään. Keskitytään tässä tarkastelemaan vielä lyhyesti pelejä, joissa on epävarma aikahorisontti, sillä ne soveltuvat erityisen hyvin todellisten ilmiöiden kuvaamiseen, ja niiden joukosta löytyy myös mahdollinen yhteistyöratkaisu vangin dilemmaan.

Epävarman aikahorisontin pelejä kutsutaan myös *diskontatuiksi peleiksi*, sillä matemaattisesti on käytännössä sama asia, ajatellaanko pelin loppuvan joka kierroksen jälkeen todennäköisyydellä p , vai onko kyseessä diskonttaus, jonka perusteella pelaajat välittävät enemmän nykyisestä kuin tulevaisuuden hyödyistä, tai muuntavat tulevaisuuden hyötyjen arvon nykypäivään (Ozdoglar, 2010, 5).

Kun peliä toistetaan, mahdollisten strategioiden lukumäärä kasvaa, sillä strategian on kuvattava pelaajan toimintaa jokaisessa mahdollisessa pelin vaiheessa, jokaisella mahdollisella historialla. Tarkastellaan tässä strategiaa, joka tunnetaan nimellä "Grim trigger". Siinä pelaaja tekee yhteistyötä niin kauan, kunnes toinen pettää, ja vaihtaa sitten itsekkin petokseen siitä eteenpäin. Millaisen hyödyn toinen pelaaja nyt saisi tekemällä itsekkin yhteistyötä, verrattuna petokseen? Otetaan esimerkkiin taulukon 12 hyötyprofiili:

Taulukko 12. Esimerkki yhteistyöpelistä.

	Yhteistyö	Petos
Yhteistyö	(2,2)	(0,3)
Petos	(3,0)	(1,1)

Kun oletetaan että $p \in [0,1[$, ja aloituksen jälkeen jokaisen kierroksen hyödyt kerrotaan tällä arvolla, niin ensimmäisen kierroksen hyödy olisi 2, toisen $2 * p$, kolmannen $2 * p * p$ ja niin edespäin. Tekemällä yhteistyötä pelaajan odotettu hyöty olisi nyt siis

$$2 + 2p + 2p^2 + 2p^3 \dots = \frac{2}{1-p},$$

ja vastaavasti petoksesta seuraava odotettu hyöty olisi

$$3 + 1p + 1p^2 + 1p^3 + \dots = 3 + \frac{1}{1-p},$$

kun ensimmäisellä kierroksella petoksesta saataisiin hyöty 3, jonka jälkeen vastapelaaja vaihtaa myös petokseen, ja hyöty siitä eteenpäin on aina vain 1 kerrottuna diskonttausarvolla.

Nyt siis pelaajan kannattaa valita yhteistyön tekeminen, mikäli siitä seuraava hyödyn odotusarvo on petosta suurempi, eli

$$\frac{2}{1-p} > 3 + \frac{1}{1-p}$$

$$p > \frac{2}{3}.$$

Pelaajan kannattaa siis valita yhteistyön tekeminen, mikäli diskonttausarvo p on suurempi kuin $2/3$. Tämä tarkoittaa sitä, että yhteistyö on sitä kannattavampaa mitä pienemmällä todennäköisyydellä peli päättyy jokaisen kierroksen jälkeen, tai tulevaisuuden hyötyjen arvo on mahdollisimman lähellä nykyisyyden hyötyjen arvoja. Tällöin ensimmäisen kierroksen petoksesta saatu hyöty ylittyy pitkässä juoksussa.

Jälleen symmetrisyyden vuoksi sama pätee molemmille pelaajille, joten toistetussa vangin dilemmassa yksi mahdollinen ratkaisu on yhteistyö, mikäli pelaajat eivät vain diskonttaa tulevaisuutta kovin voimakkaasti. Tarkka arvo riippuu tietysti myös pelin hyötyprofiilista.

Edellä kuvatuista 2x2-peleistä, joissa pelaajien hyödyt voidaan asettaa suuruusjärjestykseen keskenään, on olemassa hieman määritelmästä riippuen ainakin 144 erilaista variaatiota. Lisäksi pelaajilla ei välttämättä ole aina selkeää preferenssiä kaikkia eri lopputuloksia kohtaan, niissä voidaan sallia myös kommunikaatio tai yhteistyön tekeminen, pelaajat voivat valita toimintansa vuorotellen ja niin edelleen. Pelien moninaisuudesta huolimatta juuri normaalimuotoisia vangin dilemmaa ja yhteistyöpeliä on tutkittu kenties eniten, ja sovellettu paljon myös kansainvälisten neuvotteluiden tarkastelemiseen. (DeCanio & Fremstad, 2013).

3 Soveltaminen ympäristönsuojeluun

Tässä kappaleessa siirrytään soveltamaan peliteoriaa ympäristönsuojeluun. Keskitytään ensin vangin dilemmaan ja ilmastoneuvotteluihin. Sen jälkeen tarkastellaan mahdollisia vaihtoehtoisia näkökulmia, sekä ratkaisuehdotuksia.

3.1 Kansainväliset ilmastoneuvottelut ja vangin dilemma

Tarkastellaan vangin dilemmaa siten, että pelaajina ovat kaksi suurta valtiota, jotka neuvottelevat päästövähennyksistä. Heidän mahdollisina toimintoinaan on saastuttaminen ja vähentäminen, ja toimista seuraavat hyödyt on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Vangin dilemma ja päästövähennykset.

	Vähennys	Saastutus
Vähennys	(3,3)	(1,4)
Saastutus	(4,1)	(2,2)

Jos molemmat maat vähentäisivät päästöjään yhteistyössä, niin ne hyötyisivät molemmat kohtalaisesti (3,3), ja tulos olisi kummallekin parempi kuin yhteinen saastuttamisen jatkaminen (2,2), ja yhteenlaskettu kokonaishyöty kaikista lopputuloksista paras. Tässä pelissä jo yhden pelaajan vähennystoimet voidaan ajatella riittävät estämään ympäristön totaalisen pilaantumisen, mutta yhdessä tehdyt toimet ovat tietysti vielä tehokkaampia. Tämä ei missään tapauksessa kuvaa neuvotteluita kattavasti, mutta esimerkin avulla voidaan hahmottaa tiettyjä lainalaisuuksia. Ympäristöongelmien kontekstissa tämä dynamiikka tunnetaan myös vapaamatkustajan ongelmana tai yhteislaidunten tragediana, vaikka ne eivät olekaan aivan identtisiä (esim. Kyllönen, 2011).

Tässä pelissä olennaista on, että valtion kannalta olisi ihanteellista, jos toinen leikkaisi päästöjään, mutta se itse saisi jatkaa saastuttamista. Valtio voisi

esimerkiksi jatkaa omien fossiilisten energiavarojen hyödyntämistä ilman kalliita investointeja uusiin teknologioihin saavuttaen näin taloudellista etua toiseen valtioon nähden, joka ponnistelee päästöjen vähentämiseksi. Suoran taloudellisen edun lisäksi maa hyötyisi toisen pelaajan tekemistä päästövähennyksistä ympäristöhaittojen pienentymisenä.

Vastaavasti jos toinen maa jatkaa saastuttamista, niin omien päästöjen vähentäminen on näillä luvuilla kuvattuna kaikista huonoin vaihtoehto. Tällöin voisi esimerkiksi päätyä tekemään kalliita investointeja fossiilisista irtautumiseen, mutta joutuisi erityisen epäsuotuisaan kilpailuasemaan, kun toinen jatkaisi niiden käyttöä. Lisäksi joutuisi kärsimään ympäristön pilaantumisesta toisen saastuttamisen johdosta.

Riippumatta siis muiden maiden toimista, yksittäiselle maalle on tässä pelissä aina kannattavampaa jatkaa saastuttamista. Lopputulos (Saastutus, saastutus) on siten aidosti dominoiva kaikille pelaajille, eikä pelin voi odottaa päättyvän millään muulla tavoin.

Useammankin pelaajan pelit voidaan esittää 2x2 matriisimuodossa yhden valtion näkökulmasta: tällöin pelaaja 2 kuvaa kaikkia muita valtioita, ja sama voidaan tehdä kaikkien osallistujien kohdalla. Tähän liittyy kuitenkin omia haasteitaan. Yleisesti ottaen pelin voi tietysti muodostaa kuinka monta valtiota tahansa, mutta näiden pelien havainnollistaminen ja analyysi on kertaluokkaa haastavampaa. On hyvä huomata, että jos tarkastellaan vielä useampien maiden välistä yhteistyötä, niin yksittäisten maiden näkökulmasta kannusteet vapaamatkustamiseen lisääntyvät sitä mukaa kun oma suhteellinen osuus ongelmasta pienenee.

Esimerkiksi Pariisin sopimuksen neuvottelutulos ei ole siirtynyt maiden ilmastotoimiin riittävässä määrin, jotta sen tavoitteet voitaisiin tätä menoa saavuttaa (IEA, 2021; UNEP, 2023a), ja vangin dilemma voi antaa yhden näkökulman toimia jarruttavaan dynamiikkaan.

3.2 Vaihtoehtoiset mallit ja mekanismit

Tarkastellaan tässä kappaleessa vaihtoehtoisia malleja ja ratkaisukeinoja vangin dilemman. Aloitetaan kuvaamalla ilmastoneuvotteluita yhteistyöpelinä, seuraavaksi toistamalla peliä ja lopuksi eräänlaista sakkomekanismia.

3.2.1 Yhteistyöpelit

Ilmastoneuvotteluita voidaan kuvata vangin dilemman lisäksi myös muilla peleillä, kun tehdään tiettyjä oletuksia (esim. Kyllönen, 2011; Decanio & Fremstad, 2013). Taulukossa 14 on esitettyä yksi variaatio yhteistyöpelistä, jossa on kaksi Nashin tasapainoa.

Taulukko 14. Yhteistyöpelit ja ilmastoneuvottelut.

	Vähennys	Saastutus
Vähennys	(4,4)	(1,3)
Saastutus	(3,1)	(2,2)

Tässä pelissä Nashin tasapainoja ovat siis koordinoitujen toimien (Vähennys, Vähennys) ja (Saastutus, Saastutus). Eli jos valtion on syytä olettaa, että toinen valtio aikoo vähentää päästöjään, on sillekin yksiselitteisesti paras vaihtoehto vähentää omia päästöjään. Vastaavasti mikäli valtiolla on syytä olettaa, että toinen aikoo jatkaa saastuttamista, kannattaa tällöin senkin valita saastuttaminen. Tätä peliä voisi selittää esimerkiksi sellainen käsitys, että ilmastonmuutoksen pysäyttämiseen tarvitaan molempien toimien, ja siinä epäonnistuminen aiheuttaa enemmän haittaa kuin mitä yksipuolisella saastuttamisella voisi hyötyä.

Taulukoissa 13 ja 14 esitetyillä lukuarvoilla yhteistyöpelit ja vangin dilemma muistuttavat hämäävän paljon toisiaan. Tärkeä yhteneväisyys onkin siinä, että molempien pelaajien kannalta huonoin mahdollinen lopputulos on tehdä itse

vähennystoimia, kun toinen jatkaa saastuttamista. Peleissä on kuitenkin perustavanlaatuisen ero: yhteistyöpelissä molemmat pelaajat saavuttavat paitsi yhteenlasketun, myös yksityisen maksimihyödyn tekemällä yhteistyötä, kun taas vangin dilemmassa paras lopputulos olisi itse jatkaa saastuttamista, kun toiset tekevät vähennyksiä.

On myös helppo huomata, että jos kommunikaatio on sallittu, yhteistyöpelissä on mahdollista tehdä uskottavia sopimuksia. Jos pelaajat sopivat molemmat vähentävänsä päästöjä, niin yksipuolisesti poikkeamalla kumpikaan ei voi saavuttaa hyötyä, ja lopputulos on vielä molemmille mieluisampi kuin toinen Nashin tasapaino. Vangin dilemmassa toiselta pelaajalta on aina syytä odottaa petosta, mikäli mitään ylimääräisiä mekanismeja ei oteta käyttöön.

Vastaavatko globaalit ilmastoneuvottelut enemmän vangin dilemmaa vai yhteistyöpeleitä? Decanio ja Fremstad esittävät (2013, kpl 4), että tämä riippuu, kuinka vakavaksi katastrofaalisen ilmaston kuumenemisen riski koetaan. Mikäli ilmaston kuumeneminen nähdään ihmiskunnan olemassaoloa uhkaavana ja riittävän todennäköisenä mahdollisuutena, kyseessä on yhteistyöpeleitä. Mikäli uhkaa taas ei nähdä aivan niin kriittisenä, ja tärkeämpää on geopolittinen valta muihin valtioihin nähden, niin tällöin vangin dilemma kuvaa tilannetta paremmin. Ilmastoneuvotteluiden tähänastiset heikot tulokset voivatkin olla seurausta johtavien hallitusten kykenemättömyydestä nähdä ilmastonmuutosta riittävän vakavana uhkana.

Vaikka valtiot voisivat kommunikoida vapaasti, täydellistä luottamusta on silti vaikea saavuttaa, ja yhteistyötä tekemällä pelaajat altistavat itsensä aina mahdollisesti huonoimmalle mahdolliselle henkilökohtaiselle tulokselle. Taulukon 14 hyödyt eivät kuvasta suuruusarvoiltaan mitään realistista skenaarioita, mutta on hyvä huomioida, että riskejä kaihtava strategia saattaa itse asiassa johtaa saastuttamisen jatkamiseen.

Pelaajat voivat myös huomioida tämän riskin pelaamalla puhtaan strategian sijaan satunnaistettua strategiaa. Kappaleessa 2.3.1 esitellyn metodin mukaisesti taulukossa 14 esitetyle pelille voidaan etsiä myös satunnaistetuista

strategioista muodostuva Nashin tasapaino. Oletetaan, että todennäköisyydellä p Pelaaja 1 valitsee "Vähennyksen". Nyt siis Nashin tasapainossa on oltava

$$4p + 1 - p = 3p + 2 * (1 - p)$$

$$p = 0,5.$$

Symmetrisyyden nojalla molemmille pelaajille Nashin tasapaino olisi pelata molempia toimintoja 50 % todennäköisyydellä. Tällöin molempien pelaajien hyödyn odotusarvo olisi

$$0,5^2 * 4 + 0,5^2 * 1 + 0,5^2 * 3 + 0,5^2 * 2 = 2,5.$$

Tällä hyötyprofiililla satunnaistettua strategiaa pelaamalla siis pärjäisi paremmin kuin pelkästään saastuttamalla. Ilmastonmuutoksen kontekstissa tällainen 50–50 -strategia tarkoittaisi kuitenkin myös saastuttamisen osittaista jatkamista.

3.2.2 Vangin dilemman toistaminen

Kuten kappaleessa 2.3.2 esitettiin, myös pelin toistaminen tarjoaa mahdollisen ratkaisun vangin dilemmaan, ja esimerkiksi Wood (2010, 19) on esittänyt, että tämä kuvaisi toistuvia neuvotteluita hieman realistisemmin. Sopimusten rikkomisesta voi ymmärrettävästi seurata luottamuksen menetys, mikä taas hankaloittaa uusien sopimusten neuvotteluita tulevaisuudessa.

Tarkastellaan kappaleessa 2.1 esiteltyä vangin dilemmaa yleisessä muodossaan taulukossa 15:

Taulukko 15. Vangin dilemma yleisessä muodossa.

	Y	P
Y	(a,a)	(b,c)
P	(c,b)	(d,d)

Mikäli toinen pelaaja pelaa "Grim trigger"-strategiaa, voidaan kappaleessa 2.3.2 laskutoimituksia mukaillen yhteistyön mahdollistavan diskonttauskerroimen p arvoksi määrittää:

$$p > 1 - \frac{a - d}{c}.$$

Missä $a - d$ kuvaa lopputulosten (yhteistyö, yhteistyö) ja (petos, petos), hyötyjen erotusta, ja termi $\frac{a-d}{c}$ tuon erotuksen suhdetta yksipuolisesta petoksesta saatavaan hyötyyn. Yhteistyön mahdollistavan diskonttauskerroimen p minimiarvo siis kasvaa, kun termien a ja d välinen ero pienenee, ja suhteellinen ero c :hen kasvaa. Eli toisin sanottuna mitä pienempi hyöty olisi saavutettavissa tekemällä yhteisesti yhteistyötä verrattuna molempien petokseen, ja mitä suuremman hyödyn saisi tekemällä yksipuolisesti petoksen, sitä voimakkaammin pelaajien täytyy arvostaa tulevaisuuden hyötyjä, että yhteistyö kannattaa.

Karrikoidusti voidaan vertailla seuraavia pelejä, jotka ovat molemmat määritelmällisesti vangin dilemmoja:

Taulukko 16. Vangin dilemma esimerkki a.

	Y	P
Y	(3,3)	(1,100)
P	(100,1)	(2,2)

Taulukko 17. Vangin dilemma esimerkki b.

	Y	P
Y	(100,100)	(1,101)
P	(101,1)	(2,2)

Ensimmäisessä pelissä taulukossa 16 termi $a - d$ on pieni, ja erotuksen suhteellinen ero c :hen satakertainen. Tällöin yhteistyön mahdollistavan diskonttauskerroimen minimi olisi 0,99, eli tulevaisuuden hyötyjä tulisi arvostaa melkein yhtä paljon kuin nykyisyyttä, jotta yhteistyön tekeminen kannattaisi. Vastaavasti toisessa pelissä taulukossa 17 termi $a - d = 98$ ja suhteellinen ero c :hen pieni, jolloin yhteistyö on kannattavaa kun $p > 0,03$, eli lähes aina. Nämä ovat äärimmäisiä esimerkkejä, mutta auttavat hahmottamaan pelin dynamiikkaa.

Jos tätä sovelletaan jälleen ilmastoneuvotteluihin, seuraavien ehtojen toteutuessa voi hyvinkin olla valtioiden näkökulmasta mielekästä tehdä päästövähennyksiä, vaikka kyseessä on vangin dilemma, kun peliä toistetaan:

1. Muut pelaavat Grim trigger -strategiaa
2. Uskomus, että seuraukset päästöjen vähentämisen totaalisesta epäonnistumisesta ovat hyvin vakavat verrattuna yhteistyöstä saavutettuihin hyötyihin, eli $a - d$ on suuri.
3. Yksipuolisesti saastuttamalla ei pysty saavuttamaan selvästi enemmän hyötyä kuin vähentämällä yhteisesti päästöjä, eli $a - d$ suhteellinen ero c :hen on pieni.
4. Diskonttauskerroin on riittävän suuri, eli tulevaisuuden hyötyjen ja haittojen reaaliarvot eivät ole merkittävästi pienemmät kuin nykyisyydessä.

Toisaalta sama pätee kääntäen, ja toistetussa pelissä myös saastuttamisen jatkaminen voi olla kannattavaa. Jos vaikutusarviot ovat lähinnä taloudellisia, ja usko talouskasvuun on riittävän vahvaa, voi tällöin olla tämän logiikan mukaan kannattavampaa maksaa saastuttamisen seurauksista vauraammassa tulevaisuudessa, kuin panostaa ”köyhässä” nykyisyydessä ongelmien ehkäisyyn. Vaihtoehtoisesti voidaan ajatella, että nopeasti saatavat hyödyt saadaan kasvamaan korkoa niin tehokkaasti, että ne päihittävät pitkäaikaisen yhteistyön matalammat hyödyt. Tai kenties päättäjät eivät yksinkertaisesti vain välitä tulevaisuudesta niin paljon kuin nykyisyydestä. Lopputulos on joka

tapauksessa siis sama kuin kertapelissäkin, ja saastuttamisen jatkaminen olisi jälleen kaikille pelaajille dominantti strategia. (Barrett, 2003).

Toistojen ja pitkän aikahorisontin myötä pelin hyötyjen arvioiminen vaikeutuu, sillä tulevaisuuteen liittyy aina erilaisia epävarmuuksia. Lisäksi on hyvä huomata, että edellinen tarkastelu koski vain tilannetta, jossa toinen pelaaja on sitoutunut pelaamaan "Grim trigger"-strategiaa. Toistettujen pelien tarkasteleminen tarjoaa kuitenkin kertapelejä enemmän yhteistyön mahdollisuuksia.

3.2.3 Sakkomekanismi

Hahmotellaan vielä lopuksi mekanismi, jonka puitteissa pelaajille voi olla mielekkäämpää vapaaehtoisesti sitoutua petoksesta seuraavaan sakkoon, kuin pelata vangin dilemmaa ilman sääntelyä.

Mekanismisuunnittelu on peliteorian osa-alue, jossa ei niinkään pyritä analysoimaan mitä annetuissa peleissä tulee kenties tapahtumaan, vaan löytämään sellaisia pelejä, jotka johtavat johonkin toivottuun lopputulokseen (Wood, 2010, 5). Tietyllä tapaa vangin dilemman tarinassa syyttäjä antaa erinomaisen esimerkin mekanismisuunnittelusta: hänen tavoitteenaan on, että molemmat vangit tekevät petoksen ja tunnustavat, ja hän tarjoaa vangeille sellaiset ehdot, että tämä lopputulos on vääjäämätön. Mutta entä jos lähtökohtaisesti tilannetta kuvaa vangin dilemma, ja tavoitteena olisi päästä kertapelissä yhteistyöhön? Yhden ratkaisun tähän tarjoaa pelaajien sitoutuminen sakkomekanismiin.

Tarkastellaan tilannetta, jossa kaksi toimijaa saavat päättää tahtovatko ne pelata perinteistä vangin dilemmaa ilman sääntelyä, vai sellaista vangin dilemmaa, jossa petoksesta seuraa sakkorangaistus. Ajatellaan tässä pelaajiksi kaksi suuryritystä, jotka käyttävät jotain samaa resurssia.

Kuvataan peliä ilman sääntelyä taulukon 18 avulla:

Taulukko 18. Rajatun resurssin käyttö ilman sääntelyä.

	Rajattu käyttö	Rajaton käyttö
Rajattu käyttö	(3,3)	(1,4)
Rajaton käyttö	(4,1)	(2,2)

Rationaaliset toimijat tietävät jo etukäteen, että tämän pelin lopputuloksena on väistämättä (Rajaton käyttö, Rajaton käyttö) eli lopputulos (2,2). Selityksenä hyötyfunktioille tässä voi olla, että yritykset käyttävät jotain samaa uusiutuvaa resurssia, jonka uusiutumiskyky on rajallinen ja voi romahtaa liiallisen käytön seurauksena, mikä johtaa yhteistä rajattua käyttöä heikompaan tulokseen.

Tarkastellaan nyt peliä, jossa rajattoman käytön seurauksena, joutuisi maksamaan 3 yksikön suuruisen sakon. Nyt peli näyttäisi taulukon 19 mukaiselta:

Taulukko 19. Rajatun resurssin käyttö sakkomekanismilla.

	Rajattu käyttö	Rajaton käyttö
Rajattu käyttö	(3,3)	(1,1)
Rajaton käyttö	(1,1)	(-1,-1)

Rationaaliset toimijat tietävät tästä pelistä etukäteen, että nyt dominantti strategia on "Rajattu käyttö" eli lopputulos tulee olemaan (3,3).

Molempien pelaajien täytyy kannattaa sakkoa, jotta se otetaan käyttöön. Mikäli vain toinen pelaaja valitsee Sakon, niin pelaajat päätyvät pelaamaan vangin dilemmaa ilman sääntelyä, ja molemmat tietävät sen. Nyt pelaajien edessä olevaa valintaa voidaan havainnollistaa seuraavalla taulukon 20 mukaisesti:

Taulukko 20. Sakon valinta.

	Sakko	Ei sakkoa
Sakko	(3,3)	(2,2)
Ei sakkoa	(2,2)	(2,2)

Tässä pelissä taulukossa 20 on kaksi Nashin tasapainoa: (Sakko, Sakko) ja (Ei sakkoa, Ei sakkoa). Mikäli pelaajat voivat koordinoita toimiaan, niin tällöin on kuitenkin helppo saavuttaa lopputulos (Sakko, Sakko), josta seuraa pelaajille suurin yksityinen ja yhteinen hyöty.

On siis selvää, että tietyissä tilanteissa yritysten etujen mukaista on kannattaa tiukkaakin sääntelyä. Toisaalta on hyvä muistaa, että todellisuudessa toimijoille on kaikkein houkuttelevinta pyrkiä varmistamaan, että sääntely hillitsee kaikkien muiden toimia, tehdä itse yksipuolinen petos ja välttää sakot jollain keinolla, esimerkiksi menemällä konkurssiin.

Lisäksi tämä lähestymistapa soveltuu huonosti valtioiden välisiin neuvotteluihin, niiden suvereniteetin vuoksi: kenelläkään ei ole valtaa sakottaa valtioita, eivätkä ne ole halukkaita todellisuudessa luovuttamaan sellaista valtaa kenellekään. Valtiot voisivat myös sopia maksavansa sakkoa toisilleen, mutta ongelmat ovat silti käytännössä identtiset. Hyvä esimerkki tästä on Kioton pöytäkirja, jossa säädettiin tuntuvista sakoista, mikäli valtiot eivät pääse tavoitteisiinsa. Kun sakot lopulta uhkasivat Kanadaa, niin se yksinkertaisesti irtautui sopimuksesta ilman mainittavia seurauksia. (Barrett, 2014). Yhdysvallat on taas kertaalleen irtautunut Pariisin sopimuksesta, mutta liittyi sopimukseen uudestaan, kun Biden voitti presidentinvaalit (U.S. Department of State, 2021).

Hieman toiveikkaamman esimerkin ympäristöongelmien ratkaisemisesta tarjoaa Montrealin pöytäkirja otsonikatoa aiheuttavien yhdisteiden kieltämiseksi.

3.3 Montrealin pöytäkirja otsonikerrosta heikentävistä aineista

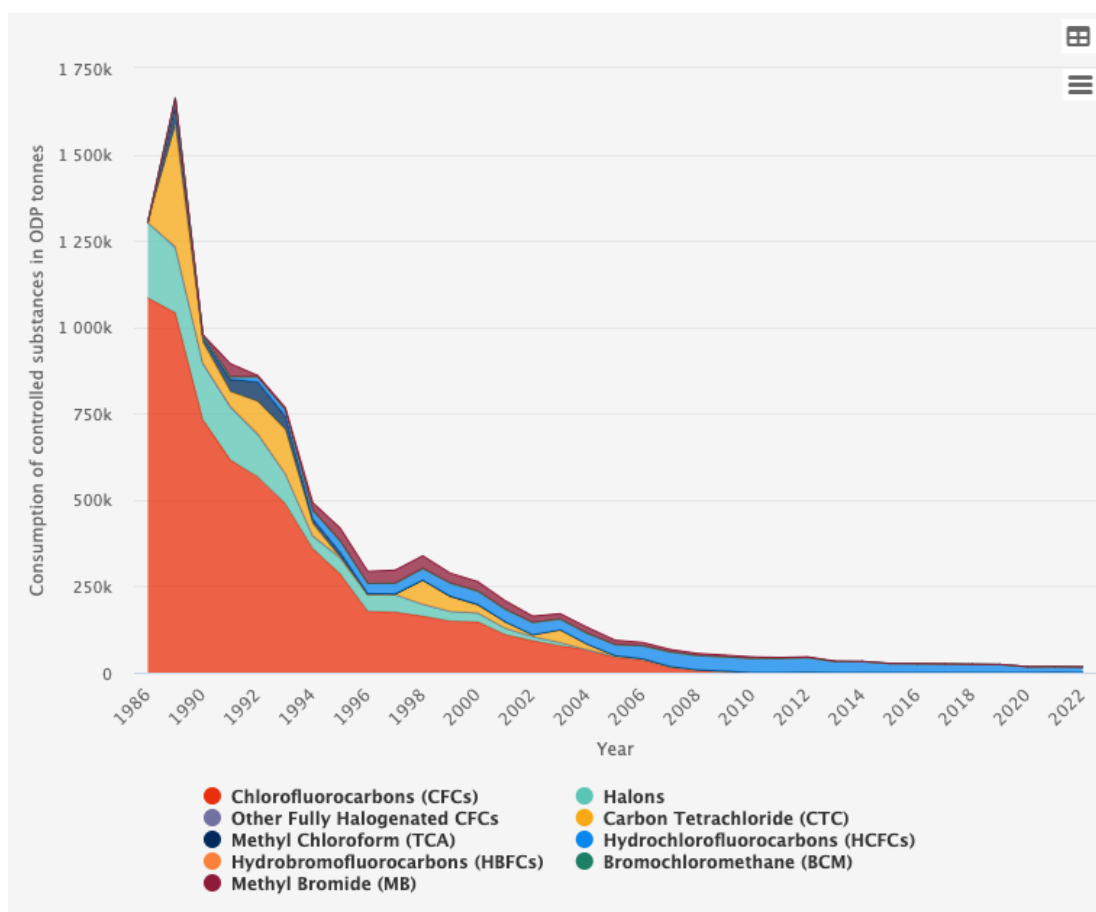
Montrealin pöytäkirja on kansainvälinen sopimus, jonka tarkoituksena on vaiheittain poistaa käytöstä otsonikerrosta heikentävät kemikaalit. Otsonikerros suojaa maapallon pintaa terveydelle haitalliselta UV-säteilyltä. Montrealin pöytäkirja on ainoa YK:n yleissopimus, jonka ovat ratifioineet kaikki 197 YK:n jäsenmaata. Alkuperäinen Montrealin pöytäkirja tuli voimaan 1. tammikuuta 1989, ja sitä on laajennettu useita kertoja. (Eur Lex, 2019). Montrealin pöytäkirjaa pidetään laajasti onnistuneena ja poikkeuksellisena sopimuksena (esim DeSombre, 2000; Barrett, 2003; McKenzie ym. 2019). Pöytäkirjaan viitataan usein myös Montrealin protokollana tai sopimuksena.

Kloorifluorivety- eli CFC-yhdisteet kehitettiin alun perin korvaamaan kylmäaineina käytettyjä myrkyllisiä ja räjähdysherkkiä tuotteita 1900-luvun alussa. Yksi tunnetuimmista tuotemerkeistä oli Yhdysvaltalaisen General Motorsin ja Du Pontin Freon. Inerti, syttymätön ja myrkytön kaasu oli markkinoilla menestys, ja käyttö laajeni pian myös punnereihin ja vaahdonmuovin valmistamiseen, ja enimmillään yhdisteitä tuotettiin jopa miljoona kuutiota vuosittain. (Elkins, 1999).

Vuonna 1974 tutkijat F. Sherwood Rowland ja Mario Molina osoittivat aiempaan Paul Crutzenin tutkimukseen pohjautuen, että CFC-yhdisteet voivat aiheuttaa otsonikatoa (Carey, 2023). Tarkempia tutkimustuloksia otsonikerroksen tilasta saatiin kuitenkin odottaa vuoteen 1985 saakka, jolloin julkaistiin ensimmäinen tieteellinen selvitys Etelämantereen vakavasta otsonikadosta (Oram, 2005). Tieteellisen näytön puutteesta huolimatta 1970-luvun loppuun mennessä esimerkiksi Yhdysvallat, Kanada, Norja ja Ruotsi olivat jo asettaneet kansallisia rajoitteita CFC-yhdisteiden käytölle, ja myös Euroopan talousyhteisö ETY pyrki lisäämään sääntelyä alueellaan.

Montrealin pöytäkirjan allekirjoitti vuonna 1987 34 maata, ja sen ensimmäisessä versiossa sovittiin tiettyjen CFC- ja halon-yhdisteiden valmistamisen vähentämisestä asteittain 50 prosentilla vuoteen 1998 mennessä. (Dudek ym., 2005) Pian allekirjoittamisen jälkeen tutkimustieto osoitti, että otsonikato oli

odotettua vakavampi, ja pöytäkirjaa täydennettiin pian 1990 Lontoon lisäyksellä ja 1992 Kööpenhaminan lisäyksellä, ja tavoitteet kiristyivät merkittävästi. Myös pöytäkirjan allekirjoittaneiden maiden määrä kasvoi nopeasti. (Eur Lex, 2019). Säädeltyjen aineiden kulutus laski 1990-luvulla nopeasti, kuten Kuvassa 1 esitetään.



Kuva 1. Otsonikatoa aiheuttavien yhdisteiden käytön kehitys (UNEP, 2023b).

Montrealin pöytäkirjassa on tiettyjä piirteitä, joiden on arvioitu olevan merkittäviä sen onnistumisen kannalta (esim. Barrett, 2003; DeSombre 2000). Siinä esimerkiksi huomioitiin alusta alkaen kehittyvät maat, joiden historiallinen ja sen hetkinen otsonikatoa aiheuttavien aineiden kulutus oli hyvin pientä, myöntämällä niille pidemmät siirtymäajat ja kehittämällä oma rahoitusmekanismi siirtymän tueksi (UNEP, n.d. a, Article 5 & Article 10). Pöytäkirja myös laadittiin siten, että sitovat lisäykset, joita on tehtykin useita

kertoja, voidaan saattaa voimaan 2/3 enemmistöllä. Tämä on parantanut pöytäkirjan kykyä mukautua uuteen tutkimustietoon (DeSombre, 2000, 54).

Lisäksi pöytäkirjan vaikuttavuutta, ja sen noudattamista vahvistavat kaupankäynnin rajoitukset: säädeltyjen aineiden tuonti ja vienti on kielletty maihin, jotka eivät ole allekirjoittaneet pöytäkirjaa (UNEP, n.d. a, Article 4). Se mahdollistaa myös sellaisten tuotteiden kaupan rajoittaminen, joiden valmistamiseen on käytetty rajoitettuja yhdisteitä. Tämä tarkoittaisi esimerkiksi elektroniikkaa, jonka puhdistamiseen CFC-yhdisteitä on käytetty yleisesti. Näitä rajoituksia ei ole koskaan sovellettu, osittain koska valvonta olisi vaikeaa ja rajoitukset olisivat koskeneet valtaisaan tuotteiden joukkoa. Rajoitusten uhka on kuitenkin mahdollisesti edesauttanut sopimuksen leviämistä (Barrett, 2003, s. 312–313).

Teollisuuden asenteesta kansainvälisen sääntelyn kehittämistä kohtaan löytyy ristiriitaista tietoa. Esimerkiksi DeSombren (2000) mukaan Yhdysvalloissa suuret kemikaalivalmistajat, kuten Du Pont, pyrkivät edistämään sopimuksen syntymistä. Tähän vaikutti osaltaan, että Yhdysvallat oli jo rajoittanut otsonikatoa aiheuttavien yhdisteiden käyttöä omalla lainsäädännöllään, ja ilman laajempaa sääntelyä yhdysvaltalaiset toimijat olisivat käytännössä pudonneet globaaleilta markkinoilta kokonaan.

Toisaalta taas esimerkiksi Smithin (1998) mukaan Du Pont on toiminut melko epäjohtonmukaisesti. Vuodesta 1975 vuoteen 1986 Du Pont johti teollisuuden vastarintamaa CFC-yhdisteiden sääntelyä kohtaan, ja tuomitsi julkisesti tieteellisen näytön CFC-yhdisteiden roolista otsonikadossa riittämättömäksi. Vuodesta 1986 vuoteen 1988 Du Pont muutti taktiikkaansa, ja ryhtyi päinvastoin lobbaamaan mahdollisimman nopeaa ja kireää sääntelyä. Yhtiön näkemyksen vaihtumista ei edeltänyt vallitsevan tieteellisen tiedon muutosta. Du Pont ilmoitti olevansa jopa valmis lopettamaan CFC-yhdisteiden valmistamisen kokonaan. Sopimuksen laatimisen jälkeen Du Pont kuitenkin jatkoi CFC-yhdisteiden valmistamista, toki sääntelyn rajoissa, vaikka tuotannon taloudellinen merkitys ei ole yrityksen mittakaavassa kovin suurta. Yhdisteiden haitat myös tunnetaan paremmin kuin ennen.

Smithin analyysin mukaan yrityksen toimintaa selittää mahdollisesti keskittyminen osakkeenomistajien taloudellisiin etuihin, ja että Du Pont arvioi Montrealin protokollan rajoitusten tarjoavan mahdollisuuden kehittää uudet vaihtoehtoisten tuotteiden markkinat. Näin se pystyi hyödyntämään omaa merkittävän suurta tutkimus- ja kehitystyön pääomaa. Alkuperäiset CFC-yhdisteiden patentit olivat jo kauan sitten rauenneet. Samoin sen on ollut taloudellisesti mielekäästä jatkaa yhdisteiden valmistamista olemassa olevalla tuotannollaan niin kauan kuin mahdollista. Smithin analyysin mukaan yhtiö on tavallaan johdonmukaisesti muuttanut julkista näkemystään CFC-yhdisteiden haitallisuudesta aina omien taloudellisten etujensa mukaan.

Myöskään korvaavien tuotteiden kehittämisen helppoudesta ei ole yksimielisyyttä. DeSombren (2000, 57–62) mukaan kehitystyö oli lopetettu ennen kuin sääntely asettui voimaan, eikä teollisuuden lausuntojen mukaan CFC-yhdisteitä korvaavia ominaisuuksiltaan vastaavia vaihtoehtoja nähty mahdollisena kehittää. Kun sääntely lopulta astui voimaan, niin korvaavia tuotteita kuitenkin onnistuttiin kehittämään nopeasti. Tämä on mahdollista nähdä osoituksena siitä, että määrätietoisella sääntelyllä on mahdollista motivoida yksityistä sektoria innovointiin, joka lopulta hyödyttää kaikkia.

Toisaalta Gareau (2010) nostaa esiin metyylibromidin, jonka käytön rajoittamista lykättiin lukuisia kertoja pääasiassa Yhdysvaltojen vaikutuksesta. Aineella oli merkittävä rooli Kalifornian mansikanviljelyssä tautien torjunnassa, eikä korvaavia aineita ole pystytty kehittämään. Yhdysvalloille myönnettiin lisää aikaa rajoituksille vuodesta 2005 aina vuoteen 2016 saakka. Tilalle on tullut lähinnä jo aiemmin käytettyjä ominaisuuksiltaan huonompia torjunta-aineita, ja tällä on ollut negatiivisia vaikutuksia viljelijöille (Holmes ym., 2020). Gareau mukaan viljelijöiden edunvalvonta pystyi käyttämään neuvotteluissa merkittävää valtaa ja viivästyttämään sääntelyä käytännössä yksipuolisesti. Kun tätä vertaa CFC-yhdisteiden kieltämisen prosessiin, niin voi olla ettei korvaavien tuotteiden kehittämistä todellisuudessa pidetty niin mahdottomana. Toisaalta metyylibromidin käyttömäärät ovat olleet verrattain pieniä (Kuva 1), eikä vertailu ole aivan mutkatonta.

Montrealin pöytäkirja on siirtynyt viimeisimmän Kigalin lisäyksen jälkeen kiinnostavaan vaiheeseen, sillä uudet rajoitteet koskevat HFC-yhdisteitä, jotka eivät aiheuta juurikaan otsonikatoa, mutta ne ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja. Lisäys on kuitenkin tietyllä tapaa looginen, sillä HFC-kaasuja käytetään lähinnä otsonikatoa aiheuttavien aineiden korvaajana. (UNEP. n.d. b). Monet Montrealin pöytäkirjassa rajoitetut aineet ovat myös kasvihuonekaasuja, ja arvioiden mukaan niiden sääntely on rajoittanut ilmaston lämpenemistä jopa enemmän kuin Kioton protokolla (Barrett, 2016).

Montrealin pöytäkirja on kiistämättä onnistunut erinomaisesti tavoitteessaan vähentää otsonikatoa aiheuttavien yhdisteiden käyttöä, kuten Kuvasta 1 voidaan nähdä. Barrett (2003, 221–239) huomioi kuitenkin, että varsinkin sopimuksen alkuaikoina maiden omat vähennykset olivat jatkuvasti jopa yhteisiä tavoitteita edellä. Barrettin analyysin mukaan otsonikatoa aiheuttavien yhdisteiden kieltämisessä oli tiettyjä piirteitä, jotka tekivät sääntelystä maille yksinkertaisesti houkuttelevaa. Sääntelyllä oli erityisesti hyvä hinta-hyötysuhde varsinkin kehittyneille maille. Valtiollisilla toimijoilla ei ollut merkittäviä kannusteita vapaamatkustamiseen, sillä otsonikato uhkasi ihmisten terveyttä hyvin suoraviivaisesti, kaikki rajoitukset vähensivät otsonikerroksen tuhoutumista, ja rajoitukset koskivat kuitenkin melko rajattua osaa taloudesta ja teollisuudesta. Lisäksi UV-säteily aiheuttaa ihosyöpää erityisen herkästi vaaleaihoisille ihmisille. Barrettin mukaan Montrealin pöytäkirjan suurimmat ansiot ovatkin näiden suotuisten olosuhteiden hyödyntäminen entistä laajemman ja tiukemman sääntelyn kehittämiseksi, mutta sopimuksen piirteiden kopioiminen muiden ympäristöongelmien sääntelyyn ei välttämättä ole mahdollista.

4 Pohdinta

Ympäristönsuojeluun liittyvän vuorovaikutuksen peliteoreettinen analyysi voi auttaa hahmottamaan tavoitteiden saavuttamiseen liittyviä haasteita ja tunnistamaan mihin vaikutustyö kannattaisi kohdistaa. Tässä opinnäytetyössä on käyty läpi lyhyesti peliteorian perusteita ja sovelluksia ympäristönsuojeluun. Työssä on keskitytty erityisesti vangin dilemmaan sekä yhteistyöpeleihin. Lopuksi on tarkasteltu vielä Montrealin pöytäkirjaa, jota pidetään laajasti erittäin onnistuneena kansainvälisenä sopimuksena.

Montrealin pöytäkirjan menestys vaikuttaa johtuvan vain osittain sen onnistuneesta rakenteesta ja osaltaan myös itse ongelman luonteesta. Rajoitukset eivät olisi todennäköisesti olleet yhtä merkittäviä ilman kansainvälistä yhteistyötä, mutta yhteistyö oli kenties mahdollista vain siksi, että vähennystoimet olivat jo lähtökohtaisesti niin kannattavia varsinkin kehittyneille maille (Barrett, 2003). Kuten kappaleessa 3.2.3 käydään tarkemmin läpi, on suvereenien valtioiden hyvin vaikeaa tai jopa mahdotonta saada aikaan uskottavia sopimuksia tilanteissa, joita kuvaa vangin dilemma. Tällöin kannusterakenne suosii yksipuolista poikkeamista yhteistyön sijaan, vaikka poikkeaminen johtaisikin lopulta kaikkien kannalta koordinoitua yhteistyötä heikompaan lopputulokseen, eikä sopimukseen voi tällöin lähtökohtaisesti luottaa.

Kiinnostava esimerkki tästä sääntelyn vaikeudesta on Montrealin pöytäkirjassa huomioitu metyylibromidi, jonka sääntelyä Yhdysvaltojen mansikanviljelijät onnistuivat viivästyttämään useilla vuosilla (Gareau, 2010). Kyseessä oli vain yksi aine, jonka käyttömäärät olivat suurimmillaankin pieniä verrattuna CFC-yhdisteisiin, joten poliittinen paine sen käytön lopettamista kohtaan on ollut todennäköisesti verrattain pienempää. Mutta entä jos lukuisilla muillakin otsonikatoa aiheuttavilla yhdisteillä olisi ollut vastaavanlainen tilanne, missä säädellyille aineille ei todella onnistuta kehittämään vaihtoehtoja, ja rajoitukset vaikuttavat negatiivisesti lähes kaikkiin toimijoihin?

CFC-yhdisteiden osalta tilanne ei todennäköisesti näyttäytynyt kaikille toimijoille vangin dilemmana. Kaikki pystyivät arvioimaan hyötyvänsä otsonikerroksen säilymisestä ainakin jossain määrin, sillä kyseessä oli varsin suoraviivainen ja jopa eksistentiaalinen uhka. Yhdisteitä käyttäville toimijoille rajoituksista ei ollut suuria taloudellisia vaikutuksia, kun korvaavia tuotteita onnistuttiin kehittämään nopeasti. Valmistajien joukosta löytyi sekä hyötyjiä, että häviäjiä. Valtiolla hyödyt olivat selvästi haittoja suuremmat, sillä yhdisteitä valmistava teollisuus oli kuitenkin niin pientä, että kansantaloudelliset haitat jäivät pieniksi.

Esimerkiksi Du Pont valmisti globaalisti jopa kolmanneksen kaikista CFC-yhdisteistä, ja silti toiminta kattoi vain noin 2 % sen omasta myynnistä (Gareau, 2010). Valtioilla ei tällöin ollut selkeitä kannusteita vapaamatkustamiseen.

Yksityiselle sektorille oli kuitenkin yhä jossain määrin houkuttelevaa kiertää rajoituksia, ja CFC-yhdisteille kehittyikin sääntelyn myötä valtavat pimeät markkinat. Maailmaan jäi rajoitusten jälkeen paljon kapasiteettia tuottaa CFC-yhdisteitä, eivätkä kaikki valmistajat kyenneet siirtymään korvaavien tuotteiden tuottajiksi. Joissain Yhdysvaltojen satamissa CFC-yhdisteet olivat heti huumausaineiden jälkeen suurin salakuljetettujen tuotteiden ryhmä 1990-luvulla (DeSombre, 2000), ja rajoitettujen kylmäaineiden laitton kauppa on yhä suuri ongelma myös Euroopassa (EIA, 2021).

Du Pontin rooli sääntelyn kehittämisessä (Desombre, 2000; Gareau, 2010) kuvaa yhtäältä, että yksityinen sektori on mahdollista saada sääntelyn puolelle, mikäli niille voidaan tarjota riittävän houkuttelevaa uutta liiketoimintaa sen myötä. Tätä heijastelee tänä päivänä esimerkiksi uusiutuvien energioiden ja sähköautojen markkinat. Toisaalta sekä CFC-yhdisteiden, että metyylibromidin tapaukset kuvaavat kuinka suuri vaikutus yksityisten toimijoiden intresseillä mahdollisesti on suuntaan tai toiseen, ja kuinka niille voi myös olla mielekäästä jatkaa ympäristölle haitallista toimintaa niin kauan kuin se on taloudellisesti kannattavaa ja mahdollista. Esimerkiksi öljy-yhtiöille vihreä siirtymä voi olla tilaisuus pikemminkin laajentaa omaa toimintaansa uusiutuviin energioihin, vihertää brändiään, ja jatkaa samalla myös fossiilisten polttoaineiden tuotantoa. Esimerkiksi IEA:n (2023) arvioiden mukaan ainakin öljyn ja maakaasun kysyntä

pysyy melko vakaana tulevina vuosikymmeninä, vaikka kasvun ennustetaankin lakkaavan.

Voittojen maksimoinnin logiikan sisällä ympäristöystävällisyydellä on lähinnä välinearvoa. On hyvinkin mahdollista toteuttaa ympäristöystävällistä ja kannattavaa liiketoimintaa pyrkimällä esimerkiksi huomioimaan ilmastonmuutokseen tai luontokatoon liittyviä riskejä rahallisesti, mutta on hyvä huomata, että toimintaa ei tällöinkään lähtökohtaisesti ohjaa ympäristöystävällisyys sinänsä. Päinvastoin, yrityksille voi olla houkuttelevaa pyrkiä lähinnä vaikuttamaan ympäristöystävälliseltä.

Kun esimerkiksi kuluttajat jollain markkina-alueella vaativat yrityksiltä vastuullisuutta, tällä alueella voi saavuttaa kilpailuetua, jos pystyy vakuuttamaan kuluttajat omasta vastuullisuudestaan. Tämä ei välttämättä tarkoita, että väittämät olisivat valheellisia, tai toimet merkityksettömiä, mutta taloudellisesta näkökulmasta yritykselle on mielekästä pyrkiä maksimoimaan uskottavuus vastuullisena toimijana mahdollisimman halvalla. Joskus tämä tarkoittaa oikeasti vaikuttavia toimia, ja joskus ei. Hyvä esimerkki tästä ilmiöstä on päästökompensaatiomarkkinat, kun jotkut myydyt kompensaatioyksiköt ovat paljastuneet arvottomiksi (esim. The Guardian, 2023).

Lisäksi on hyvä huomata, että vastuullisten tuotteiden markkinoiden kasvu ei välttämättä tarkoita ei-vastuullisten markkinoiden pientymistä varsinkaan jatkuvan kasvun kontekstissa. Ympäristöystävällistä yritystoimintaa voidaan pitää välttämättömänä, mutta ei missään määrin riittävänä osana kehitystä kohti jotain kestäväää. Mikään ei tietenkään estä yksittäisiä yrittäjiä toimimasta vastuullisesti omien henkilökohtaisten arvojensa mukaisesti, mutta kuluttajien näkökulmasta näitä vaikuttimia on vaikeaa, ellei mahdotonta arvioida.

Kappaleessa 3.2.3 käsiteltiin sakkomekanismin mielekkyyttä tilanteessa, jossa kaksi suurta yritystä hyödyntävät molemmat samaa rajallista resurssia. Voidaan kuitenkin pohtia kuvaisiko tilannetta esitettyä hyötyprofiilia paremmin peli, jossa molemmat saavat rajattomasta hyödyntämisestä merkittävät voitot ennen kuin resurssi ehtyy, jonka jälkeen ne voivat siirtyä seuraavaan resurssiin? Tällöin

sakon kannattaminen ei välttämättä enää olisikaan yrityksille optimaalinen vaihtoehto. Tämän pelin analyysiin vaikuttaa merkittävästi esimerkiksi käsitykset vaihtoehtoisten resurssien määrästä sekä aikahorisontista. Tätä voi hahmottaa peliteoreettisesti myös kappaleessa 3.2.2. käsitellyn diskonttauskertoimen avulla: mikäli pelaajat tavoittelevat lyhyen aikavälin voittoja, resurssit ehdyttävä rajaton kulutus voi olla dominoiva strategia. Kansallisella tasolla valtio ei tietenkään välttämättä tarvitse yritysten hyväksyntää sääntelyn tueksi, mutta on hyvä tunnistaa, kuinka kannattavaa yksityiselle sektorille voi olla pyrkiä vastustamaan sääntelyä. Oman haasteensa asettaa vielä yritysten mahdollisuus siirtyä maihin, joissa sääntely on heikompaa.

Kappaleessa 3.2.1 taas esitettiin, että kansainvälisellä tasolla ympäristöongelmiin liittyvä vangin dilemma on mahdollista ratkaista ymmärtämällä, että kyseessä onkin hyötyfunktioiltaan yhteistyöpelin, sillä hallitsemattoman ympäristötuhon seuraukset ovat lopulta kaikille toimijoille niin vakavat. Samoin joillekin toimijoille avautuvat uudet liiketoimintamahdollisuudet muuttavat dynamiikkaa yhteistyöpelin suuntaan. Tämä malli tarjoaa yhden uskottavan selityksen Montrealin pöytäkirjan menestykselle, sillä kuten jo edellä mainittiin, se ei mahdollisesti näyttäytynyt kaikille toimijoille alun alkaenkaan vangin dilemmana. Tietyllä tapaa siis pöytäkirjassa rajoitettujen yhdisteiden tehokkuus tuhota otsonikerrosta, ja otsonikadon suoraviivainen uhka elämälle helpottivat yhdisteiden onnistunutta rajoittamista.

Tutkijat Magli ja Manfredi (2022) esittävät, että ilmastonmuutoksen käsittely yhteistyöpelinä voi osoittautua liian optimistiseksi, ja ohjata resursseja pois tiukemman sääntelyn kehittämisestä. Esimerkiksi Pariisin ilmastopöytäkirjan on allekirjoittanut ja ratifioinut lähes kaikki maailman valtiot, mutta edes kunnianhimoisimmat lupaukset päästövähennyksistä eivät rajoita globaaleja päästöjä riittävästi, ja todelliset toimet laahaavat vielä pahemmin perässä (UNEP, 2023a). Yksi mahdollinen selitys tälle on, että valtioiden toimintaa ohjaa ilmastonmuutoksen torjunnassa vangin dilemman kaltainen dynamiikka. Lisäksi valtioilla vaikuttaa olevan kannusteita asettaa kunnianhimoisempia tavoitteita, kuin mitä ne pystyvät saavuttamaan.

Todelliseen vuorovaikutukseen ja tulevaisuuteen liittyy aina epävarmuuksia, ja erilaiset hyötyfunktiot kuvaavat käytännössä parhaimmillaankin toimijoiden uskomuksia tekojen seurauksista. Kun toimijoilla on lisäksi erilaisia uskomuksia toistensa uskomuksista, ja pyrkimyksiä uskotella toisilleen asioita, niin epävarmuudet kerrostuvat ja päätöksentekoon liittyvä analyysi sumentuu merkittävästi. Peliteoreettiset mallit ovat aina yksinkertaistuksia, ja kuten Ortmann & Veit (2022) huomauttavat, monia tilanteita voidaan kuvata uskottavasti useilla eri malleilla, eikä niitä voida koskaan todistaa ”oikeiksi”. Esimerkiksi ilmastonmuutokseen liittyy epävarmuuksien lisäksi myös suurta maantieteellistä ja vaurauteen liittyvää epäsymmetriaa, mikä monimutkaistaa tilannetta entisestään.

Jotkin pelit voivat olla lisäksi itseään toteuttavia (Kopec, 2017). Tarkastellaan tilannetta, jossa osa toimijoista uskoo avoimesti pelaavansa vangin dilemmaa, ja osa yhteistyöpeleä. Vaikka yhteistyöpeleihin uskovien näkökulmasta yhteistyön tekeminen olisi kaikkien kannalta järkevin vaihtoehto, niin heidän on otettava huomioon myös vangin dilemmaan uskovat pelaajat, joille petos on dominoiva strategia. Yhteistyöpelissä optimaalista on pyrkiä valitsemaan samoin kuin toiset pelaajat, ja näin vangin dilemma voi joissain tilanteissa ikään kuin myrkyttää koko pelin ja toteuttaa itseään. Kopecin mukaan ilmastonmuutokseen liittyvässä vuorovaikutuksessa on piirteitä tästä ilmiöstä.

Tässä työssä esitellyt peliteoreettiset mallit ovat hyvin karkeita yksinkertaistuksia, joiden ei voi olettaa kuvaavan ympäristöongelmiin liittyvää vuorovaikutusta kovin kattavasti. Tarkastelu auttaa kuitenkin hahmottamaan tiettyjä lainalaisuuksia, ja varsinkin haasteiden vakavuutta. Monille yrityksille ympäristöä tuhoava liiketoiminta voi olla yksinkertaisesti hyvin kannattavaa varsinkin lyhyellä aikavälillä, ja kilpailluilla markkinoilla yksipuoliset toiminnan rajoittamiset vain avaavat mahdollisuuksia muille toimijoille. Vaikka valtiot aidosti pitäisivätkin esimerkiksi ilmastonmuutoksen ja luontokadon torjuntaa tavoiteltavana, toimien onnistunut koordinointi on osoittautunut haastavaksi. Kiinnostavia esimerkkejä uudenlaisista alueellisista toimista ovat Euroopan unionin kiristynyt päästökauppa, sekä tuore hiilirajamekanismi. Lähivuosina

nähdään myös joutuuko esimerkiksi Suomi ostamaan nieluyksiköitä muilta jäsenmailta, sillä kansallisista tavoitteista ollaan jäämässä rutkasti jälkeen (Ilmastopaneeli, 2023).

Tässä työssä ei ole juurikaan käsitelty yksilön näkökulmaa, vaikka loppujen lopuksi se on keskeisessä roolissa kaikkien yritysten ja valtioiden toiminnan taustalla. Yksittäisille ihmisille ympäristön suojeleminen voi näyttäytyä kaikin puolin mielekkäänä toimintana, eivätkä toiminnan mahdollisuudet rajoitu kuluttajuuteen, äänestämiseen saati omien elintapojen negatiivisen vaikutuksen minimoimiseen. Viime vuosina Suomessa on nähty uuden sukupolven suoraa toimintaa Elonkapinan muodossa, ja Suomen luonnonsuojeluliitolla on jo yli 80-vuotinen historia. Järjestöllä on ollut merkittävä rooli esimerkiksi kansallispuistojen perustamisessa (Laakkonen ym. 2019).

Luonnonperintösäätiö taas on suojellut lahjoitusten turvin lähes 5000 hehtaaria metsää vuodesta 2000 lähtien (Luonnonperintösäätiö, n.d.). Nämä toimet ovat pisaroita meressä, ja aika näyttää mihin suuntaan ympäristön tila kehittyy tulevaisuudessa. Tässä työssä esiteltyjen haasteiden valossa heikentymisen jatkuminen vaikuttaa melko todennäköiseltä. Turvallisena lähtökohtana nykypäivän ympäristönsuojelulle voisi kenties pitää Nintendo-pelikonsolin ikonista lopetusnäytön tekstiä:

Everything not saved will be lost.

Lähteet

Barrett, S. (2003). *Environment and Statecraft*. Oxford Oxfordshire: Oxford University Press.

Barrett, S. (2014). Why have climate negotiations proved so disappointing? Sustainable Humanity, Sustainable Nature: Our Responsibility. Pontifical Academy of Sciences, Extra Series 41, Vatican City.

https://www.pas.va/content/dam/casinapioiv/pas/pdf-volumi/extra-series/es_41/es41-barrett.pdf

Barrett, S. (2016). Coordination vs. voluntarism and enforcement in sustaining international environmental cooperation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(51), 14515–14522.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1604989113>

Binmore, K. (1992). *Fun and Games: A Test on Game Theory*. D.C. Health and Company, Lexington.

Bland, A. R., Roiser, J. P., Mehta, M. A., Schei, T., Sahakian, B. J., Robbins, T. W., & Elliott, R. (2017). Cooperative Behavior in the Ultimatum Game and Prisoner's Dilemma Depends on Players' Contributions. *Frontiers in Psychology*, 8, 1017.

<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2017.01017>

Carey, F. A. (2023). Chlorofluorocarbon. *Encyclopedia Britannica*.

<https://www.britannica.com/science/chlorofluorocarbon>

DeCanio, S. J., & Fremstad, A. (2013). Game theory and climate diplomacy. *Ecological Economics*, 85, 177–187.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.04.016>

DeSombre, E. R. (2000). The experience of the Montreal Protocol: particularly remarkable, and remarkably particular. *UCLA Journal of Environmental Law and Policy*, 19(1), 49-82.

Dudek, D. J., LeBlanc, A. M. & Sewall K. (1990). Cutting the Cost of Environmental Policy: Lessons from Business Response to CFC Regulation. *Ambio*, 19(6/7), 324–328. <http://www.jstor.org/stable/4313727>

EIA. (2021). *Europe's most chilling crime – the illegal trade in HFC refrigerant gases*. [Raportti]. <https://eia-international.org/report/europes-most-chilling-crime/>

Elkins, J. W. (1999). Chlorofluorocarbons (CFCs). In D. E. Alexander & R. W. Fairbridge (Eds.) *The Chapman & Hall Encyclopedia of Environmental Science*, 78-80. Kluwer Academic, Boston, MA.
<https://gml.noaa.gov/hats/publicn/elkins/cfcs.html>

EUR-Lex. (2019). Montrealin pöytäkirja otsonikerrosta heikentävistä aineista. <https://eur-lex.europa.eu/FI/legal-content/summary/montreal-protocol-on-substances-that-deplete-the-ozone-layer.html>

Gareau, B.J. (2010). A critical review of the successful CFC phase-out versus the delayed methyl bromide phase-out in the Montreal Protocol. *Int Environ Agreements* 10, 209–231. <https://doi.org/10.1007/s10784-010-9120-z>

Holmes, G. J., Mansouripour, S. M., Hewavitharana, S. S. (2020). Strawberries at the Crossroads: Management of Soilborne Diseases in California Without Methyl Bromide. *Phytopathology* 110(5), 956-968.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-11-19-0406-IA>

IEA. (2021). *Net Zero by 2050*. IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, License: CC BY 4.0

IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)

Ilmastopaneeli. (2023). Metsänielun vertailutason tekninen korjaus ei poista Suomen nieluhaasteita [Blogiteksti].
<https://www.ilmastopaneeli.fi/2023/metsanielun-vertailutason-tekninen-korjaus-ei-poista-suomen-nieluhaasteita/>

Ingham, S. (2023). *Pareto-optimality*. *Encyclopedia Britannica*.

<https://www.britannica.com/money/topic/Pareto-optimality>

Jackson M. O. (2011) A Brief Introduction to the Basics of Game Theory.

https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1968579

Kopec, M. (2017). Game theory and the self-fulfilling climate tragedy.

Environmental values 26(2), 203-221. <http://www.jstor.org/stable/44202482>

Kyllönen, S. (2011). Vailla teknistä ratkaisua: yhteislaidunten tragedia, yhteistoiminnan ongelmat ja ympäristöpoliittinen teoria. Julkaisussa S Kyllönen, J Lemetti, N Noponen & M Oksanen (toim). *Kiista yhteismaista: Garret Hardin ja selviytymisen politiikka*. Niin et näin -kirjat, Eurooppalaisen filosofian seura, Tampere, Sivut 73–111.

Laakkonen, S., Louekari, S. & Lahtinen, A. (2019). Kansallispuistojen ympäristöhistoriaa. *Historiallinen aikakauskirja*, 117(4), 401–417.

https://www.historiallinenaikakauskirja.fi/wp-content/uploads/2020/05/HAik_4_2019_Laakkonen-Louekari-Lahtinen.pdf

Luonnonperintösäätiö. (n.d.). Suojelualueet. [Verkkosivu].

<https://luonnonperintosaatio.fi/suojelualueet/#suojeluid> (luettu 22.11.2023).

Magli, A. C. & Manfredi, P. (2022). Coordination games vs prisoner's dilemma in sustainability games: A critique of recent contributions and a discussion of policy implications. *Ecological Economics*, 192.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107268>

McKenzie, R., Bernhard, G., Liley, B. et al. (2019). Success of Montreal Protocol Demonstrated by Comparing High-Quality UV Measurements with “World Avoided” Calculations from Two Chemistry-Climate Models. *Sci Rep* 9, 12332. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48625-z>

Myerson R. B. 1991. *Game Theory: Analysis of Conflict*. Cambridge: Harvard University Press.

Oram, D. E. (2005). Chlorofluorocarbons and other halocarbons. In A.

Townshend & C. Poole (Eds.) *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)*, (pp. 80-89). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00087-X>.

Ormann, J., Veit, W. (2023). Theory Roulette: Choosing that Climate Change is not a Tragedy of the Commons. *Environmental Values*, 31(1). 65-89.

<https://doi.org/10.3197/096327122X16452897197784>

Ozdoglar A. (2010). Game Theory with Engineering Applications Lecture 15: Repeated Games (luentomateriaali). [https://ocw.mit.edu/courses/6-254-game-theory-with-engineering-applications-spring-2010/5a158a7558165d0e22b5b27fcfa01713 MIT6_254S10 lec15.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/6-254-game-theory-with-engineering-applications-spring-2010/5a158a7558165d0e22b5b27fcfa01713/MIT6_254S10_lec15.pdf)

Palacios-Huerta I. (2003). Professionals Play Minimax. *The Review of Economic Studies*, 70(2). 395–415. <https://doi.org/10.1111/1467-937X.00249>

Ray-Mukherjee, J., Mukherjee, S. (2016). Evolutionary stable strategy. *Resonance* 21, 803–814. <https://doi.org/10.1007/s12045-016-0386-5>

The Guardian. (2023). Revealed: more than 90 % of rainforest carbon offsets by biggest certifier are worthless, analysis shows [Raportti].

<https://www.theguardian.com/environment/2023/jan/18/revealed-forest-carbon-offsets-biggest-provider-worthless-verra-aoe> (luettu 22.11.2023)

UNEP. (n.d. a). Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol>

UNEP. (n.d. b). About Montreal Protocol. <https://www.unep.org/ozonaction/who-we-are/about-montreal-protocol>

UNEP. (2023a). *Emissions Gap Report*. [Raportti]. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>

UNEP. (2023b). *Consumption of controlled substances* [Kuva]. <https://ozone.unep.org/countries/data>

U.S. Department of State. (2021). *The United States Officially Rejoins the Paris Agreement* [Lehdistötiedote]. <https://www.state.gov/the-united-states-officially-rejoins-the-paris-agreement/>

Wood, P. J. (2010). Climate Change and Game Theory: A Mathematical Survey (CCEP working paper 2.10). Centre for Climate Economics & Policy, Crawford School of Economics and Government, The Australian National University, Canberra