

# Rike miljøsvin?

## *En spillteoretisk analyse av klimagassutslipp*

Ingrid Marie Schaumburg Huitfeldt



Masteroppgave i samfunnsøkonomisk analyse

Økonomisk Institutt  
UNIVERSITETET I OSLO

Mai 2012



# Rike miljøsvin?

En spillteoretisk analyse av klimagassutslipp.

© Ingrid Marie Schaumburg Huitfeldt

2012

Rike miljøsvin? En spillteoretisk analyse av klimagassutslipp.

Ingrid Marie Schaumburg Huitfeldt

<http://www.duo.uio.no/>

Trykk: Reprosentralen, Universitetet i Oslo

# Sammendrag

Klimautfordringen er et globalt miljøproblem. Det spiller ingen rolle hvor utslippet av karbondioksid eller andre klimagasser kommer fra; virkningen på klimaet kjenner ingen landegrenser. Selv om global oppvarming vil ramme hele kloden, vil konsekvensene variere mellom land og områder. I denne oppgaven vil utslippsstrategier for to land som begge bidrar til et globalt fellesonde bli drøftet. Målet er å kaste lys over hvordan landsspesifikke ulikheter slik som initial realkapitalbeholdning, diskontering av fremtiden og sårbarhet for en eventuell klimakatastrofe kan påvirke landenes miljøpolitikk, som representert ved utslippsbaner for klimagasser. Er det slik at forsvarsløse lavinntektsland sitter igjen med svarteper fra rike lands miljøsvineri?

Oppgaven ser på et simultant spill mellom to aktører, der egen strategi velges uten å vite noe om den andres valg av strategi. Spillet foregår over én periode, men neddiskontert velferd fra periode to og videre frem i tid fanges opp i en skrapverdifunksjon og vil dermed påvirke valgene som gjøres innledningsvis. Hvert land ønsker å finne den utslippsstrategien som maksimerer egen neddiskontert velferd, men må også ta hensyn til det andre landets valg av utslipp. Spillet løses ved å spesifisere Nashlikevekten, for så å se hvordan denne påvirkes ettersom landene endrer egenskaper.

Jeg kan nok ikke friste med noen entydig moralsk fordømming av rike lands klimapolitikk. Interessante resultater kan likevel noteres. Modellen viser at dersom et land legger lavere vekt på fremtidig velferd, som hypotesen er for et fattig land, vil landet øke eget utslipp av klimagasser. Utslipp fra det andre landet vil reduseres under forutsetningen om strategiske substitutter. Under noen antakelser, kan vi trekke samme konklusjon for et land som får en større initialbeholdning av realkapital, som gjerne er tilfellet for et rikt land. Vi viser også at når et land blir mer sårbart for en klimaendring, noe som er rimelig for et relativt fattig land, vil de redusere eget utslipp. Det relativt rike landet vil svare med å øke sitt utslipp. Med velvilje gir de to sistnevnte slutningene en indikasjon på at rike land *er* miljøsvin. Oppgaven forsøker å gi en forklaring på hvorfor vi ser disse resultatene.

# Forord

Denne oppgaven representerer avslutningen av min mastergrad i samfunnsøkonomisk analyse ved Økonomisk Institutt, Universitetet i Oslo.

Jeg vil gjerne takke min veileder Jon Vislie for særs god oppfølging og smittende engasjement. Helt fra idemyldringsfasen har hans dør stått på vidt gap; han har bistått med alt fra emnevalg til modellutforming til utlukning av hårreisende regnefeil. For dette er jeg veldig takknemlig.

Mamma og pappa fortjener en generell takk for deres ubetingede hjelp og støtte; pappa mer spesifikt for korrekturlesing, til tross for min erkjennelse om at han ikke kan *alt*.

Tusen takk til gode venner og medstudenter i 4. etasje for fem uforglemmelige år. Endeløse kaffe- og lunsjpauser har gitt mye glede og motivasjon. Til sist vil jeg særlig nevne Merethe Eriksrud Lund. Våre utallige kollokvier på solterrassen på Slemdal har vært både lærerike og hyggelige.

Eventuelle feil og mangler i teksten er mitt ansvar alene.

Blindern, 14. mai 2012.

# Innholdsfortegnelse

1	Innledning.....	1
2	Verden i dag .....	3
3	Modellen.....	5
3.1	Referansemodellen: ikke-kooperativ løsning .....	7
3.2	Referansemodellen: Pareto-optimal løsning.....	10
3.3	Stokastisk skrapverdifunksjon: ikke-kooperativ løsning.....	12
3.4	Stokastisk skrapverdifunksjon: Pareto-optimal løsning .....	15
4	Modellanalyse .....	17
4.1	Komparativ statikk: referansemodellen.....	17
4.1.1	Endring i diskonteringsfaktoren .....	17
4.1.2	Endring i initial realkapitalbeholdning.....	20
4.2	Komparativ statikk: stokastisk skrapverdifunksjon.....	22
4.2.1	Endring i sårbarhet for katastrofe .....	22
4.2.2	Endring i initial realkapitalbeholdning.....	23
5	Anvendelse av modellen på den virkelige verden.....	25
5.1	Tolkning av resultater.....	27
5.1.1	Diskontering .....	27
5.1.2	Initial realkapitalbeholdning .....	30
5.1.3	Sårbarhet for katastrofe .....	31
5.1.4	Sannsynlighet for katastrofe.....	31
5.2	Mulige utvidelser .....	32
5.2.1	Flere perioder .....	32
5.2.2	Flere land.....	34
5.2.3	Terskelverdi for utslipp .....	35
6	Konklusjon .....	38
	Litteraturliste .....	40





# 1 Innledning

Klimautfordringen er et globalt miljøproblem. Det spiller ingen rolle hvor utslippet av karbondioksid eller andre klimagasser kommer fra; virkningen på klimaet kjenner ingen landegrenser. Dette gjør at vi kan betrakte akkumulert klimagassutslipp i atmosfæren som et globalt fellesonde. Utslipp er ikke-ekskluderende, men samtidig rivaliserende, med den implikasjon at utslipp fra ett land blir direkte påvirket av utslipp fra ett eller flere andre land. Følgelig oppstår en negativ eksternalitet; ett lands utslipp vil påføre andre land en kostnad som disse ikke blir kompensert for. Selv om global oppvarming vil ramme hele kloden, vil konsekvensene variere mellom land og områder. I denne oppgaven vil utslippsstrategier for to land som begge bidrar til et globalt fellesonde bli drøftet. Målet er å kaste lys over hvordan landsspesifikke ulikheter kan påvirke landenes miljøpolitikk, representert ved utslippsbaner for klimagasser.

Oppgaven ser på et simultant spill mellom to aktører, der egen strategi velges uten å vite noe om den andres valg av strategi. Spillet foregår over én periode, men neddiskontert velferd fra periode to og videre frem i tid fanges opp i en skrapverdifunksjon og vil dermed påvirke valgene som gjøres innledningsvis. Ideen er å studere to lands ikke-kooperative strategier for utslipp av klimagasser. Begge land har nytte av utslipp gjennom en sammenheng mellom utslipp og konsum. Samtidig vil utslippene bidra til et globalt fellesonde idet klimagassene akkumuleres i atmosfæren. Dette kan føre til en irreversibel skade – en katastrofe – i fremtiden. I modellen virker det globale ondet gjennom påvirkningen på fremtidig velferd, som fanget opp i skrapverdifunksjonen. Denne funksjonen inkluderer også beholdningen av realkapital, da landene positivt verdsetter gjenstående kapital fra første periode. For gitt initial kapitalbeholdning, vil en økning i dagens konsum føre til et lavere nivå på fremtidig kapitalbeholdning. Dette modelleres ved hjelp av en alminnelig neoklassisk produktfunksjon. Hvert land ønsker å finne den utslippsstrategien som maksimerer egen neddiskontert velferd, men må også ta hensyn til det andre landets valg av utslipp.

I utvidelsen som følger av den enkle modellen, vil skrapverdifunksjonen gjøres stokastisk. På denne måten får vi uttrykt at sannsynligheten for katastrofe er økende i utslippet. Samtidig modellerer vi skaden mer eksplisitt. Ideen er at akkumulert utslipp ikke er skadelig i seg selv,

men dersom beholdningen blir stor nok, vil den føre til en irreversibel skade. Størrelsen på denne skaden er avhengig av eksogene forhold som sårbarhet for katastrofe, samt kapitalnivå, da skaden vil dempes av en høyere kapitalbeholdning. Katastrofen vil ramme begge land, men de vil oppleve nyttetapet ulikt. Som et verste tilfelle kan vi tenke oss Bangladesh, et land som vil bli oversvømt og delvis tilintetgjort som et resultat av økt havnivå. Norge derimot, vil så vidt bli påvirket. Mer generelt kan vi anta at et fattig land med lav kapitalbeholdning vil oppleve et større nyttetap fra en økning i akkumulert utslipp enn det et rikt land med stor kapitalbeholdning vil gjøre.

Hensikten er å få en større forståelse av hvordan grunnleggende ulikheter mellom land, slik som initial realkapitalbeholdning, diskontering av fremtiden og sårbarhet for en eventuell katastrofe, kan påvirke deres utslippsstrategier. Er det slik at forsvarsløse lavinntektsland sitter igjen med svarteper for rike lands miljøsvineri?

Oppgaven er strukturert som følger. I kapittel 2 ser vi verden fra fugleperspektiv, og forsøker å motivere oppgavens relevans ved å beskrive konsekvenser av global oppvarming. Modellen beskrives i kapittel 3. Her defineres først en ikke-kooperativ referansem modell, samt den Pareto-optimale løsningen. Deretter gjøres en utvidelse av referansem modellen slik at skrapverdifunksjonen blir stokastisk. Også denne sammenliknes med en Pareto-optimal løsning. I kapittel 4 gjøres modellanalysen. Her bruker vi komparativ statikk for å se på hvordan modellen påvirkes av at det foretas endringer i landspesifikke parametere. I kapittel 5 drøftes det hvorvidt modellen er egnet til å studere aspekter ved den virkelige verden. Det diskuteres også hvilke utvidelser som kunne ha vært gjort for å gjøre modellen mer realistisk. Oppsummering og konklusjoner følger i kapittel 6.

## 2 Verden i dag

Høyinntektsland står for kun en sjettedel av verdens befolkning, men er ansvarlig for nærmere to tredjedeler av drivhusgassene i atmosfæren. Det er de fattige landene, de som er minst i stand til å tilpasse seg klimaendringene, som vil bære den største byrden. (The International Bank for Reconstruction and Development; The World Bank, 2010)

Verdensbanken estimerer at temperaturstigningen på jorden frem mot år 2050 vil være i intervallet mellom to og fem grader celsius, sammenliknet med førindustrielle tider (omkring 1750). En temperaturstigning på fem grader tilsvarer forskjellen mellom dagens klima og forrige istid. I løpet av denne perioden nådde isbreer Sentral-Europa og norddelen av USA. Denne endringen skjedde over et helt millennium, mens menneskeskapt klimaendring foregår i løpet av en hundreårsperiode. Konsekvensene av en slik temperaturstigning kan bli enorme. Havnivået kan øke med én meter dette århundret, og slik true mer enn seksti millioner mennesker i utviklingsland. Produktiviteten i jordbruket kan falle på verdensbasis, noe som vil resultere i store økonomiske tap. Selv ved lavere temperaturendringer vil vi kunne oppleve store globale endringer fra nytt værmønster, og særlig utviklingslandene vil kunne bli rammet. En temperaturøkning på to grader kan resultere i en fire til fem prosents permanent reduksjon i årlig inntekt per innbygger i Afrika og Sør-Asia. Sammenlikner vi dette med det globale gjennomsnittstapet i BNP på én prosent, blir forskjellene mellom høyinntektsland og lavinntektsland enda tydeligere. (The International Bank for Reconstruction and Development; The World Bank, 2010)

Videre anslår Verdensbanken at utviklingsland vil bære rundt 75-80 prosent av kostnadene fra skadene som skyldes global oppvarming. Klimaendringer vil påvirke flere sektorer og produktive sektorer og miljøer som landbruk, skog, energi og kystsoner i utviklingsland så vel som i industriland. Utviklingsland blir hardere rammet av klimaendringer. Dette skyldes delvis at de er mer eksponert for klimasjokk, men også deres lave tilpasningsevne. Sårbarheten til de fattige har flere forklaringer. Begrensede finansielle og humane ressurser, dårlig helse og boforhold, samt utilstrekkelige helsetjenester, gjør at naturkatastrofer er ekstra skadelige i disse landene. Når temperaturen øker, vil antallet mennesker som lever i områder som er utsatt for malaria og denguefeber øke. Mindre produktivt landbruk vil føre til

underernæring og redusere innbyggernes immunforsvar. (The International Bank for Reconstruction and Development; The World Bank, 2010)

Fattige land er særlig sårbare for oversvømmelse. Ti av de femten største byene i utviklingsland ligger i lavtliggende kystområder, og er dermed spesielt utsatt for økt havnivå. I Sør -og Øst-Asia og i stillehavsområdet, bor et stort antall mennesker i slike områder. Også ferskvannsressurser er utsatt for klimaendringer gjennom påvirkning fra monsunen, som bidrar med mesteparten av årlig nedbør, og gjennom smeltingen av isbreer. Isbreene i Himalaya og Andesfjellene genererer vannkraft og gir rent vann til mer enn én milliard mennesker. Den hurtige smeltingen av disse er særlig truende for bosettinger på landsbygden og viktige matmarkeder. Global oppvarming vil videre føre til sterkere stormer; tørke og ekstreme temperaturer vil bli mer vanlig. Dette vil ødelegge jordbruksland, og gjøre landbruk mindre produktivt. Siden to tredjedeler av Afrika er ørken eller tørt land, er kontinentet sterkt utsatt. (The International Bank for Reconstruction and Development; The World Bank, 2010)

Den største trusselen er at klimaendringene virker sterkt ødeleggende på utviklingslandenes viktigste økonomiske aktiviteter. Brorparten av befolkningen i disse landene baserer seg på landbruk for inntekt og arbeid. Rundt 70 prosent av verdens ekstremt fattige mennesker bor i rurale områder. I Nord-Europa og Nord-Amerika kan en temperaturstigning føre til at avlingene øker moderat, men i flere asiatiske land vil avlingene for ris, hvete og mais reduseres, noe som rammer deres økonomier kraftig. Også høyinntektsland vil bli påvirket av moderat oppvarming. Faktisk vil skadene per innbygger være høyere i høyinntektsland siden de bosetter kun 16 prosent av verdens befolkning, men bærer 20-25 prosent av kostnadene som påløpes som følge av klimaendringer. Uretten er at disse landene er mye bedre skikket til å kunne takle slike konsekvenser. (The International Bank for Reconstruction and Development; The World Bank, 2010)

Kunnskapen om dette danner bakteppet for denne masteroppgaven. Høy- og lavinntektsland blir ulikt påvirket av global oppvarming. Dette, og andre grunnleggende landspesifikke egenskaper, gjør at de har svært forskjellige utgangspunkt og insentiver for deres miljøpolitikk. En gjennomgang av hvordan disse ulikhetene påvirker utslippsvalgene kan hjelpe oss i å øke forståelsen for hvorfor det ser ut til å være motvilje til å begrense utslipp, og også til å gjennomføre globale klimaavtaler.

### 3 Modellen<sup>1</sup>

Vi ønsker innledningsvis å finne den ikke-kooperative likevekten i utslippsspillet mellom to hypotetiske land med lik befolkningsstørrelse. Begge landene vil simultant tilstrebe å maksimere sin neddiskonterte velferd, men ingen av dem kontrollerer alle variablene som påvirker deres nytte. Utfallet for hvert land vil avhenge av valg som er tatt av det andre landet, i tillegg til egne valg. Den resulterende Nashlikevekten er vanligvis beskrevet som et utfall der ingen har incentiver til unilateralt å endre sin egen strategi. Ved å følge Leif Johansens postulat 1 til 5 (Johansen, 1982), skal vi forsøke å gi en mer presis forklaring av Nashlikevekten.

Hvert land tar et uavhengig valg uten å kommunisere eller samarbeide med det andre landet. Ingen land har dermed informasjon om det andre landets valg vedrørende utslippsbane på det tidspunktet da det selv velger sin egen utslippsbane. Hvert land er klar over det andre landets mulighetsområde og nyttefunksjoner, og bruker denne kunnskapen når det tar sitt eget valg. Når landet velger eget utslippsnivå, antar det at det andre landet er rasjonelt på samme måte som landet selv er rasjonelt. Et land kan korrekt forutse avgjørelsen som vil bli tatt av det andre landet, men det vet også at det andre landet kan forutse landets egne valg. Ved å være i stand til å forutse valgene som tas av et annet land, vil landets egen avgjørelse maksimere landets velferdsfunksjon som er sammenfallende med den forutseende avgjørelsen til det andre landet. Avgjørelsen som tas er dermed rasjonell hvis hvert land, etter å ha observert avgjørelsen til det andre landet samt spillets utfall, ikke angrer på avgjørelsen landet selv har tatt.

Uten samarbeid mellom landene, vil løsningen typisk være ikke Pareto-optimal. Oppgaven fokuserer på den ikke-kooperative likevekten, men det vil være innsiktsfullt å sammenlikne med en løsning der landene samarbeider.

Spillet er utformet som følger. Vi ser på to land, gitt ved  $j = 1, 2$ . Begge har sin egen produksjonsteknologi som representert ved den neoklassiske produktfunksjonen og anvendelsessammenhengen  $g_j(K_j^0) = c_j + K_j - (1 - \delta_j)K_j^0$  der  $c_j, K_j$  and  $\delta_j$  er landspesifikke nivåer på henholdsvis konsum, kapitalbeholdning og depresieringsrate.

---

<sup>1</sup> Modellen er en forenklet versjon av Nævdal & Vislie (2010)

Landene har en positiv initialbeholdning av realkapital,  $K_j^0 > 0$  og produktfunksjonen tilfredsstillende Inadabetingelsene:  $g_j'(0) = \infty, g_j'(\infty) = 0, g_j'' < 0$  og  $g_j(0) = 0$ .

Vi antar at utslippet av en klimagass,  $e_j$ , er en funksjon av konsum slik at  $e_j = \alpha_j c_j$  der  $\alpha_j$  er en parameter som representerer utslippsintensiteten av konsum, eller effektiviteten av en renseteknologi. I det følgende velger vi måleenhet slik at  $\alpha_j = 1$ . Land  $j$  har nytte av konsum i løpet av perioden spillet forløper, og landets nyttefunksjon er gitt ved  $u_j(c_j)$ . Det er antatt at nyttefunksjonen er økende og strengt konkav i konsum slik at  $\frac{\partial u_j}{\partial c_j} > 0$  og  $\frac{\partial^2 u_j}{\partial c_j^2} < 0$ .

Modellen er lagt opp som et simultant spill over én periode. En skrapverdifunksjon  $v_j(K_j, Z)$  fanger opp neddiskontert fremtidig velferd for begynnelsen av periode to og utover.  $Z$  er totalbeholdningen av utslipp som akkumuleres innen slutten av perioden, og er relatert til utslippsstrømmen gjennom likningen  $Z = Z^0 + e_1 + e_2$ . Initial størrelse på beholdningen er null,  $Z^0 = 0$ . Den irreversible skaden fanges opp av det siste argumentet i skrapverdifunksjonen. Funksjonen er økende i kapital, og synkende i forurensningsbeholdningen slik at  $\frac{\partial v_j}{\partial K_j} > 0$  and  $\frac{\partial v_j}{\partial Z} < 0$ . Vi antar videre at den er strengt konkav i begge argumenter slik at  $\frac{\partial^2 v_j}{\partial K_j^2} < 0, \frac{\partial^2 v_j}{\partial Z^2} < 0$ . Mer intuitivt kan vi tolke skrapverdifunksjonen som bestående av en kostnadsfunksjon der marginalkostnaden er positiv og strengt konveks;  $-\frac{\partial v_j}{\partial Z} > 0, -\frac{\partial^2 v_j}{\partial Z^2} > 0$ . Beholdningen av kapital og utslipp måles i begynnelsen av andre periode, og vi antar at landene neddiskonterer skrapverdifunksjonen til begynnelsen av første periode med en landsspesifikk eksogent gitt diskonteringsfaktor  $\beta_j \in [0,1]$ .

Formålet er å finne en optimal utslippsbane hensyn tatt til de alvorlige konsekvensene utslipp medfører. Landene møter en avveining mellom å etterlate kapital i den hensikt å kunne konsumere mer i fremtiden, og å konsumere mer i dag. Er det rimelig å investere nå for fremtidig konsum, eller å konsumere nå fordi du tror at en katastrofe er uunngåelig?

### 3.1 Referansemodellen: ikke-kooperativ løsning

Det burde nå være klart at landenes maksimeringsproblem er identiske. Land  $j$  ønsker å maksimere sin neddiskonterte velferd  $W_j = u_j(c_j) + \beta_j v_j(K_j, Z)$ . Landet må ta hensyn til sammenhengen  $Z = Z^0 + e_j + e_{-j}$ , der  $e_j = c_j$ , samt produktfunksjonen  $g_j(K_j^0) = c_j + K_j - (1 - \delta_j)K_j^0$ . I tillegg har vi at  $Z^0 = 0$  og  $K_j^0 > 0$  (gitt).

Nashlikevekten følger ved at hvert av de to landene simultant løser maksimeringsproblemet, henholdsvis

$$\max_{e_1} W_1(e_1, e_2) = \max_{e_1} u_1(e_1) + \beta_1 v_1(g_1(K_1^0) - e_1 + (1 - \delta_1)K_1^0, e_1 + e_2)$$

og

$$\max_{e_2} W_2(e_1, e_2) = \max_{e_2} u_2(e_2) + \beta_2 v_2(g_2(K_2^0) - e_2 + (1 - \delta_2)K_2^0, e_1 + e_2)$$

Nashlikevekten (N) er gitt ved utslippsnivåene  $(e_1^*, e_2^*)$ . Disse oppfyller førsteordensbetingelsene

$$\frac{\partial W_1(e_1^*, e_2^*)}{\partial e_1} = 0 = \frac{\partial W_2(e_1^*, e_2^*)}{\partial e_2}$$

Likningene kan løses simultant og vi står igjen med likevektsnivåer for utslipp i land  $j = 1, 2$ :  $e_j^* = e_j(\beta_1, \beta_2, K_1^0, K_2^0)$ .

Videre antar vi at

$$\frac{\partial^2 W_j(e_1^*, e_2^*)}{\partial e_j^2} < 0$$

Mer konkret har vi dermed at Nashlikevekten for land  $j = 1, 2$  er gitt ved

$$\frac{\partial u_j}{\partial c_j} = \beta_j \left( \frac{\partial v_j}{\partial K_j} - \frac{\partial v_j}{\partial Z} \right) \tag{1}$$

Tolkningen er at i optimum tilpasser vi oss slik at en marginal økning i utslipp gir en nyttegevinst gjennom økt konsum i første periode, som skal veies mot neddiskontert fremtidig

nyttetap. Nyttetapet oppstår gjennom redusert skrapverdifunksjon som følger av at kapitalbeholdningen reduseres, og at akkumulert utslipp øker.

Førsteordensbetingelsene definerer utslipp i ett land som en funksjon av utslippet i det andre landet. Vi kaller dette en beste-responsfunksjon:

$$\frac{\partial W_j(e_j, e_{-j})}{\partial e_j} = 0 \Rightarrow e_j = R_j(e_{-j}; \beta_j, K_j^0)$$

Beste-responsfunksjonen  $e_j = R_j(e_{-j})$  har følgende egenskap:

$$\frac{\partial^2 W_j}{\partial e_j^2} R_j'(e_{-j}) + \frac{\partial^2 W_j}{\partial e_j \partial e_{-j}} = 0 \Rightarrow R_j'(e_{-j}) = - \frac{\frac{\partial^2 W_j}{\partial e_j \partial e_{-j}}}{\frac{\partial^2 W_j}{\partial e_j^2}}$$

Dette gir oss

$$R_j'(e_{-j}) = \frac{\beta_j \left( \frac{\partial^2 v_j}{\partial K_j \partial Z} - \frac{\partial^2 v_j}{\partial Z^2} \right)}{\frac{\partial^2 u_j}{\partial c_j^2} + \beta_j \frac{\partial^2 v_j}{\partial K_j^2} - 2\beta_j \frac{\partial^2 v_j}{\partial Z \partial K_j} + \beta_j \frac{\partial^2 v_j}{\partial Z^2}} \begin{matrix} < 0 \\ > 0 \end{matrix} \quad \begin{matrix} (2a) \\ (2b) \end{matrix}$$

For enkelhets skyld antar vi at beste-responskurvene er lineære, men vi kan ikke med sikkerhet anslå om helningen er positiv eller negativ. En rimelig antakelse er at den marginale skyggeverdien av kapital blir lavere jo høyere forurensningsbeholdningen er, slik at  $\frac{\partial^2 v_j}{\partial Z \partial K_j} <$

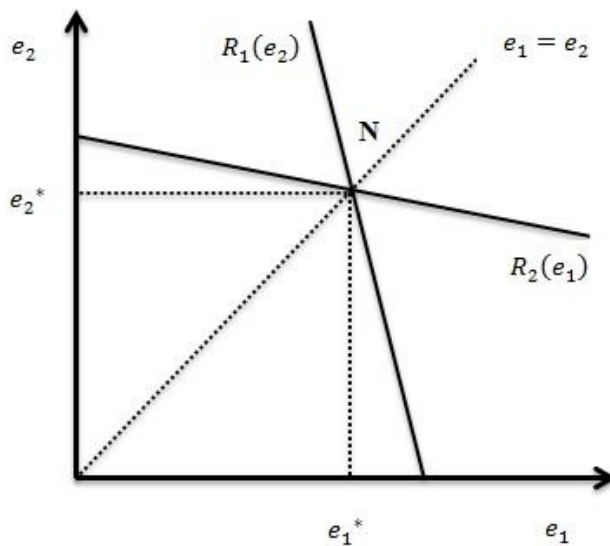
0. Dersom likevel  $\frac{\partial^2 v_j}{\partial K_j \partial Z} > \frac{\partial^2 v_j}{\partial Z^2}$ , blir telleren positiv. Dette kan begrunnes med at mer kapital reduserer marginalt nyttetap fra akkumulert utslipp mer enn det økt utslipp øker det marginale nyttetapet fra akkumulert utslipp. Under denne forutsetningen, samt  $\frac{\partial^2 W_j}{\partial e_j^2} < 0$ , vil helningen være negativ,  $R_j'(e_{-j}) < 0$ , og vi kan si at utslippene i land  $j$  og  $-j$  er strategiske substitutter (likning 2a). Dette er illustrert i figur 1. Tolkningen er at en økning i utslippet fra land  $-j$  vil øke utslippsbeholdningen, som igjen øker det neddiskonterte marginale nyttetapet fra akkumulert utslipp i land  $j$ , og slik gjør det optimalt å redusere utslippet for land  $j$ . Effekten er dempet av at økt kapitalbeholdning reduserer det marginale nyttetapet fra utslippsbeholdningen.



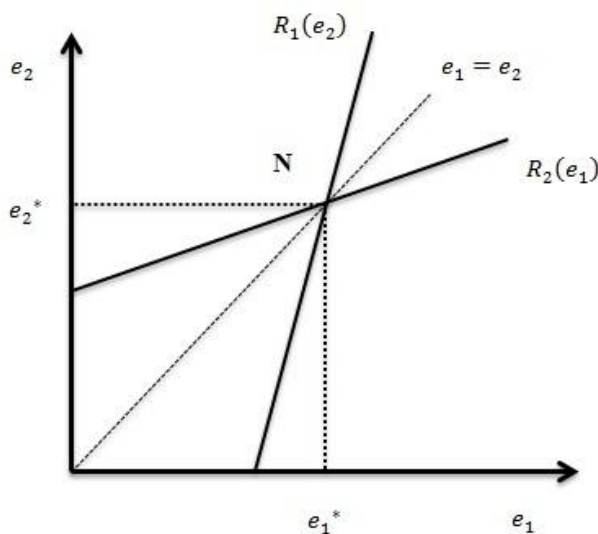
Matematisk er det også en mulighet at  $R_j'(e_{-j}) > 0$ , og i så fall er utslippene strategiske komplementer (likning 2b). Dette er vist i figur 2. Tolkningen er da at økt utslipp fra det andre landet senker egen marginal nytteverdi av kapital så mye at det vil være foretrukket å øke konsumet og dermed utslippet fremfor å investere i økt kapital. Vi kan i dette tilfellet tenke oss store materielle ødeleggelse som følge av akkumulert utslipp.

I figur 1 og 2 (Hoel, 1999) er Nashlikevekten gitt ved  $e_1^*$  og  $e_2^*$ . Disse oppfyller  $e_j^* = R_j(R_{-j}(e_j^*))$ .

Figur 1 Nashlikevekten – strategiske substitutter



Figur 2 Nashlikevekten – strategiske komplementer



## 3.2 Referansemodellen: Pareto-optimal løsning

Vi er interessert i å finne ut om et eventuelt samarbeid mellom landene vil kunne gi høyere velferd for begge parter. Vi ser derfor på den Pareto-optimale løsningen. De Pareto-optimale utslippsnivåene følger ved å maksimere et vektet gjennomsnitt av neddiskontert velferd i begge land. Ved å la  $\theta \in [0,1]$  symbolisere vekten til land 1, og  $1 - \theta$  vekten til land 2, vil en tenkt samfunnsplanleggers maksimeringsproblem kunne uttrykkes ved:

$$\max_{c_1, c_2, e_1, e_2, K_1, K_2} \theta(u_1(c_1) + \beta_1 v_1(K_1, Z)) + (1 - \theta)(u_2(c_2) + \beta_2 v_2(K_2, Z))$$

gitt at

$$Z = Z^0 + e_1 + e_2$$

$$g_1(K_1^0) = c_1 + K_1 - (1 - \delta_1)K_1^0$$

$$g_2(K_2^0) = c_2 + K_2 - (1 - \delta_2)K_2^0$$

$$e_1 = c_1$$

$$e_2 = c_2$$

$$Z^0 = 0, K_1^0, K_2^0 > 0 \text{ (gitt)}$$

Setter vi inn for bibetingelsene, står vi igjen med et maksimeringsproblem med to beslutningsvariabler:

$$\max_{e_1, e_2} \theta(u_1(e_1) + \beta_1 v_1(g_1(K_1^0) - e_1 + (1 - \delta_1)K_1^0, e_1 + e_2)) + (1 - \theta)(u_2(e_2) + \beta_2 v_2(g_2(K_2^0) - e_2 + (1 - \delta_2)K_2^0, e_1 + e_2))$$

Førsteordensbetingelsen for land  $j = 1, 2$  blir

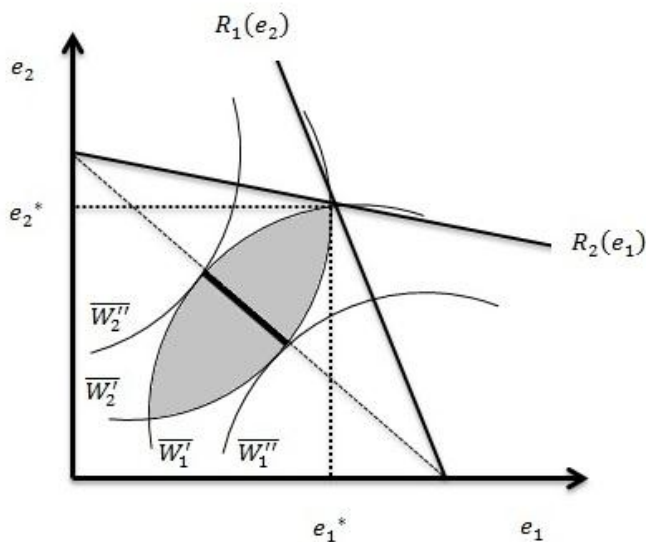
$$\frac{\partial u_j}{\partial c_j} = \beta_j \left( \frac{\partial v_j}{\partial K_j} - \frac{\partial v_j}{\partial Z} \right) - \beta_{-j} \left( \frac{1 - \theta}{\theta} \right) \frac{\partial v_{-j}}{\partial Z} \quad (3)$$

Sammenliknet med den ikke-kooperative løsningen, får vi et ekstra ledd. Grunnen er at samfunnsplanleggeren må ta hensyn til konsekvensene utslipp har for begge land. Dette resulterer i redusert konsum og utslipp, fordi  $\frac{\partial^2 u_j}{\partial c_j^2} < 0$ . Størrelsen på reduksjonen er avhengig

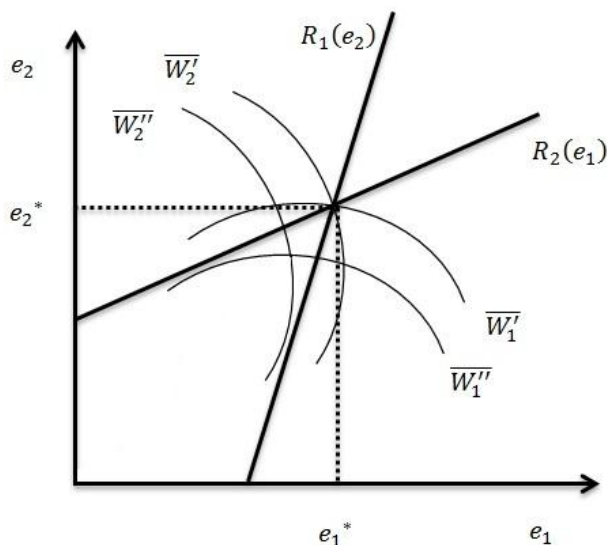
av vekten tillagt landene. Når vekten til land  $j$  går mot 1, vil landet konsumere og slippe ut mer.

Figur 3 (Hoel, 1999), der utslippene er strategiske substitutter, er en utvidelse av figur 1.  $\bar{W}_j'$  og  $\bar{W}_j''$ , der  $\bar{W}_j'' > \bar{W}_j'$ , representerer isovelferdskurver der neddiskontert velferd  $W_j = u_j(c_j) + \beta_j v_j(K_j, Z)$  er konstant. Det er klart fra figuren at Nashlikevekten fra det ikke-kooperative maksimeringsproblemet ikke er Pareto-optimal. Pareto-optimalitet innebærer at ingen kan få det bedre uten at andre får det verre. Hele det skraverte området markert i figuren representerer utslippsnivåer som innebærer en Paretoforbedring fra Nashlikevekten. Den stiplede linjen som strekker seg fra hvert lands utslippsnivå dersom en hadde vært monopolist, viser kontraktslinjen når vi lar  $\theta$  gjennomløpe alle nivåer fra 0 til 1. I skjæringspunktet mellom den vertikaleaksen og land 2s responskurve, vil  $\theta = 0$ , mens i skjæringspunktet mellom den horisontaleaksen og land 1s responskurve, er  $\theta = 1$ . Pareto-optimal tilpasning vil derfor skje langs den uthevede delen av kontraktslinjen. Det er følgelig mulig å redusere utslippene på en slik måte at nytten samtidig øker for begge land. I figur 4 (Hoel, 1999) ser vi løsningen for strategiske komplementer. Notasjonen er tilsvarende som i figur 3. Også her ser vi at en Pareto-forbedring er mulig.

Figur 3 Pareto-optimal løsning – strategiske substitutter



Figur 4 Pareto-optimal løsning – strategiske komplementer



### 3.3 Stokastisk skrapverdifunksjon: ikke-kooperativ løsning

Ideen er nå å få frem betydningen av et lands sårbarhet for en eventuell katastrofe som global oppvarming, og at større kapitalbeholdning kan virke som en buffer. Katastrofen inntreffer med en viss sannsynlighet  $p = P(Z) = P(e_1 + e_2) \in [0,1]$ , lik for begge land. Den er antatt voksende og konveks, slik at  $\frac{\partial P}{\partial Z} > 0$  and  $\frac{\partial^2 P}{\partial Z^2} \geq 0$ . Det er nå kun to mulige utfall; katastrofe eller ikke katastrofe. En eventuell katastrofe påfører landet et nyttetap som er avhengig av kapitalnivået  $K_j$  og en eksogen konstant størrelse  $\phi_j$ . Skadefunksjonen kan dermed uttrykkes som  $\gamma_j(K_j; \phi_j)$ . Jo større kapitalbeholdning, jo sterkere rustet er landet til å takle en eventuell katastrofe. Samtidig er sårbarhet for katastrofe ulik mellom land, for eksempel grunnet geografisk beliggenhet og landbruksavhengig økonomi. Dermed har vi at  $\frac{\partial \gamma_j}{\partial K_j} < 0$  og  $\frac{\partial \gamma_j}{\partial \phi_j} > 0$ . Skadefunksjonen er konkav i begge argumenter;  $\frac{\partial^2 \gamma_j}{\partial K_j^2} < 0$  og  $\frac{\partial^2 \gamma_j}{\partial \phi_j^2} < 0$ . Videre antar vi at  $\gamma_j$  er additiv separabel i  $\phi_j$  og  $K_j$  slik at  $\frac{\partial^2 \gamma_j}{\partial \phi_j \partial K_j} = 0$ .

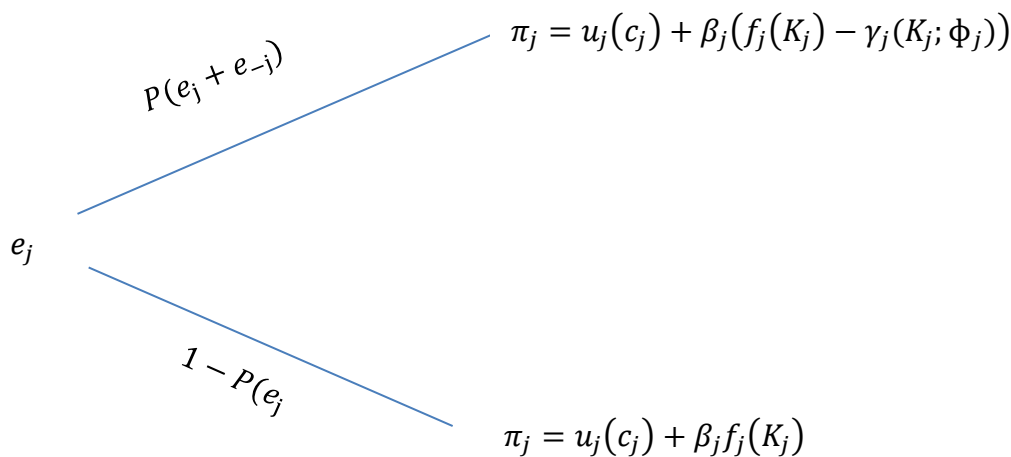
Skrapverdifunksjonen tar dermed følgende verdier:

$$v_j(K_j, Z) = \begin{cases} f_j(K_j) - \gamma_j(K_j; \Phi_j) & \text{ved katastrofe} \\ f_j(K_j) & \text{ellers} \end{cases}$$

der  $f_j(K_j)$  er skrapverdien av kapital, voksende og strengt konkav;  $\frac{\partial f_j(K_j)}{\partial K_j} > 0$ ,  $\frac{\partial^2 f_j(K_j)}{\partial K_j^2} < 0$ .

Når landene nå velger utslippsnivå, vet de at valget de tar vil påvirke sannsynligheten for at katastrofen inntreffer. Denne måten å modellere på gjør at forurensningsbeholdningen i seg selv ikke direkte påfører landene en negativ løpende kostnad. Nyttetapet fra akkumulert forurensningsbeholdning inntreffer bare med en viss sannsynlighet. Figur 5 viser beslutningstreet for land  $j$ . Katastrofen inntreffer med sannsynlighet  $P(Z)$ . Dette vil gi landet en neddiskontert velferd lik  $\pi_j = u_j(c_j) + \beta_j(f_j(K_j) - \gamma_j(K_j; \Phi_j))$ . Katastrofen inntreffer *ikke* med den disjunkte sannsynligheten  $1 - P(Z)$  og neddiskontert velferd blir da  $\pi_j = u_j(c_j) + \beta_j f_j(K_j)$ .

Figur 5 Beslutningstre



Når landene innledningsvis bestemmer utslippsnivåer, er det usikkert om katastrofen vil inntreffe. Vi finner derfor forventet verdi av skrapverdifunksjonen:

$$\begin{aligned} E(v_j(K_j, Z)) &= P(Z)(f_j(K_j) - \gamma_j(K_j; \Phi_j)) + (1 - P(Z))f_j(K_j) \\ &= f_j(K_j) - \gamma_j(K_j; \Phi_j)P(Z) \end{aligned}$$

Neddiskontert forventet velferd for hvert land blir dermed:

$$\pi_j = u_j(c_j) + \beta_j E \left( v_j(K_j, Z) \right) = u_j(c_j) + \beta_j (f_j(K_j) - \gamma_j(K_j; \phi_j) P(Z))$$

I tråd med fremgangsmåten fra avsnitt 3.1 vil vi finne den ikke-kooperative likevekten for to land. Landene maksimerer simultant hver sin neddiskonterte velferd  $\pi_j = u_j(c_j) + \beta_j (f_j(K_j) - \gamma_j(K_j; \phi_j) P(Z))$ . Hvert land må ta hensyn til sammenhengen  $Z = Z_0 + e_j + e_{-j}$ , der  $e_j = c_j$ , samt produktfunksjonen  $g_j(K_j^0) = c_j + K_j - (1 - \delta_j)K_j^0$ . I tillegg har vi at  $Z^0 = 0$  og  $K_j^0 > 0$  (gitt).

Nashlikevekten (N) er gitt ved utslippsnivåene  $(e_1^*, e_2^*)$ . Disse oppfyller førsteordensbetingelsene

$$\frac{\partial \pi_1(e_1^*, e_2^*)}{\partial e_1} = 0 = \frac{\partial \pi_2(e_1^*, e_2^*)}{\partial e_2}$$

Likningene kan løses simultant og vi står igjen med likevektsnivåer for utslipp i land  $j = 1, 2$ :

$$e_j^* = e_j(\beta_1, \beta_2, K_1^0, K_2^0, \phi_1, \phi_2)$$

Videre antar vi at

$$\frac{\partial^2 \pi_j(e_1^*, e_2^*)}{\partial e_j^2} < 0$$

Vi har dermed

$$\frac{\partial u_j}{\partial c_j} = \beta_j \left( \frac{\partial f_j}{\partial K_j} + \gamma_j(K_j; \phi_j) \frac{\partial P}{\partial Z} - P(Z) \frac{\partial \gamma_j}{\partial K_j} \right) \quad (4)$$

Tolkningen er at vi tilpasser oss slik at en marginal økning i utslipp gir en nyttegevinst gjennom økt konsum i første periode, som skal veies mot neddiskontert fremtidig nyttetap gjennom redusert skrapverdifunksjon. Dette følger direkte av at kapitalbeholdningen reduseres når konsum økes, noe som også gjør landet mer sårbart for en eventuell katastrofe, og at sannsynligheten for katastrofe øker.

Som i avsnitt 3.1 har vi at førsteordensbetingelsene definerer utslipp i ett land som en funksjon av utslippet i det andre landet:

$$\frac{\partial \pi_j(e_j, e_{-j})}{\partial e_j} = 0 \Rightarrow e_j = R_j(e_{-j}; \beta_j, K_j^0, \Phi_j)$$

Beste-responsfunksjonen  $e_j = R_j(e_{-j})$  har følgende egenskap:

$$\frac{\partial^2 \pi_j}{\partial e_j^2} R_j'(e_{-j}) + \frac{\partial^2 \pi_j}{\partial e_j \partial e_{-j}} = 0 \Rightarrow R_j'(e_{-j}) = -\frac{\frac{\partial^2 \pi_j}{\partial e_j \partial e_{-j}}}{\frac{\partial^2 \pi_j}{\partial e_j^2}}$$

Dette gir oss

$$R_j'(e_{-j}) = \frac{\beta_j \left( \gamma_j(K_j; \Phi_j) \frac{\partial^2 P}{\partial Z^2} - \frac{\partial \gamma_j}{\partial K_j} \frac{\partial P}{\partial Z} \right)}{\frac{\partial^2 u_2}{\partial c_j^2} + \beta_j \frac{\partial^2 w_j}{\partial K_j^2} - \beta_j \frac{\partial^2 \gamma_j}{\partial K_j^2} P(Z) + 2\beta_j \frac{\partial \gamma_j}{\partial K_j} \frac{\partial P}{\partial Z} - \beta_j \gamma_j(K_j; \Phi_j) \frac{\partial^2 P}{\partial Z^2}} < 0 \quad (5)$$

som sier at utslipp i land  $j$  og  $-j$  er strategiske substitutter. Økt utslipp fra land  $-j$  bidrar til høyere akkumulert utslipp som igjen øker den marginale sannsynligheten for katastrofe. Fordi land  $j$  bryr seg om fremtiden, trekker dette i retning av redusert utslipp. Samtidig vil høyere kapitalbeholdning gi større forsikring ved en potensiell katastrofe. Denne effekten bidrar til ytterligere utslippsreduksjon.

### 3.4 Stokastisk skrapverdifunksjon: Pareto-optimal løsning

Igen er vi ute etter å finne den Pareto-optimale likevekten. En tenkt samfunnsplanlegger ønsker å maksimere summen av begge lands neddiskonterte velferdsfunksjoner, og tillegger en vekt  $\theta \in [0,1]$  til land 1, og  $1 - \theta$  til land 2. Maksimeringsproblemet blir som følger:

$$\max_{c_1, c_2, e_1, e_2, K_1, K_2} \theta \left( u_1(c_1) + \beta_1 (f_1(K_1) - \gamma_1(K_1; \Phi_1) P(Z)) \right) + (1 - \theta) \left( u_2(c_2) + \beta_2 (f_2(K_2) - \gamma_2(K_2; \Phi_2) P(Z)) \right)$$

gitt

$$Z = Z^0 + e_1 + e_2$$

$$g_1(K_1^0) = c_1 + K_1 - (1 - \delta_1)K_1^0$$

$$g_2(K_2^0) = c_2 + K_2 - (1 - \delta_2)K_2^0$$

$$Z^0 = 0, K_1^0 > 0 \text{ (gitt)}$$

$$e_1 = c_1$$

$$e_2 = c_2$$

Setter vi inn for bibetingelsene, står vi igjen med et maksimeringsproblem med to beslutningsvariabler:

$$\max_{e_1, e_2} \theta \left( \beta_1 \left( \begin{array}{c} u_1(e_1) + \\ f_1(g_1(K_1^0) - e_1 + (1 - \delta_1)K_1^0) \\ -\gamma_1(g_1(K_1^0) - e_1 + (1 - \delta_1)K_1^0); \phi_1)P(e_1 + e_2) \end{array} \right) \right) +$$

$$(1 - \theta) \left( \beta_2 \left( \begin{array}{c} u_2(e_2) + \\ f_2(g_2(K_2^0) - e_2 + (1 - \delta_2)K_2^0) \\ -\gamma_2(f_2(g_2(K_2^0) - e_2 + (1 - \delta_2)K_2^0); \phi_2)P(e_1 + e_2) \end{array} \right) \right)$$

Førsteordensbetingelsen for land  $j = 1, 2$  er gitt ved

$$\frac{\partial u_j}{\partial c_j} = \beta_j \left( \frac{\partial f_j}{\partial K_j} + \gamma_j \frac{\partial P}{\partial Z} - P \frac{\partial \gamma_j}{\partial K_j} \right) + \left( \frac{1 - \theta}{\theta} \right) \beta_{-j} \gamma_{-j} \frac{\partial P}{\partial Z} \quad (6)$$

Sammenliknet med den ikke-kooperative løsningen, vil konsum, og dermed utslipp, reduseres. Størrelsen på reduksjonen er avhengig av vekten som tillegges landene. Ettersom vekten til land  $j$  nærmer seg 1, vil landet konsumere og slippe ut mer.



## 4 Modellanalyse

I kapittel 3 etablerte vi en referansemmodell og en utvidet stokastisk modell der landene opptrådte ikke-kooperativt. I det følgende vil vi studere hvordan løsningen påvirkes av isolerte endringer i landsspesifikke egenskaper som diskontering av fremtiden, initial kapitalbeholdning og sårbarhet for klimaendringer. Hypotesen er at et fattig land vil ha lavere diskonteringsfaktor og initial kapitalbeholdning, og vil være mer utsatt for en klimaendring, enn et rikt land. Vi antar dermed at land 1 er relativt rikere enn land 2.

### 4.1 Komparativ statikk: referansemmodellen

I avsnitt 3.1 fastslo vi at vi ikke kan vite med sikkerhet om helningen på responsfunksjonen var positiv eller negativ, det vil si om utslippene er strategiske substitutter eller komplementer. Tolkninger ble gitt for begge tilfeller. I det følgende vil vi betrakte begge muligheter, men fokuset vil være på tilfellet for strategiske substitutter.

#### 4.1.1 Endring i diskonteringsfaktoren

Dette avsnittet ser på effekten av at land 2 reduserer sin verdsetting av fremtiden. Vi ser derfor på en endring i  $\beta_2$ . For begge land  $j = 1, 2$  har vi at

$$\frac{\partial W_j(e_j^*, e_{-j}^*; \beta_j, K_j^0)}{\partial e_j} = 0$$

Dette gir oss to likninger til å bestemme  $\frac{\partial e_1^*}{\partial \beta_2}$  og  $\frac{\partial e_2^*}{\partial \beta_2}$ :

$$\frac{\partial^2 W_1}{\partial e_1^2} \frac{\partial e_1^*}{\partial \beta_2} + \frac{\partial^2 W_1}{\partial e_2 \partial e_1} \frac{\partial e_2^*}{\partial \beta_2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 W_2}{\partial e_1 \partial e_2} \frac{\partial e_1^*}{\partial \beta_2} + \frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2^2} \frac{\partial e_2^*}{\partial \beta_2} + \frac{\partial^2 W_2}{\partial \beta_2 \partial e_2} = 0$$

der

$$\frac{\partial^2 W_1}{\partial e_2 \partial e_1} = \beta_1 \left( \frac{\partial^2 v_1}{\partial Z^2} - \frac{\partial^2 v_1}{\partial Z \partial K_1} \right) < 0$$

$$\frac{\partial^2 W_2}{\partial e_1 \partial e_2} = \beta_2 \left( \frac{\partial^2 v_2}{\partial Z^2} - \frac{\partial^2 v_2}{\partial Z \partial K_2} \right) < 0$$

$$\frac{\partial^2 W_1}{\partial e_1^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial c_1^2} + \beta_1 \frac{\partial^2 v_1}{\partial K_1^2} - 2\beta_1 \frac{\partial^2 v_1}{\partial Z \partial K_1} + \beta_1 \frac{\partial^2 v_1}{\partial Z^2} < 0$$

$$\frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2^2} = \frac{\partial^2 u_2}{\partial c_2^2} + \beta_2 \frac{\partial^2 v_2}{\partial K_2^2} - 2\beta_2 \frac{\partial^2 v_2}{\partial Z \partial K_2} + \beta_2 \frac{\partial^2 v_2}{\partial Z^2} < 0$$

og

$$\frac{\partial^2 W_2}{\partial \beta_2 \partial e_2} = - \left( \frac{\partial v_2}{\partial K_2} - \frac{\partial v_2}{\partial Z} \right) < 0$$

Vi definerer så

$$\Lambda := \frac{\partial^2 W_1}{\partial e_1^2} \frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2^2} - \frac{\partial^2 W_1}{\partial e_2 \partial e_1} \frac{\partial^2 W_2}{\partial e_1 \partial e_2} > 0$$

Cramers regel gir oss da

$$\frac{\partial e_2^*}{\partial \beta_2} = \frac{-\frac{\partial^2 W_2}{\partial \beta_2 \partial e_2} \frac{\partial^2 W_1}{\partial e_1^2}}{\Lambda} < 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial e_1^*}{\partial \beta_2} = \frac{\frac{\partial^2 W_1}{\partial e_2 \partial e_1} \frac{\partial^2 W_2}{\partial \beta_2 \partial e_2}}{\Lambda} \begin{cases} > 0 \text{ for } \frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2 \partial e_1} < 0 \\ < 0 \text{ for } \frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2 \partial e_1} > 0 \end{cases} \quad (8a)$$

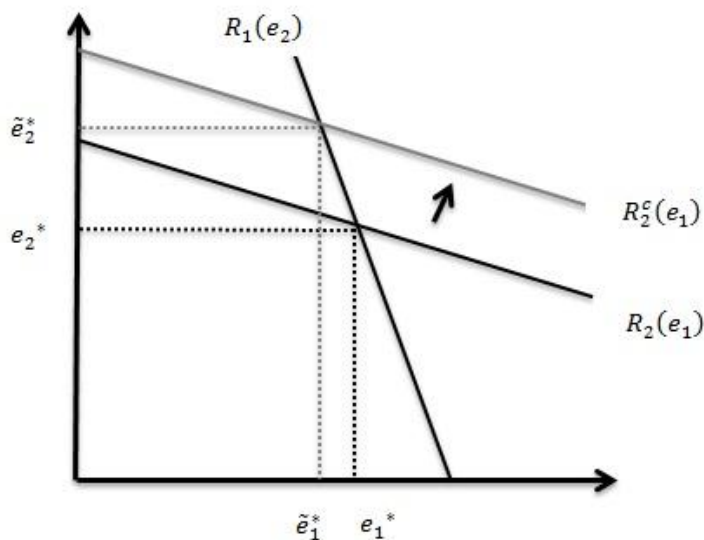
$$\frac{\partial e_1^*}{\partial \beta_2} = \frac{\frac{\partial^2 W_1}{\partial e_2 \partial e_1} \frac{\partial^2 W_2}{\partial \beta_2 \partial e_2}}{\Lambda} \begin{cases} > 0 \text{ for } \frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2 \partial e_1} < 0 \\ < 0 \text{ for } \frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2 \partial e_1} > 0 \end{cases} \quad (8b)$$

Vi ser at en *reduksjon* i land 2s diskonteringsfaktor fører til en økning i landets utslipp. Lavere diskonteringsfaktor reduserer vekten som tillegges skrapverdifunksjonen. Hvis vi verdsetter kapitalbeholdningen ved utgangen av perioden mindre nå enn vi gjorde tidligere, vil responsen være å øke konsumet, og dermed utslippet. Økningen i utslipp kan videre forklares gjennom forurensningens direkte argument i skrapverdifunksjonen. Vi bryr oss mindre om nyttetapet akkumulert utslipp vil gi oss i fremtiden, og er dermed i mindre grad opptatt av å redusere dagens utslipp. Begge disse effektene peker i retning av økt utslipp. Dette kan ses i figur 6 og 7 som et skift utover.  $R_2^c(e_1)$  representerer land 2s nye beste-

responskurve etter reduksjonen i diskonteringsfaktoren.  $\tilde{e}_1^*$  og  $\tilde{e}_2^*$  er de nye Nashlikevektsnivåene for utslipp.

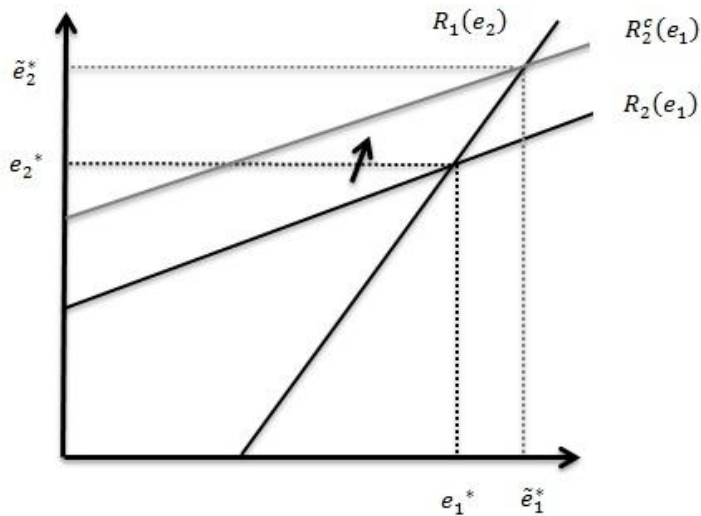
Land 1s utslipp vil avhenge av om utslippene er strategiske substitutter eller strategiske komplementer. Dersom utslippene er strategiske substitutter (likning 8a), vil landet redusere sitt utslipp. En økning i utslippet fra land 2 vil øke forurensningsbeholdningen, som igjen senker den marginale neddiskonterte skrapverdien i land 1, og slik gjør det optimalt å redusere utslippet for land 1. Dette ser vi i figur 6. Motsatt vil landet øke eget utslipp dersom utslippene er strategiske komplementer (likning 8b), som vist i figur 7. I dette tilfellet vil økt utslipp fra land 2 senke egen marginal nytteverdi av neddiskontert fremtidig kapital så mye at det vil være foretrukket å øke konsumet og dermed utslippet i dag fremfor å investere i økt kapital.

Figur 6 Endring i diskonteringsfaktoren – strategiske substitutter



*Resultat 1:* Dersom land 2 diskonterer fremtiden med en lavere faktor, og utslippene i land 1 og 2 er strategiske substitutter, vil utfallet være økt utslipp for land 2 og redusert utslipp for land 1.

Figur 7 Endring i diskonteringsfaktoren – strategiske komplementer



*Resultat 2:* Dersom land 2 diskonterer fremtiden med en lavere faktor, og utslippene i land 1 og 2 er strategiske komplementer, vil både land 1 og land 2 øke utslippet sitt.

#### 4.1.2 Endring i initial realkapitalbeholdning

Vi vil nå se på en endring i initial kapitalbeholdning for land 1. På tilsvarende måte som for endret diskonteringsfaktor, kommer vi frem til følgende endring i Nashlikevektene:

$$\frac{\partial e_1^*}{\partial K_1^0} = \frac{-\frac{\partial^2 W_1}{\partial K_1^0 \partial e_1} \frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2^2}}{\Lambda} < \frac{0}{> 0}$$

$$\frac{\partial e_2^*}{\partial K_1^0} = \frac{\frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2 \partial e_1} \frac{\partial^2 W_1}{\partial K_1^0 \partial e_1}}{\Lambda} < \frac{0}{> 0}$$

der

$$\frac{\partial^2 W_1}{\partial K_1^0 \partial e_1} = \beta_1 (g'(K_1^0) + 1 - \delta_1) \left( \frac{\partial^2 v_1}{\partial K_1 \partial Z} - \frac{\partial^2 v_1}{\partial K_1^2} \right) < \frac{0}{> 0}$$

Vi har antatt at land 1 er relativt rikere enn land 2. Rikdommen gjør at en økning i utslipp påfører skyggeverdien av kapital en mindre marginal endring enn det en økning i

kapitalbeholdningen vil gjøre:  $\left| \frac{\partial^2 v_1}{\partial K_1 \partial Z} \right| < \left| \frac{\partial^2 v_1}{\partial K_1^2} \right|$ . Da begge disse andrederiverte er negative, har vi at  $\frac{\partial^2 v_1}{\partial K_1 \partial Z} > \frac{\partial^2 v_1}{\partial K_1^2}$ .

Dermed vil

$$\frac{\partial^2 W_1}{\partial K_1^0 \partial e_1} = \beta_1 (g'(K_1^0) + 1 - \delta_1) \left( \frac{\partial^2 v_1}{\partial K_1 \partial Z} - \frac{\partial^2 v_1}{\partial K_1^2} \right) > 0$$

slik at

$$\frac{\partial e_1^*}{\partial K_1^0} = \frac{-\frac{\partial^2 W_1}{\partial K_1^0 \partial e_1} \frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2^2}}{\Lambda} > 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial e_2^*}{\partial K_1^0} = \frac{\frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2 \partial e_1} \frac{\partial^2 W_1}{\partial K_1^0 \partial e_1}}{\Lambda} \begin{cases} < 0 \text{ for } \frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2 \partial e_1} < 0 \\ > 0 \text{ for } \frac{\partial^2 W_2}{\partial e_2 \partial e_1} > 0 \end{cases} \quad (10a)$$

$$(10b)$$

Land 1 vil øke sitt utslipp av klimagasser når det opplever en velstandsøkning gjennom økt initialbeholdning av realkapital. Intuisjonen er som følger. La oss gå ut ifra at økt initial kapitalbeholdning veltes fullstendig over i økt kapitalbeholdning fra andre periode, slik at konsumnivået i utgangspunktet holdes uendret. Dette fører isolert sett til en reduksjon i både marginalavkastingen av kapital og i marginaltapet av akkumulert utslipp. Vi antok at landets rikdom gjorde dem sterkere rustet til å stå i mot økt utslipp. Videre gikk vi ut ifra at den marginale endringen i skyggeverdien til kapital er større i absoluttverdi for en økning i akkumulert utslipp enn for en økning i kapitalbeholdningen. Dette kan forklares ved at landet har investert i sikrere bygninger, demninger etc. som gjør at konsekvensene fra økt utslipp, som for eksempel høyere havnivå, ikke er like ødeleggende for landet.

Studerer vi førsteordensbetingelsen (likning 1), ser vi at når kapitalbeholdningen øker, må balansen gjenvinnes enten ved at marginalnyttens av forurensing også reduseres, eller ved at marginalnyttens av konsum senkes. Begge tilfeller betyr en økning av konsum og utslipp.

Land 2s svar på land 1s økte utslipp er avhengig av om utslipp i land 1 og 2 er strategiske substitutter (likning 10a) eller strategiske komplementer (likning 10b). Intuisjonen for dette er gitt i avsnitt 3.1.

Resultatene kan illustreres tilsvarende som i figur 6 og 7. Siden vi har brukt land 1 som utgangspunkt når vi ser på en økning i initial realkapitalbeholdning, vil vi kunne se dette grafisk som et skift utover i land 1s beste-responskurve.

*Resultat 3:* Land 1, antatt som et relativt rikt land, vil øke sitt utslipp dersom deres initialbeholdning av realkapital øker. Dersom utslipp i land 1 og 2 er strategiske substitutter, vil land 2 respondere med å slippe ut mindre.

*Resultat 4:* Land 1, antatt som et relativt rikt land, vil øke sitt utslipp dersom deres initialbeholdning av realkapital øker. Dersom utslipp i land 1 og 2 er strategiske komplementær, vil land 2 respondere med å slippe ut mer.

## 4.2 Komparativ statikk: stokastisk skrapverdifunksjon

I avsnitt 3.3 etablerte vi en modell der skrapverdifunksjonen var stokastisk. I dette avsnittet vil vi se på en endring i parameterverdiene  $\phi$  og  $K_0$ , henholdsvis sårbarhet for klimaendring og initialbeholdning av realkapital, for så å undersøke hvordan slike endringer påvirker likevekten.

### 4.2.1 Endring i sårbarhet for katastrofe

Vi vil nå se på effekten av at katastrofen treffer land 2 hardere enn land 1, fordi landet er relativt mer sårbart. Dette kan være en følge av geografisk beliggenhet, eller fordi landets økonomi er bygget opp rundt sektorer som er vesentlig mer eksponert for klimaendringer. I modellen ser vi på dette som en økning i  $\phi_2$ .

Tilsvarende som i 4.1 har vi at endringen i Nashlikevektene er gitt ved

$$\frac{\partial e_1^*}{\partial \phi_2} = \frac{\frac{\partial^2 \pi_2}{\partial e_2 \partial e_1} \frac{\partial^2 \pi_2}{\partial \phi_2 \partial e_2}}{\Lambda^s} > 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial e_2^*}{\partial \phi_2} = \frac{-\frac{\partial^2 \pi_2}{\partial \phi_2 \partial e_2} \frac{\partial^2 \pi_1}{\partial e_1^2}}{\Lambda^s} < 0 \quad (12)$$

der

$$\Lambda^s = \frac{\partial^2 \pi_1}{\partial e_1^2} \frac{\partial^2 \pi_2}{\partial e_2^2} - \frac{\partial^2 \pi_1}{\partial e_2 \partial e_1} \frac{\partial^2 \pi_2}{\partial e_1 \partial e_2} > 0$$

og

$$\frac{\partial^2 \pi_2}{\partial \phi_2 \partial e_2} = -\beta_2 \left( \frac{\partial \gamma_2}{\partial \phi_2} \frac{\partial P}{\partial Z} - P(Z) \frac{\partial^2 \gamma_2}{\partial \phi_2 \partial K_2} \right) = -\beta_2 \frac{\partial \gamma_2}{\partial \phi_2} \frac{\partial P}{\partial Z} < 0$$

Dersom  $\phi_2$  øker, vil dette føre til at land 2 slipper ut mindre (likning 12), mens land 1 øker sitt utslipp (likning 11).

Grunnen til at land 2 reduserer sitt utslipp, er at større sårbarhet øker skadeomfanget ved en eventuell katastrofe. Effekten er avhengig av hvor sensitiv sannsynligheten for katastrofe er for en endring i utslippsbeholdningen. Jo mer sensitiv, jo større blir utslippsreduksjonen. Land 1s respons er å øke utslippet. Grunnen er at lavere utslipp fra land 2 reduserer utslippsbeholdningen og dermed den marginale sannsynligheten for katastrofe. Samtidig vil lavere kapitalbeholdning gi dem en mindre buffer mot katastrofen. Dette gjør at land 1 vil øke konsumet og utslippet i dag.

*Resultat 5:* Når land 2 blir mer sårbart for en klimaendring, vil landet redusere eget utslipp. Land 1 vil øke sitt utslipp.

#### 4.2.2 Endring i initial realkapitalbeholdning

Vi vil igjen se på virkningen av en endring i land 1s initialbeholdning av kapital, denne gangen når skrapverdifunksjonen er stokastisk. Endringen i Nashlikevektene blir følgende

$$\frac{\partial e_1^*}{\partial K_1^0} = \frac{-\frac{\partial^2 \pi_1}{\partial K_1^0 \partial e_1} \frac{\partial^2 \pi_2}{\partial e_2^2}}{\Lambda^s} > 0 \quad (13a)$$

$$< 0 \quad (13b)$$

$$\frac{\partial e_2^*}{\partial K_1^0} = \frac{\frac{\partial^2 \pi_2}{\partial e_2 \partial e_1} \frac{\partial^2 \pi_1}{\partial K_1^0 \partial e_1}}{\Lambda^s} < 0 \quad (14a)$$

$$> 0 \quad (14b)$$

der

$$\frac{\partial^2 \pi_1}{\partial K_1^0 \partial e_1} = -\beta_1 (g'(K_1^0) + 1 - \delta_1) \left( \frac{\partial^2 f_1}{\partial K_1^2} + \frac{\partial \gamma_1}{\partial K_1} \frac{\partial P}{\partial Z} - P(Z) \frac{\partial^2 \gamma_1}{\partial K_1^2} \right) > 0$$

I dette tilfellet er det vanskelig å trekke konklusjoner om hvorvidt utslippet vil øke eller reduseres. Vi har effekter som drar i begge retninger. Fra førsteordensbetingelsen (likning 4) ser vi at økt initial kapitalbeholdning gjør at skyggeverdien av kapital senkes. Dette trekker i retning av økt utslipp, fordi marginalnyten av konsum må øke for å holde balansen. Samtidig dempes marginalgevinsten av økt kapital gjennom skadefunksjonen, noe som indikerer redusert utslipp.

Forklaringen er at økt kapitalbeholdning vil fungere som en forsikring fordi dette reduserer skadeomfanget ved en eventuell katastrofe. Dette trekker i retning av økt sparing, og dermed redusert konsum og utslipp i dag (likning 13b). Økt kapitalbeholdning gjør også at landet har mer å tape; det vil ikke overlate for mye kapital til fremtiden fordi det da kan risikere å miste alt dersom katastrofen skulle inntreffe. Dette motiverer til økt konsum, og dermed utslipp, i dag (likning 13a)

*Resultat 6:* Når initialbeholdning av kapital øker, og skrapverdifunksjonen er stokastisk, kan vi ikke konkludere med hvorvidt utslippet vil øke eller reduseres. Kapitalbeholdningen fungerer som en buffer dersom en katastrofe skulle inntreffe, men samtidig vil en økning av fremtidig velferd gjøre at landet har mer å tape.



## 5 Anvendelse av modellen på den virkelige verden

I denne oppgaven har vi sett på effekten av en endring av ulike parameterverdier, som diskonteringsfaktor, realkapitalbeholdning og sårbarhet for katastrofe. Endringen i seg selv, er ikke spesielt interessant. Hensikten er snarere å belyse betydningen av at land besitter ulike grunnleggende egenskaper. Slik spillet er lagt opp i denne oppgaven, er disse parameterne fastsatt eksogent for aktørene. Parameterverdiene bestemmes i forkant av spillets begynnelse, og reflekterer blant annet både politikk, kultur, kunnskap og holdninger i det spesifikke landet. Preferanser og valg som foretas på bakgrunn av dette, er derfor tilstandsbetingede. Med tilstandsbetingede preferanser menes at valget som blir tatt avhenger av upåvirkbare forhold idet avgjørelsen tas. Et eksempel kan illustrere: Jeg har lyst til å se en konkret fotballkamp. Dersom det er fint vær, vil jeg se den på stadion; dersom det er dårlig vær, vil jeg se den fra sofaen hjemme. Valget mitt avhenger derfor av været ute. På samme måte kan vi se for oss at fattige land har et annet utgangspunkt enn et rikt land når parameterverdiene skal bestemmes. Et fattig land kan, i motsetning til et rikt land, blant annet kjennetegnes ved lavt utdannelses- og kunnskapsnivå, lavere velstandsnivå og mer urolig politisk styresystem. Gitt disse ulikhetene, oppstår forskjeller i de parameterne vi har sett på i denne oppgaven. I spillets kontekst reflekterer disse ulikhetene derfor grunnleggende forhold som skiller utviklingsland fra industriland, og ikke påvirkbare størrelser. Dersom landet sto fritt til å velge parameterverdi, ville det valgt den verdien som ga dem størst mulig velferd innenfor spillets rammer. Siden parameterne fastsettes eksogent, er det for eksempel fånnyttet å reise spørsmålet om hvorvidt landet vil *velge* en høy eller lav diskonteringsrate. Dette kunne igjen kunne reist dilemmaet om det er i landenes egeninteresse å oppgi den reelle verdien til spillets motstandere. Grunnen til at vi likevel velger å se på endringer i parameterverdiene er for å få frem at fordi land er fundamentalt forskjellige, vil deres avveininger og valg være ulike. Resultatet av disse ulikhetene er at landenes utslippsprofiler også påvirkes. En forståelse av dette er viktig, fordi det gjør at land kan ha forskjellig oppfatning av hva og hvor mye som må gjøres for å endre globale utslipp, og videre ha ulike insentiver til å delta i og gjennomføre globale klimaavtaler.

Det er interessant å diskutere hvorvidt modellen er egnet til å studere aspekter ved virkeligheten. I denne oppgaven ser vi på to perioder, av uviss lengde. Alle valg gjøres innledningsvis, og gjelder for hele spillets varighet. I tillegg bestemmes parameterverdiene a priori. Det er verdt å spørre seg om dette er en rimelig antakelse. utfordringer knyttet til global oppvarming er et langsiktig problem, og vil utspinne seg over et tidsintervall på flere tiår. I løpet av perioden klimaproblemet realistisk utfolder seg, vil landet kontinuerlig evaluere om det ønsker å vie flere ressurser til forskning og utvikling, eller å investere i ny teknologi. I tillegg vil ny kunnskap og læring oppstå. Disse faktorene vil påvirke variablene vi har sett på som konstante og eksogene i spillet. En bedre tilnærming til virkeligheten kan derfor være å utvide spillet til flere perioder. Dette er diskutert under 5.2.1.

Vi ser at det finnes rom for Pareto-forbedringer i landenes utslippsprofiler. Oppgaven gjør intet forsøk på å forklare hvordan landene bør koordineres for å nå denne løsningen. Et par generelle merknader kan dog nevnes. Hadde det eksistert en tredjepart eller global domstol, kunne landene tegnet kontrakter som gjør at avvik fra bestemt utslippsnivå gir tilstrekkelig høye sanksjoner. Samtidig kan dette igjen åpne for informasjonsasymmetri som gir opphav til ukjente eller skjulte handlinger. For kan vi faktisk observere hvor mye et annet land slipper ut? Og vet vi egentlig hvor klimavennlig konsum er? Slike spørsmål åpner for en diskusjon innen kontraktsteori som vi ikke skal bevege oss inn i.

I fravær av en lovgivende og håndhevende global myndighet eller verdenspoliti, må det felles ønskede valget av utslipp være individuelt rasjonelt og selvhåndhevende. Det er selvfølgelig mulig å tenke seg at vi føler en viss moralsk forpliktelse overfor andre land, men holder vi oss til strengt rasjonelle valg, vil dette gjøre at vi ender i Nashlikevekten. Skulle landene bli enige om en Pareto-optimal løsning, vil begge land ha insentiver til å fravike løsningen. Strukturen i spillet kan, dersom vi foretar noen forenklinger, beskrives som i fangens dilemma. La oss anta at landene enten slipper ut en klimagass, eller ikke gjør det. Ved utslipp opplever landene en nytte tilsvarende 15 enheter. Dette kommer i form av økt konsum. Kostnadene fra utslipp oppleves her likt for begge land, og verdsettes til 10 enheter dersom kun ett land slipper ut, og 20 enheter dersom to land slipper ut. Spillet i normal form ser dermed slik ut:

Figur 8 Fangens dilemma

	Land 2	Utslipp	Ikke utslipp
Land 1			
Utslipp		-5, -5	5, -10
Ikke utslipp		-10, 5	0, 0

Vi ser at begge land har «utslipp» som dominant strategi. Uavhengig av hva det andre landet velger, vil det rasjonelle valget for hver spiller være «utslipp». Nashlikevekten er følgelig at begge land slipper ut drivhusgasser, selv om det er fordelaktig for begge parter at ingen av dem gjør det. Problemet er at dersom de koordinerer om den Pareto-optimale løsningen med formål om at ingen skal slippe ut, vil hvert land ha insentiver til å fravike løsningen og la det andre landet foreta utslippsstoppet.

I spillet vi har sett på i denne oppgaven, er det ikke bare ett utslippsnivå som gir en Pareto-optimal løsning. Dermed vil det oppstå et problem om hvilket av disse nivåene landene skal enes om. Dette gjør at selv om landenes nyttefunksjoner og landsspesifikke parametere var kjente, noe som i seg selv er lite sannsynlig, ville det være vanskelig å koordinere valgene for å redusere samlet utslipp.

## 5.1 Tolkning av resultater

### 5.1.1 Diskontering

Diskonteringsraten reflekterer den marginale substitusjonsraten mellom konsum i dag og fremtidig konsum, og gjør at økonomisk aktivitet som skjer på ulike tidspunkt kan sammenliknes. Å fastsette en hensiktsmessig verdi for diskonteringsraten til et langsiktig problem som klimaendring, reiser økonomiske så vel som etiske betenkeligheter. Fra et etisk eller normativt perspektiv kan vi spørre oss om hvordan konsekvensene for fremtidige generasjoner bør veies. Fra en positiv synsvinkel kan et fornuftig spørsmål være til hvilken grad lavere konsum i dag vil påvirke kapitalbeholdningen og forurensningsbeholdningen i morgen.

Utålmodighet og forventninger om fremtiden er viktige faktorer når vi skal finne en diskonteringsrate. Med utålmodighet menes at når dagens konsum veies mot fremtidig konsum, vil dagens konsum bli foretrukket av den enkle grunn at det skjer før snarere enn etter. Hvis fremtidige generasjoner vil komme til å oppleve en høyere levestandard, vil en ekstra enhet av deres fremtidige konsum være mindre verdt enn en ekstra enhet av dagens konsum. Disse aspektene er samlet i Ramseylikningen (Romer, 2006)  $f'(k) = r = \rho + \omega g$ , der  $f'(k)$  er marginalproduktiviteten til kapital, og ved arbitrasje lik den sosiale diskonteringsraten  $r$ , som brukes til å diskontere konsum.  $\rho$  er raten for tidspreferanse,  $g$  er vekstraten i per capita konsum, og  $\omega$  er elastisiteten til marginalnyten av konsum. Sistnevnte er et mål på krumningen til nyttefunksjonen og forteller oss hvor raskt marginalnyten av konsum faller når konsumet øker. Vi kan knytte diskonteringsfaktoren som blir brukt gjennom denne oppgaven til Ramseys sosiale diskonteringsrate slik:  $\beta = \frac{1}{1+r}$ .

Den eksakte verdien for diskonteringsfaktoren  $\beta$  vites ikke, og er gjenstand for skarp debatt blant økonomer. Eksempelvis var Stern-rapporten om klimaendringer kritisert for å basere konklusjonene sine på en for lav diskonteringsrate, altså for høy diskonteringsfaktor. Til tross for problemene med å bestemme en eksakt verdi, er det rimelig å anta at et fattig land vil ha en lavere diskonteringsfaktor enn et rikt land. Det virker fornuftig at fattige mennesker foretrekker nåtiden fremfor fremtiden. Dette kan begrunnes med generell pessimisme, og en redsel for at fremtiden ikke vil bli nådd og dermed ikke verdt å spare for. I tillegg er konsumnivået lavere i fattige land i dag, slik at deres marginalgevinst av økt konsum i dag er høyere enn det som er tilfellet for rike land. Lavt velstandsnivå, utdanningsnivå og vekstrate er bakenforliggende faktorer som kan tenkes å underbygge denne konklusjonen. Virkningen av økonomisk vekst er dog usikker; det er vanskelig å spå om korrelasjonen er negativ eller positiv. På den ene siden kan tålmodighet føre til økonomisk vekst gjennom sparing og investering. Sammenhengen mellom økonomisk vekst og diskonteringsfaktoren er da positiv. Samtidig kan rask økonomisk vekst føre til flere investeringsmuligheter. Dette reduserer tålmodigheten, og vi får en negativ sammenheng mellom vekst og diskonteringsfaktor.

I avsnitt 4.1.1 så vi på konsekvensene av at land 2 fikk lavere diskonteringsfaktor. Det er derfor rimelig å tolke land 2 som relativt fattig sammenliknet med land 1. Alternativt kunne vi sett på en situasjon der det rike landet tiller fremtiden større vekt. Dette ville gitt motsatt resultat av det som er vist. Høyere vekt på fremtiden kan motiveres ut ifra politiske interesser og generelle holdningsendringer. De siste tiårene har debatten rundt klimapolitikk fått enormt

med spalteplass og oppmerksomhet. Det råder nå liten tvil om hvorvidt klimaendringer faktisk er menneskeskapt. Holdningsendringen i befolkningen møtes med politiske handlinger. Myndighetene besitter flere instrumenter som gjør at ethvert mål om endret atferd kan bli møtt, om ønskelig. Eksempler er avgifter på bensin og diesel, økt satsing på kollektiv transport og økte skatter til utslippsintensive bedrifter. Norge og andre vestlige lands satsing på en mer miljøvennlig profil, er ikke utelukkende begrunnet fra et bedriftsøkonomisk perspektiv. Det handler i vel så stor grad om økt kunnskap og bevissthet, og følgelig moralske forpliktelser. I Norge er det stort sett bred politisk konsensus om det overordnede målet for klimautfordringen. I mange fattige land er det derimot mye politisk uro. Ved hyppige utskiftninger av styresmakter, vil langsiktig politikk, som klima, være underordnet. Videre trues flere land av militærkupp og er i praksis diktatur. Dette gjør at befolkningens eventuelle ønske om en grønn hverdag ikke nødvendigvis er gjenspeilet i landets politikk.

Resultatet av analysen vi har utført i denne oppgaven viser at dersom et land legger lavere vekt på fremtiden, vil de slippe ut en større mengde klimagasser. Dersom utslipp er strategiske substitutter, vil det andre landet slippe ut mindre ved strategisk interaksjon. Motsatt kan det vises at dersom et land hadde økt sin diskonteringsfaktor, ville de sluppet ut mindre, mens det andre landet ville sluppet ut mer. Vi kan nå spørre oss om hvordan dette stemmer med virkeligheten. Utviklingen Kina har hatt i levestandard de siste tiårene burde tilsa at deres diskonteringsfaktor skulle økt, noe som i modellen fører til redusert utslipp. Kina har i løpet av de siste 20 årene økt sitt totale utslipp med rundt 250 prosent (Olivier, Janssens-Maenhout, Peters, & Wilson, 2011). Til sammenlikning har USAs totale utslipp økt med i overkant av 5 prosent i samme tidsperiode, mens EUs medlemsland har redusert totalutslippet med 7 prosent (Olivier, Janssens-Maenhout, Peters, & Wilson, 2011). Således er ikke modellen fullstendig sammenfallende med virkeligheten. Alternativt kan vi tro at den kraftige økonomiske veksten har gjort Kina mindre tålmodig, og at denne effekten dominerte. I så fall gir modellen et bedre bilde av virkeligheten. Samtidig ser vi i modellen på effekten av en isolert endring i kun én av parameterverdiene. For dette finnes lite empirisk data. Reelt vil både diskonteringsfaktoren og kapitalbeholdningen samtidig kunne være ulik mellom land. I modellen trekker disse effektene i motsatt retning. Dermed vil empirisk belegg muligens i mindre grad underbygge hypotesen om land med høyere diskonteringsfaktor slipper ut mindre, da effekten av høyere realkapital vil kunne dominere.

## 5.1.2 Initial realkapitalbeholdning

Realkapitalbeholdningen inkluderer maskiner, verktøy og bygninger som brukes i produksjonen av varer og tjenester. Et rikt land vil ha en større per capita kapitalbeholdning enn et fattig land, slik at  $K_1^0 > K_2^0$ . Sirkelen er selvoppfyllende: et fattig land vil ha få muligheter til å spare. Lav sparing gir lav investering og dermed lav produktivitet. Når produktiviteten per arbeider er lav, vil inntekten forbli lav. Når folk har lav inntekt, vil etterspørselen etter goder være liten. Det er dermed ingen insentiver til å investere i kapital. Når investeringsraten er lav, vil produktiviteten til innsatsfaktorer være liten. Dette gjør igjen at inntekt per person blir lav, og enda mindre når befolkningen samtidig vokser. Landet forblir derfor fattig. Det finnes viktige unntak av land som har unnsuppet denne fattigdomsfellen. Både Kina, India og Brasil har opplevd sterk økonomisk vekst de senere årene.

Vi så på en endring i initialbeholdningen av realkapital både i referansemodellen og i den utvidede modellen med stokastisk skrapverdifunksjon. I referansemodellen så vi at økt initialbeholdning av realkapital for et relativt rikt land førte til økt utslipp. Resultatet belyser et viktig problem. Flere og flere av dagens fattige land vil i løpet av de neste årene oppleve økonomisk vekst og bedret levestandard. I løpet av denne prosessen vil etterspørselen etter energi økes betraktelig. Dette åpner for et etisk dilemma; dagens rike land har allerede gjennomgått denne utviklingen, med det resultat at USA og EU-landene står ansvarlig for over 55 prosent av akkumulert utslipp fra 1850. Til sammenlikning er Kinas andel «bare» 7,6 prosent av verdens samlede utslipp. Faktisk står industrialiserte land til sammen for hele tre fjerdedeler av totalutslippet (Baumert, Herzog, & Pershing, 2005). I modellen antar vi at landene er av lik befolkningsstørrelse. I virkeligheten er ikke land symmetriske. Dette gjør det problematisk å støtte seg på empirien som finnes om lands totalutslipp. Dilemmaet er likevel relevant. Dersom dagens lav- og middelinntektsland skal gjennomgå samme utvikling som det høyinntektslandene allerede har gjort, vil det påføre kloden enorme konsekvenser. Men hvem er vi til å si at disse ikke skal få oppleve samme velstandsøkning som oss?

I modellen der skrapverdifunksjonen ble gjort stokastisk, kunne vi ikke konkludere med hvorvidt landene ville slippe ut mer eller mindre ved økt initial kapitalbeholdning. På den ene siden ville økt kapital fungere som en buffer for en eventuell katastrofe. Dette trekker i retning av økt sparing, og redusert konsum og utslipp. Samtidig vil landet ha mer å tape dersom katastrofen skulle inntreffe. Dette trekker i retning av økt utslipp i dag grunnet redselen for å spare til noe man ikke får oppleve gevinsten av. Det er vanskelig å si hvilken av

disse effektene som vil dominere. Tenker vi på en økning i initial kapitalbeholdning for fattige land, kan vi gjette på at utslippet i dag vil øke, fordi de vil være mer fremtidspessimistiske eller utålmodige enn det rike land vil være. Samtidig kan de ha et ønske om å nå rike lands velstandsnivå. I så fall er det mer gunstig å konsumere i dag. Ser vi derimot på et rikt land, kan det tenkes at effekten reverseres. Deres fremadskuende tankegang, samt avtakende grensenytte av konsum, motiverer sparing, og dermed redusert utslipp, i dag. Kanskje ser de også for seg fremtidig teknologisk fremgang som vil redusere sannsynligheten for katastrofe, noe som gir ytterligere insentiver til sparing.

### **5.1.3 Sårbarhet for katastrofe**

Antakelsen om at enkelte land vil bli hardere rammet av en katastrofe som følger fra global oppvarming motiveres innledningsvis, i kapitlet «Verden i dag». Hovedtrekkene var at utviklingsland vil bære 75-80 prosent av kostnadene fra klimaendringer. Årsaker som ble nevnt, var mislykkede avlinger som følge av geografisk beliggenhet, tørke og ekstremvær. Det påfølgende produktivitetstapet rammer særlig utviklingsland, som har jordbruk som viktigste økonomiske aktivitet. Levekår, boforhold og helseutfordringer gjør dem spesielt sårbare.

Modellen viser at når skadeomfanget blir større for land 2, antatt å være det relativt fattige landet, vil de respondere med å redusere eget utslipp. I likevekt vil land 1 øke sitt utslipp dersom utslipp er strategiske substitutter. Dette stemmer dårlig med virkeligheten. Få fattige land har over en lengre periode redusert utslippet sitt. Årsaken til at vi ser dette i modellen, kan henge sammen med at det i denne oppgaven kun er to aktører. Dette betyr at det enkelte landet kan påvirke totalutslippet i større grad. I virkeligheten er ikke dette nødvendigvis tilfellet. Dette diskuteres nærmere i avsnitt 5.2.2. Videre kan man spørre seg om det er troverdig at et fattig land faktisk vil foreta utslippsreduksjoner. Reelt vil landet i utgangspunktet ha et lavere utslippsnivå, og en ytterligere reduksjon vil kunne være vanskelig å gjennomføre. Monner det, og har de mulighet og kunnskap nok til å endre forbruksmønsteret til å bli mindre utslippsintensivt?

### **5.1.4 Sannsynlighet for katastrofe**

Fra førsteordensbetingelsen (likning 4) vi kom frem til i kapittel 3 vet vi at vi skal tilpasse oss slik at en marginal økning i utslippet gir en nytteøkning fra økt konsum i første periode som

skal veies mot det marginale neddiskonterte forventede nyttetapet fra lavere skrapverdifunksjon. Dette følger av at kapitalbeholdningen reduseres og slik gjør landet mer sårbart for en eventuell katastrofe, og at sannsynligheten for katastrofe øker. I spillet antar vi at denne sannsynlighetsfordelingen er kjent for begge land. Dette er en noe søkt antakelse. Sannsynlighetsfordelingen for en katastrofe som global oppvarming er usikker, og vil mest sannsynlig være det for all fremtid. Det er realistisk å gå ut ifra at sannsynligheten er økende og strengt konveks i akkumulert utslipp, men hvor raskt den øker, og om den i det hele tatt er kontinuerlig, er uvisst. Dermed er det vanskelig å vite akkurat hvilket utslippsnivå Nashlikevekten vil sammenfalle med.

## 5.2 Mulige utvidelser

Modellen som brukes i denne oppgaven, er enkel og stilisert. En utvidelse ville i enkelte tilfeller kunne være en berikelse, men ofte kunne det snarere ført til unødvendig komplikasjon som ikke ville bidratt til økt forståelse. En gjennomgang av slike faktorer følger.

### 5.2.1 Flere perioder

Vi kan spørre oss om det i det hele tatt er realistisk å anta at et langsiktig problem som klimaendringer kan modelleres i et ikke-gjentatt spill. I utgangspunktet var tanken å sette opp et dynamisk spill som utspant seg over to perioder, med en skrapverdifunksjon som fanget opp neddiskontert velferd fra og med tredje periode. Mer generelt kan modellen utvides til uendelig antall perioder. Utslippsprofilene ville da fulgt fra en delspillperfekt likevekt. Dersom dette var en såkalt open-loop modell, ville ikke deltagerne kunne observere valgene som tas av motstanderen (Fudenberg & Levine, 1988). I open-loop likevekter trenger derfor ikke spillerne å ta hensyn til hvordan motstanderne vil kunne avvike fra likevekten. Valget som tas i en tilfeldig periode  $t > 1$  vil være sammenfallende med valget som ble gjort innledningsvis. Siden samme mengde informasjon er kjent i begynnelsen av et slikt spill, som i en modell med kun én periode, vil vi trolig kunne trekke de samme konklusjonene for utslippsbaner i dette tilfellet. Derimot kan vi få endringer i løsningen dersom vi ser på en closed-loop modell, der alle tidligere foretatte valg er kjent i begynnelsen av hver periode. Landene vil da kunne ta innover seg ny informasjon og endringer i ulike parametere.



Overgangen til et dynamisk spill vil tilføre en ny dimensjon. Aktørene vil måtte ta hensyn til konsekvensene egne handlinger har på andre aktørers fremtidige handlinger. Landenes rykte blir dermed av verdifull informasjon.

La oss vende tilbake til spillet i figur 8, fangens dilemma, og se hva som hadde skjedd dersom spillet ble gjentatt over flere perioder. Utvider vi spillet til et endelig antall perioder, vil samme Nashlikevekt som i et én-periode-spill gjelde. Grunnen er at spillerne vet hva som er siste periode i spillet, og i denne perioden vil det rasjonelle valget være å ikke samarbeide. Siden begge spillere vet at dette blir utfallet i siste periode, må også dette være det rasjonelle valget for perioden før. Dette gjelder helt tilbake til spillets begynnelse, og metoden kalles «backward induction». Generelt har vi dermed at delspillperfekt likevekt for et spill gjentatt over endelig antall perioder, er sammenfallende med likevekten i et spill over én periode.

Dersom spillet ble gjentatt i det uendelige, kan ikke lenger «backward induction» anvendes. Isteden tar vi i bruk en diskonteringsfaktor,  $\delta$ . For å analysere tilfellet, ser vi på en såkalt grim-triggerstrategi. Vi definerer «ikke-utslipp»-«ikke-utslipp» som samarbeidslikevekten, mens «utslipp»-«utslipp» er straffeprofilen. Straffeprofilen er også Nashlikevekten. I en triggerlikevekt er intensjonen at spillerne skal spille den kooperative likevekten i hver periode. Hvis én eller begge avviker fra den kooperative profilen, vil de spille straffeprofilen for alltid etterpå. Dette betyr at dersom du avviker fra den kooperative profilen, ødelegges ryktet slik at straffeprofilen blir trigget for resten av spillet. Målet er nå å se om spillerne har insentiver til å spille «ikke-utslipp»-«ikke-utslipp», under trusselen om at de må spille «utslipp»-«utslipp» for alltid dersom en av spillerne avviker. Mer presist spesifiserer triggerstrategien at spillerne velger «ikke-utslipp»-«ikke-utslipp» i hver periode så lenge denne profilen alltid har blitt spilt; ellers spilles «utslipp»-«utslipp». Dette kalles grimtriggerstrategien (Watson, 2008, s. 264). Anvender vi denne teorien på spillet vårt, ser vi at spiller  $j$  får følgende utbytte dersom han samarbeider i hver eneste periode  $i$ :

$$\sum_{i=0}^{\infty} \delta^i = 0$$

Dersom land  $j$  avviker i første periode, får det en umiddelbar gevinst verdt 5 enheter, fordi det andre landet spiller kooperativt i første periode. I alle senere perioder, vil landet måtte spille ikke-kooperativt. Dette gir et neddiskontert utbytte lik

$$5 + \sum_{i=1}^{\infty} -5\delta^i = 5 - \frac{5\delta}{1-\delta}$$

Dersom spilleren skal velge å samarbeide fremfor å ikke samarbeide må derfor

$$0 \geq 5 - \frac{5\delta}{1-\delta}$$

$$\delta \geq \frac{1}{2}$$

Grimtriggerprofilen er en delspillperfekt likevekt, som innebærer at samarbeid kan opprettholdes, bare dersom diskonteringsraten er større enn eller lik 1/2. Da dette er fiktive tall, er ikke den konkrete verdien på diskonteringsraten av særlig interesse. Det vi er interessert i å få frem, er hvordan straff kan være med på å gi insentiver til et Pareto-optimalt utfall.

## 5.2.2 Flere land

Modellen som er brukt i denne oppgaven, innebefatter kun to land. Dette gjør at individuelt utslipp utgjør en vesentlig del av samlet globalt utslipp. Igjen vil dette føre til at landet må ta hensyn til hvordan eget utslipp vil påvirke forurensningsbeholdningen, og slik forårsake et nyttetap gjennom skrapverdifunksjonen. I andre modelleringer av lands utslippsstrategier som finnes i litteraturen, antas det ofte at hvert lands individuelle utslipp er så ubetydelig av størrelse at det ikke har noen innvirkning på samlet utslipp. Dette betyr at det enkelte land ikke kan utgjøre en forskjell alene. I et ikke-kooperativt spill tilsvarende det i kapittel 3 ville dette ha ført til at akkumulert utslipp ikke lenger var et individuelt påvirkbart argument i skrapverdifunksjonen. Hvert land ville ha opplevd et nyttetap fra akkumulert utslipp. Samtidig ville det enkelte landet ikke hatt muligheten til å påvirke størrelsen på denne beholdningen, slik at hvert land ville måtte betrakte denne størrelsen som gitt. Avveiningen ville da utelukkende vært den mellom konsum i dag og kapital i morgen. Resultatet ville ha blitt høyere utslipp for hvert av landene.

Valget om å modellere kun to land gjør derfor at vi delvis omgår gratispassasjerproblemet. En gratispassasjer er en person som drar nytte av noe, uten å betale kostnaden av det. Vi kan se for oss et land som deltar i en klimaavtale med flere andre land. Avtalen oppmuntrer til

reduisert utslipp. Hvert lands utslipp er størrelsesmessig ubetydelig i forhold til totalt utslipp. Hvert enkelt land har derfor, uten sanksjonsmuligheter, ingen insentiver til å redusere eget utslipp. Landet drar uansett fordel av at alle andre land reduserer sine utslipp. I modellen fra denne oppgaven, ville dette føre til høyere skrapverdifunksjon gjennom redusert bidrag til akkumulert utslipp. Samtidig reduserer ikke landet eget utslipp, og slipper dermed nyttereduksjonen i form av lavere konsum og kapital. Det er i alles individuelle interesse å oppføre seg som en gratispassasjer. Dette resulterer i en Nashlikevekt av fangens dilemma-type med høyere utslippsnivåer enn det som er Pareto-optimalt.

### 5.2.3 Terskelverdi for utslipp

Det kunne vært interessant å etablere en terskelverdi  $X$  for utslipp. Dette ville innebære at sannsynligheten for katastrofe var 1 dersom utslippet nådde eller oversteg mengden  $X$ , og 0 ellers. I et simultant dynamisk spill mellom to deltagere kunne man på denne måten modellert hvordan handlingene til deltagerne endret seg etter hvert som terskelverdien nærmet seg. Ville de sluppet ut maksimal mengde med en gang, eller ville de konvergere sakte mot  $X$ ? Dersom spillet var utformet som et simultant én-periode spill kunne vi tenke oss et anti-koordineringsspill som «chicken» eller «hauk og due». I slike spill er det i begges interesse å spille ulike strategier. Et eksempel kan illustrere. La oss anta at to identiske land deler en felles ressurs – atmosfæren – som er rivaliserende, fordi den enes utslipp påfører den andre et nyttetap, men ikke-ekskluderende. Utslipp fører med seg en negativ eksternalitet fordi landet slipper ut en klimagass som det selv ikke bærer den fulle kostnaden av. Landene kan slippe ut et «lavt» (L) eller «høyt» (H) nivå av klimagasser. Dersom begge slipper ut «høyt» vil terskelverdien overstiges slik at  $H + H \geq X$ . Ellers har vi at  $L + L < H + L < X$ . Landenes utbytte avhenger av hva det andre landet velger. Dersom begge velger «lavt» utslippsnivå, vil dette gi dem nytte B hver. Nyttan oppleves gjennom økt konsum, men dette fører også med seg økt utslipp, noe aktørene verdsetter negativt. Dersom et land velger «høyt» og det andre landet velger «lavt», vil dette gi nytte A til landet som slipper ut mye, og nytte C til landet som slipper ut lite. Når landet selv spiller «lavt» vil nytten er lavere dersom det andre landet slipper ut «høyt» fremfor «lavt» fordi forurensning påfører landet en kostnad som det ikke blir kompensert for. Dersom begge spiller «høyt» overskrides terskelverdien, og landene sitter begge igjen med en nytte tilsvarende D. Her har begge land fått nytte av økt konsum, men samtidig har dette medført en skade som overgår gevinsten. Vi har dermed at  $A > B > C > D$ . Spillet kan skrives på normalform:

Figur 9 Hauk og due

	Land 2	Lavt (L)	Høyt (H)
Land 1			
Lavt (L)		B,B	C,A
Høyt (H)		A,C	D,D

De to Nashlikevektene i dette spillet er «lavt»-«høyt» og «høyt»-«lavt». Argumentasjonen er som følger. Dersom land 2 spiller L, vil det lønne seg for land 1 å spille H. Dersom land 2 spiller H, vil land 1 spille L. Omvendt, dersom land 1 spiller L, vil land 2 ønske å spille H, og dersom land 1 spiller H, vil land 2 velge L.

Grunnen til at det er optimalt å spille ulike strategier, kan være at den potensielle skaden er så stor at begge land vil unngå dette utfallet. Å spille defensivt når motspilleren er offensiv, vil gi et nyttetap fra lavere konsum, i tillegg til at det andre landets høye utslipp påfører landet en ytterligere kostnad i form av økt forurensning. Dette utfallet er for det enkelte landet likevel bedre enn «høyt»-«høyt». I dette tilfellet er konsumnivået er høyere, men nyttetapet fra økt forurensning er så stor at dette utfallet likevel ikke er ønskelig.

Det finnes også en Nashlikevekt i blandede strategier, der begge land randomiserer mellom «høyt» og «lavt». Sannsynligheten for å spille L vil for begge spillere være den  $p$  som løser  $pB + (1 - p)C = pA + (1 - p)D \Rightarrow p = \frac{C-D}{A-B-D+C}$ . Denne strategien er ofte suboptimal, da begge spillere kan gjøre det bedre hvis de hadde koordinert handlingene sine.

I referansemodellen som brukes i denne oppgaven, defineres ingen terskelverdi. Landene opplever et nyttetap ved høyere utslipp som målt gjennom skrapverdifunksjonen, men denne funksjonen er kontinuerlig i  $Z$ . Dermed fanges ikke det enorme potensielle nyttetapet opp når utslippet økes marginalt utover  $X$ . I utvidelsen av modellen gjøres skrapverdifunksjonen stokastisk. På denne måten får vi frem at utover nyttetapet gjennom redusert kapital, er ikke økt forurensning skadelig i seg selv. Faren oppstår når det akkumuleres så mye at katastrofen inntreffer. Sannsynligheten for dette utfallet er økende i akkumulert utslipp. Likevel har vi ingen formening om hvilken verdi som gir  $Z = X$ . Vi kan se for oss en bil som kjører i

bekmørket, og vil nå en hytte som ligger ved enden av et stup. Dersom du ikke vet hvor stupet ligger, hvor nærme tør du da å kjøre før du stopper?

Flere problemer oppstår dersom vi skulle ha modellert en terskelverdi. Det vil være usikkerhet rundt hvor mye utslipp som kreves før en alvorlig irreversibel skade inntreffer, og ulike skader vil kunne ha ulik terskelverdi. For eksempel vil en viss mengde utslipp føre til lavere produktivitet gjennom tørke, mens en annen mengde utslipp fører til økt havnivå. Også mellom land kan terskelverdien oppfattes forskjellig.

## 6 Konklusjon

Hensikten med denne oppgaven har vært å få en dypere forståelse av hvordan grunnleggende ulikheter mellom land, slik som initial realkapitalbeholdning, diskontering av fremtiden og sårbarhet for en eventuell katastrofe, kan påvirke deres miljøpolitikk, representert ved utslippsbaner. Med dette formålet har vi sett på to lands ikke-kooperative maksimering av egen velferd. Dette resulterer i en Nashlikevekt som ikke er Pareto-optimal. En oppsummering av resultatene følger.

*Resultat 1 til 4:* Fra referansemodellen konkluderer vi med at dersom et land legger relativt mer vekt på dagens løpende konsum, som hypotesen er for et fattig land, vil landet øke eget utslipp av klimagasser (likning 7). Det samme gjelder for et land som får en større initialbeholdning av realkapital, noe som kan illustrere et rikt land (likning 9). Utslipp fra det andre landet vil i begge tilfeller reduseres under forutsetningen om strategiske substitutter (likning 8a og 10a).

*Resultat 5:* Fra den stokastiske modellen ser vi at når et land er mer sårbart for en klimaendring, noe som er rimelig for et relativt fattig land, vil eget utslipp reduseres (likning 12). Det relativt rike landet vil respondere med å øke sitt utslipp (likning 11).

*Resultat 6:* Når initialbeholdningen av kapital øker, og skrapverdifunksjonen er stokastisk, kan vi ikke konkludere med hvorvidt utslippet vil øke eller reduseres (likning 13). Kapitalbeholdningen fungerer som en buffer dersom katastrofen skulle inntreffe. Dette motiverer til redusert konsum og lavere utslipp i dag (likning 13b). Samtidig vil en økning av fremtidig velferd gjøre at landet har mer å tape dersom katastrofen skulle inntreffe, slik at økt konsum og utslipp i dag virker mer rimelig (likning 13 a). Det er vanskelig å si hvilken av disse effektene som vil dominere. Dette vil avhenge av om vi ser på en økning i initialbeholdningen av realkapital for et fattig eller rikt land. For et fattig land kan det være rimelig å tro at dagens konsum, og dermed utslipp, vil øke. Dette kan skyldes utålmodighet, eller et ønske om å nå rikere lands velstandsnivå. For et rikt land kan man tro at avtakende grensenytte av konsum gjør at økt sparing i dag er en mer troverdig konklusjon.

Det er vanskelig å finne empirisk belegg for resultatene vi har kommet frem til. I oppgaven har vi sett på symmetriske land der kun én egenskap skiller landene fra hverandre. Så vidt det er meg bekjent, finnes det lite forskning som ser på den isolerte effekten av endringer i nevnte parameterverdier. Til en viss grad kan dette skyldes at de er vanskelig å tallfeste, som tilfellet er med diskonteringsfaktoren. Selv om man med velvilje kan bekrefte noen av resultatene, kan ikke kausalitet påvises. For å forklare empirien vi leser, kan flere andre grunner enn de vi har sett på, nevnes. Teknologisk utvikling, generell velstandsutvikling, også i utviklingsland, samt endret forbruksmønster og etterspørsel etter energi, er eksempler.

Som en særlig svakhet ved modellen for anvendelsen på den virkelige verden, må antall deltagere i spillet nevnes. Ved å inkludere kun to land omgås delvis gratispassasjerproblemet. Dersom modellen skal gi forklaringskraft for hvorfor klimaavtaler er vanskelig å utforme og implementere, ville det være naturlig å utvide modellen til langt flere deltagere. Dette gjør at hvert land i større grad kan dra nytte av andre lands utslippsreduksjoner. For hvert enkelt land vil det være fordelaktig at alle andre land inngår en samarbeidsavtale der utslipp reduseres, mens man selv står utenfor. Denne muligheten utelukkes i oppgavens modell.

Fra modellen kan vi ikke uten tvetydighet være moralsk dømmende overfor rike land. Den gir likevel en indikasjon på at høyere velstand kan påføre kloden store nyttetap i form av økt utslipp. Dette kan gi uheldige omfordelingseffekter da fattige land både er de som må begrense utslippet og er de som vil bli hardest rammet dersom en klimakatastrofe inntreffer. Videre har vi vist at det er mulig å redusere utslipp i begge land, men samtidig øke begge velferd. Modellen poengterer derfor at samarbeid mellom land er noe som bør etterstrebes. Underordnet har oppgaven illustrert at det er mulig å anvende enkle økonomiske modeller for å studere deler av et komplekst virkelighetsbilde.

# Litteraturliste

- Baumert, K. A., Herzog, T., & Pershing, J. (2005). Cumulative Emissions. I *Navigating the Numbers: Greenhouse Gas Data and International Climate Policy*. World Resources Institute. Hentet fra [http://pdf.wri.org/navigating\\_numbers\\_chapter6.pdf](http://pdf.wri.org/navigating_numbers_chapter6.pdf)
- Bjerkholt, O., & Peng, X. (2005). *Frontier Environmental Issues*. Shanghai: Fudan Press.
- Fudenberg, D., & Levine, D. (1988). Open-Loop and Closed-Loop Equilibria in Dynamic Games with Many Players. *Journal of Economic Theory*, 44(1).
- Hoel, M. (1999). Global Warming and Other Transboundary Environmental Problems. I J. C. Bergh, *Handbook of Environmental and Resource Economics*.
- Johansen, L. (1982). On the Status of the Nash Type of Noncooperative Equilibrium in Economic Theory. *The Scandinavian Journal of Economics*, 84(3), 421-441.
- Levhari, D., & Mirman, L. J. (1980). The Great Fish War: An Example Using a Dynamic Cournot-Nash solution. *The Bell Journal of Economics*, 11(1), 322-334.
- Nævdal, E., & Vislie, J. (2011). Precautionary Taxation and Environmental Hazard. *Upublisert*.
- Olivier, J. G., Janssens-Maenhout, G., Peters, J. A., & Wilson, J. (2011). *Long-term trend in global CO2 emissions*. Haag: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Hentet fra [http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news\\_docs/CO2%20Mondiaal\\_%20webdef\\_19sept.pdf](http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/CO2%20Mondiaal_%20webdef_19sept.pdf)
- Romer, D. (2006). *Advanced Macroeconomics*. New York: McGraw-Hill/Irwin.
- The International Bank for Reconstruction and Development; The World Bank. (2010). *World Development Report: Development and Climate Change*. Washington DC: The World Bank.
- Tirole, J. (1988). *The Theory of Industrial Organization*. Hong Kong: Asco Trade Typesetting Ltd.
- Watson, J. (2008). *Strategy: An Introduction to Game Theory*. New York: W.W. Norton & Company.