

# Fordeler og ulemper med internasjonal kvotehandel

– en numerisk analyse

av

Ola Roth Johnsen

**Masteroppgave**

Masteroppgaven er levert for å fullføre graden

**Master i samfunnsøkonomi**

Universitetet i Bergen, Institutt for økonomi

September 2009

UNIVERSITETET I BERGEN



Fordeler og ulemper med internasjonal kvotehandel  
- en numerisk analyse

Ola Roth Johnsen

01.09.09

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>iv</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
<b>2 Bakgrunn</b>	<b>2</b>
2.1 Kollektive goder og spill . . . . .	2
2.2 Miljøavtaler . . . . .	4
<b>3 Modell</b>	<b>7</b>
3.1 Sosialt optimum . . . . .	8
3.2 Tilpasning uten handel . . . . .	8
3.3 Med handel . . . . .	9
3.3.1 Steg 2: Profittmaksimering og markedsklarering . . . . .	9
3.3.2 Endring i kvoteprisen og utslipp . . . . .	11
3.3.3 Steg 1 . . . . .	12
3.3.4 Funksjonell form: kvadratisk renskostnadsfunksjon og lineær skade- funksjon . . . . .	13
<b>4 Parametre og scenarier</b>	<b>15</b>
4.1 Parametre . . . . .	15
4.2 Scenarier . . . . .	17
<b>5 Resultater</b>	<b>19</b>
5.1 Utslipp . . . . .	19
5.1.1 Reg_650_Carbone . . . . .	19
5.1.2 Reg_97_Carbone . . . . .	20
5.1.3 Reg_650_Jamet . . . . .	21
5.1.4 Land_650_Carbone . . . . .	22
5.1.5 Land_97_Jamet . . . . .	23
5.2 Kyoto . . . . .	23
5.3 Kostnad og velferd . . . . .	24
5.3.1 Reg_650_Carbone . . . . .	25

5.3.2	Reg_97_Carbone . . . . .	25
5.3.3	Reg_650_Jamet . . . . .	26
5.3.4	Land_650_Carbone . . . . .	26
5.3.5	Land_97_Jamet . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Diskusjon og konklusjon</b>	<b>28</b>
<b>A</b>	<b>GAMS program</b>	<b>30</b>
<b>B</b>	<b>Land, regioner og BNP</b>	<b>33</b>
<b>C</b>	<b>Fordeling av marginal klimaskade</b>	<b>37</b>
<b>D</b>	<b>Kostnader</b>	<b>38</b>
<b>E</b>	<b>Utelatte land</b>	<b>39</b>
	<b>Litteraturliste</b>	<b>40</b>

# Forord

Arbeidet med denne masteroppgaven har opptatt meg i over et år, og det er mange som fortjener takk for tilbakemeldinger og hjelp. I første omgang retter jeg en stor takk til mine to veiledere, Odd Godal og Sigve Tjøtta. Deres gode og omfattende tilbakemeldinger har vært uvurderlig i arbeidet med oppgaven.

Takk også til miljøgruppen for tilbakemeldinger og muligheten til å få innsyn i andre problemstillinger knyttet til klimautfordringene.

En stor takk til Marianne for muntrasjon og tålmodighet i travle dager.

# Sammendrag

Denne oppgaven utforsker numerisk hvilken virkning kvotehandel har på utslipp av karbon når aktørene styres av sin egeninteresse. Det er velkjent at kvotehandel gjør at kostnadene til utslippsreduksjon på marginen blir lik for alle og at dette gir en effisient løsning. Når landenes kvoteallokering gjøres ikke-kooperativt er det ikke gitt hvilken effekt kvotehandel vil ha. Carbone et al. (2009) anvender en generell likevektsmodell og finner at kvotehandel gir reduksjon i karbonutslippene. Ved å anvende en partiell likevektsmodell fra Helm (2003) undersøker denne oppgaven om de samme resultatene er mulige ved å legge til grunn andre antagelser.

Det undersøkes om antall beslutningstakere endrer resultatene. Den mest usikre parameteren i modellen er kostnadene av klimaendringene og det testes for forskjellig nivå og fordeling av denne.

Resultatene i denne oppgaven er entydige i at de gir høyere globale utslipp av karbon med kvotehandel enn uten. Det er kun det scenariet som er nærmest Carbone et al. (2009) som gir lavere globale kostnader ved kvotehandel. Endring i antall aktører fra regioner til land øker de globale utslippene mot det samme nivået en ville fått uten å bruke ressurser på klimaproblemet og er nær utslippene fra Kyoto-avtalen.

Opgaven finner at det er et generelt mønster mellom den marginale rensekostnadsfunksjonen og den marginale klimaskaden for landene og bekrefter dermed en av konklusjonene fra Holtsmark og Sommervoll (2008).

# Kapittel 1

## Innledning

Et av virkemidlene mot globale oppvarming som har fått mye oppmerksomhet er kvotehandel. Når kvotene er allokert og aktørene står fritt til å omsette sine kvoter blir markedet brukt på sin beste måte. Den marginale kostnaden av å foreta tiltak for å redusere utslipp blir lik for alle, og dette er selve kjennetegnet på en effektiv løsning i økonomifaget. I mye av litteraturen blir kvotene sett på som gitt utenfra. Modellen som brukes i denne oppgaven er fra Helm (2003). I denne modellen er kvoteallokeringen slik at kvotemengden er resultat av et ikke-kooperativt spill, deretter er aktørene pristagere i kvotehandelen. Det er flere incentiver landene står ovenfor ved en slik kvoteallokering. Land som har lav marginal klimakade har incentiv til å være sjenerøse med kvoteallokeringen, fordi de ikke blir rammet i stor grad av miljøendringene som følger med økte utslipp. Motsatt vil land med høy marginal klimaskade ønske å importere kvoter fremfor å foreta kostbare reduksjonstiltak i landet. Samtidig gir kvoteprisen incentiver til eksporterende land å redusere kvotemengden for å øke prisen, mens importørene har motsatt incentiv. Hvilken effekt som dominerer motiverer en numerisk analyse.

Oppgaven er organisert på følgende måte: Først tar jeg en gjennomgang av internasjonale avtaler som er inngått for å forsøke å koordinere innsatsen for kollektive goder. Overforbruk av et kollektivt gode, ofte kalt allmenningens tragedie, er det mest velkjente problemet som oppstår ved markedssvikt. Deretter presenterer jeg modellen fra Helm (2003). Denne modellen blir så gitt en funksjonell form, og resultatene fra simuleringene blir presentert og kommentert.

# Kapittel 2

## Bakgrunn

A point has been reached in history when we must shape our actions throughout the world with a more prudent care for their environmental consequences...

- Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm 1972

Dette kapittelet er en introduksjon til de grunnleggende struktur- og incentivproblemene med forurensing og forklarer hvorfor det er så vanskelig å løse miljøproblemer som involverer mange parter. Den siste delen ser på inngåtte avtaler og veien til Kyoto-avtalen.

### 2.1 Kollektive goder og spill

I litteraturen blir gjerne A. C. Pigou regnet som den første til å peke på forskjellen mellom sosiale og private kostnader knyttet til eksternaliteter. En eksternalitet ses som et biprodukt av økonomisk aktivitet som påfører en annen part kostnader eller fordeler som markedet ikke tar hensyn til. Begrepet pigouskatt brukes når myndighetene pålegger en forurensende part en ekstrautgift med den hensikt å redusere utslippene, slik at den sosialt beste løsning oppnås. En utfordring er at den regulerende part må innhente en stor mengde informasjon, og at kostnadene knyttet til dette risikerer å overskride den samfunnsmessige gevinsten. Det er også en stor grad av usikkerhet knyttet til hvor presis en slik regulering kan være.

Coase-teoremet etter nobelprisvinner Ronald Coase har en annen vinkling på eksternalitetsproblemet. I stedet for å la myndighetene kontrollere og regulere aktørene kan en heller benytte seg av markedets iboende effektivitet og la etterspørsel og tilbud avgjøre det beste utslippsnivået. Ved at aktørene tildeles eiendomsrett til fellesgodet kan de gjennom (kostnadsfrie-) forhandlinger nå en løsning hvor den ene part kompenserer den andre for retten til å bedrive sin aktivitet. Det er altså betalingsvilligheten og etterspørselen til



partene som avgjør hvilken løsning vi får. I og med at partene selv kjenner sin egen betalingsvillighet for å forurense og slippe forurensing så slipper vi informasjonsproblemet som oppstår når en regulerende tredjepart skal fastsette et effektivt nivå.

Felles for de fleste avtaler som inngås på et transnasjonalt nivå, er fraværet av en kontrollerende myndighet med mulighet til å påtvinge partene restriksjoner eller straff dersom de ikke oppfører seg i henhold til de uttrykte intensjonene. Det finnes ikke noen straffeinstans som kan pålegge Norge å redusere sine utslipp av klimagasser eller sin beskatning av torsk så lenge aktiviteten foregår innenfor denne nasjonens suverene grenser. Nasjonalstaten verner sine innbyggere som må forholde seg til de lovene som til enhver tid gjelder for denne. Internasjonale avtaler er avhengig av at landene samarbeider og gjensidig anerkjenner kravene som en avtale inneholder.

Før en videre analyse av eksisterende avtaler kan det være på sin plass å se på hvordan utfallet av avtaler fremkommer. Det underliggende problemet som skal løses definerer valgene og reglene partene må forholde seg til. Har vi få eller mange parter? Har en eller flere parter markedsmakt? Er problemet lokalt eller internasjonalt? Hvilke type goder, eventuelt onder, står partene ovenfor? I tillegg til reglene for spillet, kommer partenes incentiver og motivasjon som legges til grunn for hvilke valg de foretar seg.

Hvordan klassifiserer vi et gode som klima? FNs internasjonale panel for klimaendringer, IPCC (2007), hevder at en økning i temperaturen, forårsaket av drivhusgassutslipp, på mellom 1,1 og 2 grader vil gi økte havnivåer, økning i ekstremvær og sannsynligvis flere store tørkeperioder. Disse skadene vil ramme mennesker over alt på kloden. Miljøtjenester som et stabilt klima, eller fravær av økning i temperaturen, er et kollektivt gode. Kollektive goder har spesielle egenskaper på produksjons- og forbrukssiden. De kan ikke stykkes opp eller selges individuelt, godet blir konsumert i samme øyeblikk det blir produsert, og den mengden en forbruker konsumerer reduserer ikke mengden en annen forbruker kan konsumere. Kollektive goder står på grunn av disse egenskapene ovenfor et tilbudssideproblem. En kan tenke seg en forbruker som har preferanser for et privat gode og et miljøgode. Produksjonen av det private godet fører med seg eksternaliteter som gir en reduksjon i kvaliteten, eller omfanget av, miljøgodet.

Valget til en forbruker er rasjonelt for denne, men resultatet gir en suboptimal løsning for samfunnet, nasjonen eller hele menneskeheten. Dette kalles en markedssvikt. De to mest kjente problemene med kollektive goder er kjent innen litteraturen som gratispassasjerproblemet og fangenes dilemma.

Ikke-ekskluderbarheten gjør det vanskelig å begrense tilgangen på godet til kun å gjelde de som betaler for det. Det er altså mulig å være gratispassasjer på det andre betaler for. Hardin (1968) introduserer begrepet allmenningens tragedie for å beskrive hvordan uregulert bruk av en fellesressurs fører til overforbruk. For klimaproblemet blir det da slik at den samlede innsatsen for å redusere utslippene blir mindre enn det som ville vært ønskelig fra fellesskapets synspunkt. Samarbeid mellom landene er derfor ønskelig for å

bøte på dette incentivproblemet.

I økonomifaget er det vanlig å anvende spillteori for å analysere hvilke incentiver partene har og hvordan utfallet blir når flere aktører opptrer ukoordinert for å nå et optimalt utfall. Det vanligste spillet som illustrerer det grunnleggende problemet med koordinasjon er fangenes dilemma. To fanger i hver sin celle har valget mellom å angri motparten eller å ikke samarbeide med fangevokterne. Begge fangene vet at dersom de holde munn slipper de unna med kort straff. Fangevokterne gir strafferabatt dersom en av partene angir den andre. Nash-likevekten i dette spillet blir at begge fangene angir hverandre, og det samlede og individuelt dårligste resultatet blir realisert. Partene står ovenfor problemer hvor det individuelt rasjonelle valget gir et resultat som er uheldig for begge. Parallelt med klimaproblemet er det da slik at verdenssamfunnet kommer best ut ved at alle reduserer sine utslipp, men hvert land har incentiv til å avvike fra denne strategien. Et enkelt en-steps fangenes dilemma-spill fanger ikke opp alle utfallene og incentivene når forhandlinger skal igangsettes og avtaler overholdes, men det peker på et vesentlig poeng: Aktørene kan vinne på å bli enige om en avtale, men incentivene til å avvike opprettholdes.

Fangenes dilemma er et enkelt spill med 2 spillere, mens en global utfordring som klimaproblemet involverer i nærheten av 200 land. Barrett (1994) viser hvordan problemet fortøner seg med  $N$  symmetriske land. Marginalkostnaden for reduksjon av utslipp er økende i mengden som renses, og marginalnyttens av utslippsreduksjon øker med mengden av alle landenes rensing. Avstanden mellom et kooperativt og ikke-kooperativt utfall er avhengig av antall deltagere og helningen på kurvene. Alt annet like så øker forskjellen i  $N$ . Hvor mange deltagere et spill har er derfor relevant i modellering av klimaproblemet. Verdens land er også av forskjellig størrelse og vil ha ulik eksponering for klimaendringer. Det er derfor interessant å analysere hvordan utfallet blir når partene har marginale kostnads- og nyttefunksjoner som er asymmetriske.

For at et kooperativt utfall skal fungere over tid må en avtale være selvhåndhevende. Dette betyr at ingen bryter den avtalte strategien. En faktor er da om vi har troverdige straffemekanismer. Troverdighet betyr at partene som utfører straffen kommer bedre ut ved å innføre sanksjoner på den ikke-overholdende part enn ved å ignorere avviket. Foreløpig er det ingen slike straffemekanismer i Kyoto-protokollen.

## 2.2 Miljøavtaler

Stockholmkonferansen i 1972 var den første store konferansen i FN-regi med vårt felles miljø som tema. Deklarasjonen fra konferansen sier blant annet at en økende andel av de miljømessige problemene vi står ovenfor er av en slik karakter at de påvirker miljøet for alle mennesker. Miljøutfordringene er både regionale og globale, og en løsning på disse krever samarbeid og inngripen fra stater og internasjonale organisasjoner. Konferansen

var ikke en suksess i betydningen av en reduksjon av miljøskadelige utslipp, men kan sies å markere starten på en kartlegging og oppmerksomhet rundt miljøproblemer som krever internasjonal samhandling, og er den første konferansen i en pågående rekke av toppmøter og traktater for å møte miljøutfordringene. Vi har blant annet gjennomført vellykkede avtaler til viktige områder som ozonlaget og sur nedbør.

Montrealprotokollen (1987) og tilføyelsene til denne har lyktes i å fase ut bruken av klorfluorkarbon (KFK). KFK i gassform bidrar til å redusere ozonlaget i stratosfæren. En reduksjon av ozonlaget vil føre til at mer skadelig ultrafiolett stråling (UV-B) treffer jordoverflaten. Økt eksponering for UV-B stråling øker risikoen for hudkreft og er ødeleggende for planteliv og økosystemet i havet. Protokollen blir av United Nations Environmental Program (2006) regnet som en suksess i å lykkes med å redusere ozonødeleggende gasser i stratosfæren og har blitt ratifisert av 190 land.

Sur nedbør på som følge av utslipp av svovel og nitrogenoksider er et annet miljøområde hvor inngåtte avtaler har lyktes i å få partene til å redusere utslippene sine. Centre for Integrated Assessment (2007) anslår av nytteverdien av Gøteborgprotokollen i 2010 er to ganger større enn de estimerte kostnadene til utslippsreduksjon.

Begge disse avtalene er eksempler på vellykket samarbeid mellom flere land for å møte felles utfordringer knyttet til menneskeskapt ødeleggelse av naturen. Med vellykket menes i denne sammenheng at utslippene har blitt redusert. Finus og Tjøtta (2003) finner at Nash-likevekten i Osloprotokollen for svovelreduksjon vil gi større utslippsreduksjon enn avtalen innebærer. Det noe pussige resultatet blir at landene har signert en avtale de ville oppfylt også ved fravær av avtalen.

I forhold til klimaproblemet ble FN's rammekonvensjon for klimaendring undertegnet i Rio de Janeiro i 1992, og er første skritt i retning av en felles avtale for "...å oppnå stabilisering i konsentrasjonen av drivhusgasser i atmosfæren på et nivå som vil forhindre farlig menneskeskapt påvirkning av klimasystemet..."(United Nations Framework Convention on Climate Change 1992). Det er partsmøtene og protokollene fra disse som formulerer presise målsettinger som deltagerne kan enes om. Den mest kjente er Kyotoprotokollen (1998) fra det tredje partsmøtet. Kyotoprotokollen har konkrete målsettinger og virkemidler for reduksjon av utslippene av drivhusgasser. I tillegg til innenlandske tiltak åpner avtalen for tre fleksible mekanismer for utslippsreduksjon. De tre mekanismene er felles gjennomføring, den grønne utviklingsmekanismen og kvotehandel. Felles gjennomføring er tiltak som betales av et rikt land, kalt Annex I-landene, for utslippsreduksjon i et annet rikt land. Den som betaler for tiltaket kan øke sine utslipp, mens mottaker må redusere utslippene tilsvarende. Den grønne utviklingsmekanismen er laget med tanke på omfordeling. De rike landene betaler for klimatiltak som bidrar til utslippsreduksjon i fattige land. Varen de kjøper er utslippskreditter, og tiltaket må bidra til bærekraftig utvikling i det fattige landet. I begge virkemidlene betaler de rike landene for å slippe å unngå dyre utslippsreduksjoner i sine hjemland. Det tredje virkemidlet er kvotehandel.

Etter allokering av kvoter innenlands kan landene foreta kjøp og salg av retten til utslipp på en internasjonal markedsplass. Land med høye marginale reduksjonskostnader til utslippsreduksjon vil da kjøpe kvoter av land med lavere marginale kostnader. Dette tiltaket gir en effektiv løsning betegnet ved at den marginale kostnaden ved utslippsreduksjon, kvoteprisen, blir lik for alle.

# Kapittel 3

## Modell

Dette er en presentasjon av Helm (2003). Det som skiller denne modellen fra andre i litteraturen er at kvotemengden ikke er gitt på forhånd, men at den er en del av utfallet av modellen. Antagelsen er at det ikke er en overnasjonal myndighet som bestemmer den totale mengden utslipp, men at aktørene kun er opptatt av sin egen nytte og er suverene i sine valg.

Først avgjør landene hvor mange kvoter de vil allokere til seg selv. Dette valget gjøres i full visshet om hva som kommer til å skje etterpå. Det neste steget er handel med kvoter. Implikasjonene av dette er at det er en form for markedsrett i kvoteallokeringen, deretter er aktørene pristakere. En kvote utstedt i et land er godkjent i alle de andre landene og alle utslipp skal ha en tilhørende kvote.

I modellen har vi en nyttefunksjon som fanger opp de positive sidene ved utslipp av klimautslipp og en skadefunksjon som fanger opp skadene de samlede utslippene gir. Det er  $I$  land. Utslipp i land  $i$  er  $e_i \in \mathbb{R}_+$ , hvor  $i = 1, 2, \dots, I$  er landene. Utslippene kan ses som en innsatsfaktor i produksjonen av velstand for aktøren. Nyttien av utslipp er gitt ved  $\pi_i(e_i)$ , denne antas å være økende konkav og dobbel deriverbar, altså  $\pi_i'(e_i) > 0$  og  $\pi_i''(e_i) < 0$ .

Utslippene,  $e_i$ , bidrar negativt til det kollektive godet for alle parter i modellen. Disse skadene uttrykker vi i funksjonen  $v_i(e)$ , der  $e = \sum_{i=1}^I e_i$ . Funksjonen antas konveks og økende i  $e$ ,  $v_i'(e) > 0$  og  $v_i''(e) \geq 0$ .

De tilpasningene aktørene foretar er konsekvenser av rasjonelle valg foretatt av aktører som er kun opptatt av sin egen nytte, valgmulighetene er begrenset av de andre aktørenes tilpasning med samme motivasjon. Den endelige allokeringen er et resultat av en maksimering av en objektfunksjon med hensyn på gitte begrensninger.

### 3.1 Sosialt optimum

Den maksimale velferden som kan oppnås er karakterisert ved at alle kostnadene ved eksternalitetene blir tatt hensyn til. Det som maksimalt kan oppnås er gitt ved:

$$\text{maks}_{e_1, e_2, \dots, e_I} \left\{ \sum_{i=1}^I \pi_i(e_i) - \sum_{i=1}^I v_i(e) \right\}, \text{ hvor } i = 1, 2, 3, \dots, I$$

Førsteordensbetingelsen blir da:

$$\pi'_i(e_i) = \sum_{j=1}^I \frac{\partial v_j(e)}{\partial e_i}$$

Dette er Samuelson-likningen (1954) for kollektive goder som sier at marginalnyttens av et kollektivt gode for aktør  $i$  skal være lik summen av marginalkostnadene til alle aktørene. Med denne løsningen blir eksternalitetene tatt fullt hensyn til.

### 3.2 Tilpasning uten handel

Uten mulighet til å selge eller overføre kvoter på et marked vil aktørene kun ta hensyn til sin egen private gevinst i bestemmelsen av utslippsmengde. Aktørene opptrer individuelt rasjonelt og maksimerer payoff med hensyn på egne utslipp gitt ved:

$$\text{maks}_{e_i} \{ \pi_i(e_i) - v_i(e) \}$$

Nash-likevekten er karakterisert ved følgende vilkår<sup>1</sup>:

$$\frac{\partial \pi_i(e_i)}{\partial e_i} - \frac{\partial v_i(e)}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial e_i} = 0 \tag{3.1}$$

$$\pi'_i(e_i^N) = v'_i(e^N), i = 1, 2, 3 \dots I$$

Det selvpåførte utslippsnivået blir slik at den private marginalnyttens er lik den private marginalsgraden. Løsningen tar ikke hensyn til de eksterne virkningene som utslippet medfører.

---

<sup>1</sup>Nash-likevekt er karakterisert ved at ingen av partene angrer på sitt valg gitt alle andre sine valg, og at dette gjelder for alle.

### 3.3 Med handel

Modellen ses som et to-steps spill. I første del allokere aktørene kvotemengde og i det andre handler de med utslippstillatelsene. For å løse ut problemer av denne typen brukes baklengs induksjon. Ved å finne løsningen for den siste delen av spillet kan vi nøste oss bakover og finne løsningen for det første steget.

#### 3.3.1 Steg 2: Profittmaksimering og markedsklarering

I det siste steget har landene allerede valgt sine kvoter, uttrykt ved  $\omega_i$ . Utslippstillatelsene er omsettbare slik at landene kan selge og kjøpe retten til utlipp. Prisen på denne kvoten skal være lik prisen på den siste enheten med utslippsreduksjon. Skaden antas å være bestemt av  $\sum \omega_i$  og inngår som en konstant i denne delen av modellen.

Ved å bruke en funksjon som også har med kostnader (inntekter) knyttet til utslippene kan vi modellere et kvotemarked. Dersom den allokerede mengden kvoter er større (mindre) enn de innenlandske utslippene er landet en eksportør (importør) av kvoter, ser dette i differansen  $\omega_i - e_i$ .

Profitten som en aktør søker å maksimere blir:

$$\max_{e_i} \{ \pi(e_i) + p(\omega_i - e_i) \}$$

hvor kvoteprisen  $p$  oppfattes som en parameter, altså er alle aktørene pristagere.

Førsteordensbetingelsen for profittmaksimering blir da:

$$\pi'_i(e_i) - p = 0 \tag{3.2}$$

Andreordensbetingelsene for profittmaksimering er oppfylt når antagelsen om konkav nyttefunksjon holder. En pristakende profittmaksimerende aktør vil justere utslippene til det punktet hvor nytten av å øke utslippene med en enhet er lik prisen på å kjøpe en kvote. For å se at denne løsningen er den mest kostnadseffektive kan vi se på alternativene hvor marginalnyttens er ulik kvoteprisen. Anta at

$$\pi'_i(e_i) < p$$

Denne aktøren har marginalnytte lavere enn kvoteprisen. Inntekten ved å øke utslippene er lavere enn prisen på kvoten. Landet vil da ha et incentiv til å redusere utslippene og selge kvoter på markedet helt til marginalnyttens er lik prisen.

$$\pi'_i(e_i) > p$$

I dette tilfellet er nytten av å øke utslippene høyere enn kvoteprisen. Det vil da lønne seg å kjøpe kvoter så lenge prisen er lavere enn marginalnyttten.

Utslippene er en funksjon av prisen på kvotene,  $e_i(p)$ , og kvoteprisen,  $p(\omega)$ , en funksjon av total mengde utstedte kvoter

Mer spesifikt så blir prisen slik at markedet klarer, det vil si at:

$$\sum_{i=1}^I e_i(p) = \sum_{i=1}^I \omega_i \quad (3.3)$$

Ved markedsklaringen er summen av utslippene lik summen av kvotene. Dette var en av forutsetningene for kvotemarkedet, at alle utslipp skal ha en tilhørende kvote.

Markedet for kvoter kan også formuleres som et maksimeringsuttrykk ved bruk av Lagranges metode. Markedsproblemet blir da å maksimere nytten til alle aktørene gitt at utslippene ikke skal overstige kvotemengden.

$$\text{maks}_{e_i} \sum_{i=1}^I \pi(e_i) \text{ slik at } \sum_{i=1}^I e_i = \sum_{i=1}^I \omega_i$$

Lagrangeproblemet blir da:

$$\ell(e_i, \lambda) = \sum_{i=1}^I \pi_i(e_i) - \lambda \left( \sum_{i=1}^I e_i - \sum_{i=1}^I \omega_i \right)$$

Dette gir følgende førsteordensbetingelse:

$$\frac{\partial \ell(e_i, \lambda)}{\partial e_i} = \pi'_i(e_i) - \lambda$$

Sidevilkåret krever:

$$\sum_{i=1}^I e_i = \sum_{i=1}^I \omega_i$$

Det første uttrykket er likt 3.2. Forskjellen er at Lagrangemultiplikatoren  $\lambda$  står for en skyggepris som tolkes som kvoteprisen. Denne er konstant for alle aktørene og bekrefter



at den profittmaksimerende løsningen er når marginalnyttten er lik kvoteprisen.

### 3.3.2 Endring i kvoteprisen og utslipp

Som forberedelse til hva som skjer på steg 1 ser vi her på hvordan utslippene og markedsprisen endrer seg med antall kvoter. I forrige avsnitt ble kvoteprisen oppfattet som en konstant og hadde dette vært et marked hvor kvotemengden var gitt eksogen så ville løsningen vært gitt med Lagrange-uttrykket. Det er kvotemengden som er variabelen aktørene optimerer utifra på steg 1. Den endelige tilpasningen er avhengig av hvordan kvotemengden påvirker markedsprisen og utslippsmengden.

Ser først på hvordan markedsklareringen endrer seg. Deriverer (3.3) med hensyn på totalt antall kvoter  $\omega$  (merk at  $\sum_{i=1}^I \omega_i \equiv \omega$ )

$$\sum_{i=1}^I e'_i(p)p'(\omega) - 1 = 0 \quad (3.4)$$

En økning i kvoter gir både endring i utslippene og har også en effekt gjennom endringen i pris. I og med at  $\omega$  også inngår i uttrykket for prisen bestemmer dette hvordan prisen på kvotene blir. Sagt på en annen måte: økning i antall kvoter endrer både utslippene og prisen.

Ser hvordan prisen endrer seg under optimal tilpasning. Deriverer (3.2) med hensyn på  $p$ :

$$\pi''_i(e_i)e'_i(p) - 1 = 0$$

Ser her at nytten har en direkte endring i funksjonen for nytten i tillegg til en endring som kommer av endring i utslipp som følge av prisøkning. Skriver om uttrykket til

$$e'_i(p) = \frac{1}{\pi''_i(e_i)}$$

og setter inn i (3.4)

$$\sum_{i=1}^I \frac{1}{\pi''_i(e_i)} p'(\omega) - 1 = 0$$

Flytter om på uttrykket og får et uttrykk for hvordan prisen endrer seg med utslippstillatelsene

$$p'(\omega) = \frac{1}{\sum_{i=1}^I \frac{1}{\pi_i''(e_i)}} < 0 \quad (3.5)$$

En av antagelsene i modellen var strengt konkav nyttefunksjon, altså  $\pi_i''(e_i) < 0$ , derfor blir uttrykket negativt. Når vi senere anvender en funksjonell ser vi at denne antagelsen ikke holder, men det medfører ingen konsekvenser for resultatene.

### 3.3.3 Steg 1

I det første steget velger hvert land kvotemengde med forståelse av hva som vil skje på steg 2. I denne delen kommer miljøskadene inn når aktørene skal bestemme sine utslippstillatelser.

Landene velger kvotemengde som gir høyest nasjonal nytte og løser:

$$\max_{\omega_i} \{ \pi_i(e_i(\omega)) - v_i(\omega) + p(\omega)(\omega_i - e_i(\omega)) \}$$

I tillegg til skadefunksjonen inngår prisen som en funksjon av totale utslippstillatelser, kvoteallokering og utslippene uttrykt som funksjon av  $\omega$ . Førsteordensvilkåret er gitt ved:

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial e_i} \frac{\partial e_i}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial \omega_i} - \frac{\partial v_i}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial \omega_i} + \frac{\partial p}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial \omega_i} (\omega_i - e_i(\omega)) + p(\omega) \left( 1 - \frac{\partial e_i}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial \omega_i} \right) = 0$$

Har fra tidligere at marginalnykten er lik kvoteprisen,  $\pi_i'(e_i(\omega)) = p(\omega)$ , og at  $\frac{\partial \omega}{\partial \omega_i} = 1$ . Bruker dette og skriver om førsteordensvilkåret til:

$$p(\omega) \frac{\partial e_i}{\partial \omega} - \frac{\partial v_i}{\partial \omega} + \frac{\partial p}{\partial \omega} (\omega_i - e_i(\omega)) + p(\omega) - p(\omega) \frac{\partial e_i}{\partial \omega} = 0$$

som gir:

$$p(\omega) - \frac{\partial v_i}{\partial \omega} + \frac{\partial p}{\partial \omega} (\omega_i - e_i(\omega)) = 0$$

Nash-likevekten er karakterisert ved at

$$p(\omega^N) - v_i'(\omega^N) + p'(\omega^N)(\omega_i^N - e_i(\omega^N)) = 0 \quad (3.6)$$

Dette uttrykket viser hvilke marginale endringer vi får ved å øke kvotene. En økning

i kvotene gir en verdiøkning tilsvarende kvoteprisen. I optimum er denne det samme som marginalnyttten av en ekstra kvote,  $\pi'_i(e_i(\omega))$ . Vi har en marginaløkning i skaden på miljøet,  $v'_i(\omega^N)$ . Det siste leddet viser endringen i kvotepris når kvotene endres multiplisert med kjøp og salg av kvoter.

### 3.3.4 Funksjonell form: kvadratisk renskostnadsfunksjon og lineær skadefunksjon

Den teoretiske delen av oppgaven er ikke hensiktsmessig for å gi målbare resultater som kan si noe om tilpasningene til aktørene. Ved å anvende funksjonelle former som kan parametriseres er det mulig å lage simuleringer tilpasset forskjellige forutsetninger.

I begynnelsen av kapitell 3 introduserte vi nytten,  $\pi_i(e_i)$ , knyttet til det å slippe ut  $e_i$  enheter. Når det kommer til numerisk analyse er det imidlertid vanlig, og mer intuitivt å ta Business-as-usual (BAU) som utgangspunkt. BAU er tilfellet der det ikke brukes noen ressurser på utslippsreduksjon. Istedenfor nytten beregner vi kostnadene knyttet til det å holde utslippene ned til et nivå  $e_i$ . Dette har naturligvis ingen praktiske konsekvenser for analysen, men gir tall som er enklere å tolke. Vi setter derfor  $\pi_i(e_i)$  med  $-c_i(e_i)$ , der funksjonen  $c_i(e_i)$  er avtakende og konveks. Spesifikt er den hentet fra Godal og Meland (2006) og er gitt ved:

$$c_i(e_i) = \frac{1}{2\zeta_i}(\zeta_i e_i - a_i)^2$$

Begge parameterne er positive,  $\zeta_i, a_i > 0$ .  $e_i$  er mengden utslipp, og vi antar at denne ikke kan være negativ,  $e_i \geq 0$ . Denne funksjonsformen er kvadratisk og marginalkostnaden blir:

$$c'_i(e_i) = -a_i + \zeta_i e_i$$

Dette er marginalkostnaden knyttet til det å holde utslipp til nivå  $e_i$ , den marginale reduksjonskostnaden er  $-c'_i(e_i)$ .

Videre antas det at skadefunksjonen er lineær og uttrykkes som:

$$v_i(e) = b_i e$$

Den marginale klimaskaden er da:

$$v'_i(e) = b_i$$

Disse funksjonsformene er de samme som i Holtsmark og Sommervoll (2008). De konkluderer med at en økning i utslippene er sannsynlig med kvotehandel. Dette grunngrir de med at dersom det er en positiv kovarians mellom parametrene  $b_i$  og  $\frac{1}{\varsigma_i}$  så vil utslippene være større med handel enn uten. I praksis betyr det at land med lav marginalnytte av utslippsreduksjon har bratt helning på den marginale reduksjonskostnaden og omvendt. Helm (2003) påpeker at det er vanskelig på generelt grunnlag å si noe om effekten av kvotehandel på samlede utslipp og global velferd. Det er derfor interessant å gjøre noen numeriske simuleringer for å se om det er sammenheng mellom parametrene og hvordan utslippene og kostnadene blir.

Utregningene av BAU, det sosialt optimale og tilpasningen uten handel gjøres enkelt ved å hjelp av de gitte funksjonsformene. Ved BAU setter vi  $c'_i(e_i) = 0$ , utslippsnivået blir da  $e_i = \frac{a_i}{\varsigma_i}$ . Det sosialt optimale, senere referert til som first-best, er gitt ved  $-\sum b_i = -a_i + \varsigma_i e_i$ , dette gir utslippsnivå for land  $i$ ,  $e_i = \frac{a_i - \sum_{i=1}^I b_i}{\varsigma_i}$ . Uten handel vil aktørene kun ta hensyn til sine egne marginale skader ved utslipp, nivået blir da  $e_i = \frac{a_i - b_i}{\varsigma_i}$ .

# Kapittel 4

## Parametre og scenarier

### 4.1 Parametre

Det er ikke gitt entydig fra teorien hvilken effekt kvotehandel har på utslippsnivå og velferd. Dette motiverer en numerisk analyse for å se hvordan utslipp, pris og kvotealokering blir gjort ved en parametrisering av modellen. For å løse modellen benyttes dataprogrammet GAMS<sup>1</sup> med MCP<sup>2</sup> som løsningsmetode. MCP gjør det mulig å løse modellen ved å sette inn førsteordensbetingelsene fra likningssettet.

Vi trenger å parametrisere to typer funksjoner for å løse modellen, rensekostnads- og skadekostnadsfunksjonen.

Rensekostnadsfunksjonen er kvadratisk og parametrisert i henhold til tabell 4.1. Disse verdiene baserer seg på marginale utslippsreduksjonskostnadsfunksjoner fra den generelle likevektsmodellen MERGE<sup>3</sup>. Ved å pålegge forskjellige karbonskatter i MERGE og deretter ta en MKM-regresjon på dataene har det vist seg at en lineær sammenheng er en god tilnærming til den marginale rensekostnaden. Parametrene er fra tatt Godal og Klaassen (2006), og ble også brukt i Godal og Meland (2006). I MERGE er verden delt i ni økonomiske soner, disse er USA, OECDE (de europeiske OECD-landene), Japan, CANZ (Canada, Australia, New Zealand), EEFSU (Øst-Europa og tidligere Sovjetunionen), Kina, India, MOPEC (Midtøsten og OPEC-landene) og ROW (resten av verden). I tillegg til en analyse med disse regionene skal vi også se på utfallet der alle landene modelleres individuelt. Parametrene til regionene blir da disaggregert basert på BNP-data fra Verdensbanken (2005), tilsammen 187 land, en fullstendig liste over BNP for land og regioner er i appendiks B. Utelatte land er i appendiks E

---

<sup>1</sup>The **General Algebraic Modeling System** er et dataprogram utviklet til bruk for matematisk modellering og optimisering.

<sup>2</sup>**Mixed Complementarity Problem**

<sup>3</sup>Model for Evaluating the Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies

Tabell 4.1: Rensekostnadsparametre fra Godal og Klaassen (2006) i USD per tonn karbon

	$a_i$ (\$/tK)	$\zeta$ (\$/M(tK) <sup>2</sup> )
USA	1002,7436	0,5514
OECD	1883,4388	1,8126
Japan	1727,3569	4,9331
CANZ	693,2511	2,2162
EEFSU	1410,2859	1,5687
Kina	1382,5454	1,1703
India	970,9291	3,1444
MOPEC	1237,9332	2,7803
ROW	816,2209	0,7607

Den marginale klimaskaden er i noen scenarier hentet fra Tol (2005) og i andre fra Carbone et al. (2009). Estimatenes i Tol (2005) baserer seg på 103 forskjellige estimater fra 28 forskjellige studier av innvirkningen av økning av karbonkonsentrasjon i atmosfæren. Fra denne studien vil vi anvende gjennomsnittsetimatet på 97 USD per tonn karbon. Summen av den marginale betalingsvillighet fra Carbone (2009) er 650 USD per tonn karbon. Denne er basert på at aktørene avslører sine preferanser i de internasjonale klimaforhandlingene og parametriseres ut fra dette. Fordelingen av den marginale klimaskaden er fra Carbone et al. (2009) og Jamet og Corfee-Morlot (2009). Sistnevnte er beregnet ut fra den prosentvise endringen i BNP ved 2.5 grads temperaturøkning. Skadefordelingen er basert på resultater som ser på hvordan en endring i klimaet påvirker BNP for forskjellige regioner og land. Disse resultatene hentes fra vekstmodeller med klima som en integrert del. I tillegg til de direkte økonomiske virkningene av klimaendringer som redusert produktivitet ved tap av jordbruksareal, ødeleggelse av infrastruktur og lignende konverteres endringer som ikke kan måles monetært, økt migrasjon, endring i biologisk mangfold, økt dødelighet og hyppigere konflikter til en felles måleenhet, ofte endring i BNP.

Parametriseringen av den marginale klimaskaden,  $b_i$ , er gjengitt i tabell 4.2.

Tabell 4.2: Fordeling av marginal klimaskade i USD per tonn karbon. Nivå angir summen av den marginale klimaskaden. Fordelingen av marginal klimaskade er fra Carbone (2009) og Jamet og Corfee-Morlot (2009).

Nivå (USD)	650	97	650	97
Fordeling	Carbone	Carbone	Jamet og Corfee-Morlot	Jamet og Corfee-Morlot
USA	150	22,3846	58,4510	7,8607
OECD	300	44,7692	332,2733	54,2650
Japan	150	22,3846	26,5751	3,2125
CANZ	0	0	-6,9136	-1,0558
EEFSU	50	7,4615	0,4769	0,0701
Kina	0	0	5,1233	0,6943
India	0	0	42,9245	5,6374
MOPEC	0	0	23,3986	5,6607
ROW	0	0	167,6909	20,6552
Sum	650	97	650	97

I de scenariene der land modelleres som land blir  $b_i$  disaggregert i forhold til BNP. For å forenkle oversiktligheten vises alle resultater som summen av regionenes allokeringer. Se appendiks C for utregning og fordeling av parametrene.

## 4.2 Scenarier

Carbone et al. (2009) gjør følgende antagelser i parametrisering av modellen:

- Nivået på og fordelingen av den marginale klimaskaden er basert på at landene tilkjenner sin betalingsvillighet for miljømessige forbedringer i klimaforhandlingene. Modellen kalibreres slik at den reflekterer regionenes forhandlingsposisjoner. Resultatet blir at Kina, CANZ, India og ROW, som har vist lite initiativ i klimaforhandlingene, blir tilordnet en lav, eller ingen marginal klimaskade.
- Antall aktører er begrenset til seks regioner. Dette forutsetter at landene innen en region klarer å koordinere seg og opptre som en beslutningstaker.

Scenariene er laget både for å kunne stå som selvstendige resultater og for å teste om, og i hvilken grad, resultatene til Carbone et al. (2009) er sensitive til disse antagelsene. Dette fordi:

1) den marginale klimaskaden som anvendes i Carbone et al. (2009) har et høyt nivå sammenlignet med andre studier, det er derfor av relevans å se hvordan resultatene endrer seg dersom denne settes til et nivå som er mer i tråd med den vi finner i litteraturen, som i Tol (2005).

2) Hvordan miljøskadene går ut over aktørene er relevant for hvordan de tilpasser seg. Litteraturen antyder at for eksempel Kina vil bli rammet av klimaendringene.

Med fordelingen fra Jamet og Corfee-Morlot (2009) får alle landene tilordnet miljøskaden basert på de fysiske endringene av global oppvarming.

3) Antall aktører, beslutningstakere, spiller en rolle. En oppstyking fra store og få regionale beslutningstakere, til noen store og mange små land, vil muligens påvirke resultatene.

Tabell 4.3: Oversiktsmatrise for scenariene. Regioner består av 9 aktører, mens land er 150.

Scenarienavn	Beslutningstakere	Marginal skade (USD)	Fordeling
Reg_650_Carbone	Regioner	650	Carbone
Reg_97_Carbone	Regioner	97	Carbone
Reg_650_Jamet	Regioner	650	Jamet og Corfee-Morlot
Land_650_Carbone	Land	650	Carbone
Land_97_Jamet	Land	97	Jamet og Corfee-Morlot

**Reg\_650\_Carbone** bruker marginal klimaskade og fordeling som i Carbone et al. (2009). Scenariet er motivert av å gjøre antagelsene mest mulig lik som Carbone et al. (2009), men med utgangspunkt i modellen til Helm (2003). Dette scenariet danner utgangspunkt for videre undersøkelser av hvordan antall aktører, nivået på, og fordeling av, marginalskaaden endrer resultatene.

Den første endringen som gjøres i **Reg\_97\_Carbone** er en reduksjon av den marginale klimaskaden ved å benytte Tol (2005), men med samme fordeling som i Reg\_650\_Carbone.

**Reg\_650\_Jamet** undersøker hvordan tilpasningene til regionene og landene endrer seg ved en annen fordeling av marginalskaaden. Klimaendringer vil slå ut forskjellig og de fleste regioner vil bli berørt. Fra parametriseringen ser en at CANZ har positiv marginal klimaskade. Det er derfor interessant å se om denne parameterens fordeling spiller en rolle for de samlede utslipp og i hvilken grad forholdet mellom regionene endres.

Det fjerde scenariet, **Land\_650\_Carbone**, ser på hvordan en oppstyking av aktørene fra regioner til land endrer utfallet.

Det siste scenariet, **Land\_97\_Jamet**, er ment å representere det mest realistiske scenariet. Landene opptrer som autonome beslutningstakere, den globale marginale klimaskaden er i tråd med Tol (2005) og er fordelt etter hva litteraturen antyder om hvor skaden vil inntreffe.



# Kapittel 5

## Resultater

### 5.1 Utslipp

I utslippstabellen er det tatt med utslipp ved Business-as-usual (BAU), det vil si utslippene som antas å finne sted dersom ingen ressurser blir brukt til å redusere utslipp. Fra tabell 4.1 blir  $BAU = \frac{a_i}{c_i}$ . BAU-utslippene er like ved alle scenariene og tas med for sammenlikning. First-best tilsvarer det sosialt optimale.

Det er verdt å merke seg at enheten som brukes er tonn karbon og ikke CO2-enheter. For å konvertere fra karbon til CO2 må en multiplisere karbon med 44/12<sup>1</sup>.

#### 5.1.1 Reg\_650\_Carbone

Vi ser først på scenariet som er mest mulig likt Carbone et al. (2009).

Tabell 5.1: Utslipp ved first-best og Nash-likevekten uten handel (NUH). Kvoteallokeringen og utslippene ved Nash-likevekten med handel (NMH) gir en global kvotepris på 72,22 USD. Utslipp og kvoter i mtk/år.

	First-best	NUH	NMH	Utslipp	BAU
USA	640	1 546	1 182	1 688	1 818
OECD	680	874	-482	999	1 039
Japan	218	320	-170	336	350
CANZ	20	313	750	280	312
EEFSU	485	867	997	853	899
Kina	626	1 181	1 589	1 120	1 181
India	102	309	755	286	308
MOPEC	211	445	889	419	445
ROW	219	1 073	1 448	978	1 072
Sum~	3 201	6 928	6 958	6 958	7 427

Vi ser at First-best halverer de globale utslippene, og utslippene uten handel reduseres

<sup>1</sup>Se <http://www.cicero.uio.no/sporsmal/detail.aspx?faqid=79> for mer informasjon om CO2 og karbon.

med litt over 6 % fra BAU. Dette avviker fra Carbone et al. (2009) som finner at First-best-utslippene reduseres med 21,4 % fra BAU, og at det ikke-kooperative resultatet reduserer utslippene med 7.8 % fra BAU.

Forskjellen mellom Nash med handel og utslipp er kjøp og salg av kvoter. Nash med handel gir økning av de globale utslippene fra Nash uten handel. Et interessant resultat er at Japan og OECD velger negativ initallokering av kvoter. Dette betyr at den høye klimaskaden driver allokeringen nedover, den medfølgende prisøkningen er underordnet. For å illustrere kan en tenke seg en aktør som ønsker å være karbonnøytral. Utslippene denne aktøren har må hentes inn gjennom kvotemarkedet. Dermed kan et ambisiøst lokalt mål nås ved bruk av kvotemarkedet. For disse landene er det billigere å nå sine utslippsmål ved å velge en lav utslippsallokering, og dermed bli importører av kvoter, fremfor å foreta kostbar rensing i regionen.

De tre kvoteimportørene, USA, OECD og Japan, har alle høyere utslippstall enn det de har i Nash-likevekten uten handel. Generelt kan en vente at dette gjentar seg i de andre scenariene. Regioner med lav marginal rensekostnad eksporterer til regioner med høy rensekostnad og høy marginal klimaskade. Asymmetrien mellom landene er et av poengene til Holtmark og Sommervoll (2008) når de mener det vil være en systematisk variasjon i disse parameterne mellom små og store land. I dette scenariet er  $cov(\zeta^{-1}, \mathbf{b}) = 3,34^2$ . Handel gir små land incentiv til å ha sjenerøse allokeringer av kvoter og dette overstiger de store landenes motsatte incentiv, nemlig innstramming i allokeringen.

Regioner med høyere allokering enn BAU og kvoteeksport bidrar til hot-air. Hot-air er et uttrykk som brukes om Kyoto-avtalens overallokering for flere av de øst-europeiske landene. Flere av disse hadde gammel karbonintensiv industri som enten ble lagt ned eller driften modernisert etter kollapsen av det kommunistiske regimet. Resultatet er en reel utslippsreduksjon. Kyoto-målet om reduksjon i utslipp fra 1990-nivå gir dermed allokeringer som er mye høyere enn det disse landene har behov for.

### 5.1.2 Reg\_97\_Carbone

Vi ser nå på tilfellet der marginalsgraden settes til 97 USD per tonn karbon, alt annet likt.

---

<sup>2</sup> $\zeta^{-1}, \mathbf{b}$  er vektorer, der  $\zeta^{-1} := (\frac{1}{c_1}, \dots, \frac{1}{c_I})$  og  $\mathbf{b} := (b_1, \dots, b_I)$ .

Tabell 5.2: Utslipp ved first-best og nash-likevekten uten handel (NUH). Kvoteallokeringen og utslippene ved nash-likevekten med handel (NMH) gir en global kvotepris på 10,78 USD. Utslipp og kvoter i mtk/år.

	First-best	NUH	NMH	Utslipp	BAU
USA	1 643	1 778	1 723	1 799	1 818
OECD	986	1 014	812	1 033	1 039
Japan	330	346	272	348	350
CANZ	269	313	378	308	312
EEFSU	837	894	914	892	899
Kina	1 098	1 181	1 242	1 172	1 181
India	278	309	375	305	308
MOPEC	410	445	511	441	445
ROW	945	1 073	1 129	1 059	1 072
Sum~	6 797	7 353	7 358	7 358	7 427

Vi ser at reduksjon av den marginale klimaskaden gir høyere utslipp til first-best . Dette fordi klimaproblemet er mindre alvorlig. I begge Nash-løsningene øker utslippene og er nærmere BAU. Økningen i kvoter driver kvoteprisen ned til 10,77 USD per tonn karbon. De samme regionene er eksportører som i Reg\_650\_Carbon, men det er færre kvoter som omsettes. Dette skyldes at det er relativt billigere å allokere kvoter i dette scenariet. Variasjonen mellom marginale klimaskade og helningen på den marginale rensekostnaden er  $cov(\zeta^{-1}, \mathbf{b}) = 0,49$ .

### 5.1.3 Reg\_650\_Jamet

Tabell 5.3: Utslipp ved first-best og nash-likevekten uten handel (NUH). Kvoteallokeringen og utslippene ved nash-likevekten med handel (NMH) gir en global kvotepris på 72,22 USD. Utslipp og kvoter i mtk/år.

	First-best	NUH	NMH	Utslipp	BAU
USA	640	1 712	1 777	1 688	1 818
OECD	680	856	-692	999	1 039
Japan	218	345	632	336	350
CANZ	20	316	795	280	312
EEFSU	485	899	1 320	853	899
Kina	626	1 177	1 556	1 120	1 181
India	102	295	476	286	308
MOPEC	211	437	737	419	445
ROW	219	853	357	978	1 072
Sum~	3 201	6 889	6 958	6 958	7 427

Her endrer vi hvordan miljøskaden fordeler seg. Lavere marginal klimaskade i USA fører til at denne regionen blir eksportør av kvoter. Regionen med nest lavest marginal rensekostnad, ROW, blir drevet til lave allokeringer av den nye høye marginale klimaskaden i

regionen. Nash-likevekten uten handel i dette scenariet er den laveste av alle scenariene.  $cov(\zeta^{-1}, \mathbf{b}) = 7,67$

### 5.1.4 Land\_650\_Carbone

Tabell 5.4: Utslipp ved first-best og nash-likevekten uten handel (NUH). Kvoteallokeringen og utslippene ved nash-likevekten med handel (NMH) gir en global kvotepris på 3,48 USD. Utslipp og kvoter i mtk/år.

	First-best	NUH	NMH	Utslipp	BAU
USA	640	1 546	859	1 812	1 818
OECD	680	1 018	-507	1 037	1 039
Japan	218	320	-603	349	350
CANZ	20	313	379	311	312
EEFSU	485	891	843	897	899
Kina	626	1181	1 201	1 178	1 181
India	102	309	330	308	308
MOPEC	211	445	919	444	445
ROW	219	1 073	3 984	1 068	1 072
Sum~	3 201	7 096	7 405	7 405	7 427

Dette scenariet ser på effekten av å modellere land som land, og ikke som regioner. I dette scenariet ser en at det spiller en rolle hvorvidt aktørene aggregeres på forhånd eller ikke. Det er tydelig små økonomier har mye å tjene på kvotesalg, disse er det mange av i ROW. ROW allokere nesten fire ganger flere kvoter enn sine egne utslipp. Det samme forholdet er det mellom BAU og kvotene til ROW.

Handel driver kvoteallokering opp og kvoteprisen reduseres kraftig fra de regionale scenariene. De små landene allokere sjenerøst fordi de tjener på eksport av kvoter, mens de større økonomiene med høy verdsetting av reduksjon av utslipp reduserer sine initielle allokeringer. De små landene har relativt liten marginal nytte av å drive rensing siden de også blir utsatt for en liten del av skadene ved klimaendringer, og i dette scenariet er skaden for mange av de små landene satt til 0. Effekten blir at de små landenes allokeringer overstiger innstramningen i landene med høy verdsetting av miljøet.

Samvariasjonen er  $cov(\zeta^{-1}, \mathbf{b}) = 0,63$ .

### 5.1.5 Land\_97\_Jamet

Tabell 5.5: Utslipp ved first-best og Nash-likevekten uten handel (NUH). Kvotellokeringen og utslippene ved Nash-likevekten med handel (NMH) gir en global kvotepris på 0,52 USD. Utslipp og kvoter i mtk/år.

	First-best	NUH	NMH	Utslipp	BAU
USA	1 643	1 804	1 770	1 818	1 818
OECD	986	1 035	747	1 039	1 039
Japan	330	350	333	350	350
CANZ	269	313	330	313	312
EEFSU	837	899	939	899	899
Kina	1 098	1 181	1 180	1 181	1 181
India	278	307	275	309	308
MOPEC	410	445	479	445	445
ROW	945	1 071	1 373	1 072	1 072
Sum~	6 797	7 405	7 424	7 424	7 427

Reduksjonen i den marginale klimaskaden muliggjør høyere utslipp "innenlands", kvoteprisen og omsetningen går ned. Lavere etterspørsel etter kvoter gir lavere pris. Ved disaggregering av rensekostnadskurvene og fordeling av den marginale klimaskaden så vil de landene i regioner med mange aktører få høyere stigningstall i rensekurven (den blir brattere). Den slake rensekostnadskurven og høye klimakostnaden gjør at India blir importør av kvoter. Begge scenariene med land som beslutningstaker gir de høyeste utslippene ved handel. Konklusjon for dette scenariet blir at en verden med mange beslutningstakere gir utfall som nærmer seg BAU. Kvotehandel fører til høyere globale utslipp enn ved fravær av handel, men forskjellen er liten (ca 20 mtk/år). Også i dette scenariet er det positiv samvariasjon,  $cov(\zeta^{-1}, \mathbf{b}) = 0,44$ .

## 5.2 Kyoto

Kyoto-protokollen har en målsetting om total utslippsreduksjon på 5 % fra 1990-nivå. Hovedprinsippet med Kyoto-avtalen er at den gir bindende utslippsmål for annex I-landene. Utslippstallene i tabell 5.6 gir forpliktelsene til de landene som har ratifisert avtalen. USA, som ikke har ratifisert avtalen, settes til BAU. Det samme gjelder for ikke-annex I-landene.

Tabell 5.6: Utslippsforpliktelser under Kyoto-avtalen fra Godal og Klaassen (2006). Utslipp i mtk/år. Regionene med stjerne har enten ikke ratifisert avtalen eller er i ikke-annex I-gruppen. Utslippene for disse settes til BAU.

	Kyoto	Land_97_Jamet kvoter	BAU
USA*	1 818	1 770	1 818
OECD	860	747	1 039
Japan	258	333	350
CANZ	215	330	312
EEFSU	1314	939	899
Kina*	1 181	1 180	1 181
India*	308	275	308
MOPEC*	445	479	445
ROW*	1 072	1 373	1 072
Sum~	7 471	7424	7427

Vi ser at forpliktelsene under Kyoto gir høyere globale utslipp enn kvoteallokeringen fra Reg\_97\_Jamet. Dette skyldes USAs motvillighet til å ratifisere avtalen. USAs forpliktelser ville gi utslipp på 1251 mtk/år under Kyoto. Det er da nærliggende å konkludere med at til tross for økte utslipp med handel så blir totale utslipp lavere enn det vi har under den nåværende klimaavtalen.

### 5.3 Kostnad og velferd

Dette delkapittelet ser vi på kostnader og velferd til scenariene. Resultatene presenteres med kostnadene knyttet til miljøskaden og kostnadene ved rensing. Ved handel har aktørene kostnader eller inntekter for kvotekjøp. Se appendiks D for utregning av kostnadene.

I raden BAU er det kun kostnader ved klimaskade. De globale klimakostnadene er høyest når klimaskaden er definert i henhold til Carbone et al. (2009). Kostnadene senkes dramatisk når vi bruker Tol (2005).

Den neste raden viser klimakostnadene ved first-best (FB klima), dernest renskostnadene (FB rens) og til slutt summen av kostnadene (Sum FB). First-best, er per definisjon den løsningen med høyest velferd. Den tar mest mulig hensyn til klimaskadene og noe kostnader lempes over på rensing. USA har mest renskostnader i alle scenariene, mens OECD-regionen får de høyeste samlede kostnadene.

Strukturen er tilsvarende for Nash uten handel og Nash med handel. I den siste raden tas også handelskostnadene med.

Når landene kun tar hensyn til sin egen nytte og skade, Nash uten handel, blir rensingen lav i alle tilfeller.

De regionale scenariene med høy klimaskade er de eneste hvor det er kostnader til rensing i nevneverdig grad.

### 5.3.1 Reg\_650\_Carbone

Tabell 5.7: Kostnader i hele milliarder USD per år. Kvotepriis: 72,22 USD per tonn karbon.

	USA	OECD	Japan	CANZ	EEFSU	Kina	India	MOPEC	ROW	Total
BAU	1 114	2 228	1 114	0	371	0	0	0	0	4 828
FB klima	480	960	480	0	160	0	0	0	0	2080
FB rens	383	117	43	95	135	181	67	76	278	1374
Sum	863	1077	523	95	295	181	67	76	278	3454
NUH klima	1 039	2 078	1 039	0	346	0	0	0	0	4503
NUH rens	20	25	2	0	1	0	0	0	0	48
Sum	1 060	2 103	1 041	0	347	0	0	0	0	4 552
NMH klima	1 044	2 087	1 044	0	348	0	0	0	0	4 523
NMH rens	5	1	1	1	2	2	1	1	3	17
Handel	37	107	37	-34	-10	-34	-34	-34	-34	0
Sum	1 085	2 196	1 081	-33	339	-32	-33	-33	-30	4 540

Disse kostnadene er et godt eksempel på allmenningens tragedie. Den ikke-kooperative likevekten gir høyere kostnader enn det vi får ved handel. Markedet fungerer slik at kvotehandel gjør det mindre kostbart enn å opptre hver for seg. Selv om totale utslipp øker med handel, så gir altså kvotehandel en global velferdsgevinst. Dette er likt med Carbone et al. (2009).

### 5.3.2 Reg\_97\_Carbone

Tabell 5.8: Kostnader i hele milliarder USD per år. Kvotepriis: 10,78 USD per tonn karbon.

	USA	OECD	Japan	CANZ	EEFSU	Kina	India	MOPEC	ROW	Total
BAU	166	333	166	0	55	0	0	0	0	721
FB klima	152	304	152	0	51	0	0	0	0	659
FB rens	9	3	1	2	3	4	1	2	6	31
Sum	161	307	153	2	54	4	1	2	6	690
NUH klima	165	329	165	0	55	0	0	0	0	713
NUH rens	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Sum	165	330	165	0	55	0	0	0	0	714
NMH klima	165	329	165	0	55	0	0	0	0	714
NMH rens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Handel	1	2	1	-1	0	-1	-1	-1	-1	0
Sum	166	332	166	-1	55	-1	-1	-1	-1	714

I dette scenariet faller prisen. Differanse i kostnadene mellom det beste og dårligste utfallet skyldes den lavere klimaskaden.

### 5.3.3 Reg\_650\_Jamet

Tabell 5.9: Kostnader avrundet til hele milliarder USD per år. Kvotepriis: 72,22 USD per tonn karbon.

	USA	OECD	Japan	CANZ	EEFSU	Kina	India	MOPEC	ROW	Total
BAU	434	2 468	197	-51	4	38	319	174	1 246	4 828
FB klima	187	1 064	85	-22	2	16	137	75	537	2 080
FB rens	383	117	43	95	135	181	67	76	278	1 375
Sum	570	1 180	128	73	136	197	205	151	814	3 454
NUH klima	403	2 286	183	-48	3	35	296	161	1 155	4 478
NUH rens	3	30	0	0	0	0	0	0	18	53
Sum	406	2 320	183	-48	3	35	296	161	1 174	4 530
NMH klima	407	2 312	185	-48	3	36	299	163	1 167	4 523
NMH rens	5	1	1	1	2	2	1	1	3	17
Handel	-6	122	-21	-37	-34	-32	-14	-23	45	0
Sum	405	2 436	164	-84	-29	6	286	141	1 215	4 540

Endringen i miljøskade for regionene endrer kostnadene for regionene. Et resultat som kan virke pussig er at CANZ har kostnader knyttet til rensing. CANZ tjener på miljøendring, de har positiv nytte av klimaendring, og regionen har derfor ingen incentiv til å betale for utslippsreduksjon. Det er to forklaringer på dette. Det ene er forutsetningen om at kvotepriisen skal være lik marginalkostnaden ved rensing. Det er ikke optimalt å øke utslippene mer, slik at prisen blir 0, og importinntekter faller bort. Den andre er at aktørene respekterer at alle utslipp må ha en tilhørende kvote.

### 5.3.4 Land\_650\_Carbone

Tabell 5.10: Kostnader avrundet til hele milliarder USD per år. Kvotepriis: 3,48 USD per tonn karbon.

	USA	OECD	Japan	CANZ	EEFSU	Kina	India	MOPEC	ROW	Total
BAU	1114	2228	1114	0	371	0	0	0	0	4828
FBklima	480	960	480	0	160	0	0	0	0	2080
FBrens	383	117	43	95	135	181	67	76	278	1374
Sum	863	1077	523	95	295	181	67	76	278	3454
NUHklima	1064	2129	1064	0	355	0	0	0	0	4613
NUHrens	20	1	2	0	0	0	0	0	0	23
Sum	1084	2129	1066	0	355	0	0	0	0	4633
NMHklima	1111	2222	1111	0	370	0	0	0	0	4813
NMHrens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Handel	3	5	3	0	0	0	0	-2	-10	0
Sum	1114	2227	1114	0	370	0	0	-2	-10	4813

I dette scenariet er volumet av omsatte kvoter høyt, men kostnadene ved handel holdes ned på grunn av den lave kvotepriisen. Dette scenariet er det eneste hvor USA rens



mest uten handel. Dette er også det scenariet hvor USA har lavest utslipp i forhold til BAU. Økningen av de globale kostnadene viser som Barrett (1994), at avstanden fra det kooperative til ikke-kooperative utfallet øker i antall aktører. Kvotehandling forsterker dette, og gir det høyeste globale kostnadsnivået av alle scenariene.

### 5.3.5 Land\_97\_Jamet

Tabell 5.11: Kostnader avrundet til hele milliarder USD. Kvotepris: 0,52 USD per tonn karbon.

	USA	OECD	Japan	CANZ	EEFSU	Kina	India	MOPEC	ROW	Total
BAU	58	403	24	-8	1	5	42	42	153	721
FB klima	53	369	22	-7	0	5	38	38	140	659
FB rens	9	3	1	2	3	4	1	2	6	31
Sum	62	371	23	-5	3	9	40	40	147	690
NUH klima	58	402	24	-8	1	5	42	42	153	718
NUH rens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum	58	402	24	-8	1	5	42	42	153	718
NMH klima	58	403	24	-8	1	5	42	42	153	720
NMH rens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Handel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum	58	403	24	-8	0	5	42	42	153	720

Kostnadene i det siste scenariet gjenspeiler utslippsallokeringene. Kvotehandling endrer kostnadene i liten grad og er nokså like Reg\_97\_Carbone. Landene i CANZ drar globale kostnader noe ned. Vi ser at avstanden mellom de forskjellige utfallene ikke er særlig stor.

# Kapittel 6

## Diskusjon og konklusjon

En begrensning med modellen er at den er statisk i betydningen at vi ser på utfallet i kun en periode. I klimaforhandlingene møtes partene gjentatte ganger og dette kan bidra til en samarbeidsløsning. Barrett (1999a) viser at et uendelig fangenes dilemma-spill kan opprettholde en selvhåndhevende avtale, men dette forutsetter at gevinsten ved å samarbeide er liten og at aktørene har strategier for å straffe avvik.

Denne modellen antar at alle aktørene deltar i kvotehandel. De første forsøkene med kvotehandel foregår innen EU. En endring av modellen slik at bare noen parter deltar i kvotehandel kunne i noen grad endre resultatene. For eksempel vil en sammensetting av aktører som gir  $cov(\zeta^{-1}, \mathbf{b}) < 0$  føre til utslippsreduksjon for de som deltar i kvotehandel. Det ville da vært interessant å diskutere hvorvidt de landene som står utenfor kvotesystemet skulle få tilordnet utslipp tilsvarende BAU, eller det ikke-kooperative utfallet.

Den marginale klimaskaden er den parameteren det knytter seg mest usikkerhet til. Det å estimere nøyaktig hvor mye skade økte utslipp medfører i monetære termer er usikkert, og både metodene og estimatene som rapporteres har store avvik. Usikkerheten knytter seg blant annet til hvor mye vekt som skal legges på katastrofer som kan inntreffe, hvor store tap som følger av endrede inntekter fra turisme, ødeleggelser av landbruksjord og andre konsekvenser som følge av økning i temperaturen på jorden. Eksempelvis rapporterer den mye omtalte Stern-rapporten (2006) en sosial kostnad på karbon på 312 USD. Tol (2008) finner at Stern-rapportens estimat er en uteligger sammenlignet med litteraturen som er fagfellevurdert. Barrett (1999b) og Arrow (2007) påpeker at det er usikkerhet knyttet til estimatene for denne parameteren. En av årsakene er uenighet om den sosiale tidspreferanseraten som inngår i diskonteringsraten. Jo høyere diskonteringsrate som settes desto lavere vil nåverdien av en utslippsreduksjon bli.

Carbone et al. (2009) tegner et optimistisk bilde av hva ikke-kooperative beslutningstakere kan få til med kvotehandel. De benytter en generell likevektsmodell som inkluderer flere økonomiske sammenhenger enn modellen i denne oppgaven. Ved å bruke en partiell likevektsmodell fra Helm (2003), og parametrisere denne mest mulig lik Carbone et al. (2009), finner jeg at utslippene blir høyere med kvotehandel enn uten. Likt

med Carbone et al. (2009) gir dette scenariet lavere kostnader ved handel enn uten.

Felles for alle scenariene er at den positive effekten av en felles marginalkostnad blir undertrykt av økningen i kvoteallokeringer, og dette gir høyere utslipp med handel enn uten. Dette bekreftes også ved kovariansen fra Holtsmark og Sommervoll (2008), som i alle scenariene er positiv.

De scenariene der klimaskadene ikke er så kostbare, og vi har mange beslutningstakere, gir utslipp som er nær utfallet av å ikke bruke noen ressurser på klimaproblemet. Dette er også det scenariet som ligner mest på utfallet av Kyoto-protokollen. Partene signerer frivillig Kyoto-avtalen, men vi kan ikke være sikre på at forpliktelsene blir overholdt. Kyoto-avtalen har så langt ikke lyktes å redusere de globale utslippene av karbon. Synthesis Report (2009), fra forskerkonferansen i forkant av klimakonferansen i København (COP 15) høsten 2009, konkluderer med at utslippene av drivhusgasser er opp mot de mest ekstreme anslagene til IPCC (2006). En utfordring for klimaforhandlingene på lang sikt bør være å undersøke om det er mulig å omstrukturere klimaspillet slik at aktørene endrer sin oppførsel. På kort sikt ser det ut til at COP 15 i stor grad dreier seg om å få USA med på forpliktende utslippsreduksjoner. Håpet er at med USA på laget så vil en også lykkes i å få de raskt voksende økonomiene i Kina og India til å inngå utslippsforpliktelse. Hvorvidt de gode intensjonene overholdes vil tiden vise.

# Tillegg A

## GAMS program

\$title Modell med endogene utslippsvalg

\* Denne kjøringen er Reg\_650\_Carbone

SET I Land

/

11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19

/;

\* dette er regionkjøringen med henholdsvis USA, OECD, Japan, CANZ, EEFSU, China, India, MOPEC og ROW

parameter b(i) marginalskaideparameter

\* marginal skadekostnad per tonn karbon i dollars

/

11 150,

12 300,

13 150,

14 0,

15 50,

16 0,

17 0,

18 0,

19 0

/;

parameter c(i) marginalrenseparameter

\* helningen på den lineære rensekostnadskurven

/

11 0.5514,

12 1.8126,

13 4.9331,

14 2.2162,

```

15 1.5687,
16 1.1703,
17 3.1444,
18 2.7803,
19 0.7607
/;
parameter bau(i) bau
/
11 1818.4970,
12 1039.0803,
13 350.1575,
14 312.8146,
15 899.0048,
16 1181.3140,
17 308.7815,
18 445.2493,
19 1072.9688
/;
positive variables
p pris,
e(i) utslipp;
variables
w(i) kvotemengde,
dpdw pris med hensyn på kvotemengde,
dedw(i) utslipp med hensyn på kvotemengde
;
equations
Fob_w(i) Fob til landet,
Clear_p Markedsklarering,
Fob_e(i) fob til utslipp,
MARGP_w dpdw,
MARGE_w(i) dedw;
Fob_w(i).. p - b(i) + dpdw*(w(i)-e(i)) == 0;
* se likning 3.7 under steg 1
Fob_e(i).. p == (bau(i) - e(i))*c(i) ;
Clear_p.. - sum(i, e(i)) + sum(i, w(i)) == 0;
* markedsklarering, kvoter lik utslipp
MARGP_w.. dpdw == - 1/sum(i, 1/c(i));
MARGE_q(i).. dedq(i) == - (1/c(i))*dpdq ;

```

```
MODEL HELM /  
Fob_w.w,  
Fob_e.e,  
Clear_p.p,  
MARGP_w.dpdw,  
MARGE_w.dedw  
/;  
SOLVE HELM USING MCP;
```

# Tillegg B

## Land, regioner og BNP

For regionene anvendes potensielt BNP for 2010 fra Godal (2009). Reduksjon i BNP er fra Corfee-Morlot (2009)

Tabell B.1: Potensielt BNP i 2010 fra Godal (2009) i trillioner USD. Endring i BNP fra Corfee-Morlot (2009).

Region	USA	OECD	Japan	CANZ	EEFSU	Kina	India	MOPEC	ROW	Total
BNP	12,427	11,233	5,085	1,696	1,521	2,228	0,833	1,148	5,942	42,113
%-endring	-0,45	-2,83	-0,5	0,39	-0,03	-0,22	-4,93	-1,95	-2,7	

BNP for landene er fra Verdensbanken (2006). Regionene er fra Godal og Klaassen (2006), landene som ikke inngår der er tilordnet til ROW.

Region	Land	BNP USD (2005)
CANZ	Australia	674 817 310 720,00
CANZ	Canada	1 134 741 684 224,00
CANZ	New Zealand	108 403 482 624,00
China	China	2 235 913 994 240,00
EEFSU	Bulgaria	27 187 673 088,00
EEFSU	Czech Republic	124 548 571 136,00
EEFSU	Estonia	13 785 366 528,00
EEFSU	Hungary	110 216 945 664,00
EEFSU	Latvia	16 041 840 640,00
EEFSU	Lithuania	25 731 649 536,00
EEFSU	Poland	303 912 353 792,00
EEFSU	Romania	98 913 394 688,00
EEFSU	Slovak Republic	47 890 882 560,00
EEFSU	Slovenia	35 694 514 176,00
EEFSU	Ukraine	86 142 017 536,00
EEFSU	Russian Federation	764 531 113 984,00
India	India	810 151 444 480,00
Japan	Japan	4 552 113 782 784,00
MOPEC	Algeria	102 339 100 672,00
MOPEC	Angola	30 632 364 032,00
MOPEC	Bahrain	13 460 198 400,00
MOPEC	Cyprus	16 996 028 416,00
MOPEC	Ecuador	37 186 940 928,00
MOPEC	Egypt, Arab Rep.	89 685 721 088,00
MOPEC	Iran, Islamic Rep.	192 014 942 208,00
MOPEC	Israel	133 193 629 696,00
MOPEC	Jordan	12 611 458 048,00
MOPEC	Kuwait	80 797 941 760,00
MOPEC	Lebanon	21 558 208 512,00
MOPEC	Libya	41 743 118 336,00
MOPEC	Nigeria	112 248 610 816,00
MOPEC	Oman	30 923 276 288,00
MOPEC	Qatar	42 462 638 080,00
MOPEC	Saudi Arabia	315 580 055 552,00
MOPEC	Turkey	483 992 043 520,00
MOPEC	United Arab Emirates	132 999 864 320,00
MOPEC	Venezuela, RB	145 513 496 576,00
MOPEC	West Bank and Gaza	4 015 865 856,00
MOPEC	Yemen, Rep.	16 753 786 880,00
oecde	Austria	305 098 883 072,00
oecde	Belgium	375 532 879 872,00
oecde	Denmark	258 154 070 016,00
oecde	Finland	195 665 969 152,00
oecde	France	2 146 586 198 016,00
oecde	Germany	2 791 443 791 872,00
oecde	Greece	246 995 402 752,00
oecde	Iceland	16 294 338 560,00
oecde	Ireland	200 843 182 080,00
oecde	Italy	1 776 371 105 792,00
oecde	Luxembourg	37 348 712 448,00
oecde	Netherlands	632 961 105 920,00
oecde	Norway	302 013 186 048,00
oecde	Portugal	185 454 542 848,00
oecde	Spain	1 129 772 351 488,00
oecde	Sweden	366 008 762 368,00
oecde	Switzerland	372 368 310 272,00
oecde	United Kingdom	2 246 458 998 784,00
ROW	Albania	8 376 483 840,00
ROW	Antigua and Barbuda	870 329 600,00
ROW	Argentina	183 193 403 392,00
ROW	Armenia	4 900 436 992,00
ROW	Azerbaijan	13 245 421 568,00
ROW	Bahamas, The	5 983 000 064,00
ROW	Bangladesh	60 277 559 296,00
ROW	Barbados	3 043 951 616,00
ROW	Belarus	30 210 091 008,00
ROW	Belize	1 114 874 624,00
ROW	Benin	4 287 463 936,00
ROW	Bermuda	4 851 146 752,00
ROW	Bhutan	829 504 640,00
ROW	Bolivia	9 549 125 632,00
ROW	Bosnia and Herzegovina	10 764 937 216,00
ROW	Botswana	10 512 506 880,00
ROW	Brazil	882 185 273 344,00



ROW	Brunei Darussalam	9 531 403 264,00
ROW	Burkina Faso	5 427 438 080,00
ROW	Burundi	795 882 880,00
ROW	Cambodia	6 454 528 000,00
ROW	Cameroon	16 587 864 064,00
ROW	Cape Verde	1 005 977 216,00
ROW	Central African Republic	1 350 047 232,00
ROW	Chad	5 873 319 936,00
ROW	Channel Islands	8 827 273 216,00
ROW	Chile	118 249 627 648,00
ROW	Colombia	144 580 575 232,00
ROW	Comoros	387 037 216,00
ROW	Congo, Dem. Rep.	7 104 018 432,00
ROW	Congo, Rep.	6 087 004 160,00
ROW	Costa Rica	19 964 893 184,00
ROW	Cote d'Ivoire	16 363 441 152,00
ROW	Croatia	38 887 387 136,00
ROW	Djibouti	708 843 648,00
ROW	Dominica	301 651 840,00
ROW	Dominican Republic	29 100 836 864,00
ROW	El Salvador	17 070 199 808,00
ROW	Equatorial Guinea	7 527 572 480,00
ROW	Eritrea	1 161 451 520,00
ROW	Ethiopia	12 304 798 720,00
ROW	Fiji	2 962 746 624,00
ROW	Gabon	8 665 739 264,00
ROW	Gambia, The	461 305 344,00
ROW	Georgia	6 411 141 632,00
ROW	Ghana	10 720 346 112,00
ROW	Grenada	508 262 944,00
ROW	Guatemala	27 270 680 576,00
ROW	Guinea	3 260 598 272,00
ROW	Guinea-Bissau	301 110 976,00
ROW	Guyana	793 703 552,00
ROW	Haiti	4 311 683 072,00
ROW	Honduras	9 670 953 984,00
ROW	Hong Kong, China	177 771 724 800,00
ROW	Indonesia	285 868 621 824,00
ROW	Isle of Man	2 915 710 464,00
ROW	Jamaica	9 714 571 264,00
ROW	Kazakhstan	57 123 672 064,00
ROW	Kenya	18 769 012 736,00
ROW	Kiribati	61 227 948,00
ROW	Korea, Rep.	791 426 564 096,00
ROW	Kyrgyz Republic	2 459 876 096,00
ROW	Lao PDR	2 886 938 880,00
ROW	Lesotho	1 425 496 064,00
ROW	Liberia	530 200 000,00
ROW	Macao, China	11 473 112 064,00
ROW	Macedonia, FYR	5 814 726 144,00
ROW	Madagascar	5 038 577 152,00
ROW	Malawi	2 855 031 552,00
ROW	Malaysia	137 953 837 056,00
ROW	Maldives	749 765 632,00
ROW	Mali	5 305 318 912,00
ROW	Malta	5 919 075 328,00
ROW	Marshall Islands	137 575 008,00
ROW	Mauritania	1 836 589 440,00
ROW	Mauritius	6 289 630 208,00
ROW	Mexico	846 989 623 296,00
ROW	Micronesia, Fed. Sts.	232 221 488,00
ROW	Moldova	2 988 172 544,00
ROW	Mongolia	2 306 129 920,00
ROW	Montenegro	2 257 174 528,00
ROW	Morocco	59 523 858 432,00
ROW	Mozambique	6 578 515 456,00
ROW	Namibia	6 132 490 752,00
ROW	Nepal	8 179 964 416,00
ROW	Nicaragua	4 855 535 104,00
ROW	Niger	3 330 008 576,00
ROW	Pakistan	109 502 103 552,00
ROW	Palau	145 428 000,00
ROW	Panama	15 464 699 904,00
ROW	Papua New Guinea	4 921 413 120,00
ROW	Paraguay	7 473 230 848,00

ROW	Peru	79 385 075 712,00
ROW	Philippines	98 823 512 064,00
ROW	Rwanda	2 379 096 576,00
ROW	Samoa	424 981 536,00
ROW	San Marino	1 375 416 576,00
ROW	Sao Tome and Principe	113 808 432,00
ROW	Senegal	8 687 643 648,00
ROW	Serbia	26 193 416 192,00
ROW	Seychelles	722 618 176,00
ROW	Sierra Leone	1 214 786 560,00
ROW	Singapore	119 777 714 176,00
ROW	Solomon Islands	293 164 576,00
ROW	South Africa	242 344 230 912,00
ROW	Sri Lanka	24 405 790 720,00
ROW	St. Kitts and Nevis	428 729 632,00
ROW	St. Lucia	882 400 000,00
ROW	St. Vincent and the Grenadines	438 878 112,00
ROW	Sudan	27 386 028 032,00
ROW	Suriname	1 777 508 864,00
ROW	Swaziland	2 523 979 520,00
ROW	Syrian Arab Republic	28 202 723 328,00
ROW	Tajikistan	2 312 319 488,00
ROW	Tanzania	14 141 921 280,00
ROW	Thailand	176 419 586 048,00
ROW	Timor-Leste	331 900 000,00
ROW	Togo	2 108 220 672,00
ROW	Tonga	215 489 456,00
ROW	Trinidad and Tobago	15 143 723 008,00
ROW	Tunisia	28 967 847 936,00
ROW	Turkmenistan	8 102 340 096,00
ROW	Uganda	9 225 012 224,00
ROW	Uruguay	16 648 755 200,00
ROW	Uzbekistan	14 307 510 272,00
ROW	Vanuatu	369 689 280,00
ROW	Vietnam	52 803 883 008,00
ROW	Zambia	7 348 981 248,00
ROW	Zimbabwe	3 418 093 568,00
United States	United States	12 376 100 306 944,00
Sum		44 608 960 467 164,00

# Tillegg C

## Fordeling av marginal klimaskade

Fra MERGE-modellen brukes hver regions potensielle BNP for 2010, deretter beregnes det nye BNP-nivået med den prosentvise endringen fra Jamet og Corfee-Morlot (2009). Hver regions andel av den totale BNP-endringen multipliseres med samlet marginal klimaskade for å gi regionens marginale klimaskade,  $b_i$ , hvor  $i = 1, 2, 3..I$  for  $I$  land.

$$\frac{\Delta BNP_i}{\sum_{i=1}^I \Delta BNP_i} * \sum_{i=1}^I b = b_i$$

Tilsvarende beregnes den marginale klimaskaden for landene i verdensscenariet, med forskjell at endring i hvert lands BNP beregnes ut fra hver regions prosentvise endring. Det vil si at endringen i BNP slår prosentvis likt ut for alle landene i en region.

Disaggregering av helningen,  $\varsigma_i$ , for renskostnadsfunksjonen gjøres ved å dele den regionvise parameteren fra tabell 4.1 med landets andel av BNP for regionen, altså en horisontal disaggregering.

For scenariet Land\_97\_Jamet vil Norge ha en reduksjon i BNP på ca 8,5 milliarder USD ved en 2,83 % reduksjon av BNP for hele OECD-regionen. Reduksjonen for hele verden blir 687 milliarder USD. Norges andel av den totale BNP-nedgangen utgjør litt i overkant av 1 %. Norges andel av den marginale klimaskaden blir rundt 1 USD per tonn karbon. Helningen på renskostnadsfunksjonen for OECD er 1,8. Denne deles på Norges andel av totalt BNP i OECD som er 0,02.  $\varsigma_i$  for Norge blir da 81 USD.

# Tillegg D

## Kostnader

Kostnadene i modellen består av klimaskade og rensing. Klimaskaden er en funksjon av globale utslipp. Den er lineær og økende i utslipp. En aktørs kostnader som følge av klimaskade blir da  $b_i * \sum_{i=1}^I e_i$ . Rensekostnadene regnes ut ved å sette inn i kostnadsfunksjonen  $c_i(e_i)$ .

# Tillegg E

## Utelatte land

Følgende land er utelatt på grunn av manglende BNP-data:

Virgin Islands (U.S.)

Somalia

Puerto Rico

Northern Mariana Islands

New Caledonia

Netherlands Antilles

Myanmar

Mayotte

Korea, Dem. Rep.

Guam

Greenland

French Polynesia

Faeroe Islands

Cuba

Cayman Islands

Aruba

Andorra

American Samoa

Monaco

Liechtenstein

# Litteraturliste

- Arrow, Kenneth J. (2007): Global Climate Change: A Challenge to Policy. The Economists' Voice, Vol. 4, Article 2. [Internett] Tilgjengelig fra: <http://www.bepress.com/ev/vol4/>
- Barrett, Scott (1999a): A Theory of Full International Cooperation. *Journal of Theoretical Politics* nr. 11, s. 519-541.
- Barrett, Scott (1999b): Montreal versus Kyoto: International Cooperation and the Global Environment. i Kaul, I., Grunberg, I. og Stern, M.A (red.) 1999, *Global Public Goods: International Cooperation in the 21st Century*, Oxford University Press, Oxford, s 192-219.
- Barrett, Scott (2003): *Environment and Statecraft: The Strategy of Environmental Treaty-Making*, Oxford University Press, Oxford.
- Carbone, Jared C. , Helm, Carsten og Rutherford, Thomas F (2009): The case for international emission trade in the absence of cooperative climate policy. *Journal of Environmental Economics and Management*, in press.
- Centre for Integrated Assessment 2007: *Review of the Gothenburg Protocol: Report of the Task Force on Integrated Assessment Modelling and the Centre for Integrated Assessment Modelling*, CIAM Report 1/2007.
- Finus, Michael og Tjøtta, Sigve (2003): The Oslo Protocol on sulfur reduction: the great leap forward? *Journal of Public Economics*, Elsevier, vol. 87(9-10), s. 2031-2048.
- Godal, Odd og Meland, Frode (2006): Coalition formation and strategic permit trade under the Kyoto protocol, *UiB Working papers* 04/06.
- Godal, Odd og Klaassen, Ger (2006): Carbon trading across sources and periods constrained by the Marrakesh Accords. *Journal of Environmental Economics and Management*, 51 (2006) s. 308–322.
- Godal, Odd (2009): Potensielt BNP for regionene. Privat korrespondanse.
- Hardin, Garrett (1968): The Tragedy of the Commons. *Science* 162, s. 1243-1244.

- Helm, Carsten (2003): International emissions trading with endogenous allowance choices. *Journal of Public Economics* 87, s. 2737-2747.
- Holtmark, Bjart J. og Sommervoll, Dag E. (2008): International emissions trading i a non-cooperative equilibrium. *Discussion Papers* 542, Statistics Norway, Oslo
- IPCC, (2007): Summary for Policymakers i M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (red) 2007, *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, s. 7-22.
- Jamet, S. og Corfee-Morlot, J. (2009): Assessing the Impacts of Climate Change: A Literature Review. *OECD Economics Department Working Papers* 691.
- *Kyoto Protocol to The United Nations Framework Convention on Climate Change* 1998 [Internett], Tilgjengelig fra: [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/items/2830.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php).
- Samuelson, Paul A. (1954): The Pure Theory of Public Expenditure. *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 36, No. 4, s. 387-389.
- Stern, N (2006): The Economics of Climate Change: The Stern Review, *Cambridge University Press*.
- Synthesis Report (2009): *International Scientific Congress Climate Change: Global Risks, Challenges & Decisions*, [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://climatecongress.ku.dk>
- Tol, Richard S.J. (2005): The marginal damage costs off carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties. *Energy Policy* 33, s. 2064-2074.
- Tol, Richard S.J. (2008): The Social Cost of Carbon: Trends, Outliers and Catastrophes. *Economics - The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, Kiel Institute for the World Economy, vol. 2(25) [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://ideas.repec.org/p/zbw/ifwedp/6>
- United Nations Environment Programme (1972): *Report of the United Nations Conference on The Human Environment*, Stockholm [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=97>
- United Nations Environment Programme (2006): *UNEP 2006: Annual Report*, [Internett]. Tilgjengelig fra: [http://www.unep.org/publications/search/pub\\_details\\_s.asp?ID=3919](http://www.unep.org/publications/search/pub_details_s.asp?ID=3919)
- *United Nations Framework Convention on Climate Change* (1992): [Internett]. Tilgjengelig fra: [http://unfccc.int/essential\\_background/convention/background/items/2853.php](http://unfccc.int/essential_background/convention/background/items/2853.php).
- Verdensbanken (2006): *BNP-data fra 2005*, [Internett] Hentet fra: <http://ddp-ext.worldbank.org/e>