

Svovel i stratosfæren som klimatiltak

-

En økonomisk analyse

av

Kjetil Gramstad

Masteroppgave

Masteroppgaven er levert for å fullføre graden

Master i samfunnsøkonomi

Universitetet i Bergen, Institutt for økonomi

Juni 2009

UNIVERSITETET I BERGEN



Forord

Jeg vil rette en stor takk til mine fremragende veiledere Odd Godal og Sigve Tjøtta for god og omfattende hjelp ved arbeidet med denne oppgaven. Studentene i Miljøgruppen fortjener også takk for jevnlig tilbakemeldinger, samt Mona Louise, øvrige venner, familie og medstudenter; en kan ikke skrive en masteroppgave uten atspredelse utenfor instituttet eller på pauserommet.

Sammendrag

Relativt nylig har svovel vært foreslått sprøytet ut i stratosfæren for å redusere strålingen fra solen og for dermed å redusere den globale gjennomsnittstemperaturen. Sprøyting av svovel i stratosfæren faller inn under paraplybetegnelsen *klimamodifisering*. For å se på de økonomiske konsekvensene av sprøyting av svovel i stratosfæren brukes det i denne oppgaven en økonomisk vekstmodell med integrert klima. Klimamodifisering brukes kombinert med reduksjoner i utslipp av CO_2 og alene.

I denne oppgaven vises det at klimamodifisering har stor innvirkning på den globale gjennomsnittstemperaturen og klimaskadene som oppstår ved bruk av fossilt brensel: begge faller betraktelig.

Oppgaven tar for seg to situasjoner: i den første er bruken av svovel bare begrenset av den direkte økonomiske kostnaden ved implementering. I den andre legges det en begrensning på den totale mengden svovel som kan brukes. Uten begrensinger på mengden svovel gis temperaturen i 2105 som 0,29 grader over før-industrielt nivå; det er 2,4 grader lavere enn den ville vært ved bruk av utslippsreduksjoner alene. For tilfellet med begrenset svovelbruk er temperaturen 0,82 grader over før-industrielt nivå, et fall på 1,87 grader relativt til situasjonen med bare utslippsreduksjoner. Kostnaden ved utslipp av karbon – som består av klimaskader og en ressurspris – vil, ved bruk av utslippsreduksjoner alene, i dag være 27 dollar per tonn karbon (\$/tC). Inkludering av en begrenset mengde svovel senker denne til 16 \$/tC, mens den faller ytterligere ved ubegrenset bruk av klimamodifisering, til 13 \$/tC.

Denne oppgaven inkluderer bare de direkte økonomiske kostnadene ved sprøyting av svovel i stratosfæren. Integrering av bieffekter og andre kostnader trengs for å få et bedre helhetsinntrykk av fordelene og ulempene ved klimamodifisering. En eventuell anbefaling av implementering kan ikke fremmes før en har fått bedre oversikt over de negative konsekvensene av klimamodifisering.

Innhold

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Innledning | 1 |
| 2 | Klimamodifisering | 3 |
| 2.1 | Tekniske detaljer | 4 |
| 2.2 | Internasjonale avtaler | 5 |
| 2.3 | Fordeler og ulemper | 6 |
| 2.4 | Andre former for klimamodifisering | 8 |
| 3 | En økonomisk vekstmodell med klima | 10 |
| 3.1 | En enkel vekstmodell | 10 |
| 3.2 | En utvidet vekstmodell | 13 |
| 4 | DICE-2007 | 18 |
| 4.1 | Økonomiske sammenhenger | 18 |
| 4.2 | Geofysiske sammenhenger | 21 |
| 4.3 | Avveiiinger i modellen | 23 |
| 4.4 | Implementering av klimamodifisering i DICE | 23 |
| 5 | Resultater | 26 |
| 5.1 | Scenariebeskrivelse | 26 |
| 5.2 | Geofysiske resultater | 28 |
| 5.3 | Økonomiske resultater | 29 |
| 5.4 | Sensitivitetsanalyse | 31 |
| 6 | Svakheter ved modellen | 34 |
| 7 | Konklusjon | 36 |
| A | Figurer | 38 |
| B | Programmering av DICE - modifisert | 45 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| C | Underrutiner for nye scenarier | 53 |
| C.1 | Hotelling | 53 |
| C.2 | Business as usual (BAU) | 53 |
| C.3 | Utslippsreduksjon (UtK) | 54 |
| C.4 | Først-best | 54 |
| C.5 | Geoengineering | 55 |
| C.6 | Utslippskontroll med begrenset svovel | 55 |
| C.7 | BAU med begrenset svovel | 56 |
| | Litteraturliste | 58 |

Kapittel 1

Innledning

Det har etterhvert blitt hevet over enhver rimelig tvil at menneskeskapte utslipp av klimagasser bidrar til global oppvarming (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007). Denne oppvarmingen fører med seg en rekke problemer som inkluderer, men ikke begrenser seg til: endrede vilkår for jordbruk, forverring av helsemessige forhold og vanskeligheter for planter og dyr. Det biologiske mangfoldet er svært sårbart for temperaturendringer og vil lide under krav om en rask tilpasningsprosess.

Det er flere metoder vi kan anvende for å redusere problemet med global oppvarming; noen av disse er: redusert bruk av fossilt brensel, CO_2 -fangst og -lagring; både i bakken, jamfør Stoltenberg II-regjeringens 'månelanding' på Mongstad; og i havet, som kan gjødsles med jernsulfat. Andre tiltak er planting av trær og sprøyting av svovelaerosoler i stratosfæren. Flere av disse, blant annet sprøyting av svovelaerosoler i stratosfæren, faller under paraplybetegnelsen *klimamodifisering* (engelsk: geoengineering).

Metodene nevnt over kan kombineres eller brukes hver for seg. Standard økonomisk teori sier at verdien av alle tiltak – i dette tilfellet tiltak for å motvirke global oppvarming – på marginen skal være lik. Det er da rimelig å tro at det vil være optimalt å bruke en kombinasjon av overnevnte tiltak.

Denne oppgaven fokuserer på to av tiltakene nevnt over: redusert bruk av fossilt brensel (heretter utslippsreduksjon) og klimamodifisering; sistnevnte i form av sprøyting av svovelaerosoler i stratosfæren.

Utslippsreduksjon innebærer reduksjon i, eller substitusjon fra, produksjon av utslippskrevende varer og tjenester. Fordelen med denne formen for inngripen er at prosessen er velkjent, trygg og stabil. Ulempen er at det er kostbart å redusere produksjonen, og at vi ikke vil se resultatene før etter relativt lang tid. Dessuten har forsøk på å ta i bruk utslippsreduksjoner for å bøte på klimaendringene, som Kyotoprotokollen, til nå ikke hatt ønsket effekt (Barrett, 2008; Nordhaus, 2006).

Klimamodifisering inkluderer alle metoder for reduksjon av global oppvarming som går på menneskelig, aktiv inngripen i miljøet. Én teknikk er å redusere innkommende stråling fra solen ved hjelp av svovelaerosoler i stratosfæren og på den måten bremse

veksten i temperaturen. Fordelene med denne teknikken er at den virker raskt, er billig og kan ha stor effekt. Ulempene er at det er stor usikkerhet omkring effektene, spesielt bieffektene, av denne typen inngripen; endring i nedbørsmønstre, ozonreduksjon over polene og raske temperaturendringer kan potensielt ha store negative virkninger på miljøet. Klimamodifikasjon er altså billig og effektivt, men potensielt farlig i bruk.

Denne oppgaven tar mål av seg til å gi en økonomisk vurdering av klimamodifisering. Siden valg vi tar angående klima i dag vil ha betydning i fremtiden, er det viktig å ha et dynamisk perspektiv på problemstillingen. I denne oppgaven anvendes derfor en økonomisk vekstmodell med integrert klima: DICE-2007 (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy, heretter DICE), utviklet av William Nordhaus.

Kapittel 2

Klimamodifisering

Klimamodifisering (engelsk: geoengineering) som virkemiddel mot global oppvarming ble i følge Gregg (1996) foreslått første gang på 70-tallet av Marchetti (1977), Budyko (1974) og Kellogg og Schneider (1974). Marchetti foreslo å fange CO_2 i undervannsstrømmer og er også den som introduserte begrepet klimamodifisering (geoengineering) i denne sammenheng. Keith (2000, s. 245) definerer klimamodifisering som 'the intentional large-scale manipulation of the environment, particularly manipulation that is intended to reduce undesired anthropogenic climate change'. Det er viktig at både 'intensjon' og 'storskala' er oppfylt: Menneskelige utslipp av CO_2 i atmosfæren ville falt under Keiths definisjon av klimamodifisering dersom en utelater at modifiseringen blir gjort med hensikt; bønder som gjødsler åkrene sine ville drevet med klimamodifisering dersom stor-skala var utelatt.

Denne oppgaven skal begrenses til å omhandle en spesiell form for klimamodifisering: sprøyting av svovelaerosoler i stratosfæren. Med mindre annet er spesifisert, vil det fra nå av være denne teknikken det refereres til når klimamodifisering omtales.

For å gi et bilde av hvordan klimamodifisering vil virke, kan en se på effekten av smog over store byer. Denne smogen skyldes utslipp av gasser som har en sammensetning som gjør at den reflekterer sollys og dermed virker avkjølende. Klimamodifisering kan godt sammenlignes med denne smogen; to av forskjellene er at gassene som anvendes ved bruk av klimamodifisering skal plasseres langt over jordoverflaten og at vi kan kontrollere hva de består av, i dette tilfellet svovel.

Det skal nå forklares hvordan klimamodifisering i praksis vil påvirke temperaturen. Etter en kort innføring i de tekniske detaljene, skal vi se på årsaken til at klimamodifisering nå, på tross av frykt for alvorlige bivirkninger – disse gjennomgås under – vurderes som et reelt bidrag i arbeidet mot klimaendringer. Noen av problemene og fordelene ved bruk av klimamodifisering skal deretter utforskes. Til slutt i dette kapittelet gjennomgås kort noen former for klimamodifisering som ikke vurderes i denne oppgaven.

2.1 Tekniske detaljer

Stråling fra solen (sollys) svinger med en viss frekvens. For at strålingen skal reflekteres tilbake til verdensrommet før den treffer jorden, må den treffe partikler som svinger med en frekvens som stemmer overens med sollysets egen frekvens¹. Dersom kollisjon ikke inntreffer, og strålingen passerer hele atmosfæren, treffer den jordoverflaten og skifter frekvens. Den nye frekvensen passer bedre overens med frekvensen til blant annet CO_2 , så sannsynligheten for at en enkelt partikkel kolliderer på vei ut av atmosfæren, er større enn sannsynligheten for at den kolliderer på vei inn. Dette forklarer hvorfor stråling kan komme inn, men ikke ut av atmosfæren, samt at økt konsentrasjon av CO_2 fører til at temperaturen i atmosfæren øker: Når sollyset kolliderer med en partikkel i atmosfæren overføres lysets energi til denne partikkelen. Kollisjonen fører til raskere partikkelbevegelser som, per definisjon, gir økt temperatur. Forholdet mellom innkommende og utgående sollys refereres til som *strålingsbalansen*. Denne måles relativt til førindustrielt nivå, da denne per konstruksjon var lik null. Når strålingsbalansen er positiv, stiger temperaturen.

Én partikkel som har den frekvensen som trengs for å reflektere innkommende stråling er svovel. Ved bruk av klimamodifisering – slik det brukes i denne oppgaven – kan vi altså redusere oppvarmingen av atmosfæren.

At svovel har en avkjølende effekt er noe vi har observert ved flere tilfeller; ved vulkanutbrudd slippes det ut store mengder svovel. Hansen m.fl. (1992) målte effekten utbruddet til Mt. Pinatubo i 1991 hadde på strålingsbalansen i atmosfæren: Seks terragram svovel førte til et fall i strålingsbalansen på $4,5 \text{ Wm}^{-2}$. Sett i forhold til tall for strålingsbalansen i denne oppgaven, de varierer rundt $1\text{--}8 \text{ Wm}^{-2}$, gir det oss et bilde av effekten svovel kan ha på klima. Strålingsbalansen er en viktig drivkraft for temperaturendringer, og faller altså betraktelig ved vulkanutbrudd.

Et naturlig spørsmål angående klimamodifisering er om det er mulig å få lokale virkninger ved å sprøyte svovelet opp på spesielle steder. Svovelet fra utbruddet til Mt. Pinatubo spredte seg over hele kloden i løpet av 22 dager (Bluth m.fl., 1992), noe som tyder på at en slik lokal effekt ikke kan opprettholdes lenge nok til at den vil få betydning. Caldeira og Wood (2008) undersøker imidlertid effekten av klimamodifisering anvendt i arktiske strøk, noe som tyder på at lokale virkninger likevel kan være mulig.

Sprøyting av svovel i stratosfæren kan foregå på flere forskjellige måter (Rasch m.fl., 2008): en kan sende fly som brenner av svovel i motorene, skyte svovel opp med artillerikanoner, sende den opp med ballonger eller gjennom slanger som festes til høye tårn. Kostnadene av de ulike tiltakene er estimert av Robock m.fl. (2009) og presenteres i kapittel 4.4.

¹Lys kan beskrives som både en bølge og en partikkel som kalles et foton. Dette refereres til som lysets bølge-partikkeldualitet. Mange partikler, ikke bare lys, har denne egenskapen.

2.2 Internasjonale avtaler

Det kan være relativt lett å finne teoretiske løsninger på problemer, noe helt annet er å implementere løsningene slik de er beskrevet. To forhold som er av relevans i forbindelse med implementering av klimamodifisering skal kort gjennomgås: Hvorfor utslippsreduksjoner ikke blir brukt i tilstrekkelig grad, slik at klimamodifisering – med alle sine ulemper – blir vurdert, og hvorfor klimamodifisering kanskje kan være uunngåelig og av den grunn må undersøkes nærmere.

Utslippsreduksjon som kollektivt gode

Selv om det forskes mye på alternativ energi – for eksempel solenergi – genererer fremdeles industriell og annen økonomisk aktivitet store utslipp av klimagasser. Disse utslippene utgjør et problem som vil kunne påføre den samme økonomien til dels alvorlige skader i fremtiden. Hvorfor reduseres ikke utslippene tilstrekkelig med dette i tankene?

Utslippsreduksjoner er et kollektivt gode, det vil si det kan nyttes av alle – i denne sammenheng alle verdens land – når det først er betalt for. La oss anta at hvert land bare tenker på seg selv når landets utslippsreduksjoner bestemmes: en situasjon uten samarbeid. Hvert tonn CO_2 som holdes tilbake, i form av redusert produksjon, medfører en kostnad, nettopp ved den reduserte produksjonen, og en gevinst, i form av reduserte klimaskader i fremtiden. Siden kostnaden bæres alene av landet som reduserer produksjonen, mens det samme landet bare opplever sin egen del av gevinsten, vil det være et misforhold mellom marginalgevinst og -kostnad. Dette misforholdet leder til for lave reduksjoner i produksjon, eller – sagt på en annen måte – for høye utslipp av karbon.

Det finnes flere måter å takle problemet med kollektive goder. I klimasammenheng er Kyotoavtalen et forsøk på dette. Grovt fortalt innebærer denne at landene som har ratifisert avtalen forplikter seg til å overholde visse utslippsmål. Disse målene kombineres med et kvotemarked for å få en mest mulig kostnadseffektiv utslippsreduksjon. På grunn av manglende deltagelse og mangel på troverdige straffer for de som ikke overholder utslippsmålene, har imidlertid Kyotoavtalen ikke hatt ønsket effekt. I følge Alfsen og Holtsmark (2005) er andelen av globale utslipp som er dekket av Kyotoprotokollen bare rundt 30 prosent. I tillegg er veksten i utslipp i landene som ikke har ratifisert – hovedsaklig u-land og USA – større enn i landene som har ratifisert. Siden 2005 har imidlertid flere land ratifisert avtalen (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2009); likevel er utslippene av klimagasser høyere enn en skulle ønske.

Innsatsen mot global oppvarming som er satt inn til nå har ikke hatt den ønskede effekten: Utslippene faller ikke, og nye tiltak bør vurderes.

Alene eller sammen?

To gode grunner til å se nærmere på klimamodifisering som tas opp av Barret (2008), er

i) at tiltak vil påvirke land forskjellig (IPCC; 2007, s. 13) og *ii*) at det er mye usikkerhet omkring bivirkningene av klimamodifisering.

Førstnevnte argument – at tiltak påvirker land ulikt – får betydning siden klimamodifisering er så billig at enkeltland kan implementere tiltak på egenhånd. En kan da se for seg at et land som tjener mye på en lavere global gjennomsnittstemperatur, vil iverksette klimamodifiseringstiltak uten å i en fornuftig grad ta hensyn til konsekvensene dette vil ha for resten av verden. For å unngå en slik situasjon mener Barret at en internasjonal avtale om klimamodifisering bør utarbeides. Før dette er mulig må en lære effekter og bieffekter av klimamodifisering bedre å kjenne, slik at hvert land rasjonelt kan vurdere sin stilling. Dette bringer oss til punkt to: For at politiske avgjørelser om bruk av klimamodifisering kan være fornuftige og veloverveide, må usikkerheten rundt effekter og bieffekter reduseres. Dette kan best gjøres ved å samordne forskningen på området ved internasjonalt samarbeid.

Virgoe (2008) fører tilsvarende argumenter og drøfter i tillegg hvordan en eventuell bruk av klimamodifisering bør styres: av ett land alene, av en koalisjon av villige parter eller via et eksisterende internasjonalt organ som FN. Virgoe mener at FN ikke vil være et realistisk alternativ til utarbeiding av spørsmål relatert til klimamodifisering før store nok deler av verden har merket effektene av klimaendringene i tilstrekkelig grad. Han argumenterer også for at et enkelt land kan oppleve for store politiske konsekvenser til at det vil være verdt å gjennomføre klimamodifiseringstiltak på egenhånd. Dette taler i sin tur mot at landene på egenhånd forbereder bruken av klimamodifisering. En uformell koalisjon av villige land kan se ut som det mest realistiske alternativet for å forberede bruk av klimamodifisering. På grunn av de globale konsekvensene bør imidlertid selve gjennomføringen skje gjennom et internasjonalt organ, for eksempel FN.

2.3 Fordeler og ulemper

De viktigste problemene med klimamodifisering skal nå gjennomgås. Det første punktet beskriver en mulig indirekte effekt, mens de tre siste er direkte virkninger av klimamodifisering. Til slutt vil noen fordeler ved klimamodifisering nevnes.

Fortrengningseffekter

Bengtsson (2006) skriver at innføring av klimamodifisering vil fortrenge utslippsreduksjoner. Dersom en tar hensyn til alle effektene ved utslippsreduksjon og klimamodifisering, vil denne fortrengningseffekten bare representere en optimal fordeling av ressurser og dermed ikke utgjøre noe problem. Dersom en derimot utelukkende tar hensyn til effekten utslipp og klimamodifisering har på temperaturen og glemmer andre effekter, kan resultatet bli uønsket. Én slik effekt er økning av havenes pH-verdi: Økt konsentrasjon av karbon i atmosfæren fører til at havene tar opp mer karbon og blir surere, noe som kan

få alvorlige konsekvenser for blant annet økologi og fiske (Orr m.fl., 2005). Helt sikkert er det i hvertfall at klimamodifisering ikke vil løse problemet med sure hav.

Lærdommen herfra er at det er viktig å ha så mye informasjon som mulig om effekter og bieffekter, direkte og indirekte, av klimamodifisering. Slik kan vi unngå å ignorere viktige aspekter når vi bestemmer hvilken kombinasjon av klimamodifisering og andre virkemidler som vil være fornuftig.

Ozonreduksjon over polene

Tilmes, Müller og Salawitch (2008) bruker en kombinasjon av modellering og måling for å kvantifisere endringer sprøyting av svovelaerosoler i stratofæren vil ha på ozonlaget ved polene: Svovelet vil reagere med ozonmolekylene i stratosfæren og danne nye kjemiske forbindelser. Dersom en bruker mengder av svovel som er tilstrekkelig til å gjøre opp for menneskeskapt oppvarming ved utslipp av CO_2 , vil dette ha store virkninger på ozonlaget over Arktis: Det kan føre til at det tar 30 til 70 år ekstra før hullet som allerede er der tettes igjen. Jamfør diskusjonen i kapittel 2.1 om lokale effekter av klimamodifisering, er det mulig en kan unngå å sprøyte svovel over polene for å unngå negative virkninger på ozonlaget der.

Endring i nedbørsmønstre

Klimamodifisering kan redusere nedbøren, spesielt over tropiske områder, med opp til 1 mm per dag (Trenberth og Dai, 2007; Matthews og Caldeira, 2007). Mindre nedbør kan i utsatte områder føre til tørke og gå ut over matproduksjon. Tørke kan i sin tur føre til sultkatastrofer i, eller i det minste utvandring fra, områder som ikke lenger vil være fruktbare. Slike omveltninger vil kunne føre til alvorlige konflikter mellom ulike grupperinger, spesielt i områder som i utgangspunktet ikke har et stabilt politisk system².

Plutselig avbrudd

Dersom en i fremtiden, for eksempel på grunn av tekniske problemer, plutselig skulle avbryte sprøytingen av svovel i stratosfæren, vil temperaturen stige svært mye på relativt kort tid. Årsaken er den korte levetiden til svovel i stratosfæren, som er på ett til to år. På grunn av økosystemers treghet i å tilpasse seg klimaendringer vil slike plutselige omveltninger sannsynligvis få store negative konsekvenser for avlinger, dyrehold og dyre- og planteliv generelt. Brovkin m.fl. (2008) har målt effekten et plutselig avbrudd av klimamodifisering vil ha på den globale gjennomsnittstemperaturen. De fraråder sprøyting av svovelaerosoler i stratosfæren av årsaken som nettopp ble nevnt. De potensielt store gevinstene ved klimamodifisering krever imidlertid en nøyere gjennomgang før vi eventuelt forkaster metoden.

²Denne indirekte koblingen mellom klima og krig ble fremhevet da arbeid med klimaspørsmål skaffet Al Gore og IPCC Nobels fredspris (Pressemelding: Nobels fredssenter, Oslo, 12. oktober 2007.)

Rask effekt

Svovel som sprøytes ut i stratosfæren har en levetid på ett til to år. Effekten på strålingsbalansen begynner å virke med en gang svovelet utplasseres, og slutter å virke når svovelet forsvinner. Dette betyr at en relativt raskt kan begynne med og avslutte bruk av klimamodifisering etter behov; det er mulig å ha klimamodifisering i bakhånd i tilfelle det skulle oppstå akutte problemer knyttet til rask oppvarming.

Politisk gjennomførbart

Kyotoavtalen har som sagt ikke hatt ønsket effekt. En av grunnene til dette er at land ikke ønsker å påta seg reduksjoner i utslipp da dette er svært dyrt. Reduksjoner i utslipp kan implementeres for eksempel ved redusert produksjon: noen vil få reduserte inntekter. Klimamodifisering krever ikke tilsvarende offer, da prisen for gjennomføring er relativt lav. Dette taler for at det er en større sjanse for at klimamodifisering blir gjennomført enn at utslippsreduksjoner blir det.

2.4 Andre former for klimamodifisering

Denne oppgaven handler om en bestemt form for klimamodifisering: sprøyting av svovelaerosoler i stratosfæren. Dette er ikke det eneste klimamodifiseringstiltaket som er foreslått. Her gjennomgås kort noen andre klimamodifiseringstiltak.

Bruker vi Keiths definisjon gitt i kapittel 2, vil lagring av CO_2 i bakken være en form for klimamodifisering; kanskje en av de best kjente og mest populære formene, i hvertfall i Norge. Denne metoden skal fange opp CO_2 før denne slippes ut i atmosfæren, og lagre den under bakken. Det arbeides for tiden med å utvikle et system for CO_2 -fangst på Mongstadraffineriet i Norge.

Økning av verdens tremasse – som ville rensset luften for CO_2 – kunne vært et godt bidrag mot global oppvarming. Verdens tremasse har i følge FNs mat- og jordbruksorganisasjon (2009) imidlertid falt med omtrent 0,2 prosent per år, de siste 15 årene.

Et annet alternativ som vurderes er gjødsling av havet. Dersom en tilfører havet spor av jernpartikler kan dette føre til at havene tar opp større mengder CO_2 og lagrer dette. Dette er ikke problemfritt, jamfør diskusjonen om havenes pH-verdi i kapittel 2.3. Se forøvrig Smetacek og Naqvi (2008).

Heller enn utplassering av svovelaerosoler i stratosfæren, er det foreslått å bruke speil. Speilene skal plasseres slik at de går i bane rundt jorden, slik at de hele tiden reflekterer sollys. Effekten vil kvalitetsmessig være tilsvarende effekten av svovelaerosoler i stratosfæren.

Det har vært foreslått å bygge båter som kan sende opp søyler av saltvann i luften. Båtene skal patruljere verdenshavene og søylene av vann skal fordampe og bidra til et

økt skylag. Dette skylaget vil så reflektere sollys tilbake til verdensrommet.

Kapittel 3

En økonomisk vekstmodell med klima

Global oppvarming er et problem med et langt tidsspenn, så det er viktig å ha et dynamisk perspektiv når en analyserer det. Denne oppgaven benytter seg av en økonomisk vekstmodell som oppfyller kravet om dynamikk. Det skal nå presenteres en vekstmodell uten klimaaspektet, før jeg legger til klima i den andre seksjonen i dette kapitlet. Årsaken til inndelingen er at prinsippene bak en vekstmodell strengt tatt kan forstås uten at klima tas med og jo enklere en modell er, jo lettere kommer intuisjonen frem.

3.1 En enkel vekstmodell

Anta at tiden kan deles opp i diskret deler: perioder, indeksert ved t . En periode kan for eksempel være ett år. Modellen løper i et endelig antall perioder, der siste periode er T . La så verdenssamfunnets totale velferd over tid være summen av det samme samfunnets nytte i hver periode i modellens løpetid. La befolkningen representeres av et 'gjennomsnittsindivid' med *øyeblikkelig nyttefunksjon* $u(C_t)$, der C_t er konsum i periode t . Samfunnets *øyeblikkelige nyttefunksjon* blir da $u(C_t)L_t$, der L_t er antall individer i befolkningen i periode t . Befolkningen ved hver tid er gitt eksogent, så vi kan forenkle analysen ved å redefinere samfunnets *øyeblikkelige nyttefunksjon* som $u_t(C_t) \equiv u(C_t)L_t$. Vi kan da skrive velferdsfunksjonen som

$$W = \sum_{t=0}^T \beta^t u_t(C_t) \tag{3.1}$$

der $\beta \equiv \frac{1}{1+\rho}$ er den sosiale tidspreferansefaktoren og ρ den tilsvarende raten. ρ sier hvordan vi vektlegger fremtidig nytte relativt til dagens nytte. Dersom ρ er høy vektlegger vi dagens nytte høyt, og vice versa. I en vekstmodell som går over mange år kan vi tolke den sosiale tidspreferanseraten som en vektlegging av vår generasjon nytte relativt til

neste generasjons nytte. Vi skal anta at $u(\cdot)$, og dermed $u_t(\cdot)$, vokser konkavt i konsum, altså at $u'(\cdot) \geq 0$ og $u''(\cdot) \leq 0$. Befolkningsveksten antas å vokse med en fast rate $n > 0$ per periode, med L_0 gitt, slik at $L_t = L_0(1+n)^t$.

Samfunnet produserer hver periode en mengde varer og tjenester, Q_t , slik:

$$Q_t = f_t(K_t) \equiv f(K_t, L_t)$$

der vi antar at $f(\cdot)$ vokser konkavt i begge innsatsfaktorene, kapital; K_t , og arbeid; L_t . Vi antar her at hele befolkningen er i arbeid hele tiden og kan derfor forenkle produktfunksjonen til å bare avhenge av kapital.

Kapitalbeholdningen i periode $t+1$ er $K_{t+1} = K_t + I_t$, eller $I_t = K_{t+1} - K_t$. I_t er altså investeringer i kapital i periode t . Vi ser for enkelhets skyld bort fra depresiering av kapital. All produksjon antas å fordeles på investeringer og konsum, slik at $Q_t = I_t + C_t$. Kapital og konsum måles i produksjonenheter. Vi får da at utviklingen til kapital kan skrives som

$$\begin{aligned} K_{t+1} - K_t &= Q_t - C_t \\ &= f_t(K_t) - C_t \end{aligned} \tag{3.2}$$

der $K_0 = \bar{K}_0$ og $K_{T+1} = \bar{K}_{T+1}$ er gitt. Den siste betingelsen er med for å sørge for at det er kapital igjen etter modellens siste periode; verden slutter ikke å eksistere selv om modellen stopper. All kapital eies av befolkningen – representert ved det gjennomsnittlige individet – slik at avkastningen fra kapital tilfaller disse.

Anta så at det gjennomsnittlige individet maksimerer sin nytte over tid, altså at det maksimerer (3.1) gitt (3.2) med hensyn på konsum og kapital. Dette maksimeringsproblemet kan løses ved Lagranges metode. Først setter vi opp Lagrangefunksjonen:

$$\begin{aligned} \mathbb{L} &= \sum_{t=0}^T \beta^t u_t(C_t) - \sum_{t=0}^T \lambda_t (K_{t+1} - K_t - f_t(K_t) + C_t) \\ &\quad - \tilde{\lambda}_0 (K_0 - \bar{K}_0) - \tilde{\lambda}_{T+1} (K_{T+1} - \bar{K}_{T+1}) \end{aligned}$$

λ_t er Lagrangemultiplikatoren, eller *skyggeprisen*, til kapital: marginalgevinsten av å øke kapitalstokken i periode t . $\tilde{\lambda}_0$ og $\tilde{\lambda}_{T+1}$ er tilsvarende skyggepriser for kapitalen i første og siste periode i modellen.

De nødvendige betingelsene for optimum er

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial C_t} = 0 = \beta^t u'_t(C_t) - \lambda_t, \quad \text{for } t \in [0, T] \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_t} = 0 = \lambda_t (1 + f'_t(K_t)) - \lambda_{t-1}, \quad \text{for } t \in [1, T] \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_t} = 0 = K_{t+1} - K_t - f_t(K_t) + C_t, \quad \text{for } t \in [0, T] \quad (3.5)$$

I tillegg må vi kreve at *i*) $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_0} = 0 = \lambda_0(1 + f'_0(\bar{K}_0)) - \tilde{\lambda}_0$ og at *ii*) $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial K_{T+1}} = 0 = -\lambda_T - \tilde{\lambda}_{T+1}$. Siden $u(\cdot)$ og $f(\cdot)$ er konkavt stigende funksjoner, og resten av leddene som inngår i Lagrangefunksjonen er lineære, er disse nødvendige betingelsene også tilstrekkelige.

$\tilde{\lambda}_0$ gir gevinsten av å øke \bar{K}_0 . Dette er den samme effekten som en hypotetisk λ_{-1} ville gitt, så *i*) kan tolkes som de andre vilkårene gitt i (3.4). Fra *ii*) får vi at $-\lambda_T = \tilde{\lambda}_{T+1}$. \bar{K}_{T+1} er en kostnad som påføres økonomien; å redusere denne med en enhet vil ha samme nåverdi som en tilsvarende økning av K_T .

Fra (3.3) får vi at $\beta^t u'_t(C_t) = \lambda_t$, altså at nåverdien av en marginal økning i konsum i en periode skal være lik nåverdien av en marginal økning av kapitalstokken i samme periode.

Fra (3.4) får vi at $(\lambda_t - \lambda_{t-1})/\lambda_t = -f'_t(K_t)$, altså at verdien av å investere i kapital faller med en rate lik dens grenseprodukt. Årsaken til dette er at kapital som implementeres i periode $t - 1$ bidrar til produksjon en runde mer enn kapitalen som implementeres i periode t . Siden avkastning på kapital i periode t er lik renten, r_t , i samme periode, $f'_t(K_t) \equiv r_t$, kan vi skrive $(\lambda_t - \lambda_{t-1})/\lambda_t = -r_t$.

Dersom nyttefunksjonen er av formen $u_t(C_t) = \frac{C_t^{1-\alpha}}{1-\alpha}$ får vi Ramseylikningen i diskret tid:

$$r_t = \rho + \alpha \frac{C_t - C_{t-1}}{C_t} \quad (3.6)$$

Her er altså r_t renten, ρ er den sosiale tidspreferanseraten, mens $\left| \frac{d^2 u_t(C_t)}{dC_t^2} \frac{C_t}{u'_t(C_t)} \right| = \alpha$ er den marginale konsumelastisiteten til nyttefunksjonen som ble valgt, altså hvor mange prosent marginalnyttendres dersom konsumet endres med en prosent. $\frac{C_t - C_{t-1}}{C_t}$ er vekstraten til konsum fra periode $t - 1$ til t . For denne nyttefunksjonen er α også lik den relative risikoaversjonen som er definert som $-C_t u''_t(\cdot)/u'_t(\cdot)$. Sistnevnte er altså konstant i vårt tilfelle.

Ramseylikningen gir modellens totale diskonteringsrate: Den første delen, $\rho > 0$, sørger for at dagens nytte vektet høyere enn fremtidig nytte. Marginalnyttendres av konsum er høyest når konsumet er lavt, noe som i et egalitært samfunn taler for omfordeling fra rike – i form av høyt konsum – til fattige. $\alpha \frac{C_t - C_{t-1}}{C_t}$ sørger for en slik omfordeling ved et tillegg til diskonteringsraten som øker ved vekst i konsum.

Resultatet over kan vises som følger: Med nyttefunksjonen $\frac{C_t^{1-\alpha}}{1-\alpha}$ har vi at $u'_t(C_t) = C_t^{-\alpha}$. Tar vi logaritmen til høyresiden i (3.3) og setter inn $u'_t(C_t) = C_t^{-\alpha}$ får vi $t \ln \beta - \alpha \ln C_t = \ln \lambda_t$. Vi antar så at den underliggende funksjonen som gir opphav til resultatene i den diskrete modellen er kontinuerlig og deriverbar over hele domenet, $t \in [0, T]$. Vi deriverer så med hensyn på tid og får at $\ln \beta - \alpha(C_t - C_{t-1})/C_t = (\lambda_t - \lambda_{t-1})/\lambda_t$, da $d \ln C(t)/dt = (1/C(t))(dC(t)/dt)$ og $dC(t)/dt \approx (C(t) - C(t-1))/(t - (t-1)) = C(t) - C(t-1)$. Tilsvarende gjelder også for utviklingen til λ_t over tid. Vi har også at $\ln \beta = \ln(1/(1+\rho)) = \ln 1 - \ln(1+\rho) \approx 0 - \rho = -\rho$ for $\rho \lesssim 0, 1^1$. Kombinerer vi dette med at $(\lambda_t - \lambda_{t-1})/\lambda_t = -r_t$ fr vi (3.6).

Essensen i økonomiske vekstmodeller er altså avveiningen mellom konsum i dag og i fremtiden. Diskontering av fremtidig nytte, samt effekten av at økonomisk vekst gjør fremtidige generasjoner rikere, taler for å konsumere mer i dag. Avkastingen på kapital – som i en enkel modell som dette er alternativet til konsum – taler for å utsette konsumet. En modell som optimerer samfunnets velferd over tid skal finne den optimale avveiningen mellom disse hensynene.

3.2 En utvidet vekstmodell

Modellen i denne seksjonen er i prinsippet lik den som ble presentert over. Her skal modellen imidlertid utvides til å inneholde fossilt brennstoff, klima og klimamodifisering. I denne modellen kan en i hver periode fordele periodens produksjon på konsum, klimamodifisering og investeringer i kapital. En kan også velge hvor mye karbon en vil bruke i produksjon i hver periode. Gevinsten av å bruke fossilt brennstoff i produksjonen er at denne øker; kostnaden materialiserer seg i fremtiden som produksjonsødeleggende klimaendringer. Klimamodifisering kan redusere dagens klimaskader, mens kostnaden kommer i form av ressursbruk, også i dag.

Som i forrige seksjon skal samfunnets velferd gis som

$$W = \sum_{t=0}^T \beta^t u_t(C_t) \quad (3.7)$$

Denne har også de samme egenskapene som før.

Produksjonen utvides til

$$Q_t = f_t(K_t, R_t, g(M_t, h(G_t))) \quad (3.8)$$

der fotskriften defineres tilsvarende som i modellen i forrige seksjon: $f_t(\cdot) \equiv f(\cdot, L_t)$. $f(\cdot, L_t)$ vokser konkavt i kapital, arbeid og bruk av fossilt brennstoff, R_t , mens den avtar i

¹I DICE er $\rho = 0,015$.

$g(\cdot)$, som er klimaskadefunksjonen. $g(\cdot)$ stiger igjen i karbonkonsentrasjonen i atmosfæren, M_t , mens den avtar i $h(G_t)$. Sistnevnte er en stigende funksjon av mengden svovel i stratosfæren, G_t . G_t har altså en positiv effekt på produksjon.

Utviklingen i den atmosfæriske konsentrasjonen av karbon skrives som

$$M_{t+1} - M_t = R_t - aM_t \quad (3.9)$$

der $a \in [0, 1]$ er den andelen av karbon som i en periode overføres fra atmosfæren til alternative karbonlagre². Vi lar $M_0 = \overline{M}_0$ være gitt og M_{T+1} være fri.

Det er en begrenset mengde fossilt brennstoff tilgjengelig i bakken. Denne ressursen måles i karbonenheter. Ved begynnelsen av modellens løpetid er det $S_0 = \overline{S}_0$ tonn karbon tilgjengelig for utnyttelse i produksjon. Utviklingen i karbonreservene gis som

$$S_{t+1} - S_t = -R_t \quad (3.10)$$

der $S_{T+1} \geq 0$.

Kapitalen utvikler seg tilsvarende som i forrige modell, men nå med klimamodifisering, G_t , og den nye produktfunksjonen (3.8). G_t måles altså i produksjonsenheter.

$$K_{t+1} - K_t = f_t(K_t, R_t, g(M_t, h(G_t))) - C_t - G_t \quad (3.11)$$

Nå er det mulig å fordele ressursene sine ikke bare på konsum og investeringer, men også på klimamodifisering. Gevinsten ved bruk av klimamodifisering er gitt i (3.8) som skadereduksjon, mens kostnaden, i form av forgåtte investeringer, kommer frem i ligningen for kapitalutvikling.

Det kan være ønskelig å legge en begrensing på hvor mye svovel som totalt kan sprøytes ut i stratosfæren. Vi lar da tilgjengelige svovelressurser ved modellens begynnelse være $Z_0 = \overline{Z}_0$. Utviklingen i denne beholdningen gis som

$$Z_{t+1} - Z_t = -G_t \quad (3.12)$$

der vi krever at $Z_{T+1} \geq 0$.

²Karbon sirkulerer mellom de ulike karbonlagrene. I DICE '07 opereres det med tre lagre: Atmosfæren, og øvre og nedre del av hav.

Igjen skal modellen løses ved Lagranges metode. Lagrangefunksjonen blir nå

$$\begin{aligned}
 \mathbb{L} = & \sum_{t=0}^T \beta^t u_t(C_t) \\
 & - \sum_{t=0}^T [\lambda_t(K_{t+1} - K_t - f_t(K_t, R_t, g(M_t, h(G_t)))) + C_t + G_t] \\
 & \quad - \tilde{\lambda}_0(K_0 - \bar{K}_0) - \tilde{\lambda}_{T+1}(K_{T+1} - \bar{K}_{T+1}) \\
 & - \sum_{t=0}^T [\phi_t(M_{t+1} - M_t - R_t + aM_t)] - \tilde{\phi}_0(M_0 - \bar{M}_0) \\
 & - \sum_{t=0}^T [\eta_t(S_{t+1} - S_t + R_t)] - \tilde{\eta}_0(S_0 - \bar{S}_0) + \tilde{\eta}_{T+1}S_{T+1} \\
 & - \sum_{t=0}^T [\omega_t(Z_{t+1} - Z_t + G_t)] - \tilde{\omega}_0(Z_0 - \bar{Z}_0) + \tilde{\omega}_{T+1}Z_{T+1}
 \end{aligned}$$

der ϕ , η , φ , ω og λ er skyggepriser for variablene hvis bibetingelser de tilhører. De nødvendige betingelsene for optimum er

$$\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial C_t} = 0 = \beta^t u'_t(C_t) - \lambda_t, \quad \text{for } t \in [0, T] \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial R_t} = 0 = \lambda_t Q_{R,t} + \phi_t - \eta_t, \quad \text{for } t \in [0, T] \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial G_t} = 0 = \lambda_t (Q_{G,t} - 1) - \omega_t, \quad \text{for } t \in [0, T] \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial K_t} = 0 = -\lambda_{t-1} + \lambda_t (1 + Q_{K,t}), \quad \text{for } t \in [1, T] \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial M_t} = 0 = \lambda_t Q_{M,t} - \phi_{t-1} + (1 - a)\phi_t, \quad \text{for } t \in [1, T + 1] \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial S_t} = 0 = -\eta_{t-1} + \eta_t, \quad \text{for } t \in [1, T] \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial Z_t} = 0 = -\omega_{t-1} + \omega_t, \quad \text{for } t \in [1, T] \quad (3.19)$$

der $Q_{G,t} \equiv \frac{\partial f_t(\cdot)}{\partial g(\cdot)} \frac{\partial g(\cdot)}{\partial h(\cdot)} \frac{dh(\cdot)}{dG_t}$, $Q_{M,t} \equiv \frac{\partial f_t(\cdot)}{\partial g(\cdot)} \frac{\partial g(\cdot)}{\partial h(\cdot)} \frac{dh(\cdot)}{dM_t}$, $Q_{K,t} \equiv \frac{\partial f_t(\cdot)}{\partial K_t}$ og $Q_{R,t} \equiv \frac{\partial f_t(\cdot)}{\partial R_t}$. I tillegg må vi ha $\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial K_0} = 0 = \lambda_0(1 + \frac{\partial f_0(\cdot)}{\partial K_0})|_{K_0=\bar{K}_0} - \tilde{\lambda}_0$, $\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial K_{T+1}} = 0 = -\lambda_T - \tilde{\lambda}_{T+1}$, $\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial M_0} = 0 = \lambda_0(1 + \frac{\partial f_0(\cdot)}{\partial h(\cdot)} \frac{\partial h(\cdot)}{\partial g(\cdot)} \frac{\partial g(\cdot)}{M_0})|_{M_0=\bar{M}_0} - \tilde{\phi}_0$, $\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial S_0} = 0 = \eta_0 - \tilde{\eta}_0$, $\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial S_{T+1}} = 0 = -\eta_T + \tilde{\eta}_{T+1}$, $\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial Z_0} = 0 = \omega_0 - \tilde{\omega}_0$, $\frac{\partial \mathbb{L}}{\partial Z_{T+1}} = 0 = -\omega_T + \tilde{\omega}_{T+1}$ og at skyggeprisene i hver periode er lik null dersom ikke bibetingelsene de tilhører holder med likhet.

Fra (3.13) får vi, som i forrige seksjon, at nåverdien av siste enhet av ressursene brukt på konsum og investering skal være lik:

$$\beta^t u'_t(C_t) = \lambda_t \quad (3.20)$$

(3.14) kan skrives om til

$$\lambda_t Q_{R,t} = \eta_t - \phi_t \quad (3.21)$$

Høyresiden i dette uttrykket består av to elementer: η_t og ϕ_t . η_t er nytten av å kunne øke gjenstående reserver av karbon med en enhet. Dette vil være den prisen på karbon som oppstår fordi, eller dersom, karbon er en begrenset ressurs. η_t kalles normalt Hotellingrenten. ϕ_t er nyttetapet av å øke karbonkonsentrasjonen i atmosfæren med en enhet. Minustegnet foran bidrar dermed til at denne legges til som et positivt ledd på høyresiden. Denne kan ses på som enten prisen på utslipp i et kvotemarkedregime, eller som en Pigouskatt på utslipp i et skatteregime. Tilsammen utgjør høyresiden *den sosiale kostnaden av karbon* (SKK).

Venstresiden i (3.21) består av nyttegevinsten av å øke utslippene i form av økt produksjon. (3.21) sier altså at gevinsten ved å slippe ut et ekstra tonn karbon i optimum skal være lik den totale kostnaden som består av ressursprisen η_t og miljøskaden ϕ_t .

Anta at utslipp ikke fører til klimaskader. I såfall vil ikke R_t påvirke produksjonen negativt, og $\phi_t = 0$. Vi ser da at kostnaden ved å slippe ut en enhet karbon er lik Hotellingrenten. Innføring av klimaskader i en vekstmodell med ikke-fornybare ressurser fører altså til at SKK og Hotellingrenten justeres: Skadene fører til at kostnadene øker direkte, her gitt ved ϕ_t , og det vil være optimalt å redusere utslippene. Når det blir optimalt å slippe ut mindre karbon, vil også verdien av karbonreservene falle, og Hotellingrenten blir mindre. Dersom det viser seg å være optimalt å bruke mindre karbon enn det som er tilgjengelig, vil Hotellingrenten være null.

Skriver vi om (3.15) får vi at

$$\lambda_t Q_{G,t} = \lambda_t + \omega_t \quad (3.22)$$

Venstresiden gir gevinsten ved bruk av klimamodifisering i form av økt produksjon, mens høyresiden gir kostnaden i form av forgåtte investeringer, ved λ_t , og en justering for begrensingen som er lagt på klimamodifisering, ved ω_t . Dersom begrensingen på klimamodifisering ikke binder, vil $\omega_t = 0$ og gevinsten av siste enhet brukt til klimamodifisering er lik kostnaden. Dersom den binder, vil $\omega_t > 0$ slik at gevinsten er større enn kostnaden. En kan tenke på ω_t som en hypotetisk pris på svovel, tilsvarende prisen η_t på karbon. Grensen som legges på svovel er imidlertid en selvpålagt grense, og ikke en grense som oppstår fordi svovel er en begrenset ressurs. Det vil altså ikke oppstå noe marked der prisen, ω_t , kan manifestere seg.

Vi kan eventuelt kombinere (3.22) med (3.13) og få $\lambda_t Q_{G,t} = \beta^t u'_t(C_t) + \omega_t$. Denne viser i prinsippet det samme som (3.22), men klargjør at det ikke trenger å være investeringer som forgår, men også konsum. En kunne eventuelt redusert utslippene i stedet. I optimum skal alle disse marginalverdidibetraktningene oppfylles samtidig.

Avkastningen til kapital er i modellen lik renten: $Q_{K,t} \equiv r_t$. Fra (3.16) får vi da at

$$\lambda_{t-1} = \lambda_t(1 + r_t) \quad (3.23)$$

(3.23) sier at verdien av å implementere kapital faller med renten i fra en periode til neste. Årsaken er at kapitalen som ble implementert i periode $t - 1$ gir avkastning i en periode mer enn kapitalen som implementeres i periode t .

Fra (3.17) får vi at

$$\phi_{t-1} = \lambda_t Q_{M,t} + (1 - a)\phi_t \quad (3.24)$$

(3.24) gir forholdet mellom nåverdien av miljøskader i to følgende perioder. Dersom en øker konsentrasjonen av karbon i periode $t - 1$ fører dette til skader pålydende ϕ_{t-1} i nytteenheter. Relativt til ϕ_t påfører ϕ_{t-1} miljøet skader i en ekstra periode, som viser seg ved leddet $\lambda_t Q_{M,t}$ på høyresiden i (3.24). Noe av karbonen som ble sluppet ut i atmosfæren i periode $t - 1$ lekker imidlertid over i andre karbonlagre, slik at disse utslippene ikke volder like mye skade i periode t som utslippene fra periode t gjør; dette representeres med leddet $(1 - a)\phi_t$ på høyresiden av (3.24).

Til slutt har vi at (3.18) gir oss at

$$\eta_{t-1} = \eta_t \quad (3.25)$$

(3.25) gir oss at nåverdien av Hotellingrenten skal være konstant. Dette betyr at for å oppnå samme nåverdi, må η_t ha blitt tilbakeskrevet en gang mer enn η_{t-1} og dermed ha vært større i utgangspunktet. I løpende verdier vil altså Hotellingrenten vokse med den sosiale tidspreferanseraten, ρ . Denne sammenhengen kalles Hotellings regel.

Betingelsen 3.19 gir utviklingen i den hypotetiske prisen på svovel. Denne følger også Hotellings regel, men har ingen god tolkning da prisen ikke vil manifestere seg i et marked.

Kapittel 4

DICE-2007

Som modellen i kapittel 3.2, er DICE en økonomisk vekstmodell med en integrert klimadel. De økonomiske sektorene i modellen består i hovedsak av et representativt individ som maksimerer sin nytte over en gitt periode og en produksjonssektor. Klimadelen består av geofysiske sammenhenger, som bruk av en ikke-fornybar ressurs i produksjon og skadene denne medfører i senere perioder.

En forskjell mellom DICE og modellen i kapittel 3.2, er at DICE inneholder mer detaljerte beskrivelser av både de økonomiske og spesielt de geofysiske sammenhengene. Alle funksjonsformene er også spesifisert. I den følgende gjennomgangen av DICE skal disse sammenhengene gjennomgås i detalj.

Parameterverdier og funksjonsformer i DICE er hentet fra den nyeste forskning innen relevante fagfelt, og representerer så nøyaktig som mulig virkelige sammenhenger og reelle verdier.

I forhold til Nordhaus' opprinnelige DICE, er den versjonen som nå skal presenteres endret, slik at også klimamodifisering inngår i modellen. Implementeringen av klimamodifisering skal behandles for seg i slutten av dette kapittelet.

4.1 Økonomiske sammenhenger

Her beskrives den økonomiske sektoren i DICE.

Velferd

W er verdens – representert ved et 'gjennomsnitt्सindivid' – velferdsfunksjon, målt i nytteenheter. Denne består av en øyeblikkelig nyttefunksjon, $\frac{(C_t/L_t)^{1-\alpha}}{1-\alpha}$, hvis elasticitet av marginalnytte er konstant lik α , individene, L_t , som alle antas å være i arbeid og en sosial diskonteringsfaktor $\beta^t \equiv \frac{1}{1+\rho}$, der ρ er den sosiale tidspreferanseraten. Konsumet,

C_t , omfatter alle varer og tjenester.

$$W = \sum_{t=1}^T \beta^t L_t \frac{(C_t/L_t)^{1-\alpha}}{1-\alpha} \quad (4.1)$$

Den sosiale tidspreferanseraten angir hvilken vekt vi legger på nålevende sammenlignet med fremtidige generasjoner. Dersom denne er null er alle generasjoner vektet likt, og jo høyere den er, jo lavere relativ vekt får fremtidige generasjoner. Velferden er alle menneskers nytte summert over alle gjeldende perioder.

Produksjon

Produksjonen, Q_t , er av typen Cobb-Douglas, måles i penger (tusen milliarder amerikanske 2005-dollar) og består av teknologi; A_t , kapital; K_t , arbeid; L_t , rensekostnader; Λ_t , og kostnader ved skadevirkninger av klimaendringer; Ω_t . γ er produksjonens elastisitet med hensyn på kapital, altså er $\frac{\partial Q_t}{\partial K_t} \frac{K_t}{Q_t} = \gamma$.

$$Q_t = \Omega_t(1 - \Lambda_t)A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma} \quad (4.2)$$

Skadevirkninger av klimaendringer kan være endringer i forutsetninger for jordbruk, forverret helse og høyere havnivå. Q_t – slik den er oppgitt her – er nettoproduksjon: bruttoproduksjon kontrollert for skader og rensekostnader. Her er skadene forbundet med utslipp implementert på en annen måte enn i modellen i kapittel 3.2. I sistnevnte modell er bruk av fossilt brennstoff, gitt ved R_t , implementert som en innsatsfaktor. Denne bidro til økt produksjon i dag, samtidig som den, gjennom å øke konsentrasjonen av karbon i atmosfæren, bidro negativt til fremtidig produksjon. I DICE fører økt produksjon direkte til økte utslipp, uten fossilt brennstoff som innsatsfaktor. Kausaliteten i dette forholdet er imidlertid ikke avgjørende. Vi må kreve at produksjon og utslipp har en positiv samvariasjon, men det er også tilstrekkelig.

Kapital

Utviklingen til kapitalstokken gis ved det som er igjen av produksjonen etter at ressurser har blitt brukt på konsum og klimamodifisering. I tillegg trekkes kapitalens depresieringsrate, δ , fra. Vi har altså at

$$K_{t+1} - K_t = Q_t - C_t - G_t - \delta K_t \quad (4.3)$$

Størrelsene som inngår måles i tusen milliarder amerikanske 2005-dollar. Denne sammenhengen er som i (3.11), men her er det også tatt hensyn til depresiering.

Kostnader ved utslippsreduksjon

Kostnadene ved utslippsreduksjon, Λ_t , er proporsjonal med verdens produksjon. To begreper må avklares med en gang: Et *kontrollregime* kan ses på som en avtale der partene som er med underlegger sine utslipp for kontroll, og må godta regimets utslippsreduksjoner. Kyotoavtalen er et eksempel på et slikt regime. *Backstoppteknologien* beskriver i hvilken grad vi er i stand til å erstatte energi fra bruk av fossile brennstoff med en eller annen form for ren energi, for eksempel solenergi. Fra starten av modellens løpetid er det mulig å erstatte all energi med ren energi, men kostnaden er i starten svært høy; denne avtar i løpet av modellens løpetid. φ_t er andelen av verdens utslipp som er underlagt kontrollregimet, mens $\theta_2 > 1$ er en parameter. For å redusere skadene på klima kan en redusere produksjonen med en viss andel; denne andelen gis ved μ_t . $c_{1,t}$ justerer ned kostnadene ved utslippsreduksjon over tid, gjennom at backstoppteknologien blir billigere og at karbonet utnyttes mer og mer effektivt i produksjon. Vi har da at

$$\Lambda_t = A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma} c_{1,t} \varphi_t^{1-\theta_2} \mu_t^{\theta_2} \quad (4.4)$$

Da $\theta_2 > 1$ har vi at kostnadene ved utslippsreduksjon stiger i reduksjonen av utslipp og faller i deltagelsen.

I modellen i kapittel 3.2 ble kostnaden ved utslippsreduksjon gitt implisitt: En kunne la være å bruke av det fossile brennstoffet med den konsekvensen at produksjonen ble lavere enn den ellers ville vært. Selv om kostnaden er gitt eksplisitt her ser vi fra (4.2) at da kostnadene trekkes fra i produksjonsfunksjonen, blir effekten kvalitativt lik i de to modellene.

Karbonskatt

I optimum skal alle marginale kostnader være lik sine respektive marginale gevinster og gevinsten av å bruke en ressurs skal på marginen være lik i alle anvendelser. I et kvotemarket skal for eksempel prisen på en kvote være lik bedriftenes marginale kostnad ved å redusere sine utslipp. Dersom det ikke er et kvoteregime som råder, men det legges en optimal Pigouskatt på utslipp, skal den samme marginalkostnaden i optimum være lik denne skatten. Vi finner da den optimale skattesatsen, eller kvoteprisen, ved å derivere (4.4) med hensyn på reduksjonsandelen μ_t , som gir $\theta_2 A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma} c_{1,t} \varphi_t^{1-\theta_2} \mu_t^{\theta_2-1}$. For å få skatten per tonn karbon må vi dele svaret på $A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma} \varphi_t^{1-\theta_2} \sigma_t$, der σ_t er karbonets effektivitet i produksjon. Karbonskatten blir da

$$T_t = \frac{\theta_2 c_{1,t} \mu_t^{\theta_2-1}}{\sigma_t} \quad (4.5)$$

Vi ser at denne øker i blant annet utslippsreduksjonsandelen, μ_t .

4.2 Geofysiske sammenhenger

Dette er sammenhenger som beskriver hvordan modellens miljøvariabler forholder seg til hverandre.

Utslipp

E_t^{Ind} er ukontrollerte, industrielle utslipp av karbon, målt i tonn. Disse består av σ_t , som er karbonets effektivitet i produksjon; hvor mye karbon som slippes ut per enhet produsert, $A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma}$ er selve produksjonen og μ_t er andelen av potensielle utslipp, $\sigma_t A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma}$, som ikke slippes ut.

$$E_t^{Ind} = \sigma_t(1 - \mu_t)A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma} \quad (4.6)$$

I kapittel 3.2 fremgår utslipp som en kontrollvariabel som kan skrus opp for å øke produksjonen, samtidig som den vil føre til klimaskader senere. I DICE går kausaliteten motsatt vei; økt produksjon fører til økte utslipp. Kausaliteten er imidlertid ikke avgjørende da avveiningen blir den samme: produksjon i dag versus produksjon i fremtiden.

Modellen inkluderer også utslipp fra andre kilder enn utslipp av karbon, men dette er gitt eksogent som E_t^{Ex} . Totalt utslipp, E_t , blir da

$$E_t = E_t^{Ind} + E_t^{Ex} \quad (4.7)$$

På grunn av en begrensning lagt på mengden tilgjengelig fossilt brennstoff er også utslippene begrenset. Summen av E_t over modellens løpetid skal ikke overstige seks tusen gigatonn (Gt) karbon.

Karbonlagre

DICE skiller mellom tre karbonlagre. Følgende ligninger gir mengden karbon i disse lagerene, i henholdsvis atmosfæren og øvre og nedre del av havene, ved tid t .

$$M_t^{Atm} = \phi_{11}M_{t-1}^{Atm} + \phi_{21}M_{t-1}^{Up} + E_t \quad (4.8)$$

$$M_t^{Up} = \phi_{12}M_{t-1}^{Atm} + \phi_{22}M_{t-1}^{Up} + \phi_{32}M_{t-1}^{Lo} \quad (4.9)$$

$$M_t^{Lo} = \phi_{23}M_{t-1}^{Up} + \phi_{33}M_{t-1}^{Lo} \quad (4.10)$$

ϕ_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$ er parametre som gir lekkasjen mellom de ulike lagrene i hver periode.

Stråling

F_t gir strålingsbalansen i atmosfæren. Tall for strålingen er relativ til 1900, som skal refereres til som førindustrielt nivå, da denne per konstruksjon var lik null: $F_{1900} = 0$. Strålingen øker som en logaritmisk funksjon av forholdet mellom gjennomsnittlig konsen-

trasjon av karbon i atmosfæren i periode t (M_t^{Atm}) og år 1750 (M_{1750}^{Atm}). Den øker også som en lineær funksjon av eksogene kilder til stråling, F_t^{Ex} , men faller i ψG_t . ψ gir virkningen på strålingsbalansen av utsprøyting av ett terragram (Tg) svovel i stratosfæren, mens G_t er antall Tg som sprøytes ut. η er en parameter.

$$F_t = \eta \log \left(\frac{M_t^{Atm}}{M_{1750}^{Atm}} \right) + F_t^{Ex} - \psi G_t \quad (4.11)$$

Strålingen måles i watt per kvadratmeter (Wm^{-2}).

Temperatur

Temperaturen i atmosfæren er det som i økonometrien kalles en tidsforsinket, eller 'lagget', variabel: Den utvikler seg fra sin egen verdi i perioden før. Den mister temperatur til et kaldere hav, eller motsatt: blir varmere dersom havet er varrest. Temperaturen øker også i strålingsbalansen, F_t .

$$T_t^{Atm} = T_{t-1}^{Atm} + \xi_1 (F_t - \xi_2 T_{t-1}^{Atm} - \xi_3 (T_{t-1}^{Atm} - T_{t-1}^{Lo})) \quad (4.12)$$

ξ_i , $i = 1, 2, 3$ er parametre som bestemmer størrelsen på varmeutviklingen i hver periode. Temperaturen måles i $^{\circ}C$ relativt til førindustrielt nivå.

Skade

Variabelen Ω_t gir klimaskadene bidrag til reduksjon, ved skalering (se ligning (4.2)), av bruttoproduksjonen. T_t^{Atm} er temperaturen i atmosfæren på tid t , mens π_1 og π_2 er skadeparametre, $\pi_1, \pi_2 \geq 0$. Vi har at

$$\Omega_t = \frac{1}{1 + \pi_1 T_t^{Atm} + \pi_2 (T_t^{Atm})^2} \quad (4.13)$$

Vi ser at Ω_t faller konvekst i temperaturen i atmosfæren: Den marginale klimaskaden er tiltakende i temperaturen.

I kapittel 3.2 inngikk skadene i produksjonsligningen (3.8) som funksjonen $g(M_t, h(G_t))$, der M_t var karbonkonsentrasjonen i atmosfæren. Fra ligningene for karbonkonsentrasjon, stråling og temperatur – ligningene (4.8), (4.11) og (4.12) – ser vi at en økning i førstnevnte – karbonkonsentrasjonen – virker gjennom de påfølgende sammenhenger – stråling og temperatur – for å til slutt føre til økte skader. $g(\cdot)$, fra kapittel 3.2, er altså en forenklet versjon av veien fra karbonkonsentrasjon til skade relativt til beskrivelsen i dette kapitlet; her inkluderes alle de nevnte sammenhengene eksplisitt. I kapittel 3.2 inngår klimamodifisering, G_t , også i $g(\cdot)$ gjennom $h(\cdot)$, mens den i DICE er plassert i ligningen for stråling. Siden klimamodifisering i realiteten bidrar til redusert stråling faller dette naturlig.

Skadene gis også målt i tusen milliarder amerikanske 2005-dollar:

$$D_t = (1 - \Omega_t) A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma} \quad (4.14)$$

D_t er klimaskadenes bidrag til reduksjon av bruttoproduksjonen.

4.3 Avveininger i modellen

Som i vanlige vekstmodeller er også her målet å maksimere velferd ved å finne et optimalt konsummønster. Det optimale konsummønsteret avhenger av hvor mye karbon vi bruker, hvor mye av tilgjengelige ressurser vi bruker til investering, osv. En *ceteris paribus*-gjennomgang av modellens kontrollvariabler følger:

Investering

Å øke investeringene i kapital krever at vi bruker ressurser i dag som kunne vært brukt til for eksempel konsum, men til gjengjeld øker produksjonsmulighetene i fremtiden.

Utslippsreduksjon

En utslippsreduksjon i DICE-rammeverket oppnås ved å redusere produksjonen. Kostnaden ved å redusere utslippene i dag er at en får færre ressurser som kan brukes til for eksempel konsum, mens fordelene er at fremtidig produksjon vil bli mindre skadenlidende enn ellers.

Klimamodifisering

Gevinsten ved bruk av klimamodifisering er at en raskt kan få ned temperaturen i atmosfæren og dermed begrense skadene som ellers ville redusert dagens produksjon. Kostnaden ved klimamodifisering er at den legger beslag på ressurser som kunne vært anvendt til andre formål. En forskjell fra de to foregående punktene – investering og utslippsreduksjon – er at gevinsten ved klimamodifisering tas ut samtidig som kostnaden løper, heller enn i fremtiden.

4.4 Implementering av klimamodifisering i DICE

Nordhaus (2008) beskriver et scenario som har navnet klimamodifisering (geoengineering). Definisjonen av klimamodifisering gitt i denne oppgaven stemmer imidlertid ikke overens med innholdet i dette scenariet. I Nordhaus' versjon av klimamodifisering senkes kostnaden for backstopteknologien raskt, noe som innebærer at renskostnaden blir svært lav. Et slikt scenario vil kunne vurdere effekten av en revolusjon innen alternativ energi, som atomkraft, solenergi eller fusjon, hvorav ingen passer inn i denne oppgavens definisjon

av klimamodifisering.

Ved implementering av en ny ligning i modellen er det tre ting en må vurdere: hvor i modellen ligningen skal inngå, hvilken funksjonsform den skal ha og verdien av dens parametre.

Plassering

Plasseringen av leddet ψG_t , der ψ er effekten ett tonn svovel, G_t , har på strålingsbalansen, i ligningen for stråling – ligning (4.11) – skyldes at dette er den mest realistiske måten å beskrive fenomenet klimamodifisering på: Siden klimamodifisering – slik det er definert her – består i å hindre solstråling å entre atmosfæren, der den ville ført til økt stråling, er det naturlig å plassere denne der den faktisk reduserer strålingen. Når en skal finne effekten av klimamodifisering er det dessuten gjerne effekten på stråling som oppgis i litteraturen.

Kostnaden ved utsprøyting av svovel i stratosfæren, G_t , er plassert som et negativt ledd i ligningen for kapital, ligning (4.3). Dette virker rimelig da andre kostnader – konsum og depresiering – også inngår der.

I programmeringen av DICE gis kostnaden som $SPrice \times G_t$, der $SPrice$ er kostnaden ved utplassering av ett tonn svovel i stratosfæren; i fremstillingen i dette kapitlet er $SPrice$ for enkelhets skyld normalisert til én.

Funksjonsform

I 1991 hadde vulkanen Mount Pinatubo utbrudd. Denne sprøytet øyeblikkelig ut ti teragram svovel i stratosfæren (Bluth m.fl., 1992, sitert av Crutzen, 2006). Disse ti Tg ble til seks etter et halvt år. Sistnevnte seks Tg svovel førte til en reduksjon i strålingsbalansen på $4,5 W m^{-2}$ (Hansen m.fl., 1992, sitert av Crutzen, 2006). Crutzen (2006) skriver om dette, at en linearisering basert på Hansens tall gir oss at ett Tg svovel fører til en strålingsreduksjon på $0,75 W m^{-2}$. Han argumenterer ikke for hvorvidt en linearisering er fornuftig, men den lineære sammenhengen skal likevel antas i denne oppgaven, da det ikke foreligger en spesifisert sammenheng av en annen type.

Om langvarig bruk av svovel i stratosfæren kan endre på svovelens effektivitet over tid, for eksempel gjennom kjemiske endringer i stratosfæren, vites ikke. En årsak til denne manglende kunnskapen kan skyldes at svovelet fra vulkanutbrudd av naturlige årsaker ikke forblir i atmosfæren lenge nok. I denne sammenheng er det relevant å nevne at 'grunnkonsentrasjonen' av svovel i stratosfæren, altså konsentrasjonen uten påvirkning fra vulkanutbrudd og andre midlertidige kilder, er omtrent 0,25 Tg (Marsh, Wurl og Grainger; 2004). Ved bruk av klimamodifisering vil dette tallet være betraktelig høyere, i størrelsesorden 1-5 Tg, over lengre tid.

En skulle tro at svovelens effekt på strålingsbalansen var avhengig av konsentrasjonen av karbon i atmosfæren: Svovelet reflekterer sollys som ellers ville blitt absorbert i

atmosfæren. Dersom det er en høy konsentrasjon av klimagasser i atmosfæren, burde en større del av lyspartiklene – som ved bruk av klimamodifisering reflekteres før de kan bidra til oppvarming – kollidere i atmosfæren og med det føre til, på marginen, en høyere temperaturøkning enn ved en lavere konsentrasjon. Med andre ord: Effekten på strålingen av ett ekstra tonn svovel synes rimelig å være større, jo høyere karbonkonsentrasjon. En slik eventuell effekt sees imidlertid bort fra i denne oppgaven.

Parameterestimater

ψ er svovelens estimerte effekt på strålingsbalansen i atmosfæren. I kodingen av DICE i GAMS (General Algebraic Modeling System) er denne gitt som *EffS*, og er effekten av ett Tg svovel på strålingsbalansen i atmosfæren. Det er flere estimater av denne. Disse varierer fra Crutzens (2006) estimat på $0,75 \text{ Wm}^{-2}$ som jeg nevnte over, til effekter på $2,5 \text{ Wm}^{-2}$ (Rasch, Crutzen og Coleman, 2008). I resultatdelen av denne oppgaven vil gjennomsnittet av disse estimatene brukes, altså $\psi = 1,67 \text{ Wm}^{-2}$, fulgt av en sensitivitetssanalyse for å se om avvik har alvorlige konsekvenser for resultatene. Klimamodifisering er en positiv variabel; en negativ verdi ville i modellen betydd at en hadde kunnet øke produksjonen ved å fjerne svovel fra stratosfæren; dette er selvsagt helt urealistisk.

Prisen for klimamodifisering er i presentasjonen av DICE normalisert vekk ved å endre på verdien til ψ . I Kodingen av DICE kalles prisen *SPrice*. Crutzen bruker et kostnadsestimat på 25 milliarder dollar per Tg svovel som plasseres i stratosfæren. En periode i DICE representerer ti virkelige år, så det er for hvert tiende år kostnaden telles. I virkeligheten vil det imidlertid sprøytes ut svovel hvert år, så prisen i programmeringen av DICE multipliseres med ti der denne inngår. Robock m.fl. (2009) har estimert kostnaden av ulike metoder for å frakte svovelen ut i atmosfæren, som vist i tabellen under. Disse kostnadene varierer fra 225 millioner til 30 milliarder amerikanske 2007-dollar. I resultatdelen i denne oppgaven settes *SPrice* til 30 milliarder. Begrunnelsen for å bruke det høyeste estimatet fra Robock m.fl., er at kostnaden i alle tilfeller er så lav at den uansett ikke være en viktig begrensende faktor hva kostnadseffektivitet angår. Å bruke det høyeste estimatet sannsynliggjør i tillegg at kostnaden i hvertfall ikke blir undervurdert. Det vil også bli foretatt en sensitivitetsanalyse for å se på effekten av å endre denne prisen.

Tabell 4.1: Kostnad for ulike metoder for å utplassere ett Terragram (Tg) svovel i stratosfæren, målt i millioner amerikanske 2007-dollar. F-15C, KC-135 og KC-10 er ulike typer fly.

| Metode | F-15C | KC-135 | KC-10 | Artillerikanoner | Ballonger |
|---------|-------|--------|-------|------------------|-------------|
| Kostnad | 4175 | 375 | 225 | 30000 | 21000-30000 |

Kapittel 5

Resultater

Resultatene fra en kjøring av DICE-2007 i GAMS skal tolkes med forsiktighet, da verdien til parametrene i DICE er gjennomsnittet til estimerte verdier. Variasjonen som følger med estimeringen ses bort fra ved kjøring av DICE. Først presenteres imidlertid scenariene som brukes i denne oppgaven. Til slutt i kapitlet presenteres en sensitivitetsanalyse for effekten av og prisen på utplassering av svovel i stratosfæren.

5.1 Scenariebeskrivelse

Scenariene i DICE, som brukes i denne oppgaven skiller seg fra hverandre ved hvilke tiltak – klimamodifisering og utslippsreduksjon – som kan brukes på hvilke tidspunkt. Tabell 5.1 viser kombinasjonene for alle scenariene.

Tabell 5.1: Angir om utslippsreduksjon og klimamodifisering anvendes for gitte perioder. *I disse scenariene er mengden svovel som kan anvendes begrenset. Dette kan føre til at klimamodifisering ikke brukes i enkelte av periodene der svovel står som tilgjengelig.

| Scenario | Periode | | | |
|-------------------------|--------------|--------|--------------|--------|
| | 2005-2245 | | 2255→ | |
| | Utslippsred. | Svovel | Utslippsred. | Svovel |
| Business as usual (BAU) | Nei | Nei | Ja | Nei |
| Utslippskonroll (UtK) | Ja | Nei | Ja | Nei |
| Først-best | Ja | Ja | Ja | Ja |
| Geoengineering | Nei | Ja | Ja | Ja |
| UtK m/begr svovel* | Ja | Ja | Ja | Ja |
| BAU m/begr svovel* | Nei | Ja | Ja | Ja |

Business as usual

Business as usual (BAU)-scenariet skal representere en verden der utslipp fører til skader, men der det ikke blir gjort noe for å bøte på disse. Dette blir gjort ved å først sette skadeparametrene i modellen lik null, før den optimeres på vanlig måte. Når skadeparametrene settes lik null vil ikke lenger økonomien ta skade av klimaendringer, så vi kan se bort

i fra miljøskader når kontrollvariablene – utslipp og investering – bestemmes. En lagrer så utslipps- og investeringstall fra denne kjøringen¹. Disse tallene påføres så økonomien i BAU-scenariet i de første 250 årene, med den forskjellen at økonomien nå tar skade av klimaendringene disse utslippene medfører. Etter de første 250 årene har passert antas verden å 'våkne opp' og utslippsreduksjon blir tilgjengelig som virkemiddel.

Tallene for utslipp og investering fra metoden som beskrevet over brukes også i scenariene Geoengineering og BAU med begrenset svovel.

Sammenligner vi resultatene fra kjøringer av BAU og Geoengineering får vi effekten av klimamodifisering dersom dette er det eneste virkemiddelet som brukes. Dersom vi sammenligner Først-best med Utslippskontroll får vi effekten av klimamodifisering i tilfellet der det brukes sammen med utslippskontroll. Siden skadene som påføres økonomien stiger konvekst i temperaturen (se (4.14)) vil effekten av klimamodifisering – som reduserer strålingen og dermed temperaturen – være størst der temperaturen er høyest. Da gir førstnevnte sammenligning – av BAU og Geoengineering – et bilde av den øvre grensen for effekten av klimamodifisering. Tilsvarende får vi en nedre grense ved å sammenligne Først-best med Utslippskontroll.

Keith (under publisering) har – på grunn av bieffektene ved klimamodifisering – foreslått å anvende modifisering bare når klimaproblemene er på sitt verste. For å se på effekten av en slik begrenset bruk lages scenariene Utslippskontroll med begrenset bruk av svovel og BAU med begrenset bruk av svovel.

Utslippskontroll med begrenset svovel

I Utslippskontroll (UtK) med begrenset svovel kreves det at den totale mengden svovel som sprøytes ut i atmosfæren ikke overstiger et visst nivå. Den totale mengden bestemmes ved å kalibrere modellen slik at reduksjonen i strålingen ikke på noe tidspunkt overstiger 3 Wm^{-2} relativt til Utslippskontroll². Dette tallet, 3 Wm^{-2} , er anvendt i et scenario for omfattende – der alternativene var lav, medium og omfattende – bruk av klimamodifisering, av Wigley (2006). Total mengde tilgjengelig svovel settes da til 20 Tg. Jmfør diskusjonen om pris i kapittel 4.4 tilsvarer dette reelle svovelutslipp på 200 Tg. Til sammenligning slippes det ut i overkant av 2000 Tg svovel i Først-best i løpet av hele modellens løpetid, hvorav 540 Tg brukes i løpet av de første 200 årene.

Ved å sammenligne Utslippskontroll med begrenset svovel med Utslippskontroll (uten svovel) får vi effekten av en begrenset klimamodifiseringsinnsats relativt til å bare anvende utslippskontroll.

BAU med begrenset svovel

¹Dette avviker fra Nordhaus' (2008) Baselinescenario: I det scenariet fastsettes bare utslippstall. I denne oppgaven fastsettes også tall for investeringer, slik at en ikke skal kunne påvirke utslippene i fremtiden – etter 250 år – ved å endre investeringene i dag.

²Begrensingen som blir brukt fører til en maksimal reduksjon i strålingen på $3,111 \text{ Wm}^{-2}$.

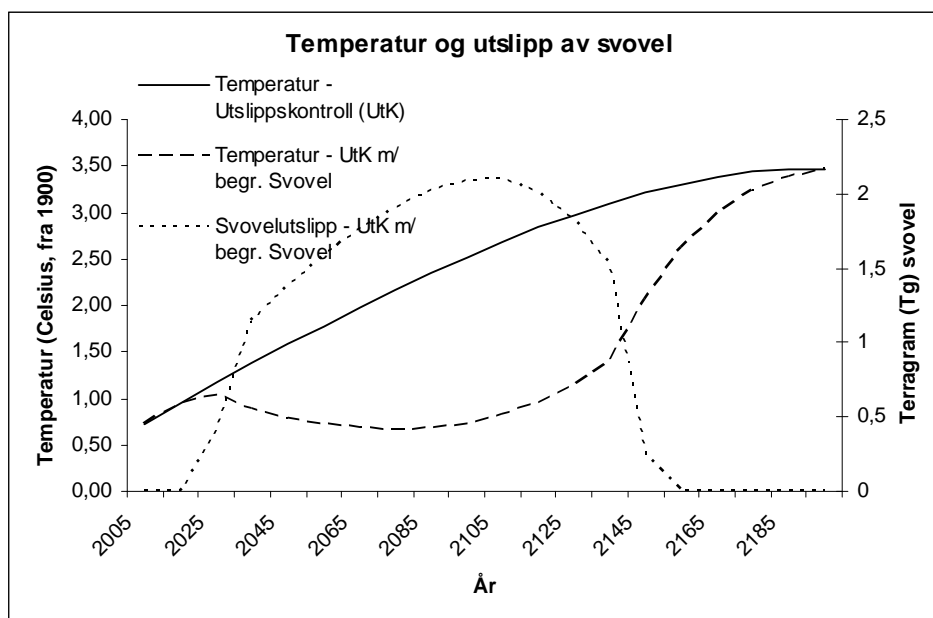
Dette scenariet tilsvarer Utslippskontroll med begrenset svovel, men har ikke utslippskontroll tilgjengelig. Mengden svovel som er tilgjengelig her, er den samme som bestemmes for sistnevnte scenario: 20 Tg. Ved å sammenligne BAU med begrenset svovel med BAU (uten svovel) får vi effekten av en begrenset klimamodifiseringsinnsats relativt til å ikke gjøre noe.

5.2 Geofysiske resultater

Det er, som forventet, optimalt å bruke en kombinasjon av utslippsreduksjoner og klimamodifisering: En kunne tenkt seg at klimamodifisering fjernet behovet for utslippsreduksjoner helt, ved at modifisering på marginen alltid var billigere enn utslippsreduksjoner; dette er altså ikke tilfellet. Reduksjonsraten i Først-best – som vist i figur A.1 i Tillegg A – er positiv, og resultatet over følger.

Innføring av klimamodifisering fører til økt konsentrasjon av karbon i atmosfæren: Ved bruk av klimamodifisering reduseres skaden av hvert tonn utslipp av karbon, så disse utlippene øker. Konsekvensene av en høy karbonkonsentrasjon – pH-nivået i havene vil til skade for økosystemer øke – er omtalt i kapittel 2.3. Dersom det legges en begrensing på utlippene av svovel, reduseres økningen i karbonkonsentrasjonen og problemet med sure hav blir mindre. Karbonkonsentrasjonen for alle scenarier er presentert i figur A.2.

Både temperatur og strålingsbalanse reduseres betraktelig i de periodene der klimamodifisering anvendes. Dette illustreres i tilfellet for temperatur i figur 5.1. Som fig-



Figur 5.1: Temperatur for Utslippskontroll og Utslippskontroll med begrenset svovel, i grader Celcius, relativt til førindustrielt nivå (år 1900) og utslipp av svovel i Tg i Utslippsreduksjon med begrenset svovel.

uren viser er temperaturen noe lavere i UtK med begrenset svovel enn i Utslippskontroll selv etter at bruken av svovel har opphørt. Årsaken er at temperaturen er en såkalt tidsforsinket variabel: den utvikler seg fra sin egen verdi i foregående periode.

EU har en målsetning om å ikke overstige en temperaturstigning på 2°C fra førindustrielt nivå (EU, 2008). Dette målet oppfylles i denne oppgaven bare i Først-best og Geoengineering, altså ved ubegrenset bruk av klimamodifisering. Figurene A.4 og A.5 gir tall for henholdsvis stråling og temperatur for alle scenariene.

I scenariene med en begrenset mengde svovel – BAU med begrenset svovel og Utslippsreduksjon med begrenset svovel – brukes svovelet relativt tidlig: Diskontering av fremtidig nytte taler for å bruke denne tidlig, mens den høyere temperaturen i senere perioder taler for å bruke svovelet sent. Førstnevnte effekt – diskontering av fremtidig nytte – har en relativt stor effekt. Dette kommer frem i figur A.3, som gir utslipp av svovel i scenariene med klimamodifisering.

5.3 Økonomiske resultater

Skadene som oppstår ved klimaendringer, kostnadene ved utslippsreduksjon, karbonskatten og den sosiale kostnaden av karbon faller alle betydelig ved innføring av klimamodifisering.

Gjennomsnittlige klimaskader per person er sammen med tall for reduksjonskostnader, gitt i tabell 5.2.

Tabell 5.2: Gjennomsnittlige klimaskader og reduksjonskostnader, i amerikanske 2005-dollar per person per år, for de første to hundre årene (2005-2195) i alle scenarier.

| Scenario | Klimaskader | Reduksjonskostnader |
|-------------------------|-------------|---------------------|
| Business as usual (BAU) | 1744 | 1 |
| Først-best | 11 | 2 |
| Utslippskontroll (UtK) | 966 | 219 |
| Geoengineering | 11 | 1 |
| UtK m/ begr. svovel | 616 | 185 |
| BAU m/ begr. svovel | 1138 | 1 |

Som vi ser er klimaskadene betraktelig lavere i scenariene med klimamodifisering enn i de uten. Også ved begrenset bruk av svovel er reduksjonen i skader av betydning.

Reduksjonskostnadene, som manifesteres i form av redusert produksjon, er av betydning i Utslippskontroll og Utslippskontroll med begrenset svovel. I de resterende scenariene tas det enten ikke hensyn til klimaendringene, eller en erstatter størsteparten av utslippsreduksjonene med klimamodifisering.

Tall for skader og reduksjonskostnader for de første to hundre årene i modellen er gitt i figurene A.6 og A.7.

I følge IPCC (2007) er et gjennomsnitt av estimer (fagfelleverdert) for den sosiale kostnaden av karbon 43 dollar per tonn. Dette er noe høyere enn resultatene gitt i denne oppgaven og kan tyde på at konsekvensene av utslipp av karbon her er underdrevet. Den sosiale kostnaden av karbon er gitt som summen av skaden et tonn karbon påfører klima og Hotellingrenten. Sistnevnte utgjør, som vi ser av tabell 5.3, en svært liten del av den totale kostnaden:

Tabell 5.3: Hotellingrente, klimaskade og sosial kostnad av karbon for alle scenarier i år 2005. Sistnevnte er lik summen i de to første. Alle tall er i amerikanske 2005-dollar per tonn karbon.

| | Hotellingrente | Klimaskade | Sosial kostnad av karbon |
|-------------------------|----------------|------------|--------------------------|
| Business as usual (BAU) | 0 | 28,154 | 28,154 |
| Utslippskontroll (UtK) | 0 | 27,275 | 27,275 |
| Først-best | 0,014 | 12,701 | 12,715 |
| Geoengineering | 0,017 | 12,560 | 12,577 |
| UtK m/ begr. svovel | 0 | 15,554 | 15,554 |
| BAU m/ begr. svovel | 0 | 16,192 | 16,192 |

Hotellingrenten i BAU og BAU med begrenset svovel er lik null. Dette skyldes at en ikke bruker alt det tilgjengelige fossile brennstoffet i løpet av de 600 årene modellen dekker: Måten utslippsreduksjonene for de første 250 årene ble bestemt for disse scenariene – etter 250 år ble utslippsreduksjoner tilgjengelig – var å sette klimaskadene ved utslipp av karbon lik null og optimere modellen. I denne kjøringen – som ble brukt for å bestemme utslippene i blant annet BAU og BAU med begrenset svovel – ble alt fossilt brennstoff brukt opp, og Hotellingrenten var positiv. En kan derfor argumentere for at Hotellingrenten i BAU og BAU med begrenset svovel bør være positiv. Hotellingrenten vil i såfall representere den prisen man betaler for fossilt brensel før en 'våkner opp' etter 250 år: Før dette tror en jo at alt det fossile brennstoffet skal brukes opp, og en vil betale ressursprisen. Hotellingrenten ville i såfall, for disse scenariene, vært lik 0,017 dollar per tonn karbon.

Karbonskatten faller som sagt betraktelig ved innføring av klimamodifisering. Tall for karbonskatten er gitt i figur A.8. Med en dollarkurs på seks kroner, tilsier resultatene fra Utslippskontroll at optimal bensinavgift uten bruk av klimamodifisering er på ti øre per liter bensin i 2005³. Resultatet fra Utslippskontroll gir den høyeste avgiften av alle resultatene, da de andre scenariene enten kan ta i bruk klimamodifisering, eller de antas å ikke ta grep i forhold til klimaendringene. Den nest-høyeste bensinavgiften gis i Utslippsreduksjon med begrenset svovel, der den er på seks øre per liter; i Først-best er avgiften på fem øre literen.

Velferdseffektene fra modellen skal gis ved å finne forskjellen i *den konstante konsumekvivalenten* (heretter konsumekvivalenten) mellom scenariene. Metoden er foreslått

³Tall brukt til beregning av bensinavgift: En liter bensin slipper ut 2,32 kilo CO_2 . Karbon veier 3,67 ganger så mye som CO_2 .

og brukt av Aaheim, Fugletvedt og Godal (2006). Konsumekvivalenten finnes ved å regne ut det konstante konsumnivået – i denne oppgaven per person – som i hvert scenario ville gitt den samme velferden som faktisk ble realisert. Tall for konsumekvivalenten, i konsum per person, er presentert i tabell 5.4:

Tabell 5.4: Konstant konsumekvivalent i amerikanske 2005-dollar per person og prosent avvik fra BAU, for alle scenarier.

| Scenario | Konstant konsumekvivalent | Prosent forskjell fra BAU |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Business as usual (BAU) | 999 986,6433 | 0 |
| Utslippskontroll (UtK) | 999 986,667 | 2,37229E-6 |
| Først-best | 999 986,7349 | 9,1592E-6 |
| Geoengineering | 999 986,7336 | 9,03166E-6 |
| UtK m/ begr. svovel | 999 986,7194 | 7,60505E-6 |
| BAU m/ begr. svovel | 999 986,7095 | 6,61592E-6 |

Som vi ser fra tabellen er det svært små forskjeller i konsumekvivalenten. Dette kan tyde på at klimaendringene på lang sikt – DICE går over 600 år – ikke vil ha store gjennomsnittlige velferdsvirkninger. Dette sier imidlertid lite om effektene på kortere sikt, for eksempel de neste 200 årene.

5.4 Sensitivitetsanalyse

Prisen på svovel og effekten svovel i stratosfæren har på strålingsbalansen i atmosfæren er estimerte verdier; det er altså mulig at de virkelige verdiene avviker fra de som brukes i denne oppgaven. For å se på virkningen endringer i disse har på oppgavens resultater, er det gjort en sensitivitetsanalyse.

Det viser seg at selv om prisen, S_{Price} , og effekten, $EffS$, har blitt økt og redusert med minst femti prosent, forandres ikke konklusjonene i denne oppgaven.

I tabellene 5.5 og 5.6 gis resultater for den sosiale kostnaden av karbon ved kjøring av DICE med ulike verdier for prisen på, og effekten av, klimamodifisering, S_{Price} ; milliarder dollar per Tg svovel, $\$/TgS$, og $EffS$; enhetsreduksjoner i strålingen per Tg svovel, Wm^{-2}/TgS . Selv om det ikke er endringer i BAU eller Utslippskontroll – klimamodifisering er ikke tilgjengelig i disse scenariene – tas disse med som referansepunkter.

Tabell 5.5: Endring i den sosiale kostnaden av karbon (SKK) ved variasjon i prisen på klimamodifisering. Tall i parentes henviser til punkteelastisiteten til SKK med hensyn på SPrice; hvor mange prosent SKK endres dersom SPrice endres med én prosent. Da klimamodifisering ikke er tilgjengelig i BAU eller Utslippskontroll er ikke resultater gitt for endringer i SPrice.

| SPrice (milliarder dollar) | EffS = $1,667 \text{ Wm}^{-2}/TgS$ | | |
|----------------------------|------------------------------------|-------|---------------|
| | 20 | 30 | 40 |
| BAU | - (0) | 28,15 | - (0) |
| Utslippskontroll (UtK) | - (0) | 27,27 | - (0) |
| Først-best | 8,92 (0,897) | 12,72 | 15,61 (0,681) |
| Geoengineering | 8,84 (0,891) | 12,58 | 15,47 (0,690) |
| UtK m/ begr. svovel | 12,36 (0,615) | 15,55 | 17,94 (0,462) |
| BAU m/ begr. svovel | 13,13 (0,567) | 16,19 | 18,47 (0,423) |

Punkteelastisitetene som er gjengitt i tabellene 5.5 og 5.6 varierer fra omtrent 0,5 til én. Disse er altså punkteelastisiteter og gjelder bare for endringene som er gjort i denne analysen.

Tabell 5.6: Endring i den sosiale kostnaden av karbon (SKK) ved variasjon i effekten av klimamodifisering. Tall i parentes henviser til punkteelastisiteten til SKK med hensyn på EffS; hvor mange prosent SKK endres dersom EffS endres med én prosent. Da klimamodifisering ikke er tilgjengelig i BAU eller Utslippskontroll er ikke resultater gitt for endringer i EffS.

| EffS (Wm^{-2}/TgS) | SPrice = 30 milliarder dollar | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-------|---------------|
| | 0,75 | 1,667 | 2,5 |
| BAU | - (0) | 28,15 | - (0) |
| Utslippskontroll (UtK) | - (0) | 27,27 | - (0) |
| Først-best | 20,18 (1,065) | 12,72 | 8,92 (0,598) |
| Geoengineering | 20,00 (1,073) | 12,58 | 8,84 (0,594) |
| UtK m/ begr.. svovel | 23,48 (0,927) | 15,55 | 10,72 (0,622) |
| BAU m/ begr.. svovel | 24,21 (0,900) | 16,19 | 11,24 (0,612) |

Temperaturen endres ikke nok, ved endringer i SPrice og EffS på minst femti prosent, til å påvirke konklusjonene i oppgaven.

I figurene A.9-A.12 gis temperaturbaner for scenariene med klimamodifisering ved endringer i effekten av og prisen på utslipp av svovel. Bare resultatene for Først-best og Utslippskontroll med begrenset svovel er presentert, da resultatene for henholdsvis Geoengineering og BAU med begrenset svovel viser tilsvarende størrelser og effekter.

Utslagene på SKK og temperatur av økt pris på og redusert effekt av klimamodifisering er av ikke ubetydelig størrelse. Sammenlignet med resultatene i scenariene uten klimamodifisering, er likevel effekten av nevnte virkemiddel fremdeles kvalitativt positiv. Den virkningen som er nærmest å påvirke konklusjonene i denne oppgaven er fall i effekten av klimamodifisering, men konklusjonene i oppgaven fremstår likevel som rimelig robuste.

Dersom effekten av svovel på strålingsbalansen skulle vise seg større enn antatt i denne oppgaven, eller om prisen er lavere, vil dette selvsagt tale til fordel for klimamodifisering.

Det bør poengteres at en til en viss grad kan styre effekten av og prisen på klimamodifisering: Ved å redusere massen på svovelaerosolene som sprøytes ut i stratosfæren kan en øke effekten av disse (Rasch, Crutzen og Coleman; 2008) og en kan velge en billig metode for utplassering. Det er imidlertid mulig at visse kombinasjoner av pris og effekt ikke er forenelig. Det kan for eksempel tenkes at det er dyrere å produsere eller utplassere små svovelpartikler enn store.

Kapittel 6

Svakheter ved modellen

Det er gjort en rekke eksplisitte og implisitte antagelser i modellen; noen av disse skal drøftes her.

Teknologien i modellen er eksogen, noe som fører til at dennes marginale bidrag til velferden ikke er lik de endogene variabelenes marginalbidrag: En kan tenke seg at innføring av klimamodifisering enten komplementerer eller substituerer for teknologiutviklingen i modellen. Da teknologien er eksogen, kan ikke denne tilpasses endringen i modellen, og resultatet blir ikke optimalt.

Parametrene som brukes i DICE er alle estimerte forventningsverdier, noen med betydelig varians (for detaljer, se Nordhaus; 2008). Dette fører til at modellen ikke egner seg spesielt godt til å forutse nøyaktige verdier på for eksempel fremtidige klimaskader. Modellen er imidlertid *indre konsistent*: det foreligger ingen selvmotsigelser i modellen. Selv om resultatene er usikre – som en konsekvens av estimerte parametre og kaos – er det så nært en sannhet om fremtiden en kan komme: Når en er tvunget til å ta valg, som i høyeste grad er tilfellet i forhold til global oppvarming, er *noe* informasjon bedre enn *ingen* informasjon.

Noen aspekter ved klimaendringer – som reduksjon i produksjon og til dels forverring av helsetilstand – kan måles og tas hensyn til i numeriske modeller. Andre aspekter er derimot av en slik karakter at de vanskelig kan tillegges en verdi. Ett illustrerende eksempel på sistnevnte – i denne oppgavens kontekst – er at svovelet i stratosfæren vil føre til en lysere blåfarge på himmelen; hvilken verdi setter man på en mørkeblå sommerhimmel? Til gjengjeld vil fargene ved solnedganger bli sterkere; veier dette opp for den lysere himmelen? I hvilken grad bør en ta hensyn til effekter som ikke kan settes tall på?

Temperaturen skader klima på to måter: via nivået; for eksempel ved at havene stiger, og via endringsraten; økosystemer trenger tid på å tilpasse seg endringer i klima. I DICE tas det bare hensyn til skadene som forårsakes av nivået. Peck og Teisberg (1994) tester betydningen av å inkludere endringsraten i en økonomisk vekstmodell (CETA) og finner at graden av ikke-linearitet i skadefunksjonen er av større betydning enn om tempera-

turendringer er inkludert eller ikke. Bruk av klimamodifisering representerer imidlertid et spesialtilfelle da temperaturen kan endres svært raskt. Brovkin m.fl. (2008) advarer som tidligere nevnt mot skader som oppstår ved raske temperaturendringer (se kapittel 2.3).

Den totale diskonteringsraten, representert ved Ramseylikningen – ligning (3.6) – er et sårbart punkt i alle økonomiske vekstmodeller; DICE er intet unntak. Samtidig som modellens resultater er sensitive for endringer i verdien på diskonteringsraten, har den ingen opplagt 'god' verdi: det finnes ingen gullstandard. Mange ulike diskonteringsrater har vært anvendt; en av de mest omtalte er fra Sternrapporten (Stern, 2006). Denne diskonteringsraten er av flere ansett for å være for lav, og er diskutert av blant andre Weitzman (2007) og Nordhaus (2007). I Sternrapporten er den sosiale tidsprefranseraten satt nær null. At den ikke er lik null forklares med en lav sannsynlighet for at menneskeheten kan dø ut, og at vi derfor bør konsumere litt ekstra nå. Den marginale konsumelastisiteten representerer i hvilken grad vi ønsker å fordele konsum fra rike til fattige. I Sternrapporten er denne satt lik én, mens verdier på omtrent to – som er tilfellet i DICE – er mer vanlig.

I kapittel 3.1 ble det sagt at den sosiale tidsprefranseraten representerer menneskers utålmodighet med hensyn på konsum; vi ønsker å konsumere i dag heller enn i morgen. Denne logikken stammer fra mikroøkonomiens rammeverk som beskriver optimal fordeling av konsum over et individs livsløp. Schelling (1995) kritiserer denne overgangen. Han mener at den sosiale tidsprefranseraten ikke har noe med fordeling av konsum over generasjoner å gjøre: rammeverket er feil. Schelling ønsker å behandle klimapolitikk som fordelingspolitikk: Reduksjon av utslipp av klimagasser i dag er i følge Schelling en inntektsoverføring fra dagens generasjon til relativt rikere – gitt fortsatt økonomisk vekst – fremtidige generasjoner. Dette, mener han, står i kontrast til normal fordelingspolitikk, som skal omfordele fra rike til fattige. Når det gjelder det første punktet, kan den sosiale tidsprefranseraten eventuelt rettferdiggjøres ved å tilpasse den et etisk syn på fordeling mellom generasjoner, heller enn å ta utgangspunkt i overgangen fra mikroøkonomisk teori som beskrevet over. Dette er gjort i for eksempel Sternrapporten. Det andre punktet – problemet med inntektsoverføring fra fattige til rike – kan en argumentere for at allerede tas hensyn til gjennom den marginale konsumelastisiteten, beskrevet i denne oppgaven via Ramseylikningen i kapittel 3.1. Ved å endre på verdien på denne, kan en tilpasse vekten som tillegges rike relativt til fattige generasjoner.

Kapittel 7

Konklusjon

Klimamodifisering har stor innvirkning på både de geofysiske og de økonomiske variablene i modellen; skadene ved klimaendringer, karbonskatt og den sosiale kostnaden av karbon faller alle betraktelig ved innføring av svovelutslipp i stratosfæren. Samtidig muliggjør klimamodifisering høyere utslipp av karbon, som kan ha konsekvenser som ikke tas hensyn til i denne oppgaven, for eksempel forsuring av hav. Disse effektene er også gjeldende – om enn i noe mindre grad – dersom bruken av svovel er begrenset.

I tillegg til å senke temperaturen i atmosfæren, vil klimamodifisering ha negative bieffekter, blant annet endring i nedbørsmønstre og risiko for raske temperaturendringer ved plutselig avbrudd.

Klimamodifisering er et relativt billig virkemiddel i kampen mot global oppvarming. Dette kan innebære at tiltaket vil være politisk enklere å implementere enn for eksempel utslippsreduksjoner, som blant annet på grunn av den høye kostnaden ikke har vært brukt i et fornuftig omfang.

På tross av de store fordelene ved klimamodifisering – tiltaket er billig og har stor effekt – er det for tidlig å anbefale implementering. Vi vet ennå ikke nok om bieffektene av klimamodifisering til at en fornuftig konklusjon kan nås.

Det kan forekomme flere selvforsterkende effekter ved klimaendringer. For eksempel er store mengder metan frosset ned i Sibirs permafrost. Når temperaturen har steget tilstrekkelig vil isen smelte og metanen slippes fri; denne kan føre til ytterligere oppvarming av atmosfæren (Walter m.fl.; 2006). Selv om klimamodifisering skulle bli vurdert som for farlig, i forhold til effekt, til å bruke som et standard virkemiddel mot klimaendringene, vil det kunne ha stor verdi når eller dersom slike selvforsterkende effekter skulle inntreffe: Klimamodifisering kan virke som et brannslukningsapparat for miljøet.

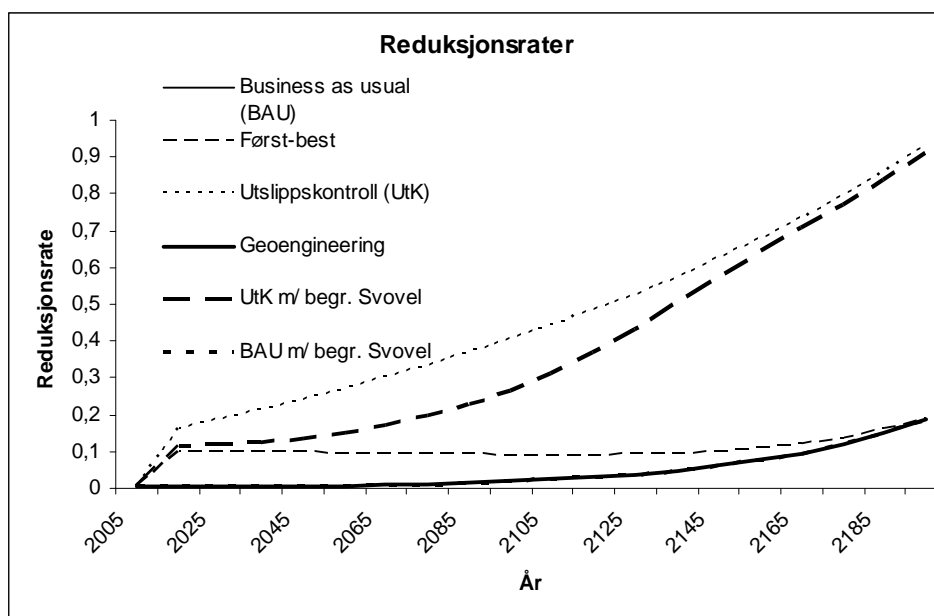
De store, kvalitativt positive, effektene av klimamodifisering som er avdekket blant annet i denne oppgaven, taler for fortsatt forskning på tiltaket, selv om en bare ønsker å bruke det som et brannslukningsapparat.

Den største mangelen ved denne oppgaven er at modellapparatet ikke tar hensyn til alle kostnadene forbundet med klimamodifisering; bare den direkte implementeringskost-

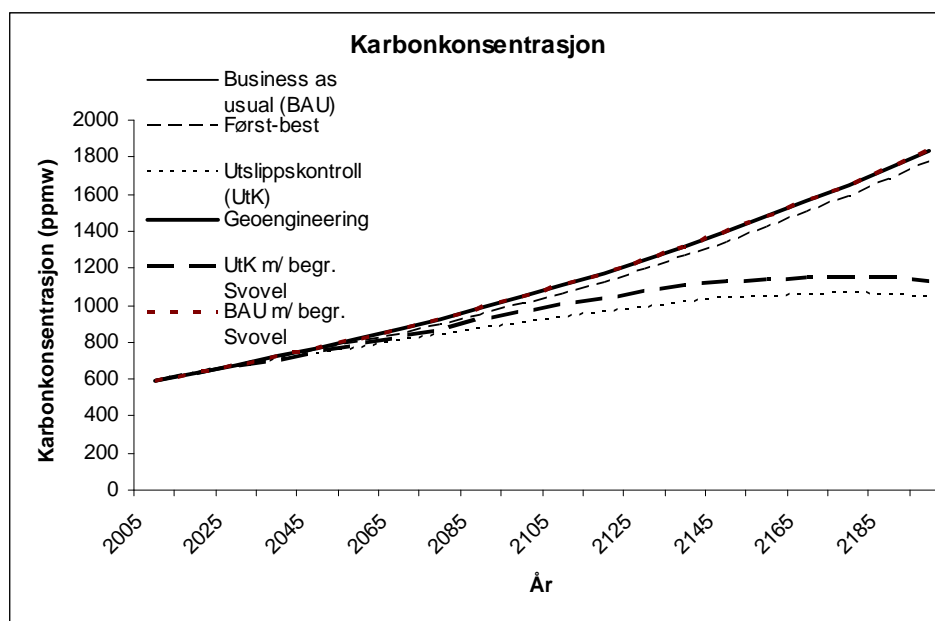
naden inkluderes. Fremtidige analyser av klimamodifisering bør inkludere aspekter som hvor fort temperaturen endres, forsuring av hav og endring av nedbørsmønstre.

Tillegg A

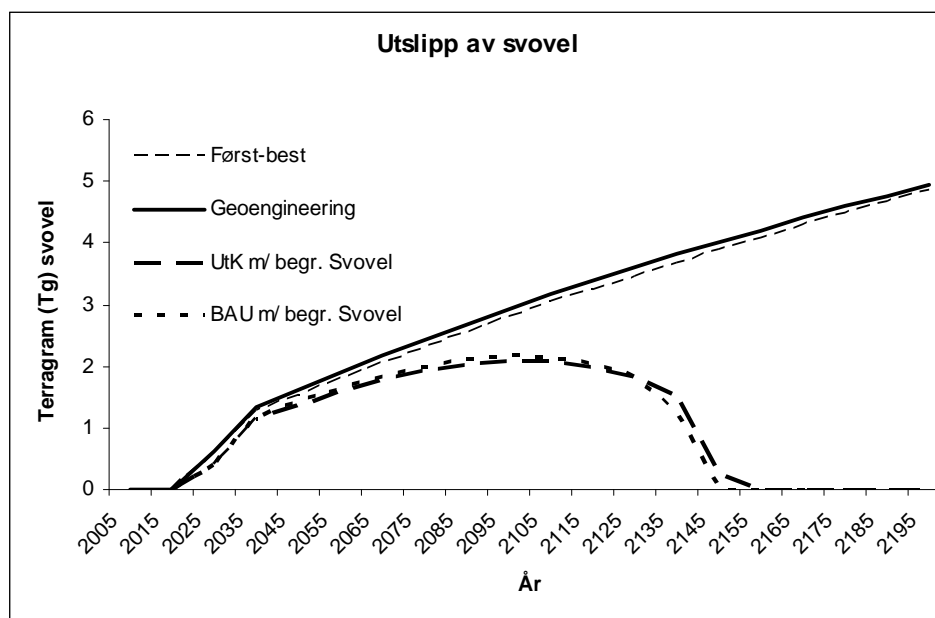
Figurer



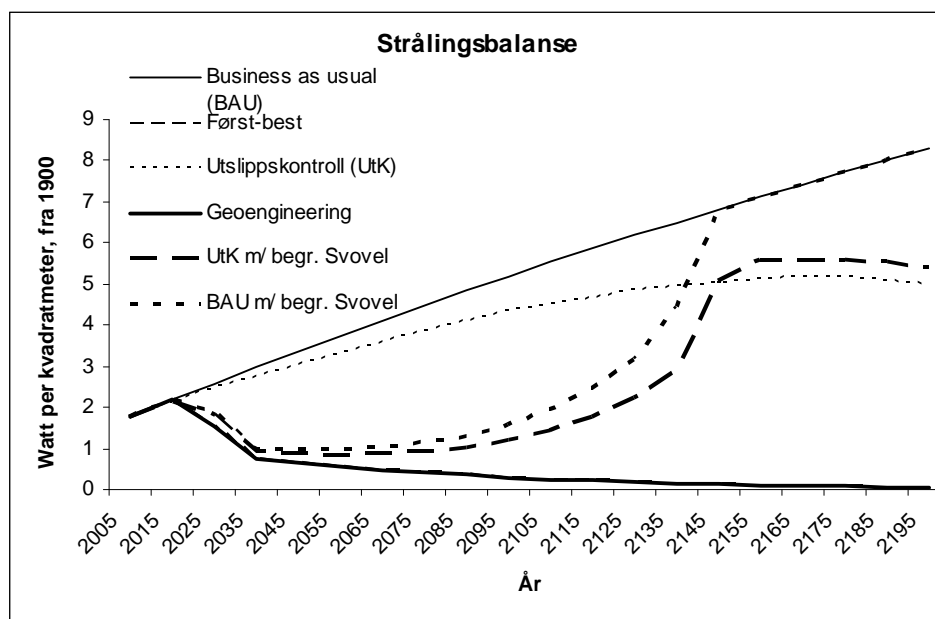
Figur A.1: Reduksjonsrater for alle scenarier i gitte perioder. Reduksjonsraten er gitt som andelen av potensielle utslipp, $\sigma_t A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma}$, som ikke slippes ut. Reduksjonsratene for BAU, Geoengineering og BAU med begrenset svovel er like, og overlapper derfor i figuren. Reduksjonsratene i disse scenariene er satt eksogent lik raten fra et scenario der høy temperatur ikke fører til klimaskader. Da brukes all tilgjengelig karbon, så denne må porsjoneres ut over modellens løpetid.



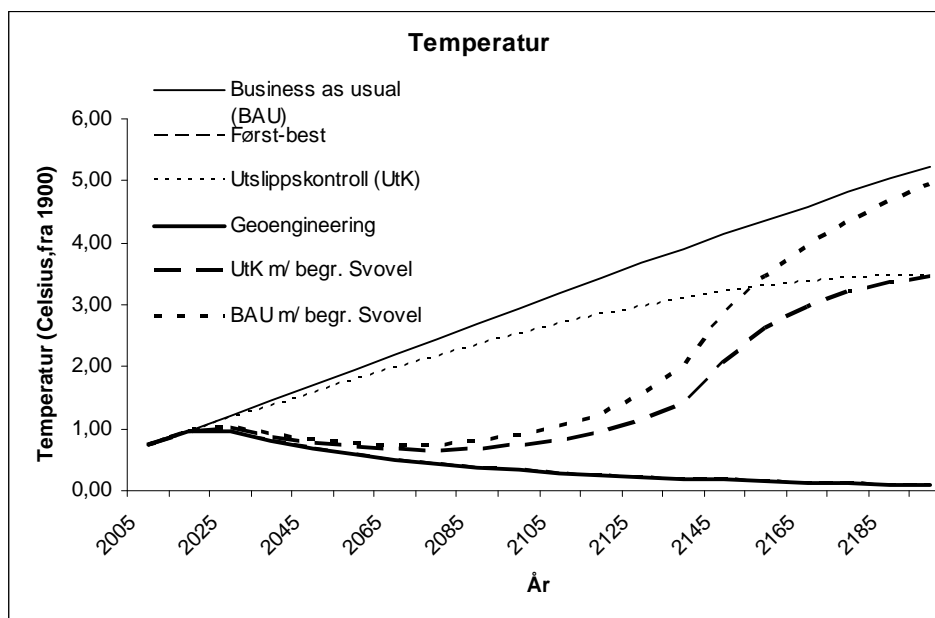
Figur A.2: Karbonkonsentrasjon i alle scenarier for angitte perioder. Konsentrasjonen oppgis i ppmw (parts per million, weight). Konsentrasjonen i scenariene BAU, Geoengineering og BAU med begrenset svovel settes eksogent og er lik, derfor overlapper kurvene i figuren.



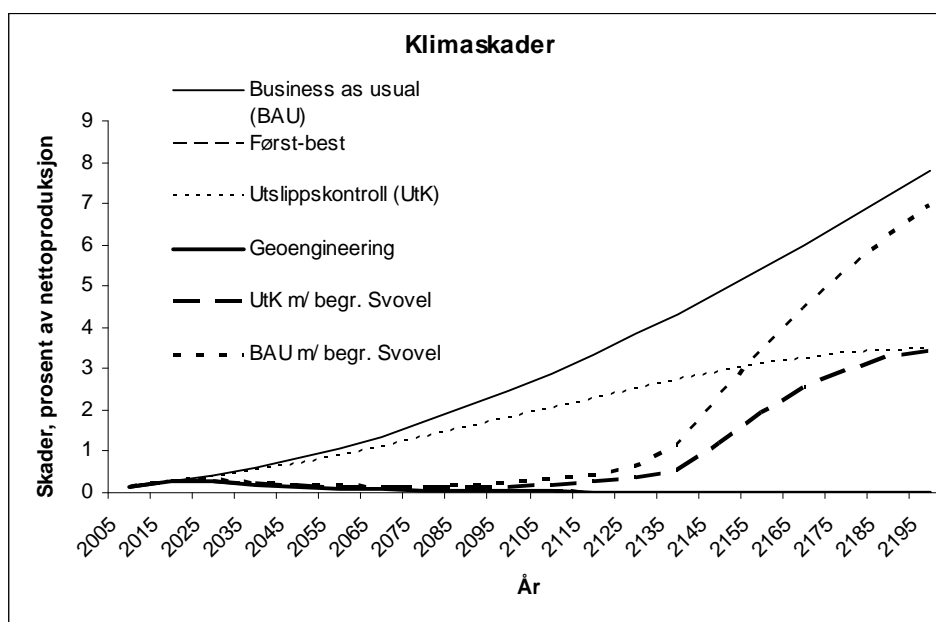
Figur A.3: Utslipp av svovel i scenarier, der dette er tilgjengelig, for angitte perioder.



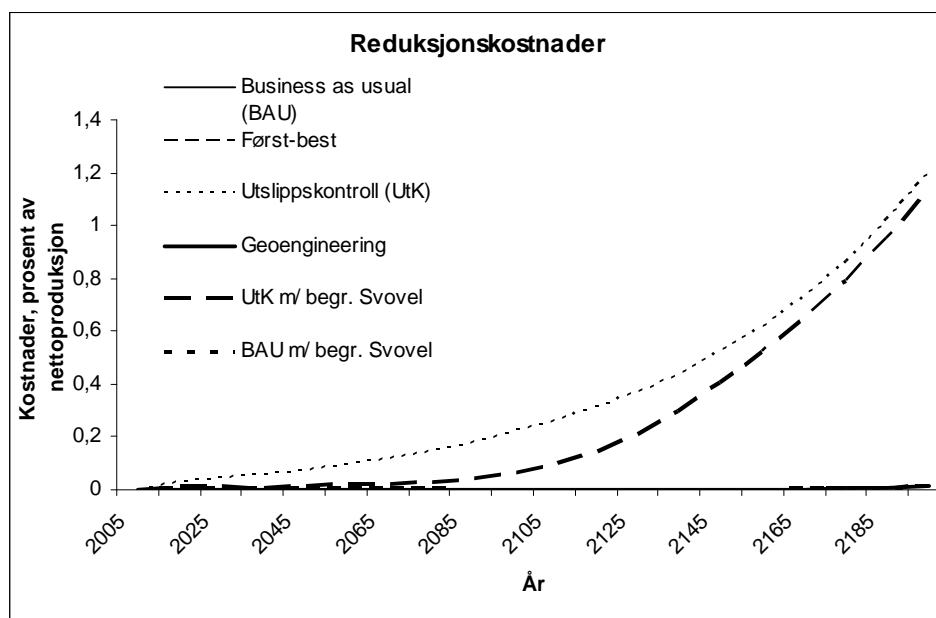
Figur A.4: Strålingsbalansen i $W m^{-2}$, relativt til førindustrielt nivå (år 1900) for alle scenarier i angitte perioder.



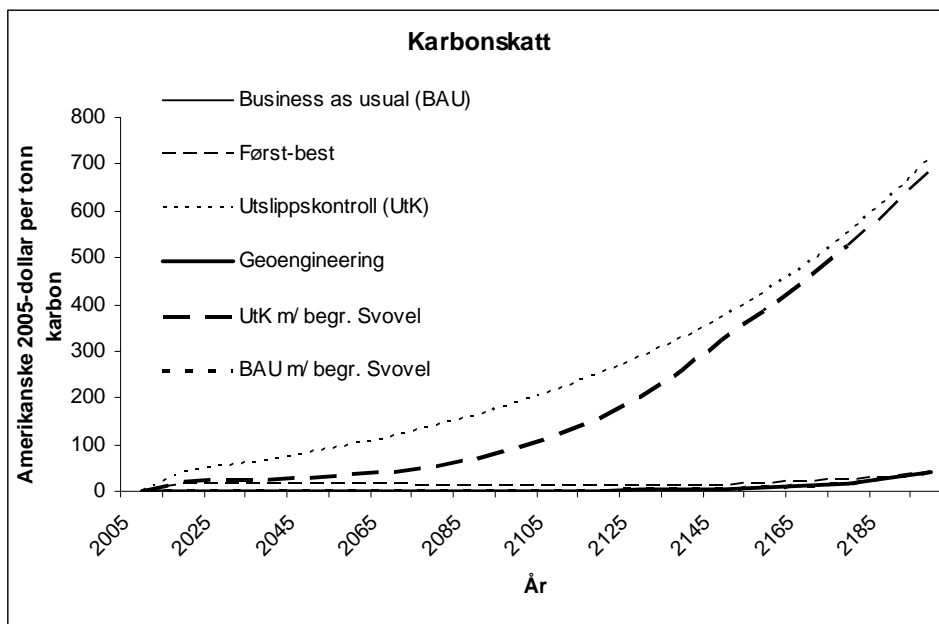
Figur A.5: Temperatur i Celsius, relativt til førindustrielt nivå (år 1900), for alle scenarier i angitte perioder.



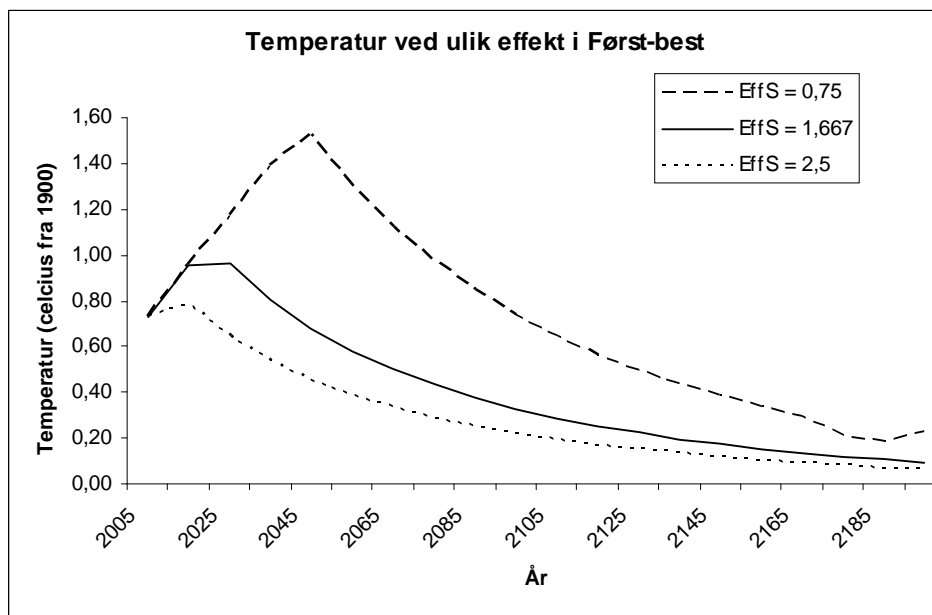
Figur A.6: Klimaskader, gitt som prosent av nettoproduksjon. Klimaskadene regnes som klimaendringenes bidrag til å redusere bruttoproduksjonen, $A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma}$.



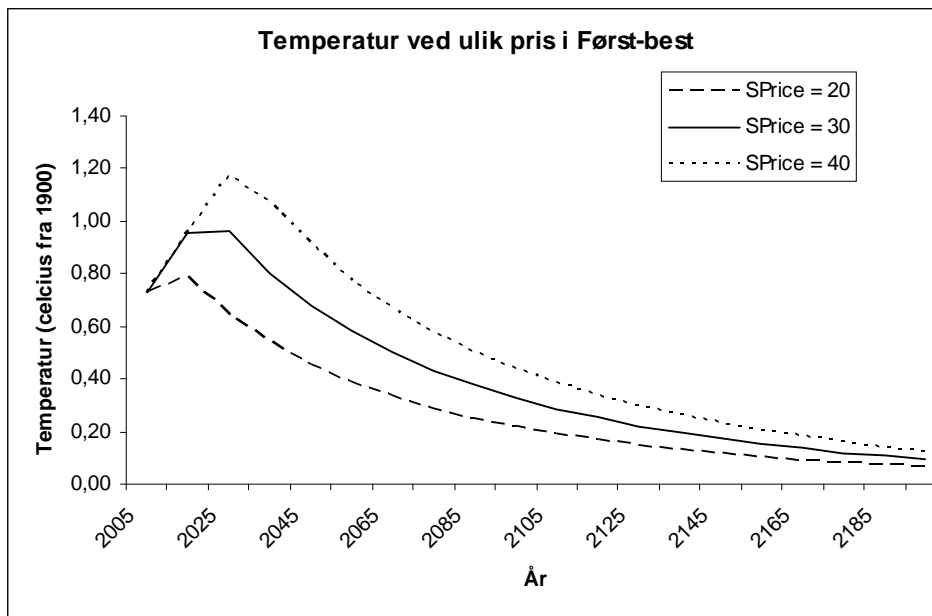
Figur A.7: Reduksjonskostnader som andel av nettoproduksjon,



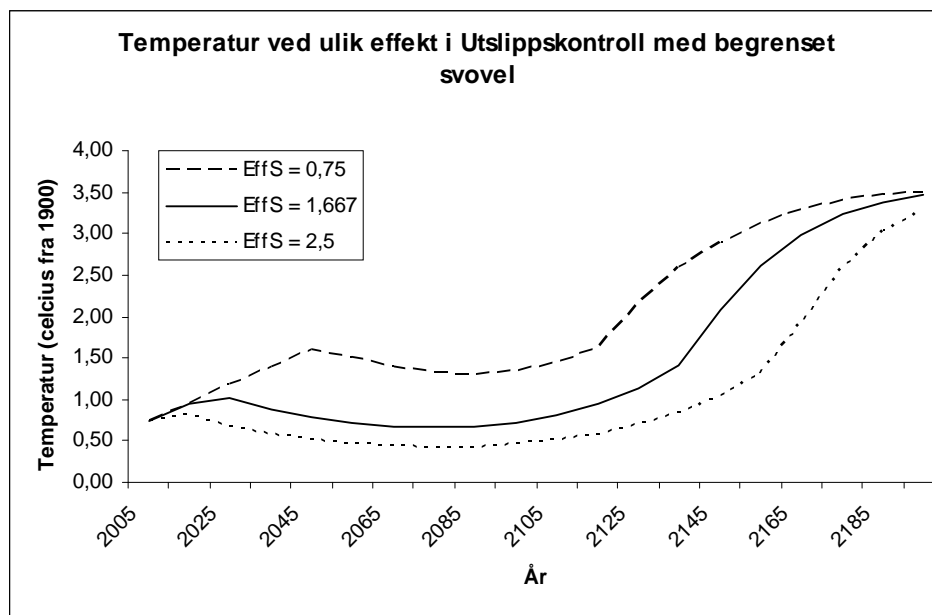
Figur A.8: Karbonskatt eller -pris, i amerikanske 2005-dollar per tonn karbon, for alle scenarier i angitte perioder. Karbonskatten settes lik marginalkostnaden ved utslippsreduksjoner, som igjen bestemmes av reduksjonsraten. Denne er eksogent satt lik i BAU, Geoengineering og BAU med begrenset svovel, så kurvene for disse scenariene overlapper i figuren.



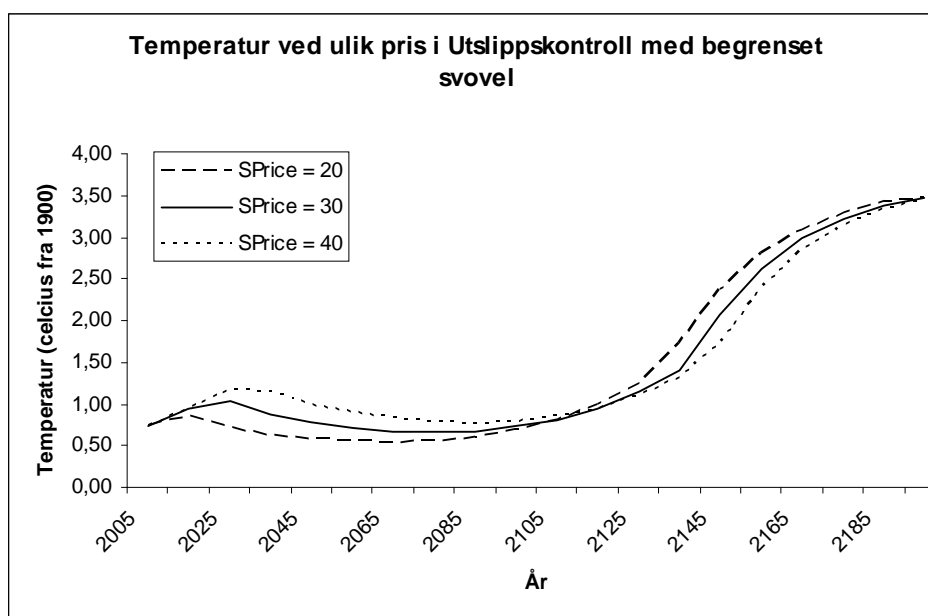
Figur A.9: Temperatur i celcius relativt til 1900 for Først-best, ved ulike effekter av klimamodifisering på strålingsbalansen. EffS måles som reduksjon i Wm^{-2}/TgS . Verdien som brukes i denne oppgaven er $1,667 Wm^{-2}/TgS$. Temperaturbanene i denne figuren har en pris på 30 milliarder $\$/TgS$; prisen som brukes i oppgaven.



Figur A.10: Temperatur i celcius relativt til 1900 for Først-best, ved ulike priser på klimamodifisering. SPrice er i milliarder $\$/TgS$. Temperaturbanene i denne figuren har en effekt på $1,667 Wm^{-2}/TgS$; effekten som brukes i oppgaven.



Figur A.11: Temperatur i celcius relativt til 1900 for Utslippskontroll med begrenset svovel, ved ulike effekter av klimamodifisering på strålingsbalansen. EffS måles som reduksjon i Wm^{-2}/TgS . Verdien som brukes i denne oppgaven er $1,667 Wm^{-2}/TgS$. Temperaturbanene i denne figuren har en pris på 30 milliarder $\$/TgS$; prisen som brukes i oppgaven.



Figur A.12: Temperatur i celsius relativt til 1900 for Utslippsreduksjon med begrenset svovel, ved ulike priser på klimamodifisering. SPrice er i milliarder $\$/TgS$. Temperaturbanene i denne figuren har en effekt på $1,667 Wm^{-2}/TgS$; effekten som brukes i oppgaven.

Tillegg B

Programmering av DICE - modifisert

Nordhaus' originale modell kan finnes på internett: <http://nordhaus.econ.yale.edu/DICE2007.htm>.

Kode for denne oppgavens versjon følger:

```
$ontext
changes to test the stern run
DICE delta version 8
July 17, 2008
This is for the revised model with climate and emissions modules changed.
This version is used for the 2007 book.
$offtext
SETS T Time periods /1*60/ ;
SCALARS
** Preferences
B_ELASMU Elasticity of marginal utility of consumption / 2.0 /
B_PRSTP Initial rate of social time preference per year / .015 /
** Population and technology
POP0 2005 world population millions /6514 /
GPOP0 Growth rate of population per decade / .35 /
POPASYM Asymptotic population / 8600 /
A0 Initial level of total factor productivity / .02722 /
GA0 Initial growth rate for technology per decade / .092 /
DELA Decline rate of technol change per decade / .001 /
DK Depreciation rate on capital per year / .100 /
GAMA Capital elasticity in production function / .300 /
Q0 2005 world gross output trill 2005 US dollars /61.1 /
K0 2005 value capital trill 2005 US dollars /137. /
```

** Emissions

SIG0 CO2-equivalent emissions-GNP ratio 2005 / .13418 /

GSIGMA Initial growth of sigma per decade / -.0730 /

DSIG Decline rate of decarbonization per decade / .003 /

DSIG2 Quadratic term in decarbonization / .000 /

ELAND0 Carbon emissions from land 2005(GtC per decade) / 11.000 /

** Carbon cycle

MAT2000 Concentration in atmosphere 2005 (GtC) / 808.9 /

MU2000 Concentration in upper strata 2005 (GtC) / 1255 /

ML2000 Concentration in lower strata 2005 (GtC) / 18365 /

b11 Carbon cycle transition matrix / 0.810712 /

b12 Carbon cycle transition matrix / 0.189288 /

b21 Carbon cycle transition matrix / 0.097213 /

b22 Carbon cycle transition matrix / 0.852787 /

b23 Carbon cycle transition matrix / 0.05 /

b32 Carbon cycle transition matrix / 0.003119 /

b33 Carbon cycle transition matrix / 0.996881 /

** Climate model

T2XCO2 Equilibrium temp impact of CO2 doubling oC / 3 /

FEX0 Estimate of 2000 forcings of non-CO2 GHG / -.06 /

FEX1 Estimate of 2100 forcings of non-CO2 GHG / 0.30 /

TOCEAN0 2000 lower strat. temp change (C) from 1900 / .0068 /

TATM0 2000 atmospheric temp change (C) from 1900 / .7307 /

C1 Climate-equation coefficient for upper level / .220 /

C3 Transfer coeffic upper to lower stratum / .300 /

C4 Transfer coeffic for lower level / .050 /

FCO22X Estimated forcings of equilibrium co2 doubling / 3.8 /

EffS Efficiency of sulfur in reducing forcing / 1.667 /

SPrice Cost of emitting 1 Tg sulfur / 0.02 /

** Climate damage parameters calibrated for quadratic at 2.5 C for 2105

A1 Damage intercept / 0.00000 /

A2 Damage quadratic term / 0.0028388 /

A3 Damage exponent / 2.00 /

** Abatement cost

EXPCOST2 Exponent of control cost function / 2.8 /

PBACK Cost of backstop 2005 000\$ per tC 2005 / 1.17 /

BACKRAT Ratio initial to final backstop cost / 2 /

GBACK Initial cost decline backstop pc per decade / .05 /

LIMMIU Upper limit on control rate / 1 /

** Participation

PARTFRACT1 Fraction of emissions under control regime 2005 /1 /

PARTFRACT2 Fraction of emissions under control regime 2015 /1 /

PARTFRACT21 Fraction of emissions under control regime 2205 /1 /

DPARTFRACT Decline rate of participation /0 /

** Availability of fossil fuels

FOSSLIM Maximum cumulative extraction fossil fuels / 6000 /

** Reasonable limit on cumulative sulphur usage

SULPHLIM Maximum cumulative use of sulphur (when applicable) /20/

** Scaling and inessential parameters

scale1 Scaling coefficient in the objective function /194 /

scale2 Scaling coefficient in the objective function /381800 / ;

* Definitions for outputs of no economic interest

SETS

TFIRST(T)

TLAST(T)

TEARLY(T)

TLATE(T);

PARAMETERS

L(T) Level of population and labor

AL(T) Level of total factor productivity

SIGMA(T) CO₂-equivalent-emissions output ratio

R(T) Instantaneous rate of social time preference

RR(T) Average utility social discount rate

GA(T) Growth rate of productivity from 0 to T

FORCOTH(T) Exogenous forcing for other greenhouse gases

GL(T) Growth rate of labor 0 to T

GCOST1 Growth of cost factor

GSIG(T) Cumulative improvement of energy efficiency

ETREE(T) Emissions from deforestation

COST1(t) Adjusted cost for backstop

PARTFRACT(T) Fraction of emissions in control regime

AA1 Variable A1

AA2 Variable A2

AA3 Variable A3

ELASMU Variable elasticity of marginal utility of consumption

PRSTP Variable initial rate of social time preference per year

LAM Climate model parameter

Gfacpop(T) Growth factor population ;

PARAMETERS

L(T) Level of population and labor

AL(T) Level of total factor productivity

SIGMA(T) CO2-equivalent-emissions output ratio

RR(T) Average utility social discount factor

GA(T) Growth rate of productivity from 0 to T

FORCOTH(T) Exogenous forcing for other greenhouse gases

GL(T) Growth rate of labor 0 to T

GCOST1 Growth of cost factor

GSIG(T) Cumulative improvement of energy efficiency

ETREE(T) Emissions from deforestation

COST1(t) Adjusted cost for backstop

PARTFRACT(T) Fraction of emissions in control regime

AA1 Variable A1

AA2 Variable A2

AA3 Variable A3

ELASMU Variable elasticity of marginal utility of consumption

PRSTP Variable initial rate of social time preference per year

LAM Climate model parameter

Gfacpop(T) Growth factor population ;

* Unimportant definitions to reset runs

TFIRST(T) = YES\$(ORD(T) EQ 1);

TLAST(T) = YES\$(ORD(T) EQ CARD(T));

TEARLY(T) = YES\$(ORD(T) LE 20);

TLATE(T) = YES\$(ORD(T) GE 21);

AA1 = A1;

AA2 = A2;

AA3 = A3;

ELASMU = B_ELASMU;

PRSTP = B_PRSTP;

b11 = 1 - b12;

b21 = 587.473*B12/1143.894;

b22 = 1 - b21 - b23;

b32 = 1143.894*b23/18340;

b33 = 1 - b32 ;

* Important parameters for the model

LAM = FCO22X/ T2XCO2;

Gfacpop(T) = (exp(gpop0*(ORD(T)-1))-1)/exp(gpop0*(ORD(T)-1));

L(T)=POP0* (1- Gfacpop(T))+Gfacpop(T)*popasym;

```

ga(T)=ga0*EXP(-dela*10*(ORD(T)-1));
al("1") = a0;
LOOP(T, al(T+1)=al(T)/((1-ga(T))));
gsig(T)=gsigma*EXP(-dsig*10*(ORD(T)-1)-dsig2*10*((ord(t)-1)**2));sigma("1")=sig0;LOOP(T,s
gsig(T+1)))););
cost1(T) = (PBACK*SIGMA(T)/EXPCOST2)* ( (BACKRAT-1+ EXP (-gback*
(ORD(T)-1) ) )/BACKRAT);
ETREE(T) = ELAND0*(1-0.1)**(ord(T)-1);
RR(t)=1/((1+prstp)**(10*(ord(T)-1)));
FORCOTH(T)= FEX0+ .1*(FEX1-FEX0)*(ORD(T)-1)$ (ORD(T) LT 12)+ 0.36$(ORD(T)
GE 12);
partfract(t) = partfract21;
PARTFRACT(T)$ (ord(T)<25) = Partfract21 + (PARTFRACT2-Partfract21)*exp(-
DPARTFRACT*(ORD(T)-2));
partfract("1")= PARTFRACT1;
display etree
VARIABLES
GEO(T) # Tg sulfur emitted in stratosphere
MIU(T) Emission control rate GHGs
FORC(T) Radiative forcing in watts per m2
TATM(T) Temperature of atmosphere in degrees C
TOCEAN(T) Temperatureof lower oceans degrees C
MAT(T) Carbon concentration in atmosphere GtC
MATAV(T) Average concentrations
MU(T) Carbon concentration in shallow oceans Gtc
ML(T) Carbon concentration in lower oceans GtC
E(T) CO2-equivalent emissions GtC
C(T) Consumption trillions US dollars
K(T) Capital stock trillions US dollars
CPC(T) Per capita consumption thousands US dollars
PCY(t) Per capita income thousands US dollars
I(T) Investment trillions US dollars
S(T) Gross savings rate as fraction of gross world product
RI(T) Real interest rate per annum
Y(T) Gross world product net of abatement and damages
YGROSS(T) Gross world product GROSS of abatement and damages
YNET(T) Output net of damages equation
DAMAGES(T) Damages
ABATECOST(T) Cost of emissions reductions

```

CCA(T) Cumulative industrial carbon emissions GTC
 CSULPH(T) Cumulative use of sulphur
 PERIODU(t) One period utility function
 UTILITY;
 POSITIVE VARIABLES MIU, TATM, TOCE, E, MAT, MATAV, MU, ML, Y, YGROSS,
 C, K, I, CCA;
 EQUATIONS
 CSULPHCSULPH(T) Cumulative use of sulphur
 CSULPHFIRST(T) First period cumulative sulphur
 CCTFIRST(T) First period cumulative carbon
 CCACCA(T) Cumulative carbon emissions
 UTIL Objective function
 YY(T) Output net equation
 YNETEQ(T) Output net of damages equation
 YGROSSEQ(T) Output gross equation
 DAMEQ(T) Damage equation
 ABATEEQ(T) Cost of emissions reductions equation
 CC(T) Consumption equation
 KK(T) Capital balance equation
 KK0(T) Initial condition for capital
 KC(T) Terminal condition for capital
 CPCE(t) Per capita consumption definition
 PCYE(T) Per capita income definition
 EE(T) Emissions equation
 SEQ(T) Savings rate equation
 RIEQ(T) Interest rate equation
 FORCE(T) Radiative forcing equation
 MMAT0(T) Starting atmospheric concentration
 MMAT(T) Atmospheric concentration equation
 MMATAVEQ(t) Average concentrations equation
 MMU0(T) Initial shallow ocean concentration
 MMU(T) Shallow ocean concentration
 MML0(T) Initial lower ocean concentration
 MML(T) Lower ocean concentration
 TATMEQ(T) Temperature-climate equation for atmosphere
 TATM0EQ(T) Initial condition for atmospheric temperature
 TOCEANEQ(T) Temperature-climate equation for lower oceans
 TOCEAN0EQ(T) Initial condition for lower ocean temperature
 PERIODUEQ(t) Instantaneous utility function equation;

```

** Equations of the model
CSULPHFIRST(TFIRST).. CSULPH(TFIRST) =e= 0;
CSULPHCSULPH(T+1).. CSULPH(T+1) =e= CSULPH(T)+ GEO(T);
CCTFIRST(TFIRST).. CCA(TFIRST)=E=0;
CCACCA(T+1).. CCA(T+1)=E=CCA(T)+ E(T);
KK(T).. K(T+1) =L= (1-DK)**10 *K(T)+10*I(T);
KK0(TFIRST).. K(TFIRST) =E= K0;
KC(TLAST).. .02*K(TLAST) =L= I(TLAST);
EE(T).. E(T)=E= (10*SIGMA(T)*(1-MIU(T))*AL(T)*L(T)**(1-GAMA)*K(T)**GAMA
+ ETREE(T));
FORCE(T).. FORC(T) =E= FCO22X*((log((Matav(T)+.000001)/596.4)/log(2)))+
FORCOTH(T) - EffS*GEO(T);
MMAT0(TFIRST).. MAT(TFIRST) =E= MAT2000;
MMU0(TFIRST).. MU(TFIRST) =E= MU2000;
MML0(TFIRST).. ML(TFIRST) =E= ML2000;
MMAT(T+1).. MAT(T+1) =E= MAT(T)*b11+MU(T)*b21 + E(T);
MMATAVEQ(t).. MATAV(T) =e= (MAT(T)+MAT(T+1))/2 ;
MML(T+1).. ML(T+1) =E= ML(T)*b33+b23*MU(T);
MMU(T+1).. MU(T+1) =E= MAT(T)*b12+MU(T)*b22+ML(T)*b32;
TATM0EQ(TFIRST).. TATM(TFIRST) =E= TATM0;
TATMEQ(T+1).. TATM(T+1) =E= TATM(t)+C1*(FORC(t+1)-LAM*TATM(t)-
C3*(TATM(t)-TOCEAN(t)));
TOCEAN0EQ(TFIRST).. TOCEAN(TFIRST) =E= TOCEAN0;
TOCEANEQ(T+1).. TOCEAN(T+1) =E= TOCEAN(T)+C4*(TATM(T)-TOCEAN(T));
YGROSSEQ(T).. YGROSS(T) =e= AL(T)*L(T)**(1-GAMA)*K(T)**GAMA;
DAMEQ(T).. DAMAGES(t) =E= YGROSS(T)- YGROSS(T)/(1+aa1*TATM(T)+
aa2*TATM(T)**aa3);
YNETEQ(T).. YNET(T) =E= YGROSS(T)/(1+aa1*TATM(T)+ aa2*TATM(T)**aa3);
ABATEEQ(T).. ABATECOST(T) =E= (PARTFRACT(T)**(1-expcost2))*YGROSS(T)*(cost1(t)
YY(T).. Y(T) =E= YGROSS(T)*((1-(PARTFRACT(T)**(1-expcost2))*cost1(t)*(MIU(T)**EXPc
aa2*TATM(T)**aa3);
SEQ(T).. S(T) =E= I(T)/(.001+Y(T));
RIEQ(T).. RI(T) =E= GAMA*Y(T)/K(T)- (1-(1-DK)**10)/10 ;
CC(T).. C(T) =E= Y(T)-I(T)- SPrice*10*GEO(T);
CPCE(T).. CPC(T) =E= C(T)*1000/L(T);
PCYE(T).. PCY(T) =E= Y(T)*1000/L(T);
PERIODUEQ(T).. PERIODU(T) =E= ((C(T)/L(T))**(1-ELASMU)-1)/(1-ELASMU);
UTIL.. UTILITY =E= SUM(T, 10 *RR(T)*L(T)*(PERIODU(T))/scale1)+ scale2 ;
** Upper and Lower Bounds: General conditions for stability

```



```
K.lo(T) = 100;
MAT.lo(T) = 10;
MU.lo(t) = 100;
ML.lo(t) = 1000;
C.lo(T) = 20;
TOCEAN.up(T) = 20;
TOCEAN.lo(T) = -1;
TATM.up(t) = 20;
miu.up(t) = LIMMIU;
partfract("1") = 0.25372;
geo.up(t) = 0;
geo.lo(t) = 0;
* First period predetermined by Kyoto Protocol
miu.fx("1") = 0.005;
** Fix savings assumption for standardization if needed
*s.fx(t)=.22;
** Cumulative limits on carbon use at 6000 GtC
CCA.up(T) = FOSSLIM;
** Cumulative limits on use of sulphur
CSULPH.up(T) = 9999999;
** Solution options
option iterlim = 99900;
option reslim = 99999;
option solprint = on;
option limrow = 0;
option limcol = 0;
model CO2 /all/;
```

Tillegg C

Underrutiner for nye scenarier

I det følgende vil jeg utelate kode som sørger for at resultatene blir lagret i en tekstfil. Hotellingscenariet er fra Nordhaus (2008) og brukes for å beregne utslipps- og investeringsstall som anvendes i Business as usual (BAU), Geoengineering og BAU med begrenset svovel.

C.1 Hotelling

*parameter estimates

```
aa1 = 0;
aa2 = 0;
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;
parameters
miuhotel(t) estimate of Hotelling rents
capitalhotel(t) capital in Hotelling;
miuhotel(t)=miu.l(t);
capitalhotel(t) = k.l(t);
```

C.2 Business as usual (BAU)

* Control statements

```
MIU.lo("1")=miuhotel("1");
MIU.lo("2")=miuhotel("2");
.
.
MIU.lo("24")=miuhotel("24");
```

```

MIU.lo("25")=miuhotel("25");
MIU.up("1")=miuhotel("1");
MIU.up("2")=miuhotel("2");
.
.
MIU.up("24")=miuhotel("24");
MIU.up("25")=miuhotel("25");
k.lo("1")=capitalhotel("1");
k.lo("2")=capitalhotel("2");
.
.
k.lo("24")=capitalhotel("24");
k.lo("25")=capitalhotel("25");
k.up("1")=capitalhotel("1");
k.up("2")=capitalhotel("2");
.
.
k.up("24")=capitalhotel("24");
k.up("25")=capitalhotel("25");
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;

```

C.3 Utslippsreduksjon (UtK)

Modellen optimeres uten ekstra kode.

C.4 Først-best

*Øvre og nedre grenser for å inkludere klimamodifisering

```

GEO.up(T) = 10;
GEO.lo(T) = 0;
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;

```

C.5 Geoengineering

*Øvre og nedre grenser for å inkludere klimamodifisering

GEO.up(T) = 1000;

GEO.lo(T) = 0;

* Control statements

MIU.lo("1")=miuhotel("1");

MIU.lo("2")=miuhotel("2");

.

.

MIU.lo("24")=miuhotel("24");

MIU.lo("25")=miuhotel("25");

MIU.up("1")=miuhotel("1");

MIU.up("2")=miuhotel("2");

.

.

MIU.up("24")=miuhotel("24");

MIU.up("25")=miuhotel("25");

k.lo("1")=capitalhotel("1");

k.lo("2")=capitalhotel("2");

.

.

k.lo("24")=capitalhotel("24");

k.lo("25")=capitalhotel("25");

k.up("1")=capitalhotel("1");

k.up("2")=capitalhotel("2");

.

.

k.up("24")=capitalhotel("24");

k.up("25")=capitalhotel("25");

solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;

solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;

solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;

C.6 Utslippskontroll med begrenset svovel

*Øvre og nedre grenser for å inkludere klimamodifisering

GEO.up(T) = 1000;

GEO.lo(T) = 0;

```

*Setter begrensing for svovel
CSULPH.up(T) = SULPHLIM;
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;

```

C.7 BAU med begrenset svovel

**Øvre og nedre grenser for å inkludere GEO

```

GEO.up(T) = 1000;
GEO.lo(T) = 0;
** Setter begrensing for svovel
CSULPH.up(T) = SULPHLIM;
* Control statements
MIU.lo("1")=miuhotel("1");
MIU.lo("2")=miuhotel("2");
.
.
MIU.lo("24")=miuhotel("24");
MIU.lo("25")=miuhotel("25");
MIU.up("1")=miuhotel("1");
MIU.up("2")=miuhotel("2");
.
.
MIU.up("24")=miuhotel("24");
MIU.up("25")=miuhotel("25");
k.lo("1")=capitalhotel("1");
k.lo("2")=capitalhotel("2");
.
.
k.lo("24")=capitalhotel("24");
k.lo("25")=capitalhotel("25");
k.up("1")=capitalhotel("1");
k.up("2")=capitalhotel("2");
.
.
k.up("24")=capitalhotel("24");
k.up("25")=capitalhotel("25");
solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;

```

solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;

solve CO2 maximizing UTILITY using nlp ;

Litteraturliste

- Aaheim A., Fugletvedt J.S. og Godal O. (2006): Costs savings of a flexible multi-gas climate policy. *Energy Journal*, Special issue #3, p 485-501.
- Barrett S. (2008): The Incredible Economics of geoengineering. *Environmental and Resource Economics*, vol 39, p 45–54. Doi: 10.1007/s10640-007-9174-8
- Bengtsson L. (2006): Geo-Engineering to Confine Climate Change: Is it at all Feasible? *Climatic Change*, vol 77, no 3-4, p. 229-234. Doi: 10.1007/s10584-006-9133-3
- Bluth G. J. S., Doiron S. D., Schnetzler C. C., Krueger A. J., and Walter L. S. (1992): Globaltracking of the SO₂ clouds from the June 1991 Mount Pinatubo eruptions. *Geophysical Research Letters*, vol 19, p 151–154. Doi: 10.1029/91GL02792
- Brovkin V., Petoukhov V., Claussen M., Bauer E., Archer D. og Jaeger C. (2008): Geoengineering climate by stratospheric sulfur injections: Earth system vulnerability to technological failure. *Climatic Change*, vol 92, p 243-259. Doi: 10.1007/s10584-008-9490-1
- Budyko M. I. (1974): The method of Climate stabilization. *Russiske Meteorology and Hydrology*, vol 2, p 91-97.
- Caldeira K. og Wood L. (2008): Global and Arctic climate engineering: numerical model studies. *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol 366, no 1882, p 4039-4056. Doi: 10.1098/rsta.2008.0132
- Crutzen P. J. (2006): Albedo Enhancements By Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution To Resolve A Policy Dilemma? *Climatic Change*, vol 77, no 3-4, p 211-220. Doi: 10.1007/s10584-006-9101-y
- EU (2008): Questions and Answers on the Commission’s proposal for effort sharing. MEMO/08/34. [Internett], Brussel, EU. Tilgjengelig fra: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAct> [Nedlastet 16.04.2009]
- Food and agriculture organization of the United Nation (2009): State of the world’s forests 2009. *Rome*

- Gregg M. (1996): Could we/should we engineer the Earth's climate? *Climatic Change*, vol 33, no 3, p 275-278. Doi: 10.1007/BF00142575
- Hansen J., Lacic A., Ruedy R., og Sato M. (1992): Potential climate impact of Mount Pinatubo eruption. *Geophysical Research Letters*, vol 19, no 2, p 215-218. Doi: 10.1029/91GL02788
- IPCC (2007): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 7-22.
- Keith D. W. (2000): Geoengineering the Climate: History and prospect. *Annual Review of Energy and the Environment*, vol 25, p 245-284. Doi:10.1146/annurev.energy.25.1.245
- Keith D. W. (In press). Engineering the Planet. *Climate Change Science and Policy*. S. Schneider and M. Mastrandrea eds.
- Kellogg W. W. og Sneider S. H. (1974): Climate Stabilization: For Better or for Worse? *Science*, vol 186, no 4170, p 1163 - 1172. Doi: 10.1126/science.186.4170.1163
- Kjærgård, E. B. (2008): Sosiale kostnader av karbon. Tilpasning og fordeling av ressurspris og miljøkostnader. *Universitetet i Bergen*. Masteroppgave.
- Orr J. C., Fabry V. J., Aumont O., Bopp L., Doney S. C., Feely R. A., Gnanadesikan A., Gruber N., Ishida A., Joos F., Key R. M., Lindsay K., Maier-Reimer E., Matear R., Monfray P., Mouchet A., Najjar R. G., Plattner G. K., Rodgers K. B., Sabine C. L., Sarmiento J. L., Schlitzer R., Slater R. D., Ian J. Totterdell, Weirig M. F., Yamanaka Y. og Yool A. (2005): Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, vol 437, p 681-686. Doi:10.1038/nature04095
- Marchetti C. (1977): On Geoengineering and the CO2 problem. *Climatic Change*, vol 1, p 59-68. Doi:10.1007/BF00162777
- Marsh S., Wurl D. og Grainger R. (2004): Measurement of Sulphur in the Stratosphere from SAGE II, Workshop on Sulphuric Acid Aerosols, *Cambridge, UK*
- Matthews H. D. og Caldeira K. (2007): Transient climate-carbon simulations of planetary geoengineering. *Proc. Natl Acad. Sci.*, vol 104 no 24, p 9949-9954
- Nordhaus, W. (2006): After Kyoto: Alternative Mechanisms to Control Global Warming. *American economic review*, vol 96, no 2, p 31-34. Doi: 10.1257/000282806777211964.

- Nordhaus, W. (2007): Economics: Critical Assumptions in the Stern Review on Climate Change. *Science*, vol 317, no 5835, p 201-202. Doi: 10.1126/science.1137316
- Nordhaus W. (2008): A question of Balance: Economic modelling of global warming. New Haven, *Yale University Press*
- Peck S. C. og Teisberg, T. J. (1994): Optimal carbon emission trajectories when damages depend on the rate or level of global warming. *Climatic Change*, vol 28, no 3, p 289-314.
- Rasch P. J., Crutzen P. J., and Coleman D. B. (2008): Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols: The role of particle size. *Geophysical Research Letters*, vol 35, no 3, L02809. Doi:10.1029/2007GL032179
- Rasch P. J., Tilmes S., Turco R. P., Oman L., Chen C. C., Stenchikov G. L. og Garcia R. R. (2008): An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosoles. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol 336, no 1882, p 3843-3862. Doi: 10.1098/rsta.2008.0131
- Robock A., Marquardt A. B., Kravitz B. og Stenchikov G. (2009): The practicality of geoengineering. Submitted to *Geophysical Research Letters*
- Schelling, T. (1995): Intergenerational discounting. *Energy Policy*, vol 23, no 4/5, p 395-401.
- Smetacek V. og Naqvi S. W. A. (2008): The next generation of iron fertilization experiments in the Southern Ocean. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol 336, no 1882, p 3947-3967. Doi:10.1098/rsta.2008.0144
- Stern N (2006): The Economics of Climate Change: The Stern Review. *Cambridge University Press*.
- Tilmes S., Müller R. og Salawitch R. (2008): The Sensitivity of Polar Ozone Depletion to Proposed Geoengineering Schemes. *Science*, vol 320, no 5880, p 1201 - 1204. Doi: 10.1126/science.1153966
- Trenberth K. E. og Dai A. (2007): Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. *Geophysical Research Letters*, vol 34, L15702, Doi:10.1029/2007GL030524
- United Nations Framework Convention on Climate Change (2009): Kyoto Protocol Status of Ratification. [Internett], Bonn, Tyskland. Tilgjengelig fra: http://unfccc.int/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/9483.php [Nedlastet 11.05.2009]

- Virgoe, J. (2008): International governance of a possible geoengineering intervention to combat climate change. *Climatic Change*. Doi: 10.1007/s10584-008-9523-9
- Walter K. M., Zimov S. A., Chanton J. P., Verbyla D. og Chapin F. S. III (2006): Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. *Nature*, vol 443, no 7107, p 71-75. Doi:10.1038/nature05040
- Weitzman, M. L. (2007): A Review of The Stern Review on the Economics of Climate Change, vol 45, no 3, p 703-724. Doi: 10.1257/jel.45.3.703
- Wigley T. M. L. (2006): A Combined Mitigation/Geoengineering Approach to Climate Stabilization. *Science*, vol 314, no 5798, p 452 - 454. Doi: 10.1126/science.1131728