

*Tom Karlsen*

**Optimal karbonbeskatning og  
virkningen på norsk  
petroleumsformue**

Notater

## Forord

Dette notatet, inngår i prosjektet «CO<sub>2</sub> avgiftenes virkning på petroleumsformuen» som er finansiert av Petroleumsprogrammet i Norges Forskningsråd. Arbeidet på dette prosjektet i 1994 er dokumentert i S. Kverndokk og K. E. Rosendahl: *CO<sub>2</sub>-avgifter og petroleumsformue*, Økonomiske analyser 1/95. I tillegg til å inngå som en del av det ovennevnte prosjektet, har notatet tjent som hovedoppgave ved Sosialøkonomisk institutt, Universitetet i Oslo.

Arbeidet har tatt utgangspunkt i en langsiktig modell hvor konsum av fossile brensler, som er en begrensa ressurs, både gir en nyttegevinst og en skade som følge av en framtidig drivhuseffekt. De optimale utvinningsbanene og de optimale CO<sub>2</sub> avgiftsbanene er beregnet. Det er spesielt sett på to mulige formuleringer av skaden; en hvor den totale skaden er en funksjon av atmosfærisk CO<sub>2</sub> konsentrasjon, og en hvor den er en funksjon av endringen i denne konsentrasjonen. Til slutt er det sett på virkningene på både den globale og den norske petroleumsformuen hvis de optimale avgiftene innføres internasjonalt.

April 1995

Snorre Kverndokk  
Prosjektleder

# 1. Innledning<sup>1</sup>

Jean Baptiste Fourier beskrev i 1824 den naturlige drivhuseffekten ved å trekke en analogi mellom atmosfærens virkemåte og en beholder tildekket av glass. Han kom fram til at atmosfæren hadde en bestemt konsentrasjon av forskjellige gasser som bevirket at noe av den utgående infrarøde strålingen fra jorden ble absorbert og sendt tilbake slik at jordoverflaten og de lavere lag av atmosfæren ble varmet opp. Disse gassene har senere blitt kalt drivhusgasser. CO<sub>2</sub> er den klimagassen hvor omfanget av utslipp er størst. Utslippene av CO<sub>2</sub> kommer i hovedsak fra forbrenning av fossile brensler. Noen andre viktige drivhusgasser er N<sub>2</sub>O og CH<sub>4</sub>. Det er effektene fra blant annet disse som gjør at jordas middeltemperatur er på +15° C, og ikke -18° C som den ellers ville vært.

Etter dette tok det omkring 70 år før Svante Arrhenius introduserte muligheten for at det også kunne være en drivhuseffekt forårsaket av menneskelig aktivitet. Arrhenius' hypotese var at det økte forbruket av kull i forbindelse med industrialiseringen kunne føre til en øket konsentrasjon av CO<sub>2</sub> i atmosfæren, men hadde som arbeidshypotese at det meste av dette ville lagres i havet slik at det sannsynligvis ikke ville gi store endringer i temperaturen. Uansett problematiserte ikke Arrhenius dette fordi en heving av den globale middeltemperaturen etter hans mening ikke ville gi noen uheldige virkninger, men snarere være ønskelig.

Man må frem til 1965 før drivhuseffekten første gang blir omtalt som et miljømessig problem, og til midten av 80-tallet for å se at drivhuseffekten utvikler seg fra å være av moderat vitenskapelig interesse til å bli en av vår tids globale bekymringer. Blant de utløsende faktorer var en miljøkonferanse avholdt i Østerrike i 1985. Initiativtakerne til denne var United Nations Environmental Programme, the World Meteorological Organisation og International Council of Scientific Unions. Etter denne konferansen konkluderte man med at man som følge av den økende konsentrasjonen av drivhusgasser kunne få en global oppvarming i løpet av første halvdel av neste århundre, som er større enn hva man noen gang tidligere hadde opplevd. Av den grunn ønsket man å jobbe videre med problemstillinger knyttet til drivhuseffekten. Dette førte til opprettelsen av Advisory Group on Greenhouse Gases (AGGG), som hadde dette som formål. Denne organisasjonen organiserte oppfølgende seminarer i årene som fulgte og ved the World Conference on the Changing Atmosphere i Toronto 1988 ga den anbefalinger om å redusere utslippene av CO<sub>2</sub> med 20% fra 1988 til 2005. De møtene som ble holdt på politisk nivå ga ikke grunnlag for en avtale om så drastisk endringer i CO<sub>2</sub> utslippene. Det etablerte imidlertid global oppvarming som et politisk

---

<sup>1</sup>Takk til K.A. Brekke, S. Kverndokk og K.E. Rosendahl.

problem som man ønsket å studere videre.

Neste skritt i retning av en avtale omkring utslipp av karbondioksid (CO<sub>2</sub>) var Rio-konferansen i 1992. Denne konferansen endte med en enighet om å stabilisere utslippene av drivhusgasser på et nivå som forhindrer at den kummulative effekten av menneskeskapte utslipp, som f. eks. avskogning og forbruk av fossile brensler, ikke skulle forårsake skader på klimasystemet. Dette skulle iverksettes innenfor en tidsramme som var tilstrekkelig for at økosystemet på en naturlig måte kunne tilpasses de klimatiske endringene. Det ble ikke underskrevet noen forpliktende avtale om dette. Enigheten som oppsto etter Rio-konferansen ga derfor beskjedne konkrete resultater, men den bidro til en erkjennelse om at fremtidens store miljøutfordring kunne være en global oppvarming forårsaket av drivhuseffekten. Rio-konferansen unnfanger også til en viss grad en ny forståelsen av selve fenomenet gjennom det meningsinnhold man ga drivhuseffekten. Erkjennelsen om at global oppvarming er et globalt miljøproblem som bare kan løses internasjonalt har preget debatten videre. Man hadde da i tankene at klimaendringer bare avhenger av verdens samlede utslipp og ikke hvordan disse er fordelt mellom land slik at problemet bare kunne løses gjennom koordinerte handlinger landene i mellom. Man skylder selvfølgelig å gjøre oppmerksom på at denne erkjennelsen på ingen måte var ny. Miljøorganisasjoner og andre som hadde arbeidet mye med drivhuseffekten hadde naturligvis hatt denne forståelsen av problemet lenge, men hadde ikke presentert den med en slik tyngde som Rio-konferansen klarte. Det er også gjort kjent at klimaendringene forårsaket av drivhuseffekten er av en slik karakter at om det finnes et kritisk nivå på konsentrasjonen som ikke bør overstiges, vil utslippsreduksjoner være mer effektive jo tidligere disse blir satt i verk. Det vil også være slik at man vil oppleve stor forskjell i tid mellom når eventuelle tiltak blir satt i verk og når man vil oppleve effektene av disse.

Den videre forskningen omkring drivhuseffekten har i stor grad vært knyttet til "the Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC). Forskningen har i hovedsak vært rettet inn mot tre sentrale problemstillinger: a) en grundigere forståelse omkring global oppvarming; b) kartlegge virkningene av denne og c) strategier med henblikk på å redusere skadevirkningene. Det er meningen at en oppdatert evaluering av de klimamessige konsekvensene av drivhuseffekten skal foreligge i 1995. Her skal man prøve å kvantifisere noen av skadene og fordelene drivhuseffekten vil kunne gi.

Økonomer har vært opptatt av problemstillinger knyttet til drivhuseffekten siden slutten av 70-tallet. I første omgang var innsatsen innrettet mot å avklare og skaffe seg kunnskap om problemet for så å bygge opp et modellapparat hvor global oppvarming på en naturlig måte kunne inngå. Også på dette feltet har man fått en dreining i retning av å se på virkemidler

med henblikk på å redusere utslippene av drivhusgasser. Dette skjedde i etterkant av den tidligere omtalte Toronto-konferansen. Den økonomiske forskningen har gjerne knyttet seg til begrepene kostnadseffektivitet og effisiens og har til hensikt å gi svar på hvordan man på en mest mulig effektiv måte kan redusere utslippene av drivhusgasser og hvor store utslippsreduksjonene bør være. Etter Toronto-konferansen har litteraturen og antall økonomiske modeller på området hatt en betydelig vekst. Særlig har begynnelsen av 90 åra og frem til i dag vært en tid med betydelige bidrag. Disse har kommet enten i form av helt nye modeller eller utvidelser av eksisterende modeller slik at man tar hensyn til at konsum av varer og tjenester der fossilt brensel inngår i produktfunksjonen vil gi eksterne effekter, og på den måten påvirke menneskenes velferd. Nå er det slik at nesten alle OECD land har sine egne modeller der forbruk av varer og tjenester som gir utslipp av klimagasser eksplisitt inngår. I tillegg er det også laget enkelte globale modeller.

Det har i de senere årene vært foretatt en rekke analyser i arbeidet med å kartlegge de samfunnsøkonomiske kostnadene ved utslipp av drivhusgasser. Det er imidlertid bare nylig at forsøk har blitt gjort for å tallfeste kostnadene. Den vesentligste delen av arbeidet har vært klimaendringenes virkning på evnen til å produsere jordbruksvarer. Denne forskningen har resultert i en antagelse om at den nåværende produksjonen av landbruksvarer trolig blir flyttet til nordligere breddegrader. Man har også sett på kostnader i forbindelse med en stigning av havnivået, dødelighet, endring av drikkevannsforekomster og at enkelte arter, som er mindre tilpasningsdyktige, dør ut. Det er videre hevdet at klimaendringer vil føre til endringer i økosystemet og at man vil oppleve mer av ekstreme værtyper som oversvømmelser og tørkeperioder. Forekomsten av klimarelaterte sykdommer som hetslag, malaria osv. vil også trolig nå områder hvor disse ikke har forekommet tidligere. Dessuten er det sannsynlig at hyppigheten av slag og hjerteattakk vil øke. Når man skal vurdere om dette skal få betydning for vårt konsum av fossile brensl, den viktigste kilden til drivhusgass utslipp, må man sette dette sammen med de gevinster forbruk av fossilt brensel gir oss. Gevinstene er gjerne knyttet til materielle goder som f.eks. oppvarming og samferdsel. Om skadene blir vurdert til å være større enn gevinstene er det et signal om at dagens tilpasning er inoptimal.

Det har vist seg at de kostnadsanslag som har fremkommet i f. eks. Cline (1992a) og Nordhaus (1991b, c) er svært like når det gjelder de totale effektene. Dette til tross for at de enkelte komponentene i beregningene er vurdert svært forskjellig. Resultatene antyder at et nivå på  $2 \times \text{CO}_2$ , det vil si to ganger preindustrielt nivå av  $\text{CO}_2$  i atmosfæren, vil gi en kostnad på mellom 1% og 2% av BNP. Det er trolig at denne atmosfæriske konsentrasjonen av  $\text{CO}_2$ , vil kunne måles omkring midten av neste århundre. Preindustrielt nivå tilsvarer en konsentrasjon på ca. 280 ppm (parts per million by volume), mens dagens nivå tilsvarer 353 ppm (1990). De anslag som foreligger tilsier at en dobling av  $\text{CO}_2$  konsentrasjonen skal gi

en global temperaturøkning på mellom 1,5-4,5°C, med 2,5°C som det mest sannsynlige.

Det finnes i hovedsak to klasser av modeller som beregner kostnader ved utslippsreduksjoner. "Top down" modeller, som vanligvis er generelle likevektsmodeller eller makroressursallokeringsmodeller, der man antar effisient produksjon og at de relative priser bestemmer ressursallokeringen. I "bottom up" modellene ligger det ingen slike antagelser om effisiens, og derfor fremkommer det at omlag 20-25 % reduksjon i utslippsnivået kan gjennomføres uten noen ekstra kostnad. D.v.s. at om man tar i bruk den beste tilgjengelige teknologien vil man uten ekstra kostnader redusere utslippene med mellom 20 og 25%. Modellene av denne typen er mer teknologisk orientert og har tradisjonelt rettet seg mot energikildenes tilgjengelighet og yteevne. De er av den grunn gjerne utarbeidet av mennesker i naturvitenskapelige miljøer.

Blant økonomer har den vanlige tilnærmingen til global oppvarming vært nytte-kostnads orienterte metoder. På denne måten har man kunnet fått sammenstilt kostnadene ved forbruk av fossilt brensel med fordelene det gir oss. I de fleste økonomiske modeller er det slik at utslipp av CO<sub>2</sub> gjerne blir betraktet som den eneste bidragsyter til drivhus-effekten. Dette har sin årsak i at CO<sub>2</sub> står for omlag 50 - 80 % av den menneskeskapte drivhuseffekten og at utslippene av CO<sub>2</sub> er lettere å overvåke siden de er så nært knyttet til de enkelte lands forbruk av fossile brenslere og materielle produksjon. Effektivitetshensyn skulle derimot tilsi at alle klimagasser inkluderes i analysen siden man da kan få svar på hvor det kreves minst innsats av ressurser for å redusere effekten av drivhusgassene. Det er imidlertid trolig at en eventuell forpliktende internasjonal avtale i første omgang bare vil inneholde enighet om CO<sub>2</sub>.

Teoriene er i stor grad preget av at man bruker enten miljøøkonomiske eller ressursøkonomiske fremstillinger. Det er derimot et begrenset omfang av modeller som tar hensyn til at et vesentlig bidrag til global oppvarming skyldes bruk av ikke-fornybare ressurser og bringer dette eksplisitt inn i analysen. I denne fremstillingen skal vi flette sammen de miljøøkonomiske og ressursøkonomiske teoriene slik at vi tar hensyn til at fossile brenslere er en endelig ressurs, og at bruken av dem gir miljømessige negative eksternaliteter. Vi skal studere optimale baner for globale CO<sub>2</sub> avgifter. Videre skal vi studere forløpet til en optimal karbonskatt under to forskjellige spesifikasjoner av den skaden drivhuseffekten påfører oss. En der skaden avhenger av den atmosfæriske konsentrasjonen av CO<sub>2</sub>, og en der den avhenger av endringstakten i denne konsentrasjonen. En global CO<sub>2</sub> avgift vil kunne ha stor betydning for framtidige oljepriser og dermed også for Norges petroleumsformue. Ut fra et forvaltningsståsted vil det være interessant å se på hvordan en slik avgift vil påvirke petroleumsformuen og våre inntekter fra denne. Vi skal derfor studere hvordan en optimal karbonbeskatning via ressursrenta endrer petroleumsformuen, og vi gir noen kvantitative resultater for hvordan konsument- og produsentprisene vil utvikle seg, d.v.s. hvem som

belastes når en global avgift implementeres. Kostnadsforholdene i Norge i forbindelse med å hente opp petroleum er vesentlig forskjellig fra andre aktører i petroleumsmarkedet. Vi skal derfor først se på verden under et og så gi resultater for Norge der vi tar hensyn til at produksjonskostnadene er høyere og dermed ressursrenta mindre enn for gjennomsnittet av petroleumproduserende land.

Det teoretiske arbeidet knyttet til denne problemstillingen er foretatt av Kverndokk (1994). Kverndokk har laget en modell der man søker å maksimere det globale samfunnets velferd gitt at man har en ikke-fornybar ressurs og at det er negative eksterne effekter forbundet med å bruke denne, enten som konsumgode eller som innsatsfaktor i produksjonsprosesser.

## 2. Den optimale CO<sub>2</sub> avgiften<sup>2</sup>

Vi skal her presentere en modell som beskriver det globale samfunnets velferd ved å bruke fossile brensler. Modellen er bygget opp som et typisk kontroll-problem hvor en samfunnsplanlegger søker å maksimere den neddiskonterte velferden til det globale samfunnet. Den opererer med en rekke forenklinger og fanger derfor ikke opp alle forhold som gjør seg gjeldende i petroleumsmarkedet. Blant annet tar man ikke hensyn til at fossile brensler består av en rekke forskjellige stoffer med ulik grad av karboninnhold som i produksjonssammenhenger er substituerbare. Dessuten tar den ikke hensyn til at det finnes en "backstop technology" som kan benyttes når prisen på petroleum blir for høy eller når ressursen er uttappet. Videre ser vi på en frikonkurranse-løsning der markedsimperfeksjoner som f. eks. eksistensen av store betydningsfulle produsenter som har vesentlig markedsrett ikke betraktes. Modellen forutsetter også at produksjon er lik konsum i hver periode. Samfunnsplanleggerens oppgave blir da å finne en bane for uttappingen av reservene som tilfredsstillende:

$$(1) \quad \begin{aligned} & \text{maksimer} \quad \int_0^{\infty} e^{-rt} [u(x_t) - \bar{c}x_t - D(S_t)] dt \\ & \text{gitt} \quad \dot{S}_t = x_t - \delta S_t \\ & \quad \quad \dot{A}_t = -x_t \\ & \quad \quad x_t \geq 0 \end{aligned}$$

$x$  er konsum og utvinning av fossile brensler målt i karbonenheter.  $u(x)$  er samfunnets nytte av dette konsumet og vi antar konstante marginale utvinningskostnader  $\bar{c}$  i motsetning til Kverndokks analyse der utvinningskostnadene er beskrevet som en stigende funksjon av hva som er tappet ut tidligere.  $S$  er den atmosfæriske konsentrasjonen av karbon utover preindustrielt nivå, og  $D(S)$  er de negative eksternalitetene assosiert med konsentrasjoner over dette nivået.  $r > 0$  er en diskonteringsrente og  $\delta$  er depresieringsraten for karbon i atmosfæren. Bakgrunnen for denne depresieringsraten er at karbonet etter hvert tas opp i havet eller på annen måte forsvinner fra atmosfæren.  $A$  er den totale beholdningen av fossile brensler, og som det går frem av den andre bibetingelsen reduseres denne med den utvinningen som til enhver tid finner sted.

Nyttefunksjonen er antatt å ha de egenskaper som man vanligvis opererer med i konsumentteorien. D.v.s. at den førsteordensderiverte er positiv og den annenordensderiverte

---

<sup>2</sup>Denne delen bygger på Kverndokk (1994).



negativ  $\{u'(x) > 0 \text{ og } u''(x) < 0\}$ . Vi gjør også den antagelse at  $u'(0) < \infty$ . I teorien er det vanlig å betrakte det preindustrielle nivået på  $\text{CO}_2$  konsentrasjonen som et likevektsnivå. Det betyr at på lang sikt, når beholdningen av fossile brensler er uttappet, vil konsentrasjonen gå mot dette nivået ( $S \rightarrow 0$ ). Skadefunksjonen er en stigende konveks funksjon av den atmosfæriske konsentrasjonen ( $D'(S) > 0$  og  $D''(S) > 0$  for alle  $S > 0$ ). Skadene er reversible slik at  $D(S) \rightarrow 0$  når  $S \rightarrow 0$ .

På grunnlag av modellen over, ønsker vi å finne den optimale  $\text{CO}_2$ -avgiften. Den løpende verdiformuleringen av Hamilton-funksjonen blir da:

$$(2) \quad H = u(X_t) - \bar{c}x_t - D(S_t) - \lambda_t x_t + \mu_t(x_t - \delta S_t)$$

Nødvendige betingelser for maksimum er at:

$$(3) \quad \frac{\partial H}{\partial x_t} = u'(x_t) - \bar{c} - \lambda_t + \mu_t = 0$$

$$(4) \quad \dot{\lambda}_t - r\lambda_t = -\frac{\partial H}{\partial A_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{\lambda}_t = r\lambda_t$$

$$(5) \quad -\frac{\partial H}{\partial S_t} = D'(S_t) + \delta\mu_t = \dot{\mu}_t - r\mu_t$$

$$(6) \quad \dot{A}_t = -x_t$$

$$(7) \quad \dot{S}_t = x_t - \delta S_t$$

$$(8) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e^{-rt} \lambda_t A_t = 0$$

$$(9) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e^{-rt} \mu_t S_t = 0$$

Skyggeprisene representert ved  $\mu_t$  og  $\lambda_t$  er assosiert med henholdsvis den akkumulerte

konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> og beholdningen av fossile brensler. Ressursrenta er lik  $\lambda_t$ . Denne oppstår fordi petroleum kan betraktes som en ikke fornybar ressurs, der avkastningen på petroleumsformuen utover normal kapitalavkastning utgjør ressursrenten. Egentlig er ressursrenta en bestanddel av den mer omfattende oljerenta som består av ressursrente, tradisjonell grunnrente og monopolrente<sup>3</sup>. Vi tenker oss her at man ikke har noen grunnrente ei heller monopolrente. (4) og definisjonen på ressursrenta gir oss da:

$$(10) \quad \lambda_t = \lambda_0 e^{rt}$$

$$(11) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_t = \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_0 e^{rt} = \infty$$

Grunnen til at ressursrentas grenseverdi er uendelig er modelleringen av kostnadene. Med stigende marginale kostnader ville denne være 0 slik det ville vært et tidspunkt da uttappingen ville være så dyr at den ikke vil bidra til å øke nytten. Dette tilfellet forteller oss at ressursrenten vokser eksponensielt med renten  $r$  inntil ressursen er tappet ut. Vi observerer også at ressursrenten er entydig bestemt om vi kjenner ressursrenten på et gitt tidspunkt og diskonteringsrenten. Intuitivt betyr dette, siden  $u'(x) < \infty$ , at det ikke vil være mulig å få solgt petroleum når ressursrenten har blitt tilstrekkelig stor. Det vil være sammenfall i tid mellom dette og når ressursen er uttappet slik at petroleum blir akkurat så dyrt at ingen vil kjøpe på det tidspunkt da reservene er utvunnet. Dette er i samsvar med teorien for utvinning av ikke-fornybare naturressurser.

#### **Den optimale avgiften når skaden er en funksjon av den atmosfæriske konsentrasjonen**

Over har vi beskrevet skaden som en stigende funksjon av den atmosfæriske konsentrasjonen av karbon. I det ligger at skadevirkningene er direkte knyttet til nivået på den atmosfæriske konsentrasjonen og skadevirkningene er større jo større konsentrasjonen er. Konkret ønsker vi her å finne et uttrykk for den optimale CO<sub>2</sub>-avgiften når skaden er modellert på denne måten. Siden  $x_t \rightarrow 0$  når  $t \rightarrow \infty$ , vet vi at  $S \rightarrow 0$ . Vi vet også at  $S$  ikke kan stige over alle grenser siden  $A$  er gitt. I følge Teorem 16 kapittel 3 med notene 20 og 21 hos Seierstad og Sydsæter (1987) har vi da at:

$$(12) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e^{-rt} \mu_t = 0$$

$\mu_t$  er skyggeprisen assosiert med den akkumulerte konsentrasjonen av karbon i atmosfæren opp til tidspunkt  $t$ . En optimal avgift på karbon på tidspunkt  $t$ ,  $\theta_t$ , er definert som  $\theta_t = -\mu_t$ . Fra (5), (12) og at  $D'(0) = 0$  får vi at:

---

<sup>3</sup>Statistisk Sentralbyrå (1992): Naturressurser og miljø.

$$(13) \quad \theta_t = \int_t^{\infty} e^{-(r+\delta)(\tau-t)} D'(S_\tau) d\tau$$

$$(14) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \theta_t = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{D'(S_t)}{(r+\delta)} = 0$$

Ligning (13) sier at den optimale avgiften skal være lik den neddiskonterte verdien av fremtidig skade. Ifølge (14) vil en optimal avgift konvergere mot 0 når  $t \rightarrow \infty$ . Intuisjonen bak dette er at når  $S \rightarrow 0$  vil det ikke være kostnader forbundet med en marginal økning av den atmosfæriske konsentrasjonen. Om vi betrakter (14) og antar at  $(r + \delta) \neq 0$  og bruker Delvis integrasjon får vi etter litt manipulasjon:

$$(15) \quad \theta_t = \frac{D'(S_t)}{(r+\delta)} + \frac{1}{(r+\delta)} \int_t^{\infty} e^{-(r+\delta)(\tau-t)} \frac{\partial D'(S_\tau)}{\partial \tau} d\tau$$

Om vi benytter oss av definisjonen av optimal avgift og setter (15) inn i (5) får vi:

$$(16) \quad \dot{\theta}_t = \int_t^{\infty} e^{-(r+\delta)(\tau-t)} D''(S_\tau) \dot{S}_\tau d\tau$$

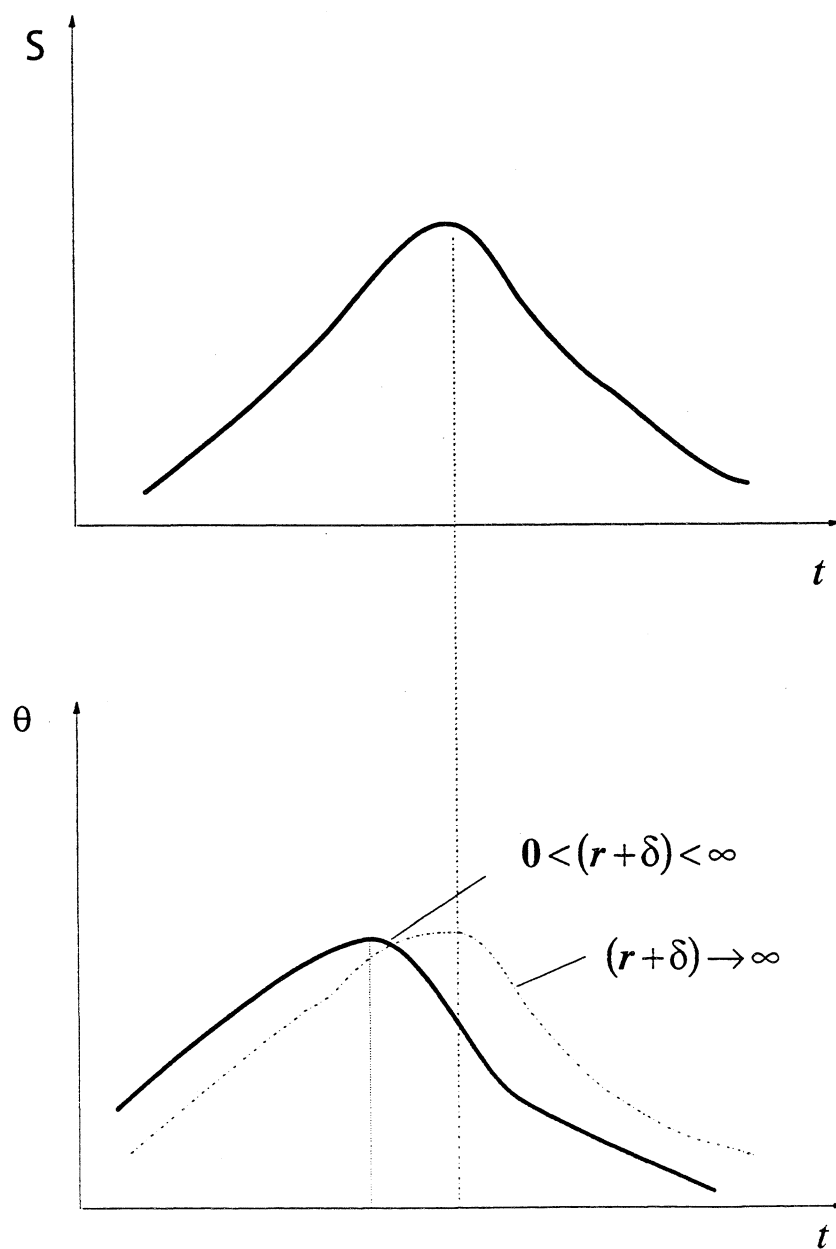
Ved å benytte (14) og at  $S \rightarrow 0$  får vi at:

$$(17) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\theta}_t = \lim_{t \rightarrow \infty} (r+\delta)\theta_t - \lim_{t \rightarrow \infty} D'(S_t) = 0$$

(17) forteller oss at avgiften vil konvergere jevnt mot null. Som det kommer fram av (13) så vil vi ha en positiv avgift så lenge marginal skade er positiv. På lang sikt vil den nærme seg 0 fordi den atmosfæriske konsentrasjonen av  $\text{CO}_2$  vil havne tilbake på sitt likevektsnivå. Utviklingen av karbonavgiften over tid avhenger av om den omtalte konsentrasjonen øker eller avtar.

Kverndokk (1994) har vist at den atmosfæriske konsentrasjonen over preindustrielt nivå,  $S$ , først vil stige for så å falle tilbake til sitt likevektsnivå. Essensielt for denne konklusjonen er at uttappingen av reservene vil falle over tid og at  $\text{CO}_2$  er en stabil forbindelse som ikke reagerer med andre stoffer, men som etter hvert lagres i andre reservoar som f. eks. havet.

Det vil derfor være en gradvis reduksjon i konsentrasjonen da uttappingen når et nivå som er mindre enn det nivået som til enhver tid lagres i andre resipienter. Den optimale avgiften vil ha et tilsvarende forløp som konsentrasjonen. Som vi ser av figur 1 har både atmosfærisk konsentrasjon og avgift et maksimumspunkt. Formen på kurvene er i samsvar med hva som er vist i Kverndokk (1994). Ta utgangspunkt i et tilfelle der den atmosfæriske konsentrasjonen fra starttidspunktet øker.



Figur 1.

Det er slik vi ville forvente det skulle være om vi f. eks. startet i dag. Vi har derfor at  $S$  initialt er positiv, og  $S_0$  ikke er for høy. Siden forbruk av fossile brensler gir en oppbygging av karbon i atmosfæren og denne ressursen er endelig, vil den atmosfæriske konsentrasjonen omsider falle. Om konsentrasjonen har en utvikling som vist i figuren vil det være slik at den optimale avgiften vil falle før den atmosfæriske konsentrasjonen av karbon faller, gitt at  $0 < (r+\delta) < \infty$ . Det betyr at det finnes en periode der man har en fallende optimal avgift og en økende konsentrasjon av karbon i atmosfæren. Vi vet at den marginale skaden vil være større jo høyere atmosfærisk konsentrasjon er. Om vi da antar at  $r \rightarrow \infty$ , slik at bare den nåværende perioden teller og optimal avgift er lik denne periodens marginale skade, vil avgiften øke så lenge skaden øker og synke så lenge skaden synker. Anta så at  $0 < (r+\delta) < \infty$ , dvs. at  $\text{CO}_2$  finnes i atmosfæren utover denne perioden og at skader i framtidige perioder teller. Siden den marginale skaden en gang i framtida vil falle som følge av en redusert konsentrasjon av karbon, vil en enhet sluppet ut før konsentrasjonen når sitt maksimum gi større skade enn en enhet sluppet ut idet konsentrasjonen når sitt maksimum. På den annen side vil skaden av en enhet sluppet ut i begynnelsen av planleggingsperioden være i atmosfæren i et tidsrom da den atmosfæriske konsentrasjonen av karbon er liten. Derfor vil denne gi mindre skade enn en enhet som slippes ut når konsentrasjonen er nær sitt maksimum. Dette fører til at den optimale avgiften, som skal avspeile alle kostnader forbundet med utslipp av en enhet karbon, vil nå sitt maksimum en tid mellom tidspunkt 0 og det tidspunkt der den atmosfæriske konsentrasjonen av karbon når sitt maksimum.

### Den optimale avgiften når skaden er en funksjon av endringen i den atmosfæriske konsentrasjonen

Den vanlige måten å modellere skaden av global oppvarming på er som over, men det er også gode argumenter for å betrakte skaden som avhengig av endringstakten i den atmosfæriske konsentrasjonen og ikke bare nivået. Det kan selvsagt være mange grunner til dette, men et hovedargument er at vårt økologiske system ikke er i stand til å tilpasse seg en endring i den globale middeltemperaturen om denne temperaturendringen kommer for raskt. Problemstillingen kan da formuleres på følgende måte:

$$(18) \quad \text{maksimer} \int_0^{\infty} e^{-rt} [u(x_t) - \bar{c}x_t - d(\dot{S}_t)] dt$$

$$\text{gitt} \quad \begin{aligned} \dot{A}_t &= -x_t \\ \dot{S}_t &= x_t - \delta S_t \\ x_t &\geq 0 \end{aligned}$$

Vi ser her at forskjellen i modellen består i at selve skadefunksjonen er forskjellig og at nivået er erstattet med endringen som argument i funksjonen. Arbeidshypotesen videre er at både endringer som impliserer et varmere og et kaldere globalt klima forårsaker negative eksternaliteter. Det gir kostnader ved å tilpasse seg et kaldere såvel som et varmere klima, og disse kostnadene er større jo større endringene er. Vi antar at skaden er en konveks funksjon av endringstakten til den akkumulerte konsentrasjonen av karbon i atmosfæren. Konveksitetsegenskapene innebærer at:

$$(19) \quad \begin{aligned} d'(\dot{S}) > 0 \text{ for } \dot{S} > 0 \quad \wedge \quad d'(\dot{S}) < 0 \text{ for } \dot{S} < 0 \\ d(\dot{S}) \geq 0 \quad \forall \dot{S}, \quad d(0) = 0 \\ d''(\dot{S}) > 0 \quad \forall \dot{S} \end{aligned}$$

Den løpende verdiformuleringen av Hamiltonfunksjonen blir:

$$(20) \quad H = u(x_t) - \bar{c}x_t - d(x_t - \delta S_t) - \lambda_t x_t + \varpi_t(x_t - \delta S_t)$$

De nødvendige betingelsene for maksimum blir:

$$(21) \quad \frac{\partial H}{\partial x_t} = u'(x_t) - \bar{c} - d'(\dot{S}_t) - \lambda_t + \varpi_t = 0$$

$$(22) \quad \dot{\lambda}_t - r\lambda_t = -\frac{\partial H}{\partial A_t} = 0$$

$$(23) \quad \dot{\varpi}_t - r\varpi_t = -\frac{\partial H}{\partial S_t} = \delta d'(\dot{S}_t) + \delta \varpi_t$$

$$(24) \quad \dot{A}_t = -x_t$$

$$(25) \quad \dot{S}_t = x_t - \delta S_t$$

$$(26) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e^{-rt} \lambda_t A_t = 0$$

$\varpi_t$  er som  $\mu_t$  en skyggepris relatert til den akkumulerte atmosfæriske konsentrasjonen av karbon. På samme måte som tidligere kommer vi fram til at:

$$(27) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\pi t} \omega_t S_t = 0$$

$$(28) \quad \omega_t = \delta \int_t^{\infty} e^{-(r+\delta)(\tau-t)} d'(\dot{S}_\tau) d\tau$$

$$(29) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \omega_t = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\delta d'(\dot{S}_t)}{(r+\delta)} = 0$$

I det  $\omega_t$  representerer nytteøkningen av en marginal økning av den atmosfæriske konsentrasjonen på tidspunkt  $t$ , vil denne, intuitivt nok, gå mot 0 siden  $S_t \rightarrow 0$  når  $t \rightarrow \infty$ .  $\omega_t$  kan være både negativ og positiv siden  $d'(\dot{S}) > 0$  for  $\dot{S} > 0$  og  $d'(\dot{S}) < 0$  for  $\dot{S} < 0$ . Økt utvinning i dag gir høyere  $\dot{S}$  og en større  $S$  i framtida. Stor  $S$  gir en høyere depresiering og lavere  $\dot{S}$ . Vi vil da ha at en stor  $S$  gir en mindre  $\dot{S}$ , noe som er bra hvis  $\dot{S}$  initialt er positiv.  $\omega$  vil derfor være positiv hvis  $\dot{S} > 0$  over en tilstrekkelig lang periode. Tidsutviklingen til  $\omega_t$  er gitt ved:

$$(30) \quad \dot{\omega}_t = \delta \int_t^{\infty} e^{-(r+\delta)(\tau-t)} d'(\dot{S}_\tau) (\dot{x}_\tau - \delta \dot{S}_\tau) d\tau$$

$$(31) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\omega}_t = \lim_{t \rightarrow \infty} (r+\delta) \omega_t - \lim_{t \rightarrow \infty} \delta d'(\dot{S}_t) = 0$$

For å finne den optimale avgiften skal vi se på hvordan konsument- og produsentprisene avviker fra hverandre. Nyttedefunksjonen er et uttrykk for konsumentenes totale betalingsvillighet for fossile brensler. Dette fører til at marginalnyttan er lik konsumentprisen ( $u'(x) = p$ ). Om vi benytter dette i tillegg til (21) får vi følgende sammenheng mellom konsument- og produsentprisen:

$$(32) \quad p_t = \bar{c} + \lambda_t + d'(\dot{S}_t) - \omega_t$$

Avgiften er størrelsen som separerer konsument- og produsentprisene. Produsentprisen er gitt ved:

$$(33) \quad q_t = \bar{c} + \lambda_t$$

Vi har da at den optimale avgiften  $\sigma$  er differansen mellom disse.

$$(34) \quad \sigma_t = d'(\dot{S}_t) - \varpi_t = d'(\dot{S}_t) - \delta \int_t^{\infty} e^{-(r+\delta)(\tau-t)} d'(\dot{S}_\tau) d\tau$$

Egenskapene til denne avgiften er:

$$(35) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_t = \lim_{t \rightarrow \infty} d'(\dot{S}_t) - \lim_{t \rightarrow \infty} \varpi_t = 0$$

$$(36) \quad \dot{\sigma}_t = d''(\dot{S}_t)(\dot{x}_t - \delta \dot{S}_t) - \dot{\varpi}_t$$

$$(37) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\sigma}_t = \lim_{t \rightarrow \infty} d''(\dot{S}_t)(\dot{x}_t - \delta \dot{S}_t) - \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\varpi}_t = 0$$

Som vi kan se fra (36) og (30) vil utviklingen til den optimale avgiften avhenge av tidsutviklingen til den marginale skaden og skyggeprisen til den akkumulerte konsentrasjonen. Om vi har at den atmosfæriske konsentrasjonen er økende vil vi ha en positiv avgift hvis  $d'(\dot{S}_t) > \varpi_t$ . Det betyr at den direkte effekten av en økning i den atmosfæriske konsentrasjonen er større enn effekten av en lavere endringstakt i fremtiden. Om tilfellet er at den atmosfæriske konsentrasjonen er avtakende trekker den direkte effekten i retning av en negativ karbonbeskatning. Den indirekte effekten er en nedgang i atmosfærisk konsentrasjon derfor en enda mindre depresiering og større tilpasningskostnader i framtiden. Hvis avgiften skal være negativ, må den direkte effekten dominere den indirekte. Om vi har en stabil konsentrasjon av karbon i atmosfæren ( $\dot{S} = 0$ ) vil avgiften bli bestemt som  $-\varpi$ . Det betyr at man kan både ha en negativ og en positiv avgift, selv om utslipp i denne perioden ikke gir kostnader i samme periode. Et annet poeng i denne forbindelse er at avgiften må gå mot null når konsentrasjonen går mot sitt likevektsnivå. Da vil det ikke være mulig å øke eller redusere konsentrasjonen av karbon i atmosfæren da ressursen er utvunnet.



### 3. Simuleringer av modellen

I dette kapittelet skal vi foreta noen numeriske beregninger med utgangspunkt i modellene over. Vi skal da forsøke å representere de forskjellige funksjonene med parametre som ligger så nært de rådende forhold som mulig. Deretter skal vi bruke resultatene fra denne til å se på en modell for oljemarkedet slik at vi kan analysere konsekvensene for norsk petroleumsvirksomhet av en optimal karbonbeskatning. Spesielt ønsker vi å se på norsk petroleumsformue og inntektene fra denne. Det har vært vanskelig å fastsette parameterverdiene til modellen ut fra tilgjengelige opplysninger. Særlig problemfylt har det vært å hente inn opplysninger om kostnadsforholdene til de forskjellige produsentene, fordi man av naturlige årsaker ikke ønsker å oppgi profittmarginene for sine produkter. Det er derfor relativ stor usikkerhet knyttet til enkelte parametre. Vi vil derfor undersøke hvor sensitiv resultatene er for de parameterverdiene det er knyttet mest usikkerhet til.

#### Parameterverdier

Målt i forhold til den konsentrasjonen av karbon man kan observere i atmosfæren er de årlige menneskeskapte utslipp små. Dagens beholdning tilsvarer 750 GtK (gigatonn karbon) som er omlag 25% høyere enn det preindustrielle nivå<sup>4</sup>. Det årlige energiforbruket av olje, kull og gass gir et utslipp på ca. 5,4 GtK pr. år. I tillegg har vi en avskogning som tilsvarer et utslipp på 1,6 GtK. Til sammen utgjør dette mindre enn 1% av den nåværende konsentrasjonen. Sett i forhold til hva som ville blitt implikasjonene av en endring i de naturlige forflytningene av karbon mellom forskjellige reservoar er disse små. En liten forandring i disse naturlige forflytningene og reservoarbeholdningene ville gi en langt større virkning enn de menneskeskapte utslippene, men her har forflytningene og beholdningene vært stabile i århundreder. CO<sub>2</sub> er en meget stabil forbindelse som sjeldent løses opp eller danner nye forbindelser, slik at utslipp vil gi virkninger over en svært lang tidsperiode.

Depresieringsraten er satt til 0,005 som svarer til en levetid på 200 år.<sup>5</sup> Dette må ses på som en forenkling siden man antar at denne raten vil reduseres etter hvert som karbonbrønnene blir mettet.

I følge BP (1994) er de samlede beholdninger av fossile brensler målt i karbonenheter 1053,69 GtK hvor fordelingen på olje, kull og gass er henholdsvis 117,12 GtK, 859,28 GtK og 77,29 GtK. Dette er reserver av fossile brensler som ifølge samme kilde er utvinnbare sett ut fra dagens teknologiske og økonomiske forhold. Tallene er regnet ut som et gjennomsnitt

---

<sup>4</sup>Tall hentet fra Cline (1991).

<sup>5</sup>Fankhauser and Kverndokk (1993).

for olje, kull og gass forekomstene, fordi forskjellige former for gass og særlig kull har svært forskjellig karboninnhold. Dette gjelder ikke i samme grad for olje der det bare er små variasjoner i karboninnholdet, selv om svovelinnholdet i de forskjellige oljereservoarer varierer en del. Med en tilsvarende utvinningstakt som man hadde i 1993 vil reservene for olje, kull og gass være uttappet etter henholdsvis 43,1, 236 og 64,9 år. Et slikt utvinnings-tempo vil doble CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i løpet av 30 år.

2xCO<sub>2</sub> nivået er blitt et utgangspunkt for de fleste analyser av drivhuseffekten. Den skaden dette påfører oss antar vi er gitt ved:

$$(38) \quad D(S_t) = \alpha S_t^\gamma$$

Parameterverdiene  $\alpha$  og  $\gamma$  er usikre. Vi har derfor valgt å se på tre forskjellige verdier for  $\gamma$ , nemlig 1, 1,5, og 2.  $\alpha$  er kalibrert slik at avgiften initialt settes lik de optimale avgiftene hos henholdsvis Fankhauser (1994) og Hoel og Isaksen (1993). Dette er gjort med en diskonteringsrente på 1%. En diskonteringsrente på 1% er i samsvar med analysen til Hoel og Isaksen. Fankhauser benytter en stokastisk modell med en nedre grense på 0,5% og en øvre grense for diskonteringsrenten på 3%. De optimale avgiftene i disse studiene er henholdsvis 20 \$/tK hos Fankhauser og 85 \$/tK hos Hoel og Isaksen i 1990. I tabell 1 under er alle verdiene på  $\alpha$  gitt.

Kostnadene ved å utvinne fossile brensler varierer sterkt fra produsent til produsent. F.eks. kan man i visse deler av Midtøsten operere med priser nede i 0,5 \$ pr. fat olje<sup>6</sup> uten at produksjonen er tapsbringende. På enkelte felter på den norske kontinentalsokkelen derimot må prisen ikke gå under 18 \$ pr. fat om produksjonen skal være innbringende. Mange av de samme forhold gjør seg gjeldende også innen gassproduksjonen, men for gass er kostnadene i forbindelse med transport store slik at nærhet til de store markedene er av vesentlig betydning. De samme trekk kan man også si gjelder for kullmarkedet. Der er det også slik at en stor del av kostnadene for konsumentene er knyttet til transport fra de store kullreservoarene. Her ser vi imidlertid bare på produksjonskostnaden målt som et snitt for all energiproduksjon fra fossile brensler. Denne betraktes som konstant både over tid og i utvunnet kvantum. Den er målt i karbonenheter tilsvarende et fat olje. D.v.s. målt pr. 114,8 kgK (kilo karbon).

Nyttegevinstene av fossilt brensel er antar vi kan uttrykkes som en eksponensialfunksjon som tilfredsstillende forutsetninger som teorifremstillingen opererer med:

---

<sup>6</sup>Tall hentet fra Petroleum Intelligence Weekly (1993)

$$(39) \quad \begin{aligned} u(x_t) &= 1 - e^{-\beta x_t} \\ u'(x_t) &= \beta e^{-\beta x_t} \end{aligned}$$

Vi legger spesielt merke til at  $u'(0) = \beta < \infty$ . Det impliserer at vi kan betrakte  $\beta$  som den maksimale pris konsumenten er villig til å betale for en mengde tilsvarende et fat olje. Det kan vises at den intertemporale substitusjonselastisitet  $\sigma_t$  er lik  $1/\beta x_t$ .  $\beta$  er i modellen satt lik 35, 40 og 50 \$/114,8 kgK. 114,8 kgK er karboninnholdet i et fat olje.

Siden tidshorisonten til skadevirkningene er lang, vil diskonteringsrenta være av stor betydning for analysen. Diskonteringsrenta er en omdiskutert størrelse. I miljøøkonomiske studier er det ofte at man bruker "the standard consumption equivalent technique" beskrevet hos Lind (1982). Denne metoden splitter diskonteringsrenten opp i to deler, rene tidspreferanser og diskontering som skyldes avtakende grensenytte. I hovedsak kan man si at det eksisterer to strømninger når det gjelder synet på rene tidspreferanser. En der man av etiske grunner ikke kan akseptere en positiv rente, fordi det implisitt innebærer at man vektlegger framtidige generasjoner mindre enn nålevende. Den andre skoleretningen tar til orde for at en positiv rente er den eneste forenlige med observerte data for rente og sparing. På den annen side har vi betraktninger som uavhengig av syn på rene tidspreferanser går i retning av en positiv rente. Dette forutsetter at man har avtakende marginalt utbytte med hensyn på inntekt, og hvis inntekten øker over tid vil man isolert sett få en positiv rente; en kronas inntektsøkning i dag gir en større nytte i dag enn i fremtiden. I denne simuleringen vil vi bruke litt forskjellige størrelser på denne slik at vi får et inntrykk av hvor sensitive løsningene er for valg av diskonteringsrente. Vi har valgt å bruke renter på 1%, 3% og 5%. Som det går fram av resultatene under viser det seg at valg av diskonteringsrente har stor betydning for utvinningstempoet.

Modellens tidshorisont er satt ut fra hvor lang tid man regner med at ressursene vil vare. Som nevnt over er de utvinnbare beholdningene av forskjellige typer fossile brensler svært ulike. Modellen skiller ikke mellom disse slik at vi ikke kan si noe om hvor mye av hver energikilde som blir tappet ut. Vi velger derfor en tidshorisont på i overkant av tohundreogfemti år. Vi forutsetter også at hele den til nå utvinnbare mengden utvinnes i planleggingsperioden, og at man ikke finner nye felter med for eksempel olje i fremtiden som kan utvinnes. Det ligger også i modellen at vi ikke får teknologiske endringer slik at kjente, men ikke utvinnbare reserver utvinnes i fremtiden.

På bakgrunn av dette og teorien i det foregående kapittel vil samfunnsplanleggerens oppgave være følgende:

$$\begin{aligned}
(40) \quad & \max \sum_{t=1995}^{2250} (1 - e^{-\beta x_t - \bar{c}x_t - \alpha S_t^\gamma}) \left(\frac{1}{1+r}\right)^{t-1995} \\
& \text{gitt } S_t = (1-\delta)S_{t-1} + x_t + \left(\frac{1}{1+b}\right)^t y_t \\
& A = \sum_{t=1995}^{2250} x_t
\end{aligned}$$

Dette er en omskriving av modellen i forrige kapittel på diskret form. Problemet består i å finne en bane for konsum og produksjon som maksimerer velferden. Av uttrykket går det fram at hele beholdningen av fossile brensler blir uttappet. Denne forutsetningen impliserer et potensielt utslipp på 1053,7 GtK i løpet av modellens tidshorisont. Man sier imidlertid ikke noe eksplisitt om hvordan konsum og produksjon fordeler seg mellom olje, kull og gass. Dette kommer vi tilbake til når vi skal se på den norske modellen. Når det gjelder karbonkonsentrasjonen så er den justert opp med en eksogen parameter,  $y_t$ , for blant annet avskogning. Vi forutsetter at arbeidet med å begrense avskogingen lykkes slik at vi i modellen starter på dagens nivå, og reduserer denne gradvis ut planleggingsperioden med en reduksjonsrente satt til 0,01.  $y_t$  er satt til 0,055 som tilsvarer et utslipp på 1,6 GtK<sup>7</sup> på starttidspunktet. Tabell 1 under viser alle parameterverdiene samt beholdningsstørrelsene. For at optimeringsprogrammet GAMS skal utføre de ønskelige operasjonene måtte vi skalere beholdningsstørrelsene ned. Konkret innebærer det at f. eks. den kjente utvinnbare reserven som er på 1053,26 GtK er satt til 3,51. Dvs. at begge beholdningsstørrelsene  $A$  og  $S_0$  og strømningsstørrelsen  $y_0$ , er fremkommet ved å dele den faktiske med 300. Det viktige er at forholdet mellom dem er uendret.  $\alpha$ 'ene er fremkommet som et resultat av kalibreringen etter samme prinsipper som forklart over. Fotskriftene til  $\alpha$  betyr at man sikter til henholdsvis Fankhausers og Hoel og Isaksens avgiftsberegninger. Det er også slik at disse er knyttet til  $\gamma$ 'en under. Dette betyr at når  $\gamma$  er 1,5 så er  $\alpha_F$  lik 0,0185 for at avgiften som Fankhauser initialt betrakter som optimal skal bli realisert. Innrammingen i tabellen er av parameterne som er brukt senere. De andre er for å foreta sensitivitetsberegninger.

---

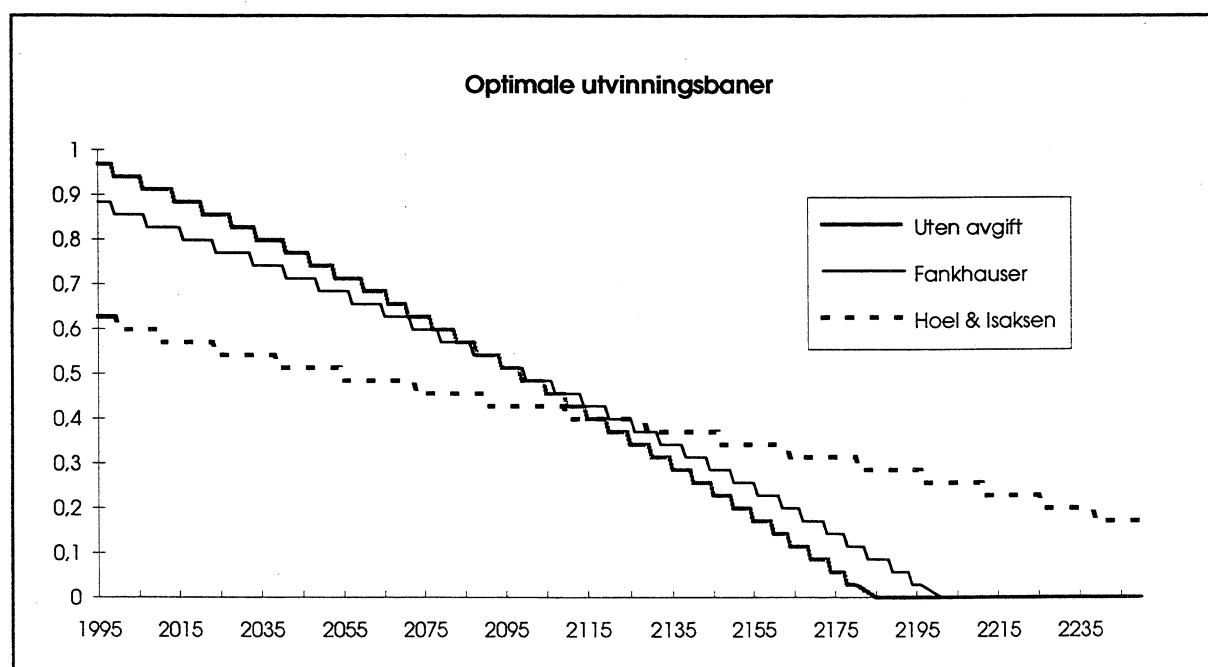
<sup>7</sup>Hentet fra Cline (1991).

Tabell 1.

A	3,51		
$S_0$	0,5		
r	1%	3%	5%
$\delta$	0,005		
C	5		
$y_0$	0,0055		
b	0,01		
$\beta$	35	40	50
$\alpha_F$	0,035	0,0185	0,0105
$\alpha_{H\&I}$	0,145	0,084	0,0525
$\gamma$	1	1,5	2

## Resultater

I figur 2 nedenfor ser vi hvordan utvinningstakten av fossile brensler endres når man innfører en optimal karbonavgift. Simuleringene bygger på parameterverdiene i tabell 1. I figurene under er parameterverdiene de samme som dem som er uthevet i tabell 1.



Figur 2.

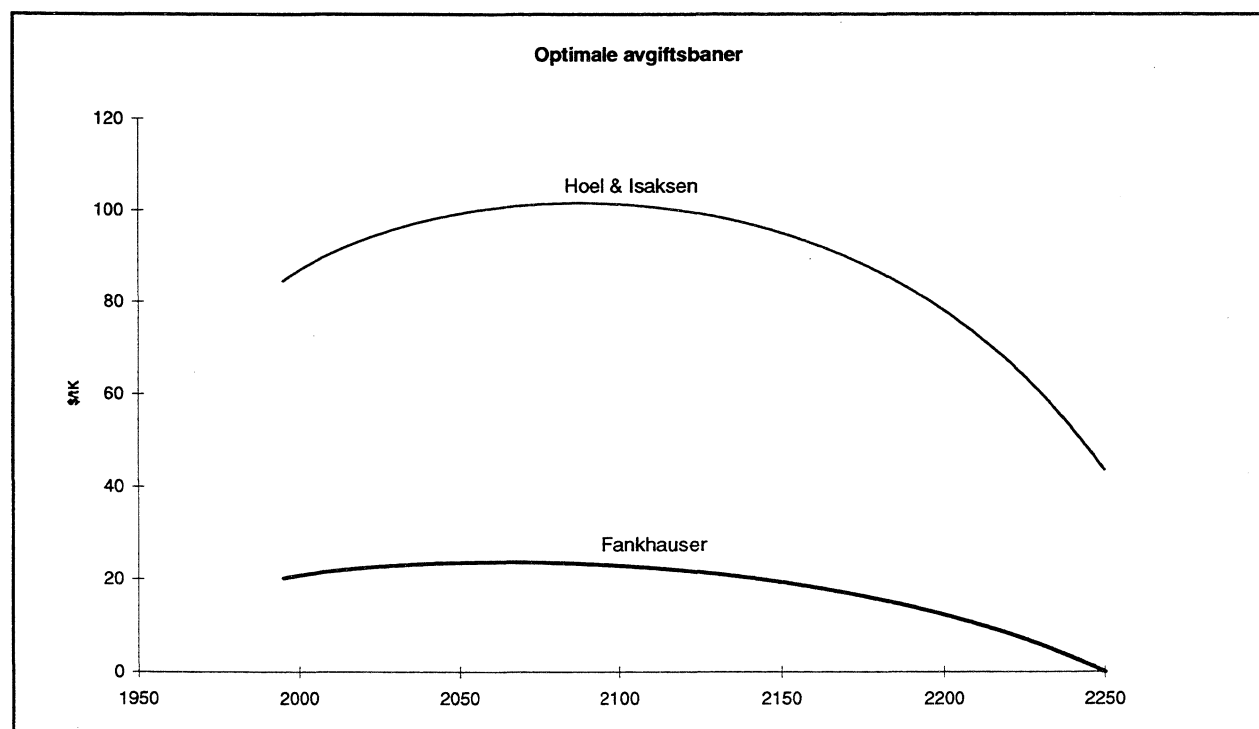
Vi ser her at utvinningstakten reduseres ved innføring av en avgift. Som ventet er denne reduksjonen større jo større avgiftene er. Resultatene viser at innføringen av en avgiftsbane som initialt svarer til Fankhausers studie øker utvinningstiden med omlag 20 år. Modellens tidshorisont er for kort for å beskrive virkningene av en optimal avgiftsbane etter Hoel og Isaksens beregninger, men resultatene viser at en avgiftsbane i denne størrelsesorden gir en vesentlig lenger uttappingstid for ressursene. Figuren viser en optimal bane for uttapping av hele den kjente reserven under forutsetning om at hele denne tappes ut.

Vi har tidligere nevnt diskonteringsrentens betydning for resultatene. En økning av denne fører til at de optimale avgiftene reduseres og man får en raskere uttapping av ressursene. Under tilfellet uten avgift reduseres uttappingstiden med 71 år ved en heving av diskonteringsrenta fra 1 til 3% og med ytterligere 19 år ved en økning til 5%. De samme forhold gjør seg gjeldende i tilfellene med avgift, men i disse fører renteendringen til at selve avgiften også reduseres. En renteheving fører nemlig til at man nedvurderer betydningen av framtidige skadevirkninger.

De optimale avgiftsbanene blir bestemt av ligningen:

$$(41) \quad \theta_{t-1} = (1-r-\delta)\theta_t + D'(S_t)$$

Dette gir følgende baner for de optimale avgiftene målt i \$/tK:



Figur 3.

Den optimale avgiften vil først stige for siden å falle som beskrevet i teoridelen.

Det viser seg at parameteren  $\gamma$  har liten betydning for resultatene. Om vi øker  $\gamma$  fra 1,5 til 2, øker utvinningstida med 3 år med Fankhausers initiale avgift. Man får imidlertid noe større svingninger i avgiftenes størrelse. Den maksimale avgiften er 23,6 \$/tK i tilfellet  $\gamma$  lik 1,5 og 27,7 \$/tK med  $\gamma$  lik 2. Det samme forhold gjelder også når man reduserer  $\gamma$  til 1. Dette gir en flatere avgiftsbane.

Modellen viser seg også å være lite følsom overfor valg av  $\beta$ . Ved å øke  $\beta$  fra 40 til 50 øker uttappingstiden med omlag 15 år gitt parameterverdiene som bygger på Fankhauser (1994). Den reduseres med ca. 4 år når  $\beta$  reduseres fra 40 til 35. Om vi foretar de samme endringene i modellen basert på Hoel og Isaksens kostnadsberegninger er endringene ubetydelige.

### Sammenligning med resultater fra andre analyser

Sammenlignet med andre kjente studier av karbonbeskatning gir disse simuleringene relativt små avgifter. Dette gjelder både for Fankhauser og Hoel og Isaksens alternativer selv om disse avviker betydelig seg imellom. De mest kjente studiene på dette feltet er samlet i OECD's arbeidsnotat no. 122 (se OECD (1992)). For å sammenligne skal vi kort se på noen kvantitative beregninger for karbonbeskatningen i disse modellene. CRTM (Carbon Rights Trade Model) opererer med en karbonavgift på 325 \$/tK i 2020. De tilsvarende avgiftene i ERM (Edmonds-Reilly Model), GREEN (OECD Model) og MR (Manne-Richels Global 2100 Model) er henholdsvis 283, 149 og 171 \$/tK. I vår studie er avgiftene i 2020 etter Fankhausers startavgift 22 \$/tK mens den etter Hoel og Isaksen er 92 \$/tK. Grunnen til disse store avvikene skyldes først og fremst modelleringen. Mens modellene referert til i OECD (1992) stort sett er generelle likevektsmodeller der man ikke tar hensyn til at fossilt brensel er en ikke fornybar ressurs er nettopp det en av hovedforutsetningene i denne modellen. Likeledes er det en forutsetning i de nevnte modellene at energiforbruket vil øke de nærmeste årene mens dette ikke er tilfelle i vår modell.

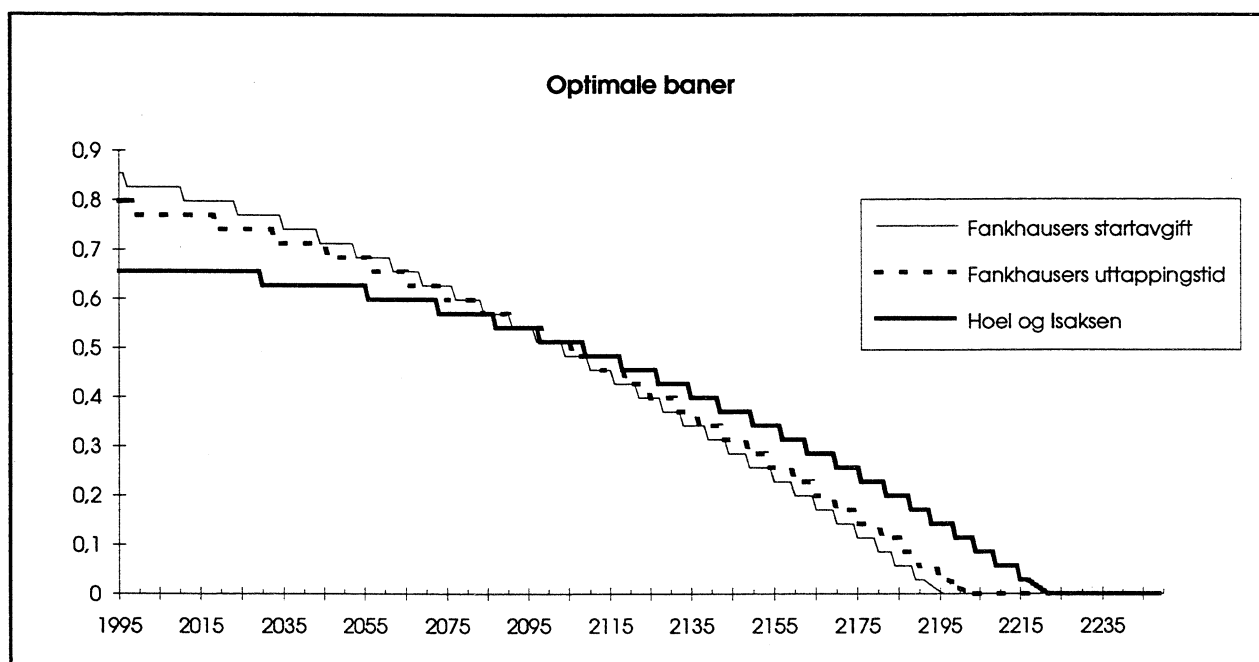
Skaden modellert som funksjon av endringstakten til den atmosfæriske konsentrasjonen

Når skaden antas å skyldes endringene i den atmosfæriske konsentrasjonen, vil samfunns-planleggerens problem være:

$$(42) \quad \begin{aligned} & \text{maks} \quad \sum_{1995}^{2250} (1 - e^{-\beta x_t - \bar{c}x_t - \alpha E_t^\gamma}) \\ & \text{gitt} \quad E_t = S_t - S_{t-1} = x_t - \delta S_t + \left(\frac{1}{1+b}\right)^t y_t \\ & \quad \quad A = \sum_{1995}^{2250} x_t \end{aligned}$$

Vi ser her at skaden karbonutslippene påfører oss kommer som et resultat av endringen i den atmosfæriske konsentrasjonen. Dette kan tolkes som at samfunnet må tilpasse seg nye klimatiske forhold og at det er kostnader forbundet med det. Ellers er modellen den samme. Parameterverdiene

og beholdningsstørrelsene er som før bortsett fra  $S$ ,  $\alpha$  og  $\gamma$ . I den forrige modellen var  $S$  konsentrasjonen over det preindustrielle nivå. Her betegner  $S$  konsentrasjonen totalt, fordi skaden avhenger av endringen i den.  $\gamma$  er satt til 2. Det er fordi man ønsker at skadefunksjonen skal være symmetrisk omkring  $E$  lik 0.  $E$  er endringen i den atmosfæriske konsentrasjonen. Når det gjelder valg av  $\alpha$  så kjenner vi ingen numeriske studier som rendyrker denne formen på skadefunksjonen. Det nærmeste vi kjenner til er en studie av Hoel og Isaksen (1993) som beskriver skaden som en kombinasjon av den atmosfæriske konsentrasjonen og endringstakten i denne. I denne studien opererer de med en avgift på 59 \$/tK i 1990. Det er imidlertid uklart hva som kan tilskrives nivået og hva som kan tilskrives endringstakten.



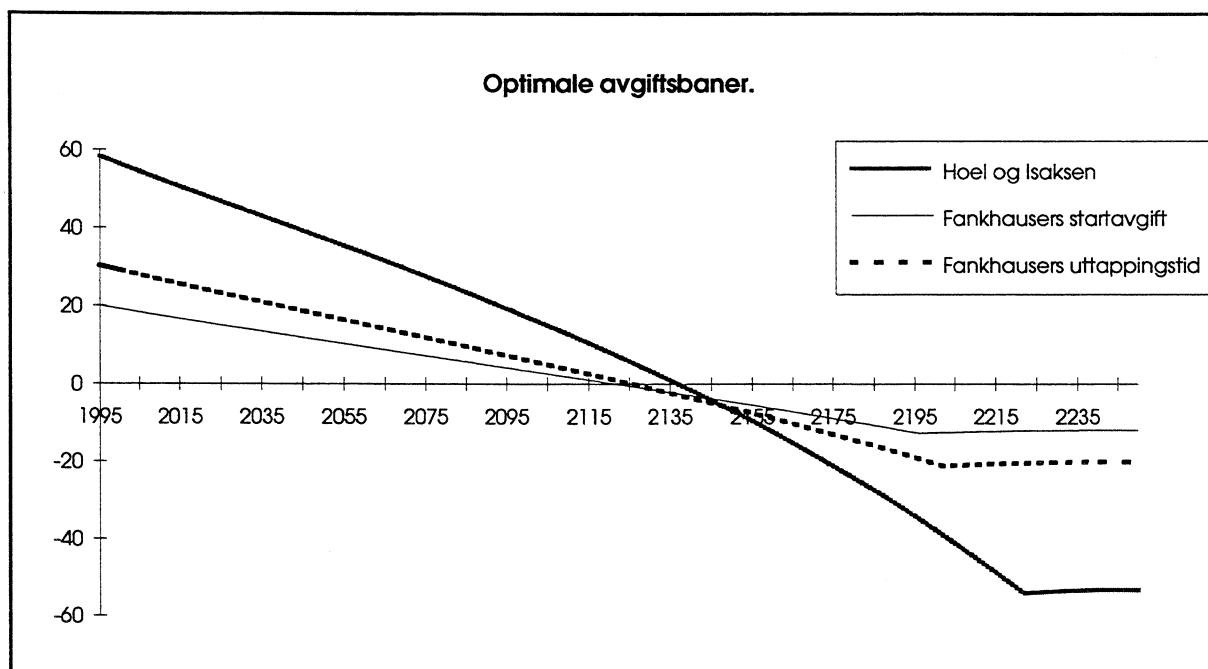
Figur 4.

Vi har derfor først og fremst valgt å se på en karbonbeskatning på det nivå Hoel og Isaksen (1993) bruker. En slik avgift tilsier en startavgift i 1995 på omlag 6.7 \$/114,8 kgK. I tillegg ser vi på tilfeller der man har en startavgift lik den Fankhauser bruker og et der man har lik uttappingstid som i den forrige simuleringen med Fankhausers avgift. Figur 4 viser optimale utvinningsbaner under de tre tilfellene. De optimale avgiftsbanene har et forløp som i figur 5. Vi ser her at man etterhvert vil få en negativ avgift på karbonutslipp. Avgiften blir i disse tilfellene bestemt av likningen:

$$(43) \quad \sigma_t = \alpha \gamma \dot{S}_t^{\gamma-1} - \delta \alpha \gamma \sum_{\tau=1995}^{2250} (1-r-\delta)^{\tau-t} \dot{S}_\tau^{\gamma-1}$$

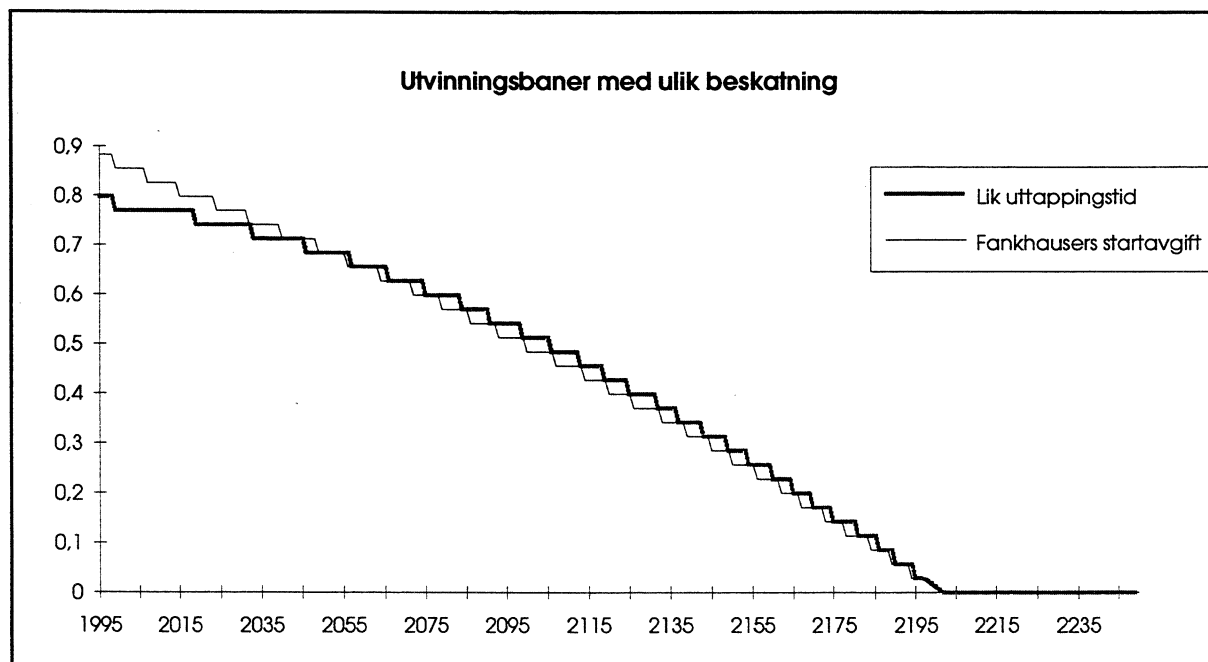
Teorien sier at denne optimale avgiften går mot null når  $t$  går mot uendelig. Det betyr med andre ord at avgiften går mot null når konsentrasjonen stabiliseres på det preindustrielle nivå som man betrakter som et likevektsnivå.





Figur 5.

Som tidligere nevnt er det ikke grunnlag for å sammenligne dette med andre studier slik at man bør betrakte dette som eksempler på hvordan slike avgiftsbaner kan se ut. Om vi ser på banene for uttappingen hvor man tar sikte på å få den samme uttappingstiden ser vi at man får en slakere bane om skaden er modellert som funksjon av endringen i konsentrasjonen. Figur 6 viser dette.



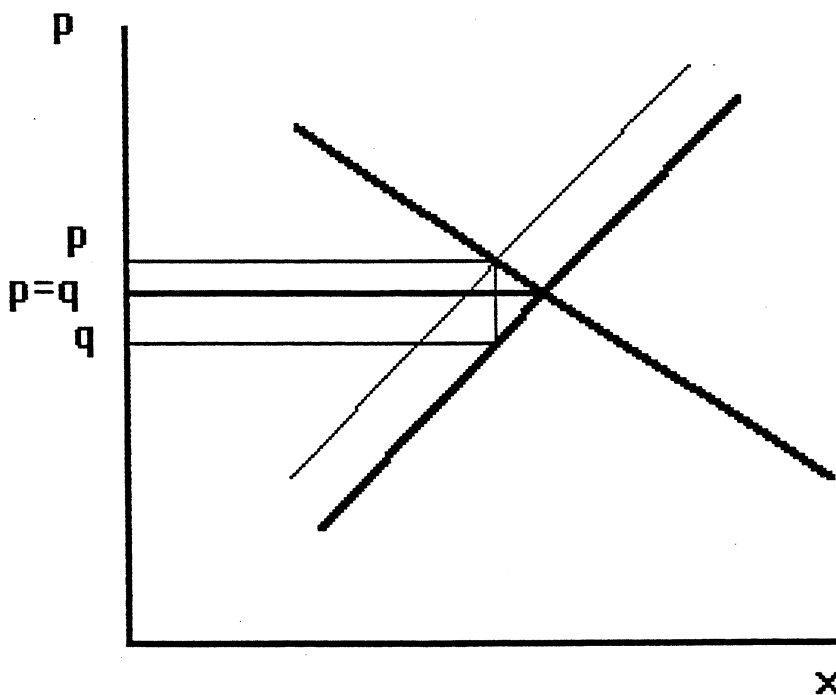
Figur 6.

Andre interessante resultater simuleringene har gitt er de forskjellige avgiftene for henholdsvis olje, kull og gass. Vi får at med en avgift som tilsvarende den Hoel og Isaksen har kommet fram til vil vi få

en avgift på 72,4 \$/t olje, 69,9 \$/t kull og 63,5 \$/t gass. I tilfellet med Fankhausers avgift vil disse være henholdsvis 17,1 \$, 16,5 \$ og 15 \$ pr. tonn olje, kull og gass. Hvilke utslag dette gjør på etterspørselen etter de forskjellige energikildene er ikke analysert i denne studien, men er et interessant felt for videre studier. Interessant vil det også være å se på hva slags avgifter dette gir pr. energienhet. Målt i t.o.e. vil dette gi en avgift på henholdsvis 72,4, 105,3 og 46,0 \$/t.o.e. for olje kull og gass. Vi skal imidlertid se på hvilke konsekvenser en implementering av avgifter av typene over får for norsk petroleumsformue.

## 4. Virkninger på norsk petroleumformue av en optimal karbonbeskatning

I dette kapitlet ser vi på virkningen av en optimal karbonbeskatning på Norges petroleumformue og hvordan denne beskatningen endrer konsument- og produsentprisene. Vi setter den optimale karbonavgiften inn i en modell for oljemarkedet. Denne modellen er utarbeidet av Knut Einar Rosendahl ved SSB (se Rosendahl (1994)) med utgangspunkt i det teoretiske arbeidet i Kverndokk (1994). Rosendahl analyserer en fast avgift på karbonutslipp, slik at denne analysen skiller seg fra hans analyser ved at beskatningen er optimal. Vi bruker imidlertid de samme antagelsene som han har gjort. Disse er stort sett de samme som dem vi har gjort tidligere, men vi betrakter kun markedet for olje.



Figur 7.

I en statisk modell vil innføringen av en avgift føre til at konsumentprisen  $p$  øker mens produsentprisen  $q$  og omsatt kvantum reduseres (se figur 7). Hvordan avgiftsfordelingen mellom produsenter og konsumenter blir, avhenger av tilbuds- og etterspørselsetastisitetene. Det vil f.eks. være slik at jo brattere tilbudskurven er jo mer vil avgiften redusere produsentprisen. Hvis man bringer inn en dynamikk ser vi at omsatt kvantum reduseres initialt. Etter hvert må imidlertid konsumentprisen falle under den initiale prisbanen hvis hele ressursen skal bli konsumert. Det fører til at produsentprisen reduseres med mer enn avgiften slik at vi får en annen overvelting i en dynamisk modell.

## Noen teoretiske resultater og numeriske beregninger fra Rosendahls arbeid

Denne analysen bygger på at produksjon av olje på norsk kontinentalsokkel er mer kostnadskrevende enn gjennomsnittet for oljeproduiserende land. Kostnadene er anslått til å være 5 \$/fat i gjennomsnitt mens kostnadene i Norge ligger 7 \$/fat over dette. Dette skulle ifølge teorien tilsi at det ville være optimalt for Norge å utsette produksjonen til slutten av perioden. Det kan være mange grunner til at dette ikke gjøres. Da det er foretatt store investeringer i oljevirkksomheten, i blant annet borerigger som ikke vil kunne stå uvirksomme fram til tidspunktet for optimal produksjonsstart, kan man legge andre prinsipper for utvinning til grunn. Rosendahl bruker derfor en eksogen bane for utvinningen av olje på norsk sokkel, og denne endres ikke ved at en avgift innføres. Denne eksogene banen bygger på oljeselskapenes planer for oljeutvinning på norsk sokkel (se Bjerkholt m.fl. 1990).

Et viktig resultat i denne analysen er at implementeringen av en avgift på karbon vil føre til høyere konsumentpriser og lavere produsentpriser initialt. Det vil si at avgiften vil bli belastet både konsumentene og produsentene i startperioden. Dette tilsvarer en statisk analyse. Det vil imidlertid være slik at med tiden vil hele avgiftsøkningen belastes produsentene. Resultatene indikerer forøvrig at en konstant avgift på 3 \$/fat olje kan gi en reduksjon på mellom 11 og 16 % av verdens petroleumsformue. For Norge vil en avgift av denne størrelsesorden kunne redusere formuen med mellom 15 og 28 %. Dette gjelder når den direkte priselastisiteten ligger mellom -0,5 og -1. Formuesreduksjonen vil være 15 % når elastisiteten er -0,5 og 28 % når elastisiteten er -1. En avgift på 10 \$/fat vil kunne føre til en formuesreduksjon på mellom 33 og 50 % for den samlede petroleumsformuen og mellom 47 og 87 % for den norske. Priselastisitetene er også her -0,5 og -1.

### Simuleringer på modellen

Vi vil nå bruke avgiftene fra kapittelet foran for å belyse hvordan optimale avgifter vil påvirke konsument- og produsentpriser samt petroleumsformuen i Rosendahls modell. Modellens relasjoner er de samme som vi har benyttet. Noen av de viktigste ligningene er:

$$(44) \quad \begin{aligned} p_t &= \bar{c} + \pi_t + \theta_t \\ q_t &= p_t - \theta_t = \bar{c} + \pi_t \\ \text{der} \quad \pi_t &= \pi_0 e^{\pi t} \end{aligned}$$

$p_t$  er konsumentprisen i periode  $t$  og  $q_t$  er produsentprisen i periode  $t$ . Vi ser at den optimale avgiften separerer disse. Ressursrenta er lik differansen mellom produsentprisen og den faste kostnaden. Vi ser da at en reduksjon i produsentprisen som følge av en avgift vil redusere ressursrenta. Siktemålet nå er å vise hvordan konsumentprisen, produsentprisen og ressursrenta endres når man innfører en optimal karbonbeskatning.

Petroleumsformuen er gitt ved:

$$(45) \quad \Pi = \int_0^T e^{-rt} \pi_t x_t dt = \int_0^T \pi_0 x_t dt = \pi_0 A$$

Petroleumsformuen er den neddiskonterte verdien av petroleumsinntektene. For å se hvordan denne endres, må vi derfor se på hvordan  $\pi_0$  endres når det innføres en avgift av typen beskrevet over. Den norske petroleumsformuen er gitt ved:

$$(46) \quad \Pi^N = \int_0^T e^{-rt} (\pi_t - (c^N - c)) x_t^N dt = \pi_0 A^N - (c^N - c) \int_0^T e^{-rt} x_t^N dt$$

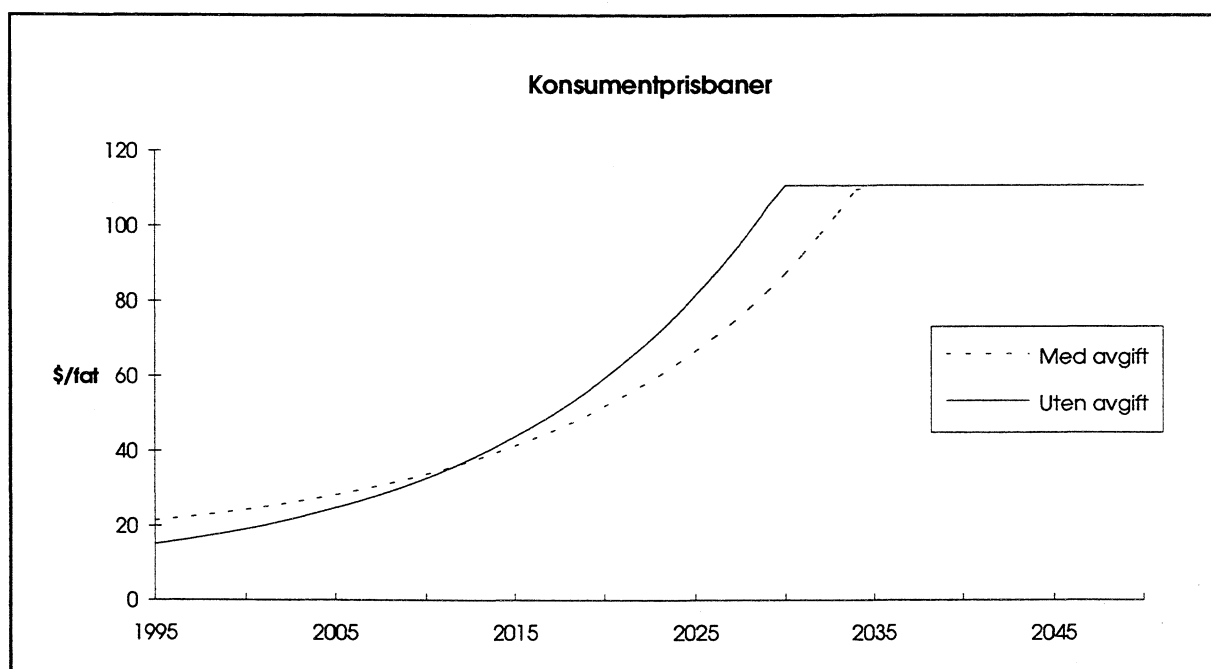
Toppskriften N indikerer norske størrelser. Det er tatt hensyn til at produksjonskostnadene i Norge ligger over gjennomsnittet for oljeproduserende land. (46) forteller at den norske petroleumsformuen er lik den neddiskonterte verdien av petroleumsinntektene fratrukket den neddiskonterte verdien av kostnadsforskjellen mellom Norge og verden forøvrig. Det følger da at endringen i petroleumsformuene er gitt ved:

$$(47) \quad \frac{d\Pi}{\Pi} = \frac{d\pi_0}{\pi_0}$$

og

$$(48) \quad \frac{d\Pi^N}{\Pi^N} = \frac{d\pi_0}{\pi_0 - (c^N - c) \frac{1}{A^N} \int_0^T e^{-rt} x_t^N dt}$$

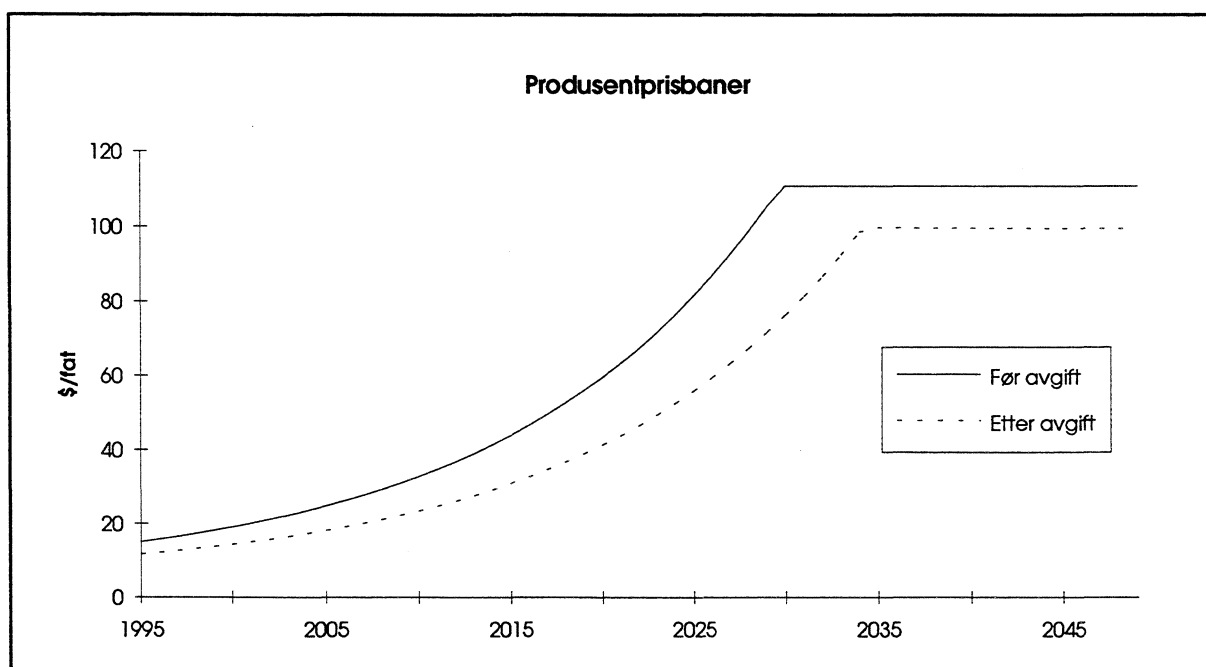
Vi ønsker å se på endringene i petroleumsformuene når vi implementerer avgiftene vi kom frem til i forrige kapittel. Vi bruker tre forskjellige eksempler på optimale avgiftsbaner. Den første er basert på analyser foretatt med bakgrunn i Hoel og Isaksens kostnadsberegninger (tilfelle 1), den andre er basert på Fankhauser (tilfelle 2) og den tredje på Hoel og Isaksen der vi antar at endringen i den atmosfæriske konsentrasjonen gir skade (tilfelle 3). De optimale avgiftsbanene er fremkommet med en diskonteringsrente på 1 %. Det er lite trolig at en så lav rente blir brukt når oljeselskapene bestemmer sin produksjonsprofil, fordi det da ville være bedre å heve høyere rente i pengemarkedet. Vi har derfor valgt å bruke den samme renta som Rosendahl i den videre analysen, dvs. 7%.



**Figur 8.**

Beregningene viser at en innføring av en karbonbeskatning under tilfelle 1 fører til at konsumentprisbanen blir slakere, men starter med en høyere pris enn den initiale banen uten avgift. Denne beregningen viser at med en initial ressursrente på 10 \$/fat og en konsumentpris på 15 \$/fat, vil innføring av avgift gi en prisøkning i den første perioden på i overkant av 6 \$/fat. Avgiften i denne perioden utgjør 9,7 \$/fat slik at produsentprisen reduseres med 3,4 \$/fat. Av dette følger at ressursrenta oljeprodusentene mottar er redusert fra 10 \$/fat til 6,7 \$/fat. Utviklingen for konsumentprisbanen i råoljemarkedet uten avgift og med avgiften fra tilfelle 1 er illustrert i figur 8 over. Resultatene viser at denne avgiften gir en reduksjon på 33,5 % i den samlede globale petroleumsformuen. For den norske formuen er reduksjonen på 48 %. Dette bygger på antagelser om at produksjonskostnadene i Norge ligger 7 \$/fat høyere enn gjennomsnittet. Konkret betyr det at man i Norge opererer med en gjennomsnittlig produksjonskostnad på 12 \$/fat. Dette er hentet fra Stortingsmelding 26 (1993-1994). Målsettingen for produksjon av olje på norsk sokkel har vært at man skal kunne drive lønnsomt med oljepriser på 15 \$/fat. I den senere tid er disse målsettingene i ferd med å endres slik at man på sikt ønsker å redusere kostnadene med 40% i forhold til dette nivå (Norsok). Arbeidsgruppen Norsok, ble opprettet med sikte på å utrede muligheten for kostnadsreduksjoner på norsk sokkel. Norsok er et samarbeidsprosjekt mellom operatører på norsk sokkel som ble startet etter initiativ fra Nærings- og energidepartementet. Pr. i dag regner man med at nivået på produksjonskostnadene i Norge ligger på 8 \$/fat. Om dette skulle ligge til grunn for beregningene over betyr det at reduksjonen på norsk petroleumsformue vil være 38,4% eller omlag 10% mindre enn i det foregående tilfelle. Om Norsoks målsettinger innfris betyr det at reduksjonen i norsk petroleumsformue som følge av

innføringen av en avgift nærmer seg reduksjonen til den samlede petroleumsformuen. Så lenge produksjonskostnadene i Norge er høyere enn gjennomsnittet vil man imidlertid alltid ha et større tap enn gjennomsnittsprodusenten.

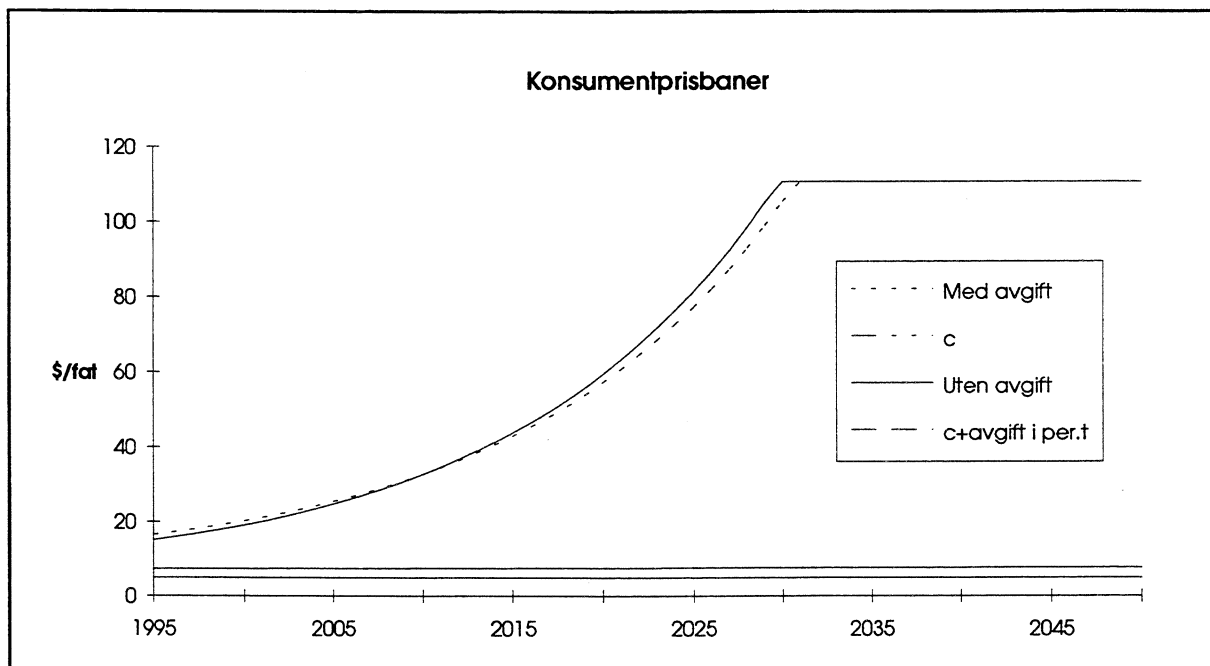


Figur 9.

Figur 9 over viser hvordan produsentprisbanen avviker fra den initiale banen uten avgift. Når ressursen er uttappet vil avstanden mellom den initiale prisbanen og produsentprisbanen med avgift være lik avgiften. Vi observerer at i de første periodene er det konsumentene som belastes mest relativt sett, men etterhvert overføres kostnadene fullt og helt til produsenten slik at produsenten mot slutten belastes mer enn hele avgiften. På grafen inntreffer dette når avstanden mellom den initiale banen og den nye er større enn avgiften i perioden.

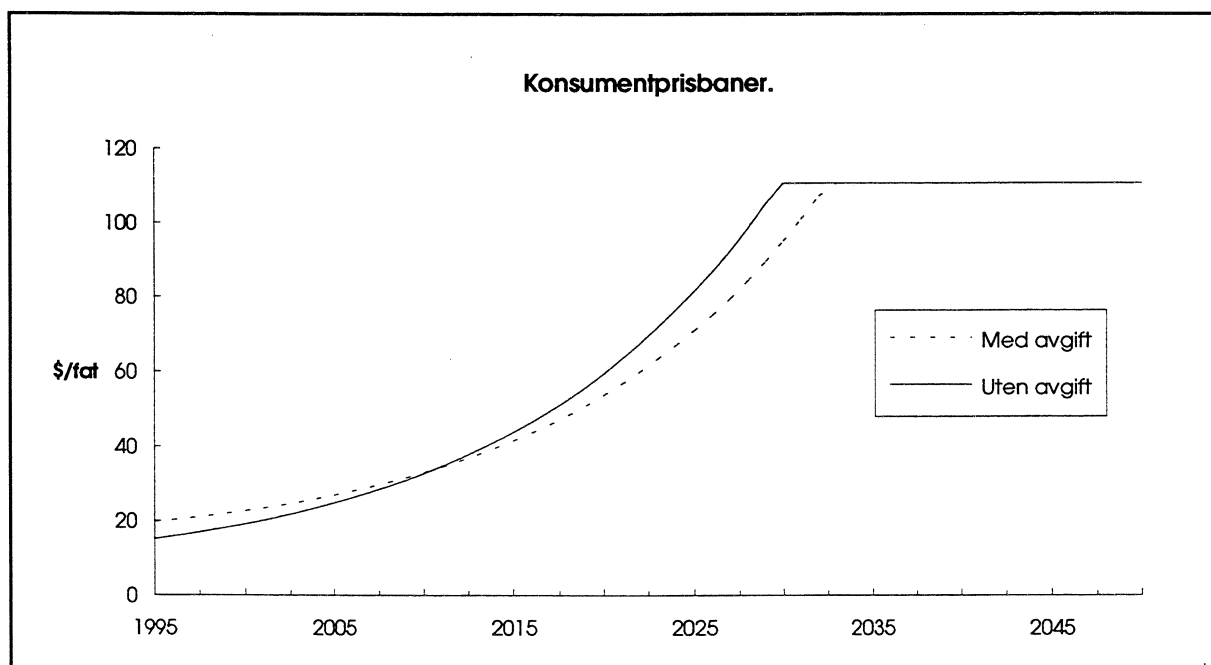
Simuleringen med avgiftsbanen under tilfelle 2, fører naturlig nok til at virkningene på konsumentprisen og produsentprisen blir mindre siden avgiftene ligger på et lavere nivå. Figur 10 viser hvordan en innføring av denne avgiftsbanen endrer konsumentprisbanen. Vi ser at de samme trekk gjør seg gjeldende også i dette tilfelle. Man vil initialt få en økning i konsumentprisen, men ikke med så mye som avgiftsøkningen.

Konsumentprisen øker med 1,4 \$/fat mens produsentprisen reduseres med 0,9 \$/fat. Også her vil det være slik at avgiften gradvis overveltes på produsenten. Avgiften i den første perioden i dette tilfellet er 2,7 \$/fat. Vi kan se at den er tilnærmet flat under hele produksjonsperioden. Ressursrenta vil reduseres til 9,2 \$/fat. Dette vil redusere verdens petroleumsformue med 9%. Den norske formuen reduseres med 12,5 %.



Figur 10.

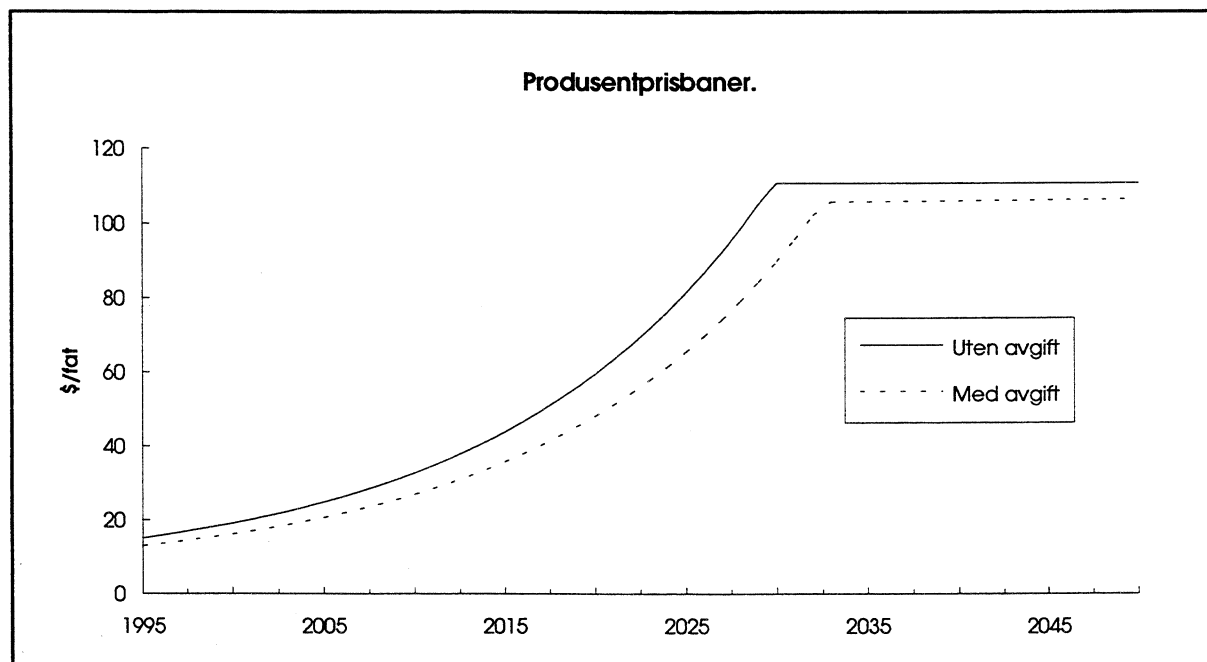
Den siste simuleringen er basert på en optimal avgift beregnet ut fra antagelsen om at det er endringstakten i den atmosfæriske konsentrasjonen som medfører skade. Avgiften starter på 6,7 \$/fat og reduseres med tiden. Figur 11 viser hvordan konsumentprisbanen endres ved avgiftsinnføringen. Vi ser at denne viser de samme tegn som i tilfeller der den optimale avgiften er en funksjon av den atmosfæriske konsentrasjonen. Produsentprisen endres også etter samme prinsipp som i de forrige simuleringene der avgiften bestemmes som funksjon av konsentrasjonen og ikke endringstakten til denne. Produsentene blir belastet noe mindre med



Figur 11.



tiden i forhold til de foregående tilfeller, men siden avgiften er tilnærmet konstant i det interessante intervallet vil konklusjonene bli de samme. Resultatene viser at denne avgiften øker konsumentprisen med 4,6 \$/fat initialt, dvs. at konsumentene belastes med 69% av avgiften. Produsentene får redusert sin pris med 2,1 \$/fat initialt.



Figur 12.

Figur 12 viser produsentprisbanene. Sammenlignet med tilfellene der skadene er en funksjon av den atmosfæriske konsentrasjonen, er dette en type beskatning som initialt belaster konsumentene med en større andel av den totale avgiften. Dette er fordi avgiften er fallende med tiden. Det vil imidlertid også i dette tilfellet være slik at konsumentene belastes relativt sett mest de første periodene mens avgiften overveltes mer og mer på produsentene etterhvert som tiden går. Ressursrenta vil i dette tilfelle reduseres med 2,1 \$/fat initialt. Dette vil medføre at den samlede petroleumsformuen vil bli redusert med 20,8%. Dette er 9 % mindre enn reduksjonen i den norske petroleumsformuen som er på 29,8 %.

Som en sensitivitetstest har vi beregnet reduksjonen i petroleumsformuen om renta var 1%. I tilfellene 1, 2 og 3 vil det redusere den globale petroleumsformuen med henholdsvis 81, 20 og 42 %. For Norge vil reduksjonen være større. Dette gjelder for råoljemarkedet. Siden usikkerheten om hvilke renter som gjelder i markedet er stor, er det nyttig å foreta simuleringer med forskjellige renter. Resultatene viser at om renta skulle være mindre enn den vi har brukt, vil produsentprisene reduseres mer og dermed gi en større reduksjon i petroleumsformuen enn vi har antydnet. En mindre rente betyr også at produsentene vil bære en større del av avgiften initialt.

Analysen over er av råoljemarkedet og bygger på en antagelse om at den direkte priselastisiteten på råolje er -0,5. I tabellen under er det også tatt med at avgiftene kan legges på oljeproduktmarkedet, der det i en studie av Dahl og Erdogan (1994), tyder på at priselastisiteten er høyere enn i råoljemarkedet. Vi har derfor, med bakgrunn i modellen over, også valgt å se på hvordan virkningen blir om beskatningen legges på oljeproduktmarkedet. I oljeproduktmarkedet er det allerede betydelige avgifter på enkelte produkter. Når det gjelder bensin f.eks. så består omlag en tredel av konsumentprisen i USA av avgifter. I Europa utgjør denne andelen omtrent to tredeler. Vi har valgt å se på oljeproduktmarkedet under ett slik at vi opererer med en økning av de gjennomsnittlige produksjonskostnadene inkludert raffineringsteknologier med 2,5 \$/fat og et tillegg for avgifter som blir lagt på oljeprodukter på 5 \$/fat.

**Tabell 2.**

Mulige virkninger på norsk og global petroleumsformue av en optimal karbonbeskatning når denne legges på enten råolje* eller oljeprodukter.**				
		Tilfelle 1	Tilfelle 2	Tilfelle 3
Global petroleumsformue	Prosentvis reduksjon	34* og 43**%	9* og 11**%	21* og 27**%
	Årlig tap i mrd. Nkr.	20* og 29**	5* og 8**	13* og 18**
Norsk petroleumsformue	Prosentvis reduksjon	48* og 68**%	12* og 18**%	30* og 43**%
	Årlig tap i mrd. Nkr.	20* og 29**	5* og 8**	13* og 18**
*Forutsetninger: $\pi_0=10$ , $\pi_0^N = 3$ , $r=0,07$ , $c=5$ , $c^N=12$				
**Forutsetninger: $\pi_0=10$ , $\pi_0^N = 3$ , $r=0,07$ , $c=7,5$ , $c^N=14,5$ , $v=5$				

Tabell 2 over oppsummerer resultatene fra disse simuleringene på råoljemarkedet og oljeproduktmarkedet. Det laveste tallet i hver celle er tall for råoljemarkedet og det høyeste for oljeproduktmarkedet. Intuisjonen bak resultatet er at en mer priselastisk etterspørsel gir en større reduksjon i produsentprisen initialt. Dette resultatet gjelder også generelt. Om vi hadde brukt en mer elastisk etterspørsel i råoljemarkedet ville petroleumsformuene blitt redusert mer. I tabellen er forskjellen at vi har brukt en større direkte priselastisitet på oljeproduktmarkedet (-1) enn i råoljemarkedet (-0,5). Det ligger i dette at etterspørselen etter råolje er mindre følsom overfor prisendringer enn etter oljeprodukter. Den initiale ressursrenta er satt lik for oljeproduktmarkedet og råoljemarkedet før avgiften ble innført.  $v$  i tabellen over er en fast skatt som legges på oljeprodukter, regnet som et snitt av beskatningen i oljeproduktmarkedet globalt sett.

## 5. Konklusjon og avsluttende merknader

I denne studien har vi sett på en modell for ikke-fornybare ressurser med miljøeksternaliteter. Ut fra modellen har vi vist hvordan vi bør utforme en optimal karbonbeskatt under forskjellige forutsetninger. Vi har videre studert mulige konsekvenser av en optimal karbonbeskatning på norsk og global petroleumsformue. Hvordan beskatningen vil virke inn på konsument- og produsentpriser er også tatt med.

Simuleringene på modellen har vist at en optimal karbonbeskatning vil øke utvinningstida av olje, kull og gass. Utvinningstida vil øke mer jo høyere avgiftsbanene ligger. Vi har kommet fram til at en startavgift på 20 \$/tK vil øke utvinningstida med 20 år. Når startavgiften settes til 78 \$/tK, øker utvinningsstida med 65 år. Dette gjelder når skaden er en funksjon av nivået på karbonkonsentrasjonen i atmosfæren. En avgift av typen over gir en lavere atmosfærisk konsentrasjon av karbon på alle tidspunkt. For petroleumsprodusenter vil en slik avgift redusere verdien av deres oljeformue. Vi har kommet fram til at med de to startavgiftene over vil verdens petroleumsformue reduseres med henholdsvis 9 og 34 % når avgiften legges på råolje. For Norge er tallene 12 og 48%. Simuleringene på modellen med skaden som en funksjon av endringen i den atmosfæriske konsentrasjonen fører også til at utvinningstida øker. Det sentrale her er imidlertid at endringene i den atmosfæriske konsentrasjonen skjer saktere. Startavgiften vi har brukt i denne simuleringen er 58 \$/tK. Reduksjonen av den samlede petroleumsformuen blir i dette tilfelle 21 % og 30 % for den norske når avgiften legges på råoljemarkedet. Petroleumsformuene reduseres noe mer når avgiften legges på oljeprodukter.

Resultatene som er gjort kjent i de foregående kapitler bygger på relativt strenge forutsetninger. I tillegg er det stor usikkerhet knyttet til enkelte parametere som har stor betydning for resultatene. Dette gjelder først og fremst diskonteringsrenta. Små variasjoner i den gir store endringer i resultatene. Hva en samfunnsplanlegger bør legge til grunn for sitt valg av rente og dermed implisitt en vurdering av framtidige generasjoners velferd er i seg selv et komplisert valg. Det oppstår også problemer når man må ta stilling til hvilken rente som markedet bruker når man ønsker å implementere avgifter som er optimale ut fra en samfunnsplanleggers ståsted. Valget vi har foretatt når det gjelder rente i kapittel 3 er derfor uavhengig av hvilken rente markedet opererer med. Markedets rentefot vil være høyere. Man bruker f.eks. 7% som rente for offentlige investeringsprosjekter i Norge. Oljeselskapene bruker trolig en enda høyere rente når investeringer blir vurdert. De praktiske konsekvensene av å bruke en rente som er lavere enn i markedet er at konsumet blir fordelt over et lengere tidsrom. Det betyr at den lave renten i seg selv er en viktig faktor som fordeler konsum over tid. For at samfunnsplanleggerens konsumbane skal bli realisert, må avgiftene i et marked

hvor renta er høyere, ligge over planleggerens avgifter. Dette taler for at avgiftsbanene i kapittel 3 ligger litt for lavt.

En kritisk merknad til selve modellen er om fossile brensler kan oppfattes som en ressurs som i økonomisk forstand er knapp. Det skulle i såfall innebære at det er rasjonelt for aktørene å ta hensyn til at ressurstilgangen er begrenset. Teknisk sett er dette et spørsmål om skyggeprisen er forskjellig fra null. Skyggeprisen er et uttrykk for verdien på en endring i reservene. Det er ikke sikkert at nye funn av fossile brensler ville påvirke prisene markedet i vesentlig grad. Dette kan være en imperfeksjon i markedet som det var ønskelig å få aktørene til å ta hensyn til. En mulig løsning på dette kunne være å finne en optimal bane for konsum over tid og så finne en avgiftsbane som kunne realisere dette konsumet.

Under forutsetning om at skaden skyldes nivået på den atmosfæriske konsentrasjonen er det vanskelig ut fra resultatene å gi konkrete anbefalinger om hva som bør gjøres. Det er imidlertid klart at de optimale karbonavgiftene vil ligge høyere jo lenger man venter med å gjøre noe med effekten fra karbonutslipp. Det er fordi den atmosfæriske konsentrasjonen vil ligge høyere jo senere avgiftene vil bli implementert. Det er derfor å anbefale at konkrete tiltak for å redusere skadevirkningene fra karbonutslipp blir satt i verk så tidlig som mulig.

## Referanser

Aslaksen, I., K.A. Brekke, T.A. Johnsen and A. Aaheim (1990): Petroleum Resources and the Management of National Wealth, i O. Bjerkholt, Ø. Olsen og J. Vislie (red.): *Recent Modelling Approaches in Applied Energy Economics*, London: Chapman and Hall, 103-123.

BP (1994): *BP Statistical Review of World Energy*, June 1994.

Cline, W.R. (1991): Scientific Basis for the Greenhouse Effect, *The Economic Journal*, 101, 904-919.

Cline, W.R. (1992): *The Economics of Global Warming*. Washington, DC: Institute for International Economics.

Dahl, C. og M. Erdogan (1994): Econometric Energy Demand and Supply Elasticities: Truth or Fiction?, Proceeding of the 17th IAEE Annual International Energy Conference.

Dean, A. og P. Hoeller (1992): Costs of Reducing CO<sub>2</sub> Emissions: Evidence from six Global Models, Working Papers 122, OECD.

Fankhauser, S. (1994): The Social Costs of Greenhouse Gas Emissions: An expected Value Approach, *The Energy Journal* 2, 157-184.

Fankhauser, S. og S. Kverndokk (1992): The Global Warming Game - Simulations of a CO<sub>2</sub> Reduction Agreement, Memorandum 13, Universitetet i Oslo.

Hoel, M. and I. Isaksen (1993): "The Environmental Costs of Greenhouse Gas Emissions", mimeo, Sosialøkonomisk Institutt, Universitetet i Oslo.

Kverndokk, S. (1994): Depletion of Fossile Fuels and the Impacts of Global Warming, Discussion paper 107, Statistisk sentralbyrå.

Lind, R.C. ed. (1982): *Discounting for Time and Risk in Energy Policy*, Washington, DC: Recourses for the Future.

Nordhause, W.D. (1991): To Slow or not to Slow: the Economics of Greenhouse Effect, *The Economic Journal* 101, 920-937.

Nærings- og energidepartementet (1993-1994): *Utfordringer og perspektiver for petroleumsvirksomheten på kontinentalsokkelen*, St.meld. 26 (1993-1994).

PIW (1994): *Petroleum Intelligence Weekly* 33, 1, Jan.3, 1994.

Rosendahl, K.E. (1994): *Carbon Taxes and the Petroleum Wealth*, Discussion paper 128, Statistisk sentralbyrå.

Seierstad, A. og K. Sydsæter (1987): *Optimal Control Theory with Economic Applications*. Amsterdam: Elsevier Science Publisher.

Statistisk Sentralbyrå (1992): *Naturressurser og Miljø 1991*, Rapporter fra Statistisk sentralbyrå nr. 1.

Statistisk sentralbyrå

*Oslo*  
Postboks 8131 Dep.  
0033 Oslo

Telefon: 22 86 45 00  
Telefaks: 22 86 49 73

*Kongsvinger*  
Postboks 1260  
2201 Kongsvinger

Telefon: 62 88 50 00  
Telefaks. 62 88 50 30



**Statistisk sentralbyrå**  
Statistics Norway