SNF RAPPORT NR. 84/00

Dynamiske adaptive miljøavgifter

av

Leif K. Sandal
Stein Ivar Steinshamn

SNF Prosjekt nr. 5330
"Fastsettelse av adaptive CO2-avgifter"

Prosjektet er finansiert av Norges forskningsråd.

Centre for Fisheries Economics
Report No. 67

STIFTELSEN FOR SAMFUNNS- OG NÆRINGSLIVSFORSKNING
BERGEN, APRIL 2001

ISBN 82-491-0118-9
ISSN 0803-4036

Innledning

I denne rapporten anvendes en adaptiv modell for fastsettelse av CO_2-avgifter. Som kjent er det eksterne virkninger knyttet til opphoping av CO_2 i atmosfæren. Videre er det eksterne virkninger knyttet også til selve utslippet av CO_2 , det vil si forbrenning av fossilt brennstoff. Eksternaliteten knyttet til akkumulering av CO_2 er en såkalt stock-eksternalitet som er hovedsakelig global, mens eksternaliteten knyttet til utslippet er en flow-eksternalitet som hovedsakelig er lokal. Modellen her brukes til å fastsette en CO_2-avgift som internaliserer begge disse eksternalitetene. Den bygger på dynamisk optimering hvor nedbrytingen av CO_2 i atmosfæren er den dynamiske bibetingelsen. Noe som skiller denne modellen fra de fleste tilsvarende modeller er at vi anvender en generell, ikke-lineær nedbrytingsfunksjon og at skatten kan beregnes som en feedback-regel, dvs. som en funksjon av tilstandsvariabelen (CO_2). Når denne er funnet kan en selvsagt lett finne tidsforløpet til de variablene som inngår dersom det skulle være ønskelig, men for å implementere skatten i praksis er det feedback-regelen som er av betydning.

Basislikningene i modellen, som er tilbud og etterspørsel etter fossilt brennstoff, blir kalibrert ut fra rimelige antakelser om tilbuds- og etterspørselselastisiteter samt fakta om markedet i dag. Markedsparametrene blir så brukt til å beregne konsument- og produsentoverskudd. Målet med modellen er å maksimere summen av konsument- og produsentoverskudd korrigert for eksternaliteter under den dynamiske bibetingelsen som beskriver utslipp og nedbryting av CO_2. Nedbrytingsfunksjonen blir kalibrert på bakgrunn av kunnskap om hva den faktiske konsentrasjonen av CO_2 er og hvordan denne har endret seg i forhold til de faktiske utslipp.

En vanlig fremgangsmåte i tilsvarende modeller er å operere med nytte/velferdsfunksjoner på aggregert nivå, dvs. ikke splittet opp i konsument- og produsentoverskudd. Da må den optimale skatten tilsvare skyggeprisen på forurensingen, og en slik skatt kan bare korrigere for stock-eksternaliteten men ikke for flow-eksternaliteten. En skatt som bare korrigerer for den ene eksternaliteten vil selvsagt være lavere enn en skatt som korrigerer for begge eksternalitetene uansett hva forurensingsnivået er, og produksjon og utslipp blir følgelig høgere. Et interessant resultat fra modellen her er at om man ignorerer flow-eksternaliteten helt og bare korrigerer for stock-eksternaliteten så vil man likevel kunne ende opp i en langsiktig likevekt med høgere skatt, lavere produksjon og langt høgere akkumulert forurensing enn om man korrigerer for begge eksternaliteten. Dette skjer selv om man starter fra nøyaktig samme utgangspunkt.

Generell modell

I dette avsnittet ser vi på den generelle modellen. Målet er å maksimere den neddiskonterte velferden definert som summen av konsumentoverskudd og produsentoverskudd korrigert for eksternaliteter. Vi ser på to typer eksternaliteter. Det ene er flow-eksternaliteter som er knyttet til produksjonen og er definert som forskjellen mellom de private og sosiale grensekostnadene. Denne eksternaliteten er velkjent fra statiske modeller. Den andre er stock-eksternaliteten som er knyttet til den akkumulerte forurensingen, og det er denne eksternaliteten man vanligvis finner i dynamiske modeller. Dynamiske modeller som både inkluderer flow- og stock-eksternaliteter er sjeldne, men kan f.eks. finnes hos Ulph og Ulph (1994) og Sandal og Steinshamn (1997).

Velferden, *W*, er en funksjon av produksjonen, *x*, og forurensingen, *a*. De to sistnevnte variablene er begge funksjoner av tiden. Objektfunksjonen kan skrives

$$max\int_0^\infty e^{-rt}W(x(t),a(t))dt$$

hvor *r* er diskonteringsraten. Det antas at det er en fast mengde forurensing knyttet til hver enhet som blir produsert, δx, og den dynamiske utviklingen i forurensingen kan derfor skrives

$$\frac{da}{dt} = \delta x - f(a)$$

hvor *f(a)* representerer den effektive nedbrytingen av forurensing. I resten av denne rapporten vil vi definere $\delta = 1$. Det er ekvivalent med at *x* og *a* måles i samme enheter.
Velferdsfunksjonen, W, er definert som

$$W(x,a) = \int_0^x \left[P(z,a) - C^s(z,a)\right]dz - D(a) \equiv \Pi(x,a) - D(a)$$

hvor *P* er den inverse etterspørselsfunksjonen, C^s er den sosiale grensekostnadsfunksjonen og *D* er unytten knyttet til forurensing; med andre ord stock-eksternaliteten. Etterspørsels- og grensekostnadsfunksjonene forutsetter vi kan tilnærmes som lineære funksjoner

$$
\begin{aligned}
&P(x,a) = p_0(a) - p_1(a)x, \qquad x \le \frac{p_0}{p_1}, \\
&C^s(x,a) = c_{so}(a) + c_{s1}(a)x, \\
&C^p(x,a) = c_{p0}(a) + c_{p1}(a)x.
\end{aligned}
$$

Her er C^p den private grensekostnadsfunksjonen. Parametrene i etterspørsels- og tilbudsfunksjonene kan i prinsippet være generelle funksjoner i forurensingsnivået. Dette er nyttig for å fange opp fenomener som at preferansene for et forurensende produkt endrer seg etterhvert som forurensingen gjør seg gjeldende. Man kan også tenke seg at kostnadene ved å produsere produktet øker når miljøet blir mer forurenset. Husk her at a er det aggregerte nivået på forurensing og må ikke forveksles med selve utslippet. For å øke lesbarheten vil den funksjonelle avhengigheten i variablene ofte undertrykkes i det følgende.

I denne rapporten er vi interessert i forurensingskontroll ved hjelp av miljøskatter og i å formulere de optimale skattene som en funksjon av forurensingsnivået, dvs. som en feedback-regel. Både ad valoremskatter og stykkskatter vil bli analysert. Disse er definert som følger: En ad valorem skatt er gitt ved uttrykket

$$
\theta(x,a) = \frac{P(x,a) - C^p(x,a)}{C^p(x,a)} = \frac{(p_0 - c_{p0}) - (p_1 + c_{p1})x}{c_{p0} + c_{p1}x},
$$

og en stykkskatt er gitt ved

$$
\tau(x,a) = P(x,a) - C^p(x,a) = (p_0 - c_{p0}) - (p_1 + c_{p1})x
$$

Det finnes nå to mulige fremgangsmåter for å beregne de optimale skattene. Det ene er å substituere uttrykket for θ eller τ direkte inn i det dynamiske optimeringsproblemet først og så løse. Det andre er å løse optimeringsproblemet først med hensyn på x og deretter substituere inn i uttrykkene over for å finne θ eller τ. Begge metodene gir selvsagt samme resultat, men sistnevnte fremgangsmåte er den enkleste og minst arbeidskrevende og vil derfor bli brukt i det følgende.

Utledning av feedback-regel for optimal produksjon

I dette avsnittet løser vi kontrollproblemet med hensyn på optimal produksjon x som en funksjon av forurensingsnivået a. Hamiltonfunksjonen for problemet er gitt ved

$$H = H(x, a, \lambda) = W(x, a) + \lambda[x - f(a)]$$

hvor λ er den såkalte costate-variabelen. Det originale med fremgangsmåten her, sammenliknet med standard optimal kontrollteori, er at vi helt fra begynnelsen søker etter en feedback og derfor prøver å eliminere λ isteret for å eliminere kontrollvariabelen slik det alltid gjøres i singulære problem. Hvis vi antar en indre løsning (positiv x og a), består de nødvendige betingelsene for optimum bl.a. av

$$\begin{aligned} H_x &= 0, \\ \frac{d\lambda}{dt} &= r \cdot \lambda - H_a \end{aligned}.$$

Ved å differensiere Hamiltonfunksjonen med hensyn på tiden og kombinere med den dynamiske bibetingelsen får vi[1]

$$\frac{dH}{dt} = r \cdot \lambda \cdot \frac{da}{dt}. \qquad (1)$$

Betingelsen for indre løsning, $H_x = 0$, impliserer at λ kan skrives som en funksjon av x og a:

$$\lambda = -W_x = \Lambda(x, a).$$

Funksjonen Λ er en kjent funksjon siden W er kjent, og den kan nå brukes til å eliminere λ fra problemet. Det gjør at vi kan skrive om igjen uttrykket for Hamiltonfunksjonen uten λ:

---

[1] $\frac{dH}{dt} = H_x \frac{dx}{dt} + H_a \frac{da}{dt} + H_\lambda \frac{d\lambda}{dt}$. Fra f.o.b. har vi $H_x = 0,\ H_a = r\lambda - \frac{d\lambda}{dt}$. Endelig, fra definisjonen av Hamiltonfunksjonen, har vi $H_\lambda = \frac{da}{dt}$.

$$K(x,a) = W(x,a) + \Lambda(x,a)\left[x - f(a)\right]. \qquad (2)$$

Funksjonen K er nå en funksjon som alltid vil være lik Hamiltonfunksjonen i verdi langs en optimal bane, men som funksjonelt uttrykk er den annerledes. Målsettingen i dette avsnittet er å finne optimal produksjon, x, som en funksjon av forurensingsnivået, a; altså $x(a)$. Ved å sette denne funksjonen, som foreløpig er ukjent, inn i uttrykket for K og differensiere med hensyn på tiden, får vi

$$\frac{dK}{dt} = \left(\frac{\partial K}{\partial a} + \frac{\partial K}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial a}\right)\frac{da}{dt}.$$

Per definisjon er imidlertid $\frac{dK}{dt} \equiv \frac{dH}{dt}$. Vi kan derfor bruke (1) til å finne en førsteordens differensiallikning som bestemmer feedback-kontrollen:

$$\frac{dK}{da} \equiv \frac{\partial K}{\partial a} + \frac{\partial K}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial a} = r \cdot \Lambda(x,a) \qquad (3)$$

Ved å løse denne likningen, numerisk eller analytisk, kan en nå finne den optimale feedback-kontrollen.

Generelt er det ingen triviell oppgave å løse denne likningen analytisk. I spesialtilfellet med null diskontering, imidlertid, viser det seg å være ganske enkelt. Fra (3) ser vi direkte at $\frac{dK}{da} = 0$ når $r = 0$. Med andre ord har vi at K er en konstant som vi kan kalle K_0. Denne konstanten kan settes rett inn i (2), og vi får da en ordinær (ikke differensial) likning å løse. Med de funksjonene som er beskrevet foran ser løsningen av denne likningen med hensyn på x, ut som følger:

$$x(a) = f(a) \pm \sqrt{\frac{K_0 - S(a)}{\frac{1}{2}\left[p_1 + c_{s1}\right]}}. \qquad (4)$$

Valg av fortegn i likning (4) vil snart bli redegjort for. Funksjonen *S(a)* er definert som bærekraftig velferd, dvs. den velferden en kan oppnå dersom forurensingen fryses på et vilkårlig nivå. Matematisk er dette gitt ved at $x = f(a)$ substitueres inn i velferdsfunksjonen:

$$S(a) = W(f(a), a).$$

Det eneste som gjenstår er å bestemme konstanten K_0. Vi ser direkte fra (4) at denne konstanten representerer bærekraftig velferd i likevekt fordi når $S(a) = K_0$ har vi at $x = f(a)$, med andre ord likevekt i dynamisk forstand. Og siden vi ikke har diskontering, dvs. at framtidig velferd ikke blir diskontert ned, ønsker vi at denne skal være så stor som overhodet mulig. Med andre blir målnivået definert ved

$$K_0 = max[S(a)].$$

Dette uttrykket bestemmer også indirekte det optimale forurensingsnivået i likevekt, a^*. Mer eksplisitt kan det optimale forurensingsnivået skrives

$$a^* = \arg max[S(a)].$$

Hvorvidt en skal velge pluss eller minus i (4) bestemmes ut fra om man er over eller under den ønskete likevekten a^*. Hvis $a < a^*$, ønsker vi at $\frac{da}{dt} > 0$, og følgelig velger vi pluss slik at $x > f(a)$. Omvendt velger vi minus når $a > a^*$.

Sammenlikning med en skatt basert på skyggeprisen

Den skatten som fremkommer når en substituerer den optimale *x(a)* inn i enten θ eller τ, tar hensyn både til flow- og stock-eksternaliteter. Det vanligste alternativet til den metoden som er skissert her, er å definere en velferds- eller nyttefunksjon direkte uten å si noe om markedsparametrene. Uten å vite noe om markedsparametrene har man heller ikke mulighet til å korrigere for flow-eksternaliteten siden denne er definert som forskjellen mellom sosiale og private grensekostnader. Når man så løser det dynamiske optimeringsproblemet ved hjelp av optimal kontrollteori, fremkommer den optimale skatten som skyggeprisen på forurensing, dvs. costate-variabelen i Hamilton-funksjonen. Hvis vi kaller denne skatten $\sigma(x)$, får vi fra maksimumsprinsippet, $H_x = 0$, at

$$\sigma(x) = -\lambda.$$

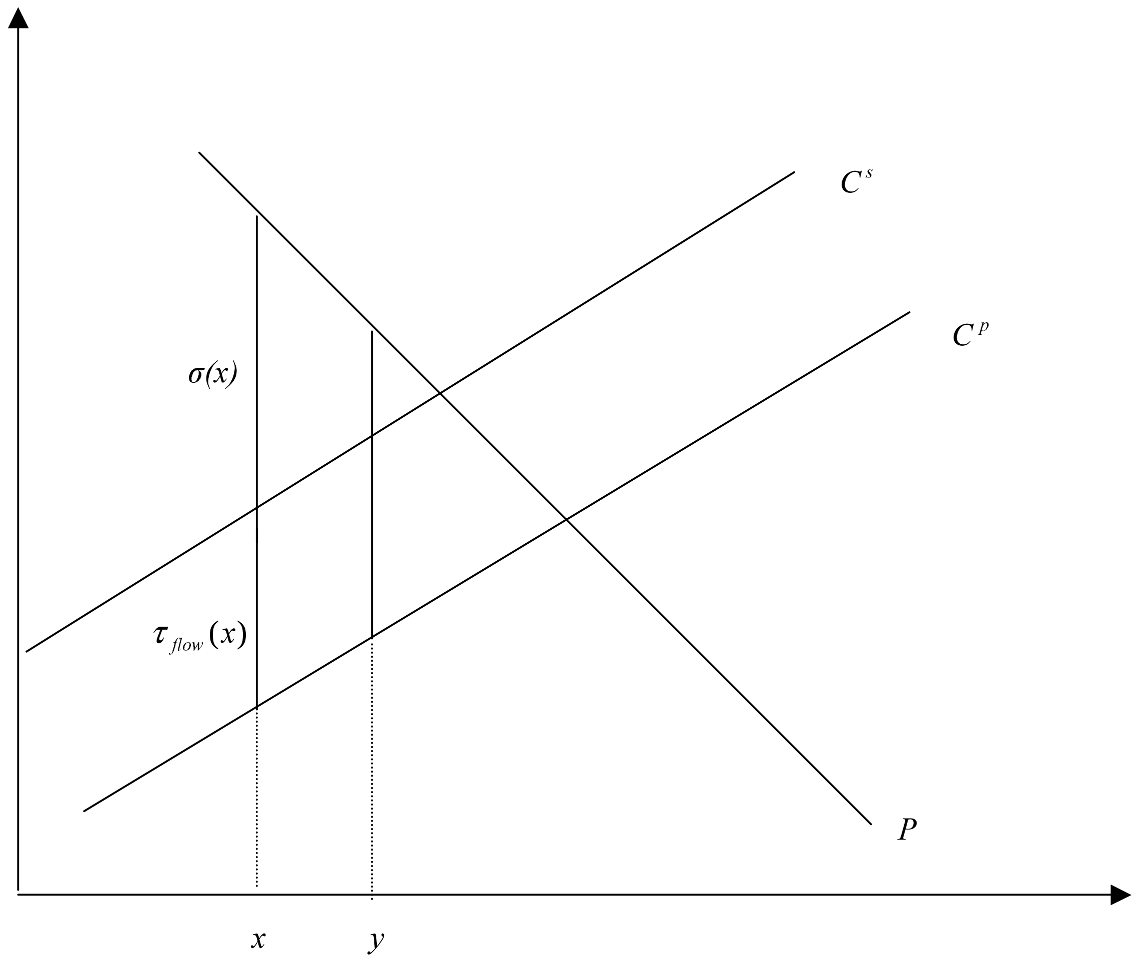
Dette er en skatt som bare korrigerer for stock-eksternaliteten, og siden den er en stykkskatt må den følgelig sammenliknes med τ. Ut fra definisjonen av flow-eksternalitet finner man lett at forskjellen mellom σ og τ er gitt ved

$$\tau - \sigma = C^s - C^p$$

Siden de sosiale grensekostnadene er antatt alltid å være høgere enn de private (negativ eksternalitet) får vi at τ alltid er større enn σ for det samme forurensingsnivået. Som en funksjon av a vil altså τ alltid ligge over σ. Som en følge av dette skulle en gjerne tro at en politikk som følger σ alltid vil medføre lavere miljøskatt og følgelig større produksjon og større utslipp i det lange løp enn en politikk som følger τ. Det kan imidlertid vises at σ-politikken godt kan resultere i en langsiktig likevekt med det motsatte resultatet, nemlig høgere skatt, lavere produksjon og utslipp og med et betydelig høgere akkumulert forurensingsnivå enn det τ-politikken fører til. Vi har med andre ord det noe motintuitive fenomenet at den skatten som for alle forurensingsnivå foreskriver lavest skatt og størst produksjon resulterer i en langsiktig likevekt med høgest skatt og lavest produksjon. Dette skyldes at den dynamiske utviklingen i forurensingsnivået er forskjellig under de to skatteregimene. En nødvendig betingelse for at dette fenomenet skal inntreffe er at nedbrytingsfunksjonen, f, ikke er monotont økende. En ikke-lineær nedbrytingsfunksjon som avtar etter et visst forurensingsnivå er imidlertid langt mer realistisk enn de monotont økende som ofte blir brukt i økonomisk analyse.

For å finne den dynamiske utviklingen i forurensing som følger av en σ-skatt, må en først finne den produksjonen som korresponderer med en σ-politikk. La oss kalle denne produksjonen y. Hvis en ignorerer flow-eksternaliteten og i stedet bruker σ som politisk redskap, vil en på hvert tidspunkt (og for hvert forurensingsnivå) få en markedslikevekt med produksjon y som er gitt ved

$$\tau(y) = \sigma(x(a)). \qquad (5)$$



Figur 1

Dette er illustrert i Figur 1. Ettersom likning (5) er et uttrykk bare i *y* og *a*, kan det brukes til å finne *y* som en funksjon av *a*. Vi har med andre ord en ny feedback-regel, *y(a)* som alltid er større enn *x(a)* for samme *a*, og den dynamiske utviklingen i forurensing som følger av denne er gitt ved

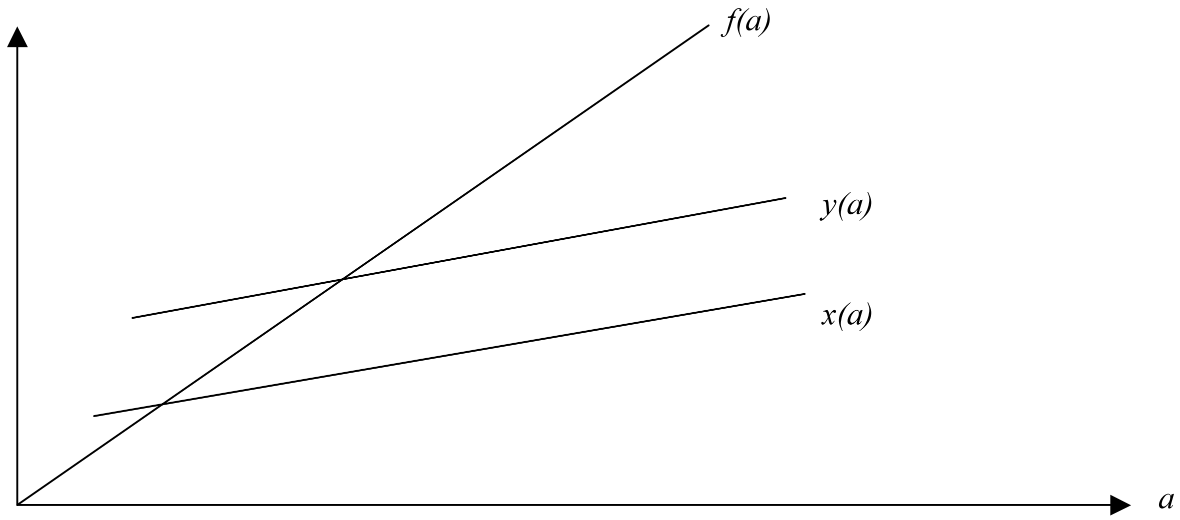
$$\frac{da}{dt} = y(a) - f(a).$$

Feedbacken *y* fører til en annen langsiktig likevekt enn *x* gjør, med et forurensingsnivå som alltid er høgere. Denne langsiktige likevekten, som vi kaller $a^{\#}$, kan finnes ved å substituere $y = f(a)$ inn i (5):

$$\tau(f(a)) = \sigma(x(a)).$$

Ut fra dette får vi to langsiktige likevekter som kan sammenliknes, nemlig $y^{\#} = f(a^{\#})$ som kommer som resultat av en *σ*-politikk og $x^{*} = f(a^{*})$ som kommer som resultat av en *τ*-politikk.

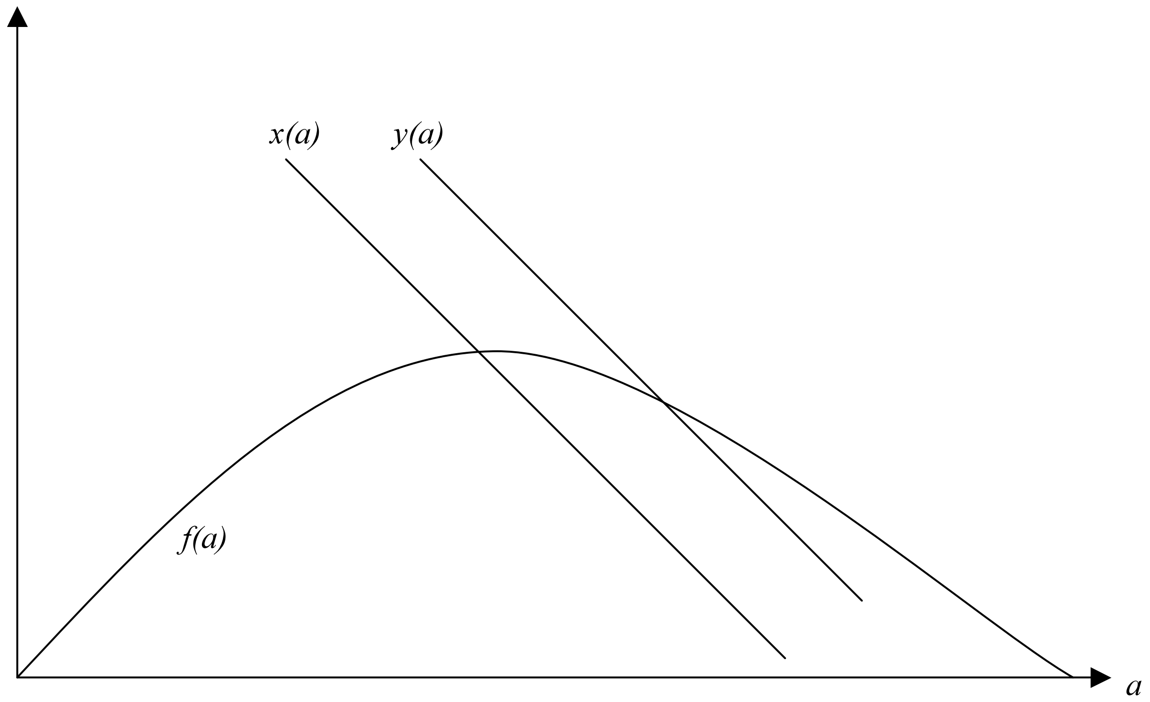
Det motintuitive tilfellet, definert ved at $x(a^{*}) > y(a^{\#})$ og følgelig $\sigma^{\#} > \tau^{*}$, kan *ikke* inntreffe når *f(a)* er monotont økende. At fenomenet ikke kan inntre for monotont økende funksjoner kan en se direkte fra Figur 2. Siden $x(a) < y(a)$ for alle *a*, vil en heller ikke kunne finne en likevekt der $x(a^{*}) > y(a^{\#})$ når *f(a)* vokser monotont. Husk at likevekt per definisjon består av skjæringspunktene mellom *x*- og *y*- kurvene og *f*-kurva, og for at likevektene skal være stabile må *x*- og *y*-kurvene skjære *f*-kurva ovenfra. En nødvendig betingelse for at fenomenet skal inntreffe og representere en stabil likevekt er dermed *at x(a)* skjærer *f*-kurva ovenfra i det området *f*-kurva heller nedover. [2]



Figur 2

Et typisk eksempel på et tilfelle der det motintuitive resultatet framkommer er illustrert i Figur 3. Her er rensefunksjonen, *f*, først stigende og deretter avtakende. Feedbacken *x* krysser *f*-kurva til venstre for (men nær) toppen mens *y* krysser til høyre for toppen. På bakgrunn av kvasi-realistiske inputfunksjoner som blir kalibrert i neste avsnitt, vil en vise at dette motintuitive tilfellet ikke bare er en teoretisk konstruksjon men også er et resultat som godt kan inntreffe i praksis.

[2] For tilstrekkelige betingelser for når det motintuitive tilfellet inntreffer, se Sandal et al. (2000).



Figur 3

Kalibrering av inputfunksjoner

I dette avsnittet vil vi kalibrere inputfunksjoner som kan brukes til numerisk analyse. Vi prøver først å finne hva en global CO_2-avgift typisk bør være. Siden det er stor usikkerhet rundt inputparametrene, vil vi her gi en forholdsvis grundig sensitivitetsanalyse. Deretter vises det at det motintuitive tilfellet beskrevet i forrige avsnitt godt kan inntreffe ved rimelige valg av parametre. I den numeriske analysen antar vi at tilbuds- og etterspørselsparametrene er uavhengige av forurensingsnivået, *a*.

For formålene i denne rapporten begynner vi med noen forenklende antakelser. Vi antar nemlig at alt fossilt brennstoff kan aggregeres i en samlekategori, f.eks. råolje. Dette er ekvivalent med å anta at fordelingen av det fossile brennstoffet til ulike formål ikke endres selv om totalkvantumet endres. Som nevnt tidligere måles både utslipp og produksjon i samme enheter, nemlig giga-tonn CO_2 (Gt-CO_2). Dagens utslipp er anslått til ca. 22 Gt-CO_2, og vi antar at dette er markedslikevekten. Det aggregerte nivået av CO_2 i atmosfæren er 2812 Gt-CO_2 mens det preindustrielle nivået er estimert til 2187. Tallene er hentet fra Nansen Environmental and Remote Sensing Center i Bergen. Det er naturlig å definere det preindustrielle nivået som nullnivå i modellen siden dette utgjør en likevekt uten produksjon. Videre er det rimelig å anta at det ikke er noen skadevirkninger knyttet til det preindustrielle nivået slik at vi har både $f(0) = 0$ og $D(0) = 0$. Med denne reskaleringen er dagens nivå 625 Gt-CO_2.

Deretter kalibreres den private grensekostnadsfunksjonen. Først foretas en reskalering av de økonomiske størrelsene slik at den private grensekostnaden knyttet til uttak av fossilt brennstoff blir definert som en når uttaket går mot null. Det vil si at vi velger denne grensekostnaden som vår økonomiske måleenhet. Det betyr med andre ord at $c_{p0} = 1$. Deretter beregnes tilbudsfunksjonen ut fra rimelige anslag på hva tilbudselastisiteten er. Anslagene for tilbudselastisitet for fossilt brennstoff varierer mye og er høgst usikre. Generelt kan man imidlertid si at tilbudet stort sett blir betraktet å være meget elastisk mens etterspørselen er inelastisk. Dette bidrar til at skatten stort sett betales av konsumentene, men skatteovervelting er ikke et tema i denne rapporten. Burniaux et al. (1992) antar at tilbudselastisiteten for land innenfor OPEC varierer fra en til tre mens den er null for land utenfor OPEC. De høgeste elastisitetene finner en for gass og kull. Ut fra dette har vi valgt å sette dagens tilbudselastisitet lik to. Samtidig kan det nevnes at tilbudselastisiteten for energi fra ikke-fossile kilder blir antatt å være mye lavere.

Estimatene for etterspørselselastisitet varierer også mye. Den kortsiktige elastisiteten blir ofte antatt å være ca. en tiendedel av den langsiktige. Siden vi her bruker en dynamisk, adaptiv modell for å fastsette virkemidlene, er det den kortsiktige elastisiteten vi er ute etter. Elastisiteten vi har brukt er - 0,15 og er hentet fra Jorgenson og Wilcoxen (1990). Disse antakelsene om elastisiteter samt antakelsen om markedslikevekt gir oss tre likninger til å finne de tre parametrene p_0, p_1 og c_{p1}. Utgangsmodellen er da gitt ved:

$$P(x) = 15{,}3 - 0{,}6x$$
$$C^p(x) = 1 + 0{,}045x.$$

Dette gir en privat markedslikevekt på 22 med de angitte elastisiteter. Prisen i likevekt blir 2.

Det som gjenstår er å bestemme den sosiale grensekostnadsfunksjonen som bestemmer flow-eksternaliteten. Det er selvsagt stor usikkerhet knyttet til denne. Antydninger om at de eksterne virkningene ved bruk av fossilt brennstoff kan være i størrelsesorden 50 til 100 prosent av den private prisen er ikke ukjente. I utgangsmodellen velger vi derfor, noe vilkårlig, å sette parameteren c_{s1} til det dobbelte av c_{p1} som gir en sosial grensekostnad på 3 i likevekt, altså 50 prosent høgere enn den private. Det er videre rimelig å anta at ved null utslipp/produksjon er den sosiale grensekostnaden lik den private, altså at $c_{s0} = c_{p0}$. Dette gir

$$C^s(x) = 1 + 0{,}09x.$$

Dette gir oss anslag for parametrene i den private markedsstrukturen samt flow-eksternaliteten. I tillegg trenger vi å vite noe om stock-eksternaliteten og nedbrytingsfunksjonen. Den globale eksternaliteten knyttet til CO_2 er antatt på sikt å kunne bli en til to prosent av verdens brutto nasjonalprodukt. I vår modell tilsvarer dette grovt

$$D(a) = 5 \cdot 10^{-5} a^2$$

når vi bruker en kvadratisk nedbrytingsfunksjon.

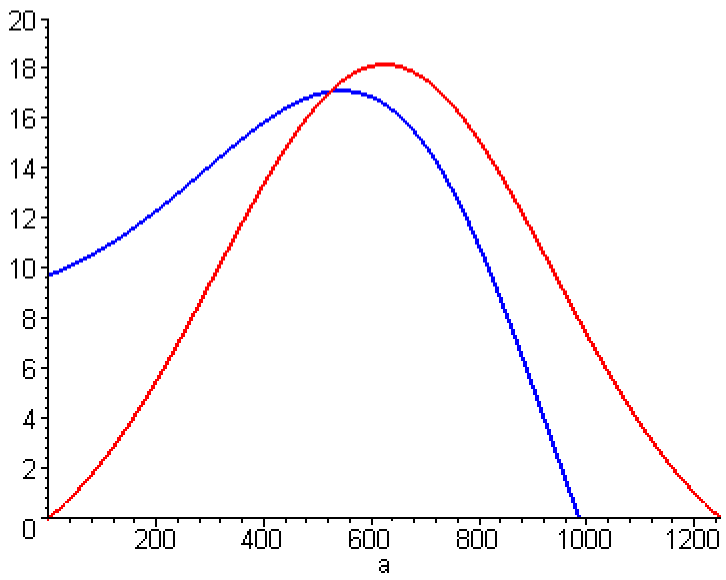
Nedbrytingsfunksjonen er uten tvil den viktigste inputfunksjonen, men samtidig er den vanskelig både å tallfeste og å fastslå formen på. Den er viktig fordi de politiske virkemidlene i sterk grad avhenger av nedbrytingsfunksjonen ikke bare kvantitativt men også kvalitativt. Desto mer påfallende er det da at størstedelen av litteraturen omkring miljøpolitiske virkemidler anvender lineære nedbrytingsfunksjoner. Dette kan dreie seg om enkle, lineære funksjoner (Ulph og Ulph, 1994) eller mer sofistikerte, flerdimensjonale funksjoner (Farzin og Tahvonen, 1996). I dette arbeidet anvendes en klokkeformet nedbrytingsfunksjon som går gjennom origo og som aldri kan bli negativ. Videre gjør vi den noe vilkårlige antakelsen at den er symmetrisk rundt dagens nivå. På denne bakgrunnen er nedbrytingsfunksjonen kalibrert til

$$f(a) = max\left[0, 21 \cdot e^{0{,}512E-5(a-625)^2} - 2.842\right]$$

Dette *gir f(*0*)* = *f(*1250*)* = 0, og *f(*625*)* = 18.2 som er maksimum. Med dette har vi alle de inputfunksjonene som er nødvendig for å beregne den optimale CO_2-avgiften. I det følgende vil vi først gi en numerisk illustrasjon av den generelle CO_2-avgiften og deretter se på det motintuitive tilfellet som er beskrevet foran.

Optimal produksjon og avgift

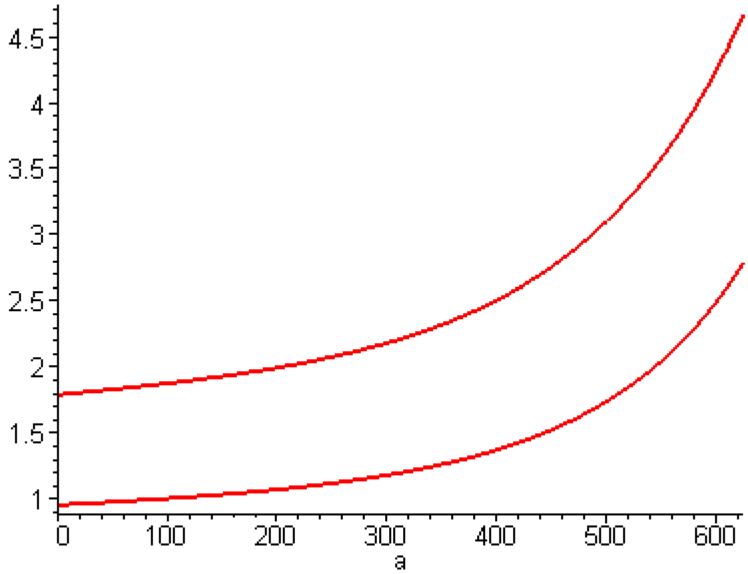
Optimal produksjon gitt som en feedback er illustrert i Figur 4 sammen med nedbrytingsfunksjonen. Skjæringspunktet mellom de to kurvene representerer den optimale dynamiske likevekten. Denne er stabil siden utslippene øker til venstre for likevekten og avtar til høgre. I Figur 5 har vi illustrert de optimale skattene (stykkskatt og ad valorem skatt) som gir denne produksjonen. Det er viktig å merke seg at selv om skattene er økende som funksjoner av *a*, så er de avtakende som funksjoner av tiden ettersom vi starter i dagens situasjon som er 625 og beveger oss mot venstre mot likevekten som er 520. Fra figuren ser vi at ad valorem skatten initielt er ca. 275 % men at den avtar til 180 % når vi nærmer oss likevekten.



Figur 4. Nedbrytingsfunksjon og optimal produksjon.

Det kan også være interessant å se hvordan likevektsutslippet endrer seg når vi endrer antakelsene om elastisitetene, dvs. når vi gjennomfører litt sensitivitetsanalyse. Vi ser først på tilbudselastisiteten som i basiskjøringen er anslått til to. Hva skjer med likevekten og ad valorem skatten når denne settes til henholdsvis en eller tre? A priori vil vi tenke oss at jo mer inelastisk tilbudet og etterspørsel er, desto høgere skatt trengs for å oppnå de ønskete endringene. Husk også at siden vi fortsatt har kravet om at markedslikevekt skal være 22, vil en endring i tilbudselastisiteten påvirke både tilbuds- og etterspørselskurvene, og det vil også påvirke målsettingen med hensyn til optimal likevekt for *a*.

Vi ser først på hva som skjer når tilbud og etterspørsel gjøres mindre elastisk. Når tilbudselastisiteten går mot en, blir den optimale likevekten på ca. 620, altså bare en svak nedgang i forhold til 625. Det som skal til for å oppnå denne reduksjonen er en skatt på initielt 166 % som reduseres litt over tid til 162 % men som for alle praktiske formål kan oppfattes konstant. Når etterspørselselastisiteten reduseres fra 0,15 til 0,10, blir optimal likevekt på 550, og for å oppnå dette trenger vi en skatt som gradvis reduseres fra rundt 340 % til 240 %.



Figur 5. Optimal stykkskatt (øverst) og ad valorem skatt (nederst) som funksjon av *a*. Merk at disse er avtakende som funksjon av tiden ettersom vi beveger oss fra høgre mot venstre i diagrammet.

Det neste vi ser på er når tilbud og etterspørsel gjøres mer elastisk. Dersom tilbudselastisiteten settes til tre, blir den optimale likevekten 507, dvs. lavere enn i basiskjøringen. Det som skal til for å oppnå dette er en skatt initielt på 285 % som gradvis reduseres til 185 %. Dersom etterspørselselastisiteten økes til 0,20 blir optimal likevekt ca. 500, og for å oppnå dette trengs en skatt som går fra 240 % til 160 % over tid.

Vi ser altså at når tilbud og etterspørsel gjøres mindre elastisk, blir den optimale reduksjonen i forurensingsnivået mindre, mao. høgere *a* i optimal likevekt, men det må en forholdsvis høg skatt til for å oppnå denne endringen på grunn av den lave elastisiteten. Når tilbud og etterspørsel blir mer elastisk, blir det optimalt med en større reduksjon i *a*, men til gjengjeld trenger man ikke så høg skatt for å oppnå dette. Resultatene er oppsummert i følgende tabell:

Tabell 1. *Optimal skatt og forurensingsnivå ved ulike elastisiteter*.

tilbudselastisitet	etterspørselselastisitet	a^*	ad valorem skatt
2	-0,15	521	275 – 185 %
2	-0,10	550	340 – 240 %
2	-0,20	500	240 – 160 %
1	-0,15	620	166 – 162 %
3	-0,15	507	285 – 185 %

Det motintuitive tilfellet i praksis

Til sist vil vi se hvordan det motintuitive tilfellet beskrevet tidligere passer inn i den numeriske modellen. Dette gjøres ved å bruke dataene over til å finne den optimale likevekten under henholdsvis en τ-politikk og en σ-politikk. Vi finner da at av de eksemplene vi har sett på over (Tabell 1) inntreffer det motintuitive når tilbudselastisiteten er lik en, for de andre tilfellene inntreffer det ikke. For alle de andre tilfellene skjærer begge kurvene nedbrytingsfunksjonen til venstre for toppen, og fenomenet kan følgelig ikke inntreffe. I det tilfellet at tilbudselastisiteten går mot en får vi

$$a^* = 620, \quad x(a^*) = 18{,}2$$
$$a^\# = 721, \quad y(a^\#) = 17{,}2.$$

Med andre ord, ved å bruke skyggeprisen direkte får vi en likevekt med 100 Gt høyere CO2 konsentrasjon i atmosfæren samtidig som årlig produksjon må reduseres med 1 Gt hvilket medfører høyere skatt.

Oppsummering

I denne rapporten har vi brukt en feedback-modell til å beregne en optimal dynamisk CO_2-avgift som internaliserer både stock- og floweksternaliteten i forbindelse med utslipp av klimagassen CO_2 til atmosfæren. Dette kan kun gjøres ved å ta utgangspunkt i de fundamentale markedsparametrene. Dersom en alternativt starter med en aggregert nytte- eller velferdsfunksjon, må en bruke skyggeprisen (costate-variabelen) som skatt, og denne vil bare kunne korrigere for stock-eksternaliteten. Mer interessant er det at vi i denne rapporten har vist at ved å bruke skyggeprisen, dvs. ignorerer flow-eksternaliteten, kan en ende i en likevekt med lavere produksjon, høgere skatt og høgere akkumulert CO_2 enn om man korrigerer for begge eksternalitetene til tross for at skyggepris-skatten som funksjon av CO_2 alltid er lavere enn den skatten som korrigerer for begge. Det blir også vist at dette faktisk kan inntreffe i praksis dersom tilbudselastisiteten for fossilt brennstoff er lav nok.

Som et hovedresultat fra dette arbeidet kan en si at med de elastisiteter for fossilt brennstoff som har vært brukt her, dvs. tilbudselastisiteter som varierer fra en til tre og etterspørselselastisiteter som varierer fra –0,1 til – 0,2, har vi funnet at den optimale CO_2-avgiften varierer fra 160 til 340 prosent.

Det som trengs fremover for å gjøre resultatene mer eksakt er mer økonometrisk analyse omkring tilbuds- og etterspørselsforhold, kartlegging av eksternaliteter og ikke minst kartlegging av nedbrytingsfunksjonen siden den spiller en såvidt sentral rolle.

Referanser:

Burniaux, J. M., Nicoletti, G., Martins, J. O. 1992. GREEN: A global model for quantifiying the costs of policies to curb CO_2 emissions. *OECD Econ. Stud.* 19 (Winter).

Farzin, Y.H., and Tahvonen, O. 1996. Global carbon cycle and the optimal time path of a carbon tax, *Oxford Economic Papers* **48**: 515-536.

Jorgenson, D. W., Wilcoxen, P. J. 1990. Intertemporal General Equilibrium Modelling of US Environmental Regulation, *Journal of Policy Modeling* **12**: 715 – 744.

Sandal, L.K., Steinshamn, S.I., og Grafton, R.Q., 2000,

Ulph, A. and Ulph, D. 1994. The optimal time path of a carbon tax, *Oxford Economic Papers* **46**: 857-868.