

Makroøkonomiske miljømodeller

Mette Wier

Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Systemanalyse.

SUMMARY: This paper examines the objectives for environmental macro-economic models. From these goals and from the empirical basis a set of guidelines for future modeling is set up.

1. Indledning

Emnet for denne artikel er makroøkonomiske miljømodeller. Formålet er at diskutere hvilken modelmæssig udformning, der egner sig til miljøøkonomiske analyser. Der opstilles retningslinier for videreudvikling af de eksisterende makromodeller, så de bliver i stand til at belyse økologisk-økonomiske problemstillinger generelt. I artiklen fokuseres dels på den anvendelsesmæssige side, idet modellen skal være i stand til at udføre relevante policy-analyser, og dels på den estimationsmæssige side, idet den anbefalede udformning tager udgangspunkt i det eksisterende empiriske grundlag.

Der har i det seneste 5-10 år vist sig et behov for at kunne vurdere og kvantificere både de miljømæssige effekter af den samfundsøkonomiske udvikling og de samfundsøkonomiske konsekvenser af miljøpolitiske tiltag. Udviklingen er først og fremmest en følge af, at miljøproblemerne har ændret både art og omfang. De er p.g.a. et stadig højere økonomisk aktivitetsniveau blevet mere intense og de er på samme tid blevet mere generelle. Der er ikke længere kun tale om lokale skadevirkninger, og dermed et behov for en politisk indsats rettet mod enkelte kilder, men om et generelt struktur- og ressourcemæssigt problem.

Strukturelle forskydninger og lavere vækstrater kan udskyde problemerne, men aldrig forhindre os i at nå dem på længere sigt. Columbusægget hedder teknologisk udvikling. Kun spring i den teknologiske viden kan vende op og ned på problemstillingen og ændre på modsætningsforholdet mellem økonomisk vækst og miljøbelastning. Hagen er bare, at den kendte teknologi ikke kan løse de væsentligste problemer, og ikke ser ud til at være i stand til det de første årtier. Mens vi venter på de teknologiske løsninger, må det helt overordnede miljøpolitiske mål derfor være at reducere den hastighed, hvormed problemerne vokser. Eller m.a.o., at styre mod den udvikling for vores samfund – dvs., de sektor- og varemæssige strukturfor skydninger – der bedst muligt tilfredsstiller vores krav om økonomisk velstand og beskyttelse af miljøet.

Artiklen er en forkortet udgave af en DMU rapport: Wier, Mette: "Makroøkonomiske miljømodeller", Faglig rapport fra DMU nr. 83, 1993. Jeg vil gerne takke seniorforsker Flemming Møller og Frits Møller Andersen, samt lektor Jørgen Birk Mortensen for gode kommentarer.

Makroøkonomiske miljømodeller

Mette Wier

Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Systemanalyse.

SUMMARY: This paper examines the objectives for environmental macro-economic models. From these goals and from the empirical basis a set of guidelines for future modeling is set up.

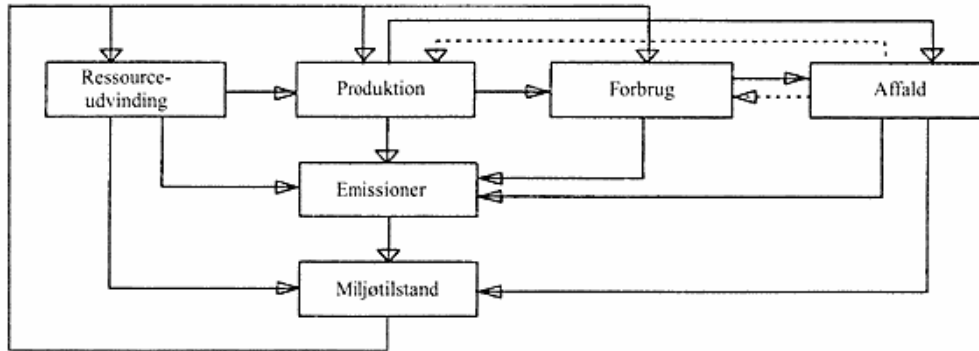
1. Indledning

Emnet for denne artikel er makroøkonomiske miljømodeller. Formålet er at diskutere hvilken modelmæssig udformning, der egner sig til miljøøkonomiske analyser. Der opstilles retningslinier for videreudvikling af de eksisterende makromodeller, så de bliver i stand til at belyse økologisk-økonomiske problemstillinger generelt. I artiklen fokuseres dels på den anvendelsesmæssige side, idet modellen skal være i stand til at udføre relevante policy-analyser, og dels på den estimationsmæssige side, idet den anbefalede udformning tager udgangspunkt i det eksisterende empiriske grundlag.

Der har i det seneste 5-10 år vist sig et behov for at kunne vurdere og kvantificere både de miljømæssige effekter af den samfundsøkonomiske udvikling og de samfundsøkonomiske konsekvenser af miljøpolitiske tiltag. Udviklingen er først og fremmest en følge af, at miljøproblemerne har ændret både art og omfang. De er p.g.a. et stadig højere økonomisk aktivitetsniveau blevet mere intense og de er på samme tid blevet mere generelle. Der er ikke længere kun tale om lokale skadevirkninger, og dermed et behov for en politisk indsats rettet mod enkelte kilder, men om et generelt struktur- og ressourcemæssigt problem.

Strukturelle forskydninger og lavere vækstrater kan udskyde problemerne, men aldrig forhindre os i at nå dem på længere sigt. Columbusægget hedder teknologisk udvikling. Kun spring i den teknologiske viden kan vende op og ned på problemstillingen og ændre på modsætningsforholdet mellem økonomisk vækst og miljøbelastning. Hagen er bare, at den kendte teknologi ikke kan løse de væsentligste problemer, og ikke ser ud til at være i stand til det de første årtier. Mens vi venter på de teknologiske løsninger, må det helt overordnede miljøpolitiske mål derfor være at reducere den hastighed, hvormed problemerne vokser. Eller m.a.o., at styre mod den udvikling for vores samfund – dvs., de sektor- og varemæssige strukturfor skydninger – der bedst muligt tilfredsstiller vores krav om økonomisk velstand og beskyttelse af miljøet.

Artiklen er en forkortet udgave af en DMU rapport: Wier, Mette: "Makroøkonomiske miljømodeller", Faglig rapport fra DMU nr. 83, 1993. Jeg vil gerne takke seniorforsker Flemming Møller og Frits Møller Andersen, samt lektor Jørgen Birk Mortensen for gode kommentarer.



Figur 1.

2. Modelbeskrivelse af de miljøøkonomiske sammenhænge

De makroøkonomiske miljømodeller sigter på at analysere de to grundlæggende modsætningsforhold i miljøøkonomi: for det første trade-off'et mellem økonomisk vækst og miljøkvalitet og for det andet trade-off'et mellem forskellige former for miljøbelastning.

En makroøkonomisk miljømodel skal i denne sammenhæng forstås helt bredt, nemlig som en økonomisk makromodel, der tilkøbes et miljømodul, der beskriver naturressourceforbrug og/eller emissions- og affaldsskabelse. Modeltypen udmærker sig ved den generalitet og det overblik, den giver brugeren over centrale sammenhænge i økonomien og konsekvenser af politiske indgreb.

I det følgende skal *det miljøøkonomiske kredsløb* rides op, med det formål at skabe en referenceramme for artiklen. De næste afsnit i artiklen er herefter en analyse af, hvorledes effekterne til og fra den økonomiske del af kredsløbet kan indarbejdes i en traditionel empirisk model-økonomi. Som illustreret i figur 1 ovenfor forekommer emission og affaldsskabelse i alle faser i det økonomiske kredsløb, lige fra udvinding af råstoffer, over produktion, til forbruget i husholdningerne. Derudover repræsenterer hver af pilene et aktivitetsbehov i form af diverse handels- og transportled.

Naturen bliver både brugt som en produktionssektor, der leverer råvarer, og en servicesektor, der opbevarer og spreder vores biproduktion – affald og emissioner. Denne del af kredsløbet beskrives i modelmæssig sammenhæng i *afsnit 3*. I det omfang naturen udfører denne funktion uden at tage skade, sker der ingen tilbagevirkning på økonomien. Men i det øjeblik belastningen bliver så stor, at forringelser i miljøtilstanden får økonomiske konsekvenser lukkes kredsløbet. De forskellige former for konsekvenser beskrives i *afsnit 4*, idet modellen fra afsnit 3 udvides med miljøets feed-back effekter på økonomien¹. Alle konsekvenser repræsenterer på den ene eller anden måde

1. Udover de økonomiske effekter er der en mængde andre, nemlig den betydning ændringer i miljøtilstanden har på det almene velbefindende gennem vores oplevelse af forringelser i natur- og bymiljø, samt vores helbredstilstand. De tages ikke i betragtning i denne artikel, hvor kun rent økonomiske – direkte observerbare – effekter inddrages.

en økonomisk omkostning og det samfundsøkonomiske problem er først og fremmest spørgsmålet om, hvordan disse omkostninger begrænses.

3. Miljøkonsekvenser af den økonomiske aktivitet

I dette afsnit beskrives den økonomiske aktivitets miljøbelastning som sagt i en formaliseret model. Afsnit A til D omfatter produktionssiden, mens det private forbrugs rolle behandles i afsnit E.

A. Emission fra produktionen

Erhvervenes udledning af affaldsstoffer afhænger af produktionens (fysiske) omfang og af produktionsteknologien. Produktionsteknologien kan, m.h.p. emissionsrelevante variable, inddeles i følgende 4 faktorer: (1) *Erhvervets inputforbrug*, (2) *Genindvinding*, (3) *Procesteknologiske forhold*, dvs. forbrændingsforhold som kedelstørrelse og temperatur, hjælpestoffer, procesintegreret rensning, mv. og endelig (4) *End-of-line rensning*. Udviklingen i de fire faktorer afhænger især af to komponenter, nemlig udviklingen i de økonomiske variable og i den miljøpolitiske lovgivning. I det omfang faktorerne er en funktion af økonomiske variable som output, de relative priser, produktivitet mv. kan de beskrives ved en traditionel økonomisk produktionsfunktion, og det er i disse tilfælde muligt at analysere effekten af økonomiske styringsmidler som f.eks. afgifter på emissionsbærende inputs. Men såfremt en lovgivning baseret på administrativt grundlag har været styrende, kan de gældende sammenhænge ikke beskrives ved hjælp af den økonomiske teori.

Punkt (1) ovenfor – *inputforbruget* – er som følge af producenternes omkostningsminimerende adfærd givet af de relative priser og inputspecifikke produktiviteter, og kan derfor beskrives ved den traditionelle teori om producentadfærd. I de tilfælde punkt (2) – *genindvinding* af et materialeinput – er en følge af ændringer i de relative priser, dvs., det kan betale sig for producenterne at investere i mere kapital eller arbejdskraft for at spare materialer, kan denne faktor beskrives på samme måde. Er det derimod en følge af et lovmæssigt påbud, kan ændringen kun inddrages som en eksogen justering – produktionsfunktionen kan ikke i sig selv forklare ændringen.

Dette gælder også for punkt (3) og (4), *rensning og procesteknologiske forhold*. Udviklingen i disse faktorer kan ikke forklares ved økonomiske variable, simpelthen fordi der ikke har været tradition for økonomisk styring på miljøområdet. I de følgende tre afsnit diskuteres hvordan man i praksis bedst forklarer emissionen, dels ved økonomiske variable, dels ved eksogene justeringer.

B. Sammenhængen mellem inputforbrug og miljøbelastning

Emissionerne afhænger først og fremmest af inputforbruget, hvorfor det selvsagt er nødvendigt at produktionsfunktionerne beskriver dette. De traditionelle analyser med

makroøkonomiske miljømodeller (Jf. bl.a. Gørling (1988), Førsund (1985)) lader imidlertid emissionerne afhænge af outputmængden, hvilket indebærer at de vil vokse med denne, uanset produktionsteknologien. Dvs., ligegyldigt om væksten i output hidrører fra en øget kapital- eller arbejdskraftindsats eller en øget materialeintensitet, vil emissionerne vokse med samme rate. I forhold til disse modeller er det derfor påkrævet at *dekomponere den økonomiske vækst* i de dele, der har betydning for emissionerne, og de der ikke har det, og samtidig lade *emissionerne afhænge af de emissionsbærende inputs*. Alt efter hvilke inputs, der fokuseres på, vil den del af væksten, der har betydning for udledningerne, blive udskilt. Såfremt modellen kan beskrive producenteres forbrug af de relevante inputs vil den samtidig kunne beskrive ændringer i emissionerne som følge af substitution mellem materialeinputs indbyrdes og mellem materialer og produktionsfaktorer. Dette gælder også ændringer i *fast affald*, der i langt højere grad er proportional med materialeinputtene end med output. Hvis prisen på materialet er høj nok, vil affaldsskabelsen søges reduceret ved en øget indsats af andre inputs.

C. Aggregeringsniveauet

Aggregeringsniveauet for både varer og erhverv er en central modelegenskab. Aggregeringen af varer er bestemmende for den måde, hvorpå emissionerne forbindes til inputtene, dvs. hvorvidt der fokuseres på den samlede materialeinputmængde i et givet erhverv eller på enkelte centrale vare- eller materialegrupper. Det samlede materialeforbrug er først og fremmest en indikator på affaldsmængden og emissionerne for i øvrigt given teknologi. Men i det omfang det er sammensætningen af materialerne, der er det centrale, bør man disaggregere og udskille de relevante varegrupper. Såfremt en bestemt varegruppe er bærer af bestemte emissions- eller affaldsproblemer skal efterspørgslen efter netop dette input specificeres².

Det er i de fleste tilfælde nødvendigt også sektormæssigt at arbejde med en vis disaggregering. Det skyldes, at emissionen for samme input ofte varierer fra erhverv til erhverv, idet sektorernes brug af det emissionsbærende input er forskellig. I dette tilfælde

2. På samme måde er det relevant at bestemme efterspørgslen efter de varegrupper, der indikerer forbruget af naturressourcer. De økonomiske erhvervs brug af naturressourcer som input i produktionen kan modelmæssigt beskrives i en produktionsfunktion på linie med forbruget af andre inputs, dvs. afhængigt af prisen på ressourcen relativt til andre inputpriser. I de makroøkonomiske miljømodeller kan ressourcerne analyseres helt traditionelt, idet de analyseres m.h.p. at beskrive samspillet mellem forbrugets størrelse, udtømningsgraden og pris- og mængdeforskydninger på makroplan.

Teorien fortæller os, at efterhånden som vi nærmer os udtømningsgrænsen, vil det relative prisforhold stige, hvilket dels vil føre til faldende anvendelse, dels vil gøre det profitabelt at benytte et substituerbart input i produktionen. Det interessante ved at indarbejde naturressourcer, er netop samspillet mellem udtrækket, der gives i modellen, og ændringer i beholdningen, der gives ved at koble modellen til naturressourceregenskaber.

må man derfor estimere koefficienten for et givet erhverv på så detaljeret niveau, at man med rimelighed kan generalisere over procesteknologiske og rensningsmæssige forhold. På denne måde vil en tilstrækkelig høj disaggregering reducere usikkerhed fra ændringer i disse to faktorer.

D. Eksogene indgreb i modelkørsler – lovgivning og holdninger

I de traditionelle neoklassiske modeller er det muligt at analysere inputsammensætningens reaktion på ændringer i relative inputproduktiviteter og -priser. Som sagt virker også andre variable ind på både inputforbrugets sammensætning og emissions- og affaldsproduktion, således at det er nødvendigt at foretage eksogene indgreb i relationerne, som udtryk for ændringer i disse variable. En af de eksogene faktorer er som omtalt miljøpolitikken. Den har været præget af mængdestyring af emissioner og emissionsbærende inputs, der i disse tilfælde udvikler sig uafhængigt af økonomiske variable. Andre faktorer kan være ændringer i forbrugernes præferencer som følge af stigende miljøbevidsthed, der kan føre til renere produktion. I mange tilfælde følger disse faktorer en gradvis udvikling, og kan derfor med fordel beskrives ved indlægning af trends eller lags i produktionsfunktionen. Er der omvendt tale om pludselige miljøpolitiske indgreb med et regulært skift i teknologien som følge, må modellen tilføres yderligere information. En måde at gøre dette på er at iagttage de største og mest betydelige virksomheder indenfor de relevante erhverv, og simpelthen indlægge deres ændringer som eksogene skift. I alle de nævnte tilfælde skal modellen på brugersiden være udformet, så der er mulighed for at gribe ind og foretage de kvantitative ændringer i de relevante variable. Der skal med andre ord være et antal håndtag, der muliggør inddragelse af informationer uden for modellen i kørslerne, således at de eksogene ændringer i lovgivning, adfærdsmønstre og teknologi kan indarbejdes.

E. Emission fra forbrug

Forbrugssiden er på mange måder helt parallel til produktionssiden. Det drejer sig også her om at udskille de varegrupper, der har betydning for miljøbelastningen, og særskilt beskrive efterspørgslen efter dem. Traditionelt beskrives vareforbruget som afhængigt af de relative prisforhold varegrupperne imellem, af indkomst, af vanedannende effekter mv., givet forbrugernes præferencer, og ikke-økonomiske forklarende variable inddrages sjældent. Forbrugernes præferencer er imidlertid muligvis ændrede de senere år, idet varens miljøbelastende egenskaber kan være et kriterium i vareudvælgelsen. Overgang til renere varer kan have fulgt en stigende trend i takt med at disse produkter har taget markedsandele og genbrugsideologien er slået igennem. En sådan trend kan lægges ind, men spørgsmålet er, om udviklingen stagnerer eller ligefrem vender. Modellen kan ikke give svaret på disse adfærds- og holdningsændringer, men må – som det var tilfældet på produktionssiden – tilføres eksogen information for at

kunne ramme udviklingen. Da forbrugssiden således rummer samme problemstillinger som produktionssiden, skal den ikke behandles nærmere i denne artikel.

Opstilling af modellen

Det samlede produktionssystem for en given sektor kan eksempelvis se ud som vist nedenfor³. Inputtene er indbyrdes substituerbare i hver funktion, men ligger herefter fast i et aggregat, der på højere niveau kan substituere med andre aggregater. For det økonomiske system (relation (ø1) til (ø7)) er fortolkningen følgende: (ø1) er produktionsværdien X som funktion af alle inputaggregater på øverste niveau. På næste niveau gives inputaggregaternes fordeling på inputs. (ø2) er værditilvæksten Y som funktion af arbejdskraft L og kapitalindsats K , (ø3) er materialeforbruget M som funktion af fire inputs, herunder to materialetyper (M_1 og M_2), en ikke-fornybar ressource R_1 , og en fornybar R_2 . (ø4) er energiforbruget E fordelt på to energiarter E_1 og E_2 , og endelig er (ø5) forbruget af transportydelser T som funktion af to transporttyper T_1 og T_2 . Relation (ø6) på nederste niveau beskriver transporttype T_1 's brug af de to energiinputs.

Emission og affaldsskabelse beskrives i relation (e1) til (e4). Ligning (e1) er en given emissionstype e_1 som funktion af erhvervenes direkte brug af de to energiarter og af transportaktiviteternes energiforbrug. (e2) giver emissionstypen e_2 som funktion af brugen af materialeinputtet M_1 og ressourcerne R_1 og R_2 . (e3) er en affaldsart w_1 som funktion af materialeinputtet M_1 . Endelig er (e4) emission af e_4 i forbindelse med behandling af affaldstype w_1 .⁴

Økonomisk produktion

$$(ø1) X = f_1(Y, M, E, T)$$

$$(ø2) Y = f_2(K, L) \quad (ø3) M = f_3(M_1, M_2, R_1, R_2) \quad (ø4) E = f_4(E_1, E_2) \quad (ø5) T = f_5(T_1, T_2)$$

$$(ø6) E^{T1} = f_6(E_1^{T1}, E_2^{T1})$$

3. Der er tale om en *del-model*, der i princippet kan kobles til alle traditionelle former for makromodeller (efter passende justeringer) – bemærk derfor, at modellen ikke er lukket. Opbygningen er først og fremmest valgt for at illustrere hvorledes et varemæssigt disaggreteret system kan udformes for en given sektor. Der er tale om et omfattende system, der vil indebære et meget stort modeludviklings- og estimationsarbejde, særlig i emissionsdelen. Det vil derfor i første omgang være fornuftigt at gøre sig klart hvilke miljøproblemer der er de mest centrale, og herefter koncentrere modeludbygningen på disse områder. Af estimationstekniske grunde er systemet nested, med de nødvendige antagelser om homothesitet og separabilitet.

4. Modellen kunne ydermere udvides med et ressourceregnskab, hvor ligningerne (r_1) og (r_2) er relationer, der angiver hvor stor ændringen af beholdningerne er i en given periode.

$$(r1) \dot{N}_1 = -R_1 \quad (r2) \dot{N}_2 = g(N_2, R_2), g'_{R2} < 0$$

R_1 og R_2 angiver strømme, dvs. det udtræk der foretages i en periode, mens \dot{N}_1 og \dot{N}_2 er ændringen i beholdningen af ressourcerne i løbet af en given periode. For den udtømmelige ressource R_1 er ændringen blot lig udtaget. For den fornybare afhænger ændringen også af væksten i den biologiske population, der helt generelt antages at afhænge af populationens størrelse N_2 . Funktion g 's afledede med hensyn til R_2 er negativ, idet større udtag vil føre til lavere tilvækst i beholdningen.

Emission og affaldsskabelse:

$$(e1) e_1 = e_1(E_1, E_2, E_1^{t1}, E_2^{t1}) \quad (e2) e_2 = e_2(M_1, R_1, R_2)$$

$$(e3) w_1 = w(M_1) \quad (e4) e_4 = e_4(a_1)$$

Den opstillede model er et godt grundlag for analyse af vækst og strukturforskydninger i økonomien og de heraf afledte miljøkonsekvenser. Beskrivelsen af strukturforskydningerne er vigtige af to grunde: Dels fordi modsætningsforholdet mellem økonomisk vækst og miljøkvalitet beskrives, og det illustreres, hvorledes miljøbelastningen per produceret enhed – indenfor visse grænser – kan reduceres. Og dels fordi de trade-off's, der eksisterer mellem forskellige typer miljøbelastning, afdækkes. Hvert input og hver sektor er jo bærer af hver sin form for emission eller ressourcestræk, og ofte vil man være tvunget til at intensivere en form for miljøbelastning for at reducere en anden. Modellen muliggør med andre ord en samlet beskrivelse af samfundsøkonomiske og miljømæssige forskydninger som følge af alternative politiske tiltag.

4. Økonomiske konsekvenser af ændringer i miljøtilstanden

I dette kapitel fokuseres på miljøtilstandens påvirkning af produktionen. Afsnit A handler om den forringelse af inputkvaliteten, forureningen medfører, mens der i afsnit B inddrages den tilpasning, der sker i det økonomiske system.

A. Miljøtilstand og produktivitet

Generelt gælder det, at forureningens skadevirkninger samfundsmæssigt kommer til udtryk på 3 måder: (1) reduktion i udbuddet af inputtene, (2) reduktion i produktiviteten af inputtene og (3) negativ indvirkning på forbrugernes nytte af naturoplevelser, dvs. faldende nytte af hvad man kunne kalde forbrug af miljøgoder. Som nævnt i indledningen ses der i denne artikel bort fra ikke-økonomiske effekter. Da (3) kan antages ikke at have betydning for forbrugernes økonomiske adfærd, betragtes kun (1) og (2).

(1) er de tilfælde, hvor inputtet er en *biologisk population*, f.eks. skove eller fiskebestande. Her fører forurening til øget sygdom og dødelighed og reducerer på denne måde den tilgængelige mængde af inputtet. Denne effekt beskrives bedst, når makromodellen kombineres med et naturressourceregnskab. Tilfælde (2) er dels *stoffer og materialer* – organiske eller uorganiske – dels produktionsfaktorer som *jord, havet eller arbejdskraft*, hvor effekten på den ene eller anden måde altid vil være en forringelse af inputtets kvalitet.

Tilfælde (2) kan sættes ind i en modelsammenhæng på følgende vis: Såfremt q , r , u og v angiver de faktorspecifikke produktivetsændringer (for henholdsvis kapital, arbejdskraft, energi og materialer), vil skadeseffekten s indvirke på denne. De antages derudover at vokse med konstante rater, således at f.eks. $q = q(E_K(0)e^{zt}, s)$, hvor q er den samlede produktivetsændring for kapitalapparatet K , som dels er en funktion af

de teknologiske fremskridt, der vokser eksponentielt med raten z , og dels er en faldende funktion af skadesniveauet s . Skadesniveauet skal opfattes som en *tilstandsvariabel* (f.eks. koncentration af forskellige stoffer i recipienten) og dens effekt på produktiviteten kan beskrives ved hjælp af en såkaldt dose-response funktion, der kvantificerer effekten af en given påvirkning på et input.

Det skal understreges, at modellen blot er en udbygning af den i kapitel 2 opstillede del-model. For at holde den udvidede del-model på et rimeligt overskueligt niveau opereres kun med inputtene K , L , E og M på eet niveau. Ligeledes opereres kun med to emissionstyper, de energirelaterede e_1 og de materialerrelaterede e_2 . Samtidig antages at kun kapital- og arbejdsproduktiviteten forringes som følge af emissionerne.

Økonomisk produktion:

$$(ø1') X = f_1(qK, rL, uE, vM)$$

Emission:

$$(e1') e_1 = e_1(E) \quad (e2') e_2 = e_2(M)$$

Skades- og produktivitetseffekter:

$$(s1) s = s(e_1, e_2, s_{t-1}) \quad s'_e > 0, s'_{t-1} > 0$$

$$(s2) q = q(E_K(0)e^{zt}, s) \quad \text{og} \quad r = r(E_L(0)e^{zt}, s) \quad , q'_s < 0, r'_s < 0$$

(s1) viser skadesniveauet som funktion af emissionsniveauet og skadesomfanget i forrige periode s_{t-1} og (s2) faktorproduktivtetsændringerne som funktion af skadeseffekten og de teknologiske fremskridt.

B. Tilpasning og produktivitet

Simultant til skadeseffekterne sker der løbende tilpasninger, hvor igennem der søges reduktion eller udbedring af skaderne. Det er i denne forbindelse hensigtsmæssigt at skelne mellem den tilpasning, der indebærer en egentlig forebyggelse og den tilpasning, der er en reaktion efter at skaden er sket. Den førstnævnte art, som kunne kaldes *ex-ante tilpasning*, er f.eks. rensning eller renere produktion. Den anden type er *ex-post tilpasningen*, dvs. beskyttelsesforanstaltninger eller ændringer i den økonomiske vareefterspørgsel. Beskyttelsesforanstaltningerne er eksempelvis skadesudbedring, hvor det forøges at bringe recipienten eller de beskadigede inputs tilbage til udgangspunktet. Både rensning og beskyttelsesforanstaltninger kræver udbygning af modellen, mens ændringerne i vareefterspørgslen på produktionssiden beskrives gennem den eksisterende produktionsfunktion og producentens profitmaksimerende adfærd. Inputsammensætningen vil ændre sig, fordi produktiviteten af det forurenende input vil være forringet. Det er derfor fordelagtigt at benytte relativt mere af de øvrige inputs til givne priser.

Systemet kan se ud som vist nedenfor. Ex-ante tilpasningen a^a optræder i relation ($e1''$) og ($e2''$), idet den reducerer mængden af emissioner. Den er modelmæssigt antaget at kunne beskrives ved en *rensningsfunktion*, analog til de økonomiske produktionsfunktioner. Heri produceres reduktion af emissioner og inputtene antages at være kapital og arbejdskraft. Ex-post tilpasningen (beskyttelsesforanstaltningerne) a^p beskrives også i en produktionsfunktion for sig, der benytter indsats af de to produktionsfaktorer, plus en materialeindsats. Den kan både optræde i relation ($s1''$), hvor den reducerer skadesomfanget, og i ($s2''$), hvor den forhøjer produktaktiviten. Der ses for enkeltheds skyld bort fra miljøbeskadigelser som følge af tilpasningsaktiviteter.

Økonomisk produktion:

$$(\theta 1') x = f_1(qK^1, rL^1, uE^1, vM^1)$$

$$(\theta 2') a^a = f_2(qK^2, rL^2) \text{ og } a^p = f_3(qK^3, rL^3, vM^3)$$

Emission:

$$(e1'') e_1 = f_{e1}(E^1, a^a) \quad (e2'') e_2 = f_{e2}(M^1, a^a)$$

Skades- og produktivitetseffekter:

$$(s1'') s = s(e_1, e_2, s_{t-1}, a^p) \quad s'_{e1} > 0, s'_{e2} > 0, s'_{s_{t-1}} > 0, s'_{a^p} < 0$$

$$(s2'') q = q(E_K(0)e^{zt}, sa^p) \text{ og } r = r(E_L(0)e^{xt}, sa^p), p'_{s'} < 0, p'_{a^p} > 0$$

Modellens anvendelsesmæssige muligheder er nu udvidet, idet der er åbnet op for mere normativt orienterede analyser. Det samfundsmæssigt mest relevante problem må i denne model være at finde den optimale fordeling af samfundets ressourcer, altså fordelingen af arbejdskraft, kapital mv. mellem de almindelige økonomiske og de tilpassende aktiviteter. Den optimale fordeling afhænger af hvor stor effekt på produktiviteten ændringer i skadeseffekten og tilpasningen har i forhold til hinanden. De teknologiske fremskridt vil med tiden ændre kurvernes form og dermed optimumspunktet. Det er således klart at der over tid er tale om en slags kapløb mellem de teknologiske fremskridt og miljøforringelserne – jo større de teknologiske skift bliver, desto mindre vil de miljømæssige begrænsningers relative betydning blive. Man må gøre sig klart, at en kvantitativ vurdering af både emissioner fra de forskellige aktiviteter, skadesomfanget, tilpasningen og den endelige produktivetsforringelse er forbundet med meget store vanskeligheder. Ovenstående skal opfattes som et forslag til, hvorledes miljøeffekterne kan systematiseres, såfremt alle nødvendige oplysninger foreligger. Estimationen kan dels blive problematisk p.g.a.. utilstrækkeligt datagrundlag, dels p.g.a.. modellens disaggregerede karakter. Den miljøpolitiske relevans vil ofte kræve et lavt aggregeringsniveau, men det må aldrig blive så lavt, at de opstillede sammenhænge ikke udviser parameterstabilitet. Visse dele af modellen er dog afprøvet i empirisk sammenhæng. En kortfattet gennemgang af disse studier kan findes i Wier (1993).

5. Modellernes anvendelse til konsekvensvurdering af politiske indgreb

I dette sidste afsnit afrundes diskussionen om makromodellens anvendelsesmuligheder i miljøpolitisk sammenhæng med en kort diskussion af valg af modeltyper.

Mens miljøeffekten modelmæssigt er givet ud fra de teknologisk bestemte emissionsforhold og de naturvidenskabeligt fastlagte sprednings- og dose-response funktioner, afhænger de økonomiske konsekvenser i høj grad af modellens økonomisk-teoretiske grundlag. På mikroniveau søger både producenter og forbrugere at tilpasse sig de ændrede betingelser gennem substitution. Substitutionen foranlediger nye ligevægtsmængder og priser på makroplan, men de endelige resultater af disse forskydninger vil i høj grad afhænge af hvilken type makroøkonomisk model, del-modellen kobles på. Der er især to antagelser, der har afgørende betydning, nemlig (1) antagelser om faktormarkederne og (2) antagelser om de teknologiske fremskridt.

ad (1): De fleste hidtidige beregninger af miljøpolitiske indgreb i makromodeller resulterer i en større eller mindre økonomisk omkostning (Jfr. f.eks. Brendemoen (1991), Proost (1991), Manne (1990)). Dette facit afhænger som sagt afgørende af den anvendte modeltype – en generel ligevægtsmodel – og dennes egenskaber. I praksis fremkommer det samfundsøkonomiske tab oftest som en forbrugsnedgang p.g.a. tilpasningsaktiviteternes beslaglæggelse af knappe ressourcer. Både øgede rensningsaktiviteter og substitution bort fra et afgiftsbelagt emissionsbærende input indebærer øget efterspørgsel efter produktionsfaktorerne. I de Keynesiansk inspirerede makromodeller med rigeligt faktorudbud er der derimod plads til den øgede faktorefterspørgsel. Ændringen kan derfor vise sig gunstig – en øget ressourceanvendelse vil jo blot sætte en multiplikator effekt i gang. Makromodellernes resultater afhænger således afgørende af de bagvedliggende antagelser. Det mest interessante resultat er dog heller ikke nødvendigvis størrelsen af en fremtidig forbrugsnedgang, men i ligeså høj grad den information om miljøkonsekvenser af vare- og erhvervsmæssige forskydninger, modellerne indeholder.

ad (2): De modeltyper, der er beskrevet i denne artikel behandler grundlæggende vareproducerende økonomisk aktivitet og bevarelse af miljøet som uforenelige modsætninger. Tilpasningsaktiviteterne og de teknologiske fremskridt opløder denne modsætning. Særlig de teknologiske fremskridt fremstår som en forløsende faktor, fordi deres miljøforbedrende egenskab opnås uden omkostninger: i modellen optræder de simpelthen som et skift til lavere inputforbrug og dermed mindre miljøbelastning per produceret enhed. Den teknologiske udvikling påvirker gennem denne ændring samfundet på to måder: dels formindsker den miljøproblemerne, dels forskyder den samfundets optimumspunkt, dvs. den optimale fordeling af ressourcerne.

Desværre kan den økonomiske teori, der anvendes i empiriske modeller, kun i ringe omfang beskrive udviklingen i teknologien endogent, selvom den er særdeles afgøren-

de for forklaringen af økonomisk vækst⁵. Man kan sige, at det væsentligste problem er at beskrive de *muligheder* fremtiden byder i form af kommende innovationer og evolutioner på tilfredsstillende vis. Denne artikels modeller egner sig bedst til at beskrive de *begrænsninger* vi vil opleve ved vores økonomiske færdens nedslidning af naturen.

6. Opsamling og konklusioner

Foringelser af naturtilstanden påvirker os på to måder, nemlig gennem vores ikke-materielle og vores materielle livskvalitet. I denne artikel er der fokuseret på sidste faktor, idet det er forsøgt at indarbejde den i en traditionel makroøkonomisk model-sammenhæng. Det står klart, at der eksisterer et trade-off på to planer: dels på overordnet niveau mellem økonomisk vækst og miljøforringelser over en bred kam, og dels mellem forskellige former for miljøbelastning. De forskellige former er afhængige af sammensætningen af den økonomiske vækst og kan modelmæssigt kun illustreres ved tilstrækkelig disaggregering af sektor- og varegrupper.

De empiriske modellers største relevans ligger netop i beskrivelsen af disse trade-offs. Den samfundsøkonomiske problemstilling kan koges ned til at finde den optimale ressourcefordeling, dvs. hvilke strukturforskydninger, der mindsker miljøbelastningen, samtidig med at vores krav om økonomisk velstand indfries. Det økonomiske systems miljøbelastende egenskaber kan ændres på to måder, nemlig ved ændringer i sammensætningen af aktiviteter eller ved ændringer i aktiviteternes produktionsmåde. I det første tilfælde ændres outputsammensætningen, dvs. efterspørgslen drejes henimod varer, der er mindre miljøbelastende i såvel produktionsmæssig som forbrugsmæssig henseende og henimod forskellige former for tilpasningsaktiviteter. I det andet tilfælde ændres inputsammensætningen for en given vare, dvs. de miljøbelastende inputs substitueres så vidt muligt ud. Alle forskydningerne er underlagt økonomiske og teknologiske begrænsninger, og kan kun finde sted inden for disse begrænsningers rammer. De makroøkonomiske modeller kan sætte tal på de parametre og andre variable, der beskriver mulighederne og kan gennem sine årsags-virknings sammenhænge illustrere hvilke økonomiske håndtag der skal drejes på.

5. Drivkræfterne i de traditionelle vækstmodeller er eksogent givne teknologiske fremskridt, befolkningstilvækst og opsparingsadfærden. Økonomiske modeller, der søger mere nuancerede forklaringer på vækstrater, har traditionelt fokuseret på indlæringseffekter og arbejdsdeling og fra slutningen af 80'erne på forsknings- og udviklingsindsatsen. Den empiriske anvendelse af disse modeltyper er imidlertid problematisk, først og fremmest fordi de nævnte faktorer er vanskelige at afgrænse og kvantificere.

Litteratur:

- Brendemoen, Anne m.fl. 1991. *A Climate Convention and the Norwegian Economy: A CGE Assessment*, Paper presented at the second EAERE conference, June 1991.
- Førsund, Finn. 1985. Input-Output Models, National Economic Models, and the Environment. I *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*, red. Kneese & Sweeney, North Holland.
- Gørling, Anders. 1988. *Økonomisk Tillvæxt och Miljø*. Økonomiske Studier, Handelshøgskolan vid Göteborgs Universitet.
- Manne, A.S., and Richels, R.G. 1990. CO-2 emissions reductions: an Economic Cost Analysis for the USA. *The Energy Journal*, Vol. 11, 1990.
- Proost, S. m.fl. 1991. *A General Equilibrium Analysis of a National Carbon Tax*. Paper for the Second EAERE Conference, June 1991.
- Wier, M. 1993. *Makroøkonomiske miljømodeller*; Faglig rapport fra DMU nr. 83, Danmarks Miljøundersøgelser.