



CICERO

Senter for  
klimaforskning

Center for  
International Climate  
and Environmental  
Research - Oslo

Working Paper 1999:11

# Metodar for å samanlikne utslepp av klimagassar GWP-konseptet og alternative metodar

*Linda Sygna, Jan S. Fuglestad  
og Asbjørn Aaheim*



Universitetet i Oslo

University of Oslo

ISSN: 0804-452X



CICERO Working Paper 1999:11

**Metodar for å samanlikne  
utslepp av klimagassar**  
GWP-konseptet og alternative metodar

**Linda Sygna, Jan S. Fuglestedt og Asbjørn Aaheim**

12. oktober 1999

**CICERO Senter for klimaforskning**

Postboks 1129 Blindern, 0317 Oslo

Telefon: 22 85 87 50

Faks: 22 85 87 51

E-post: [admin@cicero.uio.no](mailto:admin@cicero.uio.no)

Web: [www.cicero.uio.no](http://www.cicero.uio.no)

## Samandrag

I denne publikasjonen har vi søkt å presentere ulike metodar for å samanlikne effekten av utslepp av klimagassar. Det globale oppvarmingspotensialet (GWP) er utvikla av FN sitt klimapanel (IPCC) til dette formålet. Dette konseptet har ein viktig funksjon i politiske avvegingar mellom ulike klimagassar. GWP tener det formål den var sett til, nemleg å samanlikne det akkumulerte strålingspådrivet som pulsutslipp av ulike gassar resulterer i.

GWP som eit mål for gassen sin oppvarmingseffekt er derimot meir problematisk. Klimagass utslepp vert vekta etter kva tidshorisont ein vel. Det er heller ikkje vilkårleg kva gass ein vel å redusere m.o.t. temperaturendring. Dette vert ytterlegare forsterka då indeksen er sensitiv overfor ulike scenario m.o.t. framtidig utslepp og atmosfæren si samansetning og kjemi. Ei økonomisk tilnærming søkjer å finne ei løysning på den naturvitskapelege statiske indeksen. Dette innebær at ein diskonterer framtidig skade. Slik vert samanlikning og avveging mellom ulike gassar basert på diskontert oppvarmingspotensial eller diskonterte marginale utsleppskostnader. Ei slik tilnærming kan kvantifisere endra oppvarmingspotensial/utsleppskostnader. Til no viser det seg at desse alternative metodane ikkje har noko gjennomslagskraft hjå avgjerdstakarar.

## **Innhald**

1	INTRODUKSJON.....	6
2	KRAV TIL INDEKS.....	7
3	GLOBALT OPPVARMINGSPOTENSIAL.....	10
3.1	Svake sider ved GWP.....	15
3.2	Val av tidshorisont.....	16
3.3	Naturvitskapleg fundament.....	19
4	ØKONOMISK TILNÆRMING I UTARBEIDINGA AV GWP.....	20
4.1	Det diskonterte globale oppvarmingspotensialet (DGWP).....	21
4.2	Andre GWP-formuleringar.....	25
5	ALTERNATIVE METODAR FOR SAMANLIKNING.....	26
5.1	Statiske modellar.....	26
5.2	Dynamiske modellar.....	28
6	KONKLUSJON.....	33
7	REFERANSAR.....	35

# 1 Introduksjon

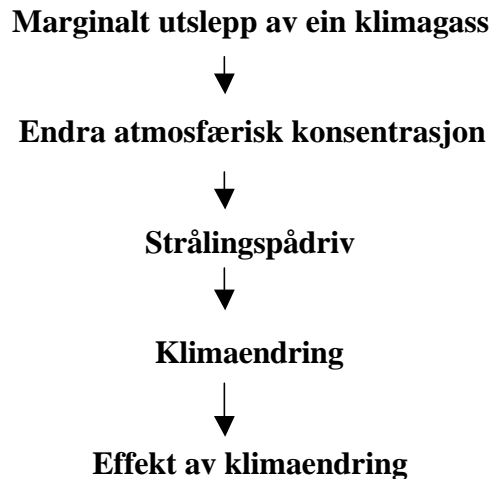
I Kyotoprotokollen frå 1997 vedtok ein å redusere utsleppa av klimagassane karbondioksid ( $\text{CO}_2$ ), metan ( $\text{CH}_4$ ), lystgass ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hydrofluorkarboner (HFK), svovelheksafluorid ( $\text{SF}_6$ ) og perfluorkarboner (PFK). Med dette forplikta i alt 38 industrialiserte land seg til å redusere utsleppa av klimagassar med 5,2 prosent i perioden frå 2008 til 2010 i høve til 1990. Kvart av dei forplikta landa har individuelle krav til utsleppsreduksjon. Innanfor dette kravet stiller eit land fritt med omsyn til kva gassar ein vel å redusere utsleppa av. Summen av utsleppskutt over ulike gassar skal vere lik Kyoto-kravet. Ei slik aggregering, òg kalla "kurv av gassar", krev at ein har ein eintydig definert skala for nemning. Berre slik kan ein i politiske avgjerder gjere avvegingar mellom ulike klimagassar i utforminga av reduksjonstiltak.

I denne artikkelen ynskjer vi å sjå nærmare på metodar for å kunne samanlikne effekten av utslepp av klimagassar og kva krav ein kan stille til ein slik metode. Det globale oppvarmingspotensialet (GWP) har til no vore grunnlaget for å samanlikne utsleppet av klimagassar. Vi presenterer metoden og korleis denne vert brukt, og peikar på svake sider ved konseptet.

Med utgangspunkt i den aksepterte og mykje brukte GWP-indeksen ser vi nærmare på kva måte ein kan nytte økonomiske tilnærmingar som eit supplement eller eit alternativ til GWP. Denne alternative metoden er økonomen sitt svar på korleis ein skal lage ein indeks som reflekterer dei ulike gassane si innverknad for oppvarmingseffekten over tid på ein god måte. Med dette kjem det ein diskusjon omkring valet av diskonteringsrente. Ein litteraturgjennomgang av aktuelle modellar, både statiske og dynamiske, vil bli presentert for å vise bruken av slik økonomisk tilnærming.

## 2 Krav til indeks

Å samanlikne gassar som har svært ulike eigenskapar og med dette er vidt forskjellige m.o.t. innverknad på klima, stiller krav til metoden brukt. For å kunne presentere innverknaden ulike drivhusgassar har på global oppvarming er det naudsynt med ein numerisk indeks. Generelt vil en måtte ta stilling til kva klimaendringskomponent en skal ta utgangspunkt i. Ein indeks kan være basert på nivåa presentert under:



**Figur 2.1:** Skjematisk oversikt over nivåa for å kvantifisere effekten av et gassutslepp.

Klimaendring kan til dømes være endring i temperatur eller endra havnivå. Effektar er situasjonar eller tilstandar som ei klimaendring kan resultere i. Ei temperaturauke vil kunne føre til t.d. større global utbreiing av malaria. Reduksjonstiltak vert sett i verk nettopp fordi ein ynskjer å avgrense omfanget av denne effekten. Det er vanskeleg å separere ulike faktorar som har innverknad på ein klimaeffekt som t.d. utbreiing av malaria. For å kunne samanlikne gassane sitt bidrag til klimaeffektar har ein difor basert seg på å måle dette bidraget via strålingspådrivet<sup>1</sup>. Basis for ein slik indeks er at strålingspådrivet er eit mål på klimaeffekt. I fylgje FN sitt klimapanel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 1994) er forholdet mellom globalt strålingspådriv og endring i global gjennomsnittleg overflatetemperatur i liten grad avhengig av gassen som gjev dette pådrivet. Som vi skal komme tilbake til vil dette gjelde for gassar som har så lang levetid at dei vert godt blanda i troposfæren, og ikkje for gassar med kort atmosfærisk levetid.

Det er tre forhold som er avgjerande for kor stort det relative bidraget av eit utslepp er målt i strålingspådriv. Ein kan dele dei inn i to tekniske og ein delvis politisk faktor. Det er avgjerande kor sterkt ein gass absorberer langbølgja stråling frå jorda og korleis denne evna til absorpsjon er lokalisert i strålingsspekteret. Det vil òg være avgjerande kva levetid/justeringstid ein gass har i atmosfæren. Den tredje faktoren, som er av politisk karakter, går på kva tidshorisont ein vel å bruke når ein akkumulerer strålingspådrivet til ulike

<sup>1</sup> Strålingspådriv vert på norsk brukt i staden for det engelske uttrykket ”radiative forcing”. ”Radiative forcing” vert av IPCC (1994) definert som fylgjer (oversett): Strålingspådrivet i troposfæren (som fylgje av endring i t.d. konsentrasjonen av ein drivhusgass) er endring i netto strålingspådriv (i  $Wm^{-2}$ ) i troposfæren etter at ein har tillet at temperaturen i stratosfæren har tilpassa seg til likevekt, før temperaturen ved bakken og i troposfæren innstiller seg og ny strålingsbalanse opprettes.

gassar. Denne har òg nær kopling til tidsskala for utvikling av skade. Dette er faktorar som er komplekse og usikre, og er med dette gjenstand for diskusjon. Dette har gjort til at utarbeiding av tall for strålingspådriv har vore ei sentral oppgåve i klimaforskinga dei siste åra.

I fylgje IPCC (1994) er samanhengen mellom strålingspådriv og klimaendring/klimaeffekt det vitskapelege fundamentet for å kunne bruke strålingspådrivet til å *i*) samanlikne nokre av dei naturlege årsakene til klimaendring med dei som er menneskeskapte eller *ii*) samanlikne ulike gassar m.o.t. relativt strålingspådriv.

Ein har i IPCC forsvart dette med to argument. For det fyrste representerer indeksen strålingspådriv og ikkje klimaendring, det vil seie endring i temperatur og endring i andre klimaparametre. Estimata for strålingspådriv er mindre usikre enn estimat for klimaendring. For det andre er indeksen angitt i relativ verdi og ikkje absolutte tall. Det å kalkulere strålingspådriv som fylgje av eit utslepp av gass A relativt til eit like stort utslepp av gass B kan gjerast meir nøyaktig enn om ein prøvde å finne strålingspådriv som fylgje av auka utslepp av ein enkelt gass.

IPCC (1994) har presentert kva praktiske funksjonar ein slik indeks bør utøve. For det første skal metoden gjere det mogeleg å analysere det relative eller det samla bidraget menneskeleg aktivitet har på klimaendringar. For det andre bør metoden seie noko om korleis ein på best mogleg måte kan redusere omfanget av desse endringane. Denne indeksen er viktig på mange områder og nokre av dei er summert i IPCC rapporten frå 1994;

- Rangere utslepp frå ulike land.
- Den kan vere eit kvantitativt mål på ei samling av ulike gassar frå kjelder eller land og danne eit grunnlag for handel av ulike gassar.
- Legge grunnlag for økonomisk vurdering av ulike teknologialternativ.
- Fungere som eit kvantitativt signal til styresmakter.
- Saman med anna informasjon kan indeksen nyttast i større konsekvensutredningar der ulike klimarelaterte faktorar vert vurdert.

Skodvin og Fuglestvedt (1997) har spesielt fokusert på bruken av ein slik indeks i politiske samanheng:

- i) Den skal vere eit verkty for kommunikasjon mellom politikk og vitskap.
- ii) Den skal vere eit verkty i politiske avgjerder for å gjere val mellom tiltak.
- iii) Den skal vere eit verkty for å kunne samanlikne potensielle klimaeffektar ved utslepp av ulike klimagassar.

For å kunne oppnå best mogeleg klimapolitiske avgjerder er det naudsynt at avgjerdstakar forstår kva aktivitetar som bidreg til klimaendringar og evt. skade (klimaeffektar) som kan fylgje denne endringa. Dette krev at metoden er enkel. Det er vidare viktig at metoden er lett tilgjengeleg slik at avgjerdstakarar kan bruke verktyet uavhengig av klimaforskarar og at resultatet likevel har ein høg grad av vitskapeleg truverd. Klimaforskingstiljøet må "stå bak" en slik indeks for at den skal ha ei viss tyngde i politisk samanheng.

Som nemnt i IPCC (1994) har ein slik indeks òg ein viktig funksjon på det bedriftsøkonomiske plan. Ei bedrift som står overfor ei eller anna form for stateleg regulering på utslepp av gassar vil vere interessert i ei økonomisk optimal tilpassing gitt dette kravet om



utsleppsreduksjon. Med dette vil bedrifta søkje å finne den gassen som gjev størst reduksjon i strålingspådriv til lågast mogleg kostnad.

Diskusjonen over viser at det var (og framleis er) eit stort behov både politisk og i den private sektor for ein slik indeks. Med utgangspunkt i ein allereie etablert indeks for å samanlikne ozonnedbrytande gassar (ODP) utførte difor m a Lashof og Ahuja (1990), Derwent (1990) og Rodhe (1990) analysar for å kunne ta denne metoden i bruk på klimagassar. Globalt oppvarmingspotensial (Global Warming Potentials, GWP) vart etablert som ein standard indeks for å samanlikne utsleppa av klimagassar.

### 3 Globalt oppvarmingspotensial

GWP er ein fysisk indeks som angjev akkumulert oppvarmingseffekt for ein viss periode, for eit utslepp av ei eining av ein drivhusgass ved eit gitt tidspunkt i forhold til eit tilsvarande utslepp av CO<sub>2</sub>. Denne verdien vert så multiplisert med utsleppa av den aktuelle gassen og ein får utsleppa i CO<sub>2</sub>-ekvivalentar for såleis å kunne samanlikne ulike gassar og effekten desse har. CO<sub>2</sub> vert med dette nytta som ein referanse-gass.

I IPCC (1990 og 1994) er GWP definert som følgjande:

$$\text{GWP} = \frac{\int_0^H a_i * C_i(t) dt}{\int_0^H a_r * C_r(t) dt}$$

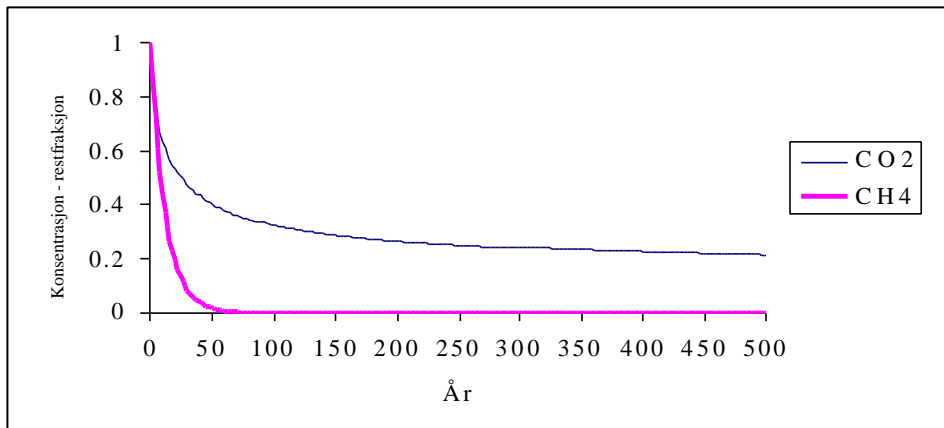
her er  $a_i$  det strålingspådrivet ein får ved å auke konsentrasjonen av drivhusgassen  $i$  med ei eining.  $H$  er tidshorizonten og er vanlegvis 20, 100 eller 500 år.  $C_i(t)$  er konsentrasjonen av gass  $i$  ved tida  $t$  som fylgje av et pulsutslipp av gassen  $i$ . Dei korresponderande verdiane for referanse-gassen er gitt i nemnar.

Det finst òg GWP-verdiar som er basert på vedvarande utsleppsauke ("sustained step increases in emissions") (Johnson m.fl., 1996; Fuglestedt m.fl., 1996) og SGWP vert då nytta som nemning. IPCC baserer sine GWP-verdiar på pulsutslipp. Det er vanleg å anta uendra samansetning av atmosfæren. Sensitivitettestar med ulike scenario viser at GWP-verdiane ikkje er svært sensitiv overfor ein slik føresetnad (IPCC, 1994). IPCC oppgjev GWP for ulike tidshorizontar, vanlegvis 20, 100 og 500 år. I Klimakonvensjonen (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) er 100 år valt (GWP<sub>100</sub>).

Det er ikkje noko eintydig metode for å berekne konsentrasjonen av karbondioksid i atmosfæren over tid. Konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> i atmosfæren vil være bestemt av bakgrunnskonsentrasjon av CO<sub>2</sub> samt i kva grad og med kva rate CO<sub>2</sub> vert fjerna frå atmosfæren.

Figurane 3.1 - 3.3 forklarar samanhengen mellom utslepp, justeringstid, konsentrasjon, strålingspådriv og GWP. Pulsutslepp av ein gass vil resultere i auka konsentrasjon av denne gassen i atmosfæren. Over tid vil konsentrasjonen gå mot utgangsløiet ein hadde før utslepp. Tida det tar for konsentrasjonen å nå ein viss avstand frå det opphavlege nivået vert kalla justeringstid<sup>2</sup>. For utslepp av klimagassar dreier det seg om eit intervall frå veker til mange tusen år (t.d. 50 000 år for CF<sub>4</sub>). I figur 3.1 har vi vist utvikling i konsentrasjonsendring for pulsutslipp av CH<sub>4</sub> og CO<sub>2</sub>.

<sup>2</sup> Det er her viktig å merke seg at justeringstid ikkje angjev opphaldstida for eit enkelt molekyl, men angjev den tida det tar før mengda har justert seg ned mot en gitt differanse frå det opphavlege nivået. Justeringstida er då tid det tar før gasskonsentrasjonen er redusert til 1/e (dvs. 37 prosent) av opphavleg konsentrasjonsnivå.



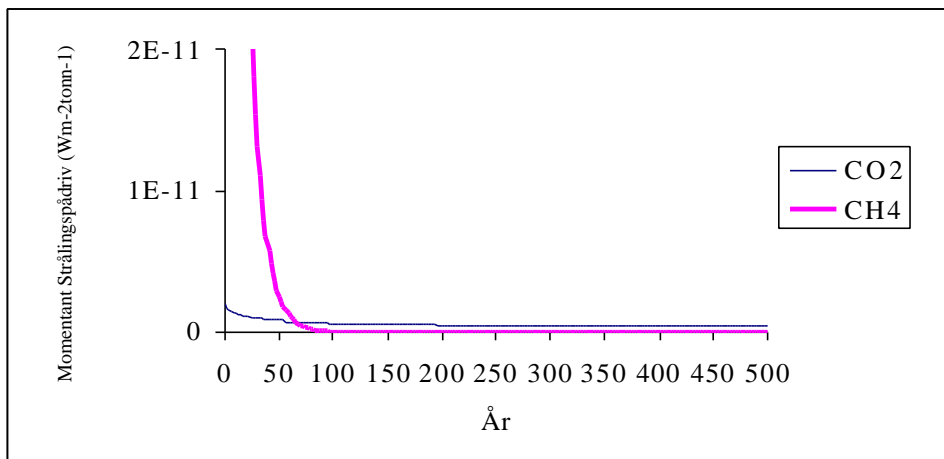
**Figur 3.1: Konsentrasjonsendring over tid av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>.**

Auken i konsentrasjon som fylgje av eit utslepp resulterer i ein oppvarmingseffekt. Då denne effekten er vanskeleg å berekne nyttar ein strålingspådrivet til kvar enkelt gass som eit mål for oppvarmingspotensialet. I tabell 3.1 vert momentant strålingspådriv for nokre gassar samanlikna med momentant strålingspådriv for CO<sub>2</sub>.

**Tabell 3.1: Momentane strålingspådriv per masse eining og per molekyl endring i atmosfærisk konsentrasjon relativt til CO<sub>2</sub> (IPCC, 1994).**

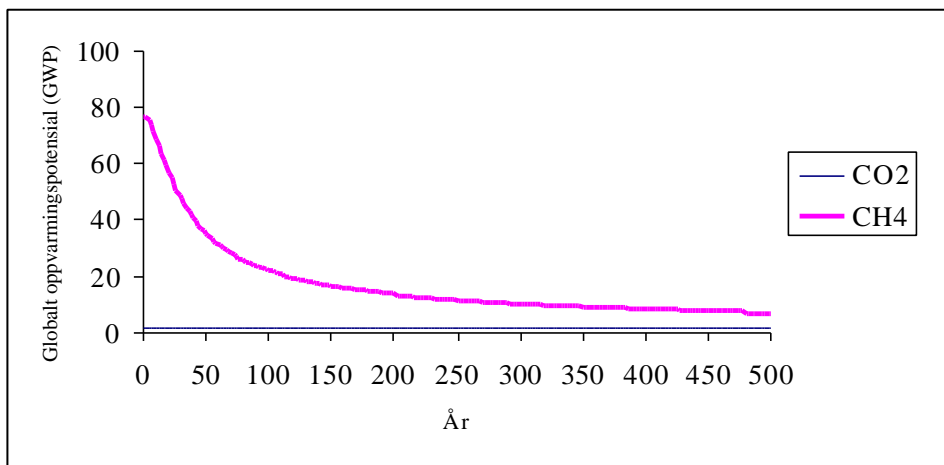
Gass	Strålingspådriv per masse eining relativt til CO <sub>2</sub>	Strålingspådriv per molekyl relativt til CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub>	1	1
CH <sub>4</sub>	58	21
N <sub>2</sub> O	206	206
KFK-11	3 970	12 400
KFK-12	5 750	15 800

Desse tala viser den momentane effekten av ei masse eller eit molekyl av ein gass. Det ein ikkje tek omsyn til her er effekten over tid. Tala i tabellen er uavhengig om eit molekyl er i atmosfæren i nokre dagar eller i mange tusen år. Multipliserer ein konsentrasjon som funksjon av tid med strålingspådriv per konsentrasjonseinig vil ein få eit estimat på korleis strålingspådrivet forandrar seg med endra konsentrasjon over tid. Integralet av dette strålingspådrivet til ein enkelt gass over ein valt tidshorisont gir teljaren i GWP-uttrykket. Strålingspådrivet for CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> som funksjon av tid er vist i figur 3.2



**Figur 3.2: Momentant strålingspådriv ( $\text{Wm}^2/\text{tonn}$ ) som fylgje av utslepp av  $\text{CO}_2$  og  $\text{CH}_4$ .**

For å kunne samanlikne strålingspådrivet frå utsleppet av  $\text{CH}_4$ , med strålingspådrivet frå utslepp av andre klimagassar, brukar ein  $\text{CO}_2$  som referansegass. Ved å dividere det akkumulerte strålingspådrivet til  $\text{CH}_4$  med det akkumulerte strålingspådrivet til  $\text{CO}_2$  vil vi få GWP for metan for den valte tidshorisonten. Korleis denne GWP-indeksen forandrar seg over tid for  $\text{CH}_4$  er vist i figur 3.3.



**Figur 3.3: Globalt oppvarmingspotensial (GWP) for  $\text{CO}_2$  og  $\text{CH}_4$ .**

Den same framgangsmåten vert brukt for dei andre klimagassane. Over tid vil ein gass med kort justeringstid relativt til referansegassen vise ein avtakande GWP-verdi.  $\text{CH}_4$  er ein slik gass og GWP verdien fell raskt over tid. Gassar som har lenger justeringstid enn referansegassen (t.d.  $\text{CF}_4$ ) vil ha aukande GWP over justeringstid til gassen. Dette vil bli diskutert nærmare i kapittel 3.2.

Tabellen under presenterer fleire GWP-verdiar frå WMO (1999):

**Tabell 3.2: Globalt oppvarmingspotensial (WMO, 1999).**

Gass	Kjemisk formel	Justeringstid (år)	GWP 20 år	GWP 100 år	GWP 500 år
Karbondioksid	CO <sub>2</sub>	Variabel <sup>3</sup>	1	1	1
Metan	CH <sub>4</sub>	12,2	64	24	7,5
Lystgass	N <sub>2</sub> O	120	330	360	190
Svovelheksafluorid	SF <sub>6</sub>	3 200	15 100	22 200	32 400
Perfluormetan	CF <sub>4</sub>	50 000	3 900	5 700	8 900

Karbondioksid er brukt som referansegass for å kunne samanlikne strålingspådrivet av ein gass med den gassen som er dominerande m.o.t. utslepp frå menneskeleg aktivitet. Når ein har funne GWP-verdiar for ulike klimagassar kan ein samanlikne desse for å finne den gassen som fører til det største integrerte strålingspådrivet over ein viss tidshorisont per masseining.

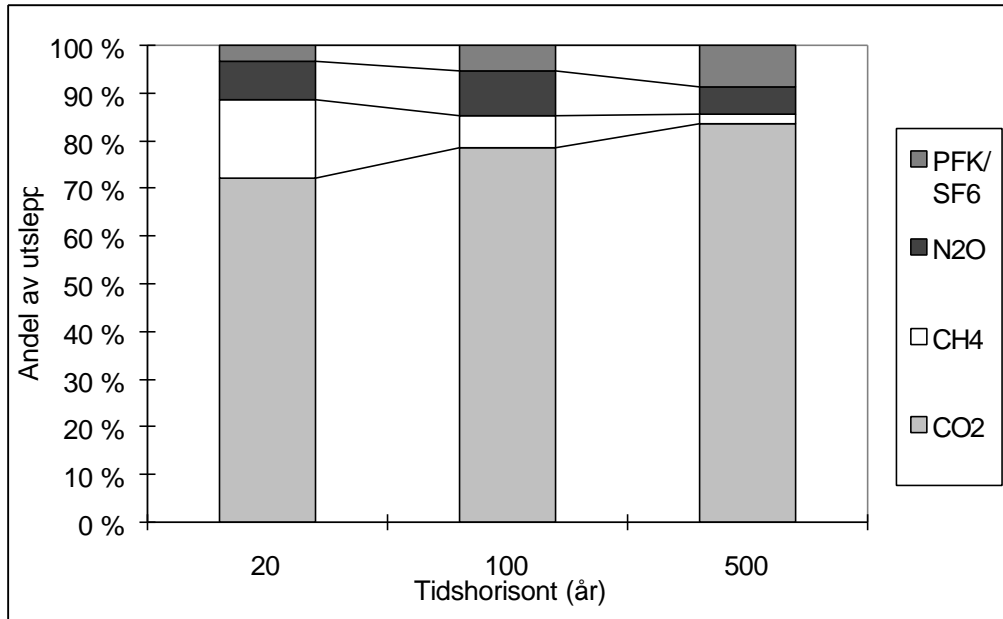
Trass i dette vitenskaplege argumentet er det grunn til å diskutere kva krav ein skal setje til omrekningsmetoden for samanlikning. Det er grader av ekvivalens når ein reknar om utslepp av ulike gassar til CO<sub>2</sub>-ekvivalentar. Utslipp som er like i CO<sub>2</sub>-ekvivalentar kan tilfredsstillte ulike ”grader” av ekvivalens:

- Same gang for endring/utvikling i strålingspådriv over ein gitt tidshorisont.
- Same integrerte strålingspådriv over ein gitt tidshorisont.
- Same strålingspådriv ved slutten av perioden (dvs. ikkje krav til same gang).

I kva grad metoden tilfredsstiller desse kriteria avgjer kor egna ein slik metode er. Når tidshorisonten er valt er GWP likevel eit enkelt og brukarvennleg verkty både m.o.t. kommunikasjon mellom ekspert og avgjerdstakar, og som grunnlag for politiske avgjerder. GWP kan presenterast i enkle tabellar som ein kan nytte utan noko behov for utfyllande naturvitenskapleg kunnskap for å gjere avvegingar mellom gassar. Indeksen gjer det heilt klart for avgjerdstakarar korleis dei skal samanlikne reduksjonar i utslepp av ulike gassar ved val mellom alternative tiltak og korleis dette endrar seg over tid. Dette er ein viktig eigenskap ved metoden. Det at ein har ein metode for å kunne samanlikne gassutslepp i dagens og framtidige forhandlingar på ein måte som er lett forståeleg vil være avgjerande for å kunne gjennomføre Kyotoprotokollen og for å kunne føre arbeidet vidare. Ved å gjere alle utslepp om til CO<sub>2</sub>-ekvivalentar kan kvart land tilpasse utsleppsreduksjonen slik det ynskjer m.o.t. økonomiske, teknologiske og sosiale forhold i prosessen med å innfri redusert totale utslepp av drivhusgassar oppgitt som CO<sub>2</sub>-ekvivalentar.

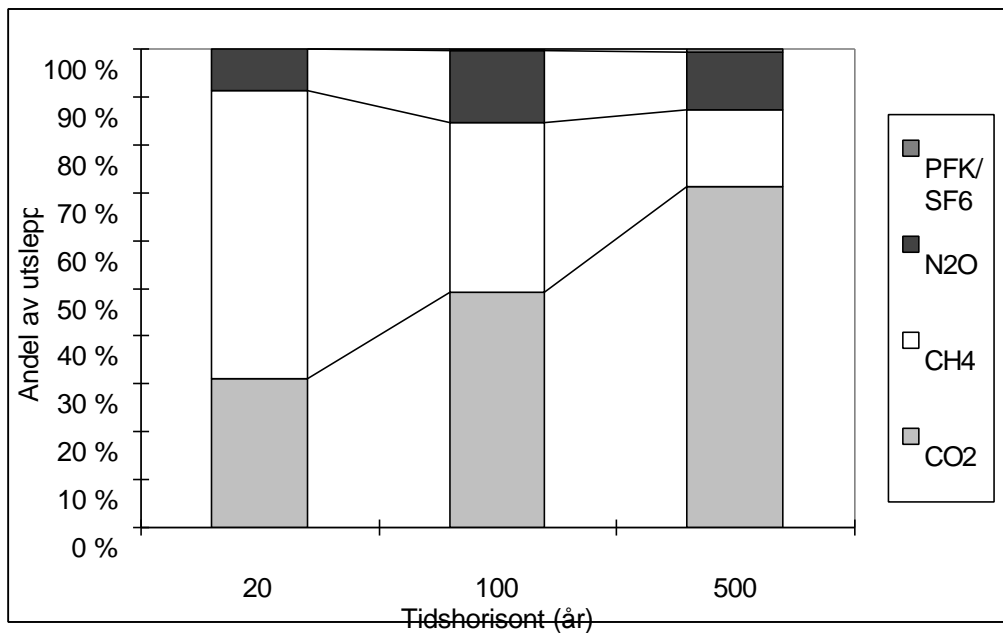
Kor viktig fleksibiliteten er m.o.t. sjonglering mellom gassar kan illustrerast med utgangspunkt i samanlikning av utsleppstall frå Noreg (figur 3.4) og New Zealand (figur 3.5). CO<sub>2</sub> står for dei høgste utsleppa og har størst innverknad på strålingspådrivet for utslepp i Noreg. Ut frå kva tidshorisont ein nyttar vil bidraget som fylgjer utslepp av CO<sub>2</sub> bli endra. Bidraget frå CO<sub>2</sub>-utsleppa er for ein tidshorisont på 20 år 60 prosent av totale nasjonale utslepp av drivhusgassar. Dette aukar til 80 prosent når tidshorisonten er 500 år.

<sup>3</sup> For CO<sub>2</sub> angjev ein denne som tida det tar for konsentrasjonen å nå tilbake til eit visst nivå etter eit utslepp av CO<sub>2</sub>. Denne kallar ein gjerne justeringstid eller responstid og er estimert ved bruk av Bern Carbon Cycle Model.



**Figur 3.4: Utslepp av ulike drivhusgassar (i CO<sub>2</sub>-ekvivalentar) som prosent av totale utslepp i Noreg i 1993 (Skodvin og Fuglestvedt, 1997).**

Samanliknar vi Noreg med New Zealand, der utsleppa av gassen CH<sub>4</sub> utgjer ein større prosentdel, vert bilete noko annleis. Som for Noreg forandrar dette seg òg over tid og CH<sub>4</sub> vert tillagt mindre vekt dersom ein nyttar ein lenger tidshorisont. Dette fordi CH<sub>4</sub> har ei relativt kort justeringstid (sjå figur 3.1). CH<sub>4</sub>-utsleppa står for over 70 prosent av dei totale utsleppa når tidshorisonten er 20 år. Dette vert redusert til litt under 30 prosent når tidshorisonten er 500 år.



**Figur 3.5: Utslepp av ulike drivhusgassar (i CO<sub>2</sub>-ekvivalentar) som prosent av totale utslepp på New Zealand tidleg på 90-talet (Skodvin og Fuglestvedt, 1997).**

For land som har så ulike samansettingar av gassutslepp er det viktig at indeksen opnar for fleksibilitet med omsyn til val av kva gassar ein ynskjer å redusere utslepp av. GWP er eit slikt fleksibelt verkty som gjer det mogleg for land å velje fritt blant drivhusgassar og sektorar når dei utformar reduksjonstiltak. Med dette kan ein i tillegg til CO<sub>2</sub>-tiltak vurdere tiltak på andre klimagassar. Som Shackley og Wynne (1997) påpeikar er det fleksibilitet, høve for bruk, kostnaden og moglegeheit for handling som gjer til at metoden har klare føremoner framfor andre meir komplekse modellar.

Indeksen er god nok for det formål som den var sett til å tene, nemleg å samanlikne akkumulert strålingspådriv over tid for pulsutslepp, gitt at atmosfæren si samansetning ikkje endrar seg. Vi skal i det følgjande sjå at indeksen har eit breiare bruksområde enn det som var intensjonen. I ein politisk kontekst har GWP *de facto* vorte standard for å estimere den relative effektiviteten av reduserte utslepp av ulike drivhusgassar m.o.t. klimaendringar og den skaden slike endringar resulterer i. Vi vil i det følgjande sjå nærmare på kva konsekvensar dette kan ha for samanlikningsgrunnlaget.

### 3.1 Svake sider ved GWP

Det er mange indirekte atmosfærekjemiske effektar knytte til antropogene utslepp og GWP kan berre til ein viss grad inkludere desse. Definisjonen gitt av IPCC er basert på pulsutslepp og det akkumulerte strålingspådrivet frå dette over ein valt tidshorisont. Slike estimat kan ein òg utføre ved å bruke ei vedvarande utsleppsending. Desse to metodane gjev ulike verdiar og resultatane kan vanskeleg samanliknast.

Allereie tidleg i implementeringsfasen var det fleire som stilte seg kritisk til bruken av GWP. Denne kritikken har ein til ein viss grad reflektert over i IPCC. I IPCC rapportane (1990/1992/1994 og 1995) har ein presentert dei svake og usikre sidene ved konseptet:

- Det er usikkert korleis ein skal berekne strålingspådrivet i atmosfæren.
- GWP måler det globale strålingspådrivet og passar best som eit estimat for gassar som er jamt fordelt i atmosfæren. Gassar med kortare justeringstid enn det desse treng for fordele seg jamt kan være svært sensitive overfor lokale kjelder, sluk og transport.
- GWP måler berre det troposfæriske *strålingspådrivet*, og ikkje endring i temperatur og andre klimafaktorar.
- GWP er svært sensitiv overfor valt tidshorisont.
- GWP er sensitiv overfor justeringstid.
- Direkte og indirekte effektar gjer det vanskeleg å estimere endring i konsentrasjonen av klimagassar som fylgjer eit utslepp.
- Når ein estimerer GWP tek ein utgangspunkt i ein konstant bakgrunnskonsentrasjon av CO<sub>2</sub>. Dette er uheldig då framtidig endring i atmosfæren si samansetning vil påverke estimata for strålingspådriv.

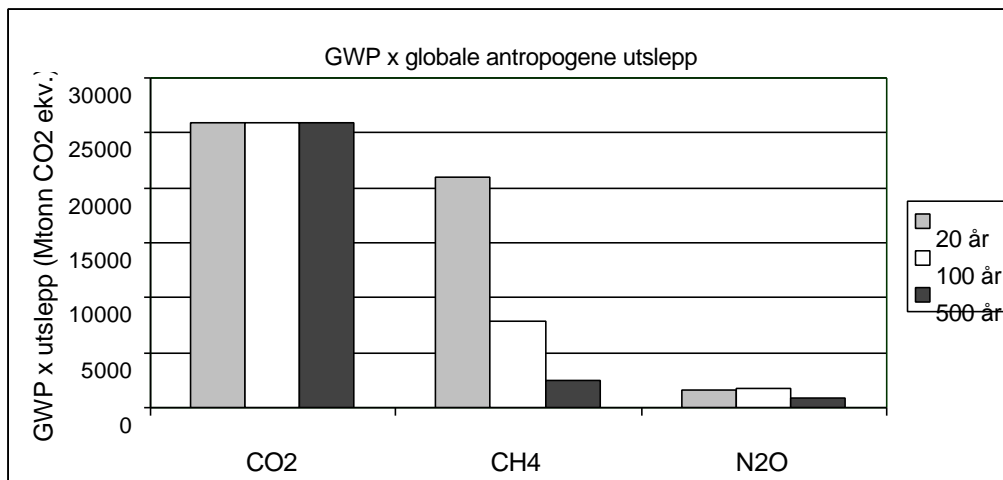
For å kunne estimere GWP treng ein spesifikk informasjon om strålingspådriv per masseining eller konsentrasjon, justeringstid for spesifikke gassar og responstid for referanse-gassen, kjemisk nedbrytingsprosess, dagens og framtidige kjemiske samansetning av atmosfæren, og dagens og framtidige fysiske trekk (temperatur, konsentrasjon av vassdamp, skydanning osv.). Då prosessane som handterer klimaendringane er så heterogene og

komplekse av natur er det stor uvisse knyta til gassen si justeringstid og effekten utslepp av gassen har, spesielt indirekte effektar. IPCC (1994) oppgjev uvisse knyta til GWP-verdiar for gassar som blandar seg godt globalt som mindre enn  $\pm 35$  prosent relativt til  $\text{CO}_2$ .

Det er òg uvisse knyta til referansegassen  $\text{CO}_2$ . Ein har avgrensa kunnskap om opptaket av  $\text{CO}_2$  i biosfæren og havet. Det har òg vore usikkert korleis og med kva rate  $\text{CO}_2$  går mellom reservoara. Ny kunnskap om responstida til denne gassen er no tilgjengeleg og ein har utvikla betre  $\text{CO}_2$ -budsjet. Trass i framstega og ny kunnskap ser vi at GWP vil være relativt usikker med m.o.t. variablane nemnt over. Vi vil i det følgjande sjå nærmare på val av tidshorisont.

### 3.2 Val av tidshorisont

Tidshorisonten brukt for å berekne GWP er til ei viss grad ei verdivurdering og er med dette eit politisk spørsmål. Noko av kritikken av GWP botnar i det tilfeldige valet av tidshorisont som indeksen opnar for. Dette valet er viktig då ulike drivhusgassar har ulik atmosfærisk justeringstid. Justeringstida for dei aktuelle gassane varierer frå ca. 1 år til 50 000 år. I eit naturvitskapleg perspektiv kan valet av tidshorisont bli sett i forhold til justeringstida i klimasystemet og sensitivitet for påverknad. Gitt at det òg er svært komplekse og heterogene effektar av antropogene utslepp vil det ikkje være ein eintydig tidshorisont som egnar seg for alle klimagassane som er definert av IPCC. Dette har vi søkt å illustrere ved å samanlikne utslepp i  $\text{CO}_2$ -ekvivalentar av ulike klimagassar over tre tidshorisontar.



**Figur 3.6: Gjennomsnittlege årlege globale utslepp av  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  og  $\text{N}_2\text{O}$ , frå 1980 til 1990, multiplisert med GWP-verdiar for tidshorisont på; 20, 100 og 500 år.**

Som vi ser av figuren over vert det store utslag i utslepp som  $\text{CO}_2$ -ekvivalentar når ein forandrar tidshorisonten. Med utgangspunkt i gassar som har justeringstid som er svært ulik responstida til referansegassen  $\text{CO}_2$  ser ein at GWP er sensitiv overfor valt tidshorisont. Ved ein tidshorisont på 20 år vil dei antropogene utsleppa av  $\text{CH}_4$  være nesten like viktig som  $\text{CO}_2$  når det gjeld innverknad på det globale strålingspådrivet. Då  $\text{CH}_4$  har ei kort justeringstid vil denne få mindre innverknad relativt til  $\text{CO}_2$  ettersom vi aukar tidshorisonten. Ved ein tidshorisont på 500 år vil effekten av dagens utslepp av  $\text{CH}_4$  være svært liten i forhold til effekten av dagens utslepp av  $\text{CO}_2$ .  $\text{N}_2\text{O}$  er mindre sensitiv overfor endra tidshorisont enn  $\text{CH}_4$ . Dette kjem av at justeringstida er nokså lik den for  $\text{CO}_2$ .



Gassane har ulik justeringstid og valet av tidshorisont vil med dette være avgjerande for kva gass som vært tillagt størst vekt. Som IPCC (1994) har poengtert vil det være eit val mellom effektar på kort og lang sikt. Ynskjer ein å hindre klimaendringar i nær framtid vil ein tidshorisont på 20 år være relevant. Ein slik kort tidshorisont vil òg være relevant dersom ein er oppteken av kor raskt temperaturen endrar seg ( $d\Delta T/dt$ ) og ikkje endeleg endring i temperaturnivå ( $\Delta T$ ). Dersom ein ynskjer å fokusere på klimaendringar langt inn i framtida vil ein tidshorisont på 100 eller 500 år være relevant. Tabell 3.3 som viser relevante tidsskalaer for nokre viktige klimaendringar.

**Tabell 3.3: Tidshorisont for ulike indikatorar for klimaendring (WMO, 1994).**

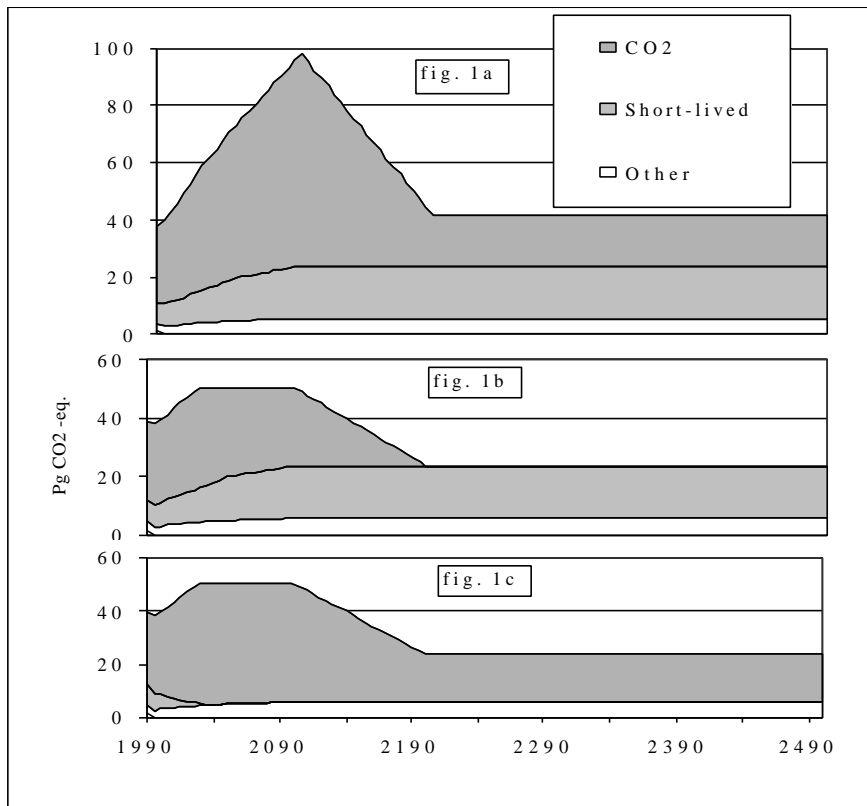
Indikator på klimaendring	Integreringstid (år)
Maksimal endring i temperatur	~ 100
Rate for temperaturendring	~ 20 til 50
Maksimal endring i havnivå	> 100
Rate for havnivåendring	> 50

Nasjonalt kan valet av tidshorisont ha eit noko anna innhald. Ulike land kan favorisere ein tidshorisont ut frå ynskje om å tillegga gassar vekt som er viktige m.o.t. reduserte utslepp i CO<sub>2</sub>-ekvivalentar. Dei fleste land og sektorar har utslepp av ei rekke klimagassar som varierer m.o.t. justeringstid. Kvar land kunne tenkjast å velje ein tidshorisont utifrå kostnadseffektive omsyn. Dette vil då være tiltak som reduserer omfanget av skade relatert til både farten ( $d(\Delta T/dt)$ ) og styrken på oppvarminga ( $\Delta T$ ). Denne "miksa" tilnærminga vert òg nemnt av IPCC som mogeleg.

Vitskapen har ei viktig rolle i det å rettleie avgjerdstakarar. Dette vil omfatte ei aktivisering av det vitskaplege miljøet i arbeidet med å formidle kva som er riktig i valet av tidshorisont. For det fyrste gjennom å supplere naudsynt informasjon om effektar og kva tidsskala desse utviklar seg etter. For det andre ved å presentere kritiske terskelverdiar i klimasystemet. Den tredje oppgåva er å underrette avgjerdstakarar om kor usikker GWP er og korleis dette varierer med tidshorisont. Valet av tidshorisont er ei kompleks avgjerd i grenseland mellom politikk og vitskap. Det vert ein balansegang mellom å gjere valet fleksibelt, og med det open for politiske avgjerder, eller gjere valet utifrå eit vitskapleg omsyn og med det kunne gjere verktøyet for rigid.

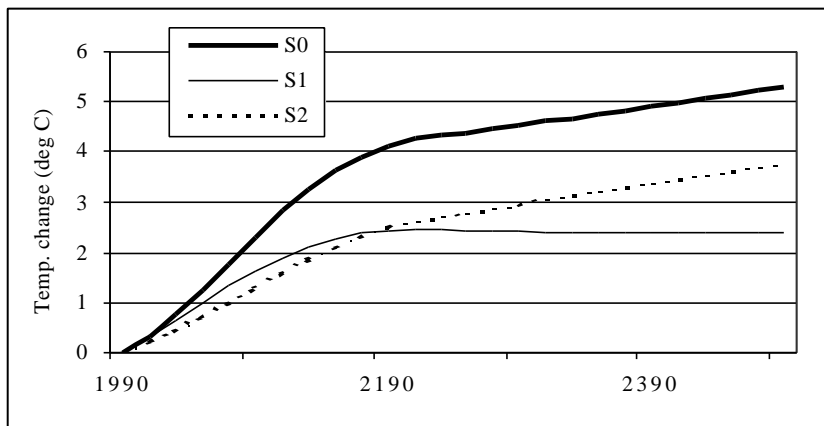
Då klimagassane innbyrdes har så vidt forskjellige justeringstider vil reduksjonsscenario med ulike samansetningar av gassar gje ulik utvikling av klima, trass i at scenaria er like når ein nyttar CO<sub>2</sub>-ekvivalentar som definert i Kyotoprotokollen. Fuglestvedt med fleire (1999) har samanlikna ulike måtar å oppfylle eit globalt mål for utslippsreduksjonar gitt i CO<sub>2</sub>-ekvivalentar: i scenario S<sub>0</sub> forutset ein at det ikkje vært iverksett noko reduksjonstiltak fram til år 2100, deretter vært CO<sub>2</sub> redusert, "business-as-usual" (jf. figur 1a); i scenario S<sub>1</sub> vert all reduksjon i utslepp lagt på CO<sub>2</sub> (jf. figur 1b); i scenario S<sub>2</sub> vert all reduksjonen gjennomført på gassar med kort justeringstid, i hovudsak CH<sub>4</sub> (jf. figur 1c). Utsleppa i scenaria er identiske gitt i CO<sub>2</sub>-ekvivalentar og såleis "politisk ekvivalente". Omrekninga til CO<sub>2</sub>-ekvivalentar vart gjort ved bruk av GWP<sub>100</sub> frå IPCC rapporten 1995. Estimeringa vart utført med en enkel klimamodell (Fuglestvedt og Berntsen, 1999; Alfsen og Berntsen, 1999; Schlesinger m.fl., 1992) og forskjellane i klimarespons vart kvantifisert i form av strålingspådriv, temperaturendring og kor raskt temperaturen endra seg. Grunna gassane si lange justeringstid

og tregleik i klimasystemet vart gangen for klimaresponsen i dei ulike reduksjonsscenario studert på en tidsskala på fleire hundre år.



**Figur 3.7: Ulike scenario for utsleppsreduksjon: a) Referanse scenario med "business as usual", b) Scenario der ein reduserer CO<sub>2</sub>, c) Scenario der ein reduserer kort-levde gassar (Fuglestvedt m.fl., 1999).**

Figur 3.8 viser at det er avgjerande kvar på tidsskala ein vel å ta utgangspunkt i når ein samanliknar reduksjon av ulike klimagassar m.o.t. temperaturendring. Scenariet med reduksjon av gassar med kort justeringstid bremsar oppvarminga vesentleg dei første dekadene, medan på lang (> 100 år) sikt vert temperaturauken i dette scenariet større enn i CO<sub>2</sub>-scenariet fordi tiltak på CH<sub>4</sub> fører til mindre reduksjon i CO<sub>2</sub>. Sidan gassutsleppa som er like når dei vert målt i CO<sub>2</sub>-ekvivalentar gjev så ulik utvikling i oppvarminga vert grunnlaget for samanlikning svekkja og motivasjonen bak GWP-konseptet held ikkje mål.



**Figur 3.8: Temperaturendring (Fuglestvedt m.fl., 1999).**

Dette støttar Wigleys (1998) konklusjon om at det ikkje eksisterer noko form for faktor for skalering som kan gjer utslepp av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> om til ein felles nemning for slik å kunne samanlikne effekten av dei to. Ei slik skalering vil være avhengig av tid og val av scenario. Bruk av IPCCs GWP-verdier har, i fylgje Wigley, resultert i ei underestimerting av effektiviteten av reduserte CH<sub>4</sub>-utslepp. Bruken av GWP for omrekning av CH<sub>4</sub>-utslepp til CO<sub>2</sub>-ekvivalentar overestimerte naudsynt reduksjon av CH<sub>4</sub>-utslepp, i samsvar med Kyotoprotokollen, med ein faktor 3 i høve til eksakt berekning av utslepp som gjev det same strålingspådrivet.

### 3.3 Naturvitskapleg fundament

GWP-indeksen seier ikkje noko om *klimaeffekten eller skaden* av klimaendringar på menneske og ulike natursystem, men den er eit uttrykk for oppvarmingseffekten av ulike klimagassar. Skaden frå klimaendring vil komme frå endring i ulike klimavariablar som t.d. temperatur, nedbør, jordfukt og ekstreme værsituasjonar. Sjølv om indeksen gjev eit riktig mål for potensielle klimaendringar er det ikkje gitt at denne vil være ein riktig indikator på skade, då samanhengen mellom dei to i høgste grad er ikkje-lineær. Hammitt med fleire (1996) hevdar at dersom skaden av drivhusgassar er ein funksjon av global temperaturendring vil effekten av utsleppa i dag være avhengig av framtidige utslepp av drivhusgassar. Framtidige utslepp vil avhenge av framtidig økonomisk vekst og klimatiltak, desse to variablane vert igjen bestemt av forventa klimaendring (Kandlikar, 1996). GWP-indeksen eignar seg difor ikkje som grunnlag for politiske avgjerder m.o.t. reduksjonstiltak (Hammitt m.fl., 1996), då denne metoden utelet komplekse, men viktige variablar.

Som vi ser er det vesentlege avgrensingar og usikre moment knyta til GWP-konseptet og bruken av det. Dette skuldast i fyrste rekke ei utvida forklaringsgrad som er tillagt GWP. GWP angjev ikkje noko anna enn akkumulert strålingspådriv av ulike klimagassar relativt til CO<sub>2</sub> for same pulsutslepp av gassene, med føresetnad om at atmosfæren si samansetning forblir uendra. Vegen fram til å berekne klimaendringar og påfølgjande skade er komplisert. Ulike alternative metodar har difor vorte utarbeida.

## 4 Økonomisk tilnærming i utarbeidinga av GWP

Som nemnt legg eit bestemt val av tidshorisont føring på kva gassar som skal vektleggjast ved gjennomføring av utsleppsreduksjonar. Bakgrunnen for at IPCC presenterte GWP med ulike val av tidshorisont er at avgjerdstakarar i prinsippet skal kunne velje vektorer for dei ulike gassane avhengig om dei ynskjer at tiltaka skal gje ein rask effekt i klimasystemet eller om dei ynskjer å legge vekt på langsiktige effektar. Trass i dette viser det seg at avgjerdstakarar har vanskeleg for å ta stilling til dette uten vidare. Når UNFCCC vel 100 år som tidshorisont for å estimere GWP i Kyotoprotokollen føreligg det såleis inga forklaring utover at ingen har sett seg kraftig imot det.

Sidan valet av tidshorisont gjev store utslag for GWP, kan prioritering av kva gassar ein skal rette klimatiltak mot bli sterkt avhengig av kva tidshorisont ein vel. Som nemnt har ein frå naturvitskapleg hald antyda at ein kan bruke ulike GWP med varierende tidshorisont avhengig av om ein vil at tiltaka skal verke raskt eller langsamt. Spørsmålet vert då kva kriterium ein skal legge til grunn for å få fram responstida av tiltak på klimasystemet.

Frå eit økonomisk synspunkt bør kriteriet være at ein får mest mogeleg igjen i form av reduserte skadekostnader for kvar krone ein bruker på klimatiltak. Med andre ord skal et gitt beløp brukt til klimatiltak retta mot t.d. CO<sub>2</sub> gje like store framtidige gevinstar som dei framtidige gevinstar av same beløp brukt til klimatiltak retta mot for eksempel CH<sub>4</sub>. Ikkje nok med det, gevinstane av desse tiltaka skal være minst like store som gevinstane av ein kva som helst annen investering ein gjer, som kjøp av datamaskiner, auka overføring til kriminalomsorga eller nytt idrettsanlegg.

Dermed avgrensar ein spørsmålet til korleis ein avveg kostnader og gevinstar over tid. Svaret på dette er tradisjonelt å diskontere. Merk likevel at vi implisitt har antekke at gevinstane er proporsjonale med strålingspådrivet. Årsaka til dette er at det er usikkert kor store klimaskadane kan bli. Heller ikkje strålingspådrivet kan anslåast sikkert, men er ein mindre omstridd indikator på skade enn for eksempel temperaturendring eller estimerer på skaden. Korleis ein skal diskontere er likevel eit omstridd spørsmål.

Det finst eit enkelt og eit komplisert svar på korleis ein skal løyse dette. Det enkle svaret består i at ein diskonterer strålingspådrivet for kvar gass over ein uendeleg tidshorisont, og samanliknar utsleppa med dette som utgangspunkt. Dette har ei rekke føremoner samanlikna med GWP, men det er òg knytt ulemper til dette konseptet. Fordelane er at ein baserer samanlikning av gassar på korleis strålingspådrivet vert vekta over tid. Dette er tufta på kva effekt ein reduksjon i utsleppa av ein klimagass har på den potensielle skaden, målt i strålingspådriv. Med andre ord gjev diskontert GWP (DGWP) i prinsippet ein indeks for gevinsten av å redusere utsleppa av ein bestemt klimagass. Dette har direkte relevans for det ein ønskjer at GWP skal bli brukt til, nemleg å velje mellom tiltak for å redusere utslepp.

Ein annan fordel ved å velje diskontert GWP er at ein unngår problemet med ein tilfeldig valt tidshorisont, då tidshorizonten er 'all framtid'. Diskonteringa gjer at effektar som skjer i fjern framtid ikkje får vesentleg verdi. Dette kan ein forklare med at eventuelle gevinstar ved reduserte klimaendringar i fjern framtid ikkje har vesentleg økonomisk relevans for kva vi skal gjere no.

Ulempa med dette enkle svaret er at ein diskontert GWP vert avhengig av kva diskonteringsrente ein vel, og at det er stor usemje blant økonomar kva som er passende. Grunnen til denne usemja er blant anna at det riktige ville være å endre diskonteringsrente over tid. Dette er særleg viktig ved problem av langsiktig karakter, som klimaproblemet er. Det er mogleg å gje anslag for variasjon i diskonteringsrenta, men då er vi over i det kompliserte svaret på korleis ein skal velje mellom gassar med ulik justeringstid, nemleg å basere seg på ein intertemporal økonomisk modell. Dette bryt med tanken om at GWP skal byggje på enkle føresetnader. I det følgjande vil vi difor sjå nærmare på GWP diskontert med ein konstant rate.

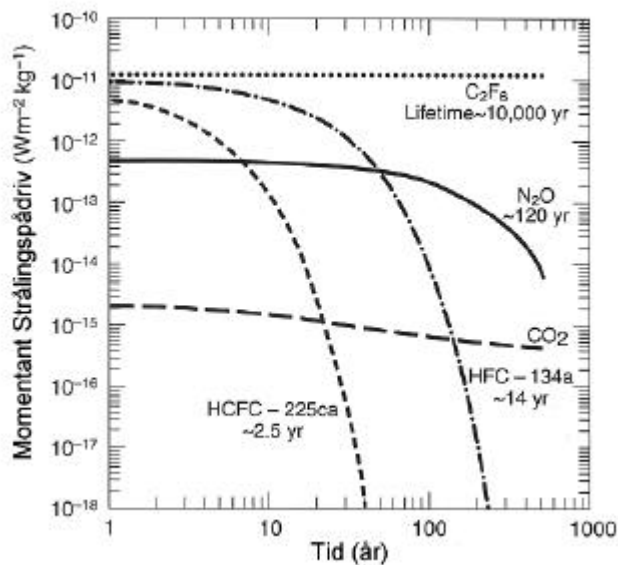
## 4.1 Det diskonterte globale oppvarmingspotensialet (DGWP)

Vi er vitne til at verda er i ei stadig endring m.o.t. økonomisk utvikling, og homogene alternativkostnader finn ein verken over tid eller mellom land. Lashof og Ahuja (1990) foreslo at ein kunne diskontere strålingspådrivet. Denne diskonterte verdien reflekterer at det er mange usikre faktorar som verkar inn på lang sikt og ein kan vanskeleg finne ei korrekt utviklingsbane t.d. med omsyn til teknologisk utvikling. Det diskonterte globale oppvarmingspotensialet til gass  $i$  vil være gitt ved:

$$DGWP = \frac{\int_0^{\infty} a_i * C_i(t) e^{-rt} dt}{\int_0^{\infty} a_{CO_2} * C_{CO_2}(t) e^{-rt} dt}$$

der  $r$  er diskonteringsrenta,  $a_i$  er strålingspådrivet ein får ved å auke konsentrasjonen av drivhusgassen  $i$  med ei eining,  $C_i(t)$  er konsentrasjonen av gass  $i$  ved tida  $t$ . Dette resulterer i at ein kan inkludere verdien av framtidig strålingspådriv i avgjerder, men der verdien av strålingspådrivet fram i tid vert tillagt mindre vekt enn dagens strålingspådriv.

Lashof og Ahuja tok utgangspunkt i at diskonteringsrenta for miljøinvesteringar er den same som investeringar i marknaden. Med dette diskonterer dei strålingspådrivet med den same renta som avkastninga på kapital. Slik vert gevinsten av reduksjonar av ein klimagass vekta etter kva den alternative forventa "avkastning" av å redusere andre gassar vil være. Dette vil såleis bli ei rein avveging av investering mellom ulike klimagassar der ein baserer avveginga på diskontert innverknad på strålingspådrivet av dei ulike gassane.

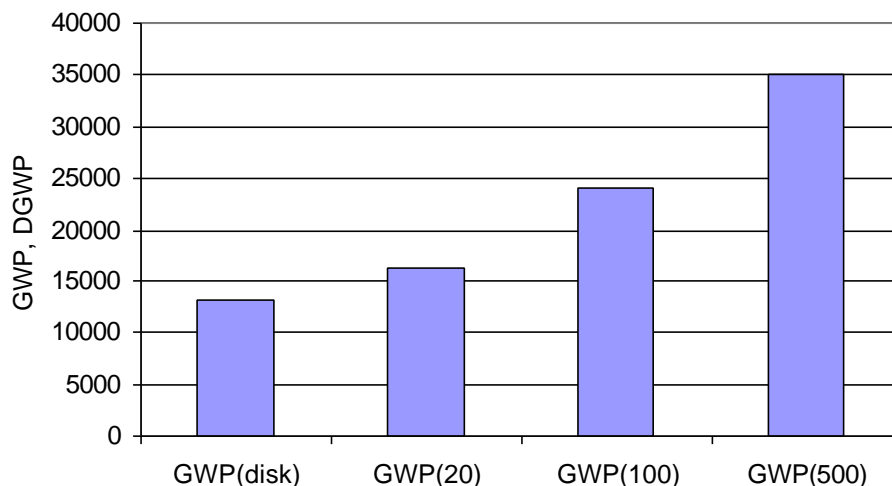


**Figur 4.1: Momentant strålingspådriv ( $\text{Wm}^{-2}\text{kg}^{-1}$ ) som følgje av utslepp av ulike klimagassar over tid (IPCC, 1994).**

Når ein estimerer GWP er det i røynda "arealet under kurva" som vert brukt, altså det akkumulerte strålingspådrivet av den aktuelle gassen (jf. figur 4.1). Dersom ein tek utgangspunkt i ein tidshorisont på 100 år vil ein kunne inkorporere heile effekten av HKFK-utsleppet, medan ein for  $\text{CO}_2$  berre tek med ein liten del av det som bidreg til strålingspådrivet. Med si lange justeringstid er  $\text{CO}_2$  ein gass som får store konsekvensar utover dei 100 åra som ein har valt som tidshorisont. Det er eit stort areal under  $\text{CO}_2$ -kurva som ikkje vert teke med når ein avgrensar tidshorisonten. Slik får ein ikkje med heile effekten dette  $\text{CO}_2$ -utsleppet har på strålingspådrivet, og med det heller ikkje heile oppvarmingspotensialet.

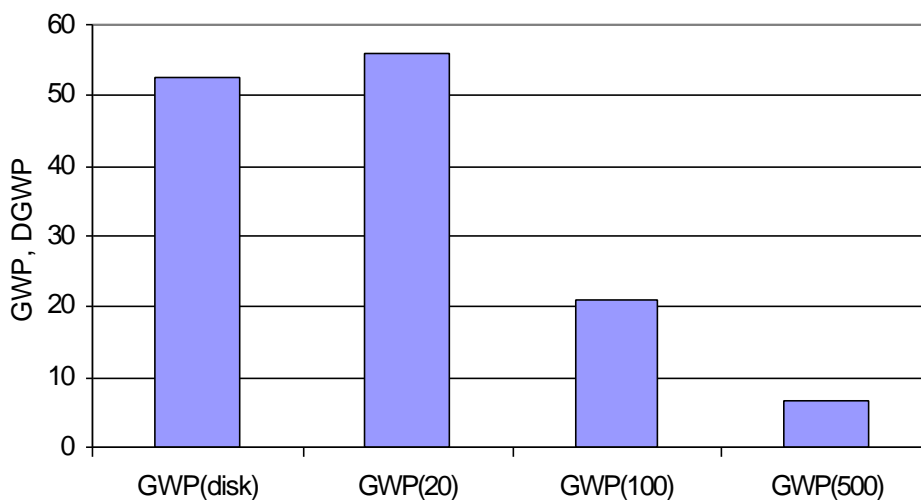
Vi ser at valet av tidshorisont får store utslag i GWP og med dette vil GWP være avhengig av kor langt inn i framtida ein ynskjer å sjå. Dersom ein nyttar DGWP vil ein kunne vekte gassane etter endra diskontert strålingspådriv over tid. DGWP vil med dette være eit verkty som er meir einslydande definert, der val av tidshorisont ikkje er naudsynt.

Dersom den diskonterte GWP-indeksen er eit alternativ til ordinær GWP kan det være interessant å undersøkje om det er noko påfallande ulikskap mellom dei to estimata. Med utgangspunkt i to sentrale klimagassar har vi estimert GWP og DGWP. Vi brukar tidshorisontane 20, 100 og 500 år for å estimere GWP. DGWP er basert på ei diskonteringsrente på 5 prosent i uendeleg framtid. Først ser vi på gassen svovelheksafluorid ( $\text{SF}_6$ ) som har ei lang justeringstid. Det tar 3200 år før konsentrasjonsauken av et pulsutslepp er redusert til  $1/e$ .



**Figur 4.2: GWP for gassen  $\text{SF}_6$  for tidshorisont på 20, 100 og 500 år (IPCC 1995) og DGWP ved ei diskonteringsrente på 5 prosent.**

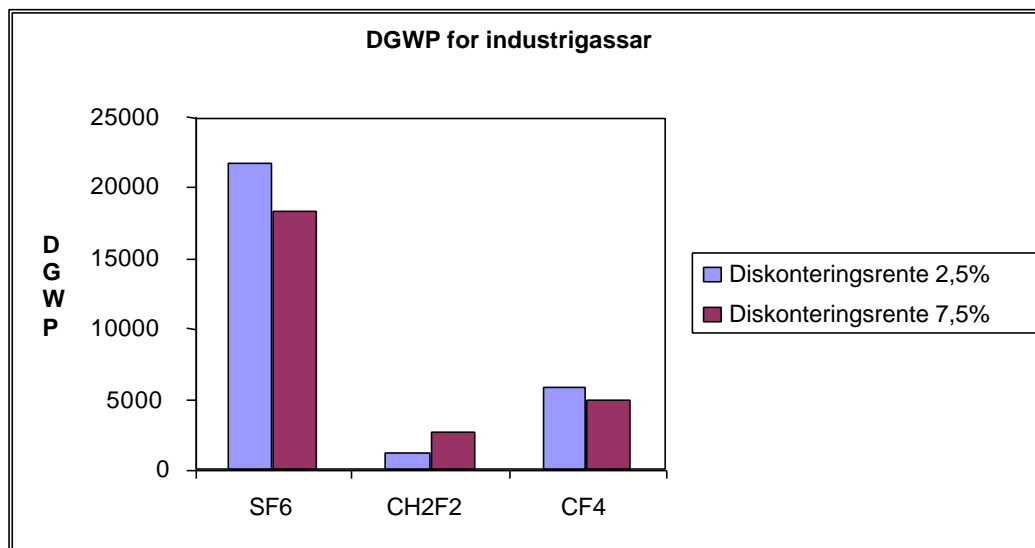
Vi ser av figur 4.2 at det er små forskjellar mellom DGWP (5 prosent) og GWP (20). Vi ser difor at ein lang tidshorisont vil overestimere GWP i forhold til DGWP. DGWP vil vekte ein gass med lang justeringstid mindre relativt til GWP. For å finne om ein kan trekke nokre generelle konklusjonar frå denne samanlikninga ser vi på ein gass som har ei relativt kort justeringstid,  $\text{CH}_4$ .



**Figur 4.3: GWP for gassen  $\text{CH}_4$  for tidshorisont på 20, 100 og 500 år og DGWP ved ei diskonteringsrente på 5 prosent.**

Ei diskonteringsrente på 5 prosent vil som vi ser gje DGWP høge verdier for gassar med kort justeringstid relativt til den ordinære GWP-indeksen. Vi diskonterer framtidig strålingspådriv og finn altså at gassar med kort justeringstid vil bli tillagt større vekt ved diskontert GWP enn gassar med lang justeringstid relativt til GWP for 20, 100 og 500 år. Kor store desse utslaga vert er avhengig av diskonteringsrente brukt.

Hjå dei som stiller seg kritisk til denne metoden for å estimere innverknad på oppvarmingspotensialet er det serskilt valet av diskonteringsrente som vekker interesse. Då dette valet til ei viss grad er politisk bestemt er det difor interessant å undersøkje kor sensitiv diskonterte GWP er overfor ulike diskonteringsrenter. Vi vil i det følgjande velje to diskonteringsrenter, 2,5 prosent og 7,5 prosent, og bruker desse til å estimere DGWP for tre industrigassar.



**Figur 4.4: DGWP for industrigassane SF<sub>6</sub>, CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub> og CF<sub>4</sub> ved diskonteringsrente 2,5 prosent og 7,5 prosent.**

Vi ser at dei tre gassane er nokså sensitive overfor endringar i diskonteringsrente. Dette er ein viktig observasjon i forhold til validiteten til estimata. Trass i at den diskonterte GWP-verdien vil gje eit estimat på akkumulert strålingspådriv over tid vil valet av diskonteringsrente ha relativt stor innverknad. Ei høg diskonteringsrente, som her 7,5 prosent, vil gjere til at ein i mindre grad prioriterer framtidig skade. Med dette vil kutt i utslepp av klimagassar verte mindre omfangsrikt, og ein vil legge størst vekt på kutt i utslepp av gassar med kort justeringstid. Vel ein ei diskonteringsrente som er lav vil ein i større grad ta omsyn til framtidige generasjonar og gassar med lang justeringstid vil i større grad bli tillagt vekt. Dette ser vi av figur 4.4 som nettopp syner at ein gass, som CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, vil ha ein høgare DGWP ved høg diskonteringsrente.

Gassar som har lang justeringstid, som SF<sub>6</sub> vil ha ein lågare DGWP di høgare diskonteringsrente. Dette dannar grunnlaget for noko av kritikken mot DGWP. Trass i at det eksisterer mykje litteratur på dette feltet, er det ikkje lett å setje ei korrekt diskonteringsrente i forhold til klimaendringar. I stor grad er det eit verdival. Klimaendringane viser seg å være svært sensitive overfor det valet ein gjer (Kandlikar, 1995). Med dette vil metoden ikkje gjere sitt virke som definert av IPCC, nemleg å eintydig kunne samanlikne utslepp av ulike gassar.

Eckaus (1992) og Schmalensee (1993) peikar på den økonomiske relevansen med å bruke diskonterte verdiar som ein justert GWP, då ein i røynda verkeleg diskonterer ein fysisk verdi, som strålingspådrivet er. Dette er ein kritikk som ikkje har relevans i denne samanheng. Det er som oftast ikkje problem å diskontere ein fysisk verdi så lenge denne gjenstanden eller tilstanden har ein verdi, altså ein pris. Det Eckaus og Schmalensee i realiteten då stiller seg



kritisk til er det å tillegga naturfenomenen, som t.d. strålingspådriv, ein verdi. Dette legg grunnlag for ein annan diskusjon.

Shackley og Wynne (1997) baserer sin kritikk på eit meir relevant grunnlag. Dei finn at det er essensielle svake sider som ikkje vert forbetra med denne modellen. Framleis reflekterer ikkje indeksen det ikkje-lineære forholdet mellom endring i temperatur og effektar av klimaendringar og kostnadene forbunde med effektane.

Mykje av kritikken av diskontert GWP har ført til at atter nye metodar for å samanlikne klimagassar har sett dagens lys. Som vi skal sjå i presentasjonen som fylgjer er det på dette tidspunkt at økonomen kjem tyngre inn i klimaforskninga med alternative metodar for å kunne samanlikne drivhusgassane.

## **4.2 Andre GWP-formuleringar**

Fisher med fleire (1990) og WMO (1990) har presentert GWP for KFK og HKFK basert på justeringstida til dei ulike gassane og gjekk med dette bort frå ein fast tidshorisont. Det kan visast at dersom justeringstida ikkje varierer over tid og dersom strålingspådrivet varierer lineært med gasskonsentrasjon, er denne definisjonen lik den gitt av IPCC over uendeleg tid.

Hammond og kollega (1990) har foreslått å nytte det strålingspådrivet ein får i augeblinken ved utsleppet og ikkje integrere dette over ein valt tidshorisont.

Reilly og Richards (1993) har argumentert for at GWP òg bør omfatte faktorar som reflekterer skade. Dette vil kunne vege opp for behovet for å diskontere. Som IPCC (1994) påpeikar vil dette krevje detaljert studie av økonomiske og politiske forhold saman med vitenskapleg presisjon. IPCC (1994) nemner sjølv behovet for å basere GWP på verkeleg temperaturrespons og ikkje strålingspådriv. Slik temperaturrespons er ikkje berre det endelege resultatet frå ulike klimastudie, men det er òg meir forståeleg for folk som ikkje arbeider innan klimaforskning. Trass i dette vert metoden lite brukt då temperaturresponsen er vanskeleg å estimere. Til dette treng ein kunnskap om korleis klimaet reagerer på endring i strålingspådriv noko som vil forandre klimagassindeksen over tid. Dette fordi ein finn fram til nye modellar for å berekne endring i temperatur. GWP slik det er formulert av IPCC (1994) byggjer på føresetnaden om at for same verdi på strålingspådrivet er endring i temperatur (T) den same. Dette er ei god tilnærming for gassar som vert godt blanda i atmosfæren, men dette held ikkje mål for gassar med kort justeringstid.

## 5 Alternative metodar for samanlikning

Vi ser at GWP samanliknar relativ endring i strålingspådriv som fylgje av utslepp utan å relatere dette til klimaendringar eller påfølgjande skader. Som eit svar til dette har fleire økonomar engasjert seg i arbeidet med å utvikle eit verkty som kan erstatte denne fysiske indeksen. Økonomane har difor kalkulert marginale skadekostnader for å kunne kvantifisere den skaden eit utslepp har. Med utgangspunkt i ein responsfunksjon/skadefunksjon kan ein finne endring i konsentrasjonen av drivhusgassar over tid som fylgje av antropogene utslepp. Denne kan så bli brukt til å finne den marginale endring i strålingspådrivet eller marginale skadekostnader av utsleppet. Slike marginale effektar er viktige når ein vurderer kostnad og nytte ved ulike strategiar for utsleppsreduksjon. Slik vil ein kunne velje den strategien som er samfunnsøkonomisk lønsam og med dette setje i gang tiltak som er kostnadseffektive.

O'Neill (1996) presenterer ein generell skadefunksjon som er summert framtidig diskontert skade som fylgje av eit marginalt utslepp av gass  $i$ . Skaden vert bestemt indirekte av utsleppa. Det er dermed mange variablar å ta omsyn til når ein estimerer slik marginal skade. Eit marginalt utslepp av gass  $i$  vil føre til endra atmosfærisk gasskonsentrasjon, strålingspådriv, endring i klimafaktorar som t.d. temperatur, som til sist kan ende opp som klimaeffektar i form av skade.

O'Neill skildrar to måtar å berekne den marginale kostnaden forbunde med utslepp av gass  $i$ . Den første er ein dynamisk modell. I eit optimalt kontrollstudie kalkulerer ein den marginale skaden som skuggeprisen av utslepp langs ei samfunnsøkonomisk optimal utsleppsbane. Slike modellar må inkludere informasjon om gassyklus og klima, men ein treng ikkje eksplisitt finne den marginale effekten på gasskonsentrasjonen. Dette tar optimeringsproblemet seg av då den optimale løysninga vil gje ein marginal utsleppsskatt som er lik marginale skadekostnader. Med andre ord er det ikkje naudsynt å ta i bruk GWP-verdien for å finne skaden som fylgjer ei marginal endring i utslepp av gass  $i$ .

Den andre metoden for å estimere marginale skadekostnader er gjennom ein ikkje-optimal statisk økonomisk modell. Denne metoden treng informasjon om gassyklusar, samt andre klimamodellresultat, som ein skadefunksjon typisk supplerer. Fordelen med denne metoden er at ein ikkje er bunden til optimale utsleppsbaner, men kan bli brukt for ein vilkårleg utsleppsbane. Til denne statiske metoden for å estimere skadefunksjonen treng ein GWP for å finne den marginale effekten av eit utslepp av gass  $i$ .

I det følgjande vil vi presentere noko av det arbeidet som er gjort på estimering av skadefunksjonar og marginale utsleppskostnader. Først ved å presentere nokre statiske modellar som alle nyttar GWP for å kunne utforme skadefunksjonen. For deretter å sjå på dynamiske modellar, som ikkje nyttar GWP på vegen fram til å estimere marginale kostnader ved klimagassutslepp.

### 5.1 Statiske modellar

Modellane presentert i det følgjande nyttar GWP for å aggregere utsleppa av klimagassar i CO<sub>2</sub>-ekvivalentar. Dette vert så brukt til å utforme eit akseptert utsleppsnivå. Det statiske utgangspunktet gjev oss ikkje høve til å vurdere korleis ein skal samanlikne gassar ved eit gitt

tidspunkt og med dette korleis ein skal prioritere mellom ulike gasar med omsyn til utsleppskostnad. Når ein nyttar GWP vil kostnaden ved utslepp berre vert påverka av utsleppskoeffisienten.

**Nordhaus (1991):** La mykje av grunnlaget for dei skademodellane som skulle komme i dette tiåret. Dette er ein optimeringsmetode. Nordhaus tek utgangspunkt i ein svært statisk situasjon der han ikkje tek omsyn til tilgang på ressursar, utsleppa av drivhusgassar er konstant og med dette forandrar heller ikkje gasskonsentrasjonen seg. Frå historiske data har Nordhaus nytta ei enkel likning for å representere karbonsyklusen. Med si enkle økonomiske og klimatiske tilnærming presenterte han ein metode for å samanlikne gassar som er basert på estimerte skadekostnader. Han brukar den globale gjennomsnittlege temperaturendringa ( $\Delta T$ ) som indikator på klimaendring.

**Eckaus (1992):** Frå sin økonomiske ståstad presenterer Eckaus ein modell for å kunne estimere alternativkostnaden ved reduserte utslepp av drivhusgassar. Dette er ein modell som utelet atmosfærisk endring og den innverknaden denne har på produksjonen. Alternativkostnaden, og kalla skuggeprisen, er eit uttrykk for kostnadene ved å forhindre global oppvarming. Ved å multiplisere strålingspådrivet med ein tilhøyrande alternativ reduksjonskostnad kan ein finne det Eckaus kallar Emissions Opportunity Cost, (EOC). Slik vert det eit konsept som gjer det mogeleg å tillegga effekten ein verdi og dermed være i stand til å summere denne over fleire gassar.

*EOC = Alternativ kostnaden ved reduserte utslepp  $\times$  strålingspådrivet (CO<sub>2</sub>-ekvivalentar)*

Eckaus tek i bruk ein enkel modell for å finne alternativ kostnaden ved å redusere utsleppa. Den er formulert som eit lineært programmeringsproblem, for å få fram korleis han tillegg verdiar til relevante variablar. Modellen søkjer å optimalisere diskontert konsum over den valte tidsperioden. Relevante miljøvariablar vert teke med som skrankar i denne optimaliseringa. Desse skrankane sikrar såleis ein viss miljøstandard, ved at skrankar på maksimalt auke i strålingspådriv og akkumulering av drivhusgassar vert bindande. Eckaus simulerer modellen og finn skuggeprisen for strålingspådrivet. Denne verdien er summen av skuggeprisen av dagens strålingspådriv som fylgje av utslepp denne perioden, samt skuggeprisen på strålingspådrivet i neste periode som fylgje av dagens utslepp. Eckaus konkluderer med at alternativkostnaden av redusert utslepp av ein gass er lik netto verdien av det godet som produserer dette gassutsleppet.

**Schmalensee (1993):** Schmalensee har òg gått ut frå at skadar ved utslepp ikkje kan estimerast utan å inkludere essensielle økonomiske variablar. Med dette utgangspunktet utarbeida han ein metode for å estimere relative marginale skadekostnader ved utslepp av ulike gassar. Kostnadsestimat av denne marginale skaden kalla han Relativ Damage Index (RDI). Schmalensee kjem til at ved visse føresetnader vil samanlikning mellom diskonterte marginale skader være det same som samanlikning mellom diskonterte strålingspådriv. Den eine føresetnaden er at diskonteringsrenta som er nytta er lik differansen mellom diskonteringsrenta som er relevant for klima relaterte skader og vekstraten til desse marginale skadene. Den andre føresetnaden er at det ikkje er nokon anna nytte eller kostnad ved desse utsleppa enn det som vært reflektert i strålingspådrivet.

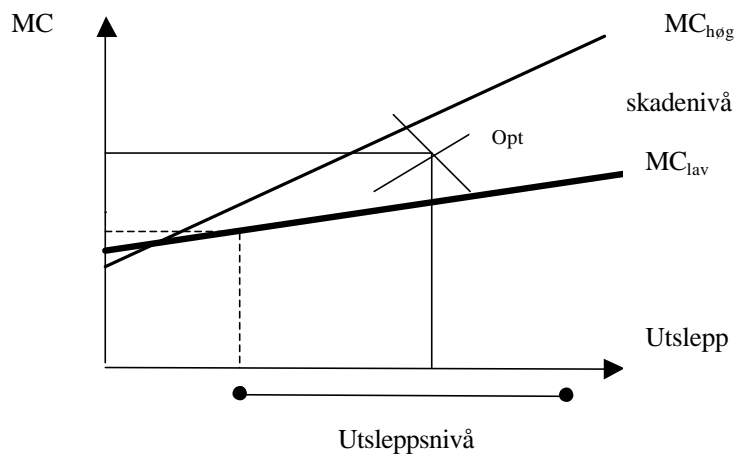
**Hoel og Isaksen (1993):** I likskap med Eckaus og Scmalensee har desse òg nytta marginale skadekostnader. I utgangspunktet brukar dei modellen til, som tradisjonelt har vore gjengs, å estimere kva tilstand klimaet vil ha ved eit gitt tidspunkt. Det kan tenkjast at det økonomiske og det økologiske system har ei viss tilpassingsevne, så lenge endringane ikkje er for store. Denne modellen vert difor utvida, då ein finn at raten på endringane i klimaet er av større interesse enn det absolutte nivået. Dette vert med dette ei dynamisk tilnærming. I begge tilfella finn dei marginale kostnader for utslepp. Det å estimere marginale kostnader i lys av raten som klimaet forandrar seg etter er interessant. Dei finn at spesifisering av skadefunksjonen er viktig, spesielt når ei bruker modellen på gassar med kort justeringstid. Modellutvidinga til Hoel og Isaksen fører oss over til funksjonar for skade som er utforma i eit dynamisk perspektiv. Og der grunnlaget for å samanlikne ulike klimagassar og aggregere desse i ein skadefunksjon kan varierer frå år til år.

## 5.2 Dynamiske modellar

I den dynamiske tilnærminga er aggregering av ulike klimagassar mindre problematisk då ein finn endring i konsentrasjon, strålingspådriv eller temperatur ved eit gitt tidspunkt. Og med dette unngår ein å bruke GWP; det akkumulerte strålingspådrivet over ein fritt valt tidhorisont.

**Reilly og Richards (1993):** For å kunne etablere eit bytteforhold mellom drivhusgassar har Reilly og Richards utvikla ein modell som òg estimerer verdien av reduserte utslepp av kvar gass, men med eit noko anna utgangspunkt enn økonomane over. Dette er ein dynamisk modell som tek omsyn til effektar som ikkje berre er relatert til klima. Det er ei vid tilnærming, med omsyn til ulik justeringstid blant gassane, diskonteringsrenta, og ikkje-lineære skadeforlaup. Med ein bindande skranke som tek sikte på å kontrollere beholdninga av drivhusgassar i atmosfæren estimerer dei verdien av å redusere utsleppa. Denne verdien kallar dei Trace Gas Index. Dette er ei utviding av modellen til Keeler med fleire (1971). Ein søkjer å maksimere nåverdien av profitt over tid, med skranke på kapital og beholdninga av drivhusgassar i atmosfæren. Dette er ein kompleks modell som viser at indeks estimeringa er svært sensitiv overfor val av diskonteringsrenta og form på skadefunksjonen. Forfattarane reflekterer over dette og ytrar behovet for betre kunnskap om korleis tillegga klimaendringa verdi.

**Fankhauser (1994):** Denne modellen skil seg noko ut frå andre modellar ved at den inkorporerer eit uttrykk for kor usikker effektane av klimaendringane er på kort og lang sikt. Dette har ein til ei viss grad òg gjort tidlegare ved at ein har køyrt modellar for ulike scenario. Fankhauser tek i bruk enn annan metode der han inkluderer uvisse direkte ved at han definerer usikre parameter som tilfeldig valt. Slik kan ein estimere sannsynsfordelinga for skadelege effektar.



**Figur 5.1: "Expected Value Approach vs. Optimal Control".**

Dei marginale skadekostnadene (MC) er avhengig av nivået på utsleppa av drivhusgassar. Det er vanleg å finne aukande marginale kostnader ved auka utslepps nivå som vist i figur 5.1. Modellar for optimalisering kalkulerer marginale kostnader ved det punktet der marginale skade er lik marginal tiltakskostnad. Denne løysninga er vist som opt. i figuren over. I modellen til Fankhauser estimerer ein marginale kostnader ved det utslepps nivået ein faktisk observerer. Sidan nivået på utsleppa er usikre og med dette og forma på den marginale skadefunksjonen, vil estimeringa resultere i fleire moglege marginale kostnader, kvar med eit sannsyn for å inntreffe.

Fankhauser gjev ein brei presentasjon av komplekse sider som er knyta til det å estimere skaden av utslepp. Dette gjer han ved å sjå på tidlegare arbeid på feltet og foreslår i kva måte det er moglege å forbetre dagens metode. Fankhauser stiller seg kritisk til at ein i økonomiske analyse har adoptert utgangspunktet til naturvitskapen. Naturvitskapen har til no nytta ein dobling av CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i forhold til førindustriell tid som utgangspunkt. Dette har òg vorte eit naturleg utgangspunkt for analysar som estimerer kostnaden ved denne skaden. Han finn det meir relevant å fokusere på marginale kostnader per tonn utslepp. I denne ramma vert framtidige skadekostnader estimert gitt at verda forblir på det same velferdsnivået som i dag, ved at temperaturen forandrar seg med 2,5°C til 3,0°C. Fankhauser tek dette til fylgje og utvidar modellen i tre dimensjonar. Han modellerer korleis skaden utviklar seg dersom ein tek utgangspunkt i ei anna temperaturendring enn det ein gjer i scenariet for dobling av CO<sub>2</sub>. Modellen tek òg omsyn til endring i temperaturnivå og vekstraten knyta til temperaturendring. Sist, påpeikar han naudsynet av å modellere korleis skadane vert påverka av økonomisk utvikling og befolkningsvekst. Som vi ser treng ein informasjon om mange forhold før ein i denne modellen kan finne samfunnskostnaden ved utslepp.

**Kandilar (1995)(1996):** Dette er ein integrert modell med både naturvitskaplege- og økonomiske prosessar. I likskap med Rilly og Richards (1993) og Schmalensee (1993) har Kandilar funne ein metode for å måle effekten av ei eining utslepp  $e_i$  av ein drivhusgass  $i$ . Dette ved å estimere nåverdien av denne skaden dette utsleppet medfører ved eit vist tidspunkt.

Nåverdien er ein funksjon av fleire sosioøkonomiske forhold. Forholdet mellom skade og endring i global gjennomsnittstemperatur, framtidig gassutslepp og tiltak for reduksjon, og diskonteringsrenta. I analysen kjem Kandilar, som svært mange andre, fram til at drivhusgassindeksen er svært variabel med ulik diskonteringsrente, ulik justeringstid for gassane, og grada av ikkje-lineær forhold i skadefunksjonen. Ved å forandre forma til skadefunksjonen kjem Kandilar fram til at det er essensielt å gjere det mogeleg å estimere ikkje-lineære skadeforlaup. Men i tillegg gjer han følgjande observasjon: Kostanden ved utsleppsreduksjon og usikre aspekt i klimamodellen er mindre viktig.

**Hammit, Jain, Adams og Wuebbles (1996):** Som ein kritikk og eit alternativ til GWP/diskontert GWP har Hammit og kollega søkt å finne ein metode for å kunne samanlikne gassar med ulik justeringstid og kva innverknad desse har på global velferd. Alternativet vert presentert som Economic-damage Index (EDI). EDI er definert som:

$$EDI_i = \frac{\partial/\partial e_i W[C(t)]}{\partial/\partial e_0 W[C(t)]} = \frac{\int_0^\infty \Delta C_i(t) I_i(t) dt}{\int_0^\infty \Delta C_0(t) I_0(t) dt}$$

der  $e_0$  og  $e_i$  er ei eining utslepp i år 0 og år  $t$  av drivhusgassen  $i$ .  $W[C(t)]$  representerer det økonomiske velferdstapet som fylgje av endra konsentrasjonen ( $C$ ) av drivhusgassar over tid. I den andre likninga er  $\lambda_i(t)$  den marginale samfunnskostnaden eller skuggeprisen ved ei auke i konsentrasjon av drivhusgass  $i$ . Som ei forenkling ser ein bort frå skader som ikkje er relatert til klima ved utslepp av drivhusgassar. Ein går utifrå at velferda vert påverka som fylgjer av klimaendringar:

$$W[\Delta T(t)] = \int_0^\infty \left( \frac{1}{1+r} \right)^t \alpha * GDP(t) D[\Delta T(t)] dt$$

der  $r$  diskonteringsrenta,  $\alpha$  er ein skalert konstant, GDP er brutto globalt produkt og  $\Delta T(t)$  er auken i global gjennomsnittleg overflatetemperatur frå 1990. Skaden  $D[\Delta T(t)]$  som fylgje av temperaturendring er gitt ved følgjande formel.

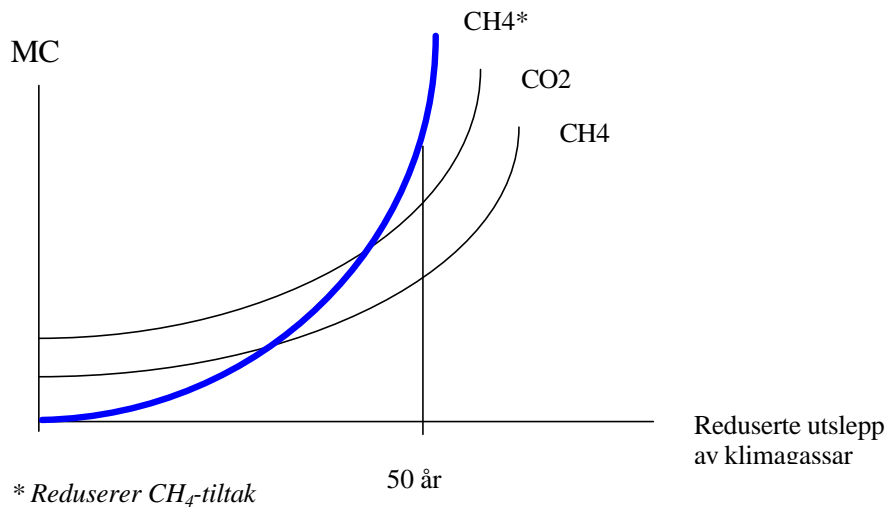
$$D_h [\Delta T(t)] = 1 - [1 - \left( \frac{\Delta T(t)}{\Delta T_m} \right)^2]^\chi$$

$\Delta T_m$  er det kritiske nivået på  $\Delta T$  og  $\chi$  er ein parameter mellom 0 og 1. For  $\chi = 1$  vert  $D_h$  ein kvadratisk skadefunksjon; dersom  $\chi$  går mot 0 vert  $D_h$  aukande konveks med skader tilsvarande 100 prosent av GDP når  $\Delta T$  vert  $\Delta T_m$ .

Ved å bruke den enkle klimamodellen kan ein kalkulere EDI for ei rekke klimaendringar/drivhusgassutlepp scenario. EDI er avhengig av framtidig drivhusgass konsentrasjon, klima sensitivitet og tidspunkt for utleppet. Hammit finn at EDI får ein lav verdi dersom ein har gassar med kort justeringstid ( $CH_4$ ), stor  $\gamma$  (eksponent), lav diskonteringsrente og høge utslepp og vekst i GDP. Det er ein indeks som er usikker, som GWP, men Hammit meiner at denne metoden har betre framtidsutsikter med omsyn til forbetring enn GWP.

**Joos, Müller-Fürstenberger og Stephan (1998):** Joos med kollega har nytta ei Computable General Equilibrium (CGE) modell. Dette svarar med den meir sofistikerte ikkje-lineære klimamodellen, enn det Nordhaus nyttar. Dei relevante kostnadane er ikkje å finne i samband med forandra karbonlager, men skaden kan ein måle som endringar i klimavariablar som temperatur, omstillingsevne, havnivå stigning, og issmelting ved polane. Nordhause si tilnærming, og mange av modellane over, har difor i sine estimat tillate for store utslepp av drivhusgassar.

**Aaheim (1998):** Presenterer ein dynamisk modell for å kalkulere strålingspådriv som fylgje av utslepp av drivhusgassar. For å kunne aggregere utslepp av ulike gassar i ein modell for optimal kontroll finn Aaheim det naudsynt å ta utgangspunkt i ei intertemporal analyse. Han byrjar med ei statisk analyse der det er eit mål for totale utslepp i CO<sub>2</sub>-ekvivalentar i form av GWP<sub>100</sub> for å få fram mangel ved denne atemporeale metoden. Som eit svar til den tradisjonelle metoden tek han i bruk den dynamiske modellen for å estimere skade og korleis ein skal bøte på denne skaden. I denne er målet å halde konsentrasjonen av drivhusgassar under eit vist nivå. Dette innebær å aggregere gassar etter kva innverknad dei ulike gassane har på strålingspådrivet ved kvar t og ikkje aggregere over integralet av ein tilfeldig valt tidshorisont. Slik stiller ein svært fleksibelt innanfor ein definert tidshorisont kva gass ein ynskjer å redusere og når denne reduksjonen skal finne stad.



**Figur 3.1: Marginale kostnader ved reduserte utslepp over tid for CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>.**

Ut frå figur 5.2 finn han at det vil være gunstig å utsette utsleppstiltak så lenge som mogeleg. Ein vil med dette kunne redusere utsleppa til ein lavare marginal kostnad. Ein vil velje å "spare" reduksjonstiltak av gassar med kort justeringstid for å kunne oppnå ein stor effekt m.o.t. konsentrasjon, og då strålingspådriv, i slutten av fasen.

Aaheim finn at di lenger ein utset reduksjonstiltaket, di mindre vil tiltaket koste i form av alternativkostnad. I kva grad ein vil redusere utsleppa vil være bestemt av avkastningsrenta på kapital. Reduksjonen av utslepp vil ha ein kostand kvart år. Korleis ein ynskjer å allokere desse kostnadene er m a avhengig av den alternative bruken av nasjonale inntekter. Dersom

avkastninga på real investeringar aukar i framtida vil det være gunstig å investere tidleg, og heller kompensere med større utsleppsreduksjon i framtida. Høg avkastningsrente på investeringar vil med dette gje liten utsleppsreduksjon tidleg i perioden, medan ein seinare perioden vil trappe opp tiltak for reduksjon for å innfri kravet til konsentrasjonen av klimagassar.

Det er likevel ikkje berre denne alternativverdien som får konsekvensar for reduksjonsbana og kva gass ein vel å inkludere i reduksjonstiltak. Dette vert òg bestemt av gassen si justeringstid og kva margineffekt reduksjon av gassen har på strålingspådrivet.

**Tol (1999):** Tol presenterer ein modell for å estimere marginale kostnader ved utslepp av karbondioksid, metan og lystgass, og diskuterer kor sensitive og usikre resultat er. Han nyttar, som Aaheim, ein modell som er dynamisk. Analysen gjer det mogeleg å diskutere regionale forskjellar. Resultata viser seg å være svært sensitive overfor endringar i grunnleggjande føresetnader. Modellen, kalla Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND), er spesifisert for ni regionar for ulike scenario i tidsrommet frå 1950 til 2200.

Økonomisk vekst og befolkningsvekst vert påverka av klimaendringar. Då dette har mindre innverknader nyttar Tol desse som eksogene variablar. Endogene variablar i skadefunksjonen er atmosfærisk konsentrasjon av karbondioksid, metan og nitrogenoksid, global gjennomsnittstemperatur, og innverknaden klimaendringa har på områder langs kysten, landbruk, ekstremt vær, natursystem og malaria.

Kvar av effektane er modellert separat. Denne effekten kjem enten av raten temperaturen forandrar seg med (0,004 °C/år) eller nivået på endringa (2,5 °C). Den førstnemnde kan ein tolke som kostnaden ved tilpassing. Den andre kan tolkast som ulempene med den nye klimasituasjonen i forhold til den ein har i dag. Ut frå dette kan han finne marginale utsleppskostnader for ulike gassar. Då desse estimata er basert på kor raskt klimaet forandrar seg, samt endring i sosioøkonomiske forhold, er dei marginale kostnadene ved utslepp over dei t.d. Nordhaus presenterer.

Vi ser at det er utarbeida ei rekkje modellar som søkjer å finne marginal skadekostnad og tabell 5.1 viser at desse estimata ikkje er einsarta:

**Tabell 5.1: Globalt skadepotensial, effekt per tonn CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O relativt til effekten av et tonn CO<sub>2</sub>.**

	FUND <sup>4</sup>	Kandlikar <sup>5</sup>	Frankhauser <sup>6</sup>	Hammitt <sup>7</sup>	GWP <sup>8</sup>
CH <sub>4</sub>	14	12	20	11	25
N <sub>2</sub> O	348	282	333	355	320

<sup>4</sup> Utslepp mellom 1995-2004; tidshorisont: 2100; diskonteringsrente: 3 prosent; modell FUND 1.6; scenario: IS92a; enkel sum; ingen effekt av høgare orden.

<sup>5</sup> Tidshorisont: 100 år; diskonteringsrente: 2 prosent; scenario: IS92a; kvadratisk skadefunksjon.

<sup>6</sup> Utslepp mellom 1991 og 2000; tidshorisont 2100; BNP vert brukt til å finne gjennomsnittlege marginale skader.

<sup>7</sup> Utslepp i 1995; tidshorisont: 2100; diskonteringsrente: 3 prosent; scenario: IS92a; midel tilfelle.

<sup>8</sup> Tidshorisont: 100 år.



## 6 Konklusjon

For å kunne samanlikne utslepp av ulike klimagassar er det naudsynt med ein egna indeks eller metode. Indeksen/metoden kan angje utsleppet sitt bidrag (per kg) til forsterka drivhuseffekt gitt ved strålingspådriv, temperaturendring eller til skade av klimaendring jf. figur 2.1. GWP-indeksen angjev akkumulert strålingspådriv som fylgje av eit pulsutslepp av ein gass relativt til det akkumulerte strålingspådrivet av eit like stort pulsutslepp av referanse-gassen CO<sub>2</sub>.

Som eit verkty for kommunikasjon og politiske avgjerder er GWP-indeksen rimeleg god. GWP har vore og er eit verkty for læring for avgjerdstakarar. Det var viktig for vitskapen å syne at CO<sub>2</sub>-utslepp ikkje er åleine om å påverke klima, men at òg andre klimagassar har stor innverknad (Skodvin, 1999). GWP gjer det mogeleg å transformere utsleppa av ulike gassar til ein felles skala og styrkar dermed moglegheita for internasjonale klimaforhandlingar og bindande avtalar om utsleppsreduksjonar.

GWP-indeksen har fleire svake sider. Når indeksen i tillegg vert tillagt ei større vekt enn det som var intensjonen misser indeksen noko av det vitskaplege truverdet. Som påpeika av Smith og Wigley (1998) vert GWP tolka som ein indeks som angjev den direkte relative temperaturendringa for reduksjon av ulike gassutslepp. Denne tolkinga inneber ei utviding av GWPs forklaringsgrad og grunnlaget for å samanlikne ulike klimagassar vert svekkja.

Det er utvikla økonomiske alternativa til GWP-indeksen. Dette er metodar som nyttar diskontert akkumulert strålingspådriv over ein uendeleg tidshorisont. Strålingspådrivet er framleis eit uttrykk for potensiell skade og dannar grunnlag for å samanlikne gassar. Dei svake sidene knytt til GWP fylgjer òg til ei viss grad dei økonomiske tilnærmingane til GWP.

Ynskjer ein å gå lenger i årsak-virkning samanhengen kan ein som i dei økonomiske metodane kvantifisere monetær skade for så å la dette danne grunnlag for å samanlikne utslepp av ulike gassar. Det er utvikla ei rekkje metodar for å estimere den økonomiske verdien av den skaden som fylgjer klimaendringar. Det er òg utvikla metodar for å aggregere bidraget frå kvar enkelt gass og korleis bidraget frå gassane endrar seg over tid.

Litteraturgjennomgangen i kapittel 5 viser at økonomiske metodar for å samanlikne ulike klimagassar har eit noko anna ambisjonsnivå enn det GWP-metoden representerer. Vi har sett korleis estimerte kostnader er avhengig av forma på skadefunksjonen. Økonomar og andre har søkt å forbetre modellane for å gje eit betre estimat av dei skadane som faktisk fylgjer utslepp av drivhusgassar.

Det er utvikla sofistikerte modellar for å simulere effekten av karbonutslepp og responsen klimasystemet gjev frå endra konsentrasjon og strålingspådriv. Utfordringa vert å integrere dette i økonomiske analysar. Feilaktige estimat av endring i konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> i atmosfæren har synt seg å kunne resultere i høge kostnader (Joos m.fl., 1998). Ein treng difor utvikle tilnærmingar slik at ein held seg innanfor det som ein reknar for rimeleg m.o.t. truverd, presisjon, kompleksitet og ressursar. Det at modelleringsverktøyet er såpass komplisert vil stille fagpersonen i ei særstilling ved at vitskapsresultat gjev lite rom for innsyn i berekningar og føresetnader og for verdivurderingar. En slik situasjon krev eit klart skilje mellom vitskap og vurderingar av meir politisk karakter.

Som Skodvin og Fuglestedt (1997) poengterer representerer fleire av alternativa til GWP vanskelegare tilgjenge og høgare ambisjonsnivå, der nye dimensjonar vert inkludert og med det meir usikre resultat. I lys av kompliserte forhandlingar og politiske avgjerder vil det være naudsynt med betre definerte indeksar som er mindre usikre og som kan auke truverdnet blant politiske avgjerdstakarar. Ser vi tilbake på krav til metode for samanlikning, presentert innleiingsvis, kan det sjå ut til at ein har søkt å forbetre metoden som eit vitenskapleg verkty, samtidig som føresetnaden for kommunikasjon mellom vitenskap og politikk er svekkja. Kva konsekvensar ein svekkja kommunikasjonslinje har for politisk avgjerder og kor lett politiske partar kan komme til semje er vanskeleg å forutsei.

Trass i kritikken presentert i denne gjennomgangen og forslag til alternative metodar er GWP eit viktig verkty for å kunne føre klimaproblemet inn en forhandlingssituasjon og for utforming av tiltak. Det er i denne forhandlingssituasjonen at premissane for framtidig reduserte utslepp av klimagassar vert fastset. Det er difor viktig at avgjerdstakarar er i stand til å rangere mellom klimagassar i denne prosessen.

Kyotoprotokollen baserer si fleirgass-tilnærming ("comprehensive approach") på bruken av GWP. Det vert arbeida med å utvikle betre metodar for å samanlikne utslepp av ulike klimagassar. Men inntil betre alternativer føreligg vil GWP være sentral i tiltaksutforming.

## 7 Referansar

- Aaheim, A.H. (1998): "Climate Policy with Multiple Sources and Sinks of Greenhouse Gases". *Environmental and Resource Economics* 00: 1-17.
- Alfsen, K.H., og Bertsen, T.K. (1999): "An Efficient and Accurate Carbon Cycle Model for Use in Simple Climate Models". CICERO Working Paper No.1, Oslo.
- Derwent, R. (1990): "Trace Gass and their Relative Contribution to the Greenhouse Effect". Report from United Kingdom Atomic Energy Authority, Harwell.
- Eckaus, R.S. (1992): "Comparing the Effects of Greenhouse Gas Emissions on Global Warming". *Energy Journal* Vol. 13(1).
- Fisher, D.A., Hales, C.H., Wang, W.-C., Ko, M.K.W. og Sze, N.D. (1990): "Model Calculation on the Relative Effects of CFCs and their Replacements on Global Warming". *Nature* 344, 513-516.
- Frankhauser, S. (1994): "The Social Costs of Greenhouse Gas Emissions: An expected Value Approach". *Energy Journal* Vol. 15, No. 2.
- Fuglestedt, J.S., Berntsen, T.K., Godal, O. og Skodvin, T. (1999): "Climate Implications of GWP-based Reductions in Greenhouse Gas Emissions". (Submitted).
- Fuglestedt, J.S., Isaksen, I.S.A. og Wang, W.-C., 1996: "Estimates of Indirect Global Warming Potential for CH<sub>4</sub>, CO and NO<sub>x</sub>". *Climatic Change* 34, 404-437.
- Hammitt, J.k., Jain, A.K., Adams, J.L. og Wuebbles, D.J. (1996): "A Welfare-based Index for Assessing Environmental Effects of Greenhouse-gas Emissions". *Nature* Vol. 381.
- Hammond, A.L., Rodenburg, E. og Moomaw, W. (1990): Commentary in *Nature*, 347, 705-706.
- Hoel, M. og Isaksen, I. (1993): "The Environmental Costs of Greenhouse Gas Emissions". *Annals of the International Society of Dynamic Games*, 89-105.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1990): "Climate Change. The Scientific Assessment". UNEP/WMO. Cambridge: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1992): "Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment". Cambridge: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1995): "Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios". Cambridge: Cambridge University Press.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1996): "Climate Change 1995: The Science of Climate Change". Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Johnson, C.E. og Derwent, R.G., 1996: "Relative Radiative Forcing Consequences of Global Emissions of Hydrocarbons, Carbon Monoxide and NO<sub>x</sub> from Human Activities Estimated with Zonally-averaged Two-dimensional Model". *Climate Change* 34, 439-462.
- Joos, F., Müller-Furstenberger, G. og Stephan, G. (1998): "Correcting the Carbon Cycle Representation: How Important is it for the Economics of climate Change?".
- Kandlikar, M. (1995): "The Relative Role of Trace Gas Emissions in Greenhouse Abatement Policies". *Energy Policy* Vol. 23, No. 10.
- Kandlikar, M. (1996): "Greenhouse Gas Indices. Degrees of Change". Vol. 1, Global Change Integrated Assessment Program, USA.
- Keeler, E., Spence, M. og Zeckhauser, R. (1971): "The Optimal Control of Pollution". *Journal of Economic Theory* 4, 19-34.
- Lashof, D.A. og Ahuja, D.R. (1990): "Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming". *Nature* 344, 529-531.
- Nordhaus, W.D. (1991): "To Slow or not to Slow: The Economics of the Greenhouse Effects". *The Economic Journal* 101, 920-937.
- O'Neill, B.C. (1996): "Greenhouse gases: Timescales, Response Functions and the Role of Population Growth on Future Emission". Ph.D. Dissertation.
- Reilly, J.M. og Richards, K.R. (1993): "Climate Change Damage and the Trace Gas Index Issue". *Environmental and Resource Economics* 3, 41-61.
- Rodhe, H. (1990): "A Comparison of the Contribution of Various Gasses to the Greenhouse Effect". *Science* 248, 1217-1219.
- Schlesinger, M.E., Jiang, X., og Carlson, R.J. (1992): "Implications of Antropogenic Atmospheric Sulphate for the Sensitivity of the Climate System". Reprinted from *Climate Change and Energy Policy*. American Institute of Physics, New York.
- Schmalensee, R. (1993): "Comparing Greenhouse Gases for Policy Purposes". *The Energy Journal* Vol. 14 (1).
- Shackley, S. og Wynne, B. (1997): "Global Warming Potentials: Ambiguity or Precision as an Aid to Policy?". *Climate Research* Vol. 8, 89-106.
- Skodvin, T. (1999): "Making Climate Change Negotiable – The Development of the Global Warming Potential Index". CICERO Working Paper No.9, CICERO, Oslo.

- Skodvin, T. og Fuglestvedt, J.S. (1997): "A Comprehensive Approach to Climate Change: Political and Scientific Considerations". *Ambio* Vol. 26 (6), Royal Swedish Academy of Sciences, Sweden.
- Smith, S.J. and Wigley, T.M.L. (1999): "Global Warming Potentials: 1. Climatic Implications of Emission Reductions". *Climatic Change* (i trykk).
- Tol, R.S.J. (1999): "The Marginal Costs of Greenhouse Gas Emissions". *Energy Journal* Vol. 20, No. 1.
- Wigley, T.M.L. og Reeves, C. (1991): "Global Warming Potentials". A Report to the U.K. Department of the Environment, London.
- Wigley, T.M.L., og Osborne, T.J. (1994): "Global Warming Potentials". A Report to the U.K. Department of the Environment and the Hadley Centre for Climate prediction and Research.
- WMO (1990): "Scientific Assessment of Stratospheric Ozone, 1989". Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 20. World Meteorological Organisation, Geneva.
- WMO (1999): "Scientific Assessment of ozone depletion, 1998". Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 44. World Meteorological Organisation, Geneva.

# ***This is CICERO***

CICERO was established by the Norwegian government in April 1990 as a non-profit organization associated with the University of Oslo.

The research concentrates on:

- International negotiations on climate agreements. The themes of the negotiations are distribution of costs and benefits, information and institutions.
- Global climate and regional environment effects in developing and industrialized countries. Integrated assessments include sustainable energy use and production, and optimal environmental and resource management.
- Indirect effects of emissions and feedback mechanisms in the climate system as a result of chemical processes in the atmosphere.

Contact details:

CICERO  
P.O. Box. 1129 Blindern  
N-0317 OSLO  
NORWAY

Telephone: +47 22 85 87 50  
Fax: +47 22 85 87 51  
Web: [www.cicero.uio.no](http://www.cicero.uio.no)  
E-mail: [admin@cicero.uio.no](mailto:admin@cicero.uio.no)

