

1. Lange termijn projecties: lastig maar noodzakelijk

Energie speelt een cruciale rol in de discussie over duurzame ontwikkeling. Enerzijds is energie nodig voor menselijke activiteiten (en daarmee menselijk welzijn). Anderzijds leidt de huidige energievoorziening tot verschillende milieuproblemen, zoals mondiale, regionale en stedelijke luchtverontreiniging en veiligheidsrisico's. Er bestaan bovendien vragen rond uitputting van goedkope energievoorraden en concentratie van het aanbod in een beperkt aantal landen. Ten slotte geldt dat ongeveer een derde van de wereldbevolking geen, of slechts beperkt toegang heeft tot moderne energiebronnen. Voor hen is het vergroten van het energieaanbod een essentiële voorwaarde voor (materiële) welvaart. Op den duur draagt deze welvaart echter verder bij aan genoemde milieu- en voorzieningsproblemen. Kortom, als samenleving staan we bij de vormgeving van het lange termijn energiesysteem voor forse uitdagingen.

Binnen deze uitdagingen speelt het omgaan met klimaatverandering een cruciale rol. In 1992 is door de meeste landen het Klimaatverdrag afgesloten met als doel stabilisatie van broeikasgasconcentraties in de atmosfeer om gevaarlijke beïnvloeding van het klimaatsysteem te vermijden. De EU heeft voor haar klimaatbeleid deze doelstelling vertaald in een stijging de wereldtemperatuur met maximaal 2°C ten opzichte van het niveau voor de industriële revolutie. Om dit doel (met enige zekerheid) te kunnen halen is volgens huidige inzichten stabilisatie van de broeikasgasconcentratie op zeer lage niveaus noodzakelijk (550 ppm CO₂-eq en minder). Dit vereist verregaande veranderingen (of transities) in het energiesysteem. Of dergelijke lage concentraties ook bereikt kunnen worden is echter zeer beperkt onderzocht.

Veel van de voor klimaatbeleid relevante processen in het energiesysteem hebben een lange termijn karakter. Als gevolg hiervan hebben beslissingen die nu genomen worden nog zeker tientallen jaren invloed. Om beslisprocessen te ondersteunen is het dus noodzakelijk om mogelijke lange termijn ontwikkelingen te verkennen. Dit is echter niet gemakkelijk. Complexe en dynamische processen zoals die met betrekking tot bevolking en economie, technologie, energievoorraden en energiebeleid bepalen samen hoe het toekomstig energiegebruik zich ontwikkelt. Sterk uiteenlopende ontwikkelingen van ieder van deze processen kunnen tot zeer verschillende toekomsten leiden.

Het maken van lange termijn scenario's, mede op basis van energiemodellen, vormt een geschikt instrument om de verscheidenheid aan energietoekomsten en de consequenties hiervan te verkennen. Met het begrip scenario wordt bedoeld "*een plausibele beschrijving van toekomstige ontwikkelingen, gebaseerd op een coherente set aannamen over de belangrijkste relaties and drijvende krachten*". Cruciaal is dat het om een *toekomstverkenning* gaat en niet om *voorspelling*. Dit laatste is gezien alle onzekerheden (en vooral ook de vrijheid van de mens keuzen te maken) weinig zinvol. Gebruik makend van verschillende scenario's gaat dit proefschrift in op drie cruciale vragen in de relatie tussen het energiegebruik en klimaatverandering:

1. Hoe kan het energiegebruik zich in de toekomst ontwikkelen zonder klimaatbeleid en wat zijn hiervan de consequenties voor broeikasgasemissies?
2. Welke onzekerheden spelen hierbij een rol en wat zijn mogelijkheden om met deze onzekerheden om te gaan in scenario's?
3. Is het mogelijk om broeikasgasemissies te stabiliseren op zeer lage niveau's?

Deze vragen zijn bestudeerd door het opstellen van lange termijn energiescenario's, voornamelijk gebruik makend van het TIMER energiemodel. Dit model wordt in hoofdstuk 2 behandeld. In het vervolg van deze samenvatting worden eerst de resultaten met betrekking tot de eerste twee vragen besproken (gebaseerd op hoofdstuk 3-6) en daarna die met betrekking tot de derde vraag (voornamelijk gebaseerd op hoofdstuk 7-9).

2. Lange termijn projecties van het energiesysteem en de bijhorende onzekerheid

2.1 Oorzaken van onzekerheid in projecties, en methoden om hiermee om te gaan

In dit proefschrift wordt een verscheidenheid aan methoden toegepast met betrekking tot omgang van onzekerheden in scenario's om aldus zowel een vollediger beeld te krijgen over mogelijke ontwikkelingen, als om een beeld te krijgen van de mogelijkheden en beperkingen van de diverse methoden. De gebruikte methoden zie verder in deze paragraaf zijn vergelijking met actuele ontwikkelingen (hoofdstuk 3), de alternatieve scenario methode (hoofdstuk 4) en model vergelijking (hoofdstuk 6). In hoofdstuk 5 wordt een nieuwe methode ontwikkeld door combinatie van de alternatieve scenario methode en probabilistische scenario's. Tevens bevat dit hoofdstuk een vergelijking van de verschillende methoden. Zoals uitgelegd in hoofdstuk 1 spelen onzekerheden een cruciale rol bij toekomstverkenningen. Er bestaan verschillende methoden om onzekerheden te classificeren. Eén methode is op basis van hun oorzaak. De twee hoofdcategorieën hier zijn *ontische* en *epistemische* onzekerheid. Bij de eerste gaat het om onzekerheid die fundamenteel aanwezig is in het systeem zelf (natuurlijke variatie). Een voorbeeld is ondermeer de variatie in economische groeisnelheden. Bij de tweede categorie gaat het om onzekerheid door gebrek aan kennis. Deze kan verder worden gekwalificeerd op basis van uitdrukingsmogelijkheden: 1) in statistische termen (meestal op basis van schattingen) zoals de schattingen van energievoorraden, 2) in termen van conditionele uitspraken ("wat als..."), of 3) in termen van uitdrukkingen over kennislacunes. Een belangrijke vorm van *epistemische* onzekerheid komt naar voren in onenigheid tussen deskundigen, met als onderliggende oorzaak vaak een verschil in expertise en/of waardepatroon (denk bijvoorbeeld aan de verschillende inschatting rond mogelijkheden voor energiebesparing tussen economen en ingenieurs). Ten slotte is er ook nog sprake van reflexieve onzekerheid, namelijk de onbekende reactie van mensen op informatie over de toekomst. Onzekerheden kunnen ook worden ge-

kwalificeerd op basis van niveau. Dan gaat het bijvoorbeeld om 1) volledige theorieën, 2) de modelmatige weergave van deze theorieën, of 3) parameter schattingen.

Het is logisch dat de grote verscheidenheid in soorten onzekerheid ook leidt tot een behoorlijke variatie in methoden om hiermee om te gaan. Hierbij gaat het om ondermeer 1) het ontwikkelen van alternatieve scenario's (zeer geschikt voor de minder kwantitatief in te schatten vormen van *epistemische* onzekerheid), 2) probabilistische methoden (vooral geschikt voor het verkennen van de gevolgen van *ontische* onzekerheid en statistische schattingen van *epistemische* onzekerheid), 3) model vergelijking (vooral geschikt voor het verkennen van tegenstellingen tussen experts en onzekerheden op modelniveau), 4) vergelijking van modelresultaten met werkelijke ontwikkeling (in bepaalde mate geschikt voor alle vormen van onzekerheid) en 5) kwalitatieve uitspraken van onzekerheid zoals in de NUSAP methode (zoals een kwalificatie als 'grote mate van onenigheid onder experts'; geschikt voor minder goed te kwantificeren vormen van onzekerheid).

De verschillende vormen van onzekerheid spelen in de tijd ook een verschillende rol. De meer kwalitatieve en fundamentele onzekerheden (ook wel aangeduid met 'onwetendheid' of 'diepe onzekerheid') worden verder vooruit in de tijd steeds belangrijker. Het belang van methoden die hiermee rekening kunnen houden, zoals alternatieve scenario's en kwalitatieve beoordelingen, neemt dan dus toe. Voor meer korte termijn verkenningen (5-30 jaar) spelen *ontische* onzekerheden en kwantitatief te schatten vormen van *epistemische* onzekerheid een belangrijkere rol. In dat geval is het eenvoudiger probabilistische verkenningen toe te passen. In de wetenschappelijke literatuur wordt een stevig debat gevoerd over dit onderwerp (in hoofdstuk 5 wordt dit debat samengevat). In dit debat geven tegenstanders van de alternatieve scenario methode aan dat deze door een gebrek aan waarschijnlijkheidsaanduiding weinig van nut is: beleidsmakers moeten immers niet alleen weten wat *kan* gebeuren – maar ook wat de *kans* daarop is. Tegelijkertijd is het commentaar op de probabilistische methoden dat deze proberen door middel met subjectieve meningen van deskundigen een schijnbaar objectieve onzekerheidsaanduiding te geven in een situatie waar onwetendheid dit eigenlijk niet toestaat.

2.2 Vergelijking van scenario uitkomsten met recentere inzichten

In hoofdstuk 3 worden de IPCC emissie scenario's (SRES) getoetst aan recentere inzichten, zowel wat betreft feitelijke ontwikkelingen als recentere toekomstschattingen. Deze scenario's zijn in 2000 gepubliceerd en omvatten een zeer lange tijdsperiode (1990-2100) om zo van nut te zijn voor klimaatmodellering. Sinds 2000 is er verschillende malen kritiek geuit op de SRES scenario's: zij zouden zowel onjuist als verouderd zijn. Een daadwerkelijke toets (zoals uitgevoerd in hoofdstuk 3) leidt tot de volgende conclusies:

- ***Samenvattend kan worden gesteld dat de SRES scenario's nog steeds consistent zijn met huidige inzichten van ontwikkeling van emissies en onderliggende drijvende***

krachten. Er zijn enkele verschillen (huidige inzichten tonen lagere populatie en inkomensprojecties in ontwikkelingslanden en lagere projecties voor zwavelemis-sies), maar over het algemeen zijn de SRES scenario's nog 'in orde' gebleken. Interessant is dat ook het onderliggende raamwerk nog steeds als relevant beschouwd wordt, gezien het gebruik hiervan in recentere verkenningen zoals de 'Millennium Ecosystem Assessment'.

- **Het is mogelijk scenario's te 'onderhouden' door updates op parameter niveau, totdat meer fundamentele veranderingen uiteindelijk de scenario's irrelevant maken.** De beperkte verschillen betekenen dat op basis van de vergelijking zelf het niet echt noodzakelijk is de scenario's te herzien in een nieuwe IPCC exercitie. Individuele modelteams kunnen echter gemakkelijk de geconstateerde gebreken corrigeren (en hebben dit in bepaalde gevallen ook al gedaan). Interessant is te constateren dat deze lange termijn scenario's na 5-10 jaar de 'eerste scheurtjes vertonen'. Dit benadrukt nog eens dat dergelijke scenario's niet bedoeld zijn om te voorspellen, maar slechts dienen als verkenning binnen de context van gestelde (beleids)vragen.

2.3 Ontwikkeling van energiegebruik en broeikasgas emissies zonder klimaatbeleid

De mogelijke ontwikkeling van wereldenergiegebruik en broeikasgas emissies zonder klimaatbeleid is in dit proefschrift bestudeerd in hoofdstuk 5 en 6. De *conditioneel-probabilistische* scenario methode in hoofdstuk 5 maakt gebruik van probabilistische schattingen op parameter niveau binnen de context van op *verhaallijn-gebaseerde* scenario's. Zo kunnen de sterke kanten van de alternatieve scenario methode en de probabilistische methode worden gecombineerd. Een andere manier om inzicht te krijgen in onzekerheden is door model vergelijking. In hoofdstuk 6 is dit gedaan door te kijken naar een vergelijking van model uitkomsten in het kader van het Energy Modelling Forum (EMF), gericht op de rol van niet-CO₂ broeikasgassen. Daarbij moet worden bedacht dat tot nu toe de meeste lange termijn modellen alleen energie-gerelateerde CO₂ emissies bestudeerden, terwijl de overige bronnen zo'n 30-40% van de emissies beslaan. In de EMF-21 studie kregen alle modelleers dezelfde informatie over de mogelijkheden om niet-CO₂ te reduceren. Deze informatie werd echter op verschillende manieren in het model verwerkt, vanwege verschillen in de modellen en (de wereldvissies van) de modelleers.

Op basis van de toegepaste methoden kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- **De TIMER modelberekeningen geven aan dat zonder klimaatbeleid emissies van CO₂ waarschijnlijk sterk toe zullen nemen. De verhaallijn voor scenario's aan de onderkant van de range verschilt substantieel van die in het midden of aan de bovenkant van de range.** Afhankelijk van de verhaallijn kunnen emissies zich in sterk verschillende richtingen ontwikkelen (met name het 'duurzame ontwikkelingspad' B1 wijkt fundamenteel af). De gevonden ranges in dit proefschrift komen overeen met de IPCC SRES scenario studie maar ook met de probabilistische studie van Webster et al. (2002). Ten opzichte van IPCC voegt de huidige studie on-

zekerheidsranges toe, terwijl ten opzichte van Webster et al. een kwalificatie mogelijk is van het soort scenario's binnen de totale range. Een vergelijking met de totale literatuurrange laat zien dat de hoogste concentratie uitkomsten overeenkomt met de range die hier is aangeduid voor het B2 scenario.

- **Emissies voor een eenduidige verhaallijn kunnen zeker nog 40% afwijken.** De onzekerheidsranges voor ieder van de verhaallijnen komen voort uit *ontische* onzekerheid en ambigue aanduiding in iedere verhaallijn. De belangrijkste parameters die op modelniveau bijdragen aan onzekerheid zijn populatie en inkomensontwikkeling, factoren die de energie-efficiënte van energievraag bepalen, voorkeuren voor brandstoffen (met name de rol van kolen) en olievoorraden (zie 5.3). Andere belangrijke factoren zijn technologie-aannamen voor hernieuwbare energie en voor energievraag.
- **In de modelvergelijking blijkt dat alle modellen in hun 'baseline' scenario (zonder klimaatbeleid) een sterke groei van emissies van zowel CO₂ als niet-CO₂ broeikasgassen laten zien.** Gemiddeld over alle modellen groeien de emissies van CO₂ van 7.5 GtC in 2000 naar ongeveer 20 GtC in 2100. De emissies van de niet-CO₂ gassen groeien iets langzamer van 2.7 naar 5.1 GtC in 2100.
- **Er is een zeer sterke spreiding tussen de projecties van de verschillende modellen, in de orde van grootte als eerder gevonden voor het TIMER model.** De spreiding in 2100 emissies is 14 tot 36 GtC (of wel de gemiddelde groei is 1.1% over de hele eeuw, maar ligt tussen de 0.8 en 1.3%). Het grootste deel van deze spreiding komt pas tot stand in de 2^e helft van de eeuw waar sommige modellen doorgroeiende emissies tonen, terwijl andere modellen een stabilisatie of zelfs een afname laten zien. Ook de emissies van de niet-CO₂ gassen tonen een behoorlijke spreiding. Modellen met een meer fysieke oriëntatie lijken meer verzadiging in groei te tonen dan de meer economisch georiënteerde modellen.

Een cruciale onzekerheid voor de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen zijn de ontwikkelingen in China. Ten gevolge van de grote bevolking en de stormachtige ontwikkeling van de economie is het waarschijnlijk dat China zeer binnenkort de VS passeert als werelds grootste land in termen van broeikasgasemissies. Hoewel de emissies per hoofd sterk beneden het gemiddelde OECD niveau liggen, heeft het absolute emissieniveau belangrijke consequenties voor zowel klimaatverandering als mondiaal klimaatbeleid. In dit proefschrift is de alternatieve scenario methode toegepast om – samen met Chinese experts – 4 alternatieve scenario's te ontwikkelen voor het Chinese energiegebruik en bijbehorende emissies. Hieruit bleek het volgende:

- **Emissies in China zouden in de komende vijftig jaren nog eens met een factor 2-4 toe kunnen nemen op basis van vier zeer verschillende scenario's.** Cruciale onzekerheden hierbij zijn de openheid van de Chinese economie voor internationale handel en investeringen en een eventuele focus op duurzame ontwikkeling. Het is interessant om de mogelijke Chinese ontwikkelingen te relateren aan de positie van Japan en de VS. Ontwikkeling richting het patroon van de VS leidt tot het hoge emissie scenario en betekent dat de emissies van China alleen hoger uitkomen dan de huidige wereldemissies. Ontwikkeling naar Japanse patronen betekent dat emissies een factor 2 lager kunnen zijn. De sterkste groeiende sectoren (in termen van

emissies) in China zijn in absolute termen electriciteitsproductie, de industrie en op de lange duur transport.

3. Scenarios met drastische reductie van broeikasgasemissies

3.1 Geïntegreerde analyse

Ondanks het feit dat een groot aantal scenario's zijn ontwikkeld die kijken naar de vraag hoe emissies kunnen worden beperkt, zijn er slechts zeer weinig die kijken naar de vraag of en hoe zeer lage concentratieniveaus (minder dan 550 ppm CO₂-eq.) kunnen worden bereikt. Een dergelijk niveau is noodzakelijk om met meer dan 50% kans de EU klimaatdoelstelling te halen. Het gebrek aan scenario's vormt een belangrijke kennis lacune voor de vraag of dergelijke doelstellingen te verwezenlijken zijn. In dit proefschrift worden dergelijke scenario's wel bestudeert (hoofdstuk 7). Daarnaast wordt specifiek aandacht besteed aan de rol van technologie (hoofdstuk 8), de nevenvoordelen van klimaatbeleid voor beleid inzake luchtverontreiniging (hoofdstuk 9) en de reductie mogelijkheden van broeikasgasemissies in China (hoofdstuk 4). De scenario's zijn gemaakt door middel van gekoppelde modellen voor energie (TIMER), landgebruik en klimaat (IMAGE) en klimaatbeleid (FAIR).

- **Er zijn forse emissiereducties nodig om broeikasgasconcentraties te stabiliseren op 650, 550 en 450 CO₂-eq. Ten opzichte van de baseline gaat het om een reductie van 65, 80 en 90% in 2100. De studie laat zien dat dit technisch mogelijk is op basis van bekende technieken. Onder specifieke aannamen is ook 400 ppm CO₂-eq. mogelijk.** Het 400 ppm niveau ligt alleen binnen bereik in het TIMER model indien de optie van bio-energie in combinatie met 'koolstofopvang en opslag' wordt toegestaan (waardoor een optie ontstaat die netto CO₂ kan aan de atmosfeer kan onttrekken bij elektriciteitsgeneratie).
- **Optimale reductiestrategieën bestaan uit een brede portfolio aan maatregelen.** Met andere woorden, er is niet één enkele technologie waarmee de gewenste reductie gehaald kan worden. Wel spelen bepaalde maatregelen, zoals energiebesparing, een voorname rol. Ook 'afvang en opslag van CO₂' is onder de standaard aannames belangrijk. Deze technologie kan echter tegen beperkte extra kosten worden vervangen door andere CO₂-neutrale manieren van elektriciteitsopwekking.
- **De concentratie doelstelling kan worden gezien als een 'trade-off' tussen kosten en klimaatbaten.** De kosten van klimaatbeleid nemen gemeten in termen van de netto constante waarde over de eeuw toe van 0.2% tot 1.1% van het wereld BNP wanneer het stabilisatieniveau wordt aangescherpt van 650 tot 450 ppm. Daarbij neemt de geschatte waarschijnlijkheid om de 2°C doelstelling te halen toe van 0-10% tot 20-70%.
- **De noodzakelijke reducties vereisen zeer sterke veranderingen in het energiesysteem – en hieraan gekoppeld grootschalige investeringen in nieuwe technologieën.** In het meest ambitieuze scenario is het tempo van introductie van

nieuwe technologieën in relatieve termen vergelijkbaar met grootschalige transitie uit het verleden (bijvoorbeeld de introductie van olie). Omdat het totale energiegebruik in de toekomst veel groter is, gaat het in absolute hoeveelheden om een veel grotere verandering. Dit kan ook worden geïllustreerd aan de hand van de ratio tussen CO₂ emissies en energiegebruikkoolstoffactor. Deze ratio is de afgelopen 100 jaar eerst toegenomen en de laatste 30 jaar stabiel. Elk van de hier doorberekende scenario's vereist een zeer forse daling van deze ratio. Ook voor de verhouding tussen energiegebruik en inkomen geldt dat deze (tijdelijk) sneller moet verbeteren dan historisch het geval. Daarbij komt dat deze ontwikkelingen al op korte termijn (voor 2020) moeten worden ingezet. Omdat dit de betrokkenheid vereist van een groot aantal actoren met zeer uiteenlopende belangen, is het vereist dat er een gevoel van noodzaak en urgentie ontstaat.

- **Onzekerheden spelen een cruciale rol.** Voor een gegeven ontwikkeling van emissies zonder klimaatbeleid en concentratiedoelstelling kunnen kosten nog steeds met minstens een factor 2 variëren als gevolg van ondermeer onzekerheden met betrekking tot landgebruikemissies, het potentieel van bio-energie en de bijdrage van energiebesparing. Gezien de dominantie van onzekerheden is het dus van belang om strategieën te ontwikkelen die enigszins robuust zijn.

3.2 De rol van technologie-aannamen

Technologische ontwikkeling is noodzakelijk om forse emissiereducties betaalbaar te maken. Om een beeld te krijgen van de invloed hiervan is in hoofdstuk 8 een analyse gemaakt van de reactie van het energiesysteem op verschillende koolstofprijzen. Hieruit blijkt dat:

- **Technologische ontwikkeling speelt een cruciale rol bij het verlagen van de kosten van klimaatbeleid.** Onderscheid moet worden gemaakt tussen de standaard technologische ontwikkeling zonder klimaatbeleid ('*baseline*') en die specifiek *geïnduceerd* door klimaatbeleid. In het TIMER model worden beiden gerepresenteerd door '*learning-by-doing*' (een beschrijving waarbij de kosten van een technologie afnemen wanneer deze veel wordt toegepast). In model experimenten kan getoond worden dat '*baseline ontwikkeling*' er voor zorgt dat de response op 300US\$/tC tax in 2030 toeneemt van een reductie van 30% tot 40% (wereldemissies), terwijl '*klimaatbeleid geïnduceerde*' ontwikkeling dit verder vergroot tot 60%. Het ondersteunen van technologische ontwikkeling is belangrijk en kan ondermeer door het creëren van niche markten om zo ontwikkeling te bevorderen en het ondersteunen van onderzoek.
- **Model aannamen over de twee vormen van technologische ontwikkeling zijn cruciaal in de keuze tussen 'vroeg' en 'laat' klimaatbeleid.** '*Baseline technologische ontwikkeling*' kan een reden zijn om beleid uit te stellen (technologie wordt vanzelf goedkoper in de tijd), terwijl '*klimaatbeleid geïnduceerd leren*' juist een reden is om vroeg te beginnen (om technologisch ontwikkeling tijdig te bevorderen). Onder de standaard model aannamen lijkt het erop dat beide factoren rond 2030 van vergelijkbare grootte zijn.

3.3 Neven-voordelen van klimaatbeleid

Een geïntegreerde benadering van klimaatbeleid en regionale luchtverontreiniging kan tot behoorlijke 'nevenvoordelen' leiden voor zowel effectiviteit als kosten. De reden hiervoor is dat beide milieuproblemen in belangrijke mate dezelfde oorzaak hebben: de verbranding van fossiele brandstoffen. Het meewegen van de baten van het beperken van luchtverontreiniging kan extra belangrijk zijn omdat deze onmiddellijk optreden, terwijl de voordelen van klimaatbeleid vaak pas decennia later belangrijk worden. In hoofdstuk 9 is gekeken hoe groot de nevenvoordelen kunnen zijn van het Kyoto Protocol (als voorbeeld van klimaatbeleid). De analyse laat zien dat:

- **De nevenvoordelen van het Kyoto Protocol zijn in de orde van 50% van de kosten.** Terwijl de jaarlijkse kosten van het Kyoto Protocol worden geschat op 4-12 miljard Euro zijn de bijhorende besparingen in termen van luchtverontreinigingsbeleid in de orde van 2.5-7 miljard. De grootte van deze nevenvoordelen hangt af van hoe de handelsmechanismes uit het Kyoto Protocol worden gebruikt.

3.4 Niet-CO₂ gassen.

Wat betreft reductie scenario's met betrekking tot niet-CO₂ gassen kunnen de volgende conclusies worden getrokken (hoofdstuk 4):

- **Een strategie gericht op alle broeikasgassen kan dezelfde klimaatdoelstelling bereiken als een CO₂-alleen strategie, maar tegen veel lagere kosten.** De kosten reductie ligt voor de meeste modellen in de orde van 30-40% van de GDP verliezen van een CO₂-alleen strategie.
- **Om een multi-gas strategie mogelijk te maken zijn meetlatten nodig die een afweging tussen de verschillende gassen mogelijk maken. Keuze voor een meetlat bepaalt de resultaten van een multi-gas strategie.** In het huidige klimaatbeleid wordt als meetlat de 100-jaar gemiddelde Global Warming Potential (GWP) gebruikt. EMF-21 resultaten laten zien dat in dat geval er een sterke bijdrage van vooral methaan zal zijn aan de emissiereductie. Een alternatieve benadering, toepasbaar binnen modellen, is optimalisatie over de tijd. In dat geval worden reducties van CH₄ uitgesteld tot het einde van de eeuw (vanwege de beperkte levensduur). Hoewel optimalisatie tot iets lagere kosten leidt is de vraag of deze methode ook kan worden toegepast in de werkelijkheid. Het lijkt dan ook dat de voordelen van gebruik van GWPs opwegen tegen de nadelen.

3.5 China

In hoofdstuk 4 is ook gekeken naar reductie mogelijkheden in China door middel van reductie scenario's. Deze leiden tot de volgende resultaten:

- **Door alle opties in het TIMER model te combineren is het mogelijk de emissies in 2050 met 50% te reduceren ten opzichte van de baseline.** In China bestaat een groot potentieel aan emissiereductie opties – ondermeer in de vorm van energiebesparing en maatregelen in de electriciteitssector. Reducties in China zijn vaak goedkoper dan de reducties in OECD landen. Analyse toont aan dat bovengenoemd

potentieel gedeeltelijk ook kan worden benut door andere vormen van beleid dan klimaatbeleid.

- **Voorstellen voor klimaatbeleid moeten ook worden geëvalueerd tegen de scenario verhaallijn.** In scenario-analyse wordt vaak veel aandacht besteed aan de verhaallijn bij het uitwerken van de baseline, maar wordt bij mitigatie analyse slechts gewerkt met een enkele generieke maatregel: een koolstof belasting. In werkelijkheid hangt de voorkeur van bepaalde opties wel degelijk af van de verhaallijn (denk aan de rol van nucleaire energie).

4. Discussie en volgende stappen

Discussie ten aanzien van de belangrijkste conclusies

Uit de analyse in dit proefschrift komen 3 kernboodschappen naar voren:

- De scenario's zonder klimaatbeleid leiden, ondanks sterk verschillende aannamen, allen tot een sterke toename van broeikasgasemissies en daardoor een waarschijnlijke toename van de mondiale temperatuur (in 2100 in de orde van 3-4°C bij een gemiddelde klimaatgevoeligheid).
- Het is mogelijk om de emissies sterk te reduceren zodat broeikasgasconcentraties kunnen worden gestabiliseerd op 450 ppm CO₂-eq. Dit niveau komt overeen met ongeveer een 50% kans op het halen van de 2°C doelstelling. De kosten hiervan liggen in het energiemodel gemiddeld op zo'n 1-2% van het GDP.
- Cruciale factoren bij het vergroten van de realiteit van ambitieuze klimaatbeleid scenario's zijn de integratie van klimaatbeleid met andere beleidsterreinen (luchtverontreiniging, voorzieningszekerheid, en duurzame ontwikkeling), technologische ontwikkeling en het creëren van een gevoel van noodzaak.

Een belangrijke vraag is of deze model resultaten voldoende robuust zijn. In dat kader moet worden overwogen dat: a) het TIMER model is gekalibreerd tegen 30 jaar energiegebruik gegevens en veel informatie bevat over technologische ontwikkeling, b) er in dit proefschrift veel aandacht aan onzekerheids- en gevoeligheidsanalyse is besteed en c) de vergelijking met andere studies laat zien dat zowel de emissie scenario's en kostenberekeningen hiermee consistent zijn. De bovenstaande kernboodschappen kunnen dan ook als robuust worden beschouwd. Desondanks zijn er ook beperkingen aan de analyse:

- Net als de andere energiemodellen heeft TIMER relatief weinig detail in de beschrijving van energie-vraag. Verbetering is hier mogelijk.
- Technologische ontwikkeling is zeer onzeker. Dit kan leiden tot zowel een over- als onderschatting van het werkelijke reductiepotentieel.
- Als kosten indicator wordt in dit proefschrift naar bestrijdingskosten gekeken. Hierin worden macro-economische feedbacks niet meegenomen.
- De onderzochte scenario's gaan uit van een verrassingsvrije wereld en nemen klimaatteggokoppelingen op de drijvende krachten niet mee.

- Het modelleren van energie-klimaat scenario's leidt tot een focus op economische en technologische elementen. Dit komt ondermeer tot uiting in slechts een beperkte aandacht voor implementatie. Er wordt bijvoorbeeld niet ingegaan op het feit dat de ontwikkelingen in het energiesysteem worden bepaald door een groot aantal actoren met zeer uiteenlopende belangen.

Belangrijke stappen vooruit

Gebaseerd op dit werk, is er nog behoorlijk wat progressie mogelijk. Hier worden een aantal mogelijkheden kort aangegeven, ingedeeld onder 1) scenario ontwikkeling, 2) model ontwikkeling en 3) model toepassing.

Scenario ontwikkeling

- Op dit moment bestaat een duidelijke tweedeling tussen 'baseline' scenario's (zonder klimaatbeleid) en beleidsscenario's. Door de huidige ontwikkeling van klimaatbeleid wordt dit verschil echter steeds moeilijker te maken – en mogelijk ook minder relevant. In plaats daarvan kan worden gewerkt met een continuüm van bestaand beleid tot aangescherpt beleid.
- Met toenemende aandacht voor, en kennis over klimaatgevolgen en aanpassingsmogelijkheden zouden terugkoppelingen van klimaat op scenario aannamen in een volgende generatie scenario's beter moeten worden meegenomen.
- Beleidsscenario's worden op dit moment vooral gemaakt door in een model een uniforme koolstofbelasting te introduceren als ruwe indicatie van een breder beleid. Beleidsrelevantie van scenario's kan worden verhoogd door in te gaan op de mogelijke beleidsinstrumenten. Dit vereist echter meer gedetailleerde modellen.
- Tenslotte, scenario's worden ontwikkeld op basis van karikaturale verhaallijnen die over lange tijd worden volgehouden. In werkelijkheid zullen er verrassingen zijn en reacties op de verhaallijn. In hoeverre dergelijke zaken kunnen worden ingebouwd in scenario's zonder deze ondoorzichtig te maken is nog een open vraag.

Model ontwikkeling

Het TIMER model dat als basis dient van veel werk in dit proefschrift heeft 3 unieke eigenschappen: 1) een sterke focus op lange termijn (technologie) dynamiek, 2) de koppeling aan het IMAGE integrated assessment model, en 3) de koppeling met FAIR en dus internationaal klimaatbeleid. In termen van verdere model ontwikkeling lijken de volgende opties nuttig:

- Verdere focus op geografisch expliciete processen. Hierbij gaat het vooral om het weergegeven van relevante processen die plaats vinden op een gedetailleerder schaalniveau (en dus een meer gedetailleerde beschrijving vereisen). Dit betreft ondermeer plattelands en stedelijke ontwikkeling, en het meenemen van geografisch expliciete factoren in energievraag.
- Het is belangrijk om de ontwikkeling van de energie-vraag beter te begrijpen. Dit vereist ondermeer een beter begrip van de ontwikkeling van de drijvende krachten van de energievraag in fysieke termen en een verbeterde beschrijving van besparingsmogelijkheden.

Model toepassing

Er zijn 2 wegen open om beleidsvorming en -implementatie (en sociaal wetenschappelijk onderwerpen in bredere zin) beter mee te nemen in energie/klimaat scenario's:

- Het uitbreiden van de modellen met expliciete modellering van deze onderwerpen, ondermeer door multi-actor benaderingen
- Het gebruik van modellen in een context die terugkoppeling van belanghebbenden en beleidsmakers toestaat.

Op dit moment gaat het eerste pad vooral om onderzoek, gericht op niet al te complexe modellen. Wat betreft het tweede pad zijn er zeer succesvolle voorbeelden uit het verleden beschikbaar – zowel op het gebied van klimaatbeleid (de Delft en COOL workshops) en daarbuiten (het gebruik van het RAINS model binnen het beleid). Natuurlijk bestaan er tussen deze voorbeelden grote verschillen, maar er mag worden gesteld dat elk van de genoemde interactieve processen heeft geleid tot een beter begrip van beleidsmakers, analisten en modellers in de relevante vragen en uitkomsten. Dergelijke kennis zou wel eens zeer belangrijk kunnen zijn in de komende, cruciale periode, waar in het internationaal klimaatbeleid vorm krijgt.