

FLEXIBILITEIT IN DE ENERGIEVOORZIENING VOOR TOEKOMSTIG CO₂-BELEID

J.R. YBEMA
S. BOS
M. MENKVELD
D.J. GIELEN

Voorwoord

Deze studie is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM). Voor hun medewerking en/of hun commentaar bedanken wij W. Gilijamse, H. Kaan (beide werkzaam bij ECN-Duurzame Energie; Zon & Wind), E. Worrell (Rijksuniversiteit Utrecht), G. Peppink (SEP), G.H. Bontius (EnergieNed), F. de Haas (WoonEnergie) en R. van de Wijngaart (Ministerie van VROM).

Abstract

A CO₂ hedging strategy aims to limit the risks associated with uncertain CO₂ emission reduction targets. Such (economic) risks exist as energy systems have limited capabilities to adapt to reduced CO₂ emissions, in particular if the reductions have to take place at a fast rate. Countries could face such requirements if they would continue to use increasing amounts of fossil fuels up to point in time where they see themselves confronted with drastic cuts to deal with - by then undisputed - climate impacts. Therefore, it is thought to be worthwhile to anticipate future CO₂ reduction policy by taking appropriate actions in the near term. Several types of action can be discerned:

- secure favourable conditions for the penetration of CO₂ reduction measures;
- avoiding decisions which inherently lead to high CO₂ emissions over long time horizons;
- start implementation of selected CO₂ emission reduction options;
- develop new technologies promising emission reduction at low cost.

This study for the Dutch Ministry of Environment contains two parts. In the first part CO₂ hedging strategies that were calculated with an energy model of the Netherlands with uncertain long term CO₂ targets are presented. The financial benefits of a CO₂ hedging strategy have also been assessed based on the model analyses. The second part presents an inventory of concrete CO₂ hedging opportunities in different sectors of the energy Netherlands' system.

INHOUD

SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	9
2. RECENTE LITERATUUR HEDGING	13
2.1 Inleiding	13
2.2 Studies naar de timing van CO ₂ -reductie	13
3. AANPAK VAN DE MODELBEREKENINGEN	17
3.1 Inleiding	17
3.2 Het MARKAL-model voor Nederland	18
3.3 MARKAL-referentiescenario	20
3.3.1 De achtergrond van het MARKAL-referentiescenario	20
3.3.2 Extra hedgingopties in MARKAL	22
3.3.3 Resultaten van het referentiescenario	23
3.4 Enquête ter voorbereiding van scenario-keuze	25
3.4.1 Inleiding	25
3.4.2 Uitwerking van de enquête	26
3.4.3 Verwerking enquêteresultaten tot modelparameters	28
3.5 Scenariokeuze	31
4. RESULTATEN MODELBEREKENINGEN	35
4.1 Ontwikkeling van de CO ₂ -emissie en primair energiegebruik	35
4.2 Kosten en baten van CO ₂ -reductie	38
4.3 De inzet van technieken	42
4.4 Resultaten berekeningen met jaarlijkse CO ₂ -doelstellingen	49
4.5 Gevoeligheidsanalyses	51
4.5.1 Hedging voor onzekere gasprijzen	51
4.5.2 Gevoeligheidsanalyse met lage discontovoet en hoge rentevoet	54
4.5.3 Gevoeligheidsanalyse met backstop technieken en een tweetal mogelijke CO ₂ -doelstellingen	56
5. OVERZICHT VAN HEDGING-OPTIES PER SECTOR	61
5.1 Werkwijze en criteria	61
5.2 Gebouwde omgeving	63
5.2.1 Ruimteverwarming	64
5.2.2 Warm tapwatervoorziening	69
5.2.3 Ruimtekoeling	71
5.2.4 Verlichting	72
5.2.5 Huishoudelijke apparatuur	73
5.2.6 Apparatuur utiliteitssector	74
5.2.7 Conclusie hedging in de gebouwde omgeving	74
5.3 Industrie	75
5.3.1 De betekenis van hedging voor de industrie	75
5.3.2 Hedging-opties per sector	77
5.4 Energie-infrastructuur	81
5.4.1 Definitie	82
5.4.2 De rol van infrastructuur	83

5.5	Elektriciteitsproductie	86
6.	DISCUSSIE HEDGINGSTRATEGIE	95
6.1	Inleiding	95
6.2	Aspecten die de timing van CO ₂ -reductie beïnvloeden	95
6.3	Totaal effect op resultaten hedgingberekeningen	101
7.	CONCLUSIES	103
	REFERENTIES	107
BIJLAGE 1	BEREKENING VAN DE BATEN VAN HEDGING	111

SAMENVATTING

De energievoorziening is in de meeste landen de sector die de grootste bijdrage levert aan de emissies van broeikasgassen van een land. Dit is ook het geval in Nederland.

De inrichting van de energievoorziening van Nederland zal rond het jaar 2040 in belangrijke mate bepaald worden door nationale en internationale besluiten over de mate waarin de emissies van CO₂ verminderd moeten worden. Bestaande studies van energiescenario's laten dit duidelijk zien. Bij scenario's met een gematigd beleid voor CO₂-emissies kan de energievoorziening tot halverwege de volgende eeuw gebaseerd blijven op fossiele energiebronnen en kunnen vergaande veranderingen bij het eindgebruik van energie achterwege blijven. Als de emissies van CO₂ daarentegen drastisch moeten worden verminderd zal de rol van duurzame energiebronnen in de Nederlandse energievoorziening sterk toe moeten nemen en dienen ook belangrijke verschuivingen plaats te vinden in energie-infrastructuur en bij de energiegebruikende sectoren.

Verwacht wordt dat de klimaatonderhandelingen nog ongeveer 20 jaar zullen voortduren voordat echt duidelijk wordt in welke mate de verschillende landen hun nationale emissies op termijn zullen moeten verminderen. Tot het moment dat er duidelijkheid is over de lange termijn doelstelling volgen de meeste landen geen of een gematigd beleid voor reductie van de CO₂-uitstoot. De besluiten die we nu nemen over de inrichting van de energievoorziening hebben evenwel consequenties voor de mogelijkheden om op lange termijn drastische reductiedoelen te bereiken. Centrales, distributiesystemen en gebouwen hebben immers een lange levensduur en investeringen hierin leggen de emissies van CO₂ voor een grote periode vast.

De energievoorziening kan meer of minder flexibel worden ingericht. Bij een flexibele energievoorziening wordt er rekening mee gehouden dat installaties, gebouwen en infrastructuur in de toekomst eventueel belangrijk worden aangepast. Door op voorhand hier rekening mee te houden al bij de bouw van installaties, gebouwen en infrastructuur:

- kan later de energievoorziening eventueel in kortere tijd worden aangepast om de uitstoot van CO₂ te verminderen,
- kunnen de CO₂-emissies verder worden verminderd,
- zijn de kosten van CO₂-reductie kleiner.

Het is de moeite waard om te inventariseren op welke wijze de flexibiliteit van de energievoorziening in de nabije toekomst verhoogd kan worden. Op die manier kan er worden ingedekt tegen hoge kosten die gemoeid zijn met een mogelijke drastische reductie van CO₂-emissies. De engelstalige term voor 'indekken' is 'to hedge'. Concrete flexibiliteitverhogende maatregelen worden daarom hier hedging-opties genoemd. Een hedgingstrategie is een strategie waarin de mogelijkheden voor toekomstige CO₂-reductiemaatregelen open worden gehouden en waarin bepaalde maatregelen worden genomen die de hoogte van CO₂-emissies op lange termijn kunnen beperken.

Er bestaan verschillende voltooide studies over hedging-strategieën voor CO₂-reductie [3-6]. Meestal is daarbij sprake van hedging-analyses op het schaalniveau van de wereld. Dergelijke analyses geven inzicht in de optimale timing van de reductie van CO₂-emissies op mondiale schaal. Analyses die meer specifiek kijken naar de energievoorziening van een individueel land zijn nog schaars. Wanneer de energievoorziening van één land in een analyse in ogenschouw wordt genomen, is het mogelijk om de keuze-mogelijkheden in de energievoorziening in een grotere mate van detail te beschouwen dan bij analyses op mondiale schaal. Verder is er nog weinig bekend over concrete flexibiliteitverhogende maatregelen in de energievoorziening. Als concrete hedging-opties bekend zijn, biedt dit mogelijk nieuwe aangrijpingspunten voor het beleid om de mogelijkheden te vergroten om de toekomstige emissies van CO₂ te verminderen. Deze studie geeft zowel een model-analyse omtrent CO₂-hedgingstrategieën voor Nederland als een inventarisatie van concrete hedging-opties.

Modelberekeningen

Deze studie presenteert een analyse met een model van de Nederlandse energievoorziening (Stochastisch MARKAL). Het model is in staat om een kostenoptimale inrichting van de energievoorziening te berekenen voor de periode van het jaar 2000 tot 2040 waarbij de energievoorziening aan randvoorwaarden dient te voldoen. Het is mogelijk om onzekere lange termijn doelstellingen voor de uitstoot van CO₂ aan het model op te leggen. Daarbij kan het model worden gevraagd één optimale strategie te berekenen met de laagste *verwachte* kosten tot het moment waarop is verondersteld dat de onzekerheid zal verdwijnen. Na dit moment kan de energievoorziening zich nog naar alle aangegeven onzekere doelstellingen ontwikkelen. Op basis van de resultaten van een enquête die aan Nederlandse deskundigen op het gebied van energiebeleid en internationaal klimaatbeleid is uitgestuurd is er invulling gegeven aan de onzekere lange termijn doelstellingen voor de uitstoot van CO₂ en de waarschijnlijkheid van deze doelstellingen.

Uit de enquête-resultaten komt naar voren dat verwacht wordt dat ongeveer in 2020 bekend zal worden met welke CO₂-doelstelling Nederland op een termijn van 2040 geconfronteerd zal worden. De gemiddelde inschatting is dat de emissies in 2040 met 23% moeten worden teruggebracht ten opzichte van de uitstoot in 1990. Er wordt overigens ook een aanzienlijke kans toegekend aan een emissiereductie met meer dan 40%.

Berekeningen zijn vervolgens uitgevoerd met verschillende soorten scenario's:

- *Deterministisch.* Voor de deterministische runs zijn enkelvoudige CO₂-doelstellingen geformuleerd. Het model kent voor deze berekeningen 'perfect foresight', dat wil zeggen alle randvoorwaarden en kosten van opties zijn vanaf het begin bekend en het model anticipeert op tijd op wat komen gaat. Het model berekent een optimale strategie om tot een emissiedoel te komen dat nu al met zekerheid bekend is.
- *Stochastisch.* Dit betreft de hedging-berekeningen. Voor stochastische runs wordt uitgegaan van een aantal mogelijk te bereiken CO₂-doelstellingen met de hierbij behorende kansverdeling. Ook deze berekeningen kennen 'perfect foresight'. Het model berekent voor de periode met onzekerheid een strategie die zo gebalanceerd mogelijk rekening houdt

met de mogelijke uitkomsten van de onzekerheid. Vanaf het moment dat de onzekerheid verdwijnt wordt de optimale strategie berekend om de verschillende nu zekere doelen te bereiken.

- *Onderbroken deterministisch.* Het gaat hierbij wederom om eenvoudige CO₂-doelstellingen. Er is echter geen sprake meer van perfect foresight over de gehele zichtperiode. Perfect foresight wordt ergens onderbroken, waardoor vanaf een bepaald moment een strategie gevolgd moet worden die gericht is op een andere CO₂-doelstelling dan aanvankelijk werd gedacht.

Daarnaast zijn berekeningen uitgevoerd met jaarlijkse doelstellingen voor de emissies van CO₂ en met cumulatieve doelstellingen. Bij de cumulatieve doelstellingen is het aan het model overgelaten om de reductie te verdelen over de onderzochte tijdsperiode van 2000 tot en met 2040.

De verschillen tussen de resultaten van deterministische runs en stochastische runs geven een indruk van de gevolgen van het al dan niet volgen van een hedgingstrategie.

De resultaten van de modelberekeningen met het stochastische MARKAL-model geven aan dat in een hedgingstrategie het beste een aanzienlijke hoeveelheid voorzorgsmaatregelen genomen dient te worden teneinde er van verzekerd te zijn dat ook de meest vergaande cumulatieve CO₂-doelstellingen haalbaar zijn. Dit betekent ruwweg dat tot het jaar 2020 maatregelen genomen moeten worden tot een kostenniveau van 100-200 f/t CO₂.

De mate waarin al vroegtijdig maatregelen voor CO₂-reductie genomen moeten worden, hangt overigens sterk af van de vraag of CO₂-emissiedoelstellingen cumulatief dan wel jaarlijks worden beschouwd. Als *jaarlijkse* CO₂-emissiedoelstellingen worden gehanteerd in plaats van *cumulatieve* doelstellingen is vroege actie veel minder nodig.

De resultaten tonen aan dat de hedgingstrategie de grootste overeenkomsten heeft met een strategie die inzet op de meer drastische reductiedoelstellingen. Het is vanuit oogpunt van beperking van de verwachte kosten voor de energievoorziening verstandig om al vroeg de CO₂-emissies enigszins te beperken. Er wordt gekozen voor technieken die over een lange tijdsperiode de CO₂-emissies beperken zoals stadsverwarming en duurzame energiebronnen. Daarnaast is elektriciteit-opwekking op basis van aardgas erg aantrekkelijk in een hedgingstrategie. De CO₂-hedgingstrategie is evenwel voorzichtig met het inzetten op een techniek als CO₂-afvang. Deze techniek wordt pas ingezet als het zeker is wat de CO₂-reductiedoelstelling zal zijn.

De baten van het volgen van een hedgingstrategie kunnen bepaald worden door vergelijking met een strategie waarin wordt ingezet op een 'zekere' cumulatieve CO₂-doelstelling en waar op gegeven moment de doelstelling veranderd moet worden. De jaarlijkse baten na 2020 kunnen oplopen tot tientallen miljarden per jaar. Daartoe moet wel tussen 2000 en 2020 gemiddeld een miljard per jaar geïnvesteerd worden. De kosten en baten van het volgen van een hedgingstrategie over de periode 2000-2040 kunnen contant worden gemaakt naar gulden in 1995. De *verwachte netto*

contante baten van een hedgingstrategie zijn 4,5 miljard ten opzichte van een strategie die meteen inzet op een drastische cumulatieve CO₂-doelstelling en 38 miljard ten opzichte van een gematigde CO₂-reductiestrategie.

Ook blijkt uit de gevoeligheidsanalyses dat een hedgingstrategie veelal kiest voor een voorzichtige koers waarbij sterk rekening wordt gehouden met risico's, of het nu gaat om schokken in de prijs van aardgas of om drastische CO₂-doelstellingen.

Inventarisatie van hedging-opties

In deze studie zijn concrete hedging-opties geïnventariseerd. Het grootste deel van de energievoorziening is afgezocht naar flexibiliteitverhogende maatregelen. Het gaat daarbij om:

- feitelijke CO₂-reductiemaatregelen met een hoge toekomstwaarde;
- het inspelen op randvoorwaarden voor toekomstige CO₂-reductiemaatregelen (anticiperende maatregelen);
- maatregelen die helpen om beslissingen met lange termijn consequenties uit te stellen.

Het blijkt dat er in alle sectoren die beschouwd zijn (gebouwde omgeving, industrie, energie-infrastructuur en elektriciteitsopwekking) hedging-opties zijn te identificeren.

In de gebouwde omgeving hebben de hedging-opties veelal betrekking op beslissingen met een heel lange invloedstermijn (100 jaar of meer). In de gebouwde omgeving geldt voor veel beslissingen 'nu of nooit'; het ontwerp is zeer bepalend voor de energievraag van gebouwen gedurende hun hele levensduur. Dit is onder andere van toepassing op zonoriëntatie, isolatie en gebouwmassa. Veel hedging-opties hebben ook te maken met ruimtelijke ordening. De invloedstermijn van beslissingen over de ruimtelijke ordening is over het algemeen groot. De invloedstermijn van beslissingen voor de energie-infrastructuur zoals ten aanzien van warmtenetten en de dimensionering van het elektriciteitsnet is ook zeer aanzienlijk.

De potentie voor CO₂-emissiereductie van individuele hedging-opties in het jaar 2030 zijn in de industrie en bij elektriciteitsopwekking (1-10 Mton) globaal een orde groter dan in de gebouwde omgeving (0,1-1 Mton). Aan de andere kant worden industrie en elektriciteitssector gekenmerkt door relatief korte levensduren van installaties. Hedging-opties hebben daar vaak te maken met locatiekeuze en onderzoek en demonstratie van technieken.

1. INLEIDING

In hoeverre de emissies van broeikasgassen op de lange termijn moeten worden verminderd is nog niet bekend. Enerzijds houdt dit verband met de onzekerheden rondom de mate waarin klimaatverandering zal plaatsvinden en hoe groot de gevolgen van klimaatverandering zullen zijn. Verwacht wordt dat de effecten van klimaatverandering pas manifest worden nadat de concentratie van broeikasgassen heeft kunnen accumuleren. Dit kan nog tientallen jaren duren. Eventueel optredende grote gevolgen van klimaatverandering worden door wetenschappers pas verwacht in de tweede helft van de 21^e eeuw. Anderzijds vormt de uitkomst van de wereldwijde onderhandelingen op termijn een belangrijke onzekere factor voor het bepalen van de mate waarin nationaal klimaatbeleid daadwerkelijk met kracht dient te worden ingezet.

Preventieve inspanningen om de emissies van broeikasgassen te verminderen en daarmee klimaatverandering tegen te gaan, vinden momenteel op beperkte schaal plaats. De maatregelen die hiervoor in aanmerking komen worden doorgaans betiteld als 'no regret' maatregelen, maatregelen die ook om andere redenen wenselijk zijn, bijvoorbeeld omdat het gaat om rendabele maatregelen of omdat gelijktijdig lokale luchtverontreiniging wordt aangepakt. Je kunt je afvragen of het voldoende is om alleen 'no regret' beleid te voeren en pas als het nodig mocht blijken de emissies van broeikasgassen verder te verminderen. Of dient er nu al meer te gebeuren omdat de broeikasgasemissies die nu optreden onomkeerbaar zijn en het te laat zal zijn om de emissies van broeikasgassen voldoende vergaand te verminderen als klimaatverandering manifest zal worden?

In de internationale onderhandelingen over klimaatbeleid speelt deze vraagstelling een belangrijke rol. Daarnaast zijn op het internationale niveau vragen omtrent de verdeling van de lasten om emissies te verminderen van groot belang. Het gaat daarbij zowel om de vraag in welke mate ontwikkelingslanden op termijn zullen moeten bijdragen aan de beperking van de uitstoot van broeikasgassen als om de vraag hoe de geïndustrialiseerde landen de CO₂-reductie verdelen.

In de Vervolgnota Klimaatverandering [1] wordt aangegeven dat het belangrijk is voorbereid te zijn op internationaal klimaatbeleid dat vergaande reductie van broeikasgassen zal verlangen voor de lange termijn (midden van volgende eeuw).

Het lijkt inderdaad verstandig om rekening te houden met de mogelijkheid dat de emissies van CO₂ en andere broeikasgassen op termijn drastisch moeten worden verminderd. Een energievoorziening waarin de beperking van CO₂-emissies van belang is, is immers wezenlijk anders ingericht dan een energievoorziening waarin geen restricties aan de CO₂-uitstoot worden gesteld. Bij geen of beperkt beleid voor CO₂-emissies kan de energievoorziening tot halverwege de volgende eeuw gebaseerd blijven op fossiele energiebronnen en kunnen vergaande verandering bij het eindgebruik van energie achterwege blijven. Als de emissies van CO₂ daarentegen drastisch verminderd moeten worden zal de rol van CO₂-vrije energiebronnen in de

Nederlandse energievoorziening sterk toe moeten nemen en dienen ook belangrijke verschuivingen plaats te vinden in energie-infrastructuur en bij de energiegebruikende sectoren.

De onzekerheden over CO₂-reductiedoelen op de lange termijn zijn verbonden met vragen rondom de optimale timing van emissiereductie. Door de onzekerheden rondom toekomstig klimaatbeleid en de economische consequenties van mogelijk klimaatbeleid zal een te ver strekkend klimaatbeleid nu op veel weerstand stuiten. Verder is het mogelijk dat in de toekomst schone energietechnieken in ruimere mate en tegen lagere kosten dan nu beschikbaar zijn. Toch is het belangrijk om voorbereid te zijn op een toekomstig klimaatbeleid dat verder zal gaan dan een 'no regret' beleid, wanneer blijkt dat een stringente aanpak nodig is om klimaatproblemen te keren. Emissies van CO₂ accumuleren immers in de atmosfeer en vanuit milieu-optiek betekent dit dat een hoeveelheid CO₂ die nu niet is uitgestoten straks niet meer extra gereduceerd hoeft te worden. Verder kan er al aan gewerkt worden de energievoorziening meer flexibel in te richten zodat gemakkelijker 'van koers veranderd kan worden' als dit nodig mocht blijken. De flexibiliteit kan ook verhoogd worden door onderzoek en ontwikkeling (R&D) aan nieuwe energietechnieken.

Een hedging-analyse is een methode om - voor zover mogelijk - op rationele wijze met de onzekerheden rond klimaatbeleid rekening te houden. Hedging is de Engelse term voor 'indekken'. Hedging wordt al veel toegepast bij beslisproblemen waar onzekerheden een grote rol spelen zoals bij het samenstellen van aandelen- en optiepakketten in de financiële wereld. Hedging voor CO₂-beleid is een benadering waarbij de onzekerheden omtrent toekomstig klimaatbeleid kunnen worden meegewogen in beslissingen over investeringen aangaande de energievoorziening [2]. Een praktische hedgingstrategie betekent dat de mogelijkheden voor toekomstige CO₂-reductiemaatregelen open worden gehouden en dat bepaalde maatregelen worden genomen die consequenties hebben voor de hoogte van CO₂-emissies over een zeer lange termijn. De (energie)-investeringsbeslissingen die nodig zijn om die mogelijkheden voor de toekomst open te houden, heten in deze studie 'hedging-opties'.

Het Ministerie van VROM ontbreekt het nu aan voldoende praktische informatie over de hedging-benadering. VROM heeft te kennen gegeven in aantal zaken meer inzicht te wensen:

1. *Inventarisatie*. Een inventarisatie van de CO₂-reductiemaatregelen in verschillende sectoren waarbij de 'hedging-benadering' een rol speelt.
2. *Model-analyse*. Op basis van berekeningen met een model van de Nederlandse energievoorziening dat geschikt is gemaakt voor hedging-analyse is inzicht gewenst in:
 - A) *Verwachte baten van hedging*. Met behulp van modelberekeningen bepalen wat de te verwachten verdiensten zijn voor de Nederlandse energievoorziening van het volgen op korte en middellange termijn van een 'least regret' strategie. Hierbij worden 3 CO₂-emissiepaden vanaf het jaar 2000 meegenomen.
 - B) *Voorbeelden*. Het schetsen van verschillen in de energievoorziening tussen het wel of niet volgen van een hedging-strategie.

- C) *Gevoeligheidsanalyse*. Inzicht vergroten in de relevantie en robuustheid van de hedging-benadering middels gevoeligheids-analyses welke zich in elk geval dienen te richten op:
- het al of niet cumulatief beschouwen van CO₂-emissies;
 - onzekerheid in de hoogte van energieprijzen.

In dit rapport wordt door ECN op de hierboven genoemde zaken ingegaan. Allereerst wordt in hoofdstuk 2 een kort overzicht gegeven van enkele recente studies waarin hedging een rol speelt. De modelberekeningen komen aan bod in de hoofdstukken 3 en 4. Het betreft modelberekeningen met een scenario-model van de Nederlandse energievoorziening voor de tijdsperiode van 2000 tot 2040. In hoofdstuk 3 wordt uiteengezet welke scenario's voor deze studie ontwikkeld zijn. Voor de scenarioberekeningen was het van belang om een kansinschatting te hebben van het toekomstig klimaatbeleid. De kansinschatting is gebaseerd op de uitkomsten van een enquête die is ingevuld door Nederlandse deskundigen op het gebied van energie en klimaatbeleid. De enquêteresultaten worden ook in hoofdstuk 3 besproken. Hoofdstuk 4 geeft de resultaten van de modelberekeningen en van gevoeligheidsanalyses. Dit betreft de CO₂-emissiepaden van de hedgingstrategie en van berekeningen zonder hedging, de verwachte verdiensten van het volgen van een hedgingstrategie en de inzet van energietechnieken in de verschillende scenario's. In hoofdstuk 5 wordt sectorgewijs een inventarisatie gegeven van CO₂-reductiemaatregelen die de flexibiliteit van de energievoorziening verhoogt. Dit gedeelte van de studie is gebaseerd op een systematische analyse van CO₂-reductiemaatregelen en de randvoorwaarden die de inzet van deze maatregelen beïnvloeden. In hoofdstuk 6 volgt een discussie over hedging voor onzekere CO₂-doelstellingen die gebaseerd is op de model-analyse en de inventarisatie van hedging-opties. Tenslotte geeft hoofdstuk 7 de voornaamste conclusies van de studie.

Deze studie is voor het grootste deel uitgevoerd in de eerste negen maanden van 1997. Toen was de klimaatop in Kyoto nog niet gehouden en moest er met heel verschillende uitkomsten van Kyoto rekening worden gehouden. Eén van de gevoeligheidsanalyses is eind december 1997 uitgevoerd en hierin zijn de uitkomsten van Kyoto meegenomen voor de keuze van de CO₂-doelstellingen.

Deze studie richt zich op besluiten en besluitvorming in de energievoorziening. Door de liberalisatie van energiemarkten zijn ook veranderingen aan het plaatsvinden in de wijze van besluitvorming. In deze studie is niet ingegaan op de wijze waarop liberalisatie en 'hedging' met elkaar geïntegreerd kunnen worden.

2. RECENTE LITERATUUR HEDGING

2.1 Inleiding

De afgelopen jaren zijn er regelmatig studies verschenen die zich richten op verschillende ontwikkelingspaden om in de toekomst tot een energievoorziening te komen met lage emissies van kooldioxide. Daarbij is er in toenemende mate aandacht voor allerlei randvoorwaarden die invloed hebben op de maximaal bereikbare reductie op een bepaald tijdstip, de snelheid waarmee de emissies verminderd kunnen worden en onzekerheid van CO₂-doelstellingen. Enerzijds wordt in sommige studies, zoals [3], de nadruk gelegd op aspecten die in het voordeel werken van uitstel van maatregelen. Andere studies, zoals [4] belichten juist de factoren die het aantrekkelijker maken om op korte termijn maatregelen te nemen.

In dit hoofdstuk wordt in paragraaf 2.2 kort stilgestaan bij een selectie van studies waarin analyses zijn gemaakt naar de 'timing' van emissiereductie en naar mogelijkheden om de flexibiliteit van de energievoorziening te vergroten. Het betreffen zowel studies met analyse op mondiale schaal als op nationale en op lokale schaal.

2.2 Studies naar de timing van CO₂-reductie

WR&E studie

Wigley, Richels en Edmonds (WR&E) geven in een artikel in Nature [3] een pleidooi om vanaf nu slechts geleidelijk de emissietrend van CO₂ om te buigen. De argumenten die hiervoor worden aangedragen zijn:

- de positieve productiviteit van kapitaal; hoe verder je in de toekomst een bepaalde uitgave moet worden gedaan, hoe minder geld je daar nu voor opzij hoeft te leggen;
- er is tijd nodig om de energievoorziening geleidelijk aan te passen; onvoorziene aanpassingen zijn duur;
- technologische vooruitgang; technieken met lage CO₂-emissies worden steeds goedkoper waardoor emissiereductie in de toekomst goedkoper is;
- verval van CO₂ in de tijd; hoe langer CO₂ in de atmosfeer verblijft, hoe groter de fractie die via de koolstofkringloop verwijderd is. Daardoor hoeft bij het mikken op een concentratieniveau niet alle CO₂-reductie die wordt nagelaten ten opzichte van IPCC reductiepaden later gecompenseerd te worden door extra CO₂-reductie.

Op basis van modelberekeningen laten WR&E zien dat in elk geval de eerste 20 jaar de CO₂-emissietrend nog niet omgebogen hoeft te worden. Later kan dit gecompenseerd worden. Dan moeten de emissies eventueel wel extra snel verminderd worden. WR&E pleiten wel voor R&D om CO₂-vrije technieken te ontwikkelen en het nemen van 'no regret' maatregelen.

Safe landing corridors (RIVM)

In een RIVM rapport [4] wordt door Alcamo en Kreileman het concept van een 'safe landing corridor' voor het eerst toegepast op klimaatverandering. Naar analogie met het venster waar een vliegtuig door moet vliegen om veilig te kunnen landen, worden hierin grenzen gesteld aan de uitstoot van CO₂ in het jaar 2010 of 2020 teneinde op een nog langere termijn een situatie bereikbaar te laten blijven die aan duurzaamheidscriteria voldoet. Een sterke stijging van CO₂-emissies is niet wenselijk omdat daardoor duurzaamheidscriteria in het geding zijn. Enkele van de gehanteerde duurzaamheidscriteria zijn een voldoende lage concentratie van CO₂ in de atmosfeer aan het einde van de volgende eeuw, het maximale tempo van opwarming en de maximale snelheid van zeespiegelstijging. Een te snelle reductie is ook niet wenselijk geacht omdat dit onevenwichtige verschuivingen in de economie kan geven. In de 'safe landing' analyse wordt geschat dat de mondiale emissies van CO₂ over een langere tijdsperiode niet sneller dan met 1% tot 4% per jaar kunnen afnemen. Deze begrenzing volgt uit de 'inertheid' van de energievoorziening als gevolg van lange levensduren van installaties, gebouwen en energie-infrastructuur en andere remmende factoren.

De analyses met de safe landing corridors geven aan dat de autonome groei in de emissies van CO₂ voor het jaar 2010 al moet worden omgebogen, om vanuit duurzaamheidsoptiek in een veilig venster te blijven.

Timing van CO₂-reductie (Grubb)

Grubb gaat in een recent artikel [5] in op de optimale timing van de reductie van CO₂ emissies. Daarbij wordt ingegaan op een drietal aspecten dat hierop van invloed is:

- technologische ontwikkeling;
- inertheid van de energievoorziening;
- onzekerheid rondom de lange termijn doelstellingen voor CO₂-reductie.

Technologische ontwikkeling

Indien verondersteld wordt dat technologische ontwikkeling autonoom plaatsvindt, dan zal het volgens WR&E [3] in de toekomst goedkoper worden om de uitstoot van CO₂-emissies te verminderen. Grubb [5] geeft aan dat het tempo waarin technologische ontwikkeling plaatsvindt echter niet autonoom is en onder andere beïnvloed wordt door de mate waarin beleid zich richt op de reductie van CO₂-emissies. Wanneer niet alleen wordt ingezet op R&D aan energietechnieken maar ook op reductie van CO₂-uitstoot nu, dan kan de kostencurve voor toekomstige CO₂-reductie verder worden verlaagd. De meest effectieve wijze waarop technologische ontwikkeling wordt beïnvloed, is volgens [5] door een grote betrokkenheid van de private sector te realiseren. Verschillende historische voorbeelden (bijvoorbeeld windturbines in Californië) geven aan dat als er een markt tot stand komt voor een techniek (van zelf of kunstmatig), dit een sterke impuls tot de technologische ontwikkeling en kostenreductie geeft. De invloed van de private sector is naar verwachting ook groot omdat in de meeste landen de uitgaven van de private sector voor R&D veel groter zijn dan de overheidsuitgaven voor R&D. Het bijtijds versterken van de ontwikkeling van technieken met lage CO₂-emissies is ook van belang omdat de concurrerende fossiele technieken reeds ingesloten ('locked in') zijn. Door leereffecten en schaaleffecten hebben veel fossiele technieken een dominante positie

veroverd die moeilijk te doorbreken is. In dit proces zijn andere technieken in de loop van de tijd uitgesloten. Het vroegtijdig creëren van een zekere markt voor de schonere alternatieven geeft deze een grotere kans ook ingesloten te raken.

Inertheid van de energievoorziening

Een van de argumenten die door WR&E [3] wordt gebruikt om voor uitstel van CO₂-reductie te pleiten is 'dat er tijd nodig is om de energievoorziening aan te passen...'. Grubb [5] gaat hier tegenin door aan te geven dat de energievoorziening al continu uitgebreid en vervangen wordt en dat er dus steeds mogelijkheden liggen om daarbij rekening te houden met de beperking van CO₂-emissies. Als daar nu rekening mee wordt gehouden, wordt vermeden dat later de energievoorziening tegen hoge kosten moet worden aangepast omdat installaties waar nu over beslist wordt, vervroegd moeten worden afgeschreven. Grubb geeft verder aan dat het natuurlijke vervangingstempo van installaties niet de enige bron is van inertheid. Het casco van gebouwen en ruimtelijke ordening hebben ook consequenties voor toekomstige CO₂-emissies en de beslissingen aangaande gebouwen en ruimtelijke ordening hebben een 'levensduur' van 100 jaar of meer. Daarnaast vormen veel technieken een schakel in een veel groter complex van energie-infrastructuur (mijnen, transport en distributiesystemen) dat in zijn geheel niet gemakkelijk is te veranderen. Hierin spelen naast inertheden die voortvloeien uit gedane investeringen in kapitaalgoederen ook inertheden een rol die voortkomen uit belangen van bestaande marktpartijen en het soort kennis en ervaring dat nu aanwezig is bij personeel.

Onzekerheid lange termijn doelstelling CO₂-reductie

Grubb presenteert ook een analyse met een model van de mondiale energievoorziening. In dit model wordt gerekend met onzekere stabilisatie-doelstellingen voor de CO₂-concentratie in de atmosfeer. Uit de resultaten komt naar voren dat ondanks de kleine kans die is toegekend aan de meest vergaande CO₂-doelstelling, de voorkeur uitgaat naar een vroegtijdige reductie van CO₂-emissies.

Analyse voor Quebec met het stochastische MARKAL-model

Door een Canadese onderzoeksgroep is een studie [6] gedaan naar de toekomstige energievoorziening van Quebec onder onzekere ontwikkeling van de energievraag en onzekere CO₂-plafonds. Hiervoor is gebruik gemaakt van een stochastische versie van MARKAL. Op basis van de resultaten zijn de energietechnieken ingedeeld in een zestal categorieën:

1. *Robuust*: Technieken die een identieke grote rol spelen in alle stochastische en deterministische berekeningen.
2. *'High mitigation' opties*: Technieken waarvan de inzet in de hedgingberekeningen een pad volgt gelijk aan de CO₂-reductiestrategie.
3. *'Low mitigation' opties*: Technieken waarvan de inzet in de hedgingberekeningen een pad volgt gelijk aan de berekeningen zonder CO₂-reductie.
4. *Compromis-opties*: Technieken met een inzet dat een compromis vormt tussen een strategie zonder CO₂-reductie en een met CO₂-reductie.
5. *'Super mitigation' opties*: Voordat onzekerheid is opgelost is de inzet van deze technieken groter dan in zowel een strategie met als in een strategie zonder CO₂-reductie.

6. *'Sub mitigation' opties*: Voordat onzekerheid is opgelost is de inzet van deze technieken kleiner dan in zowel een strategie met als in een strategie zonder CO₂-reductie.

De CO₂-hedgingstrategie zet meer dan evenredig in op vroegtijdige emissiereductie. De resultaten van de hedging-analyse geven volgens de Canadezen een meer robuuste pakket van maatregelen voor CO₂-reductie dan een set van corresponderende deterministische scenario-berekeningen.

3. AANPAK VAN DE MODELBEREKENINGEN

3.1 Inleiding

Teneinde de gevolgen van hedging-strategieën voor de Nederlandse energievoorziening te bestuderen, is een aantal modelberekeningen uitgevoerd op basis van het MARKAL-model voor Nederland, een computermodel dat gebruikt wordt om de rol van energietechnologieën in een zich ontwikkelende energievoorziening te onderzoeken. MARKAL is een optimaliseringsmodel en richt de energievoorziening zo in dat aan de vraag van eindgebruikers wordt voldaan tegen minimale kosten gegeven randvoorwaarden zoals m.b.t. de CO₂-emissies. Sinds kort is er een nieuwe stochastische versie van het MARKAL model [7]. Hiervan is gebruik gemaakt om de hedgingberekeningen te kunnen uitvoeren.

Om hedging-strategieën te bestuderen die aansluiten bij de Nederlandse energievoorziening is voor Nederland een referentiescenario opgezet voor de periode van 2000 tot 2040. Dit referentiescenario sluit aan bij de TREND-schets voor 2020 zoals die is opgesteld ter ondersteuning en illustratie van de gedachtevorming voor de Derde Energienota [8]¹. Er zijn drie soorten modelberekeningen met het MARKAL-model gedaan:

- *Deterministisch.* Voor de deterministische runs zijn enkelvoudige CO₂-doelstellingen geformuleerd. Het model berekent een optimale strategie om tot een emissiedoel te komen dat nu al met zekerheid bekend is. Het model kent voor deze berekeningen 'perfect foresight', dat wil zeggen alle randvoorwaarden en kosten van opties zijn vanaf het begin bekend en het model anticipeert op tijd op wat komen gaat. Het gaat hier dus niet om hedging-berekeningen.
- *Stochastisch.* Dit betreft de hedging-berekeningen. Voor stochastische runs wordt uitgegaan van een aantal mogelijk te bereiken CO₂-doelstellingen met de hierbij behorende kansverdeling. Het model berekent voor de periode met onzekerheid een strategie die zo uitgebalanceerd als mogelijk rekening houdt met de uitkomsten van de onzekerheid. Ook deze berekeningen kennen 'perfect foresight'.
- *Onderbroken deterministisch.* Het gaat hierbij wederom om enkelvoudige CO₂-doelstellingen. Er is echter geen sprake meer van perfect foresight over de gehele zichtperiode. Perfect foresight wordt ergens onderbroken, waardoor vanaf een bepaald moment een strategie gevolgd moet worden die gericht is op een andere CO₂-doelstelling dan aanvankelijk werd gedacht. Dit is ook geen hedging-berekening. Deze berekening is uitsluitend uitgevoerd om de financiële baten van hedging te bepalen.

¹ Op het moment dat is gestart met modelberekeningen voor dit project waren de nieuwste Lange Termijn verkenningen van het ECN, CPB en RIVM nog niet beschikbaar.

Verschillen tussen de resultaten van deterministische runs en stochastische runs geven een indruk van de gevolgen van het al dan niet volgen van een hedgingstrategie.

De algemene structuur van het MARKAL-model wordt kort beschreven in paragraaf 3.2. Vervolgens worden in 3.3 de uitgangspunten van het referentiescenario beschreven en de hedgingopties die aan het model zijn toegevoegd. De keuze voor de te bereiken CO₂-doelstellingen in de diverse scenario's met de daarbij behorende kansverdeling worden verantwoord in 3.4. Beide zijn vastgesteld op basis van een enquête die aan een aantal deskundigen is toegezonden. Tot slot wordt in 3.5 een overzicht gegeven van de scenario's die met een stochastisch MARKAL-model zijn bestudeerd. De resultaten van de scenarioberekeningen worden in hoofdstuk 4 besproken.

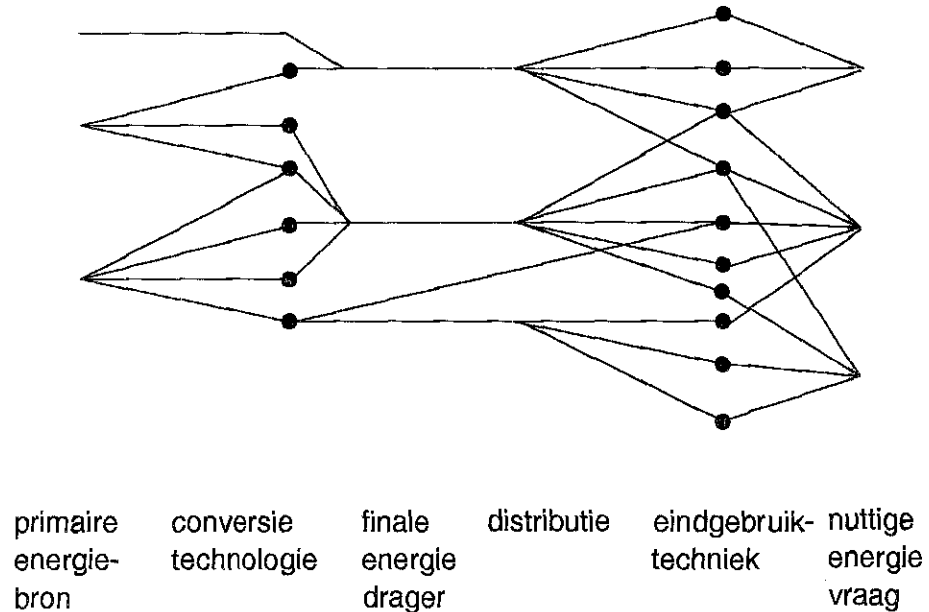
3.2 Het MARKAL-model voor Nederland

Het deterministische MARKAL-model

Het MARKAL-model voor Nederland is een model waarin de energiehuishouding van Nederland is gemodelleerd. Dat wil zeggen dat de energiestromen lopend van de import van energiedragers (bijv. kolen) en winning van energiedragers (bijv. gas) tot aan het gebruik van energie door de eindgebruikers (bijv. de industrie) in kaart is gebracht. Verschillende 'energie-omzettingsprocessen' zijn gemodelleerd met een diversiteit van technieken en brandstoffen. Een en ander is weergegeven in figuur 3.1. MARKAL bepaalt 'de route' van primaire energiebron naar eindvraag met de laagste kosten. Het MARKAL-model wordt gebruikt om de rol van energietechnologieën in een zich ontwikkelende energievoorziening te onderzoeken en is ontwikkeld en wordt onderhouden binnen het ETSAP-programma (ETSAP= Energy Technology Systems Analysis Programme). Een uitgebreide beschrijving van MARKAL is te vinden in Fishbone [9].

Het MARKAL-model is een dynamisch LP-model. De nuttige energievraag in het model is exogeen en geformuleerd in de vorm van energiediensten. Denk hierbij bijvoorbeeld aan lumen licht. Het model kan vervolgens berekenen hoe tegen minimale (verdisconteerde) kosten aan de gestelde energievraag van de eindgebruikers kan worden voldaan gegeven bepaalde randvoorwaarden zoals bijv. maximale CO₂-emissies. De optimale oplossing wordt bepaald op basis van lineaire programmering. Hierbij is er sprake van 'perfect foresight'. Dat wil zeggen dat er op ieder moment t duidelijkheid bestaat over de technologische ontwikkelingen en de energievraag etc. voor ieder moment na t.

De dynamische aard van het model komt tot uiting in het feit dat niet slechts een eindtoestand van de energievoorziening in een toekomstig jaar wordt geschetst maar tevens de inrichting van de energievoorziening in de tussenliggende jaren.



Figuur 3.1 *Schema van een gesimplificeerd netwerk van een energiesysteem*

Zoals opgemerkt rekent het model met verdisconteerde kosten. Het principe achter verdiscontering van de kosten is dat men liever X gulden in bijvoorbeeld 1995 dan in 1990 uitgeeft. Immers, door rente opbrengsten gedurende de periode 1990-1995 zijn X_{1990} gulden in 1995 meer waard dan X_{1995} gulden. De voorkeur voor het besteden van gelden later in de tijd wordt tot uitdrukking gebracht in de discontovoet. Deze bedraagt in de gepresenteerde berekeningen 5% per jaar.

De gebruiker van het model dient processen en technologieën waarin energie-omzetting plaatsvindt te modelleren. Minimaal dienen rendementen, kosten en de in- en outputs van energiedragers in kaart te worden gebracht. Daarnaast biedt het model vele mogelijkheden om andere specifieke kenmerken van technologieën te modelleren. Zo kunnen bijvoorbeeld boven- en ondergrenzen aan de geïnstalleerde capaciteit worden opgelegd, kan een beschikbaarheidsfactor worden gemodelleerd, kan deze aan de seizoenen worden gekoppeld, kan energiebesparing worden gemodelleerd, etc. Ook kunnen aspecten worden gemodelleerd die betrekking hebben op een groep van technologieën. Zo kan bijvoorbeeld een maximaal opgesteld vermogen aan een groep van technologieën, denk aan windmolens, worden opgelegd.

Het is belangrijk om de implicaties te realiseren dat MARKAL een energievoorziening construeert met minimale kosten. In de praktijk is er niet één actor die de kosten van de energievoorziening minimaliseert. Er zijn verschillende actoren die elk hun eigen gedrag hebben. Er bestaan andere modellen van de energievoorziening dan MARKAL die dit gedrag pogen te simuleren en daardoor meer geschikt zijn voor voorspellingen van toekomstig energiegebruik. MARKAL is juist uiterst geschikt voor de vraagstelling *hoe het beste een bepaalde situatie bereikt kan worden*.

Stochastische versie van het MARKAL-model

Het MARKAL-model is onlangs verschenen in een stochastische versie [7]. Dat houdt in dat aan parameters verschillende waarden kunnen worden toegekend met een kans dat die waarde optreedt. De onzekere parameter betreft bijvoorbeeld een onzekere energieprijis, onzekere investeringskosten voor een techniek of een onzekere CO₂-doelstelling. Binnen het model kan een aantal CO₂-limieten worden opgelegd met daarbij passende kansverdeling. Het model bepaalt vervolgens de strategie die met minimale kosten flexibel genoeg is om aan de verschillende doelstellingen te kunnen voldoen.

Dit stochastisch model is geschikt voor het doorrekenen van hedgingstrategieën, dat wil zeggen strategieën die expliciet rekening houden met de onzekerheid aangaande de te bereiken CO₂-doelstellingen. Gegeven een moment in de toekomst waarop onzekerheid verdwijnt omtrent de CO₂-doelstelling in de verdere toekomst en de bijbehorende kansverdeling, berekent het model een energievoorziening die hier het best mee rekening houdt tot het moment van zekerheid. Onder de hedgingstrategie wordt het CO₂-reductiepad verstaan tot het moment van zekerheid.

De berekeningen met het stochastische model onderkennen het verband tussen onzekerheid en spijt. Ook onder de aanwezigheid van grote toekomstige onzekerheden, dienen beslissingen te worden genomen aangaande de inrichting van de energievoorziening. De beslissingen die nu genomen worden zullen vanwege onzekerheid vrijwel nooit de helemaal optimale beslissingen blijken te zijn en er zal dus bijna altijd enige spijt zijn. De kunst is om een combinatie van beslissingen te kiezen die 'spijt' zo laag mogelijk houdt. Het stochastische MARKAL-model identificeert die beslissingen die de laagste verwachte spijt geven.

Het stochastisch model kan in principe ook gebruikt worden om te helpen bepalen hoe het beste rekening gehouden kan worden met andere onzekerheden zoals onzekere energieprijzen of onzekere technologische ontwikkeling.

3.3 MARKAL-referentiescenario

3.3.1 De achtergrond van het MARKAL-referentiescenario

Binnen het MARKAL-model voor Nederland is het MARKAL-referentiescenario opgezet. Dit MARKAL-referentiescenario sluit aan bij TREND-schets voor 2020 zoals opgesteld ter ondersteuning en illustratie van de gedachtevorming voor de Derde Energienota [8]. De trendschets is géén doorrekening van het daarin voorgestelde beleid maar is opgesteld ter ondersteuning van de gedachtevorming voor de Derde Energienota.

De schets is gemaakt met behulp van het NEV-instrumentarium (NEV= Nationale Energie Verkenning) bestaande uit het SAVE-model, ter bepaling van de energievraag van eindgebruikers, en het SELPE-model, ter bepaling van het energie-aanbod systeem. Voor het jaar 2020 is eerst de energie-

vraag bepaald. Vervolgens is bepaald hoe aan de energievraag kan worden voldaan. De schets is geen volledig integrale afweging tussen energievraag en energiebeleid.

De TREND-schets heeft de volgende kenmerken:

1. De schets beschrijft de ontwikkelingen van het energiegebruik in Nederland in de periode 1990-2020. Het bevat geen nieuw beleid voor deze periode, noch van de Nederlandse overheid, noch vanuit Brussel. Dat wil zeggen dat er bijvoorbeeld geen CO₂-heffing wordt ingevoerd, geen normgeving voor het energiegebruik van elektrische apparaten wordt ingevoerd, etc.
2. De economische groei bedraagt 2,3%. Dit houdt het midden tussen de scenario's European Renaissance en Global Shift uit de derde Milieu-verkenningen (resp. 1,8 en 2,8% per jaar) en is vergelijkbaar met het Conventional Wisdom scenario en het Forum scenario van de EU (resp. 2,1 en 2,3%/jaar voor Nederland.)
3. De veronderstelde energieprijzen sluiten aan bij prijzen-notitie zoals opgesteld door het Ministerie van Economische Zaken [10]. Hierin worden projecties gegeven van de energieprijzen tot 2015. De ruwe olie importprijs correspondeert met een prijs iets beneden de \$20/ vat. De eindverbruikersprijzen van benzine, aardgas en kolen zijn respectievelijk 175 ct/liter exclusief BTW, 22 ct/m³ en 3,7 gld/GJ.
4. De toename in het (primaire) energiegebruik bedraagt 0,7%/jaar. Door structureffecten en besparingseffecten is deze groei niet gelijk aan de economische groei. (Volume-effecten spelen in deze geen rol daar als 'volumegrootheid' het BNP is gekozen.)
5. De jaarlijkse CO₂-emissies in de TREND-schets bedragen 167 Mton in 1990 en 196 Mton in 2020.

Het MARKAL-referentiescenario sluit in grote lijnen aan bij de TREND-schets zoals hierboven beschreven. Dat wil zeggen dat de energieprijzen en de economische groei uit de TREND-schets als uitgangspunten dienen voor het referentiescenario, dat de energievraag van de eindgebruikers in 2020 in MARKAL min of meer gelijk is aan die zoals aangegeven in het SAVE-model en dat de modellering van de energietechnologieën in MARKAL aan zowel de vraag- als aanbodkant qua kosten en marktpotentieel in grote lijn aansluiten bij de karakterisering van technologieën in het SAVE en het SELPE model. Het is praktisch niet mogelijk om de vooronderstellingen van het MARKAL-model voor 100% in overeenstemming te brengen met het SELPE-model vanwege verschillen in modelstructuur. Het startjaar van het referentiescenario is het jaar 2000. De TREND-schets gaf geen beeld van de energievoorziening in het jaar 2000; hierdoor kon voor de resultaten in het jaar 2000 geen calibratie van de uitkomsten plaatsvinden.

Het NEV-instrumentarium is meer geschikt om een voorspelling te geven van de ontwikkelingen in de energievoorziening bij een gestelde set van aannamen. In het NEV-instrumentarium wordt namelijk zo goed mogelijk het gedrag van actoren in de energievoorziening gesimuleerd. Doordat MARKAL een energievoorziening optimaliseert en niet simuleert, is MARKAL minder geschikt voor voorspellingen; aan de andere kant leent het zicht weer beter om een optimale strategie te helpen bepalen om bij gestelde randvoorwaarden tot een zekere gewenste situatie te komen. Dit basisverschil tussen de modelconcepten van simulatie van gedrag versus

optimalisatie leidt ook tot verschillen in modeluitkomsten. Hoewel het referentiescenario en de TREND-schets qua uitgangspunten dus sterk overeen komen, zijn de resultaten niet exact hetzelfde. In de MARKAL-berekeningen worden binnen de gestelde randvoorwaarden alle kosteneffectieve besparingen geïmplementeerd. In het NEV-instrumentarium is dit niet het geval.

Andere verschillen tussen de TREND-schets en het MARKAL-referentiescenario zijn de tijdshorizon en de resultaten voor de tussenperiodes. Het MARKAL-model beschrijft in stappen van 5 jaar hoe de gewenste situatie in 2020 wordt bereikt. Daarnaast beschrijft het model in tegenstelling tot de TREND-schets ook ontwikkelingen na 2020; het referentiescenario bestrijkt de in MARKAL gedefinieerde periode van 2000 tot 2040.

De beschouwde technieken zijn in overeenstemming met de technieken die voor de SYRENE-studie [11] gemodelleerd zijn. De inschattingen voor het potentieel van enkele technieken zijn van grote invloed op de resultaten met CO₂-reductiedoelstellingen. Het betreft hier bijvoorbeeld opties als CO₂-afvang bij elektriciteitscentrales, kernenergie en import van biomassa. Kernenergie en import van biomassa zijn niet als opties in de berekeningen toegelaten. Er zijn geen restricties gesteld aan de import van aardgas. Er is verondersteld dat het potentieel voor windenergie in de tijd toeneemt tot 11 GW in 2040, waarvan 8 GW als offshore windvermogen. In 2040 mag bij 5 GW aan KV-STEG-vermogen CO₂ worden afgevangen. Het maximale potentieel voor PV-systemen bedraagt in 2040 ongeveer 20 GW. Import van elektriciteit die is opgewekt met duurzame energiebronnen, bovenop het bestaande contract met Noorwegen over import van waterkracht, is niet toegelaten.

3.3.2 Extra hedgingopties in MARKAL

Aan het MARKAL-referentiescenario zijn een aantal hedging-opties uit de elektriciteitssector toegevoegd. Op basis van deze hedgingopties is onderzocht of energiestrategieën anders uitpakken indien wel rekening gehouden wordt met onzekerheid aangaande de CO₂-reductiedoelstelling dan wanneer hier geen rekening mee gehouden wordt. In hoofdstuk 6 worden naast de opties in de elektriciteitssector vele andere hedgingopties besproken. Vele hiervan kunnen niet of slechts moeilijk in het MARKAL-referentiescenario worden ingebouwd. Onderzoek van energiestrategieën in relatie tot de onzekerheid in de CO₂-reductiedoelstelling is echter ook gediend met modelanalyses op basis van een beperkt aantal hedgingopties. Het meenemen van meerdere hedgingopties zou de flexibiliteit van het model wel aanzienlijk verhogen.

Vanuit de elektriciteitssector zijn vanuit hedgingoogpunt onder andere levensduurverlenging van elektriciteitscentrales en het overschakelen van kolen op gas van bestaande elektriciteitscentrales interessant. Beide aanpassingen maken de energievoorziening flexibeler. Levensduurverlenging (retrofitting) schept de mogelijkheid het moment van beslissing aangaande grote energie-investeringen iets uit te stellen of kan bewerkstelligen dat een korte periode overbrugd kan worden waarna in een op dat moment beschikbare technologie kan worden geïnvesteerd. Het creëren van de moge-

lijkheid voor het overschakelen van kolen op gas voor reeds bestaande elektriciteitscentrales schept de mogelijkheid op korte termijn iets aan CO₂-emissiereductie te doen bij technieken die al gebouwd zijn en een relatief lange levensduur hebben.

Levensduurverlenging en het overschakelen van kolen op gas zijn opties die aan het MARKAL-model voor Nederland zijn toegevoegd. De uitgangspunten die voor deze opties gehanteerd zijn, worden in de kaders 3.1 en 3.2 toegelicht [12] [13]. Het is interessant de inzet en bijdragen van deze opties aan (hoge) CO₂-reductiescenario's en hedgingscenario's te bestuderen.

Levensduurverlenging van elektriciteitscentrales

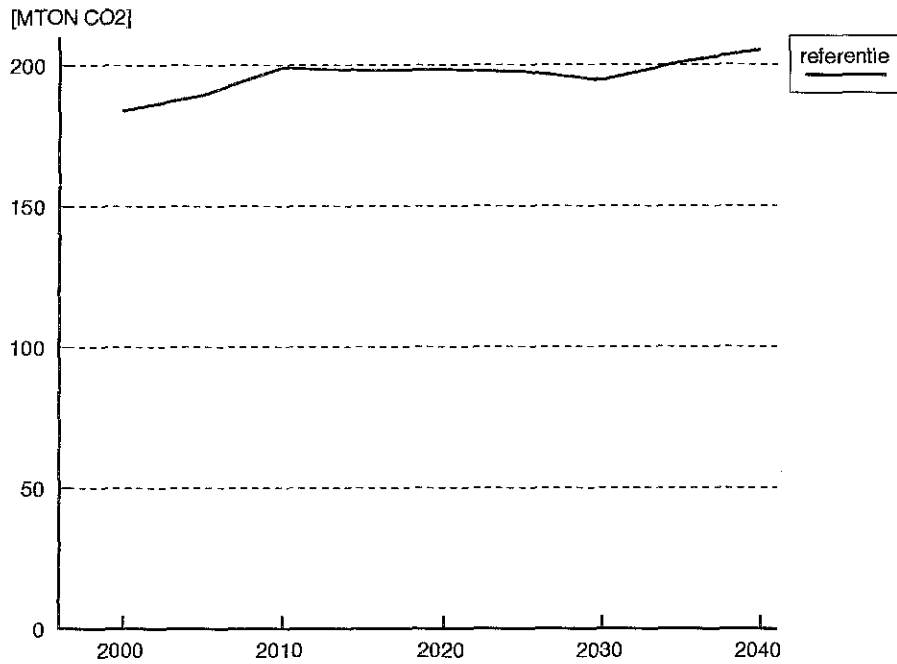
Elektriciteitscentrales, zoals kolencentrales en gascentrales, hebben in MARKAL een veronderstelde levensduur van 25 jaar. Bij verlenging van de levensduur wordt verondersteld dat 10% van de initiële investeringskosten van de centrales noodzakelijk zijn om de levensduur met 5 jaar, tot 30 jaar, te verlengen.

Het overschakelen van kolen op gas

Het overschakelen van kolen op gas in bestaande elektriciteitscentrales levert een rendementswinst van 1 procent op. Daarnaast worden de bedrijfs-en onderhoudskosten van de centrale lager. Met betrekking tot de onderhoudskosten is verondersteld dat deze dalen naar het niveau van een gascentrale.

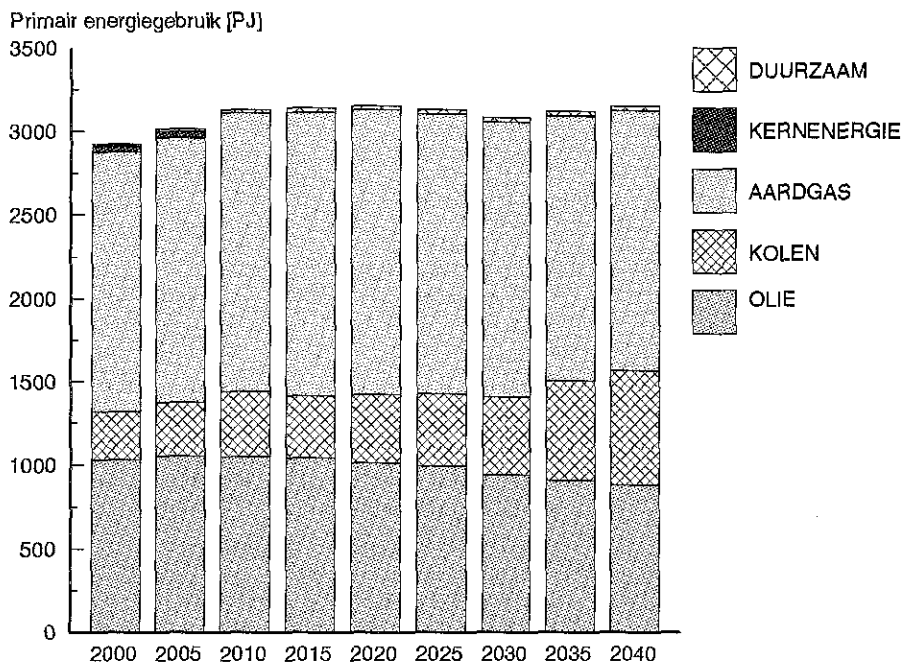
3.3.3 Resultaten van het referentiescenario

De figuren 3.2 t/m 3.4 tonen enkele resultaten van MARKAL-berekeningen aangaande het referentiescenario. Figuur 3.2 toont de jaarlijkse CO₂-emissies zoals deze zich ontwikkelen gedurende de periode 2000-2040. In het jaar 2000 bedragen de emissies 183 Mton. Dit is 6% boven het niveau van 1990 maar het is iets lager dan recente schattingen voor de nationale energieverkenningen [14]. De voorspelling van het CO₂-emissieniveau in 2000 is overigens niet zo relevant voor deze studie. Tot 2010 stijgen de emissies in het MARKAL-referentiescenario; na 2010 blijven de emissies constant.



Figuur 3.2 CO₂-emissies in het referentiescenario 2000-2040

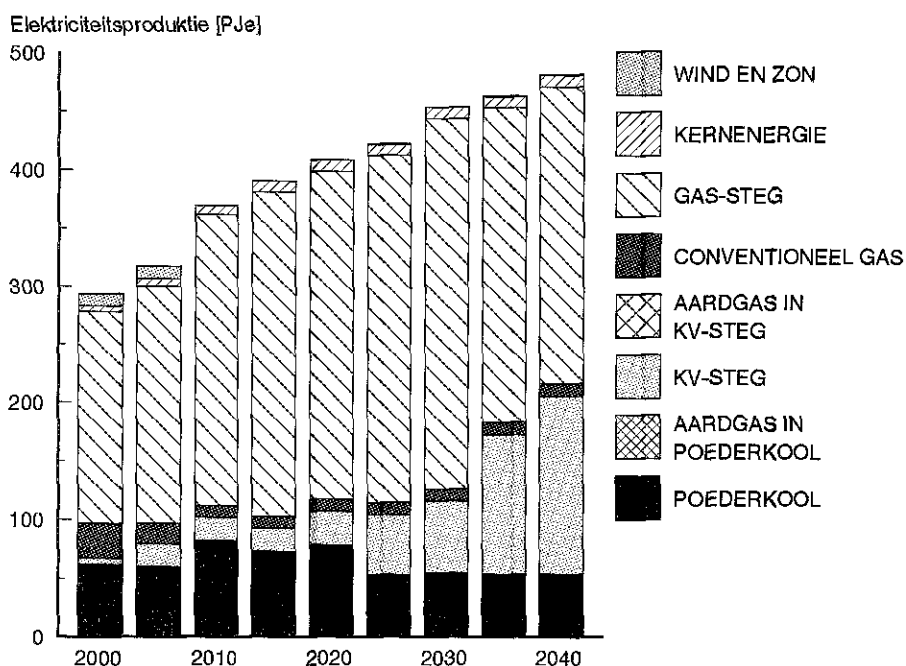
Figuur 3.3 toont het primair energieverbruik gedurende deze periode. Het totale primair energiegebruik blijft na 2010 in grote lijnen constant. De nuttig energievraag neemt in de periode 2000-2040 overigens wel gestaag toe. Rendements-verbeteringen in het energiesysteem liggen ten grondslag aan dit verschil.



Figuur 3.3 Primair energiegebruik in referentiescenario 2000-2040

Aardgas blijft de belangrijkste brandstof in het referentiescenario. Het aandeel kolen in de primaire energiebalans neemt in het MARKAL-referentiescenario geleidelijk toe, terwijl het gebruik van olieproducten na 2015 iets afneemt. Het aandeel 'duurzaam' blijft gedurende de gehele periode klein. Indien geen limiet aan CO₂-emissies wordt gesteld, is in een qua kosten geoptimaliseerde energievoorziening duurzame energie weinig aantrekkelijk. Alleen windturbines op 'onshore' locaties hebben een bescheiden bijdrage.

De productie van elektriciteit neemt gestaag toe. Tot 2030 vindt de groei van elektriciteitsproductie vooral plaats bij gasgestookte centrales (STEG's). Na 2030 neemt de rol van aardgas gestookte centrales af en worden kolengestookte centrales weer belangrijker. Het gaat hierbij om kolenvergassings-STEG-centrales (KV-STEG's). Het is in het referentiescenario niet aantrekkelijk om aardgas in te zetten in kolencentrales. Er is verondersteld dat geen nieuwe kerncentrales kunnen worden gebouwd. Vanaf 2010 levert kernenergie daarom geen bijdrage meer aan de opwekking van elektriciteit. De rol van duurzame bronnen (wind en zon) in elektriciteitsopwekking neemt in de tijd iets toe maar blijft zeer bescheiden.



Figuur 3.4 Elektriciteitsproductie in referentiescenario 2000-2040

3.4 Enquête ter voorbereiding van scenario-keuze

3.4.1 Inleiding

Om hedging-berekeningen uit te voeren dienen de volgende parameters in het MARKAL-referentiescenario te worden ingesteld:

1. Het moment waarop zekerheid ontstaat m.b.t. de CO₂-reductiedoelstellingen op de lange termijn;

2. CO₂-reductiedoelstellingen;
3. Een kansverdeling voor de CO₂-doelstellingen.

In het stochastische MARKAL-model zijn de waarden van deze parameters eenvoudig in te stellen. Daarentegen is het niet eenvoudig de waarden een waarheidsgetrouw karakter te geven. De kans op in de toekomst te bereiken CO₂-reducties is immers niet gemakkelijk in te schatten. Onafhankelijk van de waarden van de parameters verschaft het uitvoeren van diverse berekeningen met verschillende waarden voor de parameters echter inzicht in de gevolgen van dergelijke wijzigingen en het verschil tussen het al dan niet volgen van een hedgingstrategie.

Hier is gepoogd de instelling van de parameters te laten aansluiten bij kennis en verwachtingen aanwezig bij Nederlandse deskundigen die enig inzicht hebben in de lopende klimaatonderhandelingen of op andere gronden over inzicht in deze materie beschikken. Er is daartoe een enquête uitgezet onder een beperkte groep mensen. De inhoud van de vragen had betrekking op het moment waarop zekerheid ontstaat over de uiteindelijke te bereiken CO₂-reductiedoelen, de hoogte van die doelen en de kans op ieder van deze doelen. Daarnaast werd in de enquête gevraagd de potentiële bijdragen in te schatten van een beperkt aantal technologieën waarvan de toekomstperspectieven nog onduidelijk zijn.

De geënquêteerden zijn medewerkers van o.a. ministeries, onderzoeksinstituten en universiteiten en vormen derhalve geen representatieve steekproef van de Nederlandse bevolking. Het aantal enquêteresultaten dat wij hebben verwerkt is bovendien niet groot genoeg om tot significante resultaten te kunnen leiden. Een deel van de resultaten van de enquêtes kan echter als richtinggevend worden beschouwd voor de uitkomst van de toekomstige klimaatonderhandelingen en kan als input dienen voor ons model.

3.4.2 Uitwerking van de enquête

De enquêteresultaten worden hier per gestelde vraag besproken. In totaal zijn 35 enquêtes verspreid. Van 21 respondenten zijn de ingevulde enquêtes ontvangen en verwerkt.

Vraag 1

Wanneer denkt u dat de lange termijn reductiedoelstelling (voor het jaar 2040) voor de uitstoot voor CO₂ voor Nederland duidelijk zal worden?

De hierop mogelijk te geven antwoorden waren 2000, 2010, 2020, 2030 en 2040.

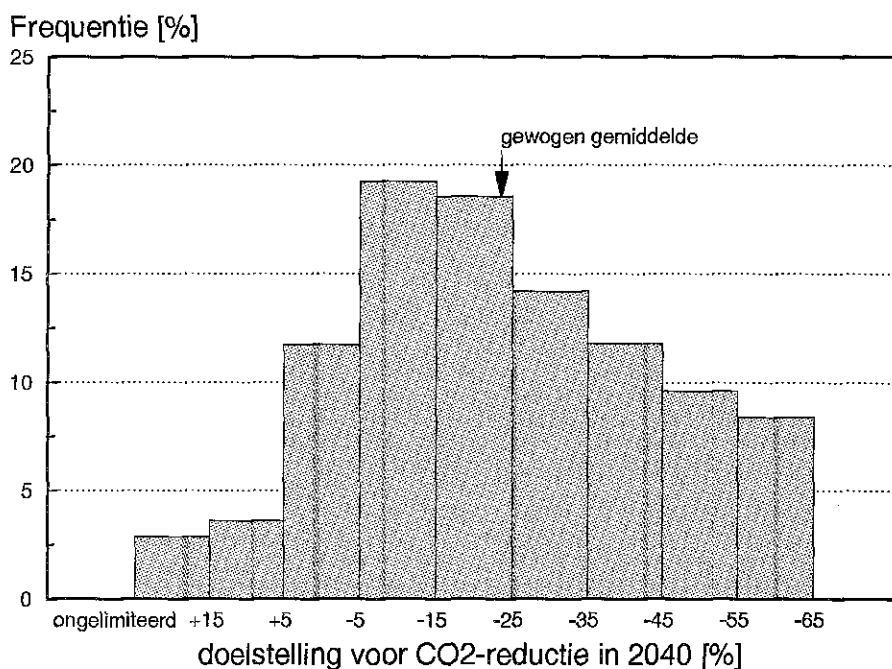
Veel respondenten antwoordden het jaar 2020 (10). Daarnaast gaven diverse respondenten het jaar 2010 (7) of 2030 (3) aan. 1 respondent gaf het jaar 2040 aan. Het gemiddeld jaar van zekerheid zoals dit berekend kon worden op basis van de diverse antwoorden is het jaar 2019.

Vraag 2

Kunt u aangeven welke kansen de hier volgende doelstellingen voor de Nederlandse uitstoot voor het jaar 2040 volgens u hebben?

De categorieën waaraan de kansen moesten worden toegekend waren: geen beperking, tussen de +15 en +5%, tussen de -5% en +5%, tussen de -5% en -15%, tussen de -15% en -25%, etc., oplopend tot, tussen de -55% en -65%. Deze reductiepercentages gelden t.o.v. het jaar 1990.

De antwoorden op deze vraag verschilden enigszins. De kansverdelingen per respondent leken veelal op normale verdelingen of scheve normale verdelingen. (Een dergelijke verdeling werd bij 13 van 21 respondenten gevonden.) Daarnaast troffen we enkele verdelingen aan waarin een grote kans werd toebedeeld aan één of beide van de uiterste categorieën (geen beperking of hoge CO₂-reductiepercentages) en zeer lage kansen werden toebedeeld aan de tussenliggende categorieën. (Dit betrof een zestal respondenten.) Figuur 3.5 toont de uit de enquête tot stand gekomen kansverdeling voor de CO₂-reductie-categorieën. Het gewogen gemiddelde is 23,5%.



Figuur 3.5 Op enquêteresultaten gebaseerde kansverdeling van doelstellingen voor de CO₂-emissie van Nederland in het jaar 2040 ten opzichte van de CO₂-uitstoot in het jaar 1990

Vraag 3

Hoe groot schat u de kans dat toekomstige doelstellingen geformuleerd zullen blijven als doelstellingen voor de jaarlijkse uitstoot?

Hoe groot schat u de kans dat toekomstige doelstellingen geformuleerd zijn als cumulatieve budgetten?

De som van bovengenoemde kansen moest 100% zijn. De kans op formulering in jaarlijkse doelstellingen was gemiddeld 68%, die op cumulatieve doelstellingen was 32%.

Vraag 4

Hoe groot schat u de kans in dat landen die vroeg inspanningen hebben gedaan voor de vermindering van de CO₂-uitstoot hiervoor enigszins ontzien worden bij reductieafspraken op lange termijn?

De gemiddelde kans berekend uit de ingeschatte kansen door de verschillende respondenten was 42%.

Vraag 5

Hoe groot kan de realiseerbare bijdrage aan de Nederlandse energievoorziening in het jaar 2040 maximaal zijn van technieken zoals zonnecellen, import van biomassa, CO₂-afvang bij elektriciteitscentrales, CO₂-afvang bij brandstofproductie en inherent veilige kernreactoren?

Gevraagd werd de potentiële bijdrage van energietechnologieën als 'zonnecellen' en CO₂-reductietechnologieën als 'CO₂-afvang bij elektriciteitscentrales' in het jaar 2040 in te schatten. De wijze van vraagstelling bleek tot enige onduidelijkheid aanleiding te geven. De resultaten van deze vraag zijn derhalve niet gebruikt voor de modelanalyse. Toch zijn uit de inschattingen van de experts wel degelijk een aantal interessante trends te halen. Meest in het oog vallend zijn de volgende conclusies:

- De bijdrage van geïmporteerde biomassa aan de energievoorziening wordt door de experts relatief hoog ingeschat.
- De bijdrage van PV-systemen aan ons energiesysteem wordt relatief laag ingeschat.
- De kansen voor CO₂-afvang bij de productie van elektriciteit worden duidelijk hoger ingeschat dan die bij de productie van brandstoffen. De verwachte inzet van CO₂-afvang bij elektriciteitscentrales is daarnaast relatief hoog.
- De grootte van de bijdrage van kernenergie aan de energievoorziening wordt door de diverse experts overwegend laag ingeschat.

3.4.3 Verwerking enquêteresultaten tot modelparameters

Op basis van de enquêteresultaten en de mogelijkheden en beperkingen van het stochastisch MARKAL-model van Nederland zijn de CO₂-doelstellingen vastgesteld. Hiermee zijn scenarioberekeningen uitgevoerd en is de waarde van een aantal parameters voor het stochastisch MARKAL-model van Nederland bepaald. Hieronder wordt uiteengezet welke keuzes zijn gemaakt en waarom.

Het moment van zekerheid m.b.t. de CO₂-doelstellingen op de lange termijn.

Het jaar 2019 is niet in het model te brengen aangezien het model met stappen van 5 jaar rekt. Op grond van de enquêteresultaten is het moment waarop zekerheid ontstaat omtrent de te bereiken doelstellingen daarom vastgesteld op het jaar 2020.

De te bereiken CO₂-doelstellingen voor het jaar 2040 en de bijbehorende kansverdeling.

Op basis van de enquêteresultaten en enkele eigenschappen van het stochastisch MARKAL-model zijn een aantal CO₂-doelstellingen met bijbehorende kansverdeling vastgesteld voor de modelberekeningen. Deze CO₂-doelstellingen zijn gedefinieerd t.o.v. het jaar 1990. Op basis van de resultaten kunnen de verschillen tussen het al dan niet volgen van een hedgingstrategie bestudeerd worden.

Een aantal overwegingen die ten grondslag liggen aan het vaststellen van de doelstellingen wordt hier nader toegelicht.

1. In 2020 ontstaat zekerheid omtrent de te bereiken CO₂-doelstelling voor 2040. De energievoorziening zal zich tot die tijd dusdanig ontwikkelen dat alle mogelijke geachte doelen voor 2040 nog bereikt kunnen worden. Voor 2040 wordt met drie mogelijke CO₂-doelstellingen rekening gehouden; 1 doelstelling die een sterke CO₂-afname bewerkstelligt, 1 doelstelling die een lichte afname bewerkstelligt en 1 doelstelling die een lichte toename van de CO₂-emissies toelaat. Hiermee wordt een overzichtelijke range aan mogelijk te bereiken CO₂-reducties omvat, die voor het computermodel hanteerbaar blijft en die in de breedte alle interessante cases dekt.
2. Het is interessant te bestuderen wat het effect is van het al dan niet meenemen van zeer vergaande CO₂-reducties met een relatief kleine kans bij het volgen van hedgingsstrategieën. Echter, om de realiteitswaarde van de scenario's niet uit het oog te verliezen, wordt -tot op zekere hoogte - een limiet gesteld aan de marginale CO₂-reductiekosten. Het model kent namelijk geen terugkoppeling van hogere prijzen voor energie naar het niveau van energiegebruikende activiteiten. In de realiteit zal dit zeker wel een rol spelen. Er is verondersteld dat in het jaar 2000 maximaal 5 Mton verminderd kan worden door gedragsmatige besparingen. De mogelijkheden om via gedragsveranderingen en verschuivingen in de economische structuur de emissies van CO₂ te verminderen, nemen in de tijd toe. Verondersteld is hier dat in het jaar 2040 25 Mton CO₂ verminderd kan worden via de gedrags- en structuuraanpassingen. De kosten van deze 'opties' zijn gesteld op f1000,-/ton CO₂. Het toevoegen van deze optie is met name van belang om te voorkomen dat de resultaten van de hedgingberekeningen sterk bepaald worden doordat één mogelijk CO₂-plafond, dat ook in een deterministisch scenario maar net gehaald kan worden, alle resultaten bepaalt.
3. De CO₂-doelstellingen kunnen geformuleerd worden als jaarlijkse doelstellingen en als cumulatieve doelstellingen. Bij jaarlijkse reductiepaden worden de reductieniveaus in de jaren vastgelegd. Bij cumulatieve doelstellingen kiest het model voor een optimale timing van de emissiereductie. De respondenten schatten de kans op de jaarlijkse doelstellingen groter in, maar de ingeschatte kans op het formuleren in cumulatieve doelstellingen is toch nog aanzienlijk (32%). Derhalve zullen beide varianten in de scenario-berekeningen worden meegenomen. Ook wordt de kans redelijk hoog ingeschat (42%) dat men enigszins wordt ontzien bij het maken van reductie-afspraken op de lange termijn indien reeds eerder inspanningen zijn gedaan. Primair wordt in deze studie aandacht besteed aan scenario's waarbij de CO₂-doelstellingen cumulatieve budgetten zijn voor de gehele periode 2000-2040 met een implicie-

te compensatieregeling voor eerder gedane inspanningen. Hier is voor gekozen omdat dit een betere aansluiting geeft bij de klimaatproblematiek. Klimaatverandering wordt veroorzaakt door concentratieverhoging en dus door de cumulatieve emissies. Daarnaast wordt één analyse gedaan met scenario's waarin de CO₂-doelstellingen jaarlijkse CO₂-budgetten zijn (paragraaf 4.4).

4. Bij het formuleren van de CO₂-doelstelling in cumulatieve termen voor de periode 2000 tot 2040 moeten de emissies die in verschillende jaren plaatsvinden bij elkaar opgeteld worden. Cumulatieve emissies zijn relevant vanuit het oogpunt dat ze bijdragen aan een toename van de CO₂-concentratie in de atmosfeer. Dit houdt echter in dat als emissies van verschillende jaren bij elkaar worden opgeteld er ook rekening moet worden gehouden met verval van CO₂ in de atmosfeer. Een deel (ongeveer 25%, afhankelijk van mondiale emissiescenario's) van de uitstoot in 2000 is in 2040 via de koolstofkringloop weer uit de atmosfeer verdwenen. Een hoeveelheid CO₂ uitgestoten in 2040 levert derhalve een grotere bijdrage aan de CO₂-concentratie in 2040 dan dezelfde hoeveelheid CO₂ uitgestoten in 2000. In de berekeningen met cumulatieve CO₂-plafonds wordt voor het verdwijnen van CO₂ in de atmosfeer gecorrigeerd. Er is verondersteld dat de gemiddelde verblijftijd van CO₂ 150 jaar is [15].
5. Rekening houdend met de uitkomsten van de enquête en de onder punten 2 en 3 genoemde argumenten, zijn de te bereiken CO₂-doelstellingen vastgesteld. De kansverdeling voor de CO₂-doelstellingen uit de enquête wordt toegerekend aan het volgende drietal te bereiken CO₂-doelstellingen: +5%, -15% en -45% ten opzichte van de emissies in 1990. De kansverdeling behorende bij de CO₂-reductiepercentages is in tabel 3.1 gegeven. Bij een cumulatieve reductie wordt met 15% reductie een cumulatief budget bedoeld dat overeenkomt met 15% reductie in 2040 volgens een lineair reductiepad vanaf 2000. De *gemiddelde* reductie, ongecorrigeerd voor de afbraak van CO₂ in de periode 2000-2040, bedraagt dus de helft van 15%, dat wil zeggen 7,5%.

Tabel 3.1 *De CO₂-reductiedoelstellingen voor 2040 met de bijbehorende kansverdeling*

CO ₂ -doelstelling	Kans
+5%	0.16
-15%	0.39
-45%	0.45

Aansluitend bij punt 4 en 5 wordt aan de hand van een rekenvoorbeeld getoond hoe de gecorrigeerde cumulatieve emissie-doelstellingen voor de afbraak van CO₂ zijn berekend. Zie hiertoe tabel 3.2.

- Rij 1 in tabel 3.2 toont de jaarlijkse emissiedoelstellingen voor de periode 2000-2040 volgens een lineair pad gegeven dat de CO₂-emissies in 2040 met 15% moeten zijn teruggebracht.
- Rij 2 toont de correctiefactoren voor de jaren tussen 2000 en 2040. Voor 2000 is deze 0.73. Immers, van de tonnen uitgestoten in 2000 is 26.7% (40/150) in het jaar 2040 verdwenen (uitgaande van de gemiddelde gestelde CO₂-verblijftijd van 150 jaar).

- Rij 3 toont vervolgens de gecorrigeerde CO₂-limieten. Zij zijn het product van rij 1 en rij 2. Feitelijk betekent dit dat 1 ton CO₂ uitgestoten in het jaar 2000 net zoveel schade aanricht als 0.73 ton CO₂ in het jaar 2040.
- De cumulatieve CO₂-limiet voor de periode 2000-2040 is nu de som van de gecorrigeerd jaarlijkse CO₂-emissies.

Aansluitend bij de gecorrigeerde CO₂-limiet worden CO₂-emissies die bijvoorbeeld ontstaan in het jaar 2000 vanzelfsprekend ook gecorrigeerd met een factor 0.73.

Tabel 3.2 *De cumulatieve CO₂-reductie voor de -15% cumulatieve CO₂-reductieberekeningen op basis van de gecorrigeerde jaarlijkse CO₂-doelstellingen (in miljoenen tonnen)*

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
CO ₂ 2040	183	181	177	174	171	168	165	162	158
CF	0.73	0.77	0.8	0.83	0.86	0.9	0.93	0.97	1.0
CO _{2c} 2040	133	139	142	144	147	151	153	157	158
CO ₂ -cumulatief = (CO _{2c} -2000 + + CO _{2c} -2040) × 5 = 6620 miljoen ton									

Toelichting: CO₂ = CO₂-doelstelling 2040; CF = correctiefactor;
CO_{2c} = gecorrigeerde CO₂-doelstelling 2040.

3.5 Scenariokeuze

Met MARKAL is een aantal scenario's doorgerekend. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen scenario's met verschillende CO₂-doelstellingen. De te bereiken CO₂-reducties die mede bepaald zijn op basis van de enquête-resultaten zijn +5%, -15% en -45% t.o.v. het basisjaar 1990.

Daarnaast onderscheiden de scenario's zich door het deterministische of stochastische karakter van het scenario. De scenario's zijn met betrekking tot deze eigenschap in drie groepen onder te verdelen:

1. *Deterministische scenario's met 'Perfect Foresight'*. In dergelijke scenario's ligt de te bereiken CO₂-doelstelling voor het jaar 2040 vast maar worden er geen grenzen opgelegd aan de CO₂-emissies in de afzonderlijke tussenliggende jaren.
2. *Stochastische scenario's met 'Perfect Foresight'*. In deze scenario's is er sprake van een drietal CO₂-doelstellingen voor het jaar 2040 met een daarbij behorende kansverdeling. Vanaf het jaar 2020 is bekend welke CO₂-doelstelling in het jaar 2040 bekend bereikt moet worden.
3. *Deterministische scenario's met 'Imperfect Foresight'*.
 - Hierin ontwikkelt de energievoorziening zich tot het jaar 2020 dusdanig dat in 2040 doelstelling A tegen minimale verdisconteerde kosten bereikt wordt, maar
 - Hierin wordt vanaf het jaar 2020 de doelstelling voor 2040 gestreefd naar doelstelling B.

Hierbij kunnen A en B de waarden +5%, -15% en -45% aannemen. Deze laatste scenario's zijn uitsluitend berekend om de financiële baten van hedging te kunnen berekenen.

De scenario's en hun naamgeving worden weergegeven in de tabellen 3.3 en 3.4. Tabel 3.3 bevat de deterministische en stochastische scenario's met 'Perfect Foresight'. Tabel 3.4 bevat de scenario's met 'Imperfect Foresight'.

De scenario-namen van de imperfect foresight scenario's zijn als volgt van opbouw: met 'det-45%_IF+5' wordt een scenario bedoeld waarin in 2040 de CO₂-reductie 45% is terwijl tot 2020 het CO₂-reductiepad wordt gevolgd dat leidt tot een 5% CO₂-toename in 2040, of in andere woorden, terwijl tot 2020 ingezet wordt op een verkeerd CO₂-reductiepad. Dit inzetten van een verkeerd reductiepad is een gevolg is van 'Imperfect foresight'. Deze imperfect foresight dienen alleen voor de berekening van de baten van hedging.

Tabel 3.3 *Perfect-Foresight scenario's*

Scenario	CO ₂ -doelstelling te bereiken in 2040, t.o.v. CO ₂ -doelstelling in 1990		
	+5%	-15%	-45%
<i>Deterministische scenario's met 'Perfect Foresight'</i>			
Referentie		geen	
det +5%	X		
det -15%		X	
det -45%			X
<i>Stochastisch scenario met 'Perfect Foresight'</i>			
hedging	X	X	X

Tabel 3.4 *Imperfect-Foresight scenario's*

Scenario*1	CO ₂ -doelstelling te bereiken in 2040, t.o.v. CO ₂ doel 1990			Energievoorziening tot 2020 volgens CO ₂ -reductiepad		
	+5%	-15%	-45%	+5%	-15%	-45%
<i>Deterministische scenario's met 'Imperfect Foresight'</i>						
det+5%_IF-15%	X				X	
det+5%_IF-45%	X					X
det-15%_IF+5%		X		X		
det-15%_IF-45%		X				X
det-45%_IF+5%			X	X		
det-45%_IF-45%			X		X	

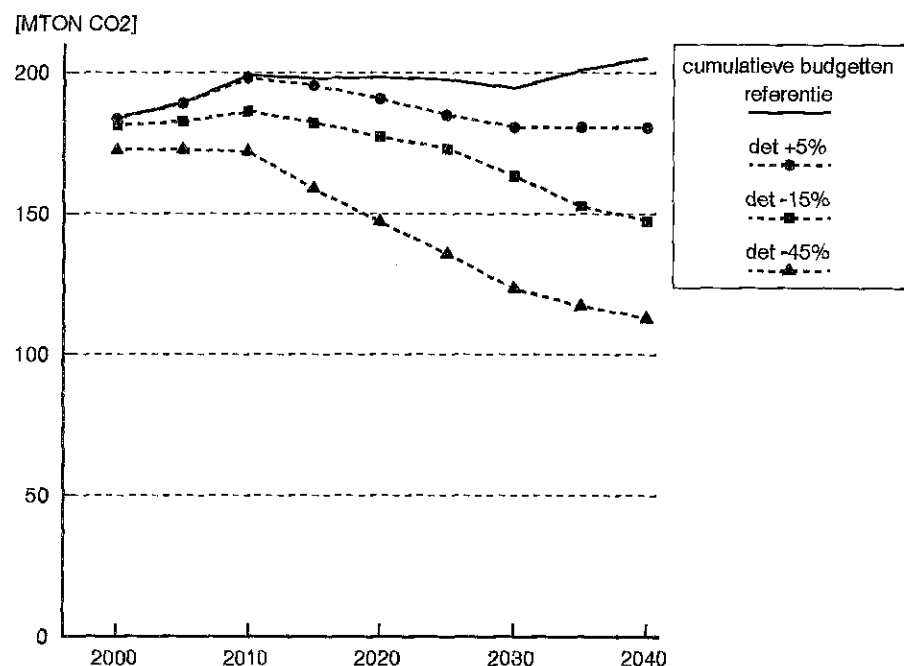
4. RESULTATEN MODELBEREKENINGEN

In paragraaf 4.1, 4.2 en 4.3 worden de resultaten besproken van de modelberekeningen met cumulatieve CO₂-doelstellingen. De resultaten betreffen respectievelijk CO₂-emissies en primair energiegebruik, kosten en de inzet van technieken. Paragraaf 4.4 gaat in op de resultaten met jaarlijkse CO₂-doelstellingen. In 4.5 wordt een aantal gevoeligheidsanalyses gepresenteerd.

4.1 Ontwikkeling van de CO₂-emissie en primair energiegebruik

Ontwikkeling CO₂-emissies zonder hedging

In de berekeningen zonder hedging geven de modeluitkomsten het optimale pad in de tijd om een enkelvoudige en *zekere* cumulatieve reductiedoelstelling van de CO₂-uitstoot te realiseren. De onderbroken lijnen in figuur 4.1 geven de CO₂-emissiereductiepaden. De bovenste onderbroken lijn is het CO₂-pad gericht op een gelimiteerde groei van de CO₂-uitstoot, met +5% ten opzichte van 1990. De onderste twee lijnen richten zich op cumulatieve reductiedoelstellingen van -15% en -45%. Ter illustratie is ook de ontwikkeling van de (ongelimiteerde) CO₂-uitstoot in de referentierekeningen weergegeven (figuur 3.2). Het referentiescenario resulteert in een emissietoename die overeenkomt met 13% cumulatieve toename ten opzichte van de emissies in 1990.



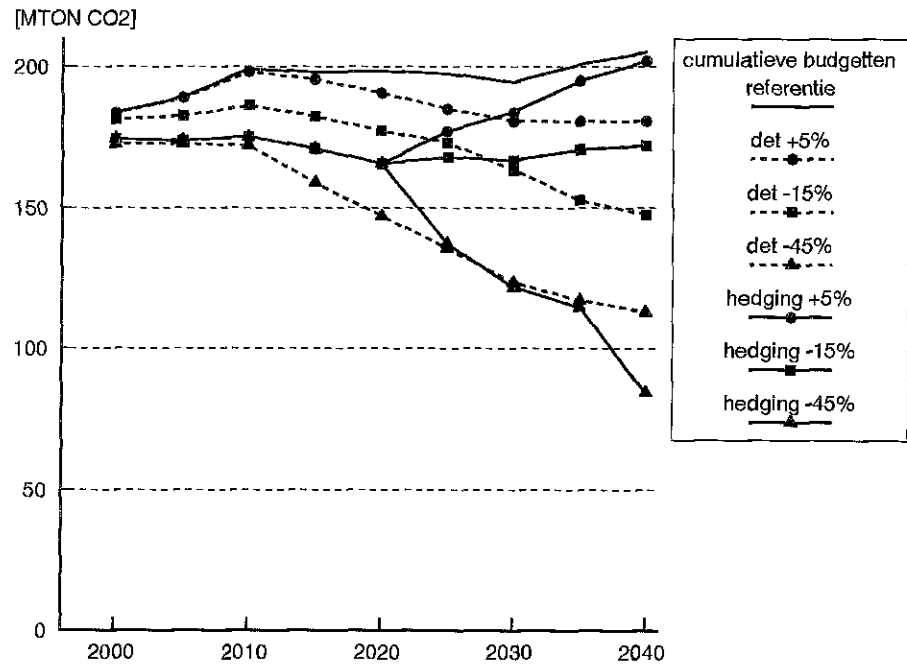
Figuur 4.1 *Ontwikkeling van CO₂-emissies in deterministische scenario's met cumulatieve CO₂-limiet*

In het scenario waarin de cumulatieve groei van CO₂-emissies tot 5% beperkt is, worden de CO₂-emissies tussen 2000 en 2010 nauwelijks verminderd ten opzichte van het referentie-scenario. In het jaar 2020 zijn de CO₂-emissies wel 8 Mton lager dan in het referentiescenario, in 2030 14 Mton en in 2040 25 Mton.

In het scenario met 15% cumulatieve CO₂-reductie zijn de CO₂-emissies in het jaar 2000 al 2 Mton lager dan in het referentie-scenario. Ook zijn de emissies in het jaar 2010 aanmerkelijk lager dan in het referentiescenario. Uiteindelijk wordt in het deterministische scenario dat mikt op -15% CO₂-reductie in 2040 ook precies een reductie met 15% bereikt ten opzichte van de emissies in 1990. In het scenario dat mikt op 45% reductie, wordt in 2000 al een forse reductie gerealiseerd. Dit is in belangrijke mate een gevolg van het terugdraaien van de draai-uren van kolencentrales, het vervangen van kolen door aardgas in kolencentrales en het opvoeren van de draai-uren van gasgestookte centrales. In de periode 2010-2030 wordt vervolgens het grootste deel van de CO₂-reductie bereikt (waarna de emissies tot aan 2040 nog licht afnemen). In het scenario waarin slechts naar 15% emissiereductie wordt gestreefd, wordt een forsere daling van de CO₂-emissies pas na 2025 ingezet.

Ontwikkelingen CO₂-emissies met hedging

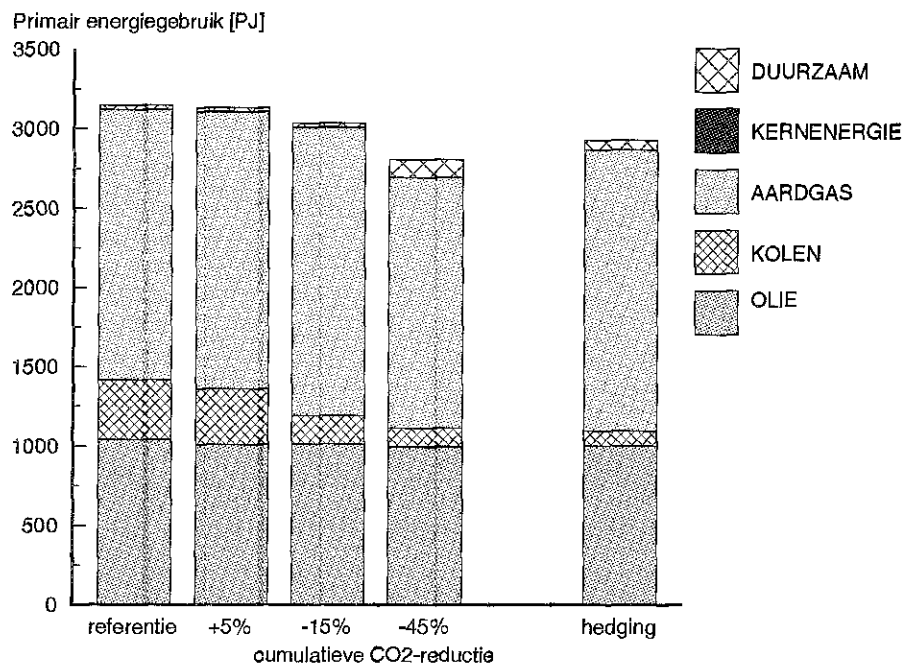
In figuur 4.2 zijn t.o.v. figuur 4.1 ook de CO₂-emissies weergegeven volgens de stochastische berekening met onzekere cumulatieve CO₂-limieten. Van 2000 tot 2010 wordt een emissiepad gevolgd dat dicht aan ligt tegen het deterministische emissiepad richting -45% CO₂. Tussen 2010 en 2020 blijft de emissiereductie in de hedgingstrategie achter bij dit deterministisch scenario met de meest vergaande reductie. Verondersteld is dat na 2020 de CO₂-doelstelling bekend is. Als de CO₂-limiet beperkt is nemen de CO₂ emissies weer snel toe; in 2040 is bijna het emissieniveau van het referentiescenario bereikt. Als de 15% reductie van emissies geldt, blijft de uitstoot tussen 2020 en 2040 nagenoeg constant. Als tenslotte zou blijken dat 45% cumulatieve reductie gerealiseerd moet worden, dan gaan de emissies drastisch omlaag. De grootste emissiereducties worden bereikt in de perioden 2020-2025 en 2035-2040. De jaarlijkse CO₂-uitstoot in de laatste jaren is veel lager dan de uitstoot volgens het deterministisch 45%-reductie scenario. Het effect van deze afname compenseert de effecten van de extra emissies in het hedgingscenario t.o.v. het deterministisch 45%-reductie scenario in de periode 2010-2020.



Figuur 4.2 Ontwikkeling van CO₂-emissies in deterministische scenario's met cumulatieve CO₂-limiet en in het hedging-scenario

Primair energieverbruik in scenario's zonder en met hedging

Het primair energieverbruik in de diverse scenario's toont een aantal interessante overeenkomsten en verschillen, zie figuur 4.3. De rol van olie in de primaire energievoorziening is constant in alle scenario's. De olieproducten zijn slecht vervangbaar en/of relatief goedkoop. De inzet van aardgas verschilt daarentegen sterk in de diverse scenario's. Het hoge aardgasverbruik in het hedgingscenario wordt verklaard door een sterke toename van het aantal STEG's.



Figuur 4.3 *Primair energiegebruik in het jaar 2015 volgens de deterministische scenario's met cumulatieve CO₂-limiet en in het hedgingsscenario*

Opvallend is dat de rol van kolen in het hedgingsscenario lager is dan in enig ander scenario. Inspelend op een onzekere toekomst wordt in de hedgingstrategie elektriciteit vooral op basis van gas geproduceerd ten koste van het gebruik van kolengestookte centrales. De rol van duurzame energie wordt groter bij hogere CO₂-reductie-percentages. De rol van duurzame energie in het hedgingsscenario is groter dan in het 15%-reductiescenario, maar kleiner dan in het 45%-reductiescenario.

4.2 Kosten en baten van CO₂-reductie

De kosten van een optimale energievoorziening waarin een limiet aan de CO₂-emissies wordt gesteld, zijn hoger dan in een optimale energievoorziening waarin de CO₂-emissies zijn vrijgelaten. Reductie van CO₂-emissies brengt bij de MARKAL-benadering dus altijd kosten met zich mee. Baten die optreden door het voorkomen van schade ten gevolge van een minder grote wijziging van het klimaat zijn hier niet bepaald.

MARKAL berekent de totale kosten behorende bij de optimale inrichting van de energievoorziening. De kosten van de energievoorziening worden berekend op basis van de maatschappelijke kostenbenadering. Dit betekent dat gerekend wordt met energieprijzen exclusief heffingen en subsidies, de technische levensduur van installaties en een relatief lage discontovoet van 5% per jaar. Met MARKAL zijn het referentiescenario en diverse reductiescenario's doorgerekend. De kosten voor CO₂-reductie in een jaar kunnen worden bepaald door de systeemkosten van het referentiescenario af te trekken van de systeemkosten van de reductiescenario's. De kosten die in het vervolg vermeld zijn, zijn uitgedrukt in guldens van het jaar 1995.

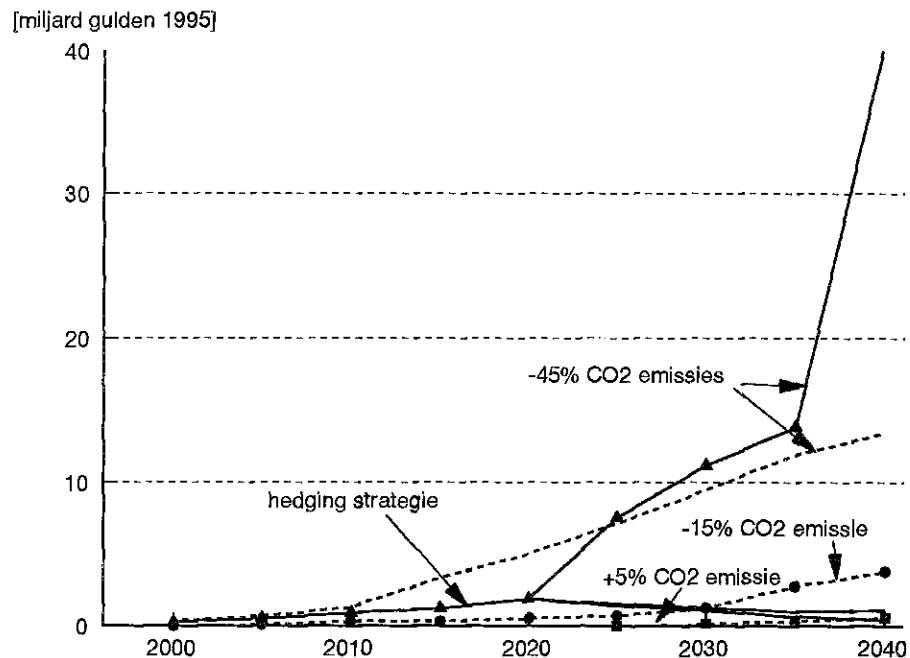
De jaarlijkse kosten van CO₂-emissiereductie lopen in de deterministische scenario's met 15% en 45% cumulatieve reductie vrijwel lineair toe tot respectievelijk 0,5 miljard en 5 miljard gulden in 2020. Na 2020 nemen de jaarlijkse kosten nog verder toe; deze bedragen in 2040 voor 15% en 45% cumulatieve reductie respectievelijk een kleine 4 miljard en ruim 13 miljard gulden.

De jaarlijkse kosten volgens de stochastische berekeningen in vergelijking met het referentiescenario zijn weergegeven in tabel 4.1 en figuur 4.6. De hedgingstrategie loopt van 2000 tot en met 2020. In die periode nemen de jaarlijkse kosten steeds verder toe; in 2020 bedragen de jaarlijkse kosten 1.9 miljard gulden. Daarmee ligt het kostenniveau tussen de kosten van de deterministische scenario's met respectievelijk 15% en 45% cumulatieve reductie. Na 2020 zijn de kosten afhankelijk van de doelstelling die zich voordoet. De jaarlijkse kosten nemen af als de minder strenge doelstelling optreden; de kosten nemen sterk toe als de -45% doelstelling optreedt.

Tabel 4.1 *Jaarlijkse kosten CO₂-reductie in hedgingstrategie [miljard gulden₁₉₉₅]*

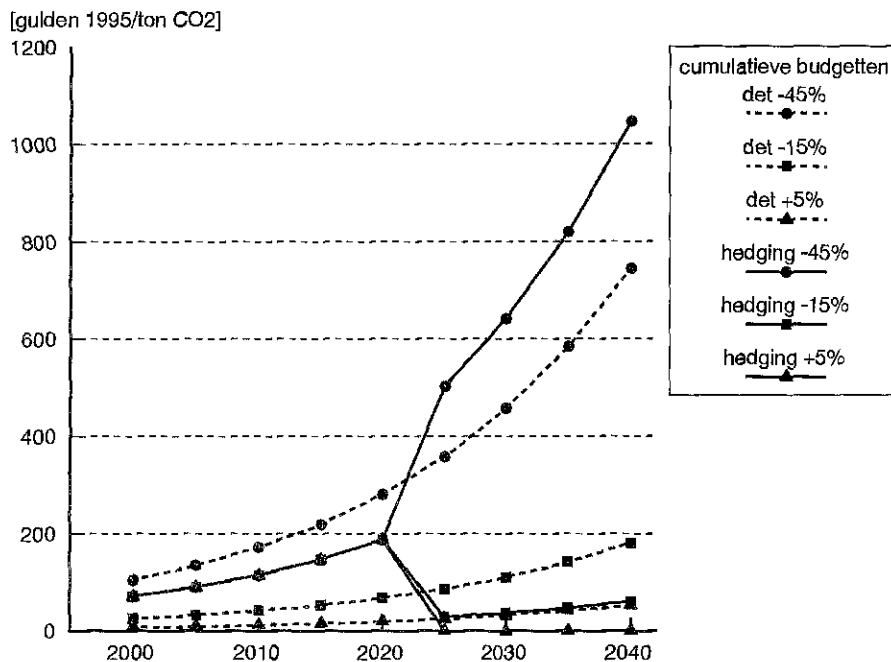
CO ₂ -doel na 2020	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
+5%	0,26	0,51	0,90	1,2	1,9	1,4	1,1	0,63	0,41
-15%	„	„	„	„	„	1,5	1,2	1,0	1,1
-45%	„	„	„	„	„	7,5	11,2	13,8	41,0

De ontwikkeling van de jaarlijkse kosten voor CO₂-reductie voor de deterministische scenario's en het hedgingsscenario zijn nog eens weergegeven in figuur 4.4.



Figuur 4.4 *Jaarlijkse kosten voor emissiereductie in bij berekeningen met cumulatieve CO₂-limieten*

De ontwikkeling van de marginale kosten per ton gereduceerde CO₂ bij de verschillende reductiedoelstellingen is weergegeven in figuur 4.5. Figuur 4.5 laat zien dat de marginale kosten voor een beperking van de groei van de CO₂-emissies (+5% CO₂-emissie) oplopen van 10 gulden per ton CO₂ in 2000 tot 23 gulden per ton CO₂ in het jaar 2020. Voor 15% reductie lopen de kosten op van 35 gulden in 2000 tot 79 gulden in 2020. De kosten voor 45% reductie zijn nog hoger: deze nemen toe van 144 gulden per ton CO₂ in 2000 tot bijna 325 gulden per ton CO₂ in 2020. De kosten in de hedgingstrategie bevinden zich tussen de kostenniveau's van 15% en 45% reductie: 96 gulden per ton CO₂ in 2000 en 216 gulden in 2020. Na 2020 nemen de kosten sterk af indien de CO₂-doelstelling meevalt. De kosten nemen aanzienlijk toe als 45% reductie gerealiseerd moet worden.



Figuur 4.5 De marginale kosten voor CO₂-reductie in deterministische scenario's en in de hedgingstrategie bij berekeningen met cumulatieve CO₂-limieten [onverdisconteerd, inclusief rentelasten, gulden₁₉₉₅]

De reductie van CO₂ brengt kosten met zich mee. De jaarlijkse kosten in de deterministische scenario's en het hedgingscenario verschillen. Maar wat zijn nu de baten van hedging? De baten van een hedgingstrategie kunnen bepaald worden door een kostenvergelijking te maken tussen een hedging scenario en scenario's die vanaf het jaar 2000 'gokken' op een bepaalde doelstelling. Zo kunnen de baten bepaald worden van het scenario waarin tot 2020 een hedgingstrategie wordt gevolgd t.o.v. het scenario waarin tot 2020 ingezet wordt op een 15% CO₂-reductiedoelstelling, te bereiken in 2040, maar waarbij in 2020 van koers veranderd wordt en vervolgens ook ingezet wordt op een CO₂-reductie van 45% in 2040. Voor een hedgingstrategie zijn echter de verwachte baten van belang. De verwachte baten van het volgen van een hedgingstrategie tot 2020 t.o.v. het volgen van een strategie tot 2020 die tot X% reductie in 2040 leidt zijn gedefinieerd als de verwachte kosten van de X%-reductie-strategie minus de verwachte kosten

van de hedgingstrategie. De verwachte kosten worden bepaald op basis van de kosten behorende bij de verschillende reductiecases en de kans op het zich voordoen van deze reductiescenario's.

Bijlage 1 geeft in symbolen en formules de wijze weer waarop de jaarlijkse baten van hedging en vervolgens de totale baten van hedging voor de gehele periode 2000-2040 zijn gedefinieerd.

Tabel 4.2 *Verwachte jaarlijkse baten van de hedgingstrategie voor CO₂-reductie ten opzichte van strategieën die gokken [kosten niet teruggerekend naar 1995, inclusief rentelasten, miljard gulden₁₉₉₅]*

CO ₂ -doel na 2020	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
-15%	-0,26	-0,44	-0,62	-1,0	-1,3	7,3	13,0	31,4	6,3
-45%	0,07	0,11	0,36	2,0	3,1	1,3	0,55	0,05	-12,1

De verwachte baten van de hedgingstrategie kunnen slechts kwantitatief vergeleken worden op basis van vergelijking met de scenario's die aanvankelijk (tot 2020) inzetten op een reductie met 15% cumulatief of met 45% cumulatief. In het scenario dat eerst inzet op 5% emissietoename is het namelijk niet meer mogelijk om in 2040 nog de doelstelling van 45% te halen. De jaarlijkse baten van de hedgingstrategie (zie tabel 4.2) tussen 2000 en 2020 zijn licht negatief t.o.v. de strategie die tot 2020 inzet op 15% reductie; deze baten liggen tussen de -0,3 en -1,3 miljard gulden per jaar. Dit is omdat er tot 2020 in de hedgingstrategie al wat meer reductie moet worden nagestreefd. Na 2020 slaat de balans heel duidelijk om. De hedgingstrategie geeft dan aanzienlijke baten die tussen 6 en 30 miljard gulden per jaar bedragen.

De jaarlijks baten van de hedgingstrategie ten opzichte van een strategie die tot 2020 inzet op 45% reductie te bereiken in 2040 verschillen nogal. De hedgingstrategie kent jaarlijkse baten die oplopen van 0.1 miljard in 2000/2005 tot ruim 3 miljard in 2020 en daarna afnemen tot slechts 0,05 miljard in 2035. In 2040 maakt de gevolgde hedgingstrategie juist meerkosten van ongeveer 12 miljard gulden.

Kosten en baten die in verschillende jaren worden gemaakt moeten contant gemaakt worden naar één jaar voordat ze bij elkaar opgeteld mogen worden. De netto contante waarde van de strategieën is hier bepaald om de netto baten van de hedgingstrategie te berekenen over de periode 2000 tot 2040. De verwachte baten van de hedgingstrategie voor de periode 2000-2040 uitgedrukt in *verdisconteerd guldens van 1995* bedragen 38 miljard gulden ten opzichte van het volgen van een tot 2020 inzetten op een 15% reductiestrategie en 4,4 miljard gulden ten opzichte van het volgen van een 45% reductiestrategie tot 2020. Zoals eerder vermeld konden de baten t.o.v. de strategie die inzet op +5% CO₂-emissie niet worden bepaald. Als de kosten wel berekend hadden kunnen worden zouden deze extra kosten t.o.v. een hedgingstrategie zeker meer dan de 38 miljard gulden van de 15% reductiecase bedragen omdat de startpositie voor de reductie nog moeilijker is.

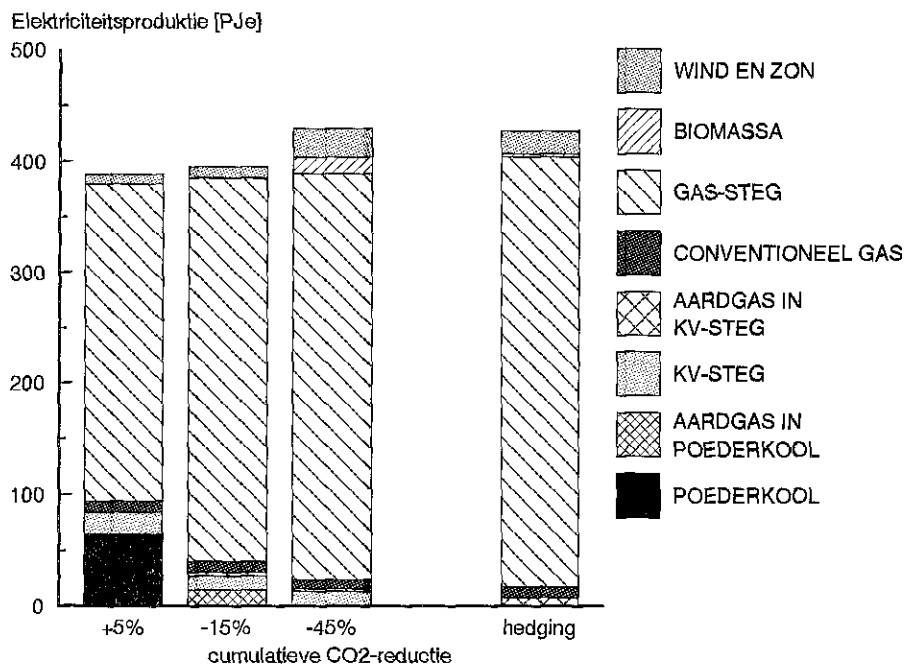
Of in de werkelijkheid de hedgingstrategie ook baten zal hebben ten opzichte van de andere strategieën blijft altijd afhankelijk van de toekomstige gebeurtenissen. Er kan immers ook met succes gekokt worden op een bepaalde doelstelling. Echter zoals is aangetoond mogen netto baten van hedging normaliter worden verwacht.

4.3 De inzet van technieken

Deze paragraaf bespreekt de rol van diverse energietechnologieën in de verschillende scenario's. Allereerst wordt een aantal technieken voor elektriciteitsopwekking bestudeerd. Daarna zijn enige resultaten gegeven voor de gebouwde omgeving.

Elektriciteitsopwekking

De elektriciteitssector is interessant om te bestuderen vanuit hedging-optiek omdat de levensduur van technieken doorgaans lang is en er een keuze kan worden gemaakt uit een groot aantal verschillende alternatieven.



Figuur 4.6 Opwekking van elektriciteit in verschillende scenario's in het jaar 2015 onderverdeeld naar groepen van technieken

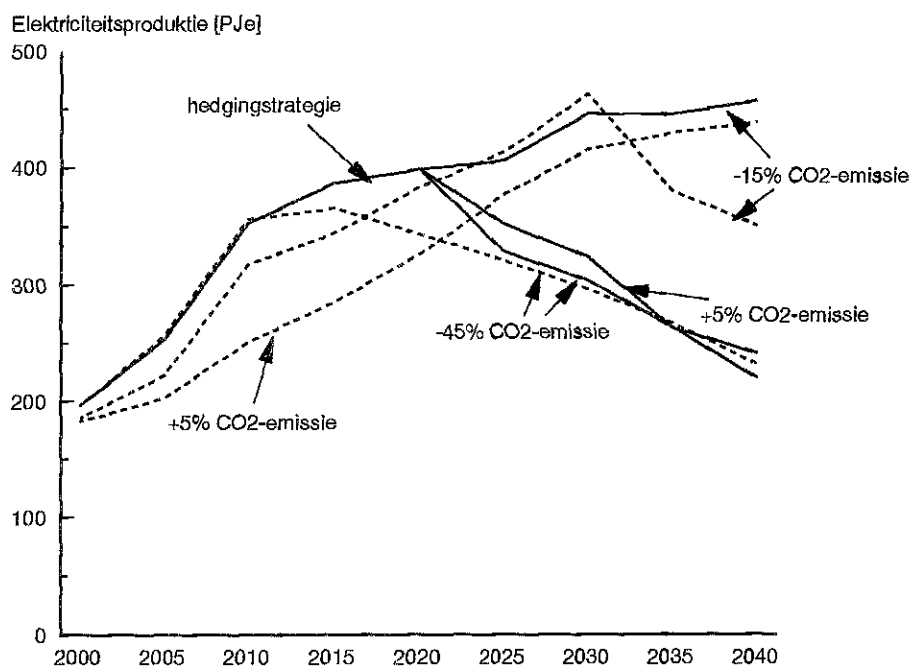
De opwekking van elektriciteit onderverdeeld naar verschillende groepen van technieken in het jaar 2015 is aangegeven in figuur 4.6. De totale productie van elektriciteit neemt toe doordat substitutie van brandstof door elektriciteit plaatsvindt bij het eindgebruik.

De opwekking van elektriciteit in 2015 wordt in alle deterministische scenario's gedomineerd door gas-STEg's; de gas-STEg's produceren tenminste 70% van de elektriciteit. Gezien de veronderstelde prijzen voor aardgas en kolen is dit niet verwonderlijk. De verschillen tussen de scenario's zitten vooral in de 30% van de elektriciteitsopwekking die in

2015 niet op basis van gas-STEG's plaatsvindt. Bij de minst strenge beperking voor CO₂-emissies (+5%) speelt elektriciteitsopwekking op basis van kolen (in poederkoolcentrales en KV-STEG's) een aanzienlijke rol naast elektriciteitsopwekking met gas-STEG's. Bij een beperking van de CO₂-emissies met 15% is de rol van gas-STEG's verder toegenomen. Hiertoe wordt het STEG-vermogen vergroot en worden de draaiuren van STEG's opgevoerd. De poederkoolcentrales en de KV-STEG's maken bij de -15% doelstelling minder draaiuren en bij de poederkoolcentrales wordt aardgas ingezet in plaats van kolen. In het scenario gericht op 45% CO₂-reductie is de productie van elektriciteit uit windturbines groter en wordt ook biomassa gebruikt voor elektriciteitsopwekking. De poederkoolcentrales worden in het geheel niet meer ingezet, ook niet op basis van aardgas. Een KV-STEG wordt ingezet waarbij de CO₂ wordt afgescheiden en in een aquifer wordt gepompt.

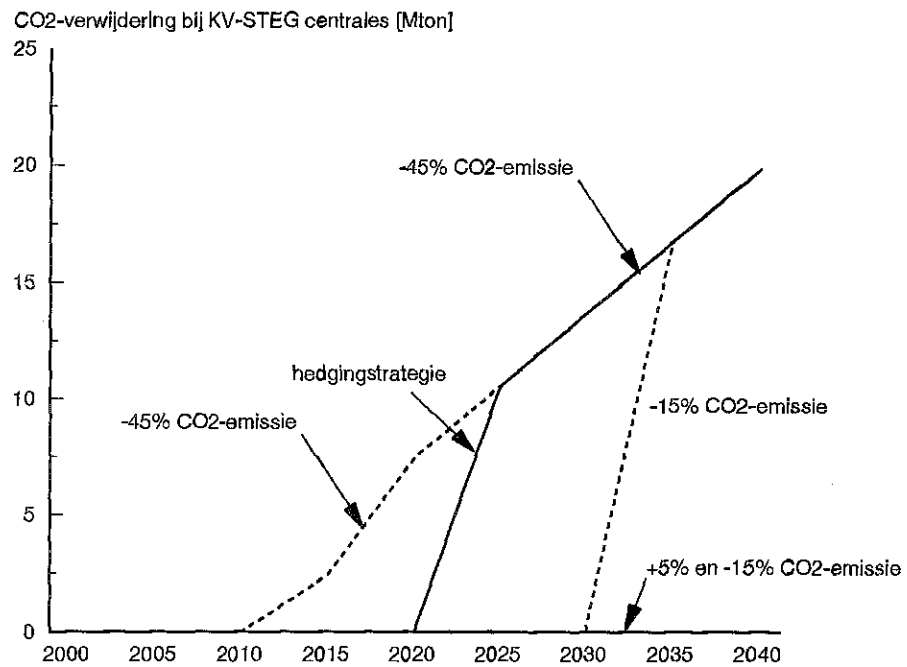
Ook in het hedgingscenario domineren gas-STEG's in 2015 de opwekking van elektriciteit. De uitkomsten van het hedging-scenario m.b.t. elektriciteitsopwekking lijken het meest op de resultaten van het scenario met een reductie van 45%. De productie van elektriciteit uit gas-STEG is nog iets groter dan in het -45% scenario en er is geen productie op basis van kolen. De rol van windenergie en biomassa zijn evenwel iets kleiner. KV-STEG's met CO₂-afvang worden in 2015 in het hedging-scenario niet ingezet. Vanwege de onzekerheid of de CO₂-afvang-faciliteiten over een langere periode kunnen worden benut, wordt hier vooreerst van afgezien. In bestaande KV-STEG's wordt daarentegen aardgas gestookt. De poederkoolcentrales worden niet ingezet, ook niet op basis van aardgas.

Aangezien gas-STEG's een grote rol spelen in de opwekking van elektriciteit, wordt daar hier nog verder op ingegaan. Figuur 4.7 laat de opwekking van elektriciteit uit gas-STEG's zien tussen 2000 en 2040 in de berekende scenario's.



Figuur 4.7 *Elektriciteitsopwekking met gas-STEg's tussen 2000 en 2040 berekeningen bij verschillende CO₂-reductiedoelstellingen. Hedging: doorgetrokken lijnen, deterministische scenario's: stippellijnen.*

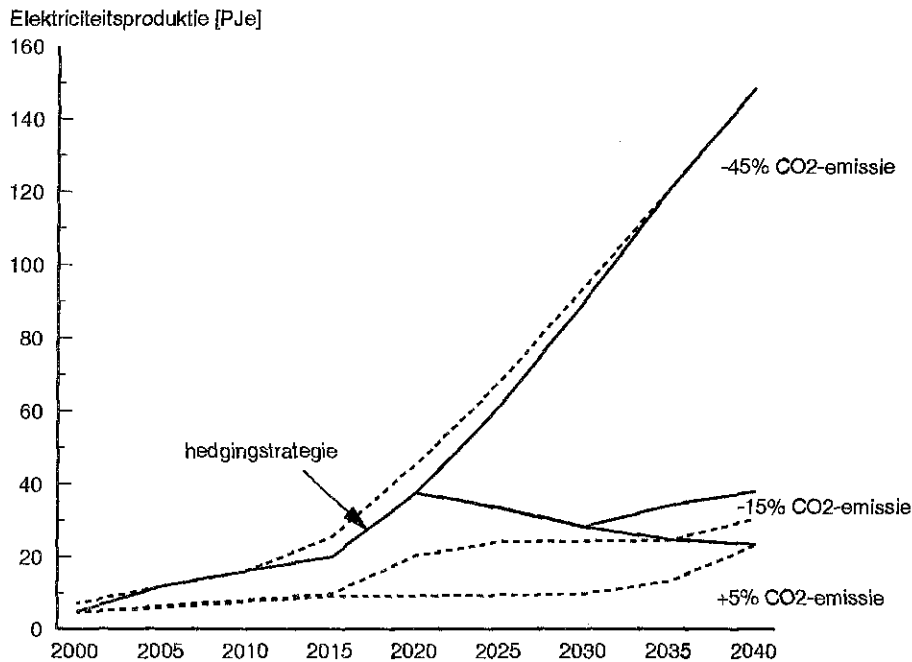
De drie deterministische scenario's laten al opvallende verschillen zien. Tussen 2000 en 2015 is de rol van gas-STEg's het grootst in het deterministische scenario met de meest vèrgaande emissiereductie, maar na 2020 is de rol van gas-STEg's in dit -45% scenario juist het laagst. Andere alternatieven voor elektriciteitsopwekking met (nog) lagere emissies krijgen dan mede de voorkeur. In de scenario's die inzetten op CO₂-doelstellingen van +5% en -15% neemt de productie van elektriciteit uit gas-STEg's na 2020 nog gestaag toe. De hedging-strategie suggereert in feite om eerst sterk in te zetten op gas-STEg's voor elektriciteits-opwekking. Als de CO₂-doelstelling na 2020 meevalt (+5%) of tegenvalt (-45%) wordt de ingezette strategie aangepast en wordt de rol van gas-STEg's verminderd. Voor de +5% doelstelling is de inzet van gas-STEg's niet zo nodig (zie ook de resultaten van de basisberekeningen in figuur 3.4) terwijl gas-STEg's voor de -45% doelstelling niet ver genoeg gaan. Als daarentegen de 'gemiddelde' doelstelling (-15%) in 2020 zal volgen, zal de rol van gas-STEg's nog verder groeien; gas-STEg's zijn precies een optimale techniek voor deze doelstelling.



Figuur 4.8 *CO₂-afvang bij KV-STEAG's tussen 2000 en 2040 berekeningen bij verschillende CO₂-reductiedoelstellingen. Hedging: doorgetrokken lijnen, deterministische scenario's: stippellijnen.*

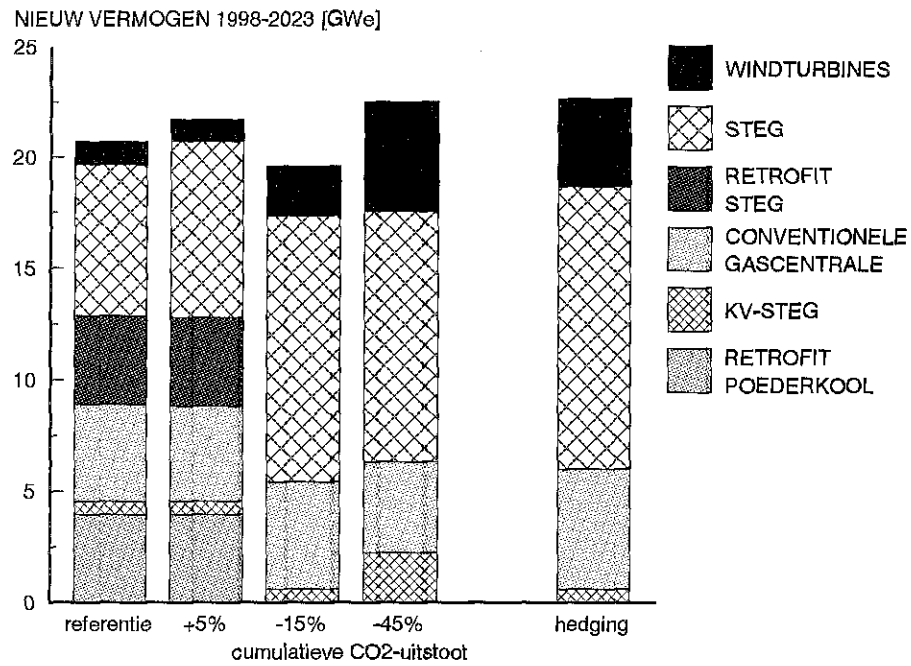
Elektriciteitsopwekking op basis van KV-STEAG-centrales met CO₂-afvang laat een heel ander beeld zien. In figuur 4.8 is aangegeven hoeveel CO₂ bij KV-STEAG's met CO₂-afvang wordt afgescheiden en opgeslagen. De hedging-strategie blijkt zeer voorzichtig met betrekking tot het investeren in KV-STEAG centrales met CO₂-afvang voordat er duidelijkheid is over de CO₂-doelstelling. Alleen als de -45% doelstelling optreedt wordt er ingezet op deze optie. In het deterministische scenario met een -15% doelstelling wordt ook vanaf 2035 bij KV-STEAG's CO₂ afgevangen. Als de hedging-strategie uitmondt op de -15% doelstelling vindt CO₂-afvang bij KV-STEAG's niet plaats omdat in deze periode minder CO₂-reductie gerealiseerd hoeft te worden dan in het deterministische -15% scenario aangezien voor 2020 al meer emissiereductie heeft plaats gevonden (zie ook de CO₂-emissieprofielen in figuur 4.2).

Figuur 4.9 geeft de opwekking van elektriciteit op basis van duurzame bronnen (vooral windturbines, maar ook waterkracht en PV). De hedging-strategie volgt met betrekking tot de inzet van duurzame bronnen voor elektriciteitsopwekking tot 2020 bijna de strategie die inzet op de -45% CO₂-doelstelling. Na 2020 ontwikkelt duurzame energie zich bij de hedgingstrategie afhankelijk van de CO₂-doelstelling die optreedt. Opvallend is dat de inzet van duurzame energie bij +5% en -15% CO₂-doelstellingen altijd groter blijft dan in de vergelijkbare deterministische berekeningen.



Figuur 4.9 *Elektriciteitsopwekking met duurzame energiebronnen (exclusief biomassa) tussen 2000 en 2040 berekeningen bij verschillende CO₂-reductiedoelstellingen. Hedging: doorgetrokken lijnen, deterministische scenario's: stippellijnen.*

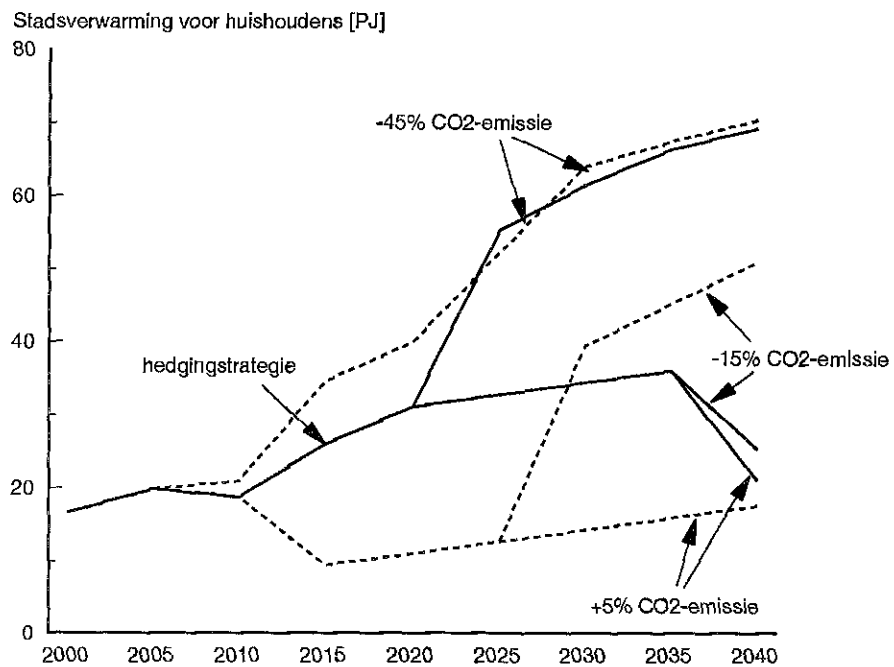
De resultaten voor de elektriciteitssector kunnen ook geïllustreerd worden door in te zoomen op het nieuwe vermogen dat geplaatst wordt. Figuur 4.10 geeft het nieuwe vermogen aan dat tussen 1998 en 2023 wordt geplaatst. In het referentiescenario en het scenario met de +5% CO₂-doelstelling vindt levensduurverlenging (retrofit) van bestaande centrales plaats. Dit geldt zowel voor poederkoolcentrales als voor gas-STEG's. In de scenario's met CO₂-doelstellingen van -15% en -45% wordt de levensduur van centrales niet verlengd. Tegen de verwachting in vindt in het hedgingscenario het verlengen van de levensduur van bestaande centrales niet plaats. Dit werd verwacht omdat levensduurverlenging een manier is om een beslissing voor het bouwen van nieuw vermogen, waarmee een aanzienlijke hoeveelheid kapitaal gemoed is, uit te stellen. Kennelijk is het rendement van de centrales waarvan de levensduur is verlengd onvoldoende om een dergelijke beslissing te verantwoorden.



Figuur 4.10 Nieuw vermogen voor elektriciteitsopwekking geplaatst tussen 1998 en 2023 volgens verschillende berekeningen

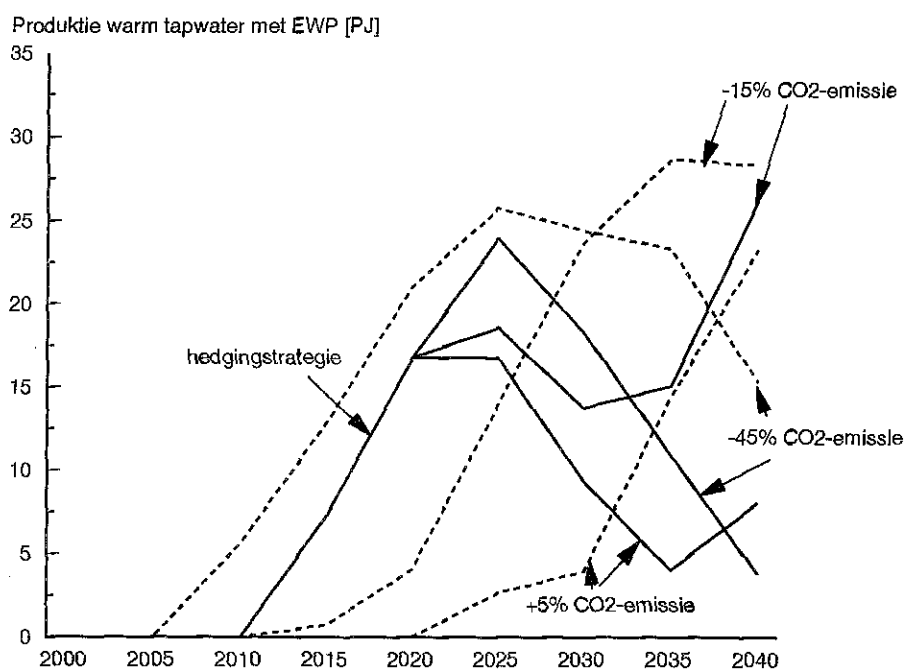
Gebouwde omgeving

In MARKAL wordt voor stadsverwarming gerekend met een economische en technische levensduur van 25 jaar. Door de inzet van stadsverwarming voor woningen in de huishoudelijke sector worden CO₂-emissies gereduceerd.



Figuur 4.11 Stadsverwarming voor woningen tussen 2000 en 2040. Hedging: doorgetrokken lijnen, deterministische scenario's: stippellijnen.

Figuur 4.11 laat zien dat het aantal PJ stadsverwarming voor huishoudens toeneemt naarmate het CO₂-regime strenger is. In het 45%-reductie-scenario neemt de inzet van stadsverwarming sterk toe vanaf het 2010 om bij te dragen aan CO₂-reductie. In het 15%-reductie-scenario en het scenario waarin de CO₂-emissies met 5% toenemen neemt de inzet vanaf 2010 in eerste instantie af waarna de inzet na 2015 weer langzaam stijgt. Vanaf het jaar 2025 neemt de inzet in het deterministische 15%-reductie-scenario weer sterk toe. De hedgingstrategie zet in op een pad lager dan de 45% reductieroute maar aanmerkelijk hoger dan de twee deterministische scenario's met gematigde CO₂-doelstellingen. Na 2020 blijft de inzet van stadsverwarming hoger voor de scenario's die eerst de hedgingstrategie volgden en daarna uitkwamen op de +5% en -15% CO₂-doelstellingen. De stadsverwarming heeft immers een aanzienlijke levensduur en als er eenmaal in is geïnvesteerd kan men er beter gebruik van blijven maken. Als na 2020 blijkt dat de -45% CO₂-doelstelling zal optreden, wordt méér stadsverwarming geplaatst zodat het scenario op vrijwel hetzelfde niveau uitkomt als het deterministische scenario gericht op -45% CO₂.



Figuur 4.12 Warm tapwater met elektrische warmtepomp boiler. Hedging: doorgetrokken lijnen, deterministische scenario's: stippellijnen.

Vergelijkbare resultaten doen zich voor bij de inzet van elektrische warmtepompboiler voor de productie van warm tapwater. In het deterministische scenario dat inzet op de -45% CO₂-doelstelling worden elektrische warmtepompboilers vanaf 2005 geïntroduceerd. De hedgingstrategie is 5 jaar later met de introductie van elektrische warmtepomp boilers. Elektrische warmtepomp boilers worden in de deterministische scenario's met -15% en -45% doelstellingen geïntroduceerd in respectievelijk 2015 en 2020. In 2020 is het penetratieniveau van elektrische warmtepomp boilers in de hedgingstrategie dichterbij het penetratieniveau van het deterministische scenario met de -45% CO₂-doelstelling dan het scenario met de -15% CO₂-doelstelling. In de periode vanaf 2025 is de verdere ontwikkeling

van elektrische warmtepomp boilers nogal verschillend voor de verschillende scenario's doordat andere (vanuit CO₂-optiek nog betere) technieken, zoals zonne-boilers met de elektrische warmtepomp boilers concurreren.

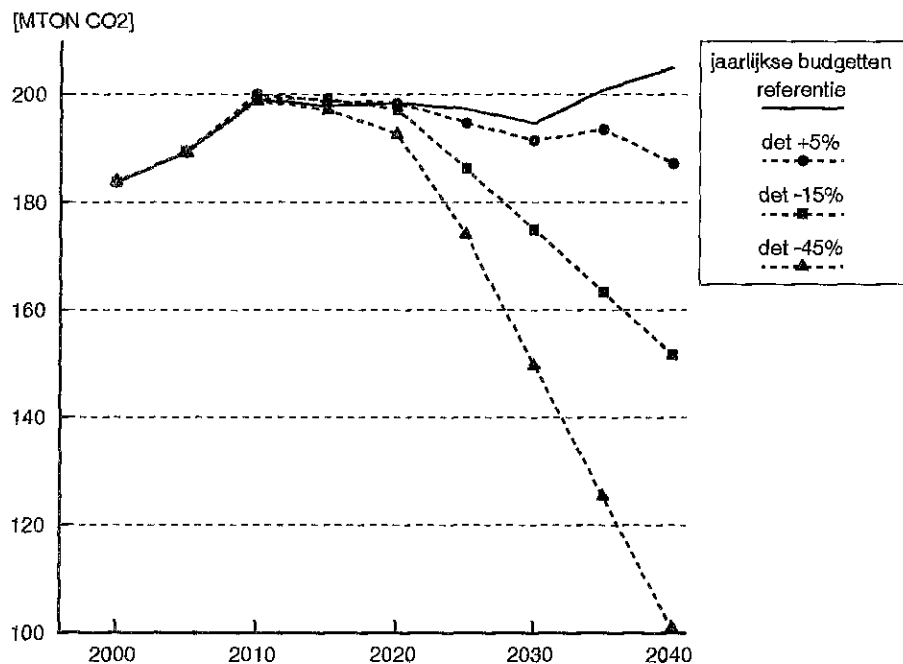
4.4 Resultaten berekeningen met jaarlijkse CO₂-doelstellingen

Bij de deterministische scenario's die zich richten op de jaarlijkse emissies van CO₂, is aangenomen dat de emissies pas vanaf 2025 aan doelstellingen zijn gebonden en dat er tot 2020 geen doelstellingen gelden.

De reductiepaden die gehanteerd zijn richten zich op drie doelstellingen in 2040 die vanaf het jaar 2025 volgens een lineair pad moeten worden bereikt:

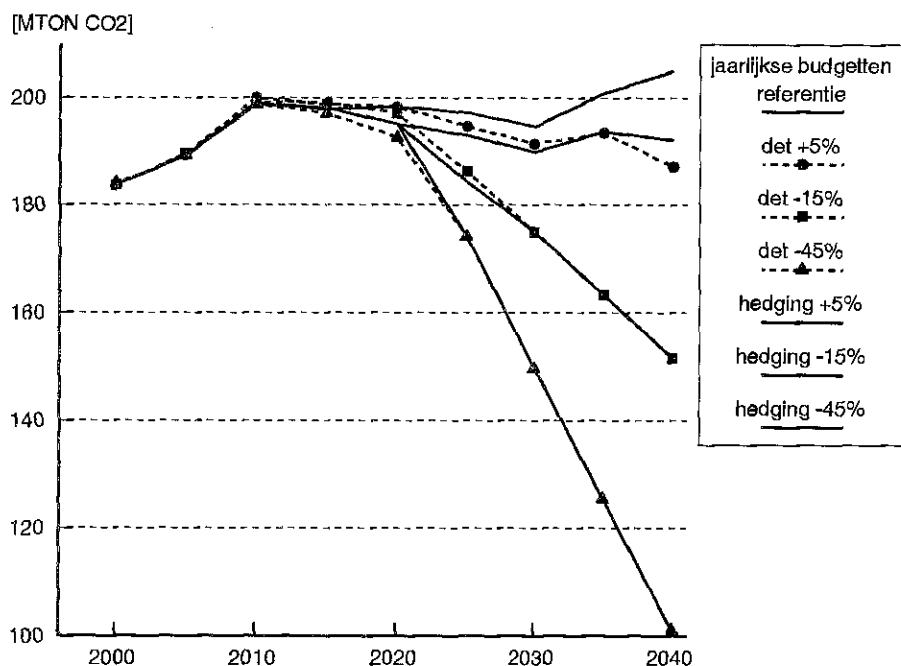
- beperkte groei (+5%),
- gemiddelde reductie (-15%),
- drastische reductie (-45%).

De reductiepaden zijn in figuur 4.13 gegeven. Er vindt in 2020 maar zeer beperkt 'vrijwillige' emissiereductie plaats als anticipatie op de CO₂-doelstellingen van 2025 tot en met 2040. De anticiperende reductie in 2020 bedraagt 1 Mton voor de -15% doelstelling ten opzichte van het referentiescenario. Voor de -45% doelstelling moet tussen 2025 en 2040 een zeer sterke emissiereductie gerealiseerd worden. Toch bedraagt ook hier de anticiperende emissiereductie in 2020 maar 6 Mton voor de -45% doelstelling. De marginale kosten voor CO₂-reductie zijn bij de geprojecteerde reductiepaden in 2030 nog beperkt (respectievelijk 10 f/ton CO₂ en 100 f/ton CO₂ voor -15% en -45%). De kosten nemen echter snel toe tot respectievelijk 125 f/t CO₂ en 1000 f/t CO₂ in 2040. Het heeft binnen de MARKAL-berekeningswijze echter nauwelijks effect om in 2020 voorzieningen te treffen teneinde de kosten in 2040 te beperken omdat technieken die in 2010 ingezet worden in 2040 veelal weer aan vervanging toe zijn.



Figuur 4.13 *Ontwikkeling van CO₂-emissies in deterministische scenario's met jaarlijkse CO₂-limiet*

Bij de jaarlijkse emissiedoelstellingen neemt het hedgingsscenario wederom een plaats in tussen de deterministische cases met -15% en -45% CO₂-doelstellingen. De 'vrijwillige' reductie van CO₂-emissies in de hedging-case in 2020 bedraagt slechts 3 Mton.



Figuur 4.14 *Ontwikkeling van CO₂-emissies in deterministische scenario's met jaarlijkse CO₂-limiet en in het hedging-scenario*

De resultaten van deze analyse illustreren een dilemma: wanneer je de problematiek beschouwd vanuit een perspectief dat milieuhygiënische gezien juist is (cumulatieve CO₂-doelstellingen), dan is hedging belangrijk, echter, wanneer je de problematiek beschouwd op de wijze waarop het vanuit de klimaatonderhandelingen waarschijnlijk op ons af zal komen, dan is hedging minder belangrijk.

4.5 Gevoeligheidsanalyses

Voorafgaande aan de invulling en uitwerking van de gevoeligheidsanalyses hebben we ons verschillende vragen gesteld.

1. Hedging kan worden toegepast voor het zoeken naar risico-mijdende strategieën bij verschillende soorten van onzekerheden. Naast de toekomstige CO₂-doelstellingen zijn ook de toekomstige energieprijzen onzeker. Hoe gevoelig zijn de scenario-resultaten voor onzekerheden in CO₂-doelstellingen in verhouding tot onzekerheden in energieprijzen? In paragraaf 4.5.1 wordt hier op ingegaan.
2. Hoe gevoelig zijn de CO₂-hedgingresultaten voor de hoogte van discontovoet en rentevoet? Zie hiervoor paragraaf 4.5.2.
3. Hoe gevoelig zijn de CO₂-hedgingresultaten voor de aannamen over de beschikbaarheid van CO₂-reductietechnieken op lange termijn? In paragraaf 4.5.3 wordt hier op ingegaan.

Van de discontovoet en de beschikbaarheid van CO₂-reductietechnieken kan een zekere gevoeligheid worden verwacht omdat ze de aantrekkelijkheid (in geval van ad. 2) en de noodzaak (in geval van ad. 3) van eventueel vroeg in de tijd investeren sterk kunnen beïnvloeden.

4.5.1 Hedging voor onzekere gasprijzen

Inleiding en modellering

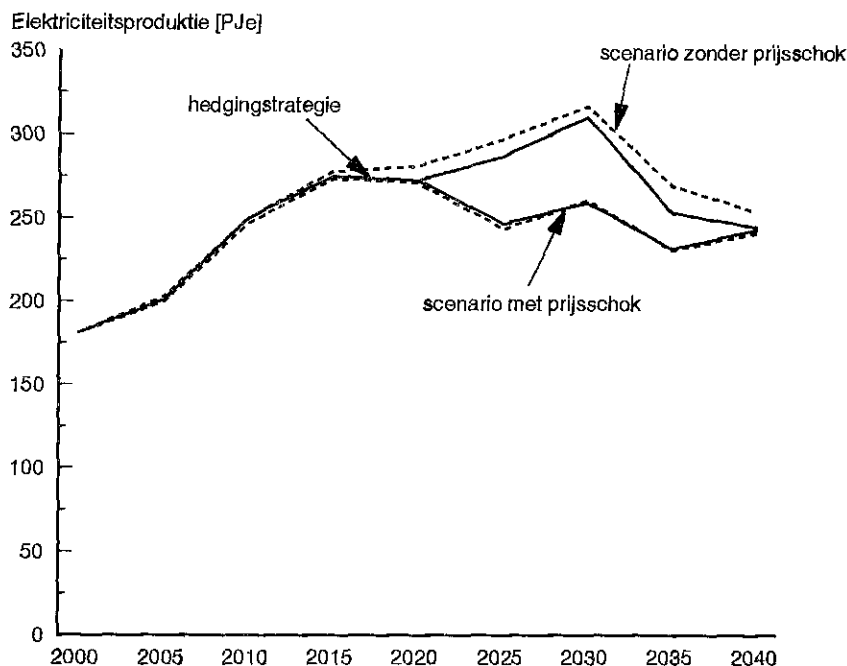
De toekomstige ontwikkeling van de prijzen van olie, kolen en aardgas wordt onder meer bepaald door de inschattingen van de bestaande reserves, de verwachte ontwikkeling van de vraag en de politiek die gevoerd wordt door de landen die fossiele energiedragers exporteren. Tussen 1979 en 1985 waren de prijzen van aardolie, kolen en aardgas aanmerkelijk hoger dan nu. De 'gemiddelde' verwachting uit de 'International Energy Workshop poll' [16] is dat de prijs van aardolie tot 2020 maar weinig zal toenemen.

Het is evenwel niet ondenkbaar dat er in de toekomst zich weer tijdelijk een piek zal voordoen in de prijs van een of meer energiedragers. Een plotselinge sterke stijging van de energieprijzen wordt frequent als een bedreiging gezien, zeker i.v.m. de tendens van een toenemende rol voor aardgas in Europa. Voor deze gevoeligheidsanalyse is verondersteld dat zich tussen 2023 en 2028 een piek kan voordoen in de prijs van aardgas. Een dergelijke situatie kan bijvoorbeeld in West-Europa optreden als Rusland een dominante positie heeft gekregen als toeleverancier van aardgas aan de West-Europese markt en wanneer West-Europa de afhankelijkheid van Rusland niet of slechts beperkt heeft afgedekt door pijpleidingen met

andere gasproducenten of door LNG-faciliteiten. In het geval van een prijsschok wordt de geleidelijke stijging van de gasprijs onderbroken door een prijsspiek. De prijs van geïmporteerd aardgas schiet van 7 gulden in 2020 naar 12,5 gulden in 2025 (40 cent per m³). In 2030 bedraagt de aardgasprijs weer 7,5 gulden. Er is voor deze berekening verondersteld dat de kans op een prijsschok 50% bedraagt. De kans op geen prijsschok bedraagt ook 50%. Voor geen van de twee scenario's is een plafond voor de emissies van CO₂ verondersteld.

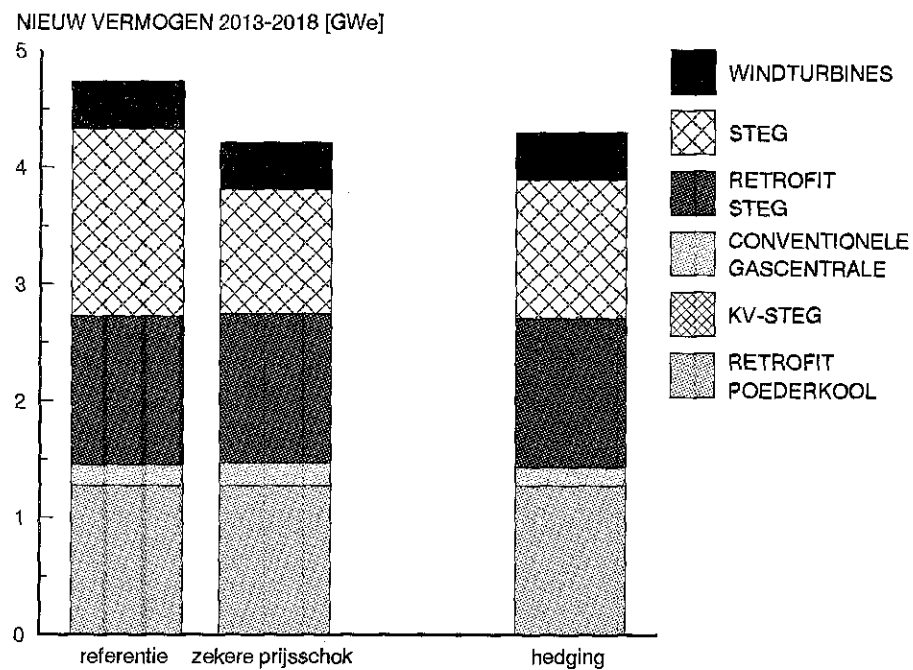
Resultaten

In een hedgingberekening zal de energievoorziening zich tot 2023 dusdanig ontwikkelen dat maximaal wordt rekening gehouden met de prijsschok. In de elektriciteitsvoorziening liggen de ruimste mogelijkheden voor substitutie tussen technieken die aardgas gebruiken en technieken op basis van andere energiedragers. Daarom wordt hier op de resultaten in deze sector ingegaan. Figuur 4.15 geeft de opwekking van elektriciteit uit gas-STEG's tussen 2000 en 2040. De onderbroken lijnen geven de productie in de scenario's met zekere energieprijzen. Tot het jaar 2010 is in deze twee scenario's de productie van elektriciteit uit gas-STEG's nagenoeg gelijk. Als geen prijsschok verwacht wordt zal de productie van elektriciteit uit gas-STEG's vanaf 2015 hoger zijn dan als er wel een prijsschok komt. De hedgingstrategie volgt tussen 2015 en 2020 vrijwel de strategie waar een prijsschok 'zeker' is. Als in 2020 blijkt of wel of niet een prijsschok gaat optreden zal de elektriciteitsproductie met gas-STEG's respectievelijk afnemen of toenemen. Opvallend is dat ook wanneer geen prijsschok optreedt de productie van met gas-STEG's tussen 2020 en 2040 lager blijft dan in het deterministische scenario zonder prijsschok.



Figuur 4.15 Elektriciteitsopwekking met gas-STEG's tussen 2000 en 2040 berekeningen bij verschillende gasprijsoontwikkelingen

In figuur 4.16 zijn de investeringen in nieuw elektrisch vermogen gegeven voor de periode 2018 tot en met 2023. Met betrekking tot investeringen in nieuw vermogen zijn de resultaten van de drie scenario's voor 5 van de 6 groepen van technieken gelijk. Alleen voor gas-STEg's is er verschil. Het blijkt ook uit deze figuur dat de hedgingstrategie kiest voor een strategie die meer lijkt op het deterministische scenario met een prijsschok dan het deterministische scenario zonder prijsschok. Er wordt afgewacht met het plaatsen van extra gas-STEg vermogen tot de onzekerheid is verdwenen aangaande de prijsschok.



Figuur 4.16 Nieuw vermogen voor elektriciteitsopwekking geplaatst tussen 2018 en 2023 volgens verschillende berekeningen

De 'verstoring' van de energievoorziening ten opzichte van het referentie-scenario is kleiner bij de hier veronderstelde schok in de prijs van aardgas dan bij CO₂-doelstelling van -15% of -45%. De energievoorziening verandert daardoor minder. Op zich is dat voor deze gevoeligheidsanalyse niet erg belangrijk. Daarvoor is vooral van belang of de hedgingstrategie zich dicht tegen één van de deterministische case bevindt. De hedgingstrategie blijkt heel dicht tegen het scenario met een zekere prijsschok aan te liggen. De model-uitkomst blijkt dus zeer gevoelig te reageren op de kans op een prijsschok.

Conclusie

Een kans op een verhoogde energieprijz heeft belangrijke consequenties op een strategie die een optimale inzet van energiedragers poogt te bereiken. Risico's van hoge energieprijzen worden vermeden en er wordt een strategie gevolgd die, tot het moment dat onzekerheid verdwijnt, weinig afwijkt van een scenario met een zekere prijsschok.

4.5.2 Gevoeligheidsanalyse met lage discontovoet en hoge rentevoet

Inleiding en modellering

In de modelberekeningen is een rentevoet van 5% gehanteerd voor de berekening van de jaarlijkse kosten en baten in een jaar. De rentevoet van 5% is gebruikelijk voor het berekenen van de maatschappelijke kosten. Voor het contant maken naar één jaar van de kosten en baten die in verschillende jaren worden gemaakt is ook gebruik gemaakt van een discontovoet van 5% per jaar.

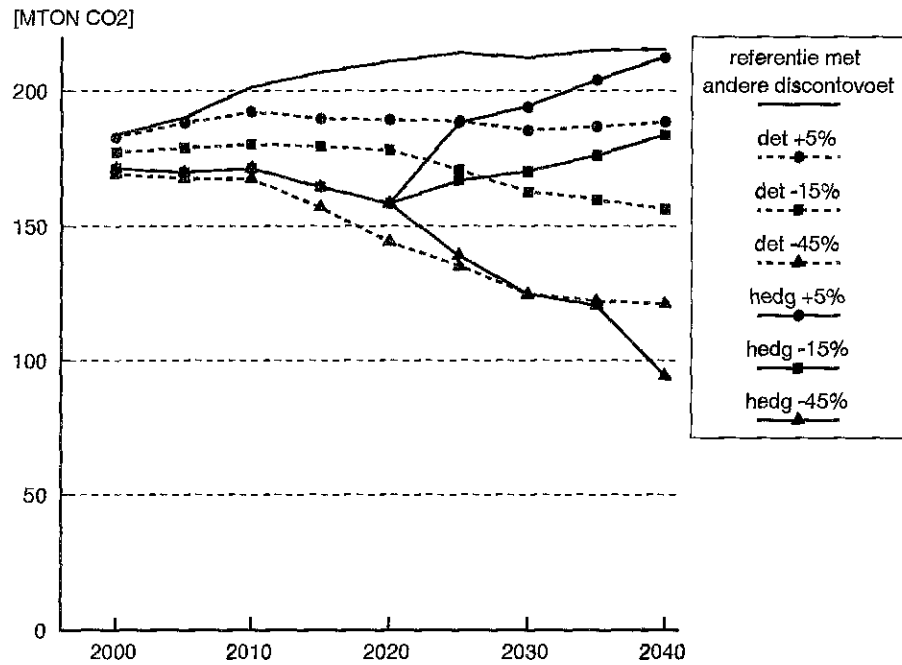
De discontovoet van 5% is in feite een compromis tussen een rentevoet die overeenkomt met de terugverdiertijden die gebruikelijk zijn voor investeringen in de publieke sector en de 'social rate of time preference'. Bij evaluatie van milieuproblemen met een zeer lange tijdshorizon is het gebruikelijk om te rekenen met de 'social rate of time preference'. De waarde hiervoor bedraagt veelal 2% tot 3% per jaar [17].

De kosten van maatregelen worden veelal niet alleen via de maatschappelijk kostenbenadering gepresenteerd, maar ook via de verbruikerskostenbenadering. Hiervoor is het gebruikelijk om te rekenen met een rentevoet die ongeveer 15% bedraagt.

Voor deze gevoeligheidsanalyse is daarom gerekend voor een combinatie van een lage discontovoet (2,5% per jaar) en een hoge rentevoet van 15% per jaar.

Resultaten

De resultaten laten ten eerste zien dat de CO₂-emissies in het referentiescenario hoger liggen. In het jaar 2020 bedragen de CO₂-emissies op 211 Mton terwijl in dat jaar de CO₂-emissies in de basisberekeningen 198 Mton bedroegen. Vanwege de hogere rentevoet kon verwacht worden dat energiebesparende investeringen en investeringen in duurzame energie minder aantrekkelijk worden dan bij een rentevoet van 5%. Hierdoor zijn de CO₂-emissies hoger.



Figuur 4.17 *Ontwikkeling van CO₂-emissies in scenario's met 15% rentevoet en 2,5% discontovoet*

De deterministische reductiescenario's laten ook verschillen zien met de deterministische reductiescenario's in de basisberekeningen (figuur 4.1). Bij de +5%, -15% en -45% emissiedoelstellingen vindt de emissiereductie eerder in de tijd plaats en is de reductie rondom het jaar 2040 iets kleiner. Dit effect wordt veroorzaakt door de lagere discontovoet. Het model zoekt bij een cumulatief CO₂-budget een optimale timing van CO₂-reductie. De optimale strategie voor de reductie van CO₂-emissies in de tijd is bereikt als de marginale kosten voor CO₂-reductie precies stijgen met de aangenomen discontovoet. In de berekeningen met een lagere discontovoet zal het verschil in de marginale kosten tussen 2010 en 2030 dus kleiner zijn dan bij een hogere discontovoet; dit verklaart de grotere emissiereductie rondom 2010 en de geringere emissiereductie rondom 2030/2040.

Ook de hedgingberekeningen geven in de gevoeligheidsanalyse rond 2010/2020 een grotere reductie van CO₂-emissies dan de basishedgingberekeningen (figuur 4.2). In 2015 en 2020 is de extra emissiereductie ten opzichte van de basishedging-berekeningen ongeveer 7 Mton CO₂. Het hedgingpad tot 2020 ligt ook dicht tegen de -45% reductiecase dan in de basishedgingberekeningen (zie figuur 4.2). Kosten die op lange termijn worden gemaakt wegen bij een lage discontovoet zwaarder dan bij een hoge discontovoet. Daarom worden hoge kosten op termijn in sterkere mate uit de weg gegaan bij een lage discontovoet en resulteert dit in de hedgingcase in een reductiepad dat dicht bij het meest extreme emissiereductiepad ligt. Het hedgingstrategie is door de lage discontovoet dus meer risicomijdend geworden met betrekking tot lange termijn kosten en verplaatst emissiereductie naar voren in de tijd.

De jaarlijkse kosten voor emissiereductie in de hedgingstrategie zijn weer-gegeven in tabel 4.3. Deze tabel kan vergeleken worden met tabel 4.1. De

kosten voor emissiereductie zijn over het algemeen hoger in deze gevoeligheidsanalyse vanwege de toepassing van een hogere rentevoet welke de rentelasten verhoogd. Alleen in de laatste periode (2040) zijn de kosten iets lager. Daarnaast zijn de kosten die eerder in de periode worden gemaakt extra hoger omdat de lagere discontovoet de tijdvoorkeur heeft veranderd.

Tabel 4.3 *Jaarlijkse kosten CO₂-reductie in hedgingstrategie, gevoeligheidsanalyse met 2,5% discontovoet en 15% rentevoet [inclusief rentelasten, miljard gulden₁₉₉₅]*

CO ₂ -doel na 2020	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
+5%	0,65	1,22	1,74	2,73	3,76	2,65	1,72	1,22	0,63
-15%	„	„	„	„	„	1,84	1,91	1,56	0,99
-45%	„	„	„	„	„	10,1	14,2	15,2	39,8

Conclusie

Er kan geconcludeerd worden dat de uitkomst van de emissiereductie-berekeningen (zowel deterministisch als stochastisch) gevoelig zijn voor de aannames met betrekking tot de discontovoet. Bij een lage discontovoet vindt een grotere emissiereductie vroeg in de tijd plaats dan bij een hogere discontovoet. De hedgingstrategie is bij een lage discontovoet extra risicomijdend, zodat de CO₂-emissies in de hedgingstrategie tot het moment dat onzekerheid weg is, extra laag zijn ten opzichte van berekeningen met een hogere discontovoet.

Verder kan geconcludeerd worden dat als een hogere rentevoet wordt toegepast de kosten voor emissiereductie ook hoger zullen zijn.

4.5.3 Gevoeligheidsanalyse met backstoptechnieken en een tweetal mogelijke CO₂-doelstellingen

Inleiding

In de gepresenteerde berekeningen zijn aanzienlijke potentiële verondersteld voor de import van aardgas en duurzame energiebronnen in Nederland. CO₂-afvang is alleen bij elektriciteitsproductie uit KV-STEG's op beperkte schaal toegelaten. Daarnaast zijn echter andere opties voor CO₂-reductie denkbaar, zoals import van duurzaam geproduceerde energie, kernenergie en CO₂-afvang bij gascentrales en bij brandstofproductie. Dergelijke technieken worden ook wel backstoptechnieken genoemd; dit zijn technieken waarvan de maatschappelijke acceptatie zekere grenzen kennen maar die eventueel via een grootschalige inpassing in ruime mate CO₂-emissies kunnen verminderen.

Wanneer in de toekomst dergelijke CO₂-vrije energietechnieken beschikbaar zijn met beperkte meerkosten, dan is er meer voor te zeggen om CO₂-reductie enigszins uit te stellen. Het is vanuit efficiëntie-oogpunt dan immers optimaler CO₂-reductie later plaats te laten vinden.

In deze gevoeligheidsanalyse is verondersteld dat verschillende back-stoproutes zijn toegelaten, namelijk:

- CO₂-afvang bij kunstmestproductie,
- CO₂-afvang bij gas-STEG's,
- CO₂-afvang bij waterstofproductie uit aardgas,
- import van hout uit Litouwen,
- import van ethanol op basis van suikerriet vanuit Brazilië.

Gezamenlijk maken deze opties drastische CO₂-reductie mogelijk met een ruim potentieel².

De eerdere berekeningen zijn steeds uitgegaan van een *drietal* mogelijke CO₂-doelstellingen. Nu in Kyoto een akkoord tot stand is gekomen over de vermindering van broeikasgasemissies, is de +5% doelstelling minder waarschijnlijk geworden³. Voor deze berekening is daarom uitgegaan van slechts *twee* doelstellingen: -15% en -45%. Deze zijn een kans toegekend van respectievelijk 85% en 15%.

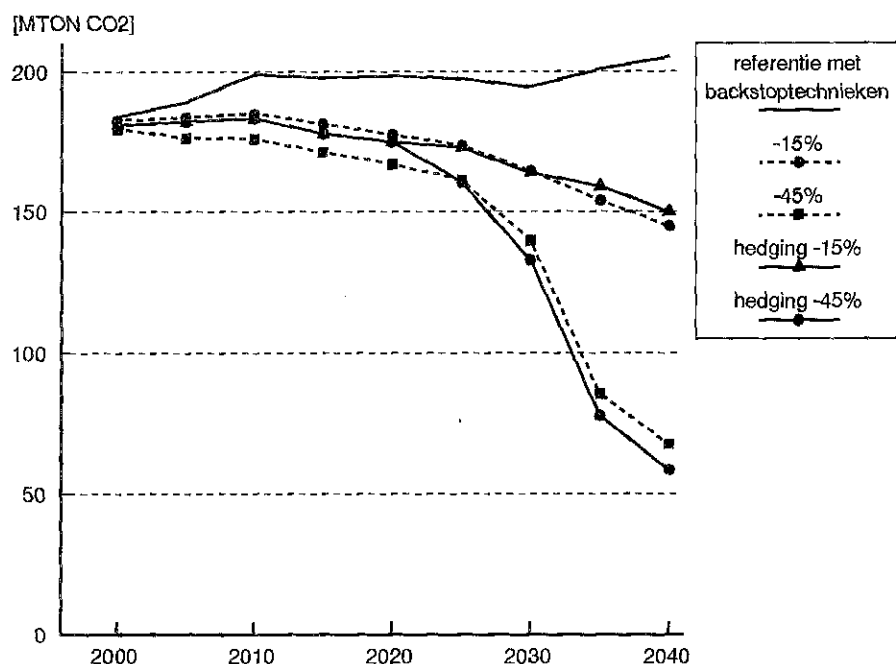
Resultaten

In figuur 4.18 is de ontwikkeling van de CO₂-emissies weergegeven. De ontwikkeling van de CO₂-emissies bij de deterministische -15% doelstelling is weinig verschillend van de ontwikkeling in de basisberekeningen (zie figuur 4.1). Het emissiepad naar de deterministische -45% doelstelling is wel sterk verschillend. Tot 2025 is de emissiereductie beperkt; na 2030 worden de CO₂-emissies zeer sterk teruggebracht. De emissiereductie is tot en met 2030 aanmerkelijk kleiner dan in de basisberekeningen. Het verschil in jaarlijkse CO₂-emissies bedraagt 10 tot 15 Mton CO₂. In de periode van 2030 tot 2040 worden de CO₂-emissies veel sterker verminderd; het verschil met de basisberekeningen in deze jaren bedraagt 30 tot 40 Mton.

Het emissiepad van de hedgingberekening tot en met 2020 verschilt van het deterministische -15% emissiepad. De emissiereductie in dit hedgingpad is kleiner dan in de basisberekeningen (figuur 4.2). Het verschil in emissies tussen 2005 en 2020 bedraagt 7 tot 9 Mton CO₂.

² Het was de bedoeling dat in het model de jaarlijkse groei van het marktaandeel van bovengenoemde technieken begrensd zou zijn, zodat de technieken alleen geleidelijk mochten penetreren. Het model blijkt dit evenwel niet goed mee te nemen waardoor de backstoptechnieken toch snel een groot marktaandeel kunnen krijgen.

³ De overige modelberekeningen die in deze studie zijn vermeld, zijn uitgevoerd vóór de klimaattop in Kyoto.



Figuur 4.18 Ontwikkeling van CO₂-emissies in scenario's met backstop-technieken toegelaten en twee CO₂-doelstellingen

De extra emissiereductie tussen 2030 en 2040 wordt bij deze berekeningen vooral gerealiseerd via CO₂-afvang. CO₂-afvang bij waterstofproductie en CO₂-afvang bij gas-STEG's zijn goed voor een CO₂-reductie van ruim 50 Mton. Import van biomassa geeft in 2035 een emissiereductie van ongeveer 10 Mton.

Tabel 4.4 Jaarlijkse kosten CO₂-reductie in hedgingstrategie, gevoeligheidsanalyse met backstop technieken en twee CO₂-doelstellingen [kosten zijn meerkosten ten opzichte van referentiescenario, inclusief rentelasten in miljard gulden₁₉₉₅]

CO ₂ -doel na 2020	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
-15%	0,04	0,12	0,40	0,41	0,50	0,44	0,79	1,44	2,56
-45%	„	„	„	„	„	1,89	4,83	12,5	16,8

De kosten voor het bereiken van CO₂-reductie in de hedging-strategie zijn tussen 2000 en 2020 ongeveer driekwart lager dan in de basisberekeningen (tabel 4.1). Na 2030 zijn de kosten hoger om de -15% reductie te bereiken. Voor de -45% doelstelling zijn de kosten ook na 2020 lager dan in de basisberekening. De verklaring hiervoor is dat backstop technieken CO₂-reductie goedkoper maken. Het model geeft de voorkeur aan CO₂-reductie op langere termijn waardoor de kosten op korte termijn aanzienlijk lager zijn.

Conclusie

De beschikbaarheid van relatief goedkope technieken die op termijn de emissies van CO₂ vergaand kunnen verminderen tegen beperkte kosten heeft gevolgen voor een hedgingstrategie. Als technieken met zekerheid

beschikbaar komen hoeven er op kortere termijn minder vergaande maatregelen voor CO₂-reductie te worden genomen. Het blijft overigens optimaal om een zekere hoeveelheid maatregelen te nemen om emissiereductie op de kortere termijn te realiseren.

5. OVERZICHT VAN HEDGING-OPTIES PER SECTOR

Via de modelberekeningen in hoofdstuk 4 is hedging voor CO₂-reductie onderzocht uitgaande van een bestaand MARKAL-model met de daarin aanwezige energietechnieken. In het model is het om praktische redenen slechts ten dele mogelijk om randvoorwaarden die in de praktijk de keuze voor CO₂-reductie-opties beïnvloeden, in detail mee te nemen. Deze randvoorwaarden zijn veelal wel van belang. In dit hoofdstuk worden randvoorwaarden van CO₂-reductie-opties in detail beschouwd.

5.1 Werkwijze en criteria

Om een hedging-strategie verder concreet te maken, moeten eerst concreet de situaties worden aangegeven, waarin hedging van belang is. Dat is bijvoorbeeld bij de bouw van een gebouw of de aanschaf van apparatuur.

Per situatie kan worden beschreven wat over het algemeen al aan CO₂-reductie wordt gedaan en wat er dan wordt nagelaten. Ook kan worden beschreven welke opties op termijn beschikbaar komen en of het dan nog mogelijk is om die opties alsnog toe te passen en tegen welke problemen dan wordt aangelopen. Tenslotte kan worden beschreven hoe die problemen kunnen worden voorkomen, door nu de situatie al geschikt te maken voor toekomstige CO₂-reductiemaatregelen.

Bij de inventarisatie van concrete hedging-opties worden 3 soorten investeringsbeslissingen als hedging-opties getypeerd:

- *Hoge toekomstwaarde hedging-opties.* Het gaat daarbij om feitelijke CO₂-reductiemaatregelen met een hoge toekomstwaarde, veelal omdat er sprake is van consequenties over een lange termijn. Een voorbeeld is zonoriëntatie bij nieuwbouwwijken.
- *Anticiperende hedging-opties.* Randvoorwaarden voor toekomstige CO₂-reductiemaatregelen. Een voorbeeld is een lage temperatuurverwarmingssysteem voor de inpassing van warmtepompen.
- *Uitstel hedging-opties.* Maatregelen die helpen om beslissingen met lange termijn consequenties uit te stellen. Een voorbeeld hiervan is levensduurverlenging van bestaande elektriciteitscentrale.

De inventarisatie is aan de hand van de energievoorzieningsketen behandeld: van energievragende functies, via infrastructuur naar energiebron, met op verschillende niveaus conversietechnologieën. De keuze om alle hedging-opties zo duidelijk een plaats te geven in de energievoorzieningsketen is gemaakt vanwege de verschillende levensduren van delen van die keten, en de interactie tussen CO₂-reductiemaatregelen aan de vraag- en aanbodzijde van de energievoorziening. De keuze voor een bepaald alternatief voor één deel van de energievoorzieningsketen kan gedurende zijn levensduur de alternatieven voor een ander deel beïnvloeden.

De energievragende functies en daarbij behorende lokale conversie-technologieën zullen voor twee sectoren apart worden behandeld:

- Gebouwde Omgeving, dat wil zeggen huishoudens en de utiliteitsbouw (paragraaf 5.2),
- Industrie (paragraaf 5.3).

De transportsector blijft dus buiten beschouwing in deze inventarisatie.

Vervolgens zullen worden besproken:

- Energie-infrastructuur (paragraaf 5.4),
- Elektriciteitsproductiesector (paragraaf 5.5).

Hedging opties zijn geïnventariseerd aan de hand van criteria die het 'hedging-gehalte' van opties bepalen:

1. De beslissing heeft gevolgen over een lange termijn. Het dient te gaan om beslissingen met een effect dat tenminste 15 jaar voortduurt. Hoe langer de effecten van een beslissing merkbaar zijn, hoe relevanter hedging-opties kunnen zijn. Bij de 'hoge toekomstwaarde hedging-opties' ligt de nadruk op dit criterium omdat de invloedstermijn van beslissingen heel groot is (meer dan 50 jaar).
2. Aanzienlijk verschil tussen de relevante alternatieven in CO₂-reductie. Het verschil met alternatieven moet tenminste 10% bedragen. Dit percentage is enigszins afhankelijk van de levensduur van een installatie. Bij een lange levensduur van investeringen mag het verschil ook iets kleiner zijn.
3. De mate waarin onomkeerbare consequenties van de beslissing een rol spelen. Onomkeerbaarheid houdt in dat door de beslissing de keuze voor andere alternatieven wordt verminderd of geheel wordt uitgeschakeld. Als bijvoorbeeld een nieuwbouwwijk wordt aangelegd die niet een goede zon-oriëntatie heeft dan is dit bijvoorbeeld een onomkeerbare beslissing.
4. De mate waarin een optie de flexibiliteit verhoogt en de onomkeerbaarheid dus (deels) wordt verminderd. Bij de 'anticiperende maatregel hedging-opties' en de 'uitstel hedging-opties' ligt de nadruk op dit criterium.

Per sector worden de mogelijkheden voor CO₂-reductie besproken en aan de hedging-criteria getoetst. In één of meerdere tabellen worden de resultaten weergegeven met daarin de belangrijkste CO₂-reductiemaatregelen bekeken vanuit een hedgingstrategie. In de tabel is voor elke CO₂-reductiemaatregel een besparingspercentage (voor individuele opties) opgenomen en de potentiële CO₂-reductie in 2030, die geldt bij het volgen van een hedging-strategie vanaf 2000. Per CO₂-reductiemaatregel staan in de tabellen de daarbij behorende randvoorwaarden met hun invloedstermijn. Het potentieel kan dus bereikt worden, wanneer bij investeringsbeslissingen rekening wordt gehouden met deze randvoorwaarden voor inpassing van de CO₂-reductiemaatregel. De potentiëlen in de tabellen mogen niet bij elkaar worden opgeteld, de verschillende maatregelen sluiten elkaar (deels) uit en opgeteld is het CO₂-reductiepotentieel groter dan de uitstoot van CO₂. In de tabellen worden dus alleen CO₂-reductie maatregelen opgenomen die vanuit een hedging-strategie belangrijk zouden kunnen zijn, omdat ze niet gemakkelijk op ieder moment kunnen worden geïmplementeerd. De tabellen worden gebruikt voor toetsing aan de hedgingcriteria.

Met het besparingspercentage en het potentieel kan de CO₂-reductie t.o.v. het alternatief van de CO₂-reductiemaatregelen worden bepaald. Ook is uit de tabellen de invloedstermijn van de randvoorwaarden af te lezen. Middels deze twee criteria kunnen per sector de belangrijkste hedgingopties worden bepaald en uiteindelijk overall conclusies m.b.t. de mogelijkheden van een hedgingstrategie worden getrokken.

Deze inventarisatie poogt primair een zo volledig mogelijk beeld te geven van hedging-opties. Hierbij is niet ingegaan op de kosteneffectiviteit van concrete hedgingopties. Er kunnen dus nog geen conclusies getrokken worden of het kostentechnisch verstandig is een bepaalde hedgingstrategie te volgen. Dat is een mogelijke tweede stap voor vervolgonderzoek, eerst moet worden geïnventariseerd waar zo'n hedgingstrategie uit zou kunnen bestaan.

Voor het opsporen van hedging-opties wordt dus puur vanuit een invalshoek van flexibiliteit t.o.v. toekomstige CO₂-reductie naar de energievoorzieningsketen gekeken. Dat betekent dat daardoor veel andere aspecten die bij keuzes over onderdelen van de energievoorziening een rol spelen, zoals bijvoorbeeld bewonersacceptatie of concurrentie-strategie van een energiebedrijf, grotendeels buiten beschouwing worden gelaten of slechts kort gememoreerd worden. Bij een situatie-specifieke evaluatie van hedging-opties of een meer gedetailleerde inventarisatie zijn deze andere aspecten natuurlijk wel van belang.

Het overzicht gaat in op hedging-opties en maar beperkt op beleidsinstrumenten met een hedging-gehalte. Beleidsinstrumenten met een hedging-gehalte zijn bijvoorbeeld vergrote R&D-inspanning die er toe bijdragen dat schone energietechnieken op voldoende schaal beschikbaar zijn als gebruik er van nodig mocht blijken. Andere prikkels voor innovatie, zoals risico-deling door de overheid bij toepassing van nieuwe technieken, kunnen ook gezien worden als beleidsinstrumenten met een hedging-gehalte. Nog een ander hedging-beleidsinstrument is het ontmoedigen of reguleren van nieuwe soorten energiegebruik om ontwikkelingen te beheersen die een groei van CO₂-emissies veroorzaken. Een voorbeeld hiervan is het stellen van normen aan installatie en woning voor airconditioning in woningen.

Deze inventarisatie heeft tot doel een duidelijk beeld te geven van de opties die passen binnen een hedgingstrategie, maar niet met welk beleid die opties kunnen worden gestimuleerd.

5.2 Gebouwde omgeving

De CO₂-emissies vanuit de gebouwde omgeving (huishoudens, utiliteitssector, land- en tuinbouw) bedroegen in 1995 ruim 40 Mton. Dit is exclusief de CO₂-emissies voor elektriciteitsgebruik in de gebouwde omgeving.

Om de hedging-opties in de gebouwde omgeving te inventariseren zijn eerst de mogelijke CO₂-reductiemaatregelen besproken voor de verschillende energievragende functies:

- ruimteverwarming (5.2.1),
- warmtapwatervoorziening (5.2.2),
- ruimtekoeling (5.2.3),
- verlichting (5.2.4),
- apparatuur huishoudens (5.2.5),
- apparatuur utiliteitssector (5.2.6).

In subparagraaf 5.2.7 zijn conclusies getrokken omtrent hedging in de gebouwde omgeving.

5.2.1 Ruimteverwarming

Passieve benutting zon

Het stedenbouwkundig plan van een wijk is van groot belang voor de beperking van de vraag naar ruimteverwarming. In dit plan en in de latere planontwikkeling wordt de wijze van verkavelen al vastgelegd. Daarmee wordt bepaald hoe de zonoriëntatie van gebouwen zal zijn en dus ook de mogelijkheden om passief gebruik te maken van zoninstraling. Een goede zonoriëntatie bespaart volgens [18] circa 150 m³ aardgas (ca. 20%) op de ruimteverwarming van een standaardwoning in 1995 (EP=1.4, dus een aardgasverbruik voor ruimteverwarming van 800 m³). Volgens [19] is deze inschatting van de besparing op ruimteverwarming overigens aan de lage kant. De invloedstermijn van een goede oriëntatie op de zon is lang, zeker gedurende de hele levensduur van een gebouw en veelal nog langer omdat een wijk zelden in zijn geheel vervangen wordt. De beslissing over de zonoriëntatie is ook onomkeerbaar. Soms kan een serre nog worden aangebouwd om de zoninstraling iets te vergroten; echter zonder goede zuidoriëntatie blijft de benutting van zoninstraling dan veelal suboptimaal [19]. Ook al is bij nieuwbouw een goede zonoriëntatie gekozen en het gebouwwontwerp hierop aangepast, dan nog is het natuurlijk mogelijk dat door verbouwingen aan een woning of de bouw van een schutting, het groeien van bomen de zoninstraling weer afneemt. Zoninstraling is dus een punt dat ook later, na de bouw, nog aandacht verdient.

Terugdringen transmissieverliezen

De ruimteverwarmingsvraag kan deels worden vermeden bij beslissingen over de constructie van gebouwen, zoals beslissingen over het isoleren van daken, muren, vloeren en ramen van een gebouw. Met de komst van de energieprestatienorm (EPN) is al een redelijke isolatiegraad gegarandeerd, hoewel de EPN ook deels te realiseren is met andere maatregelen dan isolatie, namelijk met efficiënte opwekking van warmte en warmteterugwinning [20]. De nu gebruikelijke isolatie van vloer, spouwmuur, buitenmuur, dak en dubbel glas (R=3) geeft een gemiddeld aardgasgebruik voor ruimteverwarming van eengezins nieuwbouwwoningen van ongeveer 800 m³ per woning. Dit is bij de nu geldende energieprestatie coëfficiënt (EPC) van 1,4. De EPC zal verder aangescherpt worden en zal in het jaar 2000 1,0 bedragen.

Voor de isolatie van muren, daken, vloeren en gevels moet bedacht worden dat de keuze voor een wijze van isolatie, voor de gehele levensduur of in ieder geval tot aan de renovatie van een gebouw (na circa 30 jaar) vastligt. Een traditionele spouwmuur met aan twee zijden stenen, is na de bouw bijvoorbeeld praktisch onbereikbaar en de spouwisolatie kan niet meer worden vervangen door een ander materiaal met een hogere isolatiewaarde. Bij isoleren geldt daarnaast dat doorgaans niet eenvoudig naar buiten toe kan worden uitgebreid. De kosten hiervoor zijn zeer hoog en aansluitingen tussen bijvoorbeeld kozijnen en wanden zijn moeilijk te isoleren. Binnenisolatie gaat ten koste van de ruimte binnen. Dit is doorgaans niet gewenst. Bij vloeren met een kruipruimte kan wel aan de onderzijde nog een isolatievorm worden toegevoegd of worden vervangen. Dakisolatie is in principe ook in veel situaties bereikbaar, hoewel dit doorgaans betekent dat de dakbedekking eerst tijdelijk weggenomen moet worden. De gevel kan bij renovatie worden vervangen.

Het is de moeite waard te bezien of bestaand isolatiemateriaal in spouwmuren in de toekomst toch vervangen zou kunnen worden door materialen met een hogere isolatiewaarde. Dit kan ook relevant zijn aangezien de isolatiewaarden van isolatiematerialen in de loop van de tijd achteruitgaat. Er zijn nieuwe vormen van isolatie in ontwikkeling zoals isolatiepanelen met een dikte van meer dan 15 centimeter en isolatiemateriaal met vulling van speciale gassen of gels. Ook is translucent isolatie materiaal (TIM) in ontwikkeling [21]. Dit laat zonnestraling door en heeft zeer geringe transmissieverliezen. Als de binnenwanden van een gebouw op dezelfde manier zouden zijn geconstrueerd als systeemplafonds, dan zou vervanging van isolatiemateriaal eventueel mogelijk zijn. Dit demontabel maken van muren brengt wel meerkosten met zich mee. Vanuit bouwfysisch oogpunt is men zeer sceptisch omtrent dergelijke flexibele constructies aangezien muren een belangrijke functie hebben om verband te brengen in een woning. Houtskeletbouw is wel meer flexibel en wordt al op behoorlijke schaal toegepast. Houten wandpanelen zijn relatief eenvoudig weg te nemen waardoor de spouw aan de oppervlakte komt. Isolatiemateriaal in een houtskeletwoning kan daardoor veel eenvoudiger worden vervangen.

Voor de isolatie van ramen geldt dat triple-glas iets meer ruimte in het kozijn in beslag neemt en is ook zwaarder zodat zwaarder hang en sluitwerk nodig zal zijn. Beglazing met coating en met edelgasvulling neemt niet meer ruimte dan dubbel glas. Doorgaans bieden de kozijnen voor ramen voldoende ruimte aan meerdere lagen beglazing, er is echter in het verleden ook gebruik gemaakt van dunne stalen kozijnen die niet eens geschikt zijn voor dubbele beglazing. Dergelijke uitvoeringsvormen zouden in de toekomst vermeden moeten worden. Een ander aspect is, dat bij toepassing van 'electrochrome windows' of 'smart windows', een elektrische aansluiting bij het raam nodig is. Voor de benodigde elektrische kabel zou alvast een loze leiding gelegd kunnen worden. Deze aansluiting zou eventueel ook functioneel kunnen zijn voor de bediening van zonwering.

Naarmate muren, daken, vloeren en ramen bij nieuwbouw of renovatie beter geïsoleerd worden, wordt het steeds belangrijker dat de warmteverliezen bij deuren en kozijnen ook beperkt worden. Dat betekent dat ook deuren een hogere isolatiewaarde moeten hebben en de kieren bij kozijnen goed moeten worden gedicht. Deuren en kozijnen hebben een lange

levensduur. Tochtstrips hebben een korte levensduur. De bereikbaarheid van tochtstrips vergroot het gemak van vervanging. Hiermee kan eventueel rekening worden gehouden bij het plaatsen van openslaande deuren en ramen.

Terugdringen ventilatieverliezen

Een tochtportaal vermindert de warmteverliezen in de winter en met name op dagen met veel wind. De besparing die hiermee gerealiseerd kan worden is sterk situatie-afhankelijk, maar wordt ruwweg ingeschat op 10% van het huidige energiegebruik voor ruimteverwarming [4]. Als bij de bouw van een woning geen tochtportaal aanwezig is kan dit eventueel van buiten worden aangebouwd, of de bestaande entreehal kan worden gesplitst. Rekening houden met het eventueel later plaatsen van een tochtportaal, zal de mogelijkheden voor aanpassingen vergroten, als dit nodig c.q. wenselijk mocht blijken.

Ook kan de vraag naar ruimteverwarming worden beperkt door warmteterugwinning. Het rendement van warmteterugwinning uit de gecontroleerde ventilatielucht kan al oplopen tot 85%; daarmee zijn momenteel besparingen tot 30% op het energiegebruik voor ruimteverwarming realiseerbaar. Warmteterugwinning kan alleen in gebouwen met een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem, dus zowel aanvoer van buitenlucht als afvoer van ventilatielucht. De voor warmteterugwinning benodigde kanalen hebben een levensduur van ongeveer 50 jaar. De benodigde ventilator heeft een levensduur van circa 15 jaar. Een mechanisch ventilatiesysteem met warmteterugwinning of luchtverwarming moet eigenlijk al bij het ontwerp van een gebouw worden meegenomen. Het achteraf aanbrengen van dergelijke systemen is meestal niet eenvoudig. Een kruipruimte onder een woning biedt enige mogelijkheden voor luchtafvoer en -toevoersystemen. Indien ruimte aanwezig is tussen plafonds en vloeren kunnen ventilatiesystemen ook op andere verdiepingen worden aangelegd dan de begane grond. Ventilatiesystemen met kleine diameter vormen doorgaans geen alternatief vanwege de geluidsproductie en het hogere elektriciteitsverbruik voor de ventilatie.

Terugdringen stilstandsverliezen ketel

Gasketels zijn in Nederland de standaard voor ruimteverwarming. In nieuwbouw worden HR-ketels toegepast. Ketels hebben een waakvlam of een elektrische ontsteking. Een elektrische ontsteking kan ongeveer 100 m³ [22] besparen. De kosten om een ketel direct uit te voeren met een elektrische ontsteking zijn beperkt. Wanneer de ketel later wordt aangepast zullen de kosten voor montage aanzienlijk zijn. Een elektrische ontsteking kan daardoor beter direct worden aangebracht.

Warmtepompen/micro-WKK

Conversietechnologieën hebben gemiddeld een levensduur van 15 jaar en worden dus tijdens de levensduur van gebouwen enige malen vervangen. De invloedstermijn is dus relatief kort. Om te voorzien in de vraag naar ruimteverwarming in gebouwen zijn naast de gasketels echter ook andere lokale conversie-technologieën beschikbaar, zoals elektrische of gasgestookte warmtepompen of micro-warmte/kracht. Maar er bestaat nu nog weinig flexibiliteit om naar een dergelijke optie over te stappen. Of na

de bouw nog nieuwe technologieën kunnen worden ingepast is afhankelijk van meerdere randvoorwaarden, zoals het elektriciteitsnet, ruimte voor een warmtebuffer, en warmtebron ten bate van warmtepomp en het CV-systeem.

Als een elektrische warmtepomp wordt ingepast, moet de elektrische infrastructuur over voldoende capaciteit beschikken. Dat kan een reden zijn om nu al elektriciteitsnetten in nieuwbouwwijken zo te dimensioneren dat later elektrische warmtepompen kunnen worden gebruikt. Er mag verwacht worden dat de elektriciteitsaansluitingen bij woningen bij een gemiddelde warmtebehoefte voldoende gedimensioneerd zijn voor een elektrische warmtepomp. Echter als elektrische weerstandsverwarming bij extreme koude in de back-up warmte-opwekking voorziet, zal de elektriciteitsaansluiting voor een woning veelal te klein zijn. Op wijkniveau is er een kans op te lage dimensionering als de hele wijk elektrische warmtepompen gebruikt door gelijktijdigheid in de vraag.

Als micro-warmte kracht geïnstalleerd gaat worden, zal het elektriciteitsnet als buffer worden gebruikt en moet het net geschikt zijn voor teruglevering.

Warmtepompen en micro-warmte/kracht zullen een redelijk grote warmtebuffer nodig hebben. Voor veel conversietechnologieën spelen opslagsystemen een grote rol. Hier speelt het aspect ruimte weer mee. Vaak gaat het namelijk om een buffer van 100 tot 200 liter die een zeker ruimtebeslag heeft. Doorgaans is de plaatsing van een dergelijk buffer niet onoverkomelijk. Bij wijkverwarming of stadsverwarming kan ook gedacht worden aan energieopslag op wijkniveau. Daarvoor zou open ruimte gereserveerd kunnen worden in een wijk.

Bij toepassing van warmtepompen moet er ergens een warmtewisselaar geplaatst kunnen worden om warmte uit een bron (bodem, omgevings- of ventilatielucht) te kunnen onttrekken. Om warmte uit ventilatielucht te kunnen onttrekken is een gebalanceerd ventilatiesysteem nodig. In Nederland worden veelal heipalen gebruikt om verzakking van woningen te voorkomen en in sommige delen van het land is het nodig dat er behoorlijk diep geheid wordt. De heipalen zouden gebruikt kunnen worden als warmtewisselaars als de bodem als warmtebron wordt gebruikt, maar deze moeten dan al wel worden voorzien van leidingen voordat ze geplaatst worden. Heipalen zijn onlangs al gebruikt voor de verbinding tussen de warmtebron en een warmtepomp bij een project in Heerhugowaard. Al met al kunnen van te voren aangepaste heipalen, de boorkosten van aparte bodemwarmte-wisselaars of een doubletsysteem ten behoeve van warmtepompen geheel uitsparen.

Voor het rendement van een warmtepompsysteem is het belangrijk dat het wordt aangesloten op een lage temperatuur verwarmingssysteem. Als bodemwarmte de warmtebron is voor een individuele warmtepomp, dan is de 'seasonal performance factor' (SPF, rendement van een elektrische warmtepomp) bij een 90/70 CV-systeem⁴ ongeveer 30% lager dan bij een

⁴ Hierbij is de temperatuur van het water dat de CV-leiding in gaat vanaf de warmtebron 90°C, de temperatuur van het water in de retourleiding is 70°C.

60/40 systeem. Daarmee is het rendement al snel zo laag dat het voordeel ten opzichte van een HR-ketel gering is. Een lage temperatuur verwarmingssysteem met vergrote radiatoren, of vloer- of luchtverwarming is dus een belangrijke randvoorwaarde bij de toepassing van warmtepompen. Het is verstandig om dergelijke systemen direct bij nieuwbouw aan te brengen omdat inpassing in het gebouw naderhand zeer ingrijpend is.

Waterstofinzet in ketels

Tenslotte kan waterstof of een mengsel van aardgas en waterstof worden ingezet in gasketels in plaats van aardgas. Waterstof kan geproduceerd worden met lage of geen CO₂-emissies uit met kernenergie of met duurzame bronnen geproduceerde elektriciteit of uit fossiele brandstoffen door bijvoorbeeld steam reforming en vervolgens de CO₂ af te vangen en op te slaan [23]. Het gasdistributiesysteem (zie paragraaf 5.5) en de brander van een gasketel moeten geschikt worden gemaakt voor waterstof. Het is mogelijk om nu al katalytische branders te plaatsten die zowel geschikt zijn voor aardgas als voor waterstof. Deze katalytische branders zijn tevens geschikt voor toepassing van gas met een sterk wisselend methaangehalte. Aangezien niet verwacht wordt dat waterstof de komende 20 jaar al in pure vorm zal worden ingezet (gezien de hoge kosten van waterstof), is het voorbereiden van de branders nog niet een belangrijke hedging-optie. Bij geringe bijmenging van waterstof in de gasinput (tot ca 10%) lijken er geen aanpassingen nodig.

Conclusies

In tabel 5.1 zijn de CO₂-reductiemaatregelen voor ruimteverwarming in de gebouwde omgeving weergegeven die vanuit een hedgingstrategie belangrijk zouden kunnen zijn. De besparing betreft de besparing op gas voor ruimteverwarming van woningen en kantoren. Uit vergelijking van de besparingen en invloedstermijnen in de tabel komen als hedgingopties bijvoorbeeld naar voren een zongerichte verkaveling en een daarop aangepast woningontwerp. Ook isolatie verdient vanuit hedging-oogpunt de nodige aandacht. Daarbij zijn twee strategieën mogelijk. Bij nieuwbouw kan al direct zo goed mogelijk worden geïsoleerd of gezorgd moeten worden voor een goede bereikbaarheid van vloeren en spouwmuren etc., zodat ook later de isolatiegraad van een woning nog verder kan worden verbeterd. Ook een mechanisch ventilatiesysteem doet qua besparing door warmte-terugwinning en invloedstermijn niet onder voor deze opties. Een lage temperatuur CV-systeem houdt de toekomstige mogelijkheden voor warmtepompen open.

Tabel 5.1 *Analyse hedging ruimteverwarming in gebouwde omgeving*

CO ₂ -reductie maatregel	Besparingspercentage [%]	Potentiële CO ₂ -reductie Nederland 2030 [Mton/jr]	Randvoorwaarden	Invloeds-termijn [jaren]
Passieve benutting zon	10-20	0,5	woningontwerp, zongerichte verkaveling	100
				200
Terugdringen transmissieverliezen, isolatie gebouwschil	20-40	1,0	bereikbaarheid, ruimte	100
Terugdringen ventilatieverliezen, bouwkundig	10	0,3	ruimte voor tochtportaal	100
Terugdringen ventilatieverliezen, installatietechnisch warmteterugwinning	30	1,0	gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem	100
Terugdringen stilstandsverliezen ketel	10	0,3	elektrische ontsteking	15
Elektrische warmtepomp	15-30	0,7	capaciteit elek.net	40
			warmtewisselaar (bijv. heipalen)	100
			lage temperatuur verwarmingssysteem	100
Micro-WKK	5-10	0,3	teruglevering elek.net	40

5.2.2 Warm tapwatervoorziening

De energievragende functie 'warm tapwater' wordt voor woningen steeds belangrijker, maar is ook voor sommige sectoren in de commerciële en dienstensector van belang.

Beperking leidingverliezen

Beperking van de vraag naar warm tapwater begint bij het gebouwontwerp. In het gebouwontwerp wordt vaak al de plaats van de voorzienende installatie t.o.v. de vraag vastgelegd en wordt bij de bouw de leidinglengte en leidingdikte bepaald. Een relatief korte leidinglengte tot het meeste gebruikte tappunt (de keuken) en isolatie van leidingen kan circa 20% besparen op de warm tapwatervraag van een gemiddeld huishouden [7]. De beslissingen rondom de plaatsing van de voorzienende installatie en leidingen zijn niet perse onomkeerbaar, maar deze worden in de praktijk maar zelden aangepast. Ook is het belangrijk de leidingen goed te isoleren. Alleen als de leidingen buiten de muren lopen, kan dit redelijkerwijs nog later worden aangepast.

Beperking watergebruik

Ook kan de vraag naar warm tapwater worden beperkt door de toepassing van waterbesparende douchekoppen en kranen. Vaak kan door kleine aanpassingen het debiet worden beperkt, en zo'n 20% op het energiegebruik voor warm tapwaterbereiding worden bespaard [7]. Gezien het feit dat dit altijd nog kan, is deze optie voor hedging niet zo van belang.

Zonneboiler

Warm tapwater kan in plaats van met een HR-ketel ook met een zonneboiler of warmtepompboiler worden voorzien. Deze twee opties geven een relatief hoge besparing t.o.v. de HR-ketel, maar de levensduur is relatief kort (15 jaar). Toepassing van een duurzame technologie als een zonneboiler, vereist oriëntatie op de zon wanneer gebouwen met schuine daken worden uitgevoerd. Op platte daken kan altijd nog een stellage worden gebouwd, die op juiste wijze op de zon kan worden gericht. Die zonoriëntatie wordt vastgelegd in het stedenbouwkundig ontwerp en ligt daarna voor de gehele levensduur van een gebouw vast. Een andere randvoorwaarde, die de kosten van een zonneboiler kunnen beperken is door bij aanschaf van een CV-ketel een model te kiezen met een boilerregeling. Wanneer de collector voor een zonneboiler als dakgeïntegreerd systeem wordt toegepast, kan dit alleen direct bij de bouw tot kostenbesparingen leiden. Een voorwaarde voor de installatie van een zonneboiler is ook ruimte voor een opslagvat.

Warmtepompboiler

De warmtepompboiler heeft een warmtebron nodig, vaak wordt hiervoor de uitgaande ventilatielucht gebruikt. Dat is alleen mogelijk in een woning met een mechanisch ventilatiesysteem. Dit wordt al bij het ontwerp van de woning bepaald.

Conclusies

In tabel 5.2 zijn de CO₂-reductiemaatregelen voor warm tapwatervoorziening in de gebouwde omgeving weergegeven die vanuit een hedgingstrategie belangrijk zouden kunnen zijn. De besparing betreft de besparing op gas voor warmtapwater bereiding, voornamelijk in woningen. Weer komen hier zongericht verkavelen en een mechanisch ventilatiesysteem als hedging-opties naar voren. Ook moet bij het ontwerp van een gebouw gezorgd worden voor een zo kort mogelijke leidinglengte en moeten bij de bouw de leidingen goed worden geïsoleerd.

Tabel 5.2 *Analyse hedging bij warmtapwatervoorziening in gebouwde omgeving*

CO ₂ -reductie maatregel	Besparingspercentage [%]	Potentiële CO ₂ -reductie Nederland 2030 [Mton/jr]	Randvoorwaarden	Invloedstermijn [jaren]
Beperking leidingverliezen	20	0.3	korte leidinglengte keuken, bij ontwerp en isolatie bij bouw	100
Zonneboiler	50	0.8	zongericht verkavelen	200
Warmtepomp-boiler	15-30	0.4	mechanisch ventilatiesysteem	100

5.2.3 Ruimtekoeling

Passieve koeling

De energievragende functie ruimtekoeling is vooral van belang in de utiliteitssector voor kantoren. Maar ook in woningen neemt ruimtekoeling door middel van ventilatoren en airconditioning toe. Binnen het Nederlandse klimaat bestaan er tal van mogelijkheden om de vraag naar ruimtekoeling in gebouwen te vermijden. Daarvoor moet met de bouw rekening worden gehouden met een drietal factoren: doorspuikbaarheid, zonwering en massa. De doorspuikbaarheid maakt afvoer van overtollige warmte in de zomernacht via een passief koelsysteem mogelijk. Zonwering vermindert de warmtebelasting in sterke mate. Een relatief grote massa van een gebouw fungeert als warmteregulator die de binnentemperatuur langdurig op hetzelfde niveau kan houden. Massa wordt al met het ontwerp van het gebouw vastgelegd. Zonwering en doorspuikbaarheid zijn tot op zekere hoogte later te beïnvloeden. Bij doorspuikbaarheid spelen elementaire zaken als inbraak ongevoelig hang- en sluitwerk overigens ook een rol. Door bij de aanschaf van elektrische apparatuur en verlichting te kiezen voor efficiëntie, kan de interne warmteproductie ook nog beïnvloed worden [24]. Uiteindelijk kan een aanzienlijke besparing op kosten van klimaatbeheersing worden bereikt als een gebouw door de genoemde combinatie van maatregelen geen koelsysteem nodig heeft.

Absorptiekoeling/koudeopslag

Mogelijkheden om op een efficiënte manier in de koelvraag te voorzien zijn: absorptiekoeling, efficiëntieverbetering aan de motoren en ventilatoren van de airconditioning installatie en koudeopslag. De meeste van deze maatregelen liggen in de installatiesfeer en hebben daarmee een korte invloedstermijn. Voor absorptiekoeling moet echter wel een geschikte koudebron aanwezig zijn. Koudeopslag is waarschijnlijk iets eenvoudiger in een nieuwbouwsituatie toe te passen. Gebleken is dat koude-opslag ook later kan worden aangebracht.

Conclusies

In tabel 5.3 zijn de CO₂-reductiemaatregelen voor warm tapwatervoorziening in de gebouwde omgeving weergegeven die vanuit een hedgingstrategie belangrijk zouden kunnen zijn. De besparing betreft de besparing op

de elektriciteitsvraag voor ventilatie/koeling/airconditioning van kantoren. Daaruit blijkt dat met name passieve koeling veel besparing op kan leveren, maar al bij het gebouwoontwerp moet worden meegenomen.

Tabel 5.3 *Analyse hedging bij ruimtekoeling in gebouwde omgeving*

CO ₂ -reductie maatregel	Besparingspercentage [%]	Potentiële CO ₂ -reductie Nederland 2030 [Mton/jr]	Randvoorwaarden	Invloeds-termin [jaren]
Passieve koeling	100	1,0	massa, doorspuibaarheid, zonwering, efficiënte verlichting	100 30 15 10
Absorptiekoeling/ koudeopslag	50	0,5	koudebron	15

5.2.4 Verlichting

Benutting daglicht

De energievraag voor verlichting kan in eerste instantie beïnvloed worden door het gebouwoontwerp. Een goede daglichtinval in de utiliteitssector voorkomt de noodzaak van kunstlicht gedurende de daglichtperiode. Voor daglichtbenutting zijn drie factoren van belang: de diepte van vertrekken, de hoogte van ramen en de hoogte van verdiepingen. Dat zijn factoren die alle afhankelijk zijn van onomkeerbare beslissingen, die bij het ontwerp worden genomen.

Spaarlampen

Vervolgens kunnen spaarlampen, zoals fluorescentielampen worden toegepast om het energiegebruik voor verlichting met circa 25% te beperken [4]. Conventionele gloeilampen zijn nog altijd in een veel grotere verscheidenheid verkrijgbaar dan spaarlampen. Het vergroten van de verscheidenheid in het aanbod van spaarlampen kan de toepasbaarheid vergroten. Nog niet alle armaturen zijn geschikt voor spaarlampen. De levensduur van armaturen en lampen is niet erg lang (10 jaar) en daarom is deze optie voor hedging minder van belang.

Regelsystemen

Regelsystemen kunnen ook veel besparing opleveren (c.a. 20% [4]). Aanwezigheid-detectie, tijdschakeling en daglicht afhankelijke regelingen kunnen in verschillende situaties zorgen voor een efficiënt gebruik van verlichtingssystemen. Door de snelle ontwikkelingen op het gebied van de elektronica komen er steeds meer geavanceerde regelsystemen op de markt. De hiervoor benodigde infrastructuur zou alvast kunnen worden aangelegd, maar in principe kunnen dergelijke systemen altijd nog worden toegepast.

Good housekeeping

Bij good housekeeping, energiebesparend gedrag, lijkt hedging niet belangrijk, omdat er geen grote investeringen in kapitaal mee gemoeid zijn. Het licht uit doen, is in principe gratis. Wel is belangrijk bij het ontwerp van

een gebouw rekening te houden met de randvoorwaarde dat gebruikers zo eenvoudig mogelijk zelf invloed moeten kunnen hebben op het energiegebruik.

Conclusies

In tabel 5.4 zijn de CO₂-reductiemaatregelen voor verlichting in de gebouwde omgeving weergegeven die vanuit een hedgingstrategie belangrijk zouden kunnen zijn. De besparing betreft de besparing op de elektriciteitsvraag voor verlichting van kantoren. Eigenlijk is dat alleen daglichtbenutting, omdat de relatief hoge besparing daarvan al bij het gebouwontwerp voor de hele levensduur van het gebouw wordt vastgelegd.

Tabel 5.4 *Analyse hedging bij verlichting in gebouwde omgeving*

CO ₂ -reductie maatregel	Besparingspercentage [%]	Potentiële CO ₂ -reductie Nederland 2030 [Mton/jr]	Randvoorwaarden	Invloeds-termijn [jaren]
Daglichtbenutting	70	1,5	vertrekdiepte, raamhoogte, verdiepingshoogte	100

5.2.5 Huishoudelijke apparatuur

Energiebesparende gebruiksapparatuur bestaan er voor veel verschillende functies. Voorbeelden zijn zuinige koelkasten, hotfill wasmachines, en gasgestookte wasdrogers.

Koelkasten/vriezers

De goedkoopste manier om koelkasten zuiniger te maken is door de isolatie van de wanden en onder- en bovenkant breder te maken. Ten opzichte van isolatie van nieuwbouwwoningen is de isolatie van koelkasten en vriezers nog altijd stuitend laag [25]. Echter koelkasten met meer isolatie zijn breder en hebben dus ook meer ruimte nodig (66 cm breed in plaats van standaard 60 cm breed). Keukens worden standaard geplaatst met 60 cm breedte beschikbaar voor de koelkast. Indien nieuwe keukens tenminste 66 cm ruimte geven voor koelkasten en vriezers, kunnen de met meer isolatiemateriaal uitgevoerde koelkasten ook op grotere schaal geplaatst worden. Als verbeterde isolatiematerialen (vacuümisolatie) hun intrede doen voor de isolatie van koelkasten, wordt het creëren van extra ruimte minder relevant.

Wasmachines en -drogers

Voor hotfill-wasmachines of gasgestookte wasdrogers is geen extra ruimte nodig, die apparaten zijn van buiten precies hetzelfde als hun conventionele elektrische tegenhangers. Voor deze apparaten is wel een aansluiting nodig op warm tap of CV-water of gas. Die aansluiting zou alvast gemaakt kunnen worden bij de bouw van een woning. Een manier om het energiegebruik van wasdrogers te vermijden is door de was op andere wijze te drogen dan met wasdrogers. Eventueel kan dit vergemakkelijkt worden door de aanwezigheid van overdekte balkons of serres in woningen.

Conclusies

In tabel 5.5 zijn de CO₂-reductiemaatregelen voor huishoudelijke apparatuur weergegeven die vanuit een hedgingstrategie belangrijk zouden kunnen zijn. De besparing betreft de besparing op de elektriciteitsvraag voor koelkasten/vriezers en de primaire energiebesparing bij hot-fill/CV wasmachines en drogers. Apparatuur heeft niet zo'n lange levensduur en ook de randvoorwaarden vaak niet. Alleen warmwateraansluitingen kunnen bij de bouw tegen geringe kosten worden ingepast terwijl het mogelijkheden biedt gedurende de totale levensduur van een gebouw.

Tabel 5.5 *Analyse hedging bij huishoudelijke apparatuur in gebouwde omgeving*

CO ₂ -reductie maatregel	Besparingspercentage [%]	Potentiële CO ₂ -reductie Nederland 2030 [Mton/jr]	Randvoorwaarden	Invloedstermijn [jaren]
Zuinige koelkasten/vriezers	40	0.2	ruimte (breedte)	20
Hot-fill/CV wasmachines en drogers	40	0.1	warm tapwater/ CV-aansluiting	100

5.2.6 Apparatuur utiliteitssector

In kantoren wordt o.a. door computers, monitors, kopieerapparaten en kofiemachines elektriciteit gebruikt. Het betreft hier steeds apparatuur die niet erg lang meegaat. Via 'stand by' kunnen deze apparaten aanzienlijk op hun energiegebruik besparen. De elektronica hiervoor kan het beste al vanaf het begin worden aangebracht. Verder is de hoeveelheid warmte die deze apparaten produceren belangrijk. Als apparatuur nu al zo efficiënt mogelijk is, kan een nieuw gebouw met een kleiner gedimensioneerd koelsysteem worden uitgevoerd.

Conclusies

Apparatuur in de utiliteitssector heeft een korte levensduur; efficiëntere apparatuur kan altijd nog worden toegepast.

5.2.7 Conclusie hedging in de gebouwde omgeving

Uit deze paragraaf over hedging in de sector gebouwde omgeving blijkt dat met name bouwkundige voorzieningen als benutting van zoninstraling, isolatie, passieve koeling, mechanische ventilatie en lage temperatuurverwarming nodig zijn voor een hoge potentiële CO₂-reductie, maar een lange invloedstermijn hebben.

Uiteindelijk betekent het volgen van een hedgingstrategie in de gebouwde omgeving een nieuwe manier van ontwerpen, zowel op stedenbouwkundig als bouwkundig niveau, om mogelijkheden voor vergaande CO₂-reductie in de toekomst open te houden.

Een goed voorbeeld is de opmars van materialen met een hogere isolatiewaarde. Om van die technologische ontwikkeling ook later nog

profijt te hebben, zou in het ontwerp van gebouwen de gebruikte isolatie bereikbaar en vervangbaar moeten zijn. Dat verhoogd de flexibiliteit.

Naast dit soort mogelijkheden om een ontwerp de flexibiliteit te verhogen, geldt voor een aantal zaken ook 'nu of nooit', het ontwerp is zeer bepalend voor de energievraag van gebouwen gedurende hun hele levensduur.

5.3 Industrie

5.3.1 De betekenis van hedging voor de industrie

In de vorige paragraaf is ingegaan op hedging-strategieën in de gebouwde omgeving. Dit hoofdstuk gaat in op hedging in de industrie. Een hedging-strategie in de industrie vergt een andere aanpak dan een hedging-strategie in de gebouwde omgeving. Daar is een aantal redenen voor:

- er is een beperkt aantal bedrijven die een groot deel van de CO₂-emissies uit de industrie veroorzaken,
- het aantal alternatieven bij beslissingen is doorgaans kleiner,
- de industrie heeft een internationaal karakter.

De achtergrond hiervan wordt hieronder nader uitgelegd.

Er is onderscheid te maken tussen de kleine en middelgrote energieverbruikende bedrijven en de grote energieverbruikende bedrijven. De eerste groep is in het algemeen vergelijkbaar met de gebouwde omgeving en kan op een zelfde manier aangepakt worden. Het gaat dan om functies zoals verlichting, verwarming en koeling. De bulk van de CO₂ emissies in de industrie komt echter voor rekening van de zware industrie. Voor deze industrieën wegen de kosten van de infrastructuur in het algemeen niet op tegen de jaarlijkse energiekosten. Een belangrijke, op korte termijn te realiseren optie voor reductie van CO₂ emissies in deze sector, namelijk CO₂ verwijdering, kan waarschijnlijk op alle locaties worden toegepast. Een locatie dicht bij een leeg gasveld zou eventueel nog tot iets lagere kosten leiden dan lokale opslag in aquifers die bijna overal gerealiseerd kan worden, maar de verschillen zijn maar klein.

In Nederland worden per jaar 90.000 woningen gebouwd. Bij iedere woning kan afzonderlijk een investeringsbeslissing worden genomen. In de industriector als geheel gaat het wellicht om 1 tot 5 belangrijke investeringsbeslissingen per jaar. Belangrijk, in die zin dat het gaat om beslissingen die bepalend zijn voor het grootste deel van de toekomstige CO₂-emissies. Als gevolg van dit verschil is het veel eenvoudiger om in de gebouwde omgeving op kleine schaal te experimenteren met nieuwe techniek. De risico's zijn veel groter bij beslissingen in de industrie vanwege hun veel ingrijpendere gevolgen.

Op dit moment zijn er per tak in de zware industrie in het algemeen maar één of twee technieken die gebruikt worden om een bepaald product te maken. Als er geen alternatieven bestaan, kan ook niet gemakkelijk 'gehedged' worden bij investeringsbeslissingen. Hedging heeft dan vooral het

karakter om R&D-trajecten in te zetten om op termijn nieuwe technieken beschikbaar te hebben.

Een ander belangrijk verschil tussen de gebouwde omgeving en de industrie is dat industrie in het algemeen ook op andere plaatsen op de wereld kan worden gehuisvest. Zo zal het verplaatsen van een aluminium-smelter naar IJsland resulteren in een aanzienlijke CO₂-reductie, als daarmee een kolencentrale in Nederland kan worden gesloten. In de gebouwde omgeving is er geen vergelijkbare internationale component. Er is hier aangenomen dat reallocatie-beslissingen buiten het zichtveld liggen van wat de Nederlandse overheid als 'hedging'-opties beschouwd.

Verder is een belangrijk verschil tussen de gebouwde omgeving en de industrie de technologische levensduur van de investering. In de gebouwde omgeving gaat het om een tijdsduur van 50-100 jaar. In de industrie gaat het om een beslissing voor 15-30 jaar. Het heeft dus, behalve voor R&D-inspanningen, op dit moment minder zin om te 'hedgen' in de industrie, indien pas na 2020 een significante emissie-reductie wordt verwacht. Aan de andere kant heeft de locatie van de industrie belangrijke consequenties voor energiegebruik. Tot op zekere hoogte is het immers mogelijk om energiestromen van verschillende industrieën te integreren, zodat de ene industrie bijvoorbeeld restwarmte gebruikt uit een andere industrie. Verder kan de locatie van een industrie ten opzichte van verbindingswegen met toeleverende en afnemende industrie consequenties hebben voor transport en daarmee voor energiegebruik.

De zware industrie produceert vooral materialen. Materialen kunnen na hun gebruik in producten weer gerecycled worden of verbrand worden voor energierterugwinning. Daarmee kan het huidige gebruik van materialen grote consequenties hebben voor het industriële energiegebruik voor de komende decennia. Er is dus sprake van een verband tussen de huidige materialenproductie en de toekomstige emissies. Sommige producten zijn beter te recyclen doordat ze bijvoorbeeld goed demontabel zijn of vooral uit één materiaal vervaardigd zijn zonder veel 'vervuiling' met andere materialen. In de auto-industrie is al een trend waarneembaar naar meer verhoogde recyclebaarheid van onderdelen. Verhogen van de recyclebaarheid van producten kan een aantrekkelijk hedging-optie zijn.

Uit 'hedging'-optiek zou het aantrekkelijk kunnen zijn om materialen met hoge energie-inhoud op korte termijn in versterkte mate op te slaan in producten dan nu gebeurt, zodat op lange termijn voldoende materiaal beschikbaar is om te recyclen. Indien een industrie slechts moet voldoen aan een maximale uitstoot van CO₂ in één bepaald jaar, dan zou het mogelijk interessant kunnen zijn om in jaren voorafgaand aan dat jaar enige voorraad op te bouwen waardoor de productie iets kan worden verminderd in het jaar dat de CO₂-uitstoot is gemaximeerd. Indien een dergelijke strategie gecombineerd kan worden met groot onderhoud of retrofit-werkzaamheden, kan een dergelijke strategie kosteneffectief zijn. In het algemeen lijken dergelijke strategieën echter duur en moeilijk uitvoerbaar.

5.3.2 Hedging-opties per sector

Tabel 5.1 geeft een overzicht van het beperkte aantal sectoren dat verantwoordelijk is voor de bulk van de industriële CO₂-emissies. De CO₂-emissies zijn in deze tabel toegerekend aan de producten die in de belangrijkste processen worden gemaakt. Uit de tabel blijkt dat 6 (groepen van) producten verantwoordelijk zijn voor tweederde van de CO₂ emissies. Hierbij moet echter aangetekend worden dat de CO₂-emissies die bij de processen zelf optreden in bepaalde gevallen aanzienlijk lager liggen. De CO₂-emissies in tabel 1 omvatten namelijk ook de bovenstroomse en benedenstroomse emissies. Zo worden de restgassen uit de ijzerproductie verkocht om er elektriciteit mee op te wekken. De aluminium-industrie koopt grote hoeveelheden elektriciteit. In beide gevallen kan een beslissing in de ene sector (staal resp. aluminium) grote consequenties hebben voor de CO₂-emissies in de andere sector (elektriciteitsopwekking). De petrochemie gebruikt olie vooral als grondstof voor langcyclische koolstofverbindingen zoals kunststoffen, die pas na decennia tot CO₂-emissie zullen leiden.

Tabel 5.6 *Industriële CO₂-emissies (inclusief indirecte emissies), schatting ECN 1995*

Sector	Product	GST+EVB ² [PJ/jaar]	Emissie [Mton/jaar]
Basismetaleel	IJzer	120	10
Basismetaleel	Aluminium	25	5
Petrochemie	Monomeren/BTX ¹	360	25
Kunstmest	Ammoniak	110	6
Bouwmaterialen	Cement	4	1
Papier en karton	Papier	48	3
Overig (excl. raffinaderijen)	333	24	
Totaal		1000	74

¹ BTX = Benzeen, Toluene, Xyleen

² GST+EVB = Grondstoffen- + energiegebruik

De zes producten en de optie warmte-cascading zullen afzonderlijk worden besproken.

IJzer

De productie van ijzer vindt in Nederland alleen plaats bij Hoogovens. Met behulp van twee hoogovens wordt uit ijzererts, cokes en kolen vloeibaar ijzer gemaakt. In 2005 en 2010 is telkens een hoogoven aan vervanging toe. Eén cokes-oven zal naar verwachting binnenkort gesloten worden, de andere kan nog mee tot 2010. De levensduur van een cokes-oven is 30-40 jaar, de levensduur van een hoogoven is 15 jaar. 2010 wordt dus een belangrijk jaar voor de toekomstige CO₂-emissie van de Hoogovens voor de periode tot 2050. Recent is aan Hoogovens in het kader van het CO₂-reductieplan een subsidie toegekend om een nieuw proces, de Cyclone Converter Furnace (CCF) verder te ontwikkelen. Als deze ontwikkeling slaagt, neemt de energie-efficiëntie van de ijzerproductie met 20% toe, omdat de erts niet meer geagglomereerd hoeven te worden en omdat kolen gebruikt kunnen worden in plaats van cokes.

Er bestaat een aantal opties om de CO₂-emissies nog verder te reduceren [26]:

- elektrostaal op basis van schroot (potentieel: 8 Mt CO₂),
- elektrostaal op basis van sponsijzer (ofwel Direct Reduced Iron, DRI) (potentieel: 5 Mt CO₂),
- vervang kolen door houtskool (potentieel: 4 Mt CO₂),
- CO₂-verwijdering (potentieel: 10 Mt CO₂).

De eerste twee opties vergen een overstap naar een compleet nieuwe techniek. De laatste twee opties kunnen zowel bij de hoogoventechniek als bij de CCF binnen één of twee jaar worden geïntroduceerd. Het gaat wel om opties die eerst nog grootschalig moeten worden getest. Het uitvoeren van dergelijke testen zou een hedging-optie kunnen zijn. Voor de eerste optie geldt dat extra recycling in Nederland ten koste zal gaan van recycling elders op de wereld. Het gevolg is wel een daling van de Nederlandse CO₂-emissies, maar geen daling van de mondiale emissies. Het is onduidelijk of het nationale beleid zich in een dergelijke strategie kan vinden. Deze optie wordt daarom hier niet verder geanalyseerd. Wat overblijft is de DRI-optie. DRI wordt gemaakt uit ijzererts met behulp van aardgas. Het is een substitoot voor schroot, maar is op dit moment nog aanzienlijk duurder. Het zou een hedging-optie kunnen zijn DRI op de wereldmarkt te kopen en bijvoorbeeld langlopende contracten te sluiten met producenten in Venezuela of Azië [27].

Samenvattend lijkt het voorlopig niet nodig uit hedging-optiek andere investeringsbeslissingen te nemen voor wat betreft de ijzerproductie. Het kan wel nuttig zijn het onderzoek met betrekking tot houtskool en CO₂-verwijdering ook voor deze sector uit te breiden. Omdat een sterkere groei van elektrostaal verwacht wordt in West Europa, zou het aantrekkelijk kunnen zijn deze techniek in Nederland te bevorderen. Een dergelijk industriebeleid heeft echter een veel grotere reikwijdte dan het CO₂-beleid.

Aluminium

In Nederland staan een tweetal bedrijven die uit alumina aluminium maken: Aldel in Delfzijl en Pechiney in Vlissingen. Voor Aldel is reeds de sluiting aangekondigd. De beslissing voor de Pechiney smelter valt rond 2010 [26]. Aluminiumsmelters gaan ongeveer 30 jaar mee. Recycling van aluminium uit Nederlands afval kan nog met 30-35% stijgen indien Eddy-Current technieken worden geïntroduceerd bij de afvalverbrandingsinstallaties. Het valt echter nog te bezien of extra inzameling invloed zal hebben op de Nederlandse primaire productie. Schattingen wijzen op een grote 'uitstroom' van de CO₂-reductie: Nederlandse recycling leidt tot dalende CO₂-emissies in het buitenland [28]. Omdat de directe CO₂-emissies van deze industrie relatief laag zijn, maar het elektriciteitsgebruik relatief hoog is, zal een hedging-politiek voor elektriciteitsproductie ook hedging voor de aluminiumindustrie inhouden. Verder is reeds genoemd dat de verplaatsing van aluminiumsmelters naar IJsland tot een aanzienlijke daling van de CO₂-emissies kan leiden.

Monomeren/BTX

In Nederland staan een vijftal krakers: twee bij DSM in Geleen, twee bij DOW in Terneuzen en één bij Shell in Moerdijk [29]. Deze krakers zijn tussen 1964 en 1973 gebouwd, maar zijn sindsdien zeer ingrijpend ver-

bouwd. Ze maken deel uit van een Noord-West Europees complex van chemische fabrieken, die via pijpleidingen met elkaar verbonden zijn. Er is bij deze complexe installaties geen sprake van een duidelijk moment waarop een investeringsbeslissing moet worden genomen. Er is sprake van regelmatige ingrijpende verbouwingen aan de bestaande installaties. In tegenstelling tot de metalen is bij kunststoffen nog steeds sprake van een aanzienlijk groei van de productie.

Een aantal opties staan ter beschikking om de CO₂-emissies van petrochemische producten te reduceren:

- recycling van kunststoffen (potentieel 3 Mt),
- biopolymeren (op basis van bacteriën of planten, potentieel 10 Mt),
- biomassa als grondstof (potentieel 10 Mt).

Voor alle drie de opties geldt dat de techniek nog verder ontwikkeld moet worden. Verder zijn deze opties een stuk duurder dan de huidige productie-techniek. Vanwege de export-gerichtheid van de Nederlandse petrochemie biedt de substitutie van grondstoffen een groter potentieel dan recycling (behalve als kunststofafval uit het buitenland wordt teruggehaald). Een hedging-optie zou het stimuleren van de geleidelijke introductie van de genoemde nieuwe technieken zijn, om een verdere groei van de productie op basis van olie af te remmen.

Ammoniak

Ammoniak wordt geproduceerd uit aardgas. In principe kan ammoniak ook uit waterstof gemaakt worden, maar op dit moment lijkt er geen betaalbare bron voor CO₂-vrij waterstof in zicht. Nieuwere fabrieken hebben in het algemeen een aanzienlijk hogere energie-efficiëntie dan de bestaande fabrieken. Zo heeft de overheid in het kader van het CO₂-reductieplan reeds een nieuwe ammoniakfabriek in de Rijnmond gesubsidieerd, die een 20% hogere energie-efficiëntie heeft dan de bestaande fabriek (het zgn. Gamma-project). In beginsel kan een dergelijk project ook bij de andere 4 locaties voor ammoniakproductie in Nederland worden gerealiseerd. Hier is echter sprake van een win-win situatie: de hogere efficiëntie leidt tot hogere winsten. Indien een nieuwe ammoniakfabriek wordt gebouwd, zal deze daarom altijd de hoogst mogelijke energie-efficiëntie hebben. De enige overgebleven optie om de CO₂-emissies te reduceren is CO₂-verwijdering en opslag. Deze optie kan echter eenvoudig bij bestaande ammoniakfabrieken worden geïntroduceerd, en is bijvoorbeeld al opgenomen in het 10% reductieplan [30].

Cement

De CO₂ emissie in de cementindustrie kan verdeeld worden in een deel dat voortkomt uit de ontleding van calcium carbonaat (CaCO₃, 0.5 t CO₂/t cement) en een deel dat voortkomt uit de verbranding van fossiele brandstoffen (0.3-0.4 t CO₂/t cement). In Nederland staat een cementklinkeroven bij ENCI in Maastricht. In Nederland wordt reeds een hoog percentage hoogovencement en vliegascement toegepast. Deze producten worden gemaakt uit reststoffen en leiden daardoor niet tot CO₂-emissies. Dit deel kan waarschijnlijk niet verder uitgebreid worden. Het resterende deel Portlandcement wordt uit de omliggende landen geïmporteerd. In beginsel kunnen grote besparingen in cementgebruik bereikt worden door over te gaan naar hogere betonkwaliteiten, door meer prefab-elementen toe te passen en

door geopolymere cementsoorten te ontwikkelen. Ook kan materiaal-substitutie door hout en staal bijdragen aan materiaalbesparing [31]. De beslissingen voor deze optie zal genomen worden in de bouw, maar leidt tot minder CO₂ emissies in de cementproductie. Deze opties hebben ook nog andere milieuvoordelen. Hierbij moet echter bedacht worden dat deze opties vooral tot reductie van de CO₂-emissies in de omliggende landen zullen leiden.

De cementindustrie opteert voor de inzet van meer afvalstoffen als brandstof, maar deze optie biedt slechts beperkt soelaas. De beschikbaarheid van deze brandstoffen zal enerzijds door extra recycling afnemen, anderzijds zullen ze ook in toenemende mate ingezet worden in andere sectoren zoals de staalproductie. CO₂-verwijdering en opslag zou wel een optie zijn om de CO₂-emissies te reduceren. Omdat deze optie ook nog later ingevoerd kan worden, wordt dit niet als hedging gezien. In de industrie staan veiligheid en betrouwbaarheid voorop. Door het aanbrengen van een CO₂-afvanginstallatie kan de storingsgevoeligheid toenemen. Dit wordt in de industrie als een zeer belangrijk criterium gezien, en onderzoek/demonstratie zou daarom vanuit hedging-oogpunt toch belangrijk kunnen zijn.

Papier

De productie van papier uit pulp vergt op dit moment grote hoeveelheden stoom voor de droging van het papier. Via WKK kan deze stoom efficiënt opgewekt worden. Hier is hedging in de industrie dus gekoppeld aan hedging in de elektriciteitsopwekking. De stoom zou ook uit andere processen kunnen worden afgetapt (AVI's, elektriciteitscentrales, chemische bedrijven). Een dergelijke koppeling vergt een andere ruimtelijke ordening. Planologische beslissingen die de ruimtelijke plaatsing van potentiële stoomleveraars kunnen daarmee dus als hedging-optie gezien worden.

Er zijn een aantal nieuwe technieken in ontwikkeling die het stoomgebruik terug zullen dringen. Enerzijds neemt daardoor het energiegebruik van de papiermachine sterk af, anderzijds dalen ook de kosten voor papierproductie. Er is dus sprake van een win-win situatie, die hier niet tot een hedging-optie gerekend wordt. Wellicht kan deze introductie versneld worden door het gebruik van nieuwe technieken te subsidiëren, vergelijkbaar met de subsidies voor CCF en het Gamma-project. Omdat in Nederland een 15-tal papierfabrieken staan kan de invoering geleidelijker plaatsvinden dan in andere materiaalproducerende sectoren.

Warmte-cascading

Warmte-cascading tussen bedrijven, met name in grote industriegebieden zoals de Rotterdamse haven, kan nog tot aanzienlijke energiebesparing leiden. Hierdoor zullen ook de CO₂-emissies dalen. Een warmte-net door deze gebieden of een plan voor ruimtelijke ordening dat met dergelijke netten rekening houdt, kan op termijn tot emissie-reductie leiden. In de Rotterdamse haven wordt bijvoorbeeld reeds een dergelijk beleid gevoerd (gedreven door het streven de kosten te verlagen en de efficiëntie te verhogen). Dergelijk ruimtelijke-ordeningsbeleid kan als hedging-beleid gezien worden. De integratie van de processen leidt echter tot grotere inflexibiliteit (behalve als back-up systemen worden geïnstalleerd, hetgeen de kosten echter sterk zal doen stijgen). De uitwerking is verder vergelijkbaar aan de

uitwerking voor warmtenetten in de gebouwde omgeving. Het potentieel wordt op 5 Mt CO₂ geschat.

Conclusies

In tabel 3.6 zijn de CO₂-reductiemaatregelen voor de industrie in het algemeen weergegeven die vanuit een hedgingstrategie van belang zouden kunnen zijn. In de industrie is de omvang van de potentiële CO₂-reductie groot. Een hedgingstrategie grijpt echter aan op een klein aantal beslissingen in de energie-intensieve industrie. De inpassing van nieuwe energie-efficiëntere processen zal pas gebeuren als bestaande installaties aan vervanging toe zijn. Dat is meestal na 10 tot 30 jaar. Terwijl een CO₂-reductiemaatregel als warmte cascading eisen stelt aan plannen voor ruimtelijke ordening die een zeer lange tijd impact kunnen hebben.

Voor veel CO₂-reductiemaatregelen met een veel omvangrijker potentieel zijn eigenlijk geen randvoorwaarden aan te geven, behalve dan dat de benodigde technologie in Nederland nog niet op grote schaal wordt toegepast. Om die technologieën op een willekeurig moment te kunnen inpassen, zal dus verdere ontwikkeling en uitvoering van demonstratieprojecten nodig zijn.

Tabel 5.7 Analyse hedging industrie

CO ₂ -reductie maatregel	Besparingspercentage [%]	Potentiële CO ₂ -reductie Nederland 2030 [Mton/jr]	Randvoorwaarden	Invloeds-termijn [jaren]
Nieuw energie-efficiëntere processen	10-30	10	vervanging bestaande installaties autonome ontw. (afhank. van groei)	15-30
Recycling	50-90	10	beschikbaarheid afvalstoffen (in zuivere vorm) ontwikkeling scheidingstechnieken	
CO ₂ -vrije grondstof (bijv. biomassa, houtskool, waterstof)		20	demonstratie	
CO ₂ -verwijdering end-off-pipe	85-95	30	demonstratie	
Warmte cascading		5-10	ruimtelijke ordening	100

5.4 Energie-infrastructuur

Deze paragraaf gaat over de rol van energie-infrastructuur in een hedgingstrategie. Op zichzelf zijn maatregelen in de energie-infrastructuur meestal geen CO₂-reductiemaatregelen. Wel is energie-infrastructuur vaak een randvoorwaarde voor welke CO₂-reductiemaatregelen kunnen worden ingepast in de energievoorziening. Eerst zal een definitie van energie-infrastructuur worden gegeven en een indeling naar verschillende niveaus

en verbruikersgroepen, die nodig is omdat de conclusies t.a.v. hedging bij energie-infrastructuur niet voor ieder niveau en iedere verbruikersgroep hetzelfde zal zijn. Vervolgens zullen de randvoorwaarden die een energie-infrastructuur oplegt aan de inrichting van een meer duurzame energievoorziening worden geanalyseerd en worden daaruit verschillende mogelijkheden voor een hedgingstrategie geformuleerd.

5.4.1 Definitie

Onder de energie-infrastructuur wordt hier verstaan de netwerken voor transport, distributie en opslag van energiedragers: gasnetten, elektriciteitsnetten en warmtenetten. De netten bestaan uit verschillende niveaus en voorzien verschillende eindverbruikers van energie. Die verschillende niveaus en eindverbruikers worden hieronder apart besproken, omdat ten aanzien van hedging wellicht verschillende conclusies moeten worden getrokken.

Niveaus

Het aardgasnet bestaat uit het hoofdtransportnet op landelijk niveau, het regionale net op regionaal niveau en het lokale net op lokaal niveau. Van landelijk naar lokaal niveau neemt de druk waarmee het gas wordt gedistribueerd af. Het landelijke en regionale net samen zijn eigendom van de Gasunie en de lengte ervan is de vanaf circa 1985 constant gebleven zo'n 10.000 km voor heel Nederland. Het lokale net is het net van de energiebedrijven en de lengte is gemiddeld 10 meter per woningaansluiting, dus zeker zo'n 60.000 km. Dit betekent dat qua lengte het lokale gasnet het belangrijkste is. Het elektriciteitsnet is in te delen in een landelijk hoogspanningsnet, een middenspanningsnet en een laagspanningsnet. Ook hier geldt dat qua lengte het laagspanningsnet het belangrijkste is. Warmtenetten zijn per definitie op lokaal niveau, omdat warmte vanwege grote distributieverliezen niet over grote afstanden wordt getransporteerd. Desondanks wordt wel vaak een onderscheid gemaakt tussen een warmtetransportnet (van de warmteaanbieder naar een woonwijk) en een warmtedistributienet (dat de warmte binnen een woonwijk verdeelt).

Voor hedging is met name de keuze van lokale netten van belang, die bij nieuwbouwwijken op uitbreidingslocaties nog nieuw wordt aangelegd. Dat komt al tot uiting in de discussie rond de optimale energie infrastructuur in nieuwbouwwijken. Deze discussie betreft vooral de verschillende mogelijkheden voor conversietechnologieën en infrastructuur voor warmtevoorziening: een gasnet met individuele CV-ketels of in de toekomst micro-wkk, een elektriciteitsnet met individuele elektrische warmtepompen of een warmtedistributienet gevoed door een collectieve warmtebron. Voor de voorziening in de vraag naar licht en kracht blijft voorlopig een elektriciteitsnet het enige alternatief.

De regionale en landelijke gas- en elektriciteitstransportnetten worden nauwelijks meer veranderd of uitgebreid, dus daar valt voorlopig wellicht niet veel te kiezen. Als toch delen van deze netten aan vervanging toe zijn, is het natuurlijk wel verstandig ook daar hedging toe te passen.

Penetratiegraad

In Nederland is zo ongeveer iedereen aangesloten op een elektriciteitsnet. De penetratiegraad van het aardgasnet is bij de eindverbruikers zo'n 95%. Terwijl nog geen 200.000 woningen zijn aangesloten op een warmtenet. Een openbaar waterstofnet komt momenteel nog niet voor. Wel wordt in Duitsland al sinds meer dan 50 jaar gasvormig waterstof getransporteerd door een pijplijn van 250 km lengte. Ook in de VS en Frankrijk bestaan dergelijke systemen. In het oude centrum van Kopenhagen is nog steeds een stadsgasnet in gebruik waarbij een waterstof/koolmonoxide-mengsel wordt gedistribueerd.

Eindverbruikers

De lokale netten voorzien verschillende energieverbruikersgroepen van energie. Het gaat daarbij niet alleen om woningen, maar ook om utiliteitsgebouwen (voorzieningen zoals scholen, winkels en gezondheidszorg) en kantoren, land- en tuinbouwbedrijven en industrie. Het belang van de energie-infrastructuur geldt vooral voor de kleine verbruikers (woningen, utiliteit en diensten) waar de kosten om een nieuwe infrastructuur aan te leggen relatief zwaar zullen wegen. Vanwege de trend naar steeds zuiniger nieuwbouw wordt bij kleinverbruikers zelfs overwogen slechts één net, alleen maar elektriciteit, aan te leggen.

Voor grootverbruikers lijkt een keuze tussen verschillende soorten netten toch minder belangrijk. De aanlegkosten geven slechts een kleine verandering in de kosten per eenheid energie, de investering kan gemakkelijker worden terugverdiend. Toch worden ook in de tuinbouw en industrie vooral gas en elektriciteitsnetten aangelegd en niet op grote schaal warmtenetten. Hedging voor energie-infrastructuur is dus ook in die sectoren wel van belang, maar minder dan stringent dan in de gebouwde omgeving.

5.4.2 De rol van infrastructuur

De energie-infrastructuur is een heel bepalende factor voor de inrichting van de energievoorziening, en wel om twee redenen.

Ten eerste bepaalt het type infrastructuur welke energiedragers kunnen worden gebruikt en is daarmee ook bepalend voor de keuze van zowel lokale, decentrale als centrale conversietechnologie. Tevens wordt het net gedimensioneerd op een bepaalde capaciteit en eventueel temperatuur-niveau en worden de mogelijkheden voor teruglevering bepaald.

Elektriciteitsnet: teruglevering en capaciteit

Voor toepassing van PV-panelen op daken van woningen en utiliteitsgebouwen of micro-warmte/kracht voor warmtevoorziening moeten elektriciteitsnet en elektrische aansluitingen geschikt worden gemaakt voor teruglevering. Dit betekent een stuk regeltechniek, extra groepen ter beveiliging en eventueel aparte bemetering. Voor toepassing van elektrische warmtepompen speelt de capaciteit van het net een rol. Op gebouwniveau zal de capaciteit van de aansluiting ook niet altijd voldoende zijn, maar op wijkniveau zal vanwege gelijktijdigheid zeker rekening moeten worden gehouden met voldoende capaciteit voor de elektrische warmtepompen.

Steeds meer decentrale elektriciteitsopwekking levert voor het net regeltechnisch de nodige problemen; technische oplossingen daarvoor zijn in de toekomst een randvoorwaarde.

Gasnet: geschikt voor waterstof

De energie-infrastructuur bepaalt welke energiedragers kunnen worden gebruikt. Het kan van belang zijn een energie-infrastructuur geschikt te maken voor verschillende energiedragers. Bijvoorbeeld als nu wordt besloten een gasnet aan te leggen, maar later eventueel waterstof door dit net moet worden gedistribueerd. Waterstof heeft een kleinere molecuulgrootte dan aardgas en daardoor zou waterstof distributie door het bestaande aardgasnet tot lekverliezen kunnen leiden [32]. Dat geldt niet voor stalen leidingen, maar wel voor kunststof (PVC of PE) leidingen, die juist vanwege lagere onderhoudskosten het meest worden toegepast. Onduidelijk is echter hoe groot die lekverliezen zijn. Een belangrijke hedgingoptie is dan ook dit aspect van waterstof distributie door aardgasleidingen te onderzoeken. Mochten de lekverliezen significant blijken dan kan de lekdichtheid eventueel verhoogd worden door relining technieken. Hierbij wordt een oppervlakte-actieve stof in het net gebracht die zich hecht aan de binnenkant van de aardgasleidingen en waarmee een verdichtende coating ontstaat die de lekverliezen bij waterstof distributie tegengaat. Relining-technieken worden al toegepast bij renovatie van gietijzeren leidingen.

Ook moet meer waterstof door het net worden gepompt om dezelfde hoeveelheid energie bij de eindverbruiker te krijgen [8]. Dat betekent dat het net een grotere capaciteit moet krijgen (dikkere leidingen) of een hogere druk. Ook gasmeters bij de eindverbruiker en gasdrukregelaars in het net moeten voor waterstof worden aangepast.

Warmtenet: lage temperatuur

Bij warmtenetten is het temperatuurniveau in het net van belang voor de in te passen conversietechnologieën voor warmteproductie. Vooral bij collectieve warmtepompen is het van belang dat het een laag temperatuurniveau is.

Ten tweede is de energie-infrastructuur een belangrijke oorzaak voor de traagheid van veranderingen in de energievoorziening door de relatief lange levensduur (40 jaar of nog langer) t.o.v. andere onderdelen van de energievoorziening (conversietechnologieën) en de arbeidsintensieve aanleg (waardoor hoge kosten).

Lokale en decentrale conversietechnologieën (zoals ketels en warmtepompen) gaan meestal zo'n 15 jaar mee, centrale conversie-technologie (een elektriciteitscentrale met restwarmtebenutting bijv.) zo'n 25 jaar. Tijdens de levensduur van de infrastructuur wordt de meeste conversietechnologie dus ongeveer 3 keer vervangen. Wanneer bij nieuwbouw is gekozen voor een gasnet met individuele ketels kunnen de ketels na 15 jaar worden vervangen door bijvoorbeeld micro-WKK installaties. Een warmtenet dat gevoed wordt door een gasmotor WKK-installatie kan na 15 jaar worden gevoed door een collectieve elektrische warmtepomp.

In het SYRENE-programma wordt de betekenis van de energie-infrastructuur, als belangrijke factor voor de inrichting van de energievoorziening, als volgt geformuleerd:

'Dit betekent dat de mogelijkheden die wij over een halve eeuw zullen hebben om snel en zonder kosten om te schakelen op een duurzame energievoorziening mede door de huidige keuzen (t.a.v. energie-infrastructuur) worden bepaald' [33].

Op grond van deze analyse zijn twee strategieën te onderscheiden om de flexibiliteit van (lokale) energie-infrastructuur in de gebouwde omgeving te verhogen:

1. Bereikbaarheid: zorgen dat het na aanleg van een net op een later tijdstip vervangen door een ander soort leidingnet eenvoudiger en goedkoper kan.
2. Flexibiliteit: zorgen dat leidingnet niet hoeft te worden vervangen door een ander leidingnet, maar flexibel is voor koppeling met efficiëntere conversietechnologieën en duurzame bronnen.

Beide strategieën worden in de literatuur bepleit.

Bereikbaarheid

De eerste strategie leidt tot hedging-opties zoals flexibele leidinggoten en installatiecontainers. In plaats van leidingen in de grond die bij onderhoud of vervanging moeten worden opgegraven, kunnen de leidingen in een toegankelijke kabelgoot of kabeltunnel worden gelegd samen met infrastructuur voor riolering en telecommunicatie. Door middel van een installatiecontainer zou conversietechnologie aan de buitenkant van gebouwen kunnen worden geplaatst. Bij overschakeling op een andere energiedrager hoeft het in pandige distributiesysteem dan niet veranderd te worden [34].

Flexibiliteit

De tweede strategie vraagt een meer fundamentele beschouwing van de energievraag en verschillende conversieniveaus (lokaal, decentraal en centraal) in de energievoorziening. Zo is binnen het SYRENE-programma gekeken naar de flexibiliteit van verschillende infrastructuurvarianten (gas-, elektriciteits-, en warmtenetten) voor warmtevoorziening t.a.v. inzetbaarheid van duurzame energiebronnen en nieuwe energietechnologieën [35].

Gasdistributie komt uit SYRENE-studie naar voren als relatief inflexibel, omdat duurzame bronnen slechts op lokale schaal kunnen worden toegepast (zonneboiler voor warm tapwater). Drastische CO₂-reductie bij gasdistributie is alleen mogelijk door over te stappen op waterstofdistributie, maar dan moet het gasnet hiervoor wel geschikt gemaakt zijn.

Een warmtevoorziening op basis van elektriciteitsdistributie en elektrische warmtepompen is aanzienlijk meer flexibel, omdat op verschillende manieren in de elektriciteitsproductie flinke CO₂-reductie worden gerealiseerd: efficiëntieverbetering, inzet van zonne-energie, wind, biomassa, kernenergie en CO₂-verwijdering en opslag.

Warmtedistributie wordt ook als relatief flexibel gekenschetst. Wanneer voor warmtedistributie is gekozen kan voeding door aardwarmte, zonnecol-

lectoren, restwarmte, en efficiëntieverbetering, CO₂-verwijdering en het stoken van biomassa in de elektriciteitsproductie tot drastische CO₂-reductie leiden.

Vanuit hedging-oogpunt is het voordeel dat bij elektriciteits- en warmtenetten conversie op decentraal en centraal niveau plaats vindt, in plaats van op lokaal niveau in het geval van brandstof (aardgas of waterstof) distributie. Het is eenvoudiger in een keer een installatie door een andere conversie technologie te vervangen, dan duizenden installaties bij particulieren en bedrijven.

Conclusies

Energie-infrastructuur zou flexibel moeten zijn t.o.v. de inpassing van veranderingen richting een meer duurzame energievoorziening. Concreet zijn er slechts een paar belangrijke CO₂-reductiemaatregelen waarbij infrastructuur een belangrijke randvoorwaarde is. Deze maatregelen zijn met de potentiële CO₂-reductie weergegeven in tabel 5.8. Sommige maatregelen zijn ook in de andere paragrafen besproken. Nu wordt alleen de CO₂-reductie voor de gebouwde omgeving mee genomen.

Tabel 5.8 Analyse hedging bij energie-infrastructuur

Randvoorwaarden	Besparingspercentage [%]	Potentiële CO ₂ -reductie Nederland 2030 [Mton/jr]	CO ₂ -reductie-maatregel	Invloedstermijn [jaren]
Elektriciteitsnet geschikt voor teruglevering		2	PV-panelen op daken	40-50
Aanwezigheid gasnet elektriciteitsnet geschikt voor teruglevering	5-10	0,5	micro-WKK	40-50
Gasnet geschikt voor waterstofdistributie	95	6	waterstoflevering	40-50
Voldoende capaciteit elektriciteitsnet	15-30	2 ¹	elektrische warmtepompen	40-50
Aanwezigheid warmtenet lage temperatuur	10-30	2 ¹	warmtelevering	40-50

¹ Uitgaande van min of meer conventionele elektriciteitsopwekking, wanneer de elektriciteitsproductie een grotere aandeel duurzame bronnen wordt ingezet neemt het potentieel toe.

5.5 Elektriciteitsproductie

De CO₂-emissies voor elektriciteitsproductie bedroegen in 1995 ongeveer 40 Mton. De hedging-opties voor de elektriciteitsopwekking zijn in kaart gebracht aan de hand van de volgende CO₂-reductiemaatregelen:

- restwarmtebenutting,
- verbetering efficiëntie van elektriciteitsopwekking,
- brandstofsubstitutie (ook inzet biomassa),
- kernenergie,
- CO₂-afvang en -opslag,
- duurzame bronnen (zon, wind en water).

Restwarmtebenutting

Restwarmtebenutting van centrales kan een aanzienlijke CO₂-reductie met zich meebrengen: circa 30% wanneer restwarmte van bestaande centrales wordt benut t.o.v. gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit in een bestaande centrale. Bij nieuwe centrales bespaart restwarmtebenutting 10% t.o.v. gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit in een nieuwe efficiënte centrale. In principe kan restwarmtebenutting zowel bij nieuwe als bij bestaande installaties plaatsvinden. Bij bestaande installaties zal restwarmtebenutting doorgaans minder makkelijk en daarmee dus minder efficiënt en duurder zijn dan wanneer er bij het ontwerp van de elektriciteitscentrale rekening mee is gehouden. Of restwarmtebenutting mogelijk is, heeft echter minder met het aanbod van warmte te maken en meer met de vraag naar warmte.

Ook nu al is veel restwarmte beschikbaar, maar wordt deze slechts beperkt benut. De reden hiervoor is veelal omdat er geen warmtevraag in de buurt is (vanwege hoge kosten en relatief grote verliezen bij transport van warmte, kan warmte niet over grote afstanden getransporteerd worden) of omdat er geen warmtenet ligt om de warmte te distribueren. Het eerste punt, de warmtevraag in de nabijheid van het aanbod is een kwestie van ruimtelijke ordening. In ruimtelijke orderingsplannen worden in feite voor langere tijd de mogelijkheden voor restwarmtebenutting bepaald. Tevens speelt natuurlijk de locatiekeuze van een elektriciteitscentrale zelf een rol. Ook is belangrijk voor welke capaciteit wordt gekozen. Door meer kleinere centrales te bouwen en meer verspreid over de verstedelijkte gebieden van Nederland, kan de afstemming van vraag en aanbod van warmte verbeterd worden.

Verbetering efficiëntie van elektriciteitsopwekking

Wat betreft efficiëntieverbetering van elektriciteitscentrales is de combined cycle van belang: de voorschakeling van een gasturbine voor de stoomturbine. Daarmee is een aanzienlijke sprong in de efficiëntieverbetering behaald (van een rendement van 40% naar 50% en tegenwoordig tot 58%). Sinds de opkomst van de combined cycle eind jaren '70 zijn ook bestaande centrales omgebouwd tot combined cycles door voor de bestaande stoomturbine een gasturbine voor te schakelen. Toen diende met het bestaande ontwerp van de stoomcyclus rekening te worden gehouden zodat niet de optimale verhouding in vermogen tussen de gas en de stoomturbine kon worden bereikt. Deze centrales kenden een kleinere verbetering van het rendement van ongeveer 40% in de oude situatie tot ongeveer 45%.

Indien niet bestaande gasgestookte, maar bestaande kolengestookte centrales van een voorgeschakelde gasturbines worden voorzien, heeft dit een dubbel effect wat betreft CO₂-reductie. Het geeft immers zowel efficiëntieverbetering als deels vervanging van koleninput door gasinput.

Het rendement van combined cycles is verbeterd en kan nog verder verbeteren door de ontwikkeling van gasturbines. Toch zal de efficiëntieverbetering (met nu bekende technologieën) niet meer een zelfde sprong maken zoals bij de overgang naar de combined cycle.

Bij de bouw van nieuwe centrales kan eventueel rekening worden gehouden met het voor- of naschakelen van een andere cycle. In het hoge

temperatuur traject kan worden gedacht aan brandstofcellen. Een bot-toming cycle leent zich voor het lage temperatuurtraject. De relevantie van brandstofcellen als extra voorschakeling is niet erg hoog indien verwacht wordt dat het meer dan 20 jaar zal duren voor deze techniek tegen lage kosten beschikbaar is.

In deze optiek kan het meer interessant zijn nu kleinere warmtekracht systemen te plaatsen die elektriciteit produceren en lage temperatuurwarmte leveren voor ruimteverwarming. Deze systemen kunnen na hun normale levensduur dan vervangen worden door brandstofcelsystemen met zeer hoge rendementen bij lage vermogens. Wel is er nog veel technologische ontwikkeling nodig voordat brandstofcelsystemen daadwerkelijk kunnen worden ingepast.

Uitbreiding van het West-Europese elektriciteitsnetwerk naar het oosten, over de tijdszones heen, kan betekenen dat centrales minder op en neer geregeld hoeven te worden, wat leidt tot minder efficiëntieverlies. Er moet wel een afweging worden gemaakt met betrekking tot transportverliezen.

Door de levensduur van bestaande centrales te verlengen, kunnen investeringen in geheel nieuwe centrales worden uitgesteld. Met levensduurverlenging zijn doorgaans veel lagere investeringen gemoeid dan met nieuwbouw. Door uitstel is flexibiliteit gewonnen, zodat op een later tijdstip de keuze gemaakt kan worden voor nieuwe (verbeterde) technieken.

Brandstofsubstitutie

De CO₂-emissie van centrales kan worden gereduceerd door een andere brandstof in te zetten, bijvoorbeeld gas in plaats van kolen of biomassa in plaats van gas of kolen. In poederkoolcentrales en KV-STEGs kan nu in principe al gas worden verstoekt. Bij een poederkoolcentrale betekent dit wel dat het gas met een relatief laag rendement wordt omgezet; bij een KV-STEG is de opwekking van elektriciteit nog wel redelijk efficiënt.

Eerst biomassa vergassen en dan verstopen kan in principe in een KV-STEG of in een gas-STEG, maar dan zijn er wel aanpassingen nodig aan het ontwerp van de gasturbine. Biomassa heeft minder zuurstof nodig en is een minder homogene brandstof. Er worden hoge eisen gesteld aan de gasreiniging om de vergaste biomassa in de gasturbine in te kunnen zetten. Dit betekent dat eenvoudiger biomassa kan worden ingezet bij ontwerp van een nieuwe centrale dan dat een bestaande centrale wordt aangepast. Biomassa kan niet op grote schaal in Nederland worden verbouwd, import zal dus noodzakelijk zijn. Als in West-Europa een grote vraag naar biomassa zal ontstaan, zal de prijs hiervan omhoog gaan. Indien dit in Nederland wordt verwacht, kunnen risico's worden afgedekt door nu al langlopende import contracten aan te gaan met aanbieders van biomassa.

Als men verwacht dat in de Baltische staten op grote schaal biomassa kan worden verstoekt, is het zinvol aan te sluiten op de Baltic Ring (zie kader). De vraag is of het dan niet efficiënter of goedkoper is om de biomassa naar het westen te transporteren i.p.v. de daaruit opgewekte elektriciteit.

Kernenergie

Hoewel in Nederland weinig succesvol door een gebrek aan maatschappelijk draagvlak, blijft kernenergie een mogelijke CO₂-reductiemaatregel. Om alsnog tot de bouw van nieuwe kerncentrales te kunnen besluiten is het nodig nucleaire kennis in Nederland op peil te houden. Maar vooral moet prioriteit worden gegeven aan de oplossing van het afvalprobleem. Om het maatschappelijk draagvlak te vergroten is het belangrijk ook te werken aan de ontwikkeling van inherent veilige reactoren.

CO₂-afvang en -opslag

CO₂-afvang bij elektriciteitscentrales is een techniek, waaraan in sommige toekomstverkenningen veel belang wordt toegekend. Er zijn verschillende technieken voor CO₂-afvang/verwijdering. Doorgaans betreft het bewezen technieken die in de chemische industrie al worden toegepast. Sommige technieken zijn in feite 'end of pipe' technieken; dit betekent dat CO₂ uit de rookgassen worden verwijderd. Andere technieken verwijderen de CO₂ in feite al uit de brandstof. In een verbrandingsproces is 'end of pipe' CO₂-verwijdering mogelijk of verbranding met zuivere zuurstof (met CO₂-recycling, waarbij CO₂ de rol van atmosferische stikstof overneemt). Als een vergassingsproces onderdeel uitmaakt van een installatie ligt het meer voor de hand om CO₂ uit het vergassingsmengsel te verwijderen. Dit is goedkoper, leidt tot minder efficiëntieverlies en biedt de mogelijkheid een groter aandeel van de CO₂ af te vangen. Bij een nieuw ontworpen centrale met CO₂-afvang, zal het rendement voor elektriciteitsopwekking 8 a 10% punten zakken [36].

Bij 'end of pipe' technieken heeft CO₂-afvang een beperkte invloed op de elektriciteitsopwekking ervoor (afhankelijk hoe de integratie van warmtestromen gewijzigd zal worden), terwijl bij CO₂-afvang uit de brandstofinput de systeemcondities en massaflows ingrijpend zullen wijzigen. Het lijkt er dus op dat CO₂-afvang 'end of pipe' bij bestaande elektriciteitscentrales nog enigszins mogelijk is, terwijl bij CO₂-afvang uit de brandstofinput de installatie te ingrijpend moet worden aangepast om retrofit mogelijk te maken. Bij CO₂-afvang, toegepast in een bestaande installatie, zal het negatieve effect op het rendement van de centrale waarschijnlijk groter zijn dan bij nieuwe centrales. Bij onderzoek naar CO₂-afvang wordt tot nu toe steeds uitgegaan van een nieuw ontworpen installatie. Voor zo ver bekend is geen onderzoek naar toepassing in bestaande installaties verricht. Het is evident dat indien CO₂-afvang later gerealiseerd wordt, dit gepaard gaat met de bouw van een chemische fabriek voor de gasscheiding. Hiervoor dient op het terrein van de centrale in elk geval voldoende ruimte gereserveerd te zijn.

Voor CO₂-opslag komen in technische zin in de Nederlandse situatie als eerste lege aardgasvelden in aanmerking, vanwege bewezen afsluiting van gassen in de geologische structuur. Als hedgingoptie zouden nieuw te bouwen elektriciteitscentrales in de buurt van lege aardgasvelden gelokaliseerd kunnen worden. Echter, voorlopig zijn er nog geen lege aardgasvelden beschikbaar of de NAM wil deze gebruiken voor opslag van aardgas. Als tweede optie voor CO₂-opslag komt in aanmerking opslag in aquifers [37]. Op zich is daarvoor de bodem in een groot deel van Nederland geschikt. Bij de opslag in aquifers zijn meer onzekerheden met betrekking tot de geologische structuur dan de opslag in lege aardgasvel-

den. Bij aquifers is namelijk in tegenstelling tot gasvelden doorgaans alleen een globaal beeld van de ondergrondse karakteristieken bekend, zodat eigenschappen zoals drukopbouw, verdringing, oplossen van CO₂/water nog in kaart moeten worden gebracht. De werkelijke risico's van CO₂-opslag (zoals terug lekken in de atmosfeer) kunnen alleen maar door locatie specifiek onderzoek duidelijk worden [38]. Het risico op ontsnappen van CO₂ zal via technische en organisatorische veiligheidsmaatregelen geminimaliseerd moeten worden.

Aangezien de technieken voor CO₂-verwijdering beschikbaar is, is het niet zo zinvol hier meer onderzoek naar te verrichten. Vanuit hedging-optiek is het wel zinvol om via demonstratie-projecten ervaring op te doen met ondergrondse opslag, CO₂-transport en milieueffectrapportage- (MER-) procedures voor CO₂-opslagprojecten. Hierdoor komen eventuele problemen ten aanzien van opslag boven water en kunnen meer betrouwbare kostenschattingen worden gegeven. Een maatschappelijke discussie over grootschalige toepassing van CO₂-afvang is gebaat bij de ervaring van demonstratieprojecten.

Duurzame energiebronnen (zon, wind en water)

Zonnecellen of fotovoltaische (PV) systemen moeten geplaatst worden op een draagconstructie. Hier is dakoppervlak in principe geschikt voor. De hoogste jaarlijkse opbrengst wordt in Nederland gerealiseerd bij een hoek van 30° en een oriëntatie op het zuiden. Het stedenbouwkundig plan en het gebouwwontwerp bepalen de zon-oriëntatie van gebouwen. Overigens is de jaarlijkse opbrengst bij een oriëntatie op het zuidwesten of op het zuidoosten niet heel veel lager dan bij een oriëntatie pal op het zuiden. Demonstratie van PV-systemen gebeurt nu alleen nog maar op kleine schaal. Grootschalige demonstratieprojecten zijn nodig als PV werkelijk een redelijke bijdrage moet leveren aan de elektriciteitsproductie in Nederland.

Windturbines worden nu al op zekere schaal toegepast. Er is een trend naar steeds grotere windturbines te constateren. NUON heeft een bestaand windturbine park bij Lelystad al vervangen door grotere turbines. Op deze trend zou bij de plaatsing van nieuwe windturbines alvast ingespeeld kunnen worden door een ruimere fundering te leggen en door de capaciteit van de bekabeling ruimer te kiezen.

Als de bijdrage van duurzaam vermogen met een grillig productiepatroon toeneemt, dient voldoende back-up elektrisch vermogen aanwezig te zijn. Een mogelijkheid om meer back-up vermogen te realiseren is door de verbindingen met buitenlandse elektriciteitsnetten te vergroten (zie ook tekstkader). Dit is doorgaans ook aantrekkelijk voor andere landen, zeker als die ook een toenemend aandeel duurzaam vermogen hebben. Als niet voldoende back-up vermogen gerealiseerd kan worden kan energieopslag eventueel een uitkomst bieden.

Als wordt verwacht dat PV-systemen een groot aandeel in de totale opwekking van elektriciteit zullen krijgen, wordt het patroon waarmee elektriciteit uit PV-systemen wordt opgewekt van steeds groter belang. De elektriciteitsopbrengst is bij PV-systemen die in Nederland zijn geplaatst 10 keer zo groot op een dag in juni als op een dag in december. In Zuid-Spanje is de opbrengst van PV-systemen ongeveer 80% hoger dan in Nederland, maar

daarnaast is de verhouding tussen de gemiddelde decemberproductie en de juni-productie van elektriciteit veel gunstiger dan in Nederland, namelijk 1:3. Daarmee is de inpassing in de energievoorziening veel beter voor PV-systemen die in Zuid-Spanje zijn geplaatst en waarvan de elektriciteit naar Nederland wordt getransporteerd dan voor PV-systemen in Nederland. Vanuit hedging-gedachte is het dus interessant om plaatsing van PV-systemen meer uit een internationaal perspectief te zien.

Als in West-Europa een grote vraag naar duurzaam opgewekte elektriciteit (bijvoorbeeld waterkracht) zal ontstaan, zal de prijs hiervan omhoog gaan. Indien dit in Nederland wordt verwacht, kunnen risico's worden afgedekt door nu al langlopende import contracten aan te gaan met aanbieders van duurzame elektriciteit.

Qua CO₂-reductie is het belangrijk dat bijvoorbeeld een verbinding met Noorwegen of IJsland of Midden-Afrika wordt gelegd ter benutting van het daar aanwezige waterkrachtpotentieel. De distributieverliezen blijven beperkt door toepassing van HVDC (High Voltage Direct Current), zoals ook in de 'Baltic ring' wordt toegepast. Over zee is gelijkstroom zo wie zo de enige realistische mogelijkheid. In de Baltic ring wordt het toegepast om de niet gesynchroniseerde wisselstroomnetten van de verschillende landen met elkaar te verbinden (zie kader) [39].

Conclusies

In tabel 5.9 zijn de CO₂-reductiemaatregelen voor de elektriciteitsproductie weergegeven die vanuit een hedgingstrategie belangrijk zouden kunnen zijn. Met de in de tabel gegeven schattingen voor het potentieel blijken vooral de inzet van duurzame bronnen, kernenergie, biomassa en CO₂-afvang -en opslag van belang bij een forse CO₂-reductie. Die maatregelen vereisen vanuit een hedgingstrategie weer bepaalde acties om voorbereid te zijn op een stringent klimaatbeleid. De inzet van duurzame bronnen en biomassa vereist vooral een aantal randvoorwaarden op het gebied van internationale handel. Wat betreft toepassing van kernenergie is er de zorg voor het op peil houden van de benodigde kennis en prioriteit te geven aan de oplossing van het afvalprobleem. CO₂-afvang en -opslag moet in Nederland worden gedemonstreerd, bijvoorbeeld ook bij bestaande installaties.

Tabel 5.9 *Analyse hedging bij elektriciteitsproductie*

CO ₂ -reductie maatregel	Besparingspercentage [%]	Potentiële CO ₂ -reductie Nederland 2030 [Mton/jr]	Randvoorwaarden	Invloeds- termijn [jaren]
Restwarmtebenutting	10-30	2-6	ruimtelijke ordening	200
			locatiekeuze centrale	50
			capaciteit centrale	25
Efficiëntieverbetering opwekking	5-20	1-5	technologische ontwikkeling gasturbines en brandstofcellen kleinschaligheid opwekking	
Brandstofsubstitutie o.a. biomassa	40-100	5-15	geschiktheid voor meerdere brandstoffen (zoals KV- STEG!) importcontracten	
Kernenergie		10-30	kennis oplossing afvalprobleem ontwikkeling inherent veilige reactoren maatschappelijk draagvlak	
CO ₂ -afvang en opslag	85-95	10-30	demonstratie ook bij bestaande(!) installaties	
Duurzame bronnen zon, wind en water	100	10-20	geschikte locaties back-up vermogen energieopslag importcontracten internationale netwerkverbindingen	

EWPTS

EWPTS (East-West high-Power Transmission System), een 4000 MW, 1800 km lange transportverbinding tussen Smolensk (ten westen van Moskou) en Borken (bij Frankfurt-am-Main), heeft als doel te zorgen voor een efficiënte en economische stroomuitwisseling tussen Oost-Europese, Midden-Europese en West-Europese elektriciteitsbedrijven. De transportverbinding past in het kader van het Europees Energie Handvest.

De transportleiding zal drie elektriciteitstransportsystemen doorkruisen, het Russische UPS (Unified Power System), het Centraal-Europese CENTREL (Hongarije, Polen, Tsjechië en Slowakije) en het West-Europese UCPT (Union pour la Coördination de la Production et du Transport d'Electricité, met 22 aangesloten bedrijven).

Als het systeem compleet is, zal het lange termijn uitwisselingen mogelijk maken en zouden oude en milieuvriendelijke centrales in Oost-Europa kunnen worden gesloten en vervangen. Een ander belangrijk voordeel is het 'poolen' van reserve-capaciteit. Het gaat hierbij om de vijf betrokken elektriciteitsbedrijven van de Russische Federatie en Wit-Rusland, PPGC (Polish Power Grid Company), VEAG (Vereinigde Energiewerke Aktiengesellschaft GmbH) en PreussenElektra.

De investering van ca. \$ 1,3 miljard moet worden afgezet tegen een besparing aan reservecapaciteit van 1,5 GW vermogen. Bij investeringskosten van 1500 gulden/kW wordt dan een investering van ruim 2 miljard gulden vermeden. Twee andere overwegingen die de economie beïnvloeden zijn de spotmarktprijs van elektriciteit en de mogelijkheden van telecommunicatie die de transportverbinding biedt. Schattingen geven aan dat de Duitse elektriciteitsbedrijven besparingen aan piekvraag zouden kunnen bereiken van 20 miljoen DM per jaar door stroomimport uit Oost-Europa.

Technisch-economische evaluaties hebben uitgewezen dat HVDC (High Voltage Direct Current) de meest economische oplossing is. Ontwikkelingen in converterechnologie voor lange-afstand elektriciteitstransport, gekoppeld aan schaalvoordelen, zouden de transportkosten kunnen verlagen tot ca. US\$ 1/kWh, als het EWPTS intensief wordt gebruikt. Lange afstand HVDC transportsystemen werken goed in diverse landen, zoals de VS, Canada, China en Brazilië.

De jaarlijkse onderhouds- en bedieningskosten worden geschat op 1% van de totale investeringskosten. De transmissieverliezen, inclusief verliezen van de converterstations, worden geschat op 10%.

Het project wordt volgens planning in drie fasen uitgevoerd:

- Tracékeuze en goedkeuring 1997-2005.
- Start bouw 2007.
- Start bedrijf 2010 en daarop volgende jaren.

De nabijheid van grote reserves van fossiele brandstoffen in de Russische Federatie biedt mogelijkheden voor lagere kosten van stroomopwekking en uitwisseling met West-Europa. Verder zou meer goedkope stroom kunnen worden geleverd als Siberische waterkrachtreserves zouden worden ontwikkeld en gekoppeld aan het EWPTS.

6. DISCUSSIE HEDGINGSTRATEGIE

6.1 Inleiding

In dit rapport is tot nu toe tot een drietal onderdelen behandeld:

1. een korte *literatuuranalyse* van recente hedgingstudies,
2. een *modelanalyse* waarin hedgingstrategieën voor Nederland zijn door-gerekend,
3. een *inventarisatie* van hedging-opties en randvoorwaarden die invloed hebben op de toekomstige mogelijkheden om CO₂-emissies te verminderen.

Het was om praktische redenen niet mogelijk om de resultaten van de inventarisatie onderdeel te laten uitmaken van de modelanalyse. Aan de andere kant mist de inventarisatie nu nog een gedegen raamwerk dat een systematische vergelijking van hedging-opties mogelijk maakt.

In dit hoofdstuk wordt een poging gedaan de resultaten van de modelanalyse en van de inventarisatie te integreren teneinde een totaal inzicht te krijgen in het praktische belang van hedging voor CO₂-reductie. De vragen die daarbij van belang zijn betreffen:

- Met welke hoeveelheid moeten CO₂-emissies op korte termijn verminderd worden?
- Welke aspecten beïnvloeden de timing?

De modelanalyses tot nu toe geven al enige antwoorden op deze vragen. De analyses hebben echter hun beperkingen. Een nadere bespreking maakt een betere beoordeling van hedging-strategie mogelijk.

Bij het geven van antwoorden op deze vragen zal ook worden ingegaan op de eigenschappen en beperkingen van de modelanalyse. Een aantal keuzes die gemaakt zijn voor de modelanalyse hadden ook een andere invulling kunnen krijgen; hier wordt een inschatting gemaakt van de gevolgen die dit zou kunnen hebben op hedging-resultaten.

6.2 Aspecten die de timing van CO₂-reductie beïnvloeden

De resultaten van de modelanalyse wijzen erop dat het beter is op tijd met CO₂-reductie te beginnen. De belangrijkste reden van deze berekeningsuitkomst is gerelateerd aan de veronderstelde cumulatieve limieten voor CO₂, waarbij later in de tijd gecompenseerd moet worden voor niet gedane inspanningen vroeger in de tijd. De berekeningsresultaten zijn minder een gevolg van de traagheden in de energievoorziening die vereisen dat 'het roer al vroeg om moet' om de koers op termijn fors te kunnen verleggen.

In de balans tussen vroege of late actie aangaande CO₂-reductie speelt een groot aantal aspecten een rol. In de tabel 6.1 zijn deze geclusterd naar gelang de aspecten betrekking hebben op technologie, inertheden in de

energievoorziening, milieu-aspecten en economische overwegingen. Na deze tabel wordt het effect van ieder van deze aspecten op de timing van CO₂-reductie besproken en de mate waarin deze aspecten in de modelanalyse zijn meegenomen.

Tabel 6.1 *Aspecten die van invloed zijn op de timing van CO₂-reductie*

Technologie	<ul style="list-style-type: none"> • Technologische ontwikkeling • Geïnduceerde innovatie • Beschikbaarheid van technieken
Inertheden	<ul style="list-style-type: none"> • Vervangingstempo van technieken • Randvoorwaarden technieken • Maximale groeitempo nieuwe technieken • Operationele beslissingen • Gedrag en instituties • Instrumenten ter implementatie van maatregelen • Prijzen energiedragers
Milieu	<ul style="list-style-type: none"> • Accumulatie CO₂ in atmosfeer • Hoogte van de CO₂-reductie • Kans op CO₂-reductie
Economie en markt	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkeling energievraag • Tijdvoorkeur; verdiscontering • Timing t.o.v. buitenland

Technologische ontwikkeling

Er zijn verschillende schone energietechnieken die steeds efficiënter worden en/of goedkoper worden. Hierdoor wordt CO₂-reductie op termijn ook goedkoper. In het Nederlandse MARKAL-model wordt technologische ontwikkeling meegenomen. Voor de meeste technieken zijn de aannamen die gemaakt zijn over de verdere ontwikkeling van rendementen en kosten redelijk optimistisch. Ze zijn in overeenstemming met de inschattingen die voor de SYRENE-studie [11] zijn gemaakt.

Technische ontwikkeling door 'learning by doing'

De technisch-economische invoergegevens van het Nederlandse MARKAL-model zijn exogeen. In de praktijk zal de kostenontwikkeling van technieken ook beïnvloed worden door de afzet van de technieken in kwestie. CO₂-reductiemaatregelen die vroeg worden genomen induceren innovatie die op termijn CO₂-reductie gemakkelijker maakt. Door schaaffecten kunnen de kosten van technieken immers afnemen en zullen de technische prestaties verbeteren. Echter, de technologische ontwikkeling die in Nederland plaatsvinden bedragen slechts een klein gedeelte van de mondiale technische ontwikkelingen. De ontwikkeling is meer afhankelijk van de mondiale afzet van technieken dan van de Nederlandse productie. Daarom is modellering van technologische vooruitgang via exogene inschatting niet onjuist. Voor sommige technieken kan echter een uitzonderingssituatie bestaan omdat de Nederlandse afzet een groot aandeel in de wereldafzet kan zijn. Dit geldt al voor HR-ketels en industriële warmtekracht. In de toekomst kan dit mogelijk ook gelden voor offshore windturbines. Verder zijn technische ontwikkelingen aan de gebouwschil veelal specifiek voor een land. In het MARKAL-model zijn de positieve effecten van CO₂-reductie op de technologische innovatie niet geëndogeniseerd.

Beschikbaarheid van technieken

Technieken als CO₂-afvang bij elektriciteitscentrales, kernenergie en import van biomassa hebben de potentie om de emissies van CO₂ te verminderen. Deze opties zijn echter om uiteenlopende redenen nu niet beschikbaar en het is onzeker of ze ook beschikbaar komen. Daarnaast zijn slechts die technische ontwikkelingen meegenomen waarvan prestaties en kosten nu kunnen worden ingeschat. Er kunnen tot 2040 nog veel niet verwachte ontwikkelingen in energietechnieken plaatsvinden. Als deze technieken beschikbaar komen is emissiereductie op korte termijn minder nodig. Dit blijkt ook uit de gevoeligheidsanalyse waarin dit aspect is onderzocht. Voor de basisberekeningen is er van uitgegaan dat bovengenoemde technieken niet of nauwelijks beschikbaar zijn.

Vervangingstempo van installaties

MARKAL is een dynamisch model waarin de technieken zijn beschreven op basis van hun technische levensduur. Om aan de exogeen bepaalde energievraag te voldoen, dienen er op elk moment voldoende installaties te zijn voor o.a. ruimteverwarming (ketels), transport (vervoermiddelen), onderverwarming (ketels, ovens), energie-distributie (pijpleidingen) en elektriciteitopwekking (centrales). Op deze wijze wordt één van de belangrijkste factoren meegenomen die de dynamiek van de energievoorziening in de tijd bepaalt. De levensduren die gehanteerd worden voor enkele belangrijke installaties zijn weergegeven in tabel 6.2.

Tabel 6.2 *Levensduur van verschillende soorten installaties in het Nederlandse MARKAL-model*

	Levensduur in MARKAL [jaren]
Elektriciteitscentrales	25-30
Installaties industrie	15-25
Boilers	15
Stadsverwarming	25
Elektrische apparaten	10-20
Vrachtauto's	8
Personenauto's	12

Opgemerkt wordt dat in de realiteit de levensduur van installaties niet met één waarde kan worden vastgesteld. Sommige auto's zijn bijvoorbeeld maar kort en intensief in gebruik terwijl andere auto's niet intensief en dus gedurende een langere periode in gebruik zijn. MARKAL maakt dus zowel onderschattingen als overschattingen van de dynamiek van de energievoorziening door te veronderstellen dat alle installaties na de gestelde levensduur vervangen moeten worden. MARKAL onderschat ook de inerties in de energie-infrastructuur. De distributienetten van energie zijn slechts summier gemodelleerd en veronderstellen relatief korte levensduren. De levensduur van ongeveer 30 jaar benadert eerder de economische levensduur dan de technische levensduur. De technische levensduur van infrastructuur bedraagt in de praktijk vaak 50 jaar of meer.

Randvoorwaarden technieken

De randvoorwaarden voor de introductie van technieken die de CO₂-emissies verminderen zijn uitgebreid beschreven in het hoofdstuk 5 (inventarisatie). In MARKAL zijn deze randvoorwaarden, zoals bijvoorbeeld die aangaande de ruimtelijke locaties voor centrales, in de meeste gevallen niet expliciet gemodelleerd. In MARKAL zijn grenzen aan de penetratie van technieken verondersteld welke deels gerelateerd zijn met de randvoorwaarden van technieken, echter deze zijn niet in detail gemodelleerd. Doordat MARKAL de meeste randvoorwaarden niet expliciet kent, zijn de berekeningsresultaten over het algemeen iets te optimistisch aangaande het tempo waarin veranderingen kunnen plaatsvinden.

Maximale groeitempo van nieuwe technieken

Bijna alle technieken kennen begrenzings voor het tempo waarin ze de markt kunnen penetreren. Dit geldt ook sterk voor technieken die nu nog een heel kleine rol spelen en waarvoor nu nog beperkte fabricagecapaciteit bestaat (bijvoorbeeld PV-systemen). In het Nederlandse MARKAL-model zijn begrenzings meegegeven aan de hoeveelheid capaciteit waarin jaarlijks geïnvesteerd kan worden.

Deze begrenzings zijn in MARKAL evenwel niet via een maximaal groeitempo gerelateerd aan de investeringen in capaciteit die een periode eerder zijn gedaan. In de realiteit is een dergelijk verband voor veel technieken wel van belang; er zijn maar weinig technieken waarvan gedurende een lange tijdperiode de penetratie met meer dan 25% per jaar is gegroeid. Als een techniek op termijn op grote schaal moet worden ingezet moeten de eerste investeringen daarom vroeger worden gedaan. Omdat de energietechnieken in MARKAL, in aanvulling op andere begrenzings, niet via een maximum groeitempo zijn beperkt, zijn de resultaten van MARKAL aangaande dynamiek van de energievoorziening te optimistisch.

Operationele beslissingen en investeringsbeslissingen

Het onderscheid tussen investeringsbeslissingen en operationele beslissingen is vanuit hedging-optiek belangrijk. Investeringsbeslissingen leggen het energiegebruik en de emissies binnen bepaalde grenzen vast, maar binnen deze grenzen zijn nog mogelijkheden om de inzet van technieken en daarmee de CO₂-emissies te beïnvloeden middels operationele beslissingen. Dit kan onder andere door bij 'multi fuel' centrales een brandstof met lagere CO₂-emissies per eenheid energie in te zetten of door het aantal draaiuren van centrales te veranderen. Op deze wijze is op korte termijn al een significante emissiereductie mogelijk. Dergelijke opties zijn in tal van analyses (zoals [5]) niet meegenomen.

Het is binnen MARKAL-berekeningen wél mogelijk om de capaciteit van technieken gedeeltelijk te benutten. Voor elektriciteitsopwekking geeft MARKAL op deze wijze een realistische weergave van de inzet van energietechnieken. Zonder CO₂-reductiedoelstellingen opereren elektriciteitscentrales met lage variabele kosten (zoals poederkoolcentrales) in basislast, terwijl centrales met hogere variabele kosten in midden- (gas-STEGs) en pieklast (gasturbines) draaien. Bij CO₂-reductie vinden hier verschuivingen in plaats. De operationele beslissingen nemen een fors gedeelte van de

emissiereductie in de MARKAL berekeningen op kortere termijn voor hun rekening.

De emissies van CO₂ kunnen ook verminderd worden door veranderingen in gedrag en verschuivingen in bestedingen. Deze veranderingen hebben doorgaans een onmiddellijk effect op CO₂-emissies. Dergelijke niet-technische maatregelen zijn in MARKAL niet meegenomen. Met betrekking tot dit punt onderschat MARKAL dus de dynamiek van de energievoorziening.

Gedrag en instituties

Er zijn niet alleen technische oorzaken voor inertheden in de energievoorziening. Daarnaast zijn bestaande ervaring bij installateurs, gewoontes en risicomijdend gedrag ook bronnen van inertheden. Inertheden komen ook voort uit de beperkte bekendheid en ervaring die met sommige nieuwe energietechnieken bestaat, wettelijke regelingen en bestaande relaties met toeleveranciers. Verder bestaan er verschillende marktpartijen die een belang hebben bij de status quo. Dit geldt bijvoorbeeld bij operationele beslissingen die vanuit CO₂-reductie gewenst zijn maar waar actoren zich al snel tegen zullen willen verzetten. Het is voor die partijen in de praktijk mogelijk om verandering tot op zekere hoogte te beperken of te vertragen. MARKAL simuleert dergelijk gedrag van verschillende actoren in de energievoorziening niet. Deze inertheden zijn dus niet meegenomen.

Instrumenten ter implementatie van maatregelen

In de gepresenteerde MARKAL-analyse zijn implementatiebarrières voor CO₂-reductiemaatregelen niet meegenomen. MARKAL berekent een optimale configuratie van de energievoorziening zonder expliciet met implementatieproblemen rekening te houden.

Prijzen van energiedragers

CO₂-reductie leidt tot energiebesparing. Hierdoor neemt de vraag naar energiedragers af en dit zal leiden tot lagere energieprijzen. Energiebesparing wordt hierdoor iets minder kosteneffectief. Dit mechanisme is een inertheid bij het verminderen van het aandeel van fossiele energiebronnen in de energievoorziening. In MARKAL is dit mechanisme niet meegenomen en MARKAL onderschat op dit punt dus de inertheid van de energievoorziening.

Accumulatie van CO₂ in de atmosfeer

Kooldioxyde die wordt uitgestoten door het gebruik van fossiele energiebronnen verblijft gedurende lange tijd in de atmosfeer. Emissies in opeenvolgende jaren hebben dus een cumulatief effect op de CO₂-concentratie van de atmosfeer. Klimaatverandering zal een gevolg zijn van deze accumulatie van broeikasgassen. In de internationale klimaatonderhandelingen wordt vanwege praktische overwegingen echter vooral gesproken over doelstellingen voor een enkel jaar of een periode van enkele jaren. De cumulatieve kijk op CO₂-emissies wint nu in toenemende mate aan gewicht. De resultaten van de MARKAL-analyse laten zien dat de resultaten van de hedging-analyse erg gevoelig zijn voor de keuze of met een jaarlijkse of een cumulatieve CO₂-limiet wordt gerekend. Hier wordt herhaald dat bij het berekenen van de gecumuleerde CO₂-emissies gecorrigeerd wordt voor het verval van CO₂ uit de atmosfeer (zie ook 3.4).

Hoogte van de CO₂-reductie

In de modelberekeningen bedraagt de meest drastische CO₂-doelstelling een reductie met 45% ten opzichte van de emissies in 1990. Het is niet onmogelijk dat de doelstelling voor het jaar 2040 nog drastischer wordt. Het meenemen van een nog drastischer doelstelling, bijvoorbeeld 60% reductie, zal effecten hebben op de hedgingresultaten. De CO₂-emissies zullen gedurende de periode van onzekere doelstellingen nog verder worden teruggebracht. Er moet evenwel een kanttekening worden geplaatst bij de geldigheid van de modelresultaten bij dergelijke drastische CO₂-reductie. Het model beperkt zich nagenoeg tot technische maatregelen om emissies te verminderen (pas bij CO₂-reductiekosten van 1000 f/t CO₂ is CO₂-reductie door gedragsaanpassing verondersteld. In de praktijk zullen maatregelen die de omvang van de vraag naar energiediensten beïnvloeden via gedragsverandering al eerder belangrijk worden.

Kans op CO₂-reductie

Als de meest drastische CO₂-reductiedoelstelling die beschouwd wordt, met moeite is te realiseren, is de kansverdeling niet erg belangrijk [2]. Bij makkelijk haalbare CO₂-reductiedoelen zal de kansverdeling wel invloed hebben.

Ontwikkeling energievraag

De Trend-schets [8] is als basis gebruikt voor de groei in de energievraag in de MARKAL-scenario's. Nederland maakt op dit moment een economische groei door die hoger is dan is aangenomen voor de Trend-schets. De huidige verwachting is dat daarom de CO₂-emissies ook sneller groeien dan volgens de Trend-schets. Gevolg hiervan is dat zowel op de korte termijn als op de lange termijn doelstellingen voor CO₂-emissies lastiger te realiseren worden en er grotere inspanningen moeten worden verricht om de CO₂-reductie tot stand te brengen. Het valt niet voor de vuist weg te beredeneren of dit tot gevolg heeft dat de emissies van CO₂ op de korte termijn lager moeten uitkomen dan bij een laag economisch groeiscenario.

Tijdvoorkeur; verdiscontering

In de modelberekeningen is gerekend met een discontovoet van 5%. Dit is een compromis tussen een zogenaamde descriptieve rentevoet die door investeerders gehanteerd wordt en vaak ongeveer 15% bedraagt en een prescriptieve rentevoet welke 2% tot 3% per jaar bedraagt [17]. Indien de kosten van maatregelen in de toekomst verdisconteerd worden met een discontovoet van 15%, dan zal er op korte termijn weinig aan CO₂-reductie gebeuren. Het gewicht van de toekomstige kosten in guldens van nu is bij een dergelijk rentepercentage teruggebracht tot minder dan 1% als deze over 30 jaar verdisconteerd worden. Bij een discontovoet van 5% wegen de kosten over 30 jaar meer dan 20 keer zo zwaar in de afweging nu.

Zoals ook blijkt uit de gevoeligheidsanalyse stimuleert toepassing van een discontovoet van 2,5% in hedgingberekeningen het nemen van vroege maatregelen.

Timing t.o.v. buitenland

Of Nederland vroeg dan wel laat de CO₂-emissies besluit te gaan verminderen houdt ook verband met de verwachtingen hiervan ten aanzien

van de Nederlandse concurrentiepositie. Een relatief snelle reactie van Nederland geeft als belangrijkste bedreiging dat de internationale concurrentiepositie van Nederland op het gebied van energie-intensieve producten kan verminderen. Daarentegen kan Nederland een voorloper in duurzame technieken worden waardoor op termijn Nederland juist in een meer concurrerende positie komt. Als Nederland relatief laat is met CO₂-reductie kan Nederland de boot missen op het gebied van technieken voor duurzame ontwikkeling. In het voordeel van late actie is dat op korte termijn weinig kosten worden gemaakt en dat voor emissiereductie op termijn misschien gebruik gemaakt kan worden van in het buitenland ontwikkelde technieken. Dergelijke overwegingen worden in MARKAL niet meegenomen.

6.3 Totaal effect op resultaten hedgingberekeningen

De resultaten van de modelberekeningen met het stochastische MARKAL-model geven aan dat in een hedgingstrategie een aanzienlijke hoeveelheid voorzorgsmaatregelen wordt genomen teneinde er van verzekerd te zijn dat ook de meest vergaande cumulatieve CO₂-doelstellingen haalbaar zijn.

Als de verschillende aspecten die de hedging-resultaten van de modelberekeningen (paragraaf 6.2) beïnvloeden worden samengevat, kan geconcludeerd worden dat in het MARKAL-model:

1. technologische ontwikkelingen optimistisch zijn ingeschat,
2. een aantal inertheden aanwezig zijn die over het algemeen tot een te optimistische inschatting leiden aangaande de introductie van nieuwe technieken,
- 3, de hedgingstrategie sterk beïnvloed wordt door het cumulatief dan wel jaarlijks meenemen van CO₂-emissies,
4. een relatief hoge disconto-voet is gebruikt, die de resultaten heeft beïnvloed.

De aspecten die hierboven onder de punten 1, 2 en 4 zijn genoemd wijzen in een optimale hedgingstrategie op 'actie vroeger in de tijd'. Aspect 3 zal leiden tot een hedgingstrategie met 'actie later in de tijd'.

Het MARKAL-model overschat daarmee netto de flexibiliteit in de energievoorziening. Daarom mag verwacht worden dat een optimale hedgingstrategie bij het beter meenemen van bovengenoemde aspecten in nog sterkere mate zal inzetten op maatregelen vroeg in de tijd.

7. CONCLUSIES

Door allerlei investeringsbeslissingen nu wordt de hoogte van CO₂-emissies uit de energievoorziening ook op de lange termijn vastgelegd. Het is niet wenselijk dat CO₂-emissies over een lange periode worden vastgelegd vanwege de kans dat in de toekomst de CO₂-emissies vergaand verminderd moeten worden. Er zijn mogelijkheden om er voor te zorgen dat de energievoorziening meer flexibel wordt zodat reductie van CO₂-emissies op termijn beter mogelijk is. In deze studie is op twee manieren onderzoek gedaan naar 'het indekken' (hedging) tegen vergaand CO₂-beleid. Ten eerste zijn er modelberekeningen gedaan voor de Nederlandse energievoorziening. Het model dat is gebruikt is geschikt gemaakt voor hedging-analyses. Ten tweede is er een inventarisatie gemaakt van concrete hedging-opties.

De conclusies van de modelanalyse voor de Nederlandse energievoorziening volgen hieronder:

- De resultaten van de modelberekeningen met het stochastische MARKAL-model geven aan dat in een hedgingstrategie het beste een aanzienlijke hoeveelheid voorzorgsmaatregelen genomen dient te worden teneinde er van verzekerd te zijn dat ook de meest vergaande cumulatieve CO₂-doelstellingen haalbaar zijn. Dit betekent ruwweg dat tot het jaar 2020 maatregelen genomen moeten worden tot een kostenniveau van 100-200 f/t CO₂.
- De mate waarin al vroegtijdig maatregelen voor CO₂-reductie genomen moeten worden, hangt overigens sterk af van de vraag of CO₂-emissiedoelstellingen cumulatief dan wel jaarlijks worden beschouwd. Als *jaarlijkse* CO₂-emissiedoelstellingen worden gehanteerd in plaats van *cumulatieve* doelstellingen is vroege actie veel minder nodig. Dit illustreert een dilemma: wanneer je de problematiek beschouwt vanuit een perspectief dat milieuhygiënisch gezien juist is (cumulatieve CO₂-doelstellingen), dan is hedging belangrijk; echter, wanneer de problematiek beschouwd wordt op de wijze waarop het vanuit de klimaatonderhandelingen waarschijnlijk op ons af zal komen, dan is hedging minder belangrijk.
- Bij de berekende hedgingstrategieën wordt in vergelijking met scenario's zonder onzekerheid steeds gekozen voor het vroeg nemen van maatregelen teneinde lange termijn risico's te verminderen. Dit resultaat is onafhankelijk of het nu gaat om jaarlijkse CO₂-reductie, om cumulatieve CO₂-reductie of om hoge energieprijzen.
- De hedgingstrategie heeft met name effect op de inzet van technieken met lange levensduur zoals isolatie bij gebouwen en stadsverwarming.
- Daarnaast is het vergroten van de inzet van aardgas voor de opwekking van elektriciteit in de hedging-strategie aantrekkelijk. Op deze wijze worden relatief goedkoop CO₂-emissies verminderd en wordt tijd gewonnen.
- De toekomstige baten van hedging kunnen aanzienlijk zijn. In vergelijking met strategieën die inzetten op geen of gematigde cumulatieve CO₂-doelstellingen kunnen de jaarlijkse baten na 2020 oplopen tot tientallen miljarden per jaar. Daartoe moet wel tussen 2000 en 2020 gemiddeld een miljard per jaar geïnvesteerd worden. Het volgen van een

hedgingstrategie impliceert hiermee dat een nadelige erfenis voor een toekomstige generatie - binnen redelijke grenzen - wordt voorkomen.

- De *verwachte netto contante baten* van een hedgingstrategie zijn 4,5 miljard ten opzichte van een strategie die meteen inzet op een drastische cumulatieve CO₂-doelstelling en 38 miljard ten opzichte van een gematigde CO₂-reductiestrategie. De verwachte netto contante baten zijn nog groter ten opzichte van beleid dat aanvankelijk inzet zeer gematigde CO₂-doelstellingen, maar deze baten konden niet exact worden bepaald.
- Een veronderstelde ruime beschikbaarheid van relatief goedkope technieken met lage CO₂-emissies op termijn (zoals CO₂-afvang) geeft een fors effect op de resultaten van een hedgingstrategie. Veel vroege actie is bij deze veronderstelling minder optimaal.
- In de modelanalyse zijn inertheden en beschikbaarheid van technieken relatief optimistisch ingeschat. In de werkelijkheid is de flexibiliteit van de energievoorziening wellicht kleiner dan in het model. Het juister beschouwen van flexibiliteit en inertheden in optimale hedgingstrategieën zal leiden tot de inzet van CO₂-reductiemaatregelen vroeger in de tijd.

Hieronder volgen de belangrijkste conclusies die uit de inventarisatie van hedging-opties per sector naar voren komen. Opgemerkt moet worden dat de transportsector niet is beschouwd.

- Een deel van de CO₂-emissies op lange termijn (na 2020) is nu al beperkt te beïnvloeden. Dit geldt bijvoorbeeld bij ruimteverwarming en warm tapwater in de bestaande bouw.
- In elke beschouwde sector zijn concrete hedging-opties te identificeren.
- De mogelijkheid om in te treden vooral op, op het moment dat beslissingen worden gemaakt over bijvoorbeeld een nieuw gebouw, een nieuwe installatie of een nieuwe locatie. Maatregelen die de flexibiliteit verhogen moeten op dat moment worden genomen.
- Er is onderscheid te maken naar hedging-opties waarbij direct een CO₂-reductiemaatregel wordt genomen omdat het later nooit meer mogelijk is (hoge toekomstwaarde hedging-optie) en naar hedging-opties waarbij randvoorwaarden gerealiseerd worden zodat later een bepaalde CO₂-reductiemaatregel mogelijk is (anticiperende hedging-optie).
- Veel hedging-opties hebben te maken met ruimtelijke ordening. De invloedstermijn van beslissingen over de ruimtelijke ordening is over het algemeen groot en beslissingen zijn vaak moeilijk terug te draaien en moeilijk aan te passen.
- De potentie voor CO₂-emissiereductie van individuele hedging-opties in het jaar 2030 zijn in de industrie en bij elektriciteitsopwekking (1-10 Mton) globaal een orde groter dan in de gebouwde omgeving (0,1-1 Mton). Aan de andere kant wordt de gebouwde omgeving gekenmerkt door langere levensduren van installaties.
- In de gebouwde omgeving geldt voor veel beslissingen 'nu of nooit'; het ontwerp is zeer bepalend voor de energievraag van gebouwen gedurende hun hele levensduur. Dit is onder andere van toepassing op zonoriëntatie, isolatie en bouwmassa. Randvoorwaarden om in de gebouwde omgeving een hogere potentiële reductie van CO₂-emissies mogelijk te maken betreffen onder andere mechanische ventilatie, lage temperatuurverwarming en reservering van ruimte.
- Bij de industrie is de invloedstermijn van veel beslissingen meestal niet heel groot behalve voor locatie-keuzes. De belangrijkste conditie om op termijn veel CO₂-reductie te kunnen realiseren, betreft de demonstratie

van technieken teneinde risico's te verminderen en het verhogen van de recyclebaarheid van producten.

- Bij de energie-infrastructuur zelf zijn weinig of geen mogelijkheden om de emissies van CO₂ te verminderen. De energie-infrastructuur bepaalt veelal de flexibiliteit voor CO₂-reductie elders in de energievoorziening, zoals benutting van restwarmte en de inzet van elektrische warmtepompen. Een belangrijke hedging-optie in de energie-infrastructuur is de dimensionering van het distributienet voor elektriciteit.
- Voor elektriciteitsopwekking bestaan veel opties om de emissies van CO₂ te verminderen. Voor veel van deze opties bestaan randvoorwaarden om een grote inzet in de toekomst mogelijk te maken. Dit betreft bijvoorbeeld demonstratie en schaalvergroting (duurzame energie en CO₂-afvang), voldoende back-up vermogen (duurzame energie) en import-contracten (biomassa). Locatiekeuzes zijn ook bij elektriciteitsopwekking belangrijk bij toepassing van restwarmte-benutting en bij CO₂-afvang en -opslag.

REFERENTIES

- [1] Ministerie van VROM: *Vervolgnota Klimaatverandering*, 1996.
- [2] J.R. Ybema et al.: *Including climate change in energy investment decisions*. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN-C--95-073, 1995.
- [3] T. Wigley, R. Richels and J. Edmonds: *Economic and environmental choices in the stabilisation of atmospheric CO₂ concentrations*. Nature 379, 240-243, 1996.
- [4] J. Alcamo en E. Kreileman: *The global climate system: near term action for long term protection*. Report, RIVM, Bilthoven, Netherlands, 1996.
- [5] M. Grubb: *Technologies, energy systems and the timing of CO₂ emissions abatement*. Energy Policy, Vol. 25, No 2, pp 159-172, 1997.
- [6] A. Kanudia and R. Loulou: *Robust responses to climate change via stochastic MARKAL: the case of Quebec*. GERAD Working paper, G-96-13, March 1997.
- [7] H. de Kruyk and G. Goldstein: *Markal MUSS information note: Stochastic MARKAL*. Petten, Netherlands Energy Research Foundation, May 1996.
- [8] O. van Hilten et al.: *De ECN-bijdrage aan de Derde Energienota, uitgebreide beschrijving energieschetsen 2020*. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN-C--96-014, maart 1996.
- [9] L.G. Fishbone et al.: *User's guide for Markal*. BNL/KFA version 2.0. Brookhaven National Laboratory, 1982.
- [10] A.J. van de Berg et al.: *Van wereldmarkt tot eindverbruiker*. Ministerie van Economische Zaken, Beleidsstudies Energie 7, 1995.
- [11] J.R. Ybema et al.: *Prospect of energy technologies in the Netherlands*. Volume 1 and 2. Petten, Netherlands Energy Research Foundation, ECN-C--95-002 and ECN-C--95-039, Petten, July 1995.
- [12] N.V. Elektriciteitsbedrijf Zuid-Holland. *Kolencentrale Maasvlakte*. (Folder).
- [13] M. Beeldman. *Persoonlijke communicatie*. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland, April 1997.
- [14] P. Kroon et al.: *Nationale energieverkenningen 1995-2020*. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland, (in voorbereiding), 1997.
- [15] J.R. Ybema: *On comparing the emissions of different greenhouse gases*, Petten, Netherlands Energy Research Foundation, ECN-RX-90-082, Petten, 1990.
- [16] L. Schrattenholzer and K. Marchant: *The 1995 international energy workshop: the poll results and a review of papers*. OPEC Review, Vol. XX, No 1, March 1996.

- [17] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 1995, Working Group III - economic and social dimensions of climate change*. Cambridge University Press, 1995.
- [18] NOVEM-brochure: *De factor zon bij verkavelen*.
- [19] H. Kaan: *Persoonlijk mededelingen*. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland, 17 juni 1997.
- [20] F. Ligthart en C. Zijdeveld: *De energieprestatienorm: geen vooruitstrevende prestatie*. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN-P--95-001, 1995.
- [21] NW&S: *ICARUS-3, The potential of Energy Efficiency Improvement in the Netherlands up to 2000 and 2015*. Utrecht, 1994.
- [22] J.A.M. Ogink: *Het energiegebruik en de emissie bij warmte-opwekking in woningen*. Artikel in *Gas*, Juli/augustus 1992.
- [23] P.A. Okken: *Waterstof energietoepassingen, Een compilatie van mogelijke technieken voor waterstofgebruik in toekomstige Nederlandse energiehuishouding*. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN-C--92-065, 1992.
- [24] F. Ligthart en C. Zijdeveld: *Bruikbare energieprestatie-norm voor utiliteitsgebouwen*. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN-P--96-001, 1996.
- [25] J.R. Ybema en P.A. Okken: *Technologiekaracterisering gebouwde omgeving*. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN-C--92-063, 1992.
- [26] D.J. Gielen and A.W.N. van Dril: *The Basic Metal Industry and Its Energy Use. Prospects for the Dutch Energy Intensive Industry*. Petten, Netherlands Energy Research Foundation, ECN-C-97-019, March 1997.
- [27] K. Blok et al.: *CO₂-emission reduction technologies for oil exporting countries*. NW&S, 1997.
- [28] D.J. Gielen en J.C. Römer: *De grensoverschrijdende CO₂-reductie door afvalbeleid*. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN-C-96-024, maart 1996.
- [29] D.J. Gielen, D. Vos and A.W.N. van Dril: *The Petrochemical Industry and Its Energy Use. Prospects for the Dutch Energy Intensive Industry*. Petten, Netherlands Energy Research Foundation, ECN-C-96-029, April 1996.
- [30] J.R. Ybema et al.: *Beleidsinstrumenten en realisatie van 10% reductie van CO₂-uitstoot in 2010*. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN-C-97-013, Februari 1997.
- [31] D.J. Gielen: *Buildings Materials and CO₂*. Petten, Netherlands Energy Research Foundation, ECN-C--97-065, October 1997.
- [32] L.B.M.M. Boels et al.: *SYRENE-studie, Infrastructuur brandstoffen: distributie van energiedragers*. CE, Delft, 1994.

-
- [33] NOVEM: *SYRENE, Kiezen voor een duurzame energiehuishouding, prioriteiten voor onderzoek en ontwikkeling*. Utrecht, maart 1996.
- [34] NW&S: *Flexibiliteit inbouwen in de VINEX-energie-voorziening*. E&M 6/7, 1997.
- [35] NW&S: *Duurzame warmtevoorziening: Systemstudie van technische opties*. SYRENE, december 1994.
- [36] H. Audus: *Greenhouse gas releases from fossil fuel power stations*. IEA Greenhouse gas R&D Programme, 1993.
- [37] L.G.H. van der Meer et al.: *Investigations regarding the storage of carbon dioxide in aquifers in The Netherlands*. TNO OS 92-24-A, 1992.
- [38] IWACO B.V: *CO₂-verwijdering: milieu-aspecten*. Den Bosch, rapport 332.7190, 1994.
- [39] P. Lako: *Persoonlijke mededeling*, Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland, 20 juni 1996.

BIJLAGE 1 BEREKENING VAN DE BATEN VAN HEDGING

In onderstaande tabel worden diverse CO₂-reductiestrategieën en de kosten van deze strategieën weergegeven in symbolen. De bij deze strategieën behorende kosten tot 2020, de verwachte kosten na 2020, de jaarlijkse baten van hedging en de totale baten van hedging zijn gedefinieerd.

In de tabel wordt gebruikt gemaakt van de volgende afkortingen:

H = Hedgingstrategie

R_X = X%-reductie-strategie met X is A, B of C%

(R_X staat voor X% CO₂-reductie te bereiken in 2040.)

P_A = Kans dat vanaf 2020 ingezet wordt op A% reductie in 2040.

(Aansluitend bij deze studie is gekozen voor 3 CO₂-reductiedoelen voor het jaar 2040.)

Strategie tot 2020, te bereiken in 2040	Doelstelling na 2020, te bereiken in 2040	Kans op CO ₂ -doel in 2040	Jaarlijkse CO ₂ -reductiekosten		
			2000 = periode 1	2020 = periode 5	2040 = periode 10
H	A	P _A	K-H-1	K-H-5	K-H _A -10
H	B	P _B	K-H-1	K-H-5	K-H _B -10
H	C	P _C	K-H-1	K-H-5	K-H _C -10
R _X	A	P _A	K-R _X -1	K-R _X -5	K-R _X -10
R _X	B	P _B	K-R _X -1	K-R _X -5	K-R _X -10
R _X	C	P _C	K-R _X -1	K-R _X -5	K-R _X -10

Kosten van hedging-strategie tot 2020 in periode i, met i=1...5:

$$KH_i = (K-H_A-i)$$

Kosten van X%-reductie-strategie tot 2020 in periode i, met i=1...5:

$$KX_i = (K-R_X-i)$$

Verwachte Kosten in periode i indien tot 2020 een hedging-strategie is gevolgd:

$$VKH_i = (P_A \cdot K-H_A-i + P_B \cdot K-H_B-i + P_C \cdot K-H_C-i)$$

voor i= 6...10

Verwachte kosten in periode i, indien tot 2020 een X%-reductie-strategie is gevolgd:

$$VKX_i = (P_A \cdot K-R_A-i + P_B \cdot K-R_B-i + P_C \cdot K-R_C-i) \text{ voor } i=6...10$$

Jaarlijkse Baten van hedging: $JB_i = (VK_i + VKH_i) - (VX_i + VKX_i)$ voor i=1...10

Totale Baten van hedging = $TB = \sum (VK_i + VKH_i) - (VX_i + VKX_i)$ voor i=1...10