

# **Transitie naar een duurzame energievoorziening in 2050**

## **Evolutie of Revolutie?**

ECN Beleidsstudies  
ECN Schoon Fossiel  
Van Wunnik Energy Consultancy Plus  
Kipperman Consultancy & Mediation

## Verantwoording

Deze studie is uitgevoerd door ECN Beleidsstudies, ECN Schoon Fossiel, Van Wunnik Energy Consultancy Plus en Kipperman Consultancy & Mediation in opdracht van de Algemene Energieraad (AER). De studie staat bij ECN geregistreerd onder projectnummer 7.7493.

De volgende auteur hebben een bijdrage geleverd aan deze studie:

- Harm Jeeninga, Pieter Kroon (ECN Beleidsstudies).
- Marcel Weeda (ECN Schoon Fossiel).
- Toine van Wunnik (van Wunnik Energy Consultancy Plus).
- Ton Kipperman (Kipperman Consultancy & Mediation).

Contactpersoon voor deze studie is Harm Jeeninga, ECN Beleidsstudies.

## Abstract

On behalf of the General Energy Council (AER) in the Netherlands, ECN Policy Studies, ECN Clean Fossil Fuels, Van Wunnik Energy Consultancy Plus and Kipperman Consultancy & Mediation have carried out a study in order to determine whether or not an ambitious CO<sub>2</sub>-emission target for 2050 can be reached by means of incremental innovation (evolution) rather than by taking revolutionary measures. The emission target was set on a reduction of CO<sub>2</sub>-emissions within the Netherlands by -50% in 2050 in comparison to the 1990 emission level.

Focus point of this study is the demands imposed on the flexibility of the energy infrastructure. It is concluded that the transition towards a sustainable energy system by means of incremental innovation is possible when looking at the transition from a technical perspective. However, only by means of an effective and far-reaching management of the transition, the desired revolution through evolution can be achieved. It is questionable whether or not the government is able to fulfil these tasks under current market conditions (liberalisation, privatisation).

It should be noted that achievement of the emission target by means of alternative transition trajectories, i.e. revolution instead of evolution, is even less likely. Due to the need for drastic adjustments in the energy infrastructure, the total costs of a revolution will be much higher in comparison to a transition through evolution. Also, heavy opposition from critical actors in the transition can be expected in a revolutionary process. It turns out that tuning of energy demand and the various energy sources is rather complex in case an ambitious emission target has to be reached. Therefore, an integrative system approach is needed, in which the interaction between energy production, energy demand and the demands on the flexibility of the infrastructure is considered rather than to focus solely on the impacts and demands on the infrastructure.

# INHOUD

LIJST VAN TABELLEN	5
SAMENVATTING	7
1. INLEIDING	9
1.1 Achtergrond	9
1.2 Doelstelling	9
1.3 Aanpak	10
2. EISEN AAN TOEKOMSTIGE ENERGIE-INFRASTRUCTUUR	11
2.1 Inleiding	11
2.2 Energievraag in 2050	11
2.3 Technologische opties voor verduurzaming van de energievraag	13
2.3.1 Industrie	14
2.3.2 Huishoudens, Diensten en Overheid, Land en Tuinbouw	15
2.3.3 Transport	18
2.4 Energievoorzieningsconcepten en CO <sub>2</sub> -emissies	19
2.5 Actoren en aangrijpingspunten	22
2.5.1 Laagwaardige warmte - Huishoudens, Diensten & Overheid, Landbouw	23
2.5.2 Industrie - Hoogwaardige warmte en elektriciteit	23
3. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	25
3.1 Incrementele innovatie als route naar een duurzame energievoorziening	25
3.2 Overige bevindingen en conclusies	27
3.3 Aanbevelingen	28
LITERATUUR	30
BIJLAGE A DE ENERGIEVRAAG IN 2050	32
A.1 Informatie uit diverse studies	32
A.2 Sectortrends en ESKL	34
A.3 Eerste inschatting en vergelijking	34
A.4 Energievraag 2050	36
A.5 Aanvullende informatie over het energieaanbod.	39
A.6 Eerste schatting primair verbruik en CO <sub>2</sub> -uitstoot	41
BIJLAGE B TECHNISCH REDUCTIE POTENTIEEL	42
B.1 Inleiding	42
B.2 Industrie	42
B.2.1 Vraagbeperkende maatregelen	42
B.2.2 Duurzame energie	43
B.2.3 Efficiënt fossiel	43
B.2.4 Interacties met andere sectoren	43
B.2.5 Interacties met infrastructuren	44
B.2.6 Aanbeveling	44
B.3 Transport	44
B.3.1 Vraagbeperkende maatregelen	45
B.3.2 Duurzame energie	45
B.3.3 Efficiënt fossiel	45
B.3.4 Interacties met andere sectoren	45
B.3.5 Interacties met infrastructuren	46
B.3.6 Aanbeveling	46
B.4 Huishoudens	46
B.4.1 Vraagbeperkende maatregelen	46
B.4.2 Duurzame energie	47
B.4.3 Warmtepompen	47

B.4.4	Zon-thermische systemen	48
B.4.5	Bio-energie	49
B.4.6	Zon-PV	49
B.4.7	Wind	49
B.4.8	Efficiënt fossiel	49
B.4.9	Interacties met andere sectoren	50
B.4.10	Interacties met infrastructuur	50
B.4.11	Aanbeveling	51
B.5	Overige verbruikers/utiliteit	51
B.5.1	Vraagbeperkende maatregelen	52
B.5.2	Duurzame energie	52
B.5.3	Efficiënt fossiel	52
B.5.4	Interacties met andere sectoren	52
B.5.5	Interacties met infrastructuur	52
B.5.6	Aanbeveling	52
B.6	Land- en tuinbouw	53
B.6.1	Vraagbeperkende maatregelen	53
B.6.2	Duurzame energie	53
B.6.3	Efficiënt fossiel	54
B.6.4	Interacties met andere sectoren	54
B.6.5	Interacties met infrastructuur	54
B.6.6	Aanbeveling	54
B.7	Centrale aanbodopties en grensoverschrijdend energietransport	55
B.7.1	Centraal aanbod fossiel	55
B.7.2	Centraal aanbod duurzaam	55
B.7.3	Grensoverschrijdend energietransport	55
B.7.4	Aanbeveling	56
BIJLAGE C    TECHNOLOGIEËN IN HET PERSPECTIEF VAN DE TOEKOMSTIGE		
INFRASTRUCTUUR		57
C.1	Inleiding	57
C.2	Toekomstige energie-infrastructuur	58
C.3	Uitwerking van de gewenste technologieën voor de infrastructuur van de toekomst	60
C.4	Innovaties die met de veranderingen in de infrastructuur samenhangen zijn goed vanuit de invalshoeken ‘Technologie’ en ‘Systeem’ te karakteriseren:	61
C.4.1	Technologie	61
C.4.2	Systeem	62
C.5	Import en export van elektriciteit	62
BIJLAGE D    DIVERSEN		63
D.1	Energie-aanbod	63
D.1.1	Inzet van Biomassa	63
D.1.2	Inzet van windenergie	64
D.1.3	CO <sub>2</sub> -afvang	65

## LIJST VAN TABELLEN

Tabel 2.1	<i>Energievraag voor sectoren in 2000 en 2050 per type energiedrager</i>	12
Tabel 2.2	<i>CO<sub>2</sub>-emissie en primair verbruik in 2000 en prognose voor 2050</i>	13
Tabel 2.3	<i>Energievraag naar sector en kwaliteitsniveau in 2000 en 2050 voor een scenario met een hoge groei en een scenario met een lagere groei (getallen tussen haakjes)</i>	14
Tabel 2.4	<i>Finale energievraag, inzet van primaire bronnen en resulterende CO<sub>2</sub>-emissie voor een aantal varianten</i>	20
Tabel A.1	<i>De energievraag in 2050 uit ESKL (van Hilten et al., 2000); aangepast</i>	33
Tabel A.2	<i>Scenario's van de energievraag naast elkaar [PJ]</i>	35
Tabel A.3	<i>Scenario energievraag eindverbruikers inclusief cokesfabrieken exclusief duurzaam</i>	36
Tabel A.4	<i>Overzicht van diverse temperatuur niveaus</i>	37
Tabel A.5	<i>Berekening verbruikt transportsector</i>	38
Tabel A.6	<i>Scenario energievraag transport en totaal eindverbruikers (vervolg van Tabel A.3 [PJ])</i>	39
Tabel A.7	<i>Aanvullende gegevens energiebedrijven voor het energieaanbod [PJ]</i>	39
Tabel A.8	<i>Schatting verbruik en CO<sub>2</sub>-uitstoot.</i>	41
Tabel C.1	<i>Uitwerking van de gewenste technologieën voor de infrastructuur van de toekomst</i>	60
Tabel D.1	<i>Overzicht van mogelijkheden om te komen tot beperking van energievraag (het vermijden van energievraag)</i>	65



## SAMENVATTING

In opdracht van de Algemene Energieraad (AER) is door ECN Beleidsstudies, ECN Schoon Fossiel, van Wunnik Energy Consultancy Plus en Kipperman Consultancy & Mediation onderzocht of via de route van incrementele innovatie voldaan kan worden aan een verregaande lange termijn CO<sub>2</sub>-reductiedoelstelling. Diverse potentieel studies geven aan dat het in principe technisch mogelijk is om de totale CO<sub>2</sub>-emissies in 2050 met circa 50% - 80% te reduceren ten opzichte van het niveau in 1990, maar geven geen uitsluitel of voor het bereiken van deze reductie een revolutie noodzakelijk is, of dat, onder voorwaarden, een evolutionaire route kan worden gevolgd. De AER denkt vooralsnog aan de geleidelijke aanpak en acht de 'incrementeel innovatieve route' als het meest reëel.

Het schetsen van een energievoorziening waarmee daadwerkelijk de beoogde reductiedoelstelling wordt behaald blijkt niet eenvoudig. Hierbij spelen met name de discrepanties tussen vraag en aanbod alsmede de mogelijk grote afhankelijkheid van te importeren energiedragers een rol. Met name het beslag op biomassa is naar verwachting zeer groot. Van essentieel belang is om te kijken naar de samenhang tussen verschillende processen. Geconcludeerd wordt dat niet zozeer de flexibiliteit van de infrastructuur maar de flexibiliteit van de energievoorziening, waarin de samenhang tussen energievraag en energieaanbod alsmede wijze waarop deze gekoppelde kunnen worden, uitgangspunt zou moeten zijn bij de vraag hoe de transitie naar een duurzame energievoorziening kan worden bewerkstelligd.

De transitie naar een duurzame energievoorziening in 2050 via een incrementeel innovatieve route lijkt technisch mogelijk te zijn, maar vereist een effectief en daadkrachtig transitie management. Het is, met name vanwege het conflicteren van korte en lange termijn belangen, sterk de vraag of er een partij is die in staat is de regie te voeren. De overheid is primair de partij die baat heeft bij het behalen van de reductiedoelstelling, terwijl de kosten vooral ten laste komen van andere actoren. Voor het bewerkstelligen van de beoogde transitie is het derhalve noodzakelijk dat de overheid haar instrumentarium zodanig vorm geeft dat zowel de kosten als de baten bij de 'critical actors' komen te liggen<sup>1</sup>. Hierbij kan worden gedacht aan bijvoorbeeld een CO<sub>2</sub>-heffing of emissiehandel.

De revolutie vormt het alternatief voor de incrementeel innovatieve route. Aangenomen mag worden dat de bereidwilligheid van de 'critical actors' om via revolutie te voldoen aan een vergaande CO<sub>2</sub>-reductiedoelstelling beduidend minder groot is dan wanneer dit proces via evolutie plaats kan vinden. De kosten van een revolutie zijn, vanwege de noodzakelijke ingrijpende revolutionaire aanpassingen aan de energie-infrastructuur, naar verwachting beduidend hoger dan wanneer de weg van de evolutie bewandeld zou zijn.

Met name inpassingsproblemen lijken bij een verregaande verduurzaming van de energievoorziening een belangrijke rol te spelen (met name wind vs. warmtekracht). Via een systeemstudie dient onderzocht te worden in hoeverre deze inpassingsproblemen de vrije ruimte voor inzet van bepaalde energieconversietechnieken bepalen dan wel beperken. Hierbij dient niet een technisch/economische optimalisatie vanuit het heden, maar een aanpak op basis van integrale robuuste en plausibele eindbeelden als uitgangspunt te dienen. Aanbevolen wordt nader onderzoek te doen naar de verduurzaming van feedstocks alsmede naar de inzet van syngas in de industrie en mogelijke verbeteringen van het productieproces van syngas uit biomassa. Vanwege het relatief lage vervangingstempo en de grote fijnmazigheid zou zo snel

---

<sup>1</sup> In principe kan via regulering ook een verandering worden bewerkstelligd zonder dat de baten terecht komen bij de investeerder. Probleem bij de inzet van dit type instrument, met name indien verregaande eisen worden gesteld, is het draagvlak bij de investeerder.

mogelijk moeten worden begonnen met de aanleg van een robuuste infrastructuur waarmee, op termijn, op een duurzame wijze voorzien kan worden in de vraag naar laagwaardige warmte.

# 1. INLEIDING

## 1.1 Achtergrond

De Minister van Economische Zaken heeft de Algemene Energie Raad (AER) gevraagd advies uit te brengen over het onderwerp ‘Energie-infrastructuur van de toekomst’. De energie-infrastructuur is van cruciaal belang voor het functioneren van onze maatschappij. Het vormt de verbindende schakel tussen vraag en aanbod van energie. Hierbij heeft de energie-infrastructuur een faciliterende rol. Aard, omvang en inrichting zijn voornamelijk door vraag en aanbod bepaald.

Algemeen wordt verwacht dat we aan de vooravond staan van aanzienlijke veranderingen op het gebied van vraag en aanbod. Drijvende krachten hierachter zijn de veranderende verhoudingen in de energiemarkt, de toenemende aandacht voor voorzieningszekerheid, en de toenemende zorg over milieukwaliteit en klimaatverandering. Het leidt geen twijfel dat deze veranderingen hun weerslag zullen hebben op de energie-infrastructuur.

De bestaande energie-infrastructuur vertegenwoordigt een aanzienlijk geïnvesteerd kapitaal. De aanlegkosten van nieuwe infrastructuur zijn substantieel. Een belangrijke vraag daarom is of de gewenste, respectievelijk benodigde toekomstige energie-infrastructuur zal kunnen ontstaan met stapsgewijze vernieuwingen (evolutie), voortbouwend op de bestaande infrastructuur, of dat er ingrijpende veranderingen (revolutie) zijn vereist om aan alle eisen te kunnen voldoen die vanuit vraag en aanbod aan de energie-infrastructuur worden gesteld. Met andere woorden, is het voorstelbaar dat via kleine revoluties een evolutie op macro niveau wordt bewerkstelligd waarbij op termijn een CO<sub>2</sub>-arme energievoorziening ontstaat die voldoet aan een (nu nog) onbekende lange termijndoelstelling, en die naast ‘schoon’ ook nog eens betrouwbaar (voorzieningszekerheid) en betaalbaar is. Van belang hierbij is niet alleen oog te hebben voor de technische haalbaarheid, maar ook in een vroeg stadium na te denken over de stuwende krachten achter de beoogde transitie, over de actoren die hierbij een cruciale rol kunnen spelen, hun motieven, en hoe deze actoren, indien nodig, aan te sturen.

De AER denkt voornamelijk aan de geleidelijke aanpak en acht de ‘incrementeel innovatieve route’ als het meest reëel en ook voldoende. Overigens wordt met ‘incrementeel’ niet bedoeld op een behoudende aanpak, maar op een stapsgewijze aanpak die op micro niveau tot revolutie kan leiden. Innovatiekansen moeten optimaal worden benut, en belemmeringen moeten worden opgeruimd. Met de term ‘incrementeel’ wordt in feite slechts aangeduid dat er geen netwerken geforceerd worden vervangen voor het einde van hun (economische of technische?) levensduur.

De initiële denklijn van de AER wordt vanuit recent onderzoek niet uitgesloten, maar ook niet onomstotelijk ondersteund. Nadere reflectie op dit punt is nodig. De AER heeft ECN, Van Wunnik Energy Consultancy Plus en Kipperman Consultancy & Mediation gevraagd de kwestie evolutie of revolutie nader te onderzoeken. Het onderhavige rapport bevat een weergave van de bevindingen.

## 1.2 Doelstelling

Doelstelling van de opdracht is om:

- Inzichtelijk te maken of het mogelijk is om via een route van incrementele innovatie een energie-infrastructuur te realiseren die de ruggengraat kan vormen van een toekomstige duurzame energievoorziening.

- In beeld te brengen waar de incrementeel innovatieve route op gericht moet zijn om een dergelijke energie-infrastructuur te realiseren.
- Aangrijpingspunten en sturingsmogelijkheden te identificeren voor realisatie van een dergelijke energie-infrastructuur (transitiemanagement).

### 1.3 Aanpak

Centraal staat de energie-infrastructuur. Hieronder wordt verstaan het geheel aan netwerken (niet persé leidinggebonden) voor transport, distributie en opslag van energiedragers naar de verschillende eindgebruikers van energie, inclusief de distributie van transportbrandstoffen. Aard, omvang en inrichting van de energie-infrastructuur kan echter niet los worden gezien van de rest van de energievoorziening. Om een beeld voor de energie-infrastructuur te ontwikkelen dient deze te worden beschouwd in samenhang met ontwikkelingen op het gebied van energievraag, -aanbod en -conversie.

Voor ontwikkeling van een beeld voor de energie-infrastructuur is daarom allereerst de ontwikkeling van de (autonome) energievraag in 2050 in kaart gebracht (Paragraaf 2.2). Hierbij is een onderverdeling gemaakt naar sectoren die zijn te onderscheiden gelet op type energievraag. Tevens is een inschatting gemaakt van de bijbehorende CO<sub>2</sub>-emissie indien grofweg de ontwikkeling in de huidige aanbod-mix wordt doorgetrokken. Op basis van deze emissie en een reductiedoelstelling (bijvoorbeeld -50% ten opzichte van 1990) is de beleidsopgave voor CO<sub>2</sub>-emissiereductie te bepalen ('het verschil tussen de prognose en de doelstelling'). Vervolgens zijn per onderscheidende sector technologische oplossingsrichtingen geïdentificeerd om te komen tot CO<sub>2</sub>-emissiereductie (Paragraaf 2.3). Tegelijkertijd is hierbij aangegeven wat de consequenties kunnen zijn van de oplossingsrichtingen voor de energie-infrastructuur, en is gelet op interactie tussen mogelijke oplossingsrichtingen voor de verschillende sectoren. Met name is beredeneerd of tot verandering kan worden gekomen via een geleidelijke weg of niet, en of de mogelijke oplossingsrichtingen voor de afzonderlijke sectoren kunnen leiden tot een samenhangende energievoorziening. Aan de hand hiervan zijn een aantal varianten voor de energievoorziening geschetst en is een inschatting gemaakt van de bijbehorende inzet van primaire energiedragers en de bijbehorende CO<sub>2</sub>-emissie (Paragraaf 2.4). Tot slot is voor de terreinen waar significante aanpassingen wenselijk lijken in kaart gebracht wie daar de belangrijkste actoren zijn, welke rol zij in het veranderingsproces zouden moeten of kunnen spelen, en welke aangrijpingspunten (instrumenten) er zijn om eventueel wenselijke ontwikkelingen te sturen (Paragraaf 2.5). Tot slot worden in Hoofdstuk 3 algemene conclusies getrokken en een aantal aanbevelingen geformuleerd.

## 2. EISEN AAN TOEKOMSTIGE ENERGIE-INFRASTRUCTUUR

### 2.1 Inleiding

Om na te gaan of het mogelijk is om via de weg van 'incrementele innovatie' te komen tot een transitie naar een duurzame energievoorziening in 2050 is het noodzakelijk om zowel een beeld te hebben van de autonome ontwikkeling alsmede ook van de (technische) mogelijkheden en de inspanningen die nodig zijn om te komen tot het gewenste eindbeeld. Hiertoe is allereerst een schatting gemaakt van de energievraag in 2050. Op basis hiervan is de beleidsopgave bepaald. Vervolgens is nagegaan op welke wijze de energievraag verder kan worden verduurzaamd en wat voor consequenties dit heeft voor de energie-infrastructuur.

### 2.2 Energievraag in 2050

Het maken van een valide schatting van de ontwikkeling van de autonome energievraag is niet eenvoudig. De energievraag wordt bepaald door het tempo van de bevolkingsgroei, het tempo van de economische groei, verschuivingen in de economische structuur, de energieprijzen en allerlei technologische en maatschappelijke ontwikkelingen die de Nederlandse maatschappij een totaal ander aanzien kunnen geven dan nu. De ontwikkeling van deze factoren kent een relatief grote onzekerheid. Tevens is er sprake van veranderende en complexe interacties.

De schatting van de energievraag voor 2050 is gebaseerd op het vergelijken en doortrekken van trends in de voor de periode voorhanden zijnde lange termijn scenario's. Hierbij is er van uit gegaan dat de bevolkingsomvang in 2050 rond de 17,5 tot 18 miljoen ligt. Verder is een gemiddelde economische groei van 2,5% per jaar verondersteld, en een besparingstempo (generieke efficiencyverbetering) van 1 tot 1,5% per jaar. Daar waar nodig zijn de resultaten bijgesteld op basis van nieuwe inzichten. Een meer uitvoerige beschrijving van de gehanteerde methodiek en aannamen is te vinden in Appendix A. In deze paragraaf zijn alleen de resultaten van de prognose gegeven.

Om de robuustheid van de analyse te vergroten, is er voor gekozen om voor het vinden van een antwoord op de centrale vraagstelling van dit project uit te gaan van twee scenario's. De eerste variant betreft een 'groei in alle sectoren' variant. Aanleiding voor de tweede variant is de constatering dat in Nederland de ruimte voor uitbreiding van grootschalige petrochemie en basismetaal ontbreekt, waardoor groei hiervan niet waarschijnlijk is. Daarbij komt dat deze industrietaakten in toenemende mate in handen komen van buitenlandse multinationals waardoor uitbreiding niet noodzakelijkerwijs binnen Nederland hoeft plaats te vinden. Verplaatsing van activiteiten naar elders ligt meer voor de hand dan uitbreiding hier. Tegelijkertijd zal de geografisch gunstige ligging van Nederland in 2050 niet gewijzigd zijn, waardoor ook marginalisering van deze sectoren niet voor de hand ligt. Als compromis is er daarom voor gekozen in de tweede variant de omvang en derhalve de energievraag voor de betreffende sectoren te halveren ten opzichte van de eerste variant<sup>2</sup>.

In Tabel 2.1 is de energievraag per sector naar type energiedrager gegeven voor 2000, alsmede de prognose voor 2050.

---

<sup>2</sup> Alhoewel ook de prognose voor bijvoorbeeld de sectoren Huishoudens, Diensten en Overheid een behoorlijke onzekerheidsmarge kent, mag gesteld worden dat de onzekerheid in de ontwikkeling van onder andere de volumegrootheid, zoals bijvoorbeeld het aantal Nederlanders of het totaal aantal woningen, beduidend minder groot is dan bij een aantal industriële sectoren. Daarom is ervoor gekozen alleen de omvang van de grootschalige petrochemie en basismetaal te variëren.

Tabel 2.1 *Energievraag voor sectoren in 2000 en 2050 per type energiedrager*

Sector	Zichtjaar	Elektriciteit [PJ]	Warmte (<100°C) [PJ]	Warmte (>100°C) [PJ]	Grondstof [PJ]	Olie voor brandstof [PJ]	Totale vraag per sector [PJ]
Huishoudens	2000	69	318	-	-	-	387
	2050(1)	180	330	-	-	-	510
	2050(2)	180	330	-	-	-	510
Diensten & Overheid	2000	102	154	-	-	-	256
	2050(1)	220	240	-	-	-	460
	2050(2)	220	240	-	-	-	460
Land & Tuinbouw	2000	20	146	-	-	-	166
	2050(1)	20	140	-	-	-	160
	2050(2)	20	140	-	-	-	160
Industrie	2000	147	68	409	412	-	1036
	2050(1)	290	106	644	570	-	1610
	2050(2)	200	86	404	285	-	975
Transport	2000	6	-	-	-	486	494
	2050(1)	10	-	-	-	770	780
	2050(2)	10	-	-	-	760	770
Totaal alle sectoren per type vraag	2000	344	686	409	412	486	2337
	2050(1)	720	816	644	570	770	3520
	2050(2)	630	796	404	285	760	2875

(1) sterke groei petrochemie en basismetaal.

(2) matige groei petrochemie en basismetaal.

Op basis van de cijfers kan het volgende worden geconstateerd:

- Er is sprake van een sterke toename in de vraag naar elektriciteit en energie voor transport<sup>3</sup>, ongeacht het scenario (wel of geen beperkte groei in de industrie).
- De groei in de vraag naar elektriciteit vindt vooral plaats in de sectoren ‘huishoudens’, ‘diensten en overheid’ en ‘industrie’. Ook de sector ‘transport’ kent groei maar deze zal absoluut gezien bescheiden zijn als de elektrische auto niet tot ontwikkeling komt. Enige uitzondering op een groeiende vraag vormt wellicht de sector ‘land en tuinbouw’. Hier is enige onzekerheid over de groei in de vraag in de glastuinbouw als gevolg van een toenemende inzet van assimilatieverlichting en van ventilatie ten behoeve van de warmte- en vochtthuishouding. Verdubbeling van de vraag hier leidt overall echter niet tot een ander beeld.
- Hoewel de vraag naar elektriciteit relatief sterk groeit is ook in 2050 absoluut gezien de vraag naar warmte veruit het grootst. Wel daalt als gevolg van de relatief sterke groei in de vraag naar elektriciteit de gemiddelde warmtekracht (WK) verhouding in de vraag van 3,2 naar ca. 2.
- De industrie heeft de grootste warmtevraag met een aandeel van 44% in de totale warmtevraag nu, en variërend tussen 40% en 50% in 2050. De warmtevraag in de industrie is voornamelijk een vraag naar hoge temperatuur warmte (warmte met een temperatuur > 100°C). De industrie is de enige sector die een vraag naar hoge temperatuur warmte kent.
- Afgezien van de industrie en de sector transport, die helemaal geen warmtevraag heeft, kennen de overige sectoren alleen een vraag naar lage temperatuur warmte (warmte met een temperatuur < 100°C). Deze sectoren, ‘huishoudens’, ‘diensten en overheid’ en ‘land en tuinbouw’, zijn samen goed voor ca. 85-90% van de lage temperatuur warmte vraag. De sector ‘huishoudens’ kent de grootste vraag naar lage temperatuur warmte.
- Inzet van fossiele energiedragers als grondstof vormt een aanzienlijke post in de totale energievraag. Deze vraag vindt alleen plaats bij de industrie, en dan nog voornamelijk bij de petrochemie en de basismetaal.

<sup>2</sup> Hierbij dient te worden opgemerkt dat de vraag naar energie voor transport samenhangt met een vervoersector die nog grotendeels is gebaseerd op gebruik van de interne verbrandingsmotor. De vraag naar transport energie kan sterk wijzigen indien een alternatief voertuigconcept wordt verondersteld. Dit wordt uitgewerkt in Paragraaf 2.3.3.

- De industrie vormt de grootste post in de totale energievraag. Het aandeel bedraagt nu 44%. In 2050 ligt dit op 45% tot 33% afhankelijk van het scenario. In omvang komen na de industrie achtereenvolgens ‘transport’, ‘huishoudens’, ‘diensten en overheid’ en ‘land en tuinbouw’.

Meer details over ontwikkeling van de energievraag zijn gegeven in Appendix A, met name voor wat betreft ontwikkeling van de vraag in onderdelen van de sectoren industrie en transport. In Tabel 2.2 is de energievraag vertaald in een binnenlands verbruik aan primaire energie en een schatting van de hieraan toe te rekenen CO<sub>2</sub>-uitstoot. De huidige trend van meer duurzame energie en minder kolen is hierbij voortgezet. Door een efficiëntere conversie naar finale energiedragers is de verhouding tussen finale energiedragers en primaire energie in 2050 kleiner dan in 2000. De afname van de gemiddelde CO<sub>2</sub>-uitstoot per eenheid van binnenlands verbruik komt door de vermindering van de kolen inzet en een toename van duurzame energie (het aandeel in het autonome scenario is in 2050 geschat op 10%).

Tabel 2.2 CO<sub>2</sub>-emissie en primair verbruik in 2000 en prognose voor 2050

		2000	2050(1)	2050(2)
Totale vraag finale energiedragers	[PJ]	2336	3520	2875
Binnenlands verbruik primaire energie	[PJ]	3051	4250	3550
Totale vraag/binnenland verbruik	[PJ/PJ]	0,77	0,83	0,83
CO <sub>2</sub> -uitstoot (Mton)	[Mton]	177	217	185
CO <sub>2</sub> -uitstoot/binnenlandsverbruik	[Mton/PJ]	0,058	0,051	0,052

(1) sterke groei petrochemie en basismetaal.

(2) matige groei petrochemie en basismetaal.

De CO<sub>2</sub>-emissies blijven in beide scenario's toenemen ten opzichte van het niveau van 2000. De jaarlijkse toename is echter minder sterk dan die in de periode 1990 - 2000. In 1990 bedroeg de uitstoot aan CO<sub>2</sub> 166 Mton<sup>4</sup>. Algemeen wordt er van uit gegaan dat in de toekomst een aanzienlijke CO<sub>2</sub>-emissiereductie gerealiseerd dient te worden. Percentages van 50 tot 80% worden in dit verband veelvuldig genoemd. Indien wordt uitgegaan van een binnenlands reductiepercentage voor CO<sub>2</sub> met 50% voor 2050 ten opzichte van het niveau in 1990, dan zou in 2050 maximaal 83 Mton CO<sub>2</sub> uitgestoten mogen worden. Dit betekent dat, ten opzichte van de autonome ontwikkeling, circa 100 - 135 Mton CO<sub>2</sub> dient te worden gereduceerd (een reductie met 55% - 60% ten opzichte van het niveau van de autonome emissies). Bij een nog verder gaande reductiedoelstelling (zoals bijv. -60% of -80%) is het gat tussen de autonome emissies en de doelstelling nog aanzienlijk groter.

### 2.3 Technologische opties voor verduurzaming van de energievraag

Wat zijn de mogelijkheden om de aanzienlijke CO<sub>2</sub>-emissiereductie zoals hierboven geschetst te realiseren, en wat zijn hiervan mogelijke consequenties voor de energie-infrastructuur? Voor een korte beschouwing hiervan zijn de 5 afzonderlijke sectoren tot 3 gereduceerd met ieder een karakteristieke energievraag. Dit zijn:

- *Industrie*: De industrie is de enige sector met een hoge temperatuur warmte vraag en inzet van fossiele energiedragers als grondstof. Beide behoeften zijn geconcentreerd bij een relatief klein aantal grote bedrijven. De energievraag is continu en gelijkmatig. De sector wordt gekenmerkt door lange bedrijfstijden, en door hoge aansluitwaarden voor zowel gas als elektriciteit, oftewel aansluiting op hogere druk en hogere spanning netten.
- *Huishoudens, Diensten en Overheid en Land en Tuinbouw*: Dit zijn sectoren met een grote vraag naar lage temperatuur warmte. Het gaat hierbij om een zeer groot aantal kleine en relatief kleine verbruikers. Momenteel wordt in de vraag naar laagwaardige warmte voorzien

<sup>4</sup> Niet temperatuur gecorrigeerd (conform IPCC).

via de verbranding van aardgas dat wordt aangevoerd via een fijnvermaasd netwerk. De warmte is vooral nodig voor ruimteverwarming. De vraag hiernaar is geconcentreerd in de winter en nagenoeg afwezig in de zomer. De elektriciteitsvraag is wel gelijkmatig verdeeld over het jaar heen, maar kent een duidelijk dag/nacht ritme; ca. 80 tot 85% van de momenteel gangbare vraag vindt overdag plaats met pieken in het begin van de ochtend en avond.

- *Transport*: Deze sector kent alleen een krachtvraag. Deze wordt thans vrijwel uitsluitend ingevuld door verbranding van op aardolie gebaseerde vloeibare brandstoffen in een interne verbrandingsmotor, en niet door elektriciteit zoals in de overige sectoren. De vraag naar energie voor transport is gelijkmatig door het jaar heen.

De energievraag van de hierboven geschetste sectoren is reeds gegeven in Tabel 2.1, maar is nog eens samengevat in Tabel 2.3. In de volgende paragrafen wordt per sector nader uitgewerkt via welke technologische routes op een meer duurzame wijze in de vraag naar deze energiedragers voorzien kan worden. Daarbij zal worden ingegaan op de interactie met de andere sectoren en de consequenties voor de energie-infrastructuur. Bij het opstellen van bedoelde paragrafen is Appendix B als leidraad gehanteerd.

Tabel 2.3 *Energievraag naar sector en kwaliteitsniveau in 2000 en 2050 voor een scenario met een hoge groei en een scenario met een lagere groei (getallen tussen haakjes)*

<i>sector</i>	Elektriciteit [PJ <sub>e</sub> ]		Lage temperatuur warmte (PJ <sub>th</sub> )		Hoge temperatuur warmte (PJ <sub>th</sub> )		Feedstock (PJ)		Olie voor energie voor transport (PJ)	
	2000	2050	2000	2050	2000	2050	2000	2050	2000	2050
Industrie	147	290 (200)	68	106 (68)	409	644 (404)	412	570 (285)	486	770 (760)
HH, DO, LT	191	420	618	710	-	-	-	-	-	-
Transport	6	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Totaal	344	720 (630)	686	816 (796)	409	644 (404)	412	570 (285)	486	770 (760)

### 2.3.1 Industrie

Wat zijn de mogelijkheden om de vraag naar fossiele energiedragers in de industrie ten behoeve van energievoorziening en grondstof te verduurzamen? Het kan niet vaak genoeg benadrukt worden dat het vermijden van vraag het meest duurzaam is. In Tabel D.2 van Bijlage D zijn mogelijkheden aangegeven voor het vermijden van energievraag. Op voorhand is veel winst te verwachten van de inpassing van betere unit operations en vergaande procesintegratie (herontwerp van bestaande processen). De effecten van deze maatregelen, bovenop de (autonome) efficiencyverbetering die reeds in de scenarioberekening voor 2050 is gehanteerd, zijn thans lastig te kwantificeren. Dit vergt nadere analyse. Wel is duidelijk dat de lead-time van dit soort maatregelen lang is. Tegelijkertijd is duidelijk dat dit soort maatregelen goed binnen de huidige energie-infrastructuur zijn te verwezenlijken.

Verdere verduurzaming kan worden gerealiseerd door inzet van vernieuwbare energiebronnen. De inzet van vernieuwbare energiebronnen in de industriële energievoorziening lijkt echter, althans procesgebonden, maar beperkt mogelijk. Zon-thermisch levert alleen lage temperatuur warmte. Wind en water leveren elektriciteit terwijl de voornaamste behoefte hoge temperatuur warmte betreft. De grootste mogelijkheden liggen dan ook bij de inzet van biomassa. Dit biedt een perspectief op zowel verduurzaming van de feedstock vraag (thans 15-20% van de totale vraag) als verduurzaming van de vraag naar hoge temperatuur warmte. Enig nadeel van de optie is het ruimtebeslag en de 'handling' van biomassa. De industrie die het betreft is in het algemeen niet ingericht op de inzet van een vaste brandstof of feedstock. Een mogelijke optie is de omzetting van biomassa naar syngas dat vervolgens kan worden ingezet als brandstof in ketels en fornuizen en als grondstof ter vervanging van aardolie en aardgas. De lead-time van een dergelijke ontwikkeling zal lang zijn. Waarschijnlijk zullen aanpassingen in de (opbouw van de) industrie(keten) nodig zijn om de inzet van syngas als grondstof mogelijk te maken. Daarnaast

zal de conversie van biomassa op enig schaalniveau plaats dienen te vinden om economisch aantrekkelijk te zijn. Dit kan leiden tot centrale conversie met aanleg van een syngas infrastructuur lokaal binnen industriële clusters. Consequenties voor de huidige energie-infrastructuur zijn hiervan vooralsnog echter niet te verwachten.

Ook niet-procesgebonden biedt biomassa perspectief vanwege de mogelijkheid om biomassa om te zetten naar gewenste energiedragers in warmtekracht-bedrijf. De aanstuurbare beschikbaarheid van biomassa maakt de lange bedrijfstijden mogelijk die enerzijds door de vraagzijde worden vereist en anderzijds nodig zijn om een economisch rendabel plaatje te kunnen realiseren. Door omzetting in warmtekracht-bedrijf kan zowel (een deel van) de vraag naar hoge temperatuur warmte/stoom, als de vraag naar elektriciteit vernieuwbaar worden ingevuld. Directe bio-WKK is mogelijk, maar ook een koppeling/integratie via de syngas route is voorstelbaar. Warmtekrachtkoppeling is ook de meest aangewezen manier om te komen tot een efficiëntere inzet van fossiele energiebronnen, althans voor de energetische toepassing hiervan. Daarbij biedt industriële WKK vanwege de schaalgrootte mogelijkheden om te komen tot eventueel noodzakelijke afvang van CO<sub>2</sub>.

Andere opties om de elektriciteitsvraag in de industrie in te vullen met vernieuwbare energiebronnen zijn grootschalige wind en waterkracht. Wind heeft hierbij wel als nadeel dat de bron niet stuurbaar is, en het vermogen maar een beperkt aantal uren van het jaar beschikbaar is. Verder verdient de onderlinge beïnvloeding van de opties WKK en grootschalig wind en water de nodige aandacht. Verdergaande introductie van WKK betekent mogelijk een overproductie van elektriciteit vanuit de sector, gelet op het verschil in warmtekracht-verhouding tussen hetgeen de vraagzijde nodig heeft en de aanbodtechnologie levert. Dit kan frustrerend werken op de ontwikkeling van de vernieuwbare opties die elektriciteit produceren, en kan ook grote repercussies hebben op de momenteel gangbare grootschalige elektriciteitsproductie. Omgekeerd kan de concurrentie van extra aanbod uit vernieuwbare bronnen zorgen voor lagere prijzen waardoor de rentabiliteit van WKK sterk onder druk komt te staan.

### 2.3.2 Huishoudens, Diensten en Overheid, Land en Tuinbouw

In deze paragraaf staan de mogelijkheden centraal om de vraag naar fossiele energiedragers in de sector huishoudens, diensten en land- en tuinbouw ten behoeve van lage temperatuur warmte en elektriciteit te verduurzamen. Om te beginnen wordt weer verwezen naar Tabel D.2 van bijlage D waarin een aantal maatregelen is opgesomd die leiden tot het vermijden van energievraag.

Grosso modo is er voor enkele ruwe berekeningen, die in het kader van deze studie zijn uitgevoerd (zie Paragraaf 2.4), van uitgegaan dat als gevolg van structurele aandacht voor vraagbeperkende maatregelen de vraag naar lage temperatuur warmte in de afzonderlijke sectoren respectievelijk ca. 50% (land en tuinbouw), 25% (huishoudens) en 10% (diensten en overheid) lager kan uitkomen dan volgens de scenarioberekeningen. In de sector land en tuinbouw is het potentieel het grootst. De vraag bestaat hier voornamelijk uit ruimteverwarming voor kassen die zijn te beschouwen als zeer slecht geïsoleerde woningen. Toepassing van dubbel glas zou al veel schelen. In de sector zelf heeft men het reeds over de kas als energiebron. Zover hebben wij niet willen gaan in deze studie.

#### *Verduurzaming lage temperatuurvraag in nieuwe situaties*

Als de vraag naar lage temperatuur warmte effectief wordt teruggebracht is het goed voorstelbaar dat de resterende vraag, inclusief warm tapwater, volledig is te verduurzamen door inzet van vernieuwbare bronnen als zon-thermisch en omgevingswarmte. Dit in combinatie met elektrische warmtepompen (EWP) en afdoende faciliteiten voor tijdelijke buffering van warmte. Randvoorwaarde hierbij is wel het gebruik van lage temperatuur verwarmingssystemen. Volledige verduurzaming van de lage temperatuur warmtevraag, die op micro-niveau een revolutie

betekent, zal typisch geïmplementeerd worden in nieuwbouw of vernieuwbouw situaties, en daarmee langzaam in de energievoorziening ingroeien. Op macro-niveau is er dan sprake van een evolutie die eenvoudig binnen de huidige energie-infrastructuur is te realiseren. De verwachting is dat ook netverzwaring achterwege kan blijven indien de mogelijkheden voor vraagsturing, oftewel de aan- en afschakelbaarheid van het EWP-vermogen<sup>5</sup>, worden benut.

Een optie die in verband met toekomstige nieuwe situaties veelvuldig wordt genoemd is H<sub>2</sub>. Indien de waterstof van vernieuwbare herkomst is, dat wil zeggen uit biomassa of via elektrolyse van water met ‘groene’ stroom, is sprake van een volledig duurzame optie. Om economische en schaaltechnische redenen ligt productie van waterstof uit aardgas voorlopig echter meer voor de hand. In combinatie met inzet van waterstof in WK-bedrijf is deze optie dan te karakteriseren als efficiënt fossiel. Wanneer CO<sub>2</sub>-afvang plaatsvindt bij de waterstof productie zelfs als schoon fossiel. De mogelijkheden hiervoor zullen zich vooral voordoen bij een meer volgroeide waterstofinfrastructuur met grootschalige centrale productie van waterstof.

In het geval van waterstof is inzet in WK-bedrijf randvoorwaarde. De effectiviteit van warmtekracht in de gebouwde omgeving is op voorhand echter niet duidelijk. Belangrijke oorzaken hiervoor zijn het verschil in WK-verhouding tussen energievraag en aanbod en de grote variabiliteit in WK-verhouding door het jaar heen. Hierdoor zijn de mogelijkheden voor inzet in de zomer beperkt terwijl er in de winter, zeker bij grootschalige toepassing, een overproductie van elektriciteit optreedt. Voor het economisch plaatje bij inzet op woningniveau is het vooral nodig duidelijkheid te hebben over de waarde van de elektriciteit die aan het net geleverd wordt, zeker als deze vorm substantieel wordt.

De overproductie zal lokaal invloed hebben op de inrichting van de elektriciteitsinfrastructuur. Bijvoorbeeld vanwege het vereiste ‘tweerichtingsverkeer’. Bij nieuwe situaties kunnen aanpassingen echter via de weg van evolutie plaatsvinden omdat er direct bij aanleg van de infrastructuur rekening mee kan worden gehouden. Aan de gaskant lijkt aanleg van een fijnmazig H<sub>2</sub>-stelsel voor lokaal transport van H<sub>2</sub> bij nieuwbouwlocaties betrekkelijk eenvoudig. De vraagtekens betreffen hier meer de economie. Een infrastructureel punt wat wel de nodige aandacht vergt is hoe deze, mogelijk sterk verspreide, nieuwbouwlocaties kunnen worden aangesloten op een H<sub>2</sub>-hoofdleidingstelsel. De tendens bestaat om, minder dan voorheen, nieuwbouw te clusteren maar meer te integreren in de reeds aanwezige bebouwing<sup>6</sup>. Ook waterstofopslag vergt nog de nodige aandacht. De vraag naar waterstof zal vooral in de winter plaatsvinden. Seizoensopslag is gewenst om de capaciteit van benodigde productiefaciliteiten zo klein mogelijk te kunnen houden. Er is nog onvoldoende inzicht in wat de mogelijkheden voor een dergelijke waterstofopslag, en wat daarvan de consequenties zijn. Tot slot vereist optimalisatie van deze optie het kunnen schuiven met warmte in de tijd. Dit zou ter plekke kunnen door buffering via een ‘boiler’, maar kan mogelijk ook buffering en distributie op iets grotere schaal vergen via een warmtenet. In tegenstelling tot warmtetransport in zijn huidige vorm (stadsverwarming) lijken mogelijkheden voor economisch verantwoord warmtetransport wel aanwezig bij toepassing van lokale lage temperatuur distributienetten. Dit punt, evenals het punt van overproductie, is overigens niet specifiek voor waterstof maar geldt meer in het algemeen bij inzet van warmtekracht.

---

<sup>5</sup> Inschakelen van EWP's in dal met dagopslag van warmte in “boilers”. Tevens mogelijkheid voor (seizoens)opslag van (wind)elektriciteit in aquifers na omzetting in warmte door EWP's. Centraal kan dit tot een hoger aandeel basis- en middenlast leiden en een afname van behoefte aan pieklast.

<sup>6</sup> Dit geldt met name voor woningbouw. Meer vervanging van oudbouw door nieuwbouw dan “Vinex”.

### *Verduurzaming van lage temperatuurvraag in bestaande situaties*

Voor de bestaande bouw is een heldere lange termijn beleidsvisie nodig over wat op de momenten van vervanging van apparaten, renovatie en vernieuwbouw gedaan moet worden ten aanzien van vraagbeperkende maatregelen en de inzet van duurzame bronnen. Het heeft weinig zin korte termijn maatregelen te treffen die vervolgens het momentum voor ‘echte’ maatregelen tientallen jaren naar achter verschuift. Hoewel er tot 2050 nog een aanzienlijk aantal woningen en gebouwen gerenoveerd, vernieuwd en gebouwd zal worden kan worden verwacht dat ongeveer de helft dan nog bestaat uit ‘bestaande’ bouw. Blijvende inzet van de bestaande gasinfrastructuur in die situaties<sup>7</sup> ligt voor de hand. Inzet van vernieuwbare bronnen hierin is mogelijk door toepassing van SNG centraal geproduceerd uit biomassa en waterstof. De waterstof kan van vernieuwbare oorsprong zijn (uit biomassa, of via elektrolyse met ‘groene’ stroom). In eerste instantie is waterstof uit aardgas echter ook een optie. Het lijkt daarmee een wat gekunstelde optie; aardgas inzetten om ‘kunst-aardgas’ te maken. Enig voordeel is dat het zo mogelijk wordt om te komen tot CO<sub>2</sub>-afvang. Verder kan de optie binnen de huidige energie-infrastructuur worden gerealiseerd. Omdat de vraag in de winter veel groter is dan in de zomer zal seizoensopslag (in hiervoor geschikte ondergrondse opslag/aardgasvelden) een belangrijk issue zijn in de optimalisatie van inzet van de optie enerzijds en de benodigde productiecapaciteit voor SNG anderzijds.

In de categorie efficiënter fossiel kan worden gedacht aan toepassing van de gasgestookte warmtepomp die goed aansluit bij de gasinfrastructuur in de nog bestaande situaties. Daarnaast is in de bestaande bouw verbetering van de efficiency van de inzet van fossiel energiedragers te realiseren door gebruik te maken van warmtekracht. De overwegingen die in relatie tot deze optie reeds zijn gemaakt zijn ook hier van toepassing; mogelijke overproductie van elektriciteit vanuit de sector, en interferentie met het centrale park en grootschalige opties voor vernieuwbare elektriciteit. In aanvulling daarop past wellicht enige aandacht voor de invloed van lokale decentrale productie van elektriciteit op het gasnet omdat nu niet alleen gas voor warmte, maar ook gas voor elektriciteit tot ver in het net getransporteerd moet worden.

Bij inzet van warmtekracht zal de vraag naar centraal geproduceerde elektriciteit afnemen, vooral in de winter. Bij inzet van elektrische warmtepompen geldt precies het omgekeerde. Een intermediaire ontwikkeling lijkt in dit opzicht een redelijke optie die nadere aandacht verdient. Wat zijn de interacties van deze optie met de centrale elektriciteitsproductie, en hoe kan deze optie door benutting van de in- en uitschakelbaarheid van de vermogens bijdragen tot een grotere flexibiliteit in de energievoorziening.<sup>8</sup>

### *Verduurzaming van de elektriciteitsvraag*

Vernieuwbare bronnen die kunnen worden ingezet voor invulling van de elektriciteitsvraag zijn biomassa, wind en zon-PV. De inzet van wind en biomassa zal centraal plaatsvinden en de elektriciteit via de reguliere infrastructuur tot bij de gebruiker worden getransporteerd. Zon-PV is een optie die lokaal zal worden ingezet. Als gevolg van de opbrengst en kostenkarakteristieken van de technologie is vooralsnog geen grote bijdrage van de optie te verwachten. De optie is niet of nauwelijks gebouwgeïntegreerd, en als zodanig is met moment van implementatie nagenoeg vrij te kiezen. Bij geleidelijke introductie op macroschaal zullen, ook bij stapsgewijze grootschalige introductie op microschaal in (ver)nieuwbouw situaties, eventueel noodzakelijke aanpassingen in de elektriciteitsinfrastructuur via de weg van evolutie kunnen plaatsvinden.

---

<sup>7</sup> Onder bestaande situaties wordt in dit verband verstaan alles dat nu reeds is gebouwd en met gas is uitgerust, of de komende tijd nog wordt gebouwd en nog met gas zal worden uitgerust, en dat er in 2050 nog staat.

<sup>8</sup> Bij een tekort aan centrale productiecapaciteit kunnen EWP's tijdelijk worden afgeschakeld en kleinschalige WK-installaties worden ingeschakeld. Een tegengestelde strategie kan worden gehanteerd bij een overschot aan centrale productiecapaciteit. Door op deze manier pieken te scherpen en dalen te vullen kan de behoefte aan centrale pieklast mogelijk worden beperkt.

### 2.3.3 Transport

De energievraag van een voertuig wordt voornamelijk bepaald door de luchtweerstand, de rolweerstand en de massa van het voertuig. Winst is nog vooral te behalen in de factor voertuig-massa. Gedacht kan worden aan kleinere voertuigen daar waar mogelijk (vooral particulier vervoer), en het toepassen van lichtere materialen. Zoals reeds vermeld wordt de energievraag voor transport thans vrijwel uitsluitend ingevuld door verbranding van op aardolie gebaseerde vloeibare brandstoffen in een interne verbrandingsmotor. De resulterende vraag naar aardolie, voor omzetting naar transportbrandstof, is voor 2050 ingeschat op 770 PJ.

De omzetting naar transportbrandstoffen vindt plaats met een efficiency van grofweg 85%. De energievraag naar vloeibare transportbrandstoffen komt daarmee op 655 PJ. Alvorens te bekijken hoe deze vraag is te verduurzamen past een nadere kanttekening. Er moet worden bedacht dat de maximale efficiency van het huidige aandrijfconcept met interne verbrandingsmotor ergens tussen de 30 en 35% ligt. De feitelijke krachtvraag voor de gewenste transportdiensten ligt dus ca. 440 PJ lager dan de energie-inhoud van de gebruikte transportbrandstoffen. Dat is ca. 10-15% van de nationale energievraag. Alternatieve voertuigconcepten bieden wat dat betreft uitzicht op verbetering. Mogelijkheden zijn:

- Hybrides: elektrische aandrijving met een kleine zuinige verbrandingsmotor voor aandrijving van een generator voor de productie van elektriciteit.
- Elektrische auto's: elektrische aandrijving met elektriciteitsopslag in accu's.
- Brandstofcelvoertuigen: elektrische aandrijving met productie van elektriciteit in een brandstofcel.

Hybrides, elektrische auto's en brandstofcelvoertuigen kunnen in principe respectievelijk met ca. 60%, 33% en 50% van de energie per kilometer toe. De vraag naar energie voor transport wordt hiermee respectievelijk ca. 400 PJ voor hybrides, ca. 220 PJ voor elektrische voertuigen en ca. 330 PJ voor brandstofcelauto's. Bovendien is deze vraag niet alleen in te vullen door vloeibare transportbrandstoffen. Een elektrische auto 'tankt' elektriciteit die wordt opgeslagen in accu's terwijl waterstof waarschijnlijk de transportbrandstof voor de brandstofcelauto wordt. Dit biedt naar de toekomst veel meer flexibiliteit voor uitwisseling tussen energiedragers. Overigens is in dit verband aandacht voor ketenanalyse van belang, vooral zolang fossiele energiedragers de basis blijven vormen. Productie van elektriciteit en waterstof op basis van fossiele energiedragers verloopt immers minder efficiënt dan de productie van vloeibare brandstoffen waardoor ketenbreed de voordelen van de alternatieven wellicht minder rooskleurig zijn.

Alle drie de varianten zijn thans in ontwikkeling of komen op de markt. Welke het gaat worden of dat ze allemaal naast elkaar zullen bestaan is niet te zeggen. Duidelijk lijkt wel dat het huidige concept met interne verbrandingsmotor in 2050 alleen nog als oldtimer te bezichtigen zal zijn.

#### *Verduurzaming van de vraag naar vloeibare transportbrandstoffen*

In het geval van hybrides is er vraag naar vloeibare transportbrandstoffen. Zowel aard en omvang van de vraag in 2050 zijn vergelijkbaar met de huidige vraag. Infrastructureel zal dit dus geen probleem vormen. Biomassa is de aangewezen bron voor verduurzaming van de vraag. Er zijn vele routes om vanuit biomassa vloeibare transportbrandstoffen te produceren. Thans gaat het voornamelijk via de route van bio-ethanol. Voor de toekomst is met name de productie van synthetische brandstoffen via de syngas route in beeld. Hier ligt een mogelijke interactie met de energievoorziening in de industrie. Het is echter de vraag of alle biomassa eerst hierheen moet worden geslept alvorens er brandstof van te maken. Wellicht kan dit beter plaatsvinden daar waar de biomassa wordt geoogst. Een interactie van een ander soort betreft de kwestie van beschikbaarheid van biomassa indien zowel industrie als transport aan deze bron trekken voor verduurzaming van de vraag.

### *Verduurzaming van de elektriciteitsvraag door elektrische voertuigen*

Elektrische auto's worden aangedreven door elektromotoren die worden gevoed met elektriciteit die is opgeslagen in accu's. Dit gegeven kan bij een overschot aan elektriciteit uit warmtekracht en verdergaande introductie van vernieuwbare bronnen van belang zijn, vooral bij de verdergaande inzet van niet aanstuurbare bronnen zoals wind en zon. Opslag van elektriciteit in accu's biedt dan de mogelijkheid om pieken en dalen in het aanbod van de niet aanstuurbare bronnen op te vangen zonder een (al te groot) beroep te hoeven doen op regelbaar vermogen. De doorontwikkeling van de accu vraagt nog de nodige aandacht. Vooralsnog leveren ze een beperkt bereik. Tegelijkertijd moet worden geconstateerd dat het bereik voor een groot deel van het wegtransport, woon/werkverkeer en bestelauto's, niet of nauwelijks relevant is. De milieuwinst van de optie is, in ieder geval binnenstedelijk, evident.

### *Verduurzaming van de waterstofvraag door brandstofcelvoertuigen*

Op het ogenblik worden brandstofcelauto's een grotere rol toegedicht. Ook deze auto's kunnen in de toekomst een 'opslagfunctie' in de nationale energievoorziening gaan spelen, hoewel ook de opslag van waterstof nog geen uitgemaakte zaak is. Verwacht wordt dat de waterstof in eerste instantie uit aardgas zal worden gemaakt. Verduurzaming door productie via elektrolyse met 'groene' stroom is bij verdergaande introductie van vernieuwbare, niet aanstuurbare bronnen niet alleen mogelijk, maar ligt zelfs voor de hand gezien de voordelen die de mogelijkheid van opslag van elektriciteit in relatie tot inzet van deze bronnen biedt. Tevens biedt het de mogelijkheid om te komen tot een meer evenwichtige inzet tussen biomassa en wind.

## 2.4 Energievoorzieningsconcepten en CO<sub>2</sub>-emissies

Er zijn een aantal mogelijkheden om in de verschillende energievragen te voorzien. De vraag naar hoogwaardige warmte kan worden gedekt door biomassa, en de vraag naar laagwaardige warmte door zon-thermisch en omgevingswarmte in combinatie met elektriciteit, H<sub>2</sub> en aardgas. Feedstocks kunnen worden ingevuld door biomassa in combinatie met aardgas, aardolie en kolen. Het benodigde elektrisch vermogen kan worden opgewekt via biomassa en grootschalig wind tezamen met fossiele opties. Biobrandstoffen in combinatie met aardolie, H<sub>2</sub>, en elektriciteit komen in aanmerking voor energie voor transport. Tevens is voorstelbaar dat de transitie naar alternatieve opties plaats zal vinden via de route van incrementele innovatie. Echter, er lijken grote inpassingsproblemen te ontstaan bij de noodzakelijke verregaande verduurzaming van de energievoorziening.

Voor een nadere verkenning van de consequenties van verschillende opties voor inpassing en CO<sub>2</sub>-emissies zijn enkele ruwe berekeningen uitgevoerd. Als startpunt is een variant bekeken waarin grootschalig biomassa wordt ingezet voor de productie van hoge temperatuur warmte. Het aandeel warmte uit WKK en via ketels is daarbij gelijk verondersteld. Er heeft nog geen verduurzaming van de feedstock plaatsgevonden. In de sector huishoudens/diensten/landbouw is per subsector een additionele reductie in de warmtevraag verondersteld als gevolg van de mogelijkheden die er zijn om te komen tot een meer dan trendmatige vraagbeperking (zie Paragraaf 2.3.2). Voor 2050 is verder een fifty/fifty verdeling verondersteld tussen nieuwe situaties en bestaande, oude situaties. In nieuwe situaties wordt de warmtevoorziening verzorgd middels elektrische warmtepompen. In de bestaande situaties gebeurt dit via ketels met een rendement van 130% als gevolg van additionele maatregelen zoals inzet van zon-thermisch en gasgestookte warmtepompen. Ten aanzien van transport is verondersteld dat in 2050 alle voertuigen hybrides zijn die lopen op vloeibare brandstoffen die voor 50% biomassa als basis hebben.

Al deze aannamen leiden uiteindelijk tot een vraag naar elektriciteit die centraal moet worden opgewekt. Om enige ambitie in inzet van vernieuwbare bronnen in de centrale elektriciteitsopwekking tot uitdrukking te brengen is de inzet van 10.000 MW wind verondersteld in combinatie met 40 PJ biomassa. Bij een aantal van 6.500 vollast uren komt dit overeen met centrales ter

grootte van 1700 MW. Aangenomen is dat de restpost volledig wordt ingevuld door aardgas. In de basisvariant is geen sprake van CO<sub>2</sub>-afvang.

Vervolgens zijn er ten opzichte van de basisvariant een drietal verkenningen uitgevoerd:

- Duurzame industrie: In deze variant is verondersteld dat het grondstofgebruik in de industrie volledig door hernieuwbare bronnen (met name biomassa) wordt ingevuld.
- H<sub>2</sub>-WKK in de gebouwde omgeving: In deze variant is verondersteld dat in nieuwe situaties de voorziening in lage temperatuur warmte niet middels elektrische warmtepompen maar via WKK op waterstof plaatsvindt. Voor de berekening is verondersteld dat waterstof voor 100% uit aardgas wordt geproduceerd.
- Elektrisch en brandstofcelvervoer vervoer: In deze variant is verondersteld dat in 2050 de helft van het park bestaat uit elektrische voertuigen en de andere helft uit brandstofcelvoertuigen. Voor de berekening is waterstof voor 50% geproduceerd met elektriciteit en voor 50% uit aardgas.

De resultaten van bovenstaande exercitie zijn samengevat in Tabel 2.4.

Tabel 2.4 *Finale energievraag, inzet van primaire bronnen en resulterende CO<sub>2</sub>-emissie voor een aantal varianten (resultaten subvariant 'lage groei' tussen haakjes)*

	Basisvariant	Duurzame industrie	H <sub>2</sub> -WKK in GO	Elektrisch en BC vervoer
	2050	2050	2050	2050
<i>Centrale elektr. Vraag</i>				
Vraag zomer [PJ <sub>e</sub> ]	216 (225)	216 (225)	216 (225)	352 (359)
Vraag winter [PJ <sub>e</sub> ]	255 (264)	225 (264)	18 (27)	391 (398)
<i>Centraal elektr. Aanbod</i>				
Wind zomer [PJ <sub>e</sub> ]	56 (56)	56 (56)	56 (56)	56 (56)
Wind winter [PJ <sub>e</sub> ]	69 (69)	69 (69)	69 (69)	69 (69)
Biomassa [PJ <sub>e</sub> ]	40 (40)	40 (40)	40 (40)	40 (40)
Aardgas [PJ <sub>e</sub> ]	306 (324)	306 (324)	69 (86)	578 (592)
<i>Inzet primaire bronnen</i>				
Biomassa [PJ]	1184 (853)	1893 (1207)	1184 (853)	953 (625)
Aardgas [PJ]	1140 (1015)	1050 (970)	1328 (1203)	1688 (1555)
Aardolie [PJ]	727 (523)	327 (323)	727 (523)	400 (200)
Kolen [PJ]	80 (40)	0 (0)	80 (40)	80 (40)
<i>Totale CO<sub>2</sub> emissie [Mton]</i>	<i>128 (101)</i>	<i>85 (80)</i>	<i>139 (112)</i>	<i>133 (107)</i>

Uitgangspunt is reductie van de binnenlandse CO<sub>2</sub>-emissies in 2050 met –50% ten opzichte van het niveau in 1990. Dit komt neer op een reductiedoelstelling voor 2050 van 83 Mton CO<sub>2</sub>.

### *Basisvariant*

In de basisvariant resteert er een vraag naar centrale elektriciteitsproductie van ca. 470 PJ<sub>e</sub>. Ongeveer 250 PJ<sub>e</sub> is decentraal geproduceerd door WKK bij de industrie. De resterende vraag is redelijk gelijkmatig over het jaar verdeeld, met 's winters een iets grotere vraag vanwege het gebruik van elektrische warmtepompen. Op zich correspondeert dit aardig met het iets grotere aanbod van wind in diezelfde periode. De match is verder redelijk omdat de elektrische warmtepomp (EWP) een hoeveelheid stuurbare vraag vertegenwoordigt die kan worden afgestemd op het discontinue aanbod uit wind. Bij grootschalige inzet van wind of een andere discontinue bron zoals zon-PV is alle vraag die stuurbaar is meegenomen. Het alternatief is de balans kloppend te maken met (snel) regelbaar vermogen aan de aanbodzijde, hetgeen vooralsnog lastig efficiënt is te realiseren.

De basisvariant leidt ondanks vergaande verduurzaming van de hoge temperatuur warmtevraag in de industrie, vergaande inzet van vraagbeperkende maatregelen en vernieuwbare bronnen in nieuwe en bestaande situaties in de gebouwde omgeving en 50% verduurzaming van de vraag naar transportenergie voor efficiënte hybride voertuigen, tot CO<sub>2</sub>-emissies die ca. 20% tot 55%

boven de 'target' liggen bij een doelstelling van 50% CO<sub>2</sub>-emissiereductie ten opzichte van 1990. Uit de cijfers blijkt de grote impact van de 'bulk'-industrie. In de subvariant waarin de energievraag van die sector in 2050 is gehalveerd ligt de uitstoot ruim 25 Mton lager.

In de basisvariant zijn de mogelijkheden voor het dichten van het 'CO<sub>2</sub>-emissiegat' door verdergaande inzet van wind en biomassa beperkt. Het gat kan wel worden gedicht door grootschalige afvang van CO<sub>2</sub> bij de centrale elektriciteitsproductie en in de industrie. Het betreft in dit geval ca. 20 tot 50 Mton op jaarbasis. Hiervoor is voldoende opslagpotentieel aanwezig<sup>9</sup>. In hoeverre dit opslagpotentieel daadwerkelijk benut kan worden met inachtneming van allerlei technische, economische en maatschappelijke randvoorwaarden is vooralsnog echter niet duidelijk.

### *Duurzame Industrie*

In de variant duurzame industrie kan de doelstelling wel worden gerealiseerd, zonder een beroep te hoeven doen op CO<sub>2</sub>-afvang. Verduurzaming van de inzet van fossiele energiedragers als grondstof in de industrie blijkt daarmee een cruciale factor. Verduurzaming is goeddeels slechts mogelijk door inzet van biomassa. Het leidt dan ook tot een sterke toename in de biomassa vraag. Tezamen met de behoefte aan biomassa voor hoge temperatuur warmte en energie ligt de behoefte op ca. 80-130 Mton<sup>10</sup>. De vraag is waar we dat allemaal vandaan gaan halen. Zie hiervoor ook Appendix D. Binnen de variant zijn mogelijkheden voor reductie van de biomassa inzet met ca. 20-30 Mton. Hiertoe zal transport op een andere leest moeten worden geschoeid, en waterstof in de industrie niet uit biomassa maar via elektrolyse moeten worden geproduceerd. Dit leidt elders echter weer tot meer emissies, en bovendien blijft een hoeveelheid van 60-100 Mton respectabel.

### *H<sub>2</sub>-WKK in de gebouwde omgeving*

De variant H<sub>2</sub>-WKK in de gebouwde omgeving heeft grote consequenties voor de centrale elektriciteitsvoorziening. Aangezien de lage temperatuur warmte vraag voornamelijk in de winter plaatsvindt, wordt ook dan de meeste elektriciteit geproduceerd. In het gehanteerde scenario blijft er centraal slechts een vraag over van enkele tientallen PJ's. Het productiepark dat wel nodig is voor invulling van de zomerse vraag moet dan stilgezet worden hetgeen funest is voor de economie hiervan. Indien warmtekracht niet alleen in de nieuwe situaties wordt doorgevoerd, maar ook in de bestaande situaties dan wordt dit probleem alleen maar groter. In de winter is dan sprake van grote overproductie.

Tegelijkertijd blijft de variant H<sub>2</sub>-WKK in de gebouwde omgeving ook ver verwijderd van de CO<sub>2</sub>-doelstelling. Ten opzichte van de basisvariant lijkt zelfs sprake van een toename. Dit is zeker het geval indien warmtekracht ook vergaand in bestaande situaties wordt doorgevoerd. Als extra nadeel geldt in dat geval dat er geen mogelijkheden zijn voor CO<sub>2</sub>-afvang. Ook tijdens een ingroefase met relatief kleinschalige decentrale productie van waterstof voor nieuwe situaties lijken de mogelijkheden voor CO<sub>2</sub>-afvang beperkt. De mogelijkheden zijn wel volop aanwezig bij een meer volgroeide waterstofinfrastructuur met grootschalige centrale productie van waterstof. In het gehanteerde scenario komt 40-45 Mton per jaar vrij. Alternatief is verduurzaming van de waterstofvraag via elektrolyse met elektriciteit uit wind. Bij een meer volgroeide waterstofinfrastructuur kan het net dienen als buffer om de discontinuïteit in het aanbod op te vangen. De waterstof kan dan zomers voor de centrale elektriciteitsvoorziening worden ingezet, en 's winters voor WK-bedrijf in de gebouwde omgeving. De grote vraagtekens rond de economie van deze variant zijn hiermee echter niet opgelost.

---

<sup>9</sup> Het binnenlands technisch potentieel voor opslag in kolenlagen bedraagt ruim 2700 Mton. 'Bewezen' is vooralsnog 300 Mton. Het technisch potentieel voor opslag in lege gasvelden, lege olievelden en waterreservoirs wordt thans ingeschat op respectievelijk 12000 Mton, 10 Mton en 1500 Mton.

<sup>10</sup> Energie-inhoud biomassa ca. 15 PJ/Mton

### *Elektrisch en brandstofcelvervoer*

Het gebruik van elektrische auto's en brandstofcelvoertuigen in plaats van hybrides op basis van een interne verbrandingsmotor leidt tot verlaging van de druk op de vraag naar biomassa en aardolie. Ondanks de reductie in aardolie blijft het emissieplaatje in het gehanteerde scenario gelijk omdat tegelijkertijd de vraag naar aardgas voor de productie van elektriciteit en waterstof toeneemt. Verduurzaming is echter goed voorstelbaar. De vraag is namelijk continue (gelijkmatig door het jaar heen) en bovendien goed stuurbaar. De opties bieden daarmee een uitgelezen mogelijkheid voor inpassing op grote schaal van de vernieuwbare niet stuurbare bronnen wind en zon.

In het gehanteerde scenario gaat het afhankelijk van de mate van inzet van brandstofcelvoertuigen uiteindelijk om enkele honderden PJ waterstof per jaar. Dit is aanzienlijk minder dan de hoeveelheid PJ die thans aan aardgas door leidingen wordt getransporteerd. De vraag in hoeverre de hoeveelheid waterstof die het betreft een aparte leiding-infrastructuur nodig maakt, of dat transport anderszins economisch is te realiseren, is op voorhand niet te beantwoorden en verdient nadere studie.

### *Resumerend*

Zonder uitvoerige systeemstudie is het niet mogelijk om de complexe interacties binnen de toekomstige energievoorziening voldoende nauwkeurig in beeld te brengen. Wel wordt uit de korte verkenning duidelijk dat voor het realiseren van een 50% CO<sub>2</sub>-emissiereductiedoelstelling in 2050 alles uit de kast zal moeten worden gehaald. Naast consequente aandacht voor vraagbeperking vergt het grootschalige inzet van vernieuwbare bronnen, en verdergaande efficiencyverbetering van inzet van fossiele energiedragers, waarschijnlijk in combinatie met CO<sub>2</sub>-afvang. Uit de korte verkenning wordt ook duidelijk dat zich hierbij grote inpassingsvraagstukken voordoen. Deze vraagstukken concentreren zich met name rond beschikbaarheid en optimale inzet van biomassa, en de onderlinge interactie, zowel technisch als economisch, tussen grootschalige inzet van wind, grootschalige inzet van warmtekracht en de centrale elektriciteitsproductie.

## 2.5 Actoren en aangrijpingspunten

Naast het identificeren van de technologisch oplossingsroutes via welke een reductiedoelstelling van -50% CO<sub>2</sub> in 2050 behaald kan worden, is het tevens van essentieel na te gaan welke actoren in dit transitietraject een rol spelen en welke sturingsmogelijkheden aanwezig zijn om het transitieproces te beïnvloeden.

Het is hierbij bijvoorbeeld van belang om de volgende punten na te gaan:

- Wat zijn de veranderingen in het toekomstige actor netwerk in vergelijking tot de huidige situatie.
- Welke van de huidige gebruiken / toepassingen zullen verdwijnen en welk effect heeft dit op de samenleving.
- Welke nieuwe gebruiken / toepassingen zullen moeten worden geïntroduceerd en geaccepteerd en wat is hiervan het effect op de samenleving.
- Welke van de actoren leiden het meeste schade van de beoogde transitie.
- Welke van de actoren profiteren het meeste van de beoogde transitie.
- Wat voor soort oppositie mag verwacht worden en wie zal deze oppositie naar verwachting voeren.
- Welke omgevingsfactoren kunnen van invloed zijn op de snelheid en richting van het transitieproces.

### 2.5.1 Laagwaardige warmte - Huishoudens, Diensten & Overheid, Landbouw

In het eindbeeld wordt een onderscheid gemaakt naar dat deel van de verbruikers dat reeds nu reeds aanwezig is en nieuwe verbruikers. Verondersteld is dat, gezien de fijnmazigheid van de infrastructuur en de beperkte dynamiek (laag vervangingstempo) de mogelijkheden voor de aanleg van een nieuwe infrastructuur in de bestaande gebouwde omgeving zeer beperkt zijn. Wel is, ten opzichte van de autonome ontwikkeling, nog een aanzienlijke reductie van de (laagwaardige) warmtevraag nodig. Tevens dient geïnvesteerd te worden in efficiënte conversietechnieken in combinatie met lokale opwekking van duurzame energie. Het aantal actoren (eigenaren) dat dient te worden beïnvloed is zeer groot<sup>11</sup>, hetgeen bijvoorbeeld het afsluiten van convenanten bemoeilijkt.

Er is een aantal mogelijkheden om de ‘beslissers’ te motiveren over te gaan tot verdere vraagreductie en investeren in efficiënte conversietechnieken en lokale duurzame bronnen. Hierbij kan worden gedacht aan sturing via de energieprijzen, verstrekken van subsidies of het opleggen van verplichtingen (regulering). In principe verandert er weinig ten aanzien van de momenteel door de energiebedrijven geleverde diensten.

Bij nieuwbouwsituaties lijkt een transitie naar een niet (volledig) op aardgas gebaseerde energievoorziening noodzakelijk, zie Paragraaf 2.3.1. Niet vast staat welke technologische route uiteindelijk doorslaggevend zal worden. Bij het ontwerp en realisatie van een energievoorziening voor een nieuwbouwlocatie spelen diverse actoren een rol, zoals de lokale overheid, het energiedistributiebedrijf, de architect, de projectontwikkelaar, de aannemer en de koper. Essentiële randvoorwaarden bij de realisatie van een niet-conventionele infrastructuur zijn dat de benodigde techniek voorhanden is (dat wil zeggen bewezen, betrouwbaar en betaalbaar), de wet- en regelgeving voorziet in toepassing van alternatieve energiedragers (dit is met name een aandachtspunt voor H<sub>2</sub>) en de aanwezigheid van de noodzakelijke kennis (installatie en onderhoud). Prikkel om de aanleg van een niet-conventionele energie-infrastructuur te realiseren kunnen worden gegeven via het verlagen van de investeringen en/of via regulering<sup>12</sup>.

Bij de overschakeling naar een ‘all-electric’ infrastructuur kunnen de huidige actoren vrijwel dezelfde rol blijven vervullen en is de technische kennis aanwezig om de (geringe) aanpassingen aan het elektriciteitsnet door te voeren. In deze situatie wordt wel een actor die momenteel een belangrijke rol speelt bij de energievoorziening voor laagwaardige warmte, buitenspel gezet omdat de aansluiting op het gasnet komt te vervallen. Alhoewel er enige ervaring is met het transport van H<sub>2</sub>-gas via een leidingstelsel voor industriële toepassingen, is er nog geen praktijkervaring met betrekking tot de aanleg van een fijnmazig buizenstelsel dat geschikt is voor H<sub>2</sub>-transport in de Gebouwde Omgeving. Het is moeilijk aan te geven welke actoren zich zullen richten op de levering van H<sub>2</sub>-gas. De huidige actoren kunnen deze diensten aanbieden, maar de veranderde situatie zou ook mogelijkheden kunnen bieden voor nieuwe spelers. De installateurs zullen geschoold moeten worden met betrekking tot de toepassing van micro WKK-systemen en CV-fabrikanten zullen de hiervoor noodzakelijke systemen moeten ontwikkelen.

### 2.5.2 Industrie - Hoogwaardige warmte en elektriciteit

Alhoewel er, vanwege de aanvoer van zeer grote hoeveelheden biomassa (en omzetting naar syngas), ingrijpende aanpassingen nodig zijn aan de energie-infrastructuur, wordt verwacht dat dit in principe via een incrementeel innovatieve route realiseerbaar is, mits alle relevante actoren

---

<sup>11</sup> Aangenomen mag worden dat bijv. het aandeel eigenaar/bewoners in de sector Huishoudens alleen nog maar verder zal toenemen.

<sup>12</sup> Een verhoging van de energieprijzen voor conventionele energiedragers heeft in dit geval waarschijnlijk minder effect, aangezien degene die baat heeft bij een lagere energierekening (de eindverbruiker) slechts marginaal betrokken is bij het besluitvormingsproces rondom de keuze voor een bepaald type energie-infrastructuur. Indirect heeft de consument in theorie wel invloed, dit omdat hij (theoretisch) de mogelijkheid heeft om een woning die is aangesloten op een bepaalde infrastructuur niet te kopen (of te huren).

bereid zijn actief de transitie van een met name op aardgas gebaseerde energievoorziening naar een overwegend op biomassa gestoelde energievoorziening te willen bewerkstelligen. De transitie vergt aanpassing aan energieconversie-installaties (overwegende WKK). Het dominante criterium voor de industrie is kosten. Via heffingen op aardgas dan wel CO<sub>2</sub> in combinatie met gerichte stimulering (bijv. subsidies) om de eventuele meerinvesteringen voor de aanpassingen van industriële installaties weg te nemen dient te worden bereikt dat de overschakeling naar biomassa/syngas niet leidt tot kostenverhogingen<sup>13</sup>. Belangrijke randvoorwaarden zijn concurrentiepositie ten opzichte van het buitenland, beschikbaarheid en betrouwbaarheid van de noodzakelijke nieuwe technologie alsmede de zekerheid dat het kostenplaatje ook richting de verdere toekomst gunstig uitpakt. In de eindbeelden wordt uitgegaan van een zeer sterke toename van het WKK-vermogen om in de vraag naar hoogwaardige warmte en elektriciteit te kunnen voorzien. De rentabiliteit van deze investering is echter zeer gevoelig voor zowel de gasprijs (prijs van syngas) alsmede terugleververgoedingen voor elektriciteit. Met name de terugleververgoeding voor elektriciteit kan, met name gedurende de nachtelijke uren, zwaar onder druk komen te staan indien centraal een grote hoeveelheid niet regelbaar vermogen wordt geplaatst, zoals wind of nucleair vermogen.

---

<sup>13</sup> In vergelijking tot een energievoorziening op aardgas.

### 3. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

#### 3.1 Incrementele innovatie als route naar een duurzame energievoorziening

De vraag of het mogelijk is om via een route van incrementele innovatie op de lange termijn aan een verregaande CO<sub>2</sub>-reductiedoelstelling te voldoen is in essentie een transitievraagstuk. De eerste stap bij het oplossen van een transitievraagstuk is het formuleren van één of meerdere eindbeelden<sup>14</sup>. Een essentiële randvoorwaarde bij het invullen van deze eindbeelden is de noodzaak tot het behalen van een vooraf gestelde (reductie)doelstelling. Nadat dit eindbeeld is ingevuld, dient bepaald te worden via welke routes de transitie naar de geschetste eindbeelden kan verlopen<sup>15</sup>. Via een combinatie van back- en forecasting kan bepaald worden welke veranderingen op zullen moeten treden en wordt tevens inzicht verkregen in het tempo waarin deze veranderingen zich zullen moeten voltrekken. Vervolgens dienen de zogeheten ‘critical actors’ te worden geïdentificeerd en dient te worden nagegaan op welke wijze, bijvoorbeeld door de inzet van additionele beleidsinstrumenten, zij kunnen worden beïnvloed, zodanig dat ze het voor het bewerkstelligen van de transitie noodzakelijke gedrag gaan vertonen. Tot slot dient te worden nagegaan hoe robuust de veronderstelde ontwikkelingen zijn. Hierbij kan bijvoorbeeld het mogelijke effect van wijzingen in de veronderstelde sociaal/economische context worden bepaald. Er is sprake van een weinig robuuste en/of plausibele oplossingsroute indien deze alleen mogelijk is binnen slechts één, afwijkende, sociaal/economische context<sup>16</sup>.

Indien vanuit het heden via een, korte termijn, technisch/economische optimalisatie strategie een ‘transitie’ richting de toekomst vormgegeven zou worden, dan zouden primair de maatregelen genomen worden die, redenerende vanuit het heden, als meest optimaal beschouwd zouden worden. Deze strategie heeft echter als belangrijk nadeel dat een situatie kan ontstaan waarbij ‘permanente’ vraagbeperkende opties die naderhand niet of alleen tegen zeer hoge kosten kunnen worden genomen, het moeten afleggen tegen efficiënte of geavanceerde energieconversie-opties met een beperkte levensduur en een gunstigere korte termijn rentabiliteit. Doordat vanuit het heden op basis van kosten/baten wordt geoptimaliseerd, is het niet zeker of uiteindelijk de beoogde reductiedoelstelling nog tegen aanvaardbare kosten behaald kan worden. Indien echter vanuit het eindbeeld teruggedeneerd wordt, dan wordt duidelijk wanneer en in welke mate deze ‘permanente’ vraagbeperkende opties genomen hadden moeten worden<sup>17</sup>.

---

<sup>14</sup> Hierbij wordt uitgegaan van een zogeheten technisch/economisch eindbeeld, zie ook (Jeeninga et al., 2002).

<sup>15</sup> Doorgaans heeft een set van eindbeelden één of meerdere gemeenschappelijke kenmerken, zodat over het algemeen de eerste fase van de transitie naar deze eindbeelden toe via een gemeenschappelijk pad plaats kan vinden. In dit geval is er, in de eerste fase, sprake van een relatief robuuste transitie route.

<sup>16</sup> Bijvoorbeeld een samenleving met een dominante en sterk sturende overheid, een zeer sterke vorm van milieubewustzijn en opofferingsgezindheid bij de consument en actoren die zonder pressie het lange-termijn belang laten prevaleren boven korte termijn gewin.

<sup>17</sup> Dit kan worden geïllustreerd aan de hand van het volgende voorbeeld. Beoogd wordt op termijn het beslag op primaire energiedragers door de gebouwde omgeving zeer sterk terug te dringen. Vanuit een technisch/economische optimalisatie strategie, zoals momenteel in wezen via de EPN plaatsvindt, zullen eerst de maatregelen genomen worden met de meest gunstige rentabiliteit, zoals bijvoorbeeld efficiënte of geavanceerde energieconversietechnieken, dit omdat de investering per jaarlijks bespaarde eenheid energie lager is dan die van concurrerende vraagbeperkende besparingsopties zoals betere isolatie van het casco van het gebouw of de woning. Indien na verloop van tijd blijkt dat via deze route de doelstelling niet meer kan worden gehaald, dan rest niets anders dan het tegen zeer hoge kosten alsnog implementeren van de vraagbeperkende maatregelen waar in het verleden van is afgezien, maar die destijds tegen aanvaardbare kosten genomen hadden kunnen worden. Indien vanuit het eindbeeld teruggedeneerd was, dan was duidelijk geworden wanneer en met welke intensiteit bepaalde permanente vraagbeperkende maatregelen genomen hadden moeten worden. Op het moment waarop deze toegepast zouden moeten worden hoeven dit niet noodzakelijkerwijs de meest rendabele maatregelen te zijn. Echter, voor het behalen van een lange termijn reductiedoelstelling kan het nodig zijn om voorrang te verlenen aan permanente vraagbeperkende opties, dit omdat deze noodzakelijk zijn om te kunnen voldoen aan de uiteindelijke reductiedoelstelling en naderhand niet of tegen een veelvoud van de oorspronkelijke meerinvesteringen te nemen zijn.

Diverse potentieel studies geven aan dat het in principe technisch mogelijk is om de totale CO<sub>2</sub>-emissies in 2050 met circa 50% - 80% te reduceren ten opzichte van het niveau in 1990 (Seebregts et al., 2002). De vraag is echter of het mogelijk is om deze transitie naar een duurzame energievoorziening via een incrementeel innovatieve route (evolutie) te laten plaatsvinden of dat een revolutionaire invoering noodzakelijk dan wel te prefereren is. Eén van de randvoorwaarden in het transitieproces is dat de kosten en baten zodanig verdeeld worden dat de actoren die dienen te investeren ook baat hebben bij deze investering (of simpelweg niet onder een investeringsverplichting uit kunnen komen). De overheid, zijnde de representant van de Nederlandse samenleving, is primair de partij die baat heeft bij het behalen van de reductiedoelstelling. Probleem hierbij is nog dat deze baten moeilijk in geld uit te drukken zijn. Aangezien de baten primair bij de overheid liggen, zal deze het initiatief moeten nemen om er voor te zorgen dat er instrumenten worden ingezet waardoor ook de 'critical actors' baat hebben bij de transitie naar een duurzame energievoorziening. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan instrumenten als een CO<sub>2</sub>-heffing, emissiehandel, subsidies of regulering.

Uit deze studie blijkt dat het schetsen van een energievoorziening waarmee daadwerkelijk de beoogde reductiedoelstelling wordt behaald, met name vanwege discrepanties tussen vraag en aanbod alsmede de mogelijk grote afhankelijkheid van te importeren energiedragers, niet eenvoudig is, zie ook Paragraaf 2.4. Belangrijk hierbij is met name te kijken naar de samenhang tussen verschillende processen. Dit betekent, en deze studie bevestigt dit ook, dat niet zozeer de flexibiliteit van de infrastructuur maar de flexibiliteit van de energievoorziening, waarin de samenhang tussen energievraag en energieaanbod alsmede wijze waarop deze gekoppeld kunnen worden, uitgangspunt zou moeten zijn bij een dergelijk transitievraagstuk.

Op basis van deze studie kan geconcludeerd worden dat een transitie naar een duurzame energievoorziening in 2050 waarschijnlijk technisch mogelijk is via een incrementeel innovatieve route. Het streven om via een incrementeel innovatieve route deze transitie te bewerkstelligen is echter ambitieus en vereist een effectief en daadkrachtig transitie management. Het is, in een liberale energiemarkt bij een terugtrekkende overheid, sterk de vraag of één of meerdere partijen in de praktijk in staat zullen zijn om deze rol van transitie manager op zich te nemen. Vanuit dat perspectief bekeken zou geconcludeerd kunnen worden dat het, met name vanwege het conflicteren van korte en lange termijn belangen, niet waarschijnlijk is dat de beoogde lange termijn transitie via incrementele innovatie plaats zal vinden zonder een effectieve regie van de overheid.

Bedacht dient te worden dat het alternatief voor een incrementeel innovatieve route, zijnde een route waarin pas veel later overgegaan wordt tot het nemen van revolutionaire maatregelen voor verregaande CO<sub>2</sub>-reductie, nog grotere problemen oplevert. Weliswaar kunnen investeringen later worden gepleegd. Echter, de kosten verbonden aan een uitgestelde transitie naar een duurzame energievoorziening via een revolutionair proces zijn, vanwege de noodzakelijke investeringen in een nieuwe infrastructuur, naar verwachting aanzienlijk hoger dan de kosten waarmee deze transitie via het proces van incrementele evolutie kan worden bewerkstelligd. Aangenomen mag worden dat de bereidwilligheid van de 'critical actors' om via revolutie te voldoen aan een CO<sub>2</sub>-reductiedoelstelling beduidend minder groot is dan wanneer dit proces via evolutie plaats kan vinden, terwijl ook de kosten van een revolutie beduidend hoger zullen zijn.

## 3.2 Overige bevindingen en conclusies

### INTEGRALE AANPAK IN PLAATS VAN SECTORALE AANPAK

*Per sector zijn meerdere opties mogelijk om de energievraag op een (meer) duurzame wijze in te vullen. Optimalisatie per sector levert echter niet noodzakelijkerwijs ook overall een optimale energievoorziening en kan zelfs tot knelpunten leiden.*

Op het ogenblik is er vooral aandacht voor de grootschalige inzet van biomassa in de centrale elektriciteitsproductie. Verder wordt er thans een grote rol gezien voor biomassa in de vervoer- en transportsector in de vorm van biobrandstoffen. Daarnaast wordt er gedacht aan de inzet van biomassa voor de productie van SNG voor invoeding in het aardgasnet. Uit de verkenning blijkt nu dat er ook grote hoeveelheden biomassa nodig zijn om tot verduurzaming in de industrie te kunnen komen. Het is zeer de vraag of er voldoende biomassa aanwezig is om al deze behoeften te dekken. Moeten er keuzes worden gemaakt, en zo ja, wanneer en door wie?

Een ander aandachtspunt is de inpassing van warmtekracht en wind. Warmtekracht zal voornamelijk warmtegestuurd zijn. Indien de WK verhouding in de energievraag groter is dan de WK verhouding die wordt geleverd door de aanbodtechnologie leidt dit tot een overproductie van elektriciteit. Omdat de warmtevraag leidend is, is er, evenals in het geval van wind, sprake van een niet-stuurbare elektriciteitsbron. Bij grootschalige inzet van beide zijn zij in concurrentie met elkaar hetgeen de economie van beide kan frustreren.

Specifiek aandachtspunt bij wind en mogelijk ook bij grootschalige inzet van kleinschalige warmtekracht in de gebouwde omgeving is de gepiekttheid van het aanbod, hetgeen specifieke eisen stelt aan de 'centrales' die moeten zorgen voor de balans.

### AANDACHT VOOR FLEXIBILITEIT

*Iedere mogelijkheid consequent gebruiken om de infrastructuur geschikt te maken voor toekomstige innovaties is wezenlijk onderdeel van transitie management van de incrementeel innovatieve route.*

Flexibiliteit betekent niet alleen uitbreiding van capaciteit. Het kan op zeer verschillende wijzen worden geïntroduceerd. Geïntroduceerd moet worden welke stappen snel genomen moeten worden indien voldaan dient te worden aan de voorwaarde dat de transitie volgens een incrementeel innovatieve route moet verlopen. Zo kan worden gedacht aan een meer flexibele aanleg van infrastructuren, bijvoorbeeld via eenvoudig bereikbare 'kabelgoten'. Dit is vooral van belang voor situaties met een laag vervangingstempo, zoals bijvoorbeeld de woningbouw. Woningen die nu worden gebouwd staan er over 50 jaar voor een groot deel nog. Bij een meer flexibele aanleg zijn eenmaal gemaakte keuzes minder definitief omdat de infrastructuur relatief eenvoudig kan worden uitgebreid of aangepast.

Een andere mogelijkheid voor flexibilisering is het introduceren van mogelijkheden voor vraagsturing. Mogelijk is het genereren van flexibele afnemers nodig om blijvend genoeg flexibiliteit voor een stabiele werking van een systeem met daarin een groot aandeel niet stuurbare bronnen te garanderen. Ook het introduceren van opslag/buffering is een manier om flexibiliteit te winnen. Hierbij kan worden gedacht aan opslag van een overschot aan warmte in de zomer in aquifers voor gebruik in de winter, maar ook aan het gebruik van de transportsector als buffer, via elektriciteitsopslag of waterstofopslag, voor de inpassing van niet stuurbare bronnen.

### VERDUURZAMING FEEDSTOCKS

*Inzet van fossiele energiedragers als feedstock in de industrie is een belangrijk aandachtspunt bij de verduurzaming van de energievoorziening.*

De inzet van fossiele energiedragers als feedstocks in de industrie bedraagt thans 15-20% van de totale Nederlandse energievraag. Dit is bijvoorbeeld vergelijkbaar met de totale vraag naar elektriciteit en lage temperatuurwarmte in de sector huishoudens. Het is een belangrijke factor voor

het vergaand kunnen terugdringen van de CO<sub>2</sub>-emissies vooral vanwege het feit dat verduurzaming voornamelijk de inzet van biomassa vergt. Vanwege de omvang zou dit mogelijk de inzet van biomassa voor andere doelen kunnen beperken.

#### CO<sub>2</sub>-AFVANG EN OPSLAG

*In Nederland is een groot technisch potentieel aanwezig voor opslag van CO<sub>2</sub>. De vraag is in hoeverre dit potentieel daadwerkelijk kan worden benut.*

CO<sub>2</sub>-afvang en opslag kan de transitie naar een duurzame energievoorziening bespoedigen/ vereenvoudigen. Nog onzeker is hoe groot de binnenlandse opslagcapaciteit is die tegen aanvaardbare economische en maatschappelijke randvoorwaarden kan worden benut. Bij onvoldoende binnenlandse capaciteit zou grootschalige CO<sub>2</sub>-export kunnen worden overwogen. Een ander alternatief is de ontwikkeling van mogelijkheden voor vastlegging/hergebruik van CO<sub>2</sub>.

#### VOORZIENINGSZEKERHEID

*Een vergaande verduurzaming van de energievoorziening brengt mogelijk een grote tot zeer grote afhankelijkheid met zich mee.*

Verregaande vraagbeperking alleen is onvoldoende om de beoogde reductiedoelstelling te behalen. Ook het aanbod zal verduurzaamd moeten worden. Om de knelpunten in het aanbod op te lossen zijn globaal drie hoofdrichtingen denkbaar:

- (1) *Grootschalig inzet van biomassa.* In de vraag naar elektriciteit en hoge temperatuur warmte wordt voorzien middels de inzet van biomassa (biomassa centrales en synthesegas voor WKK). Nederland wordt hierdoor sterk afhankelijk van het buitenland door de grootschalige import van biomassa.
- (2) *Aardgas- CO<sub>2</sub>-afvang.* In de vraag naar elektriciteit en hoogwaardige warmte wordt voorzien via aardgasgestookte installaties (veel snel regelbaar vermogen) met CO<sub>2</sub>-afvang. Aangenomen mag worden dat een groot deel van het benodigde aardgas geïmporteerd dient te worden. Onzeker is of de afgevangen CO<sub>2</sub> deels dient te worden geëxporteerd of binnen Nederland kan worden opgeslagen. In deze situatie is Nederland sterk afhankelijk van de aanvoer van gas uit het buitenland.
- (3) *Grootschalig hernieuwbaar (via niet stuurbare bronnen zoals wind).* In principe is het mogelijk om binnen Nederland voldoende energie op te wekken om in de totale energievraag te kunnen voorzien. Echter, deze route geeft met name een probleem met betrekking tot de aansluiting van aanbod op de energievraag vanwege de beperkte stuurbaarheid van het aanbod. Deze route is, zonder inzet van één van de twee andere hoofdrichtingen, waarschijnlijk niet realiseerbaar vanwege de noodzaak tot opslag van grote hoeveelheden energie.

### 3.3 Aanbevelingen

Op basis van deze studie worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Het lijkt zinnig een verkenning in hoofdlijnen uit te voeren naar de toekomst van de grote industrie in Nederland met als richting meer kennisintensief dan wel veel bulkproductie. Daarbij is aandacht te schenken aan de energievraag repercussies van procesvernieuwing, de totale inzet van warmtekracht, mogelijkheden voor duurzame energie, in het bijzonder als feedstock en de wisselwerking met energie-infrastructuur.
- In een studie op hoofdlijnen de inzichten bij elkaar brengen van de stappen die noodzakelijk zijn om de gewenste transitie naar een duurzame energievoorziening te bewerkstelligen. Hierbij dienen de meest geschikte plaatsen voor inpassing van innovaties in de bestaande en toekomstige infrastructuur te worden geïdentificeerd.
- Het 'elastiek' die de opslag van energie aan boord van het voertuig in de transportsector biedt, is nader te verkennen. Aandacht daarbij voor zaken als mogelijkheden voor opslag van elektriciteit uit warmtekracht en duurzame bronnen en de wisselwerking met infrastructuren bij grootschalige introductie van elektriciteit, biobrandstoffen of waterstof. De mogelijkhe-

den om de personenauto thuis te 'tanken', elektrisch of waterstof, dienen nader te worden verkend en beoordeeld te worden op de impact op het totaal van de energievoorziening.

- Onderzocht dient te worden op welke wijze de bouwregelgeving 'vergroend' kan worden. Hierbij kan met name gedacht worden aan eisen aan casco, gebalanceerde ventilatie en lage temperatuur verwarming. De mogelijkheden van nieuwe zon-thermische concepten, voor zowel nieuwbouw als bestaande bebouwing moeten worden verkend.
- Voor de sector Land- en Tuinbouw is een vergaande en snelle verduurzaming van de energievoorziening nodig. Hierbij kan gedacht worden aan verregaande vraagbeperking (met daarbij in het bijzonder aandacht voor dubbel 'glas'), andere methoden voor koeling, ontvochtiging en CO<sub>2</sub>-bemesting, inzet van warmtepompen en warmte-/koude-opslag ('de kas als energiebron').
- Nader onderzoek naar inzet van syngas in de industrie en mogelijke verbeteringen van het productieproces van syngas uit biomassa.
- Met name inpassingsproblemen lijken bij een verregaande verduurzaming van de energievoorziening een belangrijke rol te spelen (met name wind vs. WKK). Via een systeemstudie dient onderzocht te worden in hoeverre deze inpassingsproblemen de vrije ruimte voor inzet van bepaalde energieconversietechnieken bepalen (beperken).
- Nader onderzoek dient uitgevoerd te worden naar de mogelijkheden om feedstocks te verduurzamen.

## LITERATUUR

- AER (2001): *Zorgen voor de energie van morgen*. AER-advies, vastgesteld op 25 oktober 2001, ISBN 90 74357 28 8, 2001.
- AER (2002): *Post-Kyoto Energiebeleid*. AER-advies, ISBN 90 74357 30 X, vastgesteld op 24 januari 2002.
- Arkel, W.G. van, et. al. (1999): *Energieverbruik van gebouwgebonden energiefuncties in woningen en utiliteitsgebouwen*. ECN-C--99-084, Petten, ECN, november 1999.
- Bakema, G.F. (1990): *Energiebesparing door elektrische auto's in stadsverkeer*. ECN-C--90-038, ECN, Petten, september 1990.
- Benner, J.H.B., A.H.M. Kipperman (2002): *Integrale benadering van ontwikkelingen in de energie-infrastructuur. Een denkmodel dat praktische waarde heeft bewezen. Eindrapportage*. CEA, Bureau voor communicatie en advies over energie en milieu B.V., rapportnummer: 10646, Rotterdam, 2002.
- Beeldman, M., et. al. (1995): *SAVE-module Utiliteitsbouw; De modellering van energieverbruiksoontwikkelingen*. ECN-I--94-044, Petten, ECN, januari 1995.
- Boonekamp, P.G.M. (1995): *SAVE-module Huishoudens; De modellering van energieverbruiksoontwikkelingen*. ECN-I--94-045, Petten, ECN, januari 1995.
- CBS (2001): *Nederlandse Energiehuishouding 2000* (zip bestand met tabellen). CBS, Voorburg, versie oktober 2001.
- CPB (1997): *Economie en fysieke omgeving, Beleidsopgaven en oplossingsrichtingen 1995-2020*. Centraal Planbureau, Den Haag, 1997.
- Dril, A.W.N. van, et.al. (1995): *SAVE-module Productiebedrijven; De modellering van energieverbruiksoontwikkelingen*. ECN-I--94-043, Petten, ECN, januari 1995.
- ECN (1998): *Nationale Energie Verkenningen 1995-2020*. ECN-C--97-081, Petten, ECN, maart 1998.
- Faaij, A., et. al. (2001): *Beelden van de toekomst; Twee visies op de Nederlandse energievoorziening ten behoeve van de Nationale Dialoog*, RUU, Publicatie voor het NOP-COOL project, Utrecht, 2001.
- Gool, W. van (1998): *Exergie en Energie. Toepassingen van het exergieconcept in procesanalyse en energiebeleid*. W. van Gool, Van Gool ESE Consultancy; Driebergen, 1998.
- Ham, E.R. van den (1996): *Sectorstudie kantoorhoudende dienstverlening*. NDS--96-012, NEEDIS (bij ECN Beleidsstudies), Petten, november 1996.
- Hilten, O. van, et. al. (2000): *Energietechnologie in het spanningsveld tussen klimaatbeleid en liberalisering*. ECN-C--00-020, Petten, ECN, mei 2000.
- IEA (1992): *Expert Workshop on Life-Cycle Analysis of Energy systems, Methods and Experience*. Proceedings International Energy Agency, Paris, France, 21st-22nd, May 1992.
- Jeeninga, H. et al. (2002). *Klimaatneutrale Energiedragers in de Gebouwde Omgeving. Naar een actieplan*. Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), rapport nr. ECN-C-02--077, Petten, (in druk), 2002.

- Kaizen (1994): *Het stap voor stap bezig zijn met verbetering van een product of dienst. Dé filosofie achter het Japanse succes*. Masaaki Imai, Kluwer Bedrijfswetenschappen, ISBN 90-267-1995-7, 2e druk 1994.
- Kema (2002): *Technologie voor een duurzame samenleving, Electricity Technology Roadmap. Een technologieanalyse voor de elektriciteitsvoorziening van Nederland in een N-W Europees perspectief 2000 - 2025*. KEMA, 40010378-TDC 02-24457A; 4 April 2002.
- Korver, W., et.al. (1997): *Wegwijzers naar 2050, verkeer en vervoer in de 21 eeuw. Deelstudie 'Vervoerbehoefte en vervoersystemen'*. TNO-INRO, VVG-1997-15, Delft, TNO, 1997.
- Menkveld, M. (1998): *Energievraag Utiliteit in 2050*. Interne ECN-notitie, Petten, ECN Beleidsstudies, 24 december 1998.
- Ministerie van Economische Zaken (1996): *Marktwerking in de energiesector*. Ministerie van Economische Zaken, Beleidsstudies Energie, ISBN 90-73225-02-7, 1996.
- Ministerie van Economische Zaken (1998): *Internationale Benchmark Duurzame Energie - Eindrapport*. Ministerie van Economische Zaken, Beleidsstudies Energie, ISBN 90-73225-11-6, juni 1998.
- Olivier, J.G.J., L.J. Brandes, J.A.H.W. Peters, P.W.H.G. Coenen (2002): *Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2000. National Inventory Report 2002*. RIVM report 773201 006 / 2002, Bilthoven, RIVM, 2002.
- Paul, I., K. Riedle, R. Taud (2000): *Tailor-made versus off-the-shelf: modularisation aims to strike a balance*. Ingo Paul, Klaus Riedle, Robert Taud, Modern Power Systems, July 2000.
- Reepe, D. van de (2001): *Inzet door inzicht*, Afstudeerverslag, Natuurwetenschappen en Bedrijf & Bestuur, Universiteit Utrecht, November 2001.
- Seebregts, A.J. en M. Weeda (2002): *Energie-infrastructuur van de toekomst. Een inventarisatie op basis van recente verkenningen en studies voor Nederland*. Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), rapport nr. ECN-C--02-027, Petten, 2002.
- Shell (2001): *Exploring the Future, Energy Needs, Choices and Possibilities Scenarios to 2050*. Global Business Environment, Shell International, 2001.
- Smit, R., J.G. de Beer, I.C. Kok (1996): *Technology assessment HTR. Deelstudie 2 Inpasbaarheid Hoge Temperatuur Reactor in industriële processen*. ECN-C--96-042, Petten, ECN, juni 1996.
- Syrene (1996): *Kiezen voor een duurzame energiehuishouding. Prioriteiten voor onderzoek en ontwikkeling*. Novem-brochure, Utrecht, maart 1996.
- Ybema, J.R. et. al. (2002): *Referentieraming energie en CO<sub>2</sub> 2001-2010*. ECN-C--02-010, Petten, ECN, januari 2002.

## BIJLAGE A DE ENERGIEVRAAG IN 2050

Pieter Kroon - ECN Beleidsstudies

### A.1 Informatie uit diverse studies

De energievraag in 2050 voorspellen is een onmogelijke zaak. De toekomstige energievraag wordt bepaald door het tempo van de bevolkingsgroei, het tempo van de economische groei, verschuivingen in de economische structuur, de energieprijzen en, last but not least, allerlei technologische en maatschappelijke ontwikkelingen die de Nederlandse maatschappij een totaal ander aanzien kunnen geven dan nu (vergelijk 1950 met nu). Al deze factoren zijn op de lange termijn niet te voorspellen, laat staan hun complexe interactie. In dit soort situaties is het door-trekken van trends, bij gebrek aan beter, een bruikbaar startpunt (Hilten, 2000).

De energiesituatie in 2050 is onderdeel geweest van een tweetal recente studies.

Voor het COOL-project, in het kader van het nationale Onderzoeksprogramma Klimaatverandering, zijn er een tweetal beelden gemaakt van een mogelijke energiesituatie in 2050 (Faaij, 2001). In deze beelden is uitgegaan van een situatie waarin een vergaande CO<sub>2</sub>-reductie al bereikt was. Het doel was vooral het op gang brengen van een discussie. Kenmerken van deze beelden zijn onder andere een zeer vergaande energiebesparing en veel duurzame energie waaronder zeer veel biomassa. Door het enigszins extreme karakter van deze beelden leveren deze een weinig bruikbaar startpunt op. Om het karakter enigszins duidelijk te maken kan opgemerkt worden dat het primaire energiegebruik in deze beelden uit komt op 1768-1994 PJ in 2050. Volgens het CBS (CBS,2001) was het totale verbruik in 2000 3051 PJ.

Bij ECN is in het kader van het project 'Energietechnologie in het spanningsveld tussen klimaatbeleid en liberalisering' (ESKL) een referentiebeeld gemaakt voor de situatie in 2050 (Hilten, 2000). In ESKL is dit energievraag beeld later ingevuld met een energieaanbod gericht op 50% CO<sub>2</sub>-reductie in ten opzichte van 1990. De energiecijfers van 2050 worden dan ook gepresenteerd ten opzichte van 1990.

In ESKL wordt een schatting van de energievraag opgesteld door de trends in scenario's uit 1997 voor de periode 1995-2020 (CPB, 1997),(ECN, 1998) door te trekken naar 2050. Daar waar het gezond verstand daarom vraagt, zijn de resultaten aangepast. Als basis is per verbruikscategorie steeds het gemiddelde van de drie CPB scenario's genomen. In zijn totaliteit ontstaat een beeld dat veel lijkt op het EC-scenario (European Coordination) met een economische groei van circa 2,5%. In Tabel A.1 is een overzicht gegeven van de energievraag in ESKL. De energievraag van de transportsector is in ESKL uitgedrukt in voertuigkilometers. Ten behoeve van de tabel is dit vertaald in PJ. De term *stoom* duidt op warmtevraag waarbij een tussenmedium gebruikt wordt als stoom, warm water, hete lucht of thermische olie. De term *heat* duidt op warmtevraag waarbij er een direct contact is (al dan niet gescheiden door een wand) tussen hete verbrandingsgassen en product. Het gaat hierbij onder andere om ovens, drogers, ketels en fornuizen.

Het bijgaande primaire energiegebruik bij Tabel A.1 bedroeg in 1990 circa 2600 PJ. In 2050 (exclusief een stukje verbruik dat in ESKL mist) 3600 tot 4500 PJ al naar gelang de invulling van de energievoorziening. De CO<sub>2</sub>-emissie in ESKL zou bij conventionele technieken (en efficiencyverbetering) stijgen tot 214 Mton in 2050. Als het deel wat ontbreekt in ESKL er bij wordt opgeteld (10 Mton in 1990) zou de emissie in 2050 224 Mton CO<sub>2</sub> worden.

Ten aanzien van de bruikbaarheid van ESKL voor het huidige rapport kunnen een viertal opmerkingen gemaakt worden:

1. Het basisjaar is 1990 of 1995 en geen 2000. In het huidige rapport is 2000 het basisjaar.
2. De sectorverdeling voor de industrie is minder gedetailleerd dan gewenst. Met name bulk productie is niet apart bekeken.
3. Het scenario is niet compleet. In de ESKL studie ontbreken de bouwsector en een aantal kleinere oliestormen. Uitgedrukt in CO<sub>2</sub> 1990 komt ESKL tot 158 Mton versus 168 Mton in werkelijkheid.

Tabel A.1 *De energievraag in 2050 uit ESKL (van Hilten et al., 2000); aangepast*

Energievraag	1990 [PJ]	2050 [PJ]	Groei [%]	Groei/jaar [%]
<i>Huishoudens</i>				
Warmtevraag	264	238	-10	-0,2
Warm watervraag	47	84	78	1,0
Elektriciteitsvraag	55	184	233	2,0
<i>Utiliteit</i>				
Warmtevraag	134	270	102	1,2
Elektriciteitsvraag	74	206	180	1,7
<i>Transport</i>				
Personenverkeer weg [mld km]	218 (83)	286 (158)	90	1,1
Bussen weg [mld km]	7 (1)	8 (1)	23	0,3
Bestelauto's weg [mld km]	29 (8)	85 (42)	441	2,9
Goederenvervoer weg [mld km]	69 (6)	265 (28)	339	2,5
Treinen/trams	5	7	40	0,6
Binnenlandse scheep/lucht	18	36	103	1,2
Overige mobiele bronnen	31	46	47	0,6
<i>Land- en tuinbouw</i>				
Warmtevraag	148	168	13	0,2
Elektriciteitsvraag	7	15	111	1,3
<i>Industrie</i>				
Stoom (warmte met tussenmedium)	185	363	96	1,1
Heat (directe warmteoverdracht)	194	387	99	1,2
Elektriciteit	118	333	183	1,8
Aardgas voor non energetische toepassingen	95	102	7	0,1
Olieproducten voor non energetische toepassingen	279	441	58	0,8
<b>Totaal</b>	<b>1976</b>	<b>3524</b>	<b>78</b>	<b>1,0</b>

Noot: Niet in tabel kolen en cokes voor hoogovens: 52 PJ in 1990 en 45 PJ in 2050. In de ESKL studie missen tevens de bouwsector en een aantal kleinere oliestromen.

Ten behoeve van dit rapport is gekozen om te starten met het basisjaar uit de referentieraming (Ybema, 2002), een recente ECN/RIVM scenariostudie tot 2010 met een economische groei van 2,5%. De referentieraming heeft het basisjaar 2000, gebaseerd op voorlopige cijfers over het jaar 2000. De reden om niet direct de CBS statistiek voor 2000 te hanteren (CBS, 2001) is dat deze niet de energievraag aangeeft maar het brandstof- en elektriciteitsverbruik. Op de 2000 cijfers kunnen groeipercentages gezet worden die vergelijkbaar zijn met de ESKL studie. Waar dat praktisch gezien voor de hand ligt wordt ook naar een extrapolatie van de referentieraming gekeken. Ofwel er wordt gekozen voor een update van het ESKL scenario op basis van de nieuwste gegevens uit de referentieraming.

## A.2 Sectortrends en ESKL

Omdat gekozen wordt voor een update van de ESKL studie wordt in deze paragraaf stil gestaan bij de enkele sectoren waarin de ESKL cijfers nadere toelichting behoeven (Hilten, 2000).

De ontwikkeling van de energievraag in ESKL levert het volgende beeld. In de cijfers voor warmte en elektriciteit zit impliciet een extrapolatie van het tempo van besparingen op het eindverbruik. Met andere woorden, er wordt verondersteld dat het besparingstempo van 1 à 1,5 %/jaar uit de CPB scenario's tot in 2050 wordt vol gehouden. In ESKL is een economische groei verondersteld van ongeveer 2,5% per jaar. Dit betekent dat het BNP in de periode 1995-2050 bijna een factor 4 groter wordt! Een vier maal zo omvangrijke economie zou uit milieuoogpunt gepaard moeten gaan met drastisch lagere CO<sub>2</sub>-emissies. In de huidige situatie is de trend dat het energiegebruik minder hard groeit dan de economie, door veranderingen in de economische structuur en grote inspanningen op het gebied van energiebesparing. De verwachting is dat deze trend zal doorzetten. In Tabel A.1 moeten groeicijfers hoger dan 2,5 %/jaar dan ook met argwaan worden bekeken.

In de eerste plaats gaat het om het *elektriciteitsverbruik in huishoudens*. Het lijkt onwaarschijnlijk dat de hoge groei in de CPB scenario's tot 2020 zal doorzetten tot 2050. Daarom is voor de gehele periode 1995-2050 een gemiddeld groeipercentage van 2% in plaats van 3% verondersteld. De elektriciteitsvraag in huishoudens komt daarmee in ESKL in 2050 op 184 PJ, drie maal het verbruik in 1990.

In de tweede plaats verdient het *warmteverbruik in de dienstensector* aandacht. Weliswaar is de groeivoet lager dan 2,5 %/jaar, maar het verschil met de groei van de warmtevraag in huishoudens is erg hoog. Via EPN (energie prestatie norm) en EPA (energie prestatie advies) is daar nog erg veel winst te halen. Verder zal de groei van de toegevoegde waarde vooral moeten komen uit een sterk stijgende arbeidsproductiviteit, en veel minder uit een toename van het aantal arbeidsjaren. Uit (Menkveld, 1998) blijkt dat de warmtevraag per arbeidsjaar tussen de 25 (veel beleid, telewerken, teleshoppen, etc) en 65 (dezelfde waarde als in CPB scenario GC-2020) GJ zal liggen. In dezelfde notitie wordt gesteld dat het aantal arbeidsjaren tussen de 5 miljoen en 6,75 miljoen zal liggen. Als 'business as usual' wordt hier voor beide het gemiddelde genomen: 6 miljoen arbeidsjaren maal 45 GJ, wat neerkomt op 270 PJ in 2050.

In de derde plaats gaat het om het *vrachtvervoer*. De groei van voertuigkilometers van bestel- en vrachtauto's is hoger dan de groei van het BNP. Dit wordt voor de periode 1995-2020 verklaard uit een relatief sterke groei van internationaal vervoer (CPB, 1997, pp. 293). De vraag is of deze trend zich voortzet. In (Korver, 1997) varieert de index voor de vervoersprestatie over de weg in tonkm van 147 tot 465 (als 1990 = 100). Het eerste getal hoort bij een scenario met de naam Onbegrensde Groei, het tweede getal bij Duurzame Balans. Een gebruikelijke aanname is om de vervoerde hoeveelheid vracht met het BNP mee te laten groeien. In ESKL wordt voor business as usual aangenomen dat de extra groei van internationaal vervoer gecompenseerd wordt door grotere vrachtwagens en/of hogere beladingsgraden, zodat ook de voertuigkilometers in ESKL meegroeien met het BNP.

## A.3 Eerste inschatting en vergelijking

In de referentieraming (raming) (Ybema, 2002) is een scenario voor 2010 gemaakt. Hierbij is als basis 2000 gebruikt (voorlopige cijfers). Een overzicht van het jaar 2000 en 2010 staat in Tabel A.2. Hoewel niet gepubliceerd is er ook een ruwe versie van 2020 gemaakt die via door-trekken van de trend 2000-2020 geëxtrapolerd is naar 2050. Ter vergelijking zijn de cijfers uit de ESKL studie er naast gezet.

Tabel A.2 *Scenario's van de energievraag naast elkaar [PJ]*

	2000 Raming	2010 Raming	2050 Raming extrapolatie	2050 ESKL	1990 ESKL
<i>Huishoudens</i>					
Elektriciteit	69	83	179	184	55
Ruimte verwarming	253	242	210	238	264
Warm water	58	70	121	84	47
Warmte voor koken	7	7	8		
<i>Diensten en overheid</i>					
Elektriciteit	102	129	211	206	134
Ruimte verwarming	154	148	144	270	74
<i>Landbouw</i>					
Elektriciteit	20	26	48	15	7
Ruimte verwarming	146	137	123	168	148
<i>Totaal industrie</i>					
Elektriciteit	147	161	262	333	118
Stoom	247	268	391	363	185
Heat	230	249	332	387	194
<i>Grondstof (netto)</i>					
Aardgas	84	86	119	102	95
Olie	256	288	388	441	279
kolen	63	64	59		
<i>Transport</i>					
Olie en elektriciteit	526	582	624	733	377
<i>Totaal</i>	<i>2363</i>	<i>2540</i>	<i>3219</i>	<i>3524</i>	<i>1977</i>
<i>CO<sub>2</sub>-uitstoot [Mton]</i>	<i>179</i>	<i>191</i>		<i>224</i>	<i>168</i>

Wat opvalt is dat bij het doortrekken van de trend, vergelijkbare aspecten naar voren komen, als bij de ESKL studie zijn genoemd. De daling van de vraag naar ruimteverwarming (doordat er op korte termijn veel bespaard wordt) wordt doorgezet. De elektriciteitsvraag van diensten en overheid, huishoudens en landbouw groei erg veel. De verschillen bij de industrie zijn veel kleiner.

Het beeld uit Tabel A.2 is alleen de vraag naar energie en biedt geen volledig beeld van de energievoorziening. Het energieaanbod ontbreekt nog. Relevant voor de invulling van het energieaanbod is onder andere:

- verbruik van de olieraffinaderijen,
- elektriciteitsproductie,
- energieverbruik gaswinning,
- import en export van elektriciteit,
- distributieverlies elektriciteit,
- duurzame energie opwekking.

Tevens staat alleen het deel van het verbruik aan grondstof in de tabel wat er, in PJ gerekend, niet weer als gas uit komt. De grondstof die omgezet wordt in een energiedrager, die weer gebruikt wordt voor de energievoorziening, is niet opgenomen. Het gaat hierbij om:

- Cokesfabrieken: kolen in cokes en cokesgas uit.
- Hoogovens: cokes en kolen in hoogovengas uit.
- Petrochemie: aardolieproducten in chemisch restgas uit.

Het grondstofverbruik is derhalve hoger dan Tabel 2 aangeeft, en bovendien wordt er een eigen gasvormige brandstof gemaakt.

## A.4 Energievraag 2050

In deze paragraaf wordt het energiebeeld voor 2050 besproken en vergeleken met 2000. Resumerend uit voorgaande paragrafen wordt een gemiddelde economische groei verondersteld van 2,5 % en een besparingstempo van 1 tot 1,5% per jaar. In bepaalde sectoren zoals elektriciteitsverbruik huishoudens, warmteverbruik utiliteit en transport zitten in het uitgangsmateriaal voor 2050 al veronderstellingen over een lagere verbruiksgroei dan de trend. De bevolkingsomvang waar van uit gegaan wordt ligt in 2050 rond de 17,5 tot 18 mln.

Tabel A.3 *Scenario energievraag eindverbruikers inclusief cokesfabrieken exclusief duurzaam*

in [PJ]	2000 Vraag	2000 komt vrij	2050 vraag	2050 komt vrij	2050-ind laag	2050-ind komt vrij
<i>Huishoudens</i>						
Elektriciteit	69		180		180	
Ruimte verwarming	253		230		230	
Warm water	58		90		90	
Warmte voor koken	7		10		10	
<i>Diensten en overheid</i>						
Elektriciteit	102		220		220	
Ruimte verwarming	154		240		240	
<i>Landbouw</i>						
Elektriciteit	20		20		20	
Ruimte verwarming	146		140		140	
<i>Chemie</i>						
Elektriciteit	43		80		40	
Stoom	112		170		85	
Heat	137		220		110	
<i>Metaal</i>						
Elektriciteit	49		100		50	
Stoom	28		50		25	
Heat	49		80		40	
<i>Overige industrie</i>						
Elektriciteit	55		110		110	
Stoom	107		170		170	
Heat	43		60		60	
<i>Totaal industrie</i>						
Elektriciteit	147		290		200	
Stoom	247		390		280	
Heat	230		360		210	
<i>Grondstof</i>						
Aardgas <sup>18</sup>	84		90		45	
Olie <sup>19</sup>	360	104	560	160	280	80
Kolen <sup>20</sup>	119	47	130	50	65	25

De cijfers voor 2050 zijn afgerond op veelvouden van 10. Naast een trend beeld van 2050 is er ook een scenario beeld gemaakt (2050-ind) waarin de energievraag van metaal en chemie (de

<sup>18</sup> Betreft o.a. het verbruik bij de ammoniakproductie, de grondstof voor kunstmest.

<sup>19</sup> Het gaat hier onder andere om nafta voor de petrochemie. In 2000 is het netto energieverbruik 256 PJ. Er ontstaat namelijk ook 104 PJ chemisch restgas. In 2050 zijn deze cijfers 400 en 160 PJ.

<sup>20</sup> Het gaat hier vooral om het kolen en cokeskolen gebruik voor de ijzerproductie. In 2000 is het netto energiegebruik 72 PJ (waarvan een deel bij de cokesfabrieken plaats vindt). Er ontstaat ook 47 PJ cokesgas en hoogovengas. In 2050 zijn deze cijfers 80 en 50 PJ.

bulkproductie) 50% lager is. Ten behoeve van de invulling van het energieaanbod is het type energievraag in de toelichting soms verder uitgesplitst.

In Tabel A.3 is een overzicht gegeven van de energievraag van eindverbruikers exclusief transport (staat in Tabel A.5). De industrie is in drie relevante stukken gesplitst namelijk de chemie (kunstmestchemie, organische basischemie, anorganische basischemie overige basischemie en de chemische productenindustrie), de metaal (basismetaleel ijzer en staal, basismetaleel non-ferro, de overige metaal en de cokesfabrieken) en de overige industrie (voeding en genotmiddelen, textiel, papier en grafisch en de overige industrie). De cokesfabrieken, die normaal bij de energiebedrijven gerekend worden zijn hier tot de metaal industrie gerekend.

### *Huishoudens*

Bij huishoudens zijn ongeveer de cijfers van ESKL aangehouden. Warmte voor koken is apart opgenomen en de vraag naar warm water is, gezien de huidige trend, nog iets hoger verondersteld. In 2000 is circa 0,3 PJ elektriciteit besteed aan ruimte koeling. In 2050 is dit circa 10 PJ elektriciteit. Het elektriciteitsverbruik van apparatuur voor koelen en vriezen is dan circa 30 PJ. De inschatting van de vraag naar koeling is gebaseerd op het ECN model SAVE-huishoudens (Boonekamp, 1995).

### *Diensten en overheid*

Bij diensten en overheid zijn de huidige trends vergeleken met die waar ESKL van uit gaat. De elektriciteitsvraag groeit harder, de warmte vraag langzamer. Het beeld in 2050 is op deze tendens aangepast. In 2050 is voor ruimte koeling circa 15 PJ<sub>e</sub> elektriciteit nodig (nu circa 5), voor koelapparatuur (5 PJ<sub>e</sub>) ongeveer hetzelfde als nu. De inschatting van de vraag naar koeling is onder andere gebaseerd op (Ham 1996), (Arkel 1999) en het ECN model SAVE-utiliteit (Beeldman, 1995).

### *Land en tuinbouw*

Bij *landbouw* zijn vooral de ontwikkelingen bij de glastuinbouw van belang. Hier zijn zowel groei- als krimpscenario's denkbaar (CPB, 1997). De liberalisering heeft een eind gemaakt aan de gunstige aardgasprijs, waardoor de vooruitzichten van de warmtevraag in recente toekomstbeelden naar beneden zijn bijgesteld. Het elektriciteitsverbruik is de afgelopen jaren erg fors (en voor een deel onverklaarbaar) gestegen en ligt al boven de ESKL waarde voor 2050. Voor 2050 is gezien alle onzekerheden daarom maar ongeveer dezelfde energievraag als 2000 aangehouden

Tabel A.4 *Overzicht van diverse temperatuur niveaus*

Temperatuur in [°C]	<100	100-250	250-500	500-750	750-1000	> 1000	Totaal
<i>Chemie</i>							
Schatting aandeel [%]	5	11	27	21	26	10	100
In [PJ] van de warmtevraag	21	41	104	84	101	39	390
<i>Metaal</i>							
Schatting aandeel [%]	15	0	5	0	10	70	100
In [PJ] van de warmtevraag	20	0	7	0	13	91	130
<i>Overige industrie</i>							
Schatting aandeel [%]	29	38	13	0	0	21	100
In [PJ] van de warmtevraag	66	87	29	0	0	48	230

### *Industrie*

Voor de industrie is op hoofdlijnen gekeken naar wat ESKL aangeeft en de hierbij gebruikte basisscenario's en waar de raming nu op uit komt. De verwachtingen rond de elektriciteitsvraag op basis van de raming zijn nu wat lager, die van de stoomvraag wat hoger. Voor heat is de vraag wat hoger, alleen zijn de groeiverwachtingen minder hoog dan in ESKL, waardoor uiteindelijk een lagere waarde resulteert. Een deel van het verschil kan verklaard worden uit het feit dat in

ESKL een deel van het verbruik buiten beschouwing is gelaten. De energievraag is hierna, rekening houdend met groeiverwachtingen in de raming, over de diverse sectoren verdeeld. Het grondstofverbruik van de industrie is opgehoogd met de groeicijfer uit ESKL. Bij het grondstofgebruik komen ook restgassen vrij. Deze staan ook in de Tabel A.3. Deze restgassen kunnen worden ingezet om stoom, heat of elektriciteit op te wekken.

Van het grondstofgebruik komt 100% van de koolstof in de kolen en 90% van de koolstof in het aardgas als CO<sub>2</sub>-vrij. Voor nafta ligt dit op 82% (Olivier 2002). De koolstof die niet vrij komt wordt vastgelegd in producten als kunststof of asfalt.

Ten behoeve van het de invulling van het energieaanbod is voor de industrie een schetsmatig overzicht gemaakt van de temperatuurniveaus van de warmtevraag. Voor een deel kon hierbij gebruik gemaakt worden uit een door de Beer gemaakt overzicht: Figuur 1 uit (Smit, 1996). Een ander deel is specifiek voor deze studie bepaald, waarbij de energievraagverdeling is gebruikt uit het ECN model SAVE-productiebedrijven (Dril, 1995). Voor de temperatuurverdeling is de vraag naar stoom (waaronder stoom, heet water, hete olie etc) en heat (ovens, drogers en fornuizen) bij elkaar genomen. Beneden de 100 °C gaat het bij chemie en metaal vooral om ruimteverwarming. Bij de overige industrie is de voedingsmiddelenindustrie belangrijk (tot 250 °C). Dan volgt papier (250-500 °C). De hoge temperaturen bij de overige industrie zitten bij de productie van bouwmaterialen en keramiek.

### *Transport*

De groei van het verbruik van de transportsector is overgenomen uit de ESKL studie. De berekening staat in Tabel A.5. De groei van personenauto's neemt door verzadigingsverschijnselen duidelijk af. De groei van het goederenvervoer is vergelijkbaar met de economische groei. Voor de variant met minder bulkindustrie is een iets lager verbruik voor goederenvervoer en binnenvaart verondersteld (zie Tabel A.6). Aangezien bulkproductie rond waterwegen is geconcentreerd is het effect beperkt.

Tabel A.5 *Berekening verbruikt transportsector*

	Verbruik in 2000 [PJ]	groei 2000-2050	groei per jaar	efficiency verbetering 2000 – 2050	Verbruik in 2050 [PJ]
Personen en bestelauto's	344	1,64	1,01	0,7	396
Goederenvervoer + binnenvaart	111	3,44	1,025	0,85	325
Openbaar Vervoer elektrisch	6	1,35	1,006	0,85	7
Mobiele werktuigen	31	1,35	1,006	0,85	36

De feitelijke energievraag van een voertuig is veel lager dan het brandstofverbruik. Rendementen tussen brandstofverbruik en voortstuwingsenergie (energie aan de wielen) liggen in stadsritten tussen de 10 en 30% afhankelijk van het voertuig (Bakema, 1990). Omdat dit geen herkenbaar beeld op zou leveren is in Tabel A.5 de energievraag in olie-brandstof uitgedrukt. Indien een voertuigtechnologie toegepast wordt die efficiënter is dan de conventionele, maar wel energiezuiniger, benzine en diesel motor, kan het energieverbruik lager uitkomen dan de hier opgenomen olie-brandstof vraag.

Tabel A.6 *Scenario energievraag transport en totaal eindverbruikers (vervolg van Tabel A.3 [PJ])*

	2000 Vraag	2000 Komt vrij	2050 vraag	2050 komt vrij	2050-ind laag	2050-ind komt vrij
<i>Transport</i>						
Personen en bestelauto's	344		400		400	
Goederenvervoer en binnenvaart	111		330		320	
Openbaar vervoer elektrisch	6		10		10	
Mobiele werktuigen	31		40		40	
<i>'Totaal'</i>	<i>'2336'</i>		<i>'3520'</i>		<i>'2875'</i>	

In Tabel A.6 is ook een optelling gemaakt met de energievraag uit Tabel A.3. Dit levert in 2050 een beeld van de energievraag op die 50% hoger ligt dan in 2000. Met minder bulkproductie wordt dit 23%. Aangezien hiervoor elektriciteit, warmte, grondstof en olie bij elkaar opgeteld zijn, is dit slechts een eerste orde schatting.

#### A.5 Aanvullende informatie over het energieaanbod.

Tabel A.7 *Aanvullende gegevens energiebedrijven voor het energieaanbod [PJ]*

	2000 Vraag	2000 Komt vrij	2050 vraag	2050 komt vrij	Opmerkingen
<i>Raffinaderijen</i>					
Elektriciteit	8		10		
Stoom	18		20		Netto
Heat	98		70		
Aardgas grondstof	2		10		
<i>Aardgaswinning</i>					
Aardgas	33		10		Eigen verbruik aardgas
<i>Productie duurzaam</i>					
<i>Vuilverbranding</i>					
Elektriciteitsproductie		7		(10)	incl. fossiel deel
Warmte productie		9		(20)	incl. fossiel deel
<i>Overig duurzaam</i>					
Elektriciteit		6		(100)	excl. biomassa centrales
Warmte		8		(30)	excl. warmtepompen
Gas		3		(0)	
<i>Elektriciteitsproductie</i>					
Elektriciteit import	pm	pm	pm	pm	Netto import
<i>Netverliezen</i>					
Elektriciteit	18		30		
Warmte	5		10		

Met de energievraag kan het energieaanbod bepaald worden. In de energiestatistieken is het energieaanbod te vinden bij de energiebedrijven. Voor een goede invulling van het totale beeld is het van belang om ook rekening te houden met de herkomst van de diverse energiedragers. De vraag naar transportbrandstoffen leidt tot brandstofverbruik in de raffinaderijen, de vraag naar gas naar energieverbruik voor winning en transport. In Tabel A.7 zijn daarom een aantal aanvullende gegevens opgenomen. Voor een deel gaat het hierbij om de energievraag van de

energiebedrijven, voor een ander deel om een de productie van duurzame energie dat in een deel van de energievraag kan voorziet. Om een ruwe schatting van de CO<sub>2</sub>-uitstoot te kunnen maken voor 2050 zijn hiervoor ook een aantal gegevens in de tabel opgenomen. De productie van duurzame energie is hier een eerste aanzet. Bij de invulling van het energieaanbod, op een ander plaats in dit rapport zal hier een andere invulling van gekozen worden

### *Raffinaderijen.*

Door de aanwezigheid van de Rijn hebben de Nederlandse raffinaderijen zich altijd ook op het buitenland gericht. Een belangrijk deel van de productie, in 2000 netto 2292 PJ, wordt dan ook geëxporteerd. Het primaire energieverbruik van de raffinaderijen is ongeveer 6 tot 7% van de doorzet. Het verbruik is wel afhankelijk van de soort ruwe olie die verwerkt wordt, de productmix en de gewenste productkwaliteiten. Voor de energievoorziening wordt veel gebruik gemaakt van restgassen of zware olieresiduen (vergassing) die bij de productie vrijkomen. Daarnaast wordt tegenwoordig ook aardgas ingezet. Voor het verhitten van de diverse oliestromen wordt veel gebruik gemaakt van fornuizen. Om aan te geven dat er keuze mogelijkheden zijn ten aanzien van het energieaanbod in de raffinaderijen is de energievraag opgesplitst. Voor heat liggen de relevante procestemperaturen tussen de 400 en 550°C. Voor stoom wordt meestal middendruk stoom gebruikt (350-400°C). In de raffinaderijen wordt veel waterstof gebruikt, zowel voor ontzwaveling als bij het maken van motorbrandstoffen uit zwaardere oliestromen. Een deel van de waterstof komt in het proces vrij, een ander deel wordt hiervoor apart gemaakt uit aardgas (grondstofgebruik). Bij het 2050 beeld is verondersteld dat een deel van de voertuigbrandstof in 2050 uit aardgas of biomassa gehaald wordt.

### *Aardgaswinning*

In 2000 is er 2189 PJ aardgas gewonnen en netto 720 PJ aardgas uitgevoerd. Ongeveer 34 PJ aardgas wordt door de winningsbedrijven zelf gebruikt. Een bekende toepassing van dit aardgas is de opwekking van kracht voor de het aandrijven van aardgascompressoren. In 2050 zal de Nederlandse aardgaswinning fors zijn afgenomen. De behoefte aan (ondergrondse) gasopslag is dan wellicht sterk toegenomen.

### *Productie van duurzame energie*

Een mogelijkheid om in een deel van de energievraag te voorzien is gebruik te maken van duurzame energie. De bijdrage is procentueel gezien vrij beperkt, maar wel sterk groeiende. De cijfers die hier opgenomen zijn hebben betrekking op zon, wind, water en (biomassa)afval.

### *Elektriciteitsproductie*

In de elektriciteitsproductie werd in 2000 234 PJ kolen (en gas uit kolen), 33 PJ olieproducten, 342 PJ gas en 41 PJ stoom uit kernenergie ingezet. Hiermee werd 248 PJ elektriciteit en 92 PJ warmte gemaakt ten behoeve van andere sectoren. Een belangrijk deel van de warmte wordt gemaakt in zogenaamde joint ventures, waarin bedrijven en elektriciteitsbedrijven samen warmte kracht installaties (WKK) beheren. Het eigenverbruik van elektriciteitscentrales wordt meestal direct verrekend met het rendement, en is dan ook niet in Tabel A.7 opgenomen. Een relevant gegeven voor de energievoorziening is de import-export balans met het buitenland. In 2000 is er netto 66 PJ elektriciteit geïmporteerd, waarvan circa 5 PJ in het buitenland geproduceerd is met kleinschalige waterkracht en biomassa.

### *Netverliezen*

Bij de distributie van energiedragers vinden er netverliezen plaats. Bij de distributiebedrijven, waar deze netverliezen plaatsvinden, vindt ook nog wat elektriciteits- en warmteproductie plaats middels WKK (CBS, 2001).

## A.6 Eerste schatting primair verbruik en CO<sub>2</sub>-uitstoot

In Tabel A.8 is de energievraag vertaald in een binnenlands verbruik en een eerste schatting van de CO<sub>2</sub>-uitstoot. De huidige trend van meer duurzame energie en minder kolen is hierbij voortgezet. Het kleinere verschil tussen energievraag en binnenlandsverbruik in 2050 ten opzicht van 2000 heeft te maken met een efficiëntere opwekking. De afname van de gemiddelde CO<sub>2</sub> uitstoot per eenheid van binnenlandsverbruik komt door de vermindering van de kolen inzet en een toename van duurzame energie (het aandeel is hier in 2050 ingezet op circa 10%). De eerste, kolen, is goed voor ongeveer 10 Mton CO<sub>2</sub>, de tweede, duurzame energie voor 15 Mton CO<sub>2</sub>. Indien er als voorbeeld bovendien nog 30% biobrandstof in de transportsector gebruikt zou worden in 2050 dan komt de CO<sub>2</sub> uitstoot in 2050 circa 17 Mton lager uit.

Tabel A.8 *Schatting verbruik en CO<sub>2</sub>-uitstoot.*

		2000	2050	2050-ind
Totale energie vraag	[PJ <sub>e</sub> +PJ <sub>th</sub> +PJ <sub>feedstock</sub> ]	2336	3520	2875
Binnenlands verbruik	[PJ]	3051	4250	3550
CO <sub>2</sub> -uitstoot	[Mton]	177	217	185
Energievraag/binnenlandsverbruik	[PJ/PJ]	0,77	0,83	0,81
CO <sub>2</sub> -uitstoot/binnenlandsverbruik	[Mton/PJ]	0,058	0,051	0,052
Bunkering	[PJ]	668	1500	1450

Voor de volledigheid zijn ook de cijfers voor bunkering toegevoegd. Dit is de hoeveelheid brandstof die voertuigen als zeeschepen, vliegtuigen en binnenvaartschepen in Nederland tanken voor een internationale (grensoverschrijdende) reis. In de huidige CO<sub>2</sub>-berekenningsmethodiek wordt dit niet tot de Nederlandse CO<sub>2</sub>-emissies gerekend (Olivier, 2002).

## BIJLAGE B TECHNISCH REDUCTIE POTENTIEEL

Toine van Wunnik - Van Wunnik Energy Consultancy Plus

### B.1 Inleiding

Dit rapport omschrijft globaal de technische reductiemogelijkheden die in de diverse subsectoren van de Nederlandse energiemarkt (cf. CBS-indeling) voor de zichtperiode mogelijk en wenselijk zijn. Specifiek aandacht is gegeven aan de subsector ‘huishoudens’, omdat in deze subsector sprake is van de langste infra-keten, met relatief dure, fijnvermaasde distributiesystemen, van een duidelijke dynamiek in de energievraag en van ruime mogelijkheden tot verduurzaming van de energievoorziening.

Anders dan in het projectvoorstel omschreven zijn de aangrijpingspunten bij de bepaling van de reductiemogelijkheden geordend naar de prioriteitenvolgorde cf. de Trias Energetica. Dus eerst vraagbeperkende maatregelen, de overgebleven vraag zover mogelijk invullen met duurzame/hernieuwbare energie en in de dan nog resterende vraag voorzien door de efficiënte inzet van fossiele brandstoffen.

Wezenlijk hierbij is ook de keuze van het uitgangspunt ‘energievraag’. Een infrastructuur heeft, als onderdeel van de energievoorziening, slechts één bestaansrecht en dat is een bijdrage te leveren in een adequate voorziening van die vraag. Teveel verhalen wekken de indruk dat energie-aanbod en -distributie bepalende factoren zijn, maar gaan daarin voorbij aan het ‘verursacher-prinzip’; aanbod en distributie zijn slechts zaken van een tweede orde.

Evenzeer wezenlijk is dat bij die energievraag uitgegaan moet worden van de gevraagde energiefuncties. Het aanduiden van een vraag in brandstofhoeveelheden en niet in Joules vertroebeld sterk het inzicht in de ‘echte’ vraag, omdat de vraag inherent is gemaakt aan momenteel gebruikte brandstoffen en aan huidige conversietechnologieën. Verder wordt zo ook geen inzicht gegeven in de gewenste energiekwaliteit van die vraag. Zeker voor warmte is noodzakelijk om het temperatuurniveau van de vraag mee te beschouwen, mede om zodoende bij de invulling van die vraag een helder beeld te kunnen krijgen over de mogelijkheden van de diverse aanbod-opties, zoals er zijn duurzame energie-opties en warmtekracht.

### B.2 Industrie

De energievraag bij de industrie is de helft van de totale Nederlandse energievraag. De vraag naar energie (-dragere) voor niet-energetischgebruik/feedstock vormt een wezenlijk onderdeel van die industriële energievraag. Deze industriële vraag is vergaand bepaald door petro-chemie, chemie en metaalindustrie. Mede daardoor is deze vraag ook gekenmerkt door een lange ‘bedrijfstijd’ en een specifieke behoefte aan hoge temperatuur proceswarmte en/of stoom. De warmtekracht oftewel WK-verhouding van de vraag, exclusief feedstock, is momenteel circa 3; deze verhouding zal in de toekomst licht dalen. Gezien aard en karakter van de industrie vindt de energietoevoer vooral plaats via energie-infrastructuren die met grotere transportcapaciteiten op hogere drukken en spanningen werken.

#### B.2.1 Vraagbeperkende maatregelen

Vraagbeperkende maatregelen van een bijzondere aard zijn het op termijn laten verdwijnen van de industrie die zich bezig houdt met de productie van bulk-producten, zeker als daarbij sprake is van een energie-intensief productieproces en verder weinig toegevoegde waarde.

Normale vraagbeperkende maatregelen zijn voorhanden in:

- verbetering van de procesbesturing,
- procesintegratie,
- betere unit operations, zoals WW's, industriële HT-WP'en, branders en scheidingstechnieken/membranen.

### B.2.2 Duurzame energie

De inzet van duurzame/hernieuwbare energie in de industriële energievoorziening is, althans *procesgebonden*, maar beperkt mogelijk. De grootste mogelijkheden daarin liggen bij de inzet van biomassa als feedstock, op dit moment circa 20% van de totale nationale energievraag(?). Gezien omvang, bedrijfstijd, aantal spelers en aantal processen is dit een van de meest interessante mogelijkheden om hier de energievoorziening vergaand te verduurzamen. De lead-time van een dergelijke ontwikkeling zal echter lang zijn en de vraag is of zo'n ontwikkeling wel past binnen de 'postzegel' Nederland. Anderszins kent ons land grote multinationals en is het economische belang groot. Verder past een verwijzing naar de eerder gemaakte opmerking over het wel of niet handhaven van energie-intensieve bulk-productie in Nederland; zie ook scenario's.

Ook *niet-procesgebonden* kan bio-energie goed scoren. Lange bedrijfstijden in de industrie stroken met een lange en tot op zekere hoogte aanstuurbare beschikbaarheid van bio-energie. Verder kan de conversie van biomassa naar gewenste secundaire energievormen in warmtekracht-bedrijf plaats vinden; daarbij zijn de bedrijfstijden economisch plezierig, maar vooral de behoefte aan hoge temperatuur-warmte/stoom maakt het industriële gebruik van bio-energie exergetisch gezien onovertrefbaar. De links naar feedstock-inzet en zonnig de productie van syngas op basis van biomassa duiden ook in de richting van sterke voorkeur voor de inzet van biomassa bij de industrie. Ook hier echter de opmerking over bulk-productie.

Andere, grote DE-bronnen als wind en waterkracht zijn dus ook niet procesgebonden, maar staan alleen voor elektriciteit. Beide bronnen interfereren op een ongunstige manier met de inzet van warmtekracht, al of nog niet duurzaam; de inzet van wind heeft als extra nadeel het beperkte aantal uren dat het vermogen beschikbaar is.

De inzet van warmte-/koudeopslag heeft enige betekenis voor industrieën met een energievraag op een temperatuurniveau tussen -50 en +50 °C.

Industriegebonden zijn de mogelijkheden voor de inzet van omgevingswarmte en zon-thermisch en -PV beperkt.

### B.2.3 Efficiënt fossiel

Warmtekrachtkoppeling is de meest aangewezen manier om, althans voor energetische toepassing van fossiele energiedragers, te komen tot efficiënt fossiel. De randvoorwaarden die liggen opgesloten in bedrijfstijd, in WK-verhouding van vraag en conversietechnologie en in de eventueel benodigde mogelijkheden tot opslag van CO<sub>2</sub> zijn in geen van de andere sectoren beter. Over niet-energetische inzet van fossiel zijn onder 'vraagbeperkende maatregelen' al enkele opmerkingen gemaakt.

### B.2.4 Interacties met andere sectoren

De voornaamste interacties zijn te verwachten bij inzet biomassa/-energie en de verdere ontwikkeling van industrieel WK-vermogen.

Voor de biomassa moet duidelijkheid komen over bulk-industrie en over de inzet van beschikbare biomassa daarin; de toepassing van bio-energie in andere sectoren van de energievraagmarkt komt dan zwaar onder druk te staan, ook als dat afgeleide toepassingen betreft.

Een verdergaande introductie van WK betekent een sterke interferentie met de momenteel gangbare grootschalige elektriciteitsproductie én, gezien de WK-verhoudingen, een overproductie van elektriciteit. Dit laatste kan frustrerend werken op elektriciteitproducerende DE-opties en versterkt de roep om inzet van elektriciteit in de warmtevoorziening en/of energieopslag, warmte en/of elektriciteit, ook bijvoorbeeld in transport.

De afvalwarmte, géén restwarmte, van industrie is in specifiek gegeven situaties inzetbaar voor het voorzien in warmtevraag op lage temperatuurniveaus; zoals voor ruimteverwarming en/of warmtapwatervoorziening in woning- en utiliteitsbouw en in eventueel glastuinbouw.

### B.2.5 Interacties met infrastructuur

De bestaande energie-infrastructuur kunnen vergaand en wellicht volledig de hierboven geschetste beweging in de energievoorziening van de industrie aan. Wel heeft het zin om een en ander wat meer zeker te stellen, met daarbij aandacht voor elektriciteitsinfra nationaal (zeker bij nog substantiële groei van energievraag industrie) en voor grensoverschrijdend elektrisch transport (ook eventueel voor opslag). Ook voor de gasinfra, in wezen het hoofdtransportsysteem, is verificatie nodig van grensoverschrijdend verkeer (zeker bij nog substantiële groei).

Gezien de lead-times van WK, zeg 10 jaar, en van ontwikkeling en bouw van nieuwe plants, zeg 25 jaar, kan bij de industrie uitgegaan worden van een evolutie. De enig theoretisch mogelijke revolutie die kan optreden is de introductie van waterstof, maar om dezelfde reden als hiervoor genoemd lijkt ook dan een evolutie meer waarschijnlijk. Komt het tot een introductie van waterstof dan geschied dat naar alle waarschijnlijkheid in (grote) marktniches van industrietypen of -locaties met een eigen waterstofinfra; gebruikmaking van bestaande (gas-)infrastructuur ligt niet voor de hand. De feedstock-behoefte verdient dan daarbij bijzondere aandacht.

De hierboven aangeduide mogelijkheid van de inzet van afvalwarmte vraagt dan om lokale warmte-infrastructuur, werkend op lage temperatuurniveaus. Ook deze, mogelijke, ontwikkeling kan niet anders dan als een evolutie.

### B.2.6 Aanbeveling

Het lijkt zinnig een verkenning in hoofdlijnen uit te voeren naar de toekomst van de grote industrie in Nederland. Daarbij is aandacht te schenken aan:

- energievraag repercussies van procesvernieuwing,
- totaal inzet van warmtekracht,
- mogelijkheden voor duurzame energie, ook als feedstock,
- wisselwerking met andere sectoren hierbij,
- wisselwerking met energie-infra hierbij.

## B.3 Transport

Het binnenlands transport staat voor ongeveer 10% van de Nederlandse energievraag. Van de totale energievraag transport komt bijna tweederde voor rekening van het personen- en bestelauto wegverkeer. De totale vraag wordt momenteel voor vijfzesde fossiel ingevuld, de resterende eenzesde vooral elektrisch.

### B.3.1 Vraagbeperkende maatregelen

De technische mogelijkheden om de energievraag verder te reduceren zijn beperkt; de vermindering van lucht- en rolweerstand gaat richting zijn asymptoot, terugwinning remenergie en verbetering airconditioning biedt ook een beperkt verbeteringspotentieel. Tevens is duidelijk dat dit soort ontwikkelingen niet vanuit Nederland zijn aan te sturen.

### B.3.2 Duurzame energie

Het grootste deel van transport bestaat bij de gratie van energieopslag, benzine of diesel in een tank. Dit gegeven kan zeker ook bij een verdergaande introductie van duurzame energie van betekenis zijn. Dit omdat bij duurzame energie meer sprake is van niet-aanstuurbare bronnen zoals wind en zon en dus het opslagfenomeen dan zowel vraag- én aanbodzijdig van belang is.

De voor de hand liggende mogelijkheden om het transport te verduurzamen zijn groene elektriciteit en bio-energie. De praktische vormen waarin zijn onder meer de auto met verbrandingsmotor op bio-brandstof, de elektrische auto, de auto op waterstof, van welke duurzame bron dan ook, en eventueel mengvormen hiervan als hybride auto's.

Auto's die gebruik maken van conversietechnologie en dus van brandstoffen moeten zorgvuldig beoordeeld worden op hun overall cyclusrendement (met als extra minpunt dat de conversie per definitie níet in WK geschied), op de snelheid waarmee de introductie van duurzaam geschied en op hun inpasbaarheid in het totale, toekomstige energieconcept dat voor Nederland wenselijk is.

Op voorhand kan al gezegd worden dat op basis van algemene beschouwingen de elektrische auto op deze punten goed scoort. De behoefte aan mogelijkheden om meer elektriciteit in te zetten in de Nederlandse energievoorziening, gezien WK-verhouding van vraag en aanbod, en de mogelijkheid van aanstuurbare elektriciteitsopslag vormen essentieel onderdeel van deze beschouwingen.

Alhoewel de ontwikkelingen ook hier in het buitenland bepaald worden is het aannemelijk dat er afdoende keuzemogelijkheden zullen zijn om gericht beleid te voeren ten aanzien van de meest optimale inzet van duurzame energie in de transport sector.

### B.3.3 Efficiënt fossiel

Een verdergaande verbetering van de conversie-rendementen bij toepassing van fossiele brandstoffen is, zeker gezien de recente ontwikkelingen, zonder meer te verwachten. Of dit traject doorgezet wordt met de introductie van de brandstofcel is op voorhand geen uitgemaakte zaak; daarbij zijn zeker ook overwegingen te maken over de meest gewenste vorm van transport als het gaat om de verduurzaming van dat transport (zie boven).

### B.3.4 Interacties met andere sectoren

In het voorgaande is reeds aangeduid dat transport de potentie heeft om een 'wisselgeld'-functie te vervullen in het totaal van de energievoorziening. Het opslag-fenomeen, dat inherent is aan een groot deel van het transport, kan een grote rol spelen in het bereiken van het ideale concept voor onze toekomstige energievoorziening. Die rol is zeker van essentiële waarde als het gaat over elektrische auto's en dus over elektriciteitsopslag. De behoefte aan opslag komt voort uit de 'overproductie' van elektriciteit door WK en duurzaam, dit gezien de WK-verhoudingen van vraag en aanbod, en uit de behoefte om niet-aanstuurbaar vermogen (bv. wind en zon) zodanig in de tijd te verschuiven dat dit vermogen beter de energievraag kan bedienen.

### B.3.5 Interacties met infrastructuur

De huidige infrastructuur voor fossiele transportbrandstoffen kan een rol blijven vervullen als in de toekomst bio-brandstoffen en waterstof de te 'tanken' energiedragers zouden zijn. De overgang naar de distributie van andere energiedragers is dan zondermeer een evolutie.

Waterstof tanken in huis lijkt vooralsnog minder waarschijnlijk; de coïncidentie van én een waterstof-infra én een waterstof-auto is te klein. Deze weg is alleen te bewandelen na een introductie van de waterstof-auto via tankstations. Overigens zijn de benodigde vermogens en de aanstuurbaarheid zodanig dat dan geen bijzondere maatregelen in de waterstof-infra nodig zijn. Hier kan dus hooguit sprake zijn van een langzame en afhankelijke evolutie.

Gaat elektriciteit een rol spelen dan zijn ook daarvoor vermogens en aanstuurbaarheid, ook ten aanzien van de inzet van groene stroom, van dien aard dat geen bijzondere eisen aan de elektriciteitsinfra worden gesteld.

### B.3.6 Aanbeveling

De 'elastiek' die de opslag van energie in de transportsector biedt is nader te verkennen. Aandacht daarbij voor zaken als:

- Mogelijkheden voor opslag van elektriciteit uit warmtekracht en duurzame bronnen.
- Wisselwerking met infrastructuur bij grootschalige introductie van elektriciteit, bio-brandstoffen of waterstof.

## B.4 Huishoudens

De energievraag van de huishoudens is nu ongeveer een vijfde van de nationale energievraag; op termijn zal dit aandeel teruglopen naar een zesde. Daarbij stijgt het energieverbruik wel in absolute zin; dit ondanks een significante daling, ook in absolute zin, van de energievraag ten behoeve van ruimteverwarming.

Voor een sterke stijging van de elektriciteitsvraag zal er in resulteren dat de huidige WK-verhouding van de vraag, circa 5, zal dalen naar ongeveer 2. Alleen al de sterke stijging van de elektriciteitsvraag, zoals die in de scenario's is voorzien, heeft repercussies voor de lokale elektriciteits-infra.

De mogelijke introductie van elektrische warmtepompen en van elektrische auto's kan de elektriciteitsvraag nog verder omhoog stuwen; de repercussies hiervan zijn nader te beoordelen, ook in relatie met de aanstuurbaarheid van die extra vraag.

De perifere infrastructuur naar woningen zijn zonder twijfel de netten die het meest te maken krijgen met veranderingen in de vraag, een verdergaande verduurzaming van de energievoorziening én met geheel nieuwe infrastructuur. Daarom is grote aandacht nodig voor de flexibiliteit van die infrastructuur en dringen zich gedachten op aan bijvoorbeeld leidingkokers.

### B.4.1 Vraagbeperkende maatregelen

Onderkend dat voorkomen beter dan genezen is ligt het zeer voor de hand dat verdergaande vraagbeperkende maatregelen genomen worden en wel met name op het gebied van ruimteverwarming. Nog betere isolatie, nog meer aandacht voor oriëntatie en zon-passief en gebalanceerde ventilatie met warmteterugwinning (WTW) kunnen en moeten er voor zorgen dat de energievraag voor ruimteverwarming zeer substantieel omlaag gaat. Daar het gaat om vrijwel volledig gebouwgeïntegreerde maatregelen zijn de geëigende momenten om hier wat aan te doen *nieuwbouw* en *renovatie/vernieuwbouw*. De lange levensduur van de gebouwen, de woningen,

maakt noodzakelijk dat deze zaken zijn te beschouwen in een lange termijn visie op de woningbouw en de energievoorziening daarvan.

Een belangrijke bijkomende zaak hierbij is dat onder meer door de verbetering van de thermische kwaliteit van de woning tevens de vermogens van de verwarmingsinstallaties aanzienlijk verkleind kunnen worden. Conform ISSO-51 zijn vermogens van 3 á 5 kWth voor een huidige nieuwbouwwoning afdoende; dat is een factor 3,5 lager dan volgens de tot voor kort gangbare berekeningsmethode. Dit feit heeft vergaande repercussies voor onder meer de grootte van apparaten en systemen en voor de capaciteit van de eventueel benodigde infrastructuur die dit vermogen moet aanvoeren.

Alhoewel in strikte zin geen vraagbeperkende maatregel heeft het zeker zin om op de momenten van nieuwbouw en renovatie ook aandacht te schenken aan de introductie van lage-temperatuurverwarming (LTV). Ook dit is een gebouwgeïntegreerde maatregel die noodzakelijk is als randvoorwaarde voor een verdergaande verbetering van de energievoorziening en het comfort van de woningen en specifiek voor de introductie van voor de hand liggende vormen van duurzame energie; daarover later meer.

Gesteld dat er per jaar 100.000 woningen nieuw gebouwd of gerenoveerd worden, dan is duidelijk dat vrijwel de volledige woningvoorraad in de komende vijftig jaar aan de beurt komt. Dit maakt tevens helder dat hier niet anders dan sprake is van evolutie. Echter deze evolutie is pas dan mogelijk als er ten aanzien van beleid/regelgeving/afspraken zich snel een revolutie voltrekt die deze zaken adequaat aanstuurt.

#### B.4.2 Duurzame energie

De energievraag van huishoudens/woningen bestaat voor het over grote deel uit een vraag naar energie voor ruimteverwarming en warmtapwaterbereiding. Deze vraag heeft dus betrekking op een behoefte aan lage temperatuur warmte; uiteindelijk behoeft de ruimte maar op 20 °C te worden gehouden en is 60 °C voor warmtapwater voldoende.

#### B.4.3 Warmtepompen

Gezien dit lage temperatuurniveau is duidelijk dat in deze vraag goed is te voorzien middels de inzet van warmtepompen met omgevingswarmte en/of zon-thermisch als bron, al of niet in combinatie met warmte-/koude-opslag. Voorwaarde is dan wel dat het ruimteverwarmingssysteem op lage temperatuur bedreven wordt (zie ook onder 'Vraagbeperkende maatregelen'); er zijn overigens meer argumenten die pleiten voor lage temperatuurverwarming.

Toepassing van elektrisch gedreven warmtepompen is mede aantrekkelijk omdat zo de mogelijkheid ontstaat om op een exergetisch verantwoorde manier elektriciteit in te zetten voor verwarmingsdoeleinden. Bij de überhaupt gewenste opslag van warmte kan zo deze warmteopslag ook een rol gaan spelen in de opslag van 'electriciteit'. Het aan- en uitschakelbare vermogen van de warmtepomp kan zo grote betekenis krijgen voor de inzet van niet-aanstuurbaar vermogen uit bv. wind en voor het 'overschot' van elektriciteit uit WK-vermogen, fossiel of bio, dit gezien de onbalans in WK-verhouding tussen vraag en aanbod. De elektrische warmtepomp heeft in zich dat zij snel een groot deel van de energievraag van woningen, namelijk de warmtevraag voor ruimteverwarming en warmtapwater, kan verduurzamen. Gezien de hoge COP, nu 4 á 5 en in de toekomst 6 á 7, is het aandeel duurzame warmte al zondermeer groot; wordt gebruikt gemaakt van groene stroom voor de aandrijving dan is sprake van een volledige duurzaamheid.

De gasabsorptie-warmtepomp heeft een veel lagere COP; daardoor is het duurzaamheidsgehalte beperkt, zeker zolang de pomp gestookt wordt met niet-duurzaam gas. Het is zeer de vraag of

dit type warmtepomp een redelijke rol kan spelen in de vervanging van de CV-ketel; de ogen-schijnlijke aantrekkelijkheid van opvolger CV-ketel, kleine warmtebron en hoge temperatuur-levering frustrereert naar alle waarschijnlijkheid eerder een adequate ontwikkeling naar een duur-zame energiesituatie. Het exergie-rendement is in ieder geval van dien aard dat dit type pomp niet als een 'blijvertje' gezien kan worden. Of het een relevante stap is in de overgang naar wa-terstof of biogas met brandstofcellen als conversietechnologie, zo die overgang al überhaupt gewenst is, is een nog open vraag.

Een 'aardige' bijkomstigheid is dat warmtepompen ook zorg kunnen dragen voor koeling; ook dit op een verantwoorde manier. De warmtepompsystemen, met bron, warmtepomp en afgifte-systeem, kunnen in een grote diversiteit van uitvoeringsvormen voorkomen. Als bronnen valt te denken aan onder meer:

- bodenwarmtewisselaars en aquifers, beiden met warmteopslagmogelijkheid,
- buitenlucht en/of afgaande ventilatielucht, met mogelijkheid de temperatuur van die lucht te verhogen middels zonne-energie (bv. m.b.v. serre, atrium of Trombe-dak),
- andere zon-thermische voorzieningen, zoals bv. zonneboiler, energiedak of asfalt,
- grond- of oppervlaktewater,
- rioolwater,
- industrieel afvalwater.

Warmtepompen zijn te onderscheiden naar aandrijfenergie, EWP of GWP, die verder kunnen voorkomen als:

- individuele WP, per woning, voor ruimteverwarming en/of tapwater,
- collectieve WP, ook voor ruimteverwarming en/of tapwater.

Mogelijke afgiftesystemen zijn:

- vloer- en/of wandverwarming (LTV), tevens tot op zekere hoogte als opslag te gebruiken,
- luchtverwarming (LTV), met relaties naar gebalanceerde ventilatie en luchtkwaliteit,
- convectoren, eventueel met geforceerde afgifte (ventilator),
- radiatoren.

Een uitermate gewenst of zelfs noodzakelijk onderdeel van het systeem is een warmteopslag. Vormen daarin zijn:

- bodem en aquifer (zie boven), geschikt voor lange termijn opslag,
- opslag in grotere volumina water of in zouten, middellange termijn opslag met brede range,
- boilers, met water en ter zijner tijd zout als opslagmedium, voor korte termijn; zeer geschikt voor piekverbruiken in tapwater,
- opslag in bouwmassa (zie boven).

Voor meer dichte bebouwingen zijn uitvoeringsvormen voor de hand liggend die zich deels al in de utiliteitsbouw bewezen hebben. Om de gedachte te bepalen: een collectief systeem dat de ruimteverwarming direct verzorgt, met voor de tapwatervoorziening een individuele WP-boiler met als bron het ruimteverwarmingssysteem of een ook collectief warmtapwatersysteem. De bron en ook het opslagsysteem kan dan de bodem of een aquifer zijn.

Gezien de koppeling met nieuwbouw en renovatie kan hierbij niet anders dan sprake zijn van evolutie.

#### B.4.4 Zon-thermische systemen

Een aantal zon-thermische opties zijn al aangeduid in het voorgaande verhaal over warmtepompen. Het momenteel meest gangbare zon-thermische systeem, de zonneboiler, heeft als voordeel dat het nauwelijks gebouwgeïntegreerd is te noemen; dit heeft dus als voordeel dat de implementatie op vrijwel ieder gewenst moment kan plaatsvinden. Helaas heeft de zonneboiler zich in

al zijn bestaansjaren nog niet echt kunnen bewijzen. Oorzaken zijn te vermoeden bij kostprijs en matig systeemconcept. Bij dit laatste is verbetering op gang gekomen door bv. de combinatie met CV-ketel. Echter de combinatie van veel goedkopere zon-thermische systemen met warmtepompen houdt veel meer belofte in. Zon-passieve en zon-actieve systemen, al of niet in combinatie, zoals afgaande ventilatielucht, koeling, serres, atria en Trombe-wanden of -daken, bieden voor zowel nieuwbouw als bestaande bebouwing veel mogelijkheden; zie ook hiervoor bij 'warmtepompen'.

#### B.4.5 Bio-energie

De directe inzet van bio-energie voor de warmtevoorziening bij woningen is, afgezien van een marginale en tot op zekere hoogte discutabele inzet van houtkachels, vooral mogelijk via een WK-conversie met transport van warmte naar de woningen. Gezien de beperkte mogelijkheden om verantwoord warmte over enige afstand te transporteren, de dalende warmtebehoefte van woningen, de emissie-eisen en de vragen over beschikbaarheid van biomassa is dit een mogelijkheid die beperkt zal blijven tot nichesituaties.

Een indirecte inzet via biogas, waterstof of bio-olie ten behoeve van de warmtevoorziening van woningen is op korte termijn niet reëel te verwachten. De terechte eis om deze inzet alleen mogelijk te maken als de gehanteerde conversietechnologieën redelijke exergie-rendementen hebben blokkeert wellicht deze vorm.

De eventuele inzet van de elektriciteit uit biomassa zal steeds via de reguliere elektriciteitsinfra plaatsvinden.

#### B.4.6 Zon-PV

De zon-PV optie is ook een optie die niet of nauwelijks gebouwgeïntegreerd is. Als zodanig is ook hier het moment van implementatie nagenoeg vrij te kiezen. Het lijkt daarom ook voor de hand te liggen de implementatie pas dan plaats te laten vinden als duidelijk is dat dit verantwoord is. De technologie-ontwikkelingen op PV-gebied ten aanzien van rendementen, kosten, combinatiemogelijkheden met zon-thermisch en de mogelijkheden als dak- of wandpanelen houden wel beloften in. Maar of die voldoende zijn voor een grootschalige introductie in de woningbouw is nog niet te zeggen.

Het lage aantal 'vollasturen' van zon-PV zal, zeker bij grootschalige toepassing ervan, problemen gaan opleveren bij teruglevering aan het openbare net; wie wil die kWh'en hebben en wat heeft die partij er voor over?

#### B.4.7 Wind

De inzet van de DE-optie wind zal gebruik maken van de reguliere elektriciteitsinfra. Deze inzet is niet gebouwgebonden of -geïntegreerd. Dit is zeker het geval als de kleinere windturbines, die kort bij of in de gebouwde omgeving een plaats moeten krijgen, naar verwachting geen hoge vlucht zullen nemen.

Andere DE-opties als eigen waterkracht en aardwarmte zullen naar verwachting maar een marginale rol spelen in de energievoorziening van de huishoudens.

#### B.4.8 Efficiënt fossiel

De verbetering van de efficiency van de inzet van fossiele energiedragers bij de energievoorziening van de huishoudens moet vooral aandacht hebben voor de exergie-rendementen van de conversies die in die voorziening gebruikt worden. Gezien de maar lage temperatuur warmtebe-

hoefte zijn conversies naar alleen warmte in dit opzicht op voorhand discutabel. WK-conversietechnologie is zondermeer te prefereren, maar de schaalgrootte waarop deze ingezet moet worden is niet op voorhand duidelijk. Wezenlijke verbeteringen van de economie van warmtetransport zijn mogelijk als overgegaan wordt naar lage temperatuur verwarmingssystemen. WK op woningniveau is pas mogelijk bij een verantwoord economisch plaatje. Nodig is vooral duidelijkheid over de waarde van elektriciteit die aan het net geleverd wordt, zeker als deze vorm substantieel wordt.

De dalende warmtevraag en een toenemende inzet van duurzame energieopties zal op termijn grote druk gaan leggen op de economie van de warmtevoorziening van woningen. Het zoeken naar compensatie daarvoor middels WK en elektriciteitsproductie is des te meer discutabel omdat op lange termijn een 'overproductie' van elektriciteit is te verwachten. Overigens lijkt een intermediaire ontwikkeling van WK en EWP een redelijke weg.

#### B.4.9 Interacties met andere sectoren

Voor de warmtevoorziening bij de huishoudens kan bij toepassing van EWP'en en opslag een essentiële rol gaan vervullen bij de verdere introductie van WK, fossiel en/of bio, en van groot-schalige windenergie. Het feit dat sprake is van aan- en afschakelbaar vermogen en dat elektriciteit zo exergetisch verantwoord is in te zetten in de warmtevoorziening, met ook een opslagfaciliteit, is van groot belang.

Het op grote schaal terugleveren van elektriciteit uit PV op en/of uit WK in woningen is een nog weinig heldere zaak; wellicht kan ook hier de elektrische auto enig soelaas bieden. Een nichere-latie is mogelijk met de industrie, daar waar sprake komt van de benutting van afvalwarmte uit de industrie.

#### B.4.10 Interacties met infrastructuur

Voor de hand liggend en ook nastrevenswaardig is dat met name de warmtevoorziening van woningen in de toekomst anders zal geschieden dan nu. Momenteel is het nagenoeg volledig gas/CV en een beetje stadsverwarming. Echter de veranderende energievraag, minder warmte, meer elektriciteit (en dus een andere WK-verhouding in de vraag) en de behoefte aan conversietechnologie met meer verantwoorde exergie-rendementen (en dus ook een andere WK-verhouding in het aanbod) laten verwachten dat een diversiteit van voorzieningsvormen een rol gaan spelen. Ter indicatie enkele voorbeelden:

- aardgas en elektriciteit, met conversietechnologieën als CV, GWP en WK,
- stadsverwarming en elektriciteit, met dus hoge temperatuur warmteverdeling en warmte uit WK,
- EWP en elektriciteit, met collectieve WP'en en bron- en opslagsystemen,
- EWP en elektriciteit, met individuele WP'en en bron- en opslagsysteem,
- lage temperatuur afvalwarmte, eventueel ondersteund door WP'en, en elektriciteit.

Door de vele combinaties die mogelijk zijn zullen in de praktijk wellicht meer dan tien verschillende manieren van energievoorziening gaan voorkomen. Een bijkomend aspect van groot belang is hierbij ook het wel of niet openbaar zijn van alle soorten perifere netten.

Deze gang van zaken heeft vanzelfsprekend interactie met vooral de perifere gasdistributienetten. Mocht een overgang naar waterstof gewenst zijn dan is duidelijk dat die perifere gasnetten niet zondermeer of helemaal niet bruikbaar zijn. Deze overgang naar waterstof wordt verder bemoeilijkt door de aanvoer van die waterstof. Het gehele aardgasnet voorzien van een relatief klein percentage waterstof werkt maar te dele en legt meteen een asymptoot voor de inzet van waterstof. Een klein distributienet volledig op waterstof kan niet vanuit een bestaand hoofdnet gevuld worden, specifieke nichesituaties daargelaten. De manier waarop een daadwerkelijke,

grootschalige introductie van waterstof zou moeten plaatsvinden is mij in ieder geval nog niet duidelijk.

De elektriciteitsinfra zal met aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid al zonder meer verbeterd/verzwaard moeten worden. Dit gezien de leeftijd van veel van de perifere netten en de sterke stijging van de elektriciteitsvraag in woningen. Op voorhand is niet te verwachten dat verzwaren van het elektriciteitsnet nodig is bij een grootschalige introductie van EWP'en. De collectieve WP'en zijn niet op de laagspanningsnetten aangesloten. De individuele WP'en hebben een vermogen van 1 kW<sub>e</sub> of minder en leveren, als aan- en afschakelbaar vermogen, naar verwachting geen problemen op in de laagspanningsnetten; zeker als verdere ondersteuning komt op de aansturing van de andere grotere vermogens in huis middels bijv. domotica. Op basis van dezelfde overwegingen is niet te verwachten dat er op hogere spanningsniveaus wel problemen ontstaan.

Van cruciale betekenis kan in dit verband ook zijn de introductie van 'leidingkokers'. De open schutpijp is binnenstedelijk al redelijk in zwang, echter deze schutpijpen liggen er veelal voor maar één infra of zelfs toekomstige infra. De beperkte kosten van een collectieve koker, zeg EURO 500,00 per woning bij normale bebouwingsdichtheden, maakt deze mogelijkheid aantrekkelijk. Het wachten is alleen op actie bij de lagere overheden. Hun verantwoordelijkheid voor infrastructuur, direct als het gaat om wegen en riolering en indirect als het gaat om energie-infrastructuur, maakt dat zij bij uitstek de partij zijn om in deze actie te ondernemen.

#### B.4.11 Aanbeveling

De voornaamste aanbevelingen voor de sector huishoudens zijn:

- Zorg voor 'vergroening' van de bouwregelgeving en stel daarbij met name eisen aan casco,gebalanceerde ventilatie en lage temperatuur-verwarming en formuleer een 'levende groene paragraaf' om de noodzakelijke verduurzaming te bereiken,
- Verken de diverse 'nieuwe' infrastructuur die mogelijk zijn en analyseer ze ten aanzien van hun waarden voor onze toekomstige energievoorziening; hierbij in het bijzonder aandacht voor elektrische warmtepompen en warmte-/koude-opslag, vooral ook als mogelijke 'opslag' van elektriciteit in de vorm van aan- en afschakelbaar vermogen,
- Verken de mogelijkheden om de personenauto thuis te 'tanken', elektrisch of waterstof, en beoordeel de impact op het totaal van de energievoorziening,
- Verken indringend de mogelijkheden van nieuwe zon-thermische concepten, voor zowel nieuwbouw als bestaande bebouwing; mogelijke combinatie met zon-PV is daarbij speciaal aandachtspunt,
- Analyseer de mogelijkheden voor flexibele infrastructuur, met daarbij bijzondere aandacht voor leidingkokers; ga daarbij tevens na welk proces nodig is om die flexibele infrastructuur te implementeren,
- Verken de impact van grensverschuivingen tussen openbare en niet-openbare netten,
- Zorg voor een gelijke behandeling van alle energievoorzieningssystemen als het gaat om wettelijke zaken zoals bijvoorbeeld toezicht.

#### B.5 Overige verbruikers/utiliteit

De overige energieverbruikers zijn te vinden in vooral de gebouwde omgeving, minus natuurlijk de woningen. De energie hier is ongeveer eenachtste van de totale Nederlandse vraag en daarmee ruim half zo groot als de vraag van de huishoudens. De vraag heeft wel een duidelijk lagere WK-verhouding dan die in de woningbouw.

Kenmerkend is verder dat de energievraag grotendeels gedurende de werkdagen/-uren optreedt. Mede door dit verschil in bedrijfstijden en door een identieke behoefte aan ruimteverwarming zijn utiliteit- en woningbouw goed te combineren.

### B.5.1 Vraagbeperkende maatregelen

Qua warmtevraag gaat het hier net als bij de huishoudens veelal gaat om ‘bouwwerken’ met een behoefte aan ruimteverwarming en, zij het minder relevant, aan warmtapwater. Maar anders dan bij woningen bestaat er nu ook al een koelvraag, zij het nog beperkt van omvang. Verdere vraagbeperkende maatregelen zijn te vinden in de sfeer van nog betere schilisolatie, minder oververhitting door zonne-instraling en minder interne warmtelast.

### B.5.2 Duurzame energie

De energievraag bestaat voor ongeveer tweederde uit een vraag voor ruimteverwarming en -koeling; beiden zijn gezien hun temperatuurniveau uitstekend te verduurzamen. De introductie van duurzame energie is reeds in gang gezet met de toepassing van warmte/koude-opslag en warmtepompen, die ook de koelfunctie voor hun rekening nemen. Lage temperatuur verwarmingssystemen zijn al gangbaar in onder andere de vorm van luchtverwarming en -koeling; dit faciliteert op een goede manier deze inzet van omgevingswarmte/warmtepompen en aquifers. Mogelijkheden voor toepassing van Trombe-wanden als bron in warmtepompsystemen, tevens te benutten als ‘zonwering’, verdient aandacht, vooral ook bij bestaande gebouwen. Deze zonthermische optie laat zich in de ietwat verdere toekomst goed combineren met zon-PV. Andere gebouwgebonden DE-opties, althans van enige importantie, zijn voor de warmte-/koudevoorziening voorlopig niet voor de hand liggend.

### B.5.3 Efficiënt fossiel

Vergelijkbaar met de woningbouw is het mogelijk de conversie van fossiele brandstoffen wezenlijk te verbeteren door toepassing van warmtekracht. Maar ook hier bestaan de vragen ten aanzien van de economie van een en ander.

Ook hier legt een verdergaande introductie van duurzame energie een toenemende druk op de infra specifiek bedoeld voor alleen de warmtevoorziening; op voorhand is niet zeker dat de ‘vlucht vooruit’ richting ook elektriciteitsproductie een relevante mogelijkheid is.

### B.5.4 Interacties met andere sectoren

Ook hier kan de grootschalige toepassing van de EWP en opslag een rol vervullen bij de verdere introductie van WK, fossiel en/of bio, en van wind. Daar het gaat om een vergelijkbaar type warmtevoorziening en mede door het verschil in de bedrijfsuren is een combinatie met de sector huishoudens voor de hand liggend. Verder ook hier de mogelijkheid van een nicherelatie met de industrie; hier zeker van interesse als het gaat om bedrijventerreinen.

### B.5.5 Interacties met infrastructuur

De interacties zijn te verwachten bij de gasinfra, wegens een lagere warmtevraag en inzet van ander aanbod, en bij de elektriciteitsinfra, door de toenemende elektriciteitsvraag. Daar grotere complexen vaker op hogere spannings- en hogere druknetten zijn aangesloten zijn evenwel nog minder problemen te verwachten dan bij de woningbouw. Een aparte vermelding verdienen de IT-bedrijven die grote elektrische aansluitingen hebben; zeker bij concentratie van dit type bedrijven levert dit een duidelijke interactie op met de elektriciteitsinfra.

### B.5.6 Aanbeveling

Gezien de parallel die deze sector heeft met de sector ‘huishoudens’ zijn de meeste aanbevelingen van die sector hier over te nemen.

## B.6 Land- en tuinbouw

De sector land- en tuinbouw staat voor bijna 10 % van de nationale energievraag; de glastuinbouw is binnen de sector verreweg de grootste energieconsument. De energievraag van de glastuinbouw komt vooral voort uit de behoefte aan 'ruimteverwarming' waarbij ook de CO<sub>2</sub>-bemesting een rol speelt. Het elektriciteitsverbruik is beperkt, dit ondanks de voorkomende assimilatie-verlichting; de WK-verhouding van de vraag is groter dan 10. De overige energievraag in deze sector zit onder meer bij veeteelt (melk- en slachtvee) en champignon-, witlof- en bloembollenteelt.

### B.6.1 Vraagbeperkende maatregelen

De behoefte aan licht, zonlicht, in de glastuinbouw is van dien aard dat de kassen veelal met enkelglas zijn uitgevoerd. Duidelijk zal zijn dat hierdoor de warmtevraag, zeer seizoengebonden, niet anders dan zeer hoog kan zijn. Maatregelen om hierin verbetering aan te brengen zijn onder meer de toepassing van dekschermen, gebeurd al op beperkte schaal, en van dubbelglas/kunststof, een wenkend perspectief. Het effect op de 'stralingswarmte', zoals die in zeer koude periode nu nodig is, is nog niet geheel helder.

De vochthuishouding in een kas is letterlijk van levensbelang, althans voor de tomaat of bloem. De momenteel gangbare methode om het vocht uit de kas te verwijderen is het openzetten van de ramen; echter met het vocht verdwijnt ook én warmte én CO<sub>2</sub>. Een meer intelligente manier van drogen kan resulteren in minder vraag voor verwarming en CO<sub>2</sub>-bemesting en in een verbetering van de waterhuishouding. De mogelijkheden hierin zijn al verkend in kasconcepten als 'de kas van de toekomst' en 'de gesloten kas'.

Het is voorstelbaar dat er vraagbeperkende maatregelen genomen worden die de warmtevraag en de vraag naar CO<sub>2</sub> meer dan halveren.

### B.6.2 Duurzame energie

De kassen zijn de grootste zonnecollector van Nederland. De 's zomers ingevangen zonnewarmte is circa tweemaal de hoeveelheid warmte die 's winters nodig is voor verwarming. De ongelijktijdigheid van vraag en aanbod kan ondervangen worden door het opslaan van warmte in bijvoorbeeld aquifers, al of niet ondersteund door warmtepompen. Ook de mogelijkheden hierin zijn al verkend in de eerder genoemde concepten; een nieuw, ander concept 'de kas als energiebron' gaat zover dat de kas dan ook met name warmte gaat leveren aan omliggende woningen en gebouwen. Qua warmte is de kas dan meer dan energie-neutraal.

Andere DE-opties die in de warmtevoorziening van kassen een rol zouden kunnen spelen zijn bio-energie en in nichelocaties wellicht aardwarmte. Hierbij is wel duidelijk dat de eigen 'productie' van biomassa slechts een beperkte rol kan spelen en is het de vraag of de externe beschikbaarheid van biomassa, -olie of -gas in substantiële hoeveelheden zeker valt te stellen. Of deze opties in het licht van het voorgaande alleen intermediaire oplossingen zullen zijn is nog onduidelijk.

Voor de elektriciteitsvoorziening ligt vooral de optie wind voor de hand; deze zal niet of nauwelijks bedrijfsgebonden zijn. De optie zon-PV is vooralsnog minder waarschijnlijk, dit om redenen van onder meer kosten, lichtdoorlatendheid en technische volwassenheid; overigens is deze optie later gemakkelijk aan te brengen.

### B.6.3 Efficiënt fossiel

De oplossing voor het verbeteren van de efficiency van de fossiele inzet is warmtekracht. Echter de WK-verhoudingen van vraag en conversietechnologie liggen ver uit elkaar en maken het noodzakelijk om buiten het bedrijf en, op termijn, buiten de sector de energiebalans te vinden. Binnen de sector biedt de combinatie van WK, ook eventueel bio, en EWP ruimte; echter een nadere verkenning van deze ruimte is nodig. De inzet van industriële afvalwarmte en 'afval'-CO<sub>2</sub> zijn niche-mogelijkheden van redelijke importantie.

### B.6.4 Interacties met andere sectoren

Interacties zijn mogelijk met de sectoren huishoudens, overige verbruikers/utiliteit en industrie als het gaat om warmte (en koude). Een rol spelen dan natuurlijk de ligging van de diverse locaties ten opzichte van elkaar, omdat warmte niet over grotere afstanden is te transporteren; nog meer beleid in deze is mogelijk.

Gezien de grote WK-verhouding van de vraag nu (en later?) bestaat bij grootschalige introductie van WK een ruime mogelijkheid van E-export uit de sector naar andere sectoren; de tijdstippen van productie, 's winters en 's nachts, stemmen echter minder vrolijk. Een eventuele grootschalige introductie van PV maakt deze mogelijkheid nog groter; of de tijdstippen, 's zomers en overdag, hierbij beter zijn is de vraag.

Vooraf een nog verdergaande introductie van assimilatie-verlichting en van EWP'en bieden ruimte om E-overschotten, uit andere sectoren en uit niet-aanstuurbare bronnen, op redelijke momenten en af-/inschakelbaar te benutten.

### B.6.5 Interacties met infrastructuur

Grote interacties komen bij de infrastructuur voor de warmtevoorziening. De wisselwerking tussen lage temperatuur warmte, WK-verhouding vraag en aanbod, clustermogelijkheden in de sector zelf en met andere sectoren, opslagmogelijkheden en dergelijke is nog nadere aandacht waard. Vrijwel zeker is in ieder geval dat de warmtevraag sterk daalt en dat de overblijvende vraag goed, lokaal, duurzaam is in te vullen.

Het dalende gasverbruik veroorzaakt geen technische problemen bij de bestaand gasinfra, hooguit economische; ideeën over een overgang naar waterstof zijn in dit licht kritisch te bezien. E-infra's moeten anticiperen op de ontwikkeling van meer assimilatie-verlichting, op de eventuele inzet van EWP'en en op een mogelijke, maar niet zondermeer waarschijnlijke, export van elektriciteit uit WK. Het is overigens niet te verwachten dat er grote ingrepen in de E-infra's nodig zijn.

De eigendomsverhoudingen van de lokale netten veranderen waarschijnlijk ingrijpend; de ontwikkeling van de E-handel binnen sector neemt een hoge vlucht.

### B.6.6 Aanbeveling

Om de sector voor Nederland te behouden is een vergaande en snelle verduurzaming van de energievoorziening nodig. Dus met zekere urgentie zijn volgende aanbevelingen te doen:

- Analyseer indringend de mogelijkheden voor vraagbeperking, met daarbij in het bijzonder aandacht voor dubbel 'glas' en voor andere methoden voor koeling, ontvochtiging en CO<sub>2</sub>-bemesting,
- Ondersteun de ontwikkeling van de 'kas als energiebron' en zorg voor een correcte procesgang bij die ontwikkeling; daarbij bijzondere aandacht voor warmtepompen en warmte-/koude-opslag,

- Analyseer de mogelijkheden voor energiehandel en eigen energievoorziening en zorg voor een adequate inbedding van die ontwikkelingen; met aandacht voor grens openbaar/niet-openbaar.

## B.7 Centrale aanbodopties en grensoverschrijdend energietransport

Naast aandacht voor de vraagsectoren zijn hier nog enkele, algemene opmerkingen te maken over de centrale aanbodopties van duurzame en fossiele energie en over grensoverschrijdend energietransport.

### B.7.1 Centraal aanbod fossiel

Binnen de zichtperiode treden er beduidende veranderingen op in de beschikbaarheid en dus ook in de export van eigen aardgas. De repercussies daarvan op én de afhankelijkheid én op de betalingsbalans zullen groot zijn.

Een duidelijke beleidsvisie in deze is noodzakelijk om de Nederlandse energiesituatie gericht én tijdig aan te passen; zeker daar waar nu én tijd én geld nog voorhanden zijn. Ten aanzien van kolen moet die beleidsvisie ook het traject aangeven voor kolencentrales én voor het bijstoken van biomassa in die centrales; lead-time en levensduur zijn substantiële onderdelen van de zichtperiode.

### B.7.2 Centraal aanbod duurzaam

Centraal aanbod van bio-energie is, gezien de opmerkingen die al bij de vraagsectoren en centraal aanbod fossiel zijn gemaakt, kritisch te beschouwen. De toepassing van bio-energie is bij uitstek geschikt binnen de sector industrie. Dit met name gezien 'vollasturen' van vraag en aanbod, gezien de mogelijkheden van warmtekracht-bedrijf met uitnutting van de beschikbaar komende hoge temperatuur warmte en gezien de potentie als feedstock. Gezien de mogelijke grootten van dergelijke installaties kan voor het elektriciteitsdeel gesproken worden van een verkapt centraal aanbod.

Het bijstoken in kolencentrales is, vanzelfsprekend, afhankelijk van de beschikbaarheid van dat type centrales. Over de zichtperiode is het beeld hierover niet duidelijk. Ten aanzien van beschikbaarheid, kosten, milieu-implicaties en afhankelijkheidsaspecten van bio-energie zouden wat meer relativerende geluiden niet misstaan.

Centraal aanbod van wind valt op termijn vooral uit de Noordzee te verwachten; dit in de veronderstelling en overtuiging dat die wind een concurrerende optie zal zijn. De repercussies voor de elektriciteitsinfra op nationaal en internationaal vlak zijn vanzelfsprekend aanzienlijk. Groot pluspunt van zo'n ontwikkeling is echter ook de versterking en betere positionering van het nationale hoogspanningsnet. Dit omdat die ontwikkeling de links legt naar het noorden en westen, daar waar nu alleen links zijn naar oost en zuid.

### B.7.3 Grensoverschrijdend energietransport

De import en export van energie is reeds lang een wezenlijk deel van de Nederlandse energiesituatie. Voor de zichtperiode zijn in ieder geval ontwikkelingen te verwachten aangaande het eigen aardgas. Ook een herijking van de oliepositie in die periode is zeker voorstelbaar en wellicht ook noodzakelijk. Beide zaken hebben, indien ze zich voordoen, grote gevolgen voor de nationale energiebalans en daarmee ook voor de nationale betalingsbalans.

Een vergaande verduurzaming van de lage temperatuur warmtevoorziening in de gebouwde omgeving en glastuinbouw is goed mogelijk met eigen, nationale DE-aanbodopties. Bij de transportsector is ook de mogelijkheid van een verduurzaming met behulp van eigen DE-opties, namelijk als er een keuze wordt gemaakt voor elektrisch transport. Met ook eigen groene stroom in gebouwde omgeving en glastuinbouw is zo in bijna de helft van de nationale energievraag met eigen duurzame middelen te voorzien. Deze sectoren hebben dan nauwelijks nog energie-import nodig. Het wegvallen van de behoefte aan transportcapaciteit voor gas ten behoeve lage temperatuur warmtevoorziening creëert tevens de ruimte in de gasinfra die nodig is voor de industrie.

De ongetwijfeld noodzakelijke import van biomassa die nodig is bij een verdergaande verduurzaming komt zo volledig beschikbaar voor de industrie; een situatie die uitermate wenselijk is. Het overall beeld dat zo ontstaat is dat er met maar zeer beperkt grensoverschrijdend energietransport de energievoorziening van Nederland mogelijk is. Het enige grensoverschrijdend transport van enige omvang is biomassa en dit alleen in relatie met de verdere ontwikkeling van die industrie.

#### B.7.4 Aanbeveling

Het is noodzakelijk om voorgaande nader te beschouwen in de context van de totale nationale energievoorziening, met aandacht voor onder meer energiebalans, betalingsbalans, milieu-implicaties en afhankelijkheid.

## BIJLAGE C TECHNOLOGIEËN IN HET PERSPECTIEF VAN DE TOEKOMSTIGE INFRASTRUCTUUR

Ton Kipperman - Kipperman Consultancy & Mediation.

### C.1 Inleiding

Technologieën in het perspectief van de toekomstige infrastructuur plaatsen, kan alleen zinvol als de karakteristieke verschillen met de huidige infrastructuur aangegeven worden. Daarmee ontstaat een duidelijk referentiekader voor de beoordeling van de technologieën. Het doelgebied voor de toepassing van de technologieën ligt vast. Vanuit de gewenste nieuwe functionaliteiten in het doelgebied kan er al een kwalitatief beeld gemaakt worden van de soort veranderingen die daarvoor nodig zijn. De kwantitatieve invulling hangt niet alleen van de technologische mogelijkheden af, maar ook van de snelheid en uiteindelijke omvang van de implementatie die vooral door economische en sociale factoren bepaald worden. Goede scenario's kunnen inzicht geven in die kwantitatieve invulling en de bijbehorende waarschijnlijke bandbreedte. Ze geven een beeld van de toekomstige ontwikkeling van de vraag naar energiefuncties en het aanbod van de verschillende bronnen.

De kwalitatieve veranderingen worden in dit hoofdstuk uitgewerkt en -indicatief- voorzien van mogelijke technologieën. Technologieën, die kunnen bijdragen aan de gewenste veranderingen.

#### Flexibiliteit staat onder druk

De flexibiliteit van de huidige infrastructuur wordt geconsumeerd door WK-generatoren die warmte gestuurd zijn en is ook nodig voor de integratie van de niet-stuurbare bronnen wind en zon. Om een voldoende flexibel systeem te houden, dat adequaat kan reageren op de fluctuaties in de vraag van de gebruikers, moet er dus nieuwe flexibiliteit gegenereerd worden. Gebeurt dit niet, dan is de stabiliteit van de energievoorziening onvoldoende gewaarborgd. Gebruikers die hogere eisen gaan stellen aan de leveringszekerheid (99,9999% i.p.v. 99,9%) vragen daarmee om voorrang: ze 'eten' een stukje van de beschikbare flexibiliteit op.

Complementair aan deze invalrichting is die, waarbij vanuit de veranderingen van de energiefuncties bij de gebruikers wordt gekeken naar mogelijk toe te passen technologieën. De veranderingen hebben in enkele gevallen verstrekkende gevolgen voor de eisen die aan de infrastructuur en de achterliggende bronnen gesteld worden. Zoals bijvoorbeeld de eis van een hogere beschikbaarheid (leveringszekerheid) voor apparatuur en toestellen waarvoor zelfs een korte onderbreking van de energie, meestal elektriciteit, fataal is. Men kan daarbij denken aan computerapparatuur (kassa's en administraties) en regelingen voor ventilatie en temperatuur (in processen). Daarentegen is er bijvoorbeeld een grotere tolerantie voor onderbrekingen in verwarming en koeling van gebouwen en voor verlichting, en ook voor sommige onderdelen van processen. Er is dus een verandering aan de gang waarin voor een relatief klein deel van de energielevering een hogere leveringszekerheid wordt gevraagd en voor de rest met een lagere leveringszekerheid kan worden volstaan. Daarnaast is er de tendens dat door hogere efficiency en intelligentere processen de gemiddelde afname zal dalen: de voorzieningszekerheid is daardoor gemakkelijker in te vullen.

De begrippen beschikbaarheid (leveringszekerheid) en gemiddelde afname (voorzieningszekerheid) komen ook op andere plaatsen in de samenleving voor. Ze hebben dan vaak een minder stringent karakter, omdat lokale opslag dan in de hoge leveringszekerheid voor een relatief klein

deel van de vraag voorziet. Een voorbeeld daarvan dicht bij huis: zorgen voor brood in de trommel en de tank van de auto gevuld.

De hoge leveringszekerheid die van een deel van de elektriciteitsvoorziening gevraagd wordt, is te illustreren met het volgende equivalent: 24 uur per dag een auto met draaiende motor en chauffeur voor de deur en maar weinig rijden. Direct beschikbare auto's en elektriciteit zijn beide moeilijk in voorraad te houden.

Het is zo'n situatie voor de energieleverancier redelijkerwijs niet meer mogelijk om, zoals gebruikelijk, een deel van de (hoge) kosten van de beschikbaarheid van de voorziening (gas, elektriciteit, warmte, enz.) te verdisconteren in het gebruikstarief. Dit vond in het verleden bij de nutsbedrijven als regel wel plaats. Anderzijds is er de vermindering in het gebruik door de toenemende activiteiten tot vraagbeperking (o.a. meer efficiency). Dit heeft echter niet tot gevolg dat de vraag naar beschikbaarheid (leveringszekerheid) ook afneemt, wel wordt de gemiddelde afname (voorziening) kleiner. De ontwikkeling van de maatschappij in de richting van meer diensten en informatie vraagt namelijk om een hogere betrouwbaarheid van de beschikbaarheid van elektriciteit voor een beperkt deel van het vermogen: leveringszekerheid 99,9999% of meer. Voor het grootste deel van het elektrische vermogen kan wel met een lagere leveringszekerheid of beschikbaarheid worden volstaan. Tenminste als dit afgesproken is en er een passende, lagere prijs bij hoort. Warmtevoorziening is wat toleranter, tenminste wat de ruimteverwarming betreft; het geldt niet voor tapwater. De douchekop moet wel tot het eind van de douchebeurt warm water blijven geven en niet halverwege een paar minuten alleen maar koud.

Het voorbeeld van de elektriciteitsvoorziening illustreert dat er innovaties op apparatuurniveau en innovaties op systeemniveau noodzakelijk zijn om aan deze veranderende eis te kunnen voldoen. Daarbij komt, dat er waarschijnlijk een grotere diversiteit aan gebruikspatronen en daarbij behorende tarieven zal ontstaan. Dit vraagt om een grotere, andersoortige flexibiliteit van de gehele infrastructuur. De energiestromen moeten daarvoor naar preferente gebruikers gestuurd kunnen worden.

De verknoping van de verschillende energie-infrastructuren voor gas, elektriciteit en warmte maakt dat de gewenste verandering van de flexibiliteit niet alleen geldt voor de perifere netten, maar ook doorwerkt in hoofdnetten en de stuurbare bronnen. Tegelijkertijd moet ook nog geanticipeerd worden op de toenemende hoeveelheid energie van de niet-stuurbare bronnen.

## C.2 Toekomstige energie-infrastructuur

De *toekomstige infrastructuur* moet een grotere diversiteit van bronnen en opwekkers kunnen koppelen aan een grotere diversiteit van gebruikers en afnemers.

De huidige infrastructuur heeft een mate van flexibiliteit die voldoende is gebleken voor de huidige, nog beperkte, omvang van de niet-stuurbare bronnen. Terwijl in de hoge leveringszekerheid wordt voorzien door lokale maatregelen. Met andere woorden: het werkgebied van de energievoorziening is tot nu toe voldoende breed gebleken om tot nu toe vernieuwingen en veranderingen in de eisen op te vangen. Binnen het werkgebied kunnen aanbod en vraag fluctueren, terwijl toch aan de gewenste levering- en stabiliteits eis kan worden voldaan. Zo'n werkgebied of operationele bandbreedte wordt nauwkeuriger met de bedrijfskundige term 'operational window' aangegeven, daarom wordt deze ook hier gebruikt. Voor een goed inzicht in het belang van het 'operational window' voor de karakterisering van energievoorzieningsstelsel en de infrastructuur in het bijzonder, is het gewenst daar wat nader op in te gaan.

Het operational window is bijna nooit ééndimensionaal, maar heeft technische, economische en sociale assen die nagenoeg onafhankelijk van elkaar zijn. Door in de ene dimensie veel ruimte in het window te gebruiken of op te eisen, moet in de andere dimensies ruimte ingeleverd worden: het volume van het operational window rekt niet zomaar mee. Dit vergroten in één richting kan zelfs tot gevolg hebben dat het window in de andere richtingen zo krap wordt, dat de gehele activiteit gestopt moet worden.

Wanneer het gemiddelde werkpunt ver uit het midden van het operational window ligt, is er naar één kant (te) weinig ruimte om (toevallige) fluctuaties op te vangen. Dit geeft instabiliteit en leidt soms uitval, vooral als er te weinig mogelijkheden zijn om noodvoorzieningen in te schakelen die het window tijdelijk weer groter maken. Bijvoorbeeld de overvloedige regenval in augustus 2002 geeft wateroverlast in de polders. Het operational window van de gemalen + noodvoorzieningen wordt naar een zijde volledig opgesoupeerd en dan nog is het te weinig om de aardappels op het veld binnen twee dagen weer droge voeten te geven. Als het niet binnen twee dagen kan, hoeft het helemaal niet meer, omdat de rot dan toeslaat.

Nieuwe technologieën, nieuwe bronnen en opwekkers, andere eisen van gebruikers en afnemers verschuiven het werkpunt in het window. Teneinde toch een goed en stabiel bedrijf van het systeem te kunnen behouden, moet het operational window aangepast, vergroot en/of verschoven worden. Hiervoor zijn acties nodig in alle drie de hoofdrichtingen: technologisch, economisch en sociaal. Het is daarom van groot belang dat men zich realiseert dat veranderingen in de infrastructuur niet ‘vanzelf’ plaatsvinden na een technisch geslaagde demonstratie van een innovatie. Zo’n geslaagde demonstratie implementeren betekent een verschuiving van het werkpunt in het operational window van het hele systeem. Dus eigenlijk hadden al bij de voorbereiding van de betreffende demonstratie de acties langs de ander assen ontwikkeld en gestart moeten worden om ‘goed’ in het window te blijven zitten. Daarmee wordt de noodkreet voorkomen: ‘Demonstratie geslaagd, help wat nu?’

Zonder de pretentie te hebben compleet te zijn, zal de toekomstige energie-infrastructuur op de volgende punten anders moeten zijn of worden dan de huidige:

- 1 Verliezen verminderen, vooral aandacht voor het perifere deel van het net.
- 2 Transportcapaciteit vergroten (piek).
- 3 Transport versoepelen, meer tolerantie voor:
  - fluctuaties in de hoeveelheid,
  - fluctuaties in de transportrichting.
- 4 Bij grotere fluctuaties toch stabiel bedrijf, kritische afnemers blijven voorzien van de gevraagde, en gecontracteerde energie.  
(derhalve: fluctuaties gaan neutraliseren, compenseren in de nabijheid van de veroorzaker)
- 5 Meer mogelijkheden om delen van de infrastructuur te koppelen of te ontkoppelen:
  - met dezelfde energiedrager aan weerszijden van het koppelpunt,
  - met verschillende energiedragers aan weerszijden van het koppelpunt.
- 6 Meer ruimte voor tweerichtingsverkeer op koppelpunten,  
Overgang van een distributienet naar een uitwisselingsnet.

### C.3 Uitwerking van de gewenste technologieën voor de infrastructuur van de toekomst

Tabel C.1 *Uitwerking van de gewenste technologieën voor de infrastructuur van de toekomst*

Gewenste ontwikkeling in infrastructuur	Eerste aanpak	Mogelijke technologie(ën)
1. Verliezen verminderen, met extra aandacht voor de perifere delen van de netten.	Daluren meer benutten door gebruikstoestellen van opslag voorzien en deze gestuurd in en uit te schakelen.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Koude-accu's in diepvriezers.</li> <li>- Warm- resp. heetwater opslag bij cv-ketels.</li> <li>- Gas- of elektriciteitopslag bij kooktoestellen.</li> <li>- Sturing van de opslag voor het vullen of ledigen opslag middels signalen via net.</li> </ul>
2. Transportcapaciteit vergroten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Elektriciteit</i>: lokaal <math>\cos \Phi</math> compenseren middels vermogenselektronica en ac-kabels met de bedrijven</li> <li>- <i>Gas</i>: opslag aanbrenge bij koppelpunten deze vraag-gestuurd vullen en legen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Blindvermogen lokaal genereren.</li> <li>- Brandstof- en warmteopslag bij decentrale WK.</li> <li>- Kleine, snelle gasopslag.</li> </ul>
3. Transport versoepelen <ul style="list-style-type: none"> <li>- fluctuaties in de hoeveelheid.</li> <li>- fluctuaties in de transportrichting.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Hoeveelheid</i>: netwerkdelen en paden actief aansturen; niet alleen schakelen maar ook energiestromen verdelen.</li> <li>- <i>Transportrichting</i>: twee opties voor koppelpunt naast elkaar uitwerken: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gescheiden heen en terugweg;</li> <li>▪ Geïntegreerde heen- en terugweg.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schakelen is reeds bekend, maar verdelen van elektriciteit en gas over verschillende paden vraagt nog ontwikkeling.</li> <li>- Decentrale bronnen vragen om beheersen van techniek voor heen- en terugweg: systeem van twee gescheiden banen of van enkelbandtransport.</li> </ul>
4. Bij grotere fluctuaties toch stabiel bedrijf (Fluctuaties compenseren in de nabijheid van de veroorzaker, zodat instabiliteiten zich niet in het net voortplanten).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meerdere toevallig fluctuerende gebruikers in een deelnetwerk koppelen en isoleren van de rest (gedeeltelijke uitmiddeling).</li> <li>- Fluctuaties aftoppen door lokale piekvraag aan de lokale opslag te onttrekken; sturing door vermogenselektronica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deel van het netwerk met zijn eigen fluctuaties isoleren van de rest, gemiddeld vermogen wel doorlaten (dit is lastiger voor elektriciteit dan voor gas).</li> <li>- In het deel van het netwerk met veel fluctuaties aangepaste opslag en regeling plaatsen.</li> </ul>

## Vervolg Tabel C.1

Gewenste ontwikkeling in infrastructuur	Eerste aanpak	Mogelijke technologie(ën)
<p>5. Meer mogelijkheden om delen van de infrastructuur te koppelen of te ontkoppelen.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- met dezelfde energiedrager aan weerszijden van het koppelpunt.</li> <li>- met verschillende energiedragers aan weerszijden van het koppelpunt.</li> </ul>	<p><i>Dezelfde energiedrager:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fysieke mogelijkheden van koppelingen vergroten door creëren van passerelles.</li> <li>- Door actieve sturing op koppelpunten energiestromen dirigeren, maar tegelijkertijd de terugwerking verkleinen (dynamische impedantiesturing).</li> </ul> <p><i>Verschillende energiedragers:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ontwikkel een range van energiedragerconvertoren met lokale opslag voor verschillende typen koppelpunten.</li> <li>- Ontwikkel reversibele of tweeweg-convertoren voor koppelpunten inclusief de mogelijkheid voor aanpassing van de impedanties.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dynamische impedantiesturing is bekend uit de elektrische informatie-netwerken en moet nu ook toegepast gaan worden in energienetwerken voor elektriciteit en gas.</li> <li>- Benader verschillende energiedragers in stappen: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ gas hoge en lage druk.</li> <li>▪ aardgas vloeibaar en gas.</li> <li>▪ elektriciteit hoge en lage spanning; dc en ac; frequentie stabiliteit hoog en laag.</li> <li>▪ brandstof naar elektriciteit en omgekeerd.</li> </ul> </li> </ul>
<p>6. Meer ruimte genereren voor tweerichtingsverkeer op koppelpunten.</p>	<p>De transitie van distributienetten naar uitwisselingsnetten voor o.a. gas en elektriciteit faciliteren door koppelpunten gelijktijdig met gebruikers te veranderen Twee opties uitwerken:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verkeer langs twee paden in de twee richtingen sturen.</li> <li>- Op het koppelpunt echt tweerichtingsverkeer realiseren.</li> </ul>	<p>Naast de ontwikkeling van een filosofie voor energienetwerken is de uitwerking de facto een integratie van de technologieën die boven reeds genoemd zijn.</p>

Wij dienen ons te realiseren dat de infrastructuur is een technisch systeem is, zodat de veranderingen of innovaties daarin noodzakelijkerwijs technisch van aard zijn. Welke van de mogelijke innovatieopties gekozen moet of kan worden, hangt echter ook af van de economische en sociale consequenties. Er is dus alle reden om revolutionaire innovaties geleidelijk in te voeren en zo deze consequenties te kunnen behappen (evolutionaire invoering).

## C.4 Innovaties die met de veranderingen in de infrastructuur samenhangen zijn goed vanuit de invalshoeken ‘Technologie’ en ‘Systeem’ te karakteriseren:

### C.4.1 Technologie

- Bestaande technologieën anders gebruiken.
- Verbeterde en/of andere combinaties van bestaande technologieën toepassen.
- Vernieuwde of nieuwe technologieën ontwikkelen en gaan toepassen.

## C.4.2 Systeem

Het systeem heeft globaal de volgende structuur:

bronnen → primaire energiedrager → infrastructuur → secundaire energiedrager → infrastructuur → gewenste functie/dienst.

Het energievoorzieningsstelsel anders inrichten om meer flexibiliteit te verkrijgen.

- Conversie van primaire naar secundaire energiedrager op een andere plaats in de infrastructuur uitvoeren.
- Stabilisatiecomponenten naar de koppelpunten verplaatsen.
- Complementaire gebruikers in hetzelfde deel van het netwerk onderbrengen.
- Decentrale bronnen, vooral de niet-stuurbare, eerst in deelnetwerken koppelen en pas dan aan op een knooppunt in de infrastructuur inkoppelen.
- Niet-stuurbare bronnen geprogrammeerd koppelen aan gericht zeer flexibel gemaakte gebruikers.

## C.5 Import en export van elektriciteit

Elektriciteit onderscheidt zich van andere energiedragers omdat er geen materiële transport mee gemoeid is. Daarom is opslag van elektriciteit als zodanig praktisch niet mogelijk, alleen in condensatoren (elektrisch veld) of supergeleidende magneten (magnetisch veld) kan enige opslag plaatsvinden. Anderzijds gaat transport van elektrische energie door geleidende materialen zoals koper en aluminium momentaan (lichtsnelheden), terwijl de lucht een natuurlijke isolator is en er dus weinig problemen zijn met afdichtingen zoals bij gas- en vloeistoftransport.

Deze karakteristieke eigenschappen van elektriciteit manifesteren zich nadrukkelijk bij import of export. Transport vindt, zoals gezegd, momentaan plaats, dat wil zeggen dat elektriciteit die ergens opgewekt wordt, op hetzelfde moment ergens afgezet moet worden. Dit vraagt zeker bij grensoverschrijdend transport intensieve communicatie tussen opwekker, netbeheerder en afnemer, en daarnaast momentane bemeting ten behoeve van een juiste financiële verrekening. Bovendien maakt het ontbreken van opslagmogelijkheden dat de transportcapaciteit limitatief is voor import of export. Hoewel grensoverschrijdende elektriciteitsverbindingen uitgebreid zijn, is het nog steeds passen en meten in de ruimte die overgebleven is nadat de vaste contracten door de netbeheerder gehonoreerd zijn.

De transitie naar een duurzame energiehuishouding betekent een (veel) groter aandeel niet-stuurbare bronnen. Dit geeft enerzijds problemen voor transport, omdat je wind niet 'op contract kunt inkopen'. Anderzijds biedt een grensoverschrijdend netwerk met grote capaciteit de mogelijkheid om de niet-stuurbare bronnen in Europa te koppelen en de verschillen te laten uitmiddelen. Als het bijvoorbeeld flink waait in het Middellandse zee gebied kan het op de Noordzee rustig zijn.

Voor het effectief realiseren van zo'n uitmiddeling is waarschijnlijk een Europees dc-netwerk noodzakelijk, naast het bestaande en nog verder uit te breiden ac-netwerk. Gelukkig kan dit in stappen opgebouwd worden, maar het is wel een revolutionaire innovatie.

## BIJLAGE D DIVERSEN

ECN Schoon Fossiel  
ECN Beleidsstudies

### D.1 Energie-aanbod

Er zijn een aantal mogelijkheden om in de vraag naar de finale energiedragers te voorzien. In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de mogelijkheden om in de vraag te voorzien, de consequenties die dit heeft voor de energie-infrastructuur alsmede de mogelijke interactie met zowel de energievraag als ook de overige aanbodopties.

#### D.1.1 Inzet van Biomassa

Volgens de EWAB Marsroute studie (Novem, 2000) is in Nederland op dit moment ruim 110 PJ aan afval en biomassa beschikbaar voor energiewinning. De totale vrijkomende hoeveelheid is hoger, maar er zijn ook andere toepassingen die de beschikbaarheid beperken. In de hier genoemde hoeveelheid gaat het om 80 PJ gemengd afval wat vooral de afvalverbrandingsinstallaties ingaat, 10 PJ laagwaardig biogeen afval (kippenmest, zuiveringsslib) en 20 PJ houtachtige reststromen. De mee- en bijstook in kolencentrales vindt vooral met een deel van de laatste twee stromen plaats.

De huidige beschikbaarheid voor op energiewinning gerichte installaties is circa 30 PJ. Uitbreiding van deze hoeveelheid kan alleen door binnenlandse kweek van biobrandstof of door import van biobrandstof. De benodigde ruimte voor biomassa is een veelvoud van het ruimtebeslag van andere duurzame energie opties (Menkveld, 2002). Energieteelt op goede landbouwgrond levert maximaal 35 ton per hectare. De energie inhoud is ca. 15 MJ/kg, ofwel dat levert maximaal 500 GJ primaire brandstof per ha. Nederland beschikt over 2 mln ha. cultuurgrond waarvan ongeveer de helft grasland. Gesteld dat 25% van de cultuurgrond voor een energiegewas gebruikt zou worden dan zou dit jaarlijks 250 PJ energie kunnen leveren.

Volgens een studie van de Utrecht Centrum voor Energieonderzoek (UCE, 2000) kan er op de huidige landbouwgronden wereldwijd bijna 1000.000 PJ aan energiegewas verbouwd worden, zonder de voedselvoorziening in gevaar te brengen. Indien een evenredig deel gebaseerd op toekomstige bevolkingsomvang of huidige economie, 0,2% tot 0,7%, hiervan naar Nederland geëxporteerd zou worden komt dit neer op 2.000 tot 7.000 PJ.

In deze studie zal uitgegaan worden van een beschikbaarheid van 2.000 PJ waarvan 10% binnenlands

De biomassa wordt na winning lokaal opgeslagen en in de loop van het jaar naar de verbruikers getransporteerd. In de havengebieden kan er een tussenopslag plaatsvinden. De omzetting van biomassa in een transportbrandstof, vindt met het oog op verlaging van de transportkosten bij voorkeur in het land van herkomst plaats.

De biomassa die naar Nederland komt is een vaste brandstof die afgezien van de netto CO<sub>2</sub>-uitstoot veel overeenkomsten heeft met kolen. Biomassa vergt veel ruimte voor opslag en een relatief dure verbrandingsinstallatie met de nodige voorzieningen om de lokale milieubelasting te beperken. Ook komen er asresten vrij. De toepassing in grote centrales, langs vaarwegen, ligt voor de hand. Dergelijke centrales staan continu aan en kunnen hoogstens 's avonds wat terugeregeld worden in vermogen. Bij industriële installaties en zekere in de gebouwde omgeving ligt vaste biomassa aanzienlijk moeilijker, en is een schone vloeibare of gasvormige brandstof

veel aantrekkelijker. Een optie is om in een aantal vergassingsinstallaties de biomassa centraal te laten vergassen en middels een syn-gas leidingennet naar de verbruikers te transporteren. De voorkeur gaat hierbij uit naar gebruikers met een hoge bedrijfstijd (industrie). Hierbij dienen er voorzieningen gemaakt te worden om het syn-gas tijdelijk op te slaan (buffers). Deze buffers, in de simpelste vorm een stapel gekoppelde gasleidingen, maken het ook mogelijk om het gas voor piekcentrales te gebruiken. Bij een aantal afnemers zou een dual fuel installatie gebouwd kunnen worden, die bij een langdurige storing op olie of aardgas over gaat.

#### D.1.2 Inzet van windenergie

Voor windenergie wordt in 2050 uitgegaan van 1.500 MWe op land, en de rest van het vermogen op zee. Bij zo'n 10% van het opgestelde vermogen, vanaf circa 2.000 MWe maar afhankelijk van de opbouw van het park, zullen er inpassingsproblemen in het elektriciteitsnet ontstaan. Consequentie hiervan kan zijn dat 's nachts gascentrales stilgezet moeten worden en kolencentrales teruggeschakeld moeten worden. Naarmate het windvermogen toeneemt nemen deze problemen toe. Via het stilleggen van WKK vermogen tot het uit de wind draaien van windturbines moet het aanbod aan de afzetmogelijkheden worden aangepast. Omdat het aantal vollast uren van windturbines rond de 3000-3500 uur ligt moeten er ook voorzieningen zijn om elektriciteit te maken als het niet waait. Bepaalde centrales, die niet gemakkelijk aan en uitgezet kunnen worden zullen daarom ook bij een overvloed van elektriciteit uit wind op een teruggeschakeld vermogen door blijven draaien.

Gesteld dat in 2050 op het Nederlandse continentale vlak de enorme hoeveelheid van 50.000 MWe (dit is nog niet het volledige potentieel) aan windturbinevermogen aanwezig is, wat zijn dan de mogelijkheden om hier een nuttige besteding aan te geven? Het gaat hierbij dan om 625 PJ<sub>e</sub> (gedurende 3.500 uur), en als het waait voldoende om circa 4 keer aan de piekvraag voor elektriciteit (in 2050) te voldoen. Opgemerkt moet worden dat dit 10 keer meer is als ons huidige hoogspanningsnet kan verwerken. Ook vergt dit de aanleg van een (internationale) elektriciteitsinfrastructuur op de Noordzee.

Er zijn een aantal opties om in de te verwachten onbalans tussen vraag- en aanbod te voorzien:

- 1) Exporteren: De huidige exportcapaciteit is 5.000 MWe. Dit zou aanzienlijk verhoogd kunnen worden. Gezien windenergiepotentiëlen in Denemarken, Duitsland en Groot-Brittannië ligt de dichtstbijzijnde afzetmarkt in Zuid Duitsland (of verder). Het is niet realistisch dat we een enorm teveel simpelweg kunnen exporteren. Wellicht is dit omgelijk voor 200 PJ<sub>e</sub>.
- 2) Een tweede optie is om er ter plekke (dus offshore) of aan de kust waterstof mee te produceren. Een deel van de energie-inhoud gaat hierbij verloren. Waterstof kan mist het aardgasnet hier tegen kan voor 10% bijgemengd worden. al dan niet. Dit is wellicht een oplossing voor 50 tot 100 PJ<sub>e</sub>.
- 3) Een derde optie is om waterstof te produceren voor industriële afnemers. Deze moeten dan wel zowel op waterstof als op een andere brandstof kunnen werken. Ook kan gedacht worden aan het stoken van waterstof in de afgassenketels van WKK-installaties die op dat moment (wegens de overvloed aan elektriciteit uit wind) stil staan. Indien ook van waterstof gebruik gemaakt moet worden. Als het minder waait, dient er aanzienlijke, ondergrondse, waterstof opslagcapaciteit aangelegd te worden.
- 4) Een daarop lijkende optie is de brandstofkraan even dicht te doen en tijdelijk elektrisch te gaan verwarmen. Dit vergt een aanzienlijke verzwarende van de elektriciteitsinfrastructuur.
- 5) Indien vanuit biomassavergassing een syngas geproduceerd wordt kan met de beschikbare elektriciteit waterstof gemaakt worden. In een installatie zou hiermee, kunststof (vervangt olie), een transportbrandstof (vloeibaar veel eenvoudiger dan gasvormig) of synthetisch aardgas (kan in aardgasinfrastructuur) gemaakt kunnen worden. Belangrijkste nadeel is het beperkte aantal vollast uren van een dergelijke installatie.
- 6) Ook kan getracht worden om de elektriciteit op te slaan. Het gebruik van waterkracht levert hierbij energetisch het beste beeld op. Op het moment dat er elektriciteit over is, wordt water omhoog gepompt, op het moment dat er tekort is, loopt het door een turbine weer naar

beneden. In landen met hoogteverschillen zijn dergelijke opslagsystemen al aanwezig. In Nederland kan een OPAC (ondergrondse pomp accumulatie centrale) aangelegd worden. Hiervoor dient onder een waterdichte grondlaag een gangenstelsel aangelegd te worden, en bovengronds een meer.

Bij de derde en vierde optie kan er een probleem aan de aardgaskant ontstaan. Aardgas dat via een pijpleiding naar Nederland aangevoerd wordt, kan niet worden afgenomen en dient hier te worden opgeslagen (of het aardgas transport vanuit Rusland en de winning moet worden teruggeschroefd).

### D.1.3 CO<sub>2</sub>-afvang

Door het uitrusten van aardgasgestookte installaties met CO<sub>2</sub>-verwijderingsinstallaties kan de uitstoot van CO<sub>2</sub> sterk worden gereduceerd. De afgevangen CO<sub>2</sub> dient vervolgens zodanig opgeslagen te worden dat het gedurende honderden jaren niet meer teruglekt naar de atmosfeer. CO<sub>2</sub> zou mogelijk kunnen worden opgeslagen in lege aardgasvelden, kolenhoudende lagen alsmede aquifers. Onzeker is hoeveel CO<sub>2</sub> op jaarbasis opgeslagen kan worden in lege aardgasvelden. Een alternatief zou zijn om de CO<sub>2</sub> op te slaan onder de Noordzee. Hiervoor is wel de aanleg van een omvangrijke nieuwe infrastructuur. Een overschot aan CO<sub>2</sub> dat niet in Nederland kan worden opgeslagen zou geëxporteerd moeten worden. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan export naar Noorwegen, alwaar de CO<sub>2</sub> opgeslagen zou kunnen worden in aquifers.

Tabel D.2 *Overzicht van mogelijkheden om te komen tot beperking van energievraag (het vermijden van energievraag)*

<i>Sector</i>	<i>Vraagbeperkende maatregelen</i>
<i>Huishouden</i>	Terugdringen gebouwgebonden energievraag: Betere bouw; isolatie, benutting zonnewarmte en zonlicht (oriëntatie) Gebalanceerde ventilatie met warmte terugwinning.
<i>Diensten en Overheid</i>	Terugdringen gebouwgebonden energievraag: Betere bouw, isolatie, benutting zonnewarmte en zonlicht (oriëntatie) gebalanceerde ventilatie met warmte terugwinning.
<i>Landbouw</i>	Vooraf glastuinbouw. Terugdringen kas- en teelt gebonden energievraag: betere isolatie en intelligentere water- en CO <sub>2</sub> -huishouding
<i>Industrie (Petro)chemie</i>	Terugdringen procesgebonden energievraag: Betere monitoring/procesbesturing, procesintegratie, unit operations (warmtewisselaars, scheidingstechnieken etc.) en nieuwe 'slim' ontworpen processen.
<i>Industrie Basismetaal</i>	Idem
<i>Industrie Overig</i>	Idem
<i>Industrie Grondstof</i>	Efficiëntere productieprocessen, betere producten (minder grondstof per eenheid product, hergebruik, recycling.
<i>Transport</i>	Gewichtsvermindering, verlaging van lucht- en rolweerstand, efficiëntere motoren, hybride aandrijfconcepten, terugwinnen remenergie, snelheidbeperking.