

Ontwerpfilosofie voor een duurzame energiehuishouding

Sleutelrol voor warmte

A.K. Wemmers

S. Spoelstra

P.T. Alderliesten



'Cheshire Puss, would you tell me, please, which way I ought to go from here?'

'That depends a good deal on where you want to get to,' said the Cat.

'I don't much care where — ' said Alice.

'Then it doesn't matter which way you go,' said the Cat.

Alice's Adventures in Wonderland, Lewis Carroll

Verantwoording

Dit rapport is geschreven in het kader van een door ECN uitgevoerde studie WAPRO (WarmtePROgramma). Diverse medewerkers van ECN hebben hier hun bijdrage aan geleverd. In alfabetische volgorde zijn dat: P.W. Bach, L.W.M. Beurskens, H. Visser en H.J.M. Visser.

Abstract

This report presents a design philosophy for the arrangement of the Dutch energy system in 2050 and elaborates this for two cases. In contrast to usual studies on future energy systems, this report uses an approach that starts with the energy function that has to be fulfilled and designs the system towards the source of energy. The objective is to arrive at a system that uses minimal fossil energy sources and materials. The use of heat forms the leading role in the design of the system.

A stepwise approach has been designed that consists of three steps: (1) reduce energy end use, (2) reduce conversion losses, and (3) implement renewable energy. The remaining energy demand is filled in with fossil resources. An energy model of the Netherlands has been developed which facilitates the design by evaluating the consequences of technology options. The two cases that have been analyzed differ with respect to the heat production in the build environment (heat pumps versus micro combined heat and power) combined with a different application of biomass (synthetic natural gas versus biofuels).

The results show that increasing the energy efficiency (by reducing end use and reducing conversion losses) and the use of renewable energy contribute about equally to a more sustainable energy system. Roughly speaking, about $\frac{1}{3}$ of the original energy demand is reduced by energy savings, $\frac{1}{3}$ is supplied by renewable energy, and $\frac{1}{3}$ is still relying on fossil energy carriers.

The approach followed in this report does therefore not lead to a completely renewable Dutch energy system in 2050 despite the fact that significant energy saving measures and renewable energy options have been implemented. The results show that the increase in energy use can be substantially reduced compared to Business As Usual (BAU). The two cases arrive at 3049 PJ and 3187 PJ compared to 4348 PJ for the BAU scenario. The share of renewable energy for these cases are respectively 1747 PJ (57%) and 1653 PJ (52%).

Keywords

Dutch sustainable energy system, heat, integral system approach, energy vision, technology options, energy functions

Inhoud

Lijst van figuren	4
Samenvatting	5
1. Inleiding	7
2. Nederlandse energiehuishouding volgens het GEHP-scenario	8
3. Visie	13
4. Ontwerpfilosofie	14
4.1 Stappenplan	14
4.2 Quick-Scan model	15
4.3 Illustratie van de ontwerpfilosofie	17
5. Toekomstbeelden 2050	19
5.1 WPBS variant	19
5.1.1 Stap 1: Vraagreductie	19
5.1.2 Stap 2: Reductie van conversieverliezen	20
5.1.3 Stap 3: Inzet van duurzame energie	22
5.1.4 Eindbeeld	22
5.2 WKBF variant	23
6. Conclusies en aanbevelingen	27
6.1 Conclusies	27
6.2 Aanbevelingen	28
Referenties	29

Lijst van figuren

Figuur 2.1	<i>Energiegebruik als functie van de tijd bij verschillende ontwikkelingen</i>	8
Figuur 2.2	<i>Nederlandse energiebalans in 2050, volgens GEHP</i>	9
Figuur 2.3	<i>Energiebalans elektriciteitssector 2050, volgens GEHP</i>	9
Figuur 2.4	<i>Energiebalans industrie in 2050, volgens GEHP</i>	10
Figuur 2.5	<i>Energiebalans transport in 2050, volgens GEHP</i>	10
Figuur 2.6	<i>Energiebalans gebouwde omgeving 2050, volgens GEHP</i>	11
Figuur 2.7	<i>Nederlandse energiehuishouding in 2050 volgens het GEHP scenario, exclusief grondstoffen</i>	12
Figuur 4.1	<i>Aandelen vraagreductie, reductie conversieverlies, duurzaam en resterend fossiel voor een woning</i>	18
Figuur 5.1	<i>Aandelen vraagreductie, reductie conversieverlies, duurzaam en resterend fossiel voor het Nederlandse energiegebruik in de WPBS variant</i>	23
Figuur 5.2	<i>Het Nederlandse energiesysteem in 2050 in de WPBS variant</i>	25
Figuur 5.3	<i>Het Nederlandse energiesysteem in 2050 in de WKBF variant</i>	26
Figuur 6.1	<i>Aandelen vraagreductie, reductie conversieverlies, duurzaam en resterend fossiel voor het Nederlandse energiegebruik ten opzichte van het GEHP scenario in de WPBS en WKBF varianten</i>	27

Samenvatting

Dit rapport presenteert een ontwerpfilosofie voor de mogelijke inrichting van de Nederlandse energiehuishouding in 2050 en werkt dit uit in een tweetal varianten.

In tegenstelling tot de meeste beschouwingen over de toekomstige energiehuishouding wordt in dit rapport een benadering gehanteerd die start met de energiefunctie die moet worden vervuld en ontwerpt het totale energiesysteem door vanuit deze functie 'stroomopwaarts' het systeem in te richten. Er wordt ingezet op een vergaande beperking van de energievraag ten opzichte van GEHP scenario (Farla, 2006) door het nemen van concrete maatregelen. Waar mogelijk wordt zoveel mogelijk duurzame energie ingezet. De doelstelling is hierbij om te komen tot een sterk verminderde afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en een minimaal beslag op grondstoffen.

De visie geeft warmte een centrale rol bij de inrichting van de energiehuishouding en beschouwt Nederland als een integraal energiesysteem. Om invulling te geven aan de visie en een toekomstbeeld te genereren wordt een ontwerpfilosofie toegepast, die bestaat uit twee delen. Ten eerste wordt een stappenplan gedefinieerd waarlangs de energiehuishouding wordt ingericht. Het doorrekenen van de energiehuishouding gebeurt in het tweede deel, met een Quick-scan model. Dit model is een energiebalans van de Nederlandse energiehuishouding opgesteld waarmee inzicht wordt verkregen in wat de consequenties kunnen zijn voor het zichtjaar 2050 ten aanzien van mogelijkheden tot energiebesparing, duurzame invulling en welke technologieopties daarbij een rol spelen.

Deze visie is uitgewerkt in een tweetal varianten. Het onderscheid tussen de twee varianten wordt gevormd door de manier waarop de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving plaatsvindt (warmtepompen versus microwarmtekracht) gecombineerd met een verschil in de wijze waarop biomassa wordt ingezet (synthetisch aardgas versus biobrandstoffen).

De resultaten laten zien dat verhoging van de energie efficiency (vraagreductie en reductie conversieverliezen) en de inzet van duurzame energie in ongeveer gelijke mate bijdragen aan de verduurzaming van de energiehuishouding. Ruwweg kan worden gesteld dat de oorspronkelijke energiebehoefte voor $\frac{1}{3}$ wordt gereduceerd door energiebesparing, voor $\frac{1}{3}$ wordt ingevuld met duurzame energie en voor $\frac{1}{3}$ met fossiele energiedragers.

De twee in dit rapport doorgerekende varianten laten nog steeds een stijging van het energiegebruik zien ten opzichte van de huidige situatie, zij het veel minder dan de Business As Usual (BAU) scenario's. Daar waar het BAU scenario uitkomt op 4348 PJ komen de twee varianten uit op respectievelijk 3049 PJ en 3187 PJ. Het duurzame aandeel wordt berekend op 1747 PJ (57%) en 1653 PJ (52%).

Uit de in dit rapport gevolgde aanpak blijkt dat een volledig duurzame Nederlandse energiehuishouding in 2050 niet mogelijk is op basis van nu bekende mogelijkheden. Ondanks het feit dat met name in de gebouwde omgeving, de transportsector en duurzame opwekking vergaande maatregelen zijn genomen, wordt nog steeds een significant deel van de Nederlandse energiehuishouding voorzien van fossiele energiedragers.

Ondanks het feit dat de invulling van de warmtevraag leidend is in dit rapport, komt uit de berekeningen van allerlei varianten van het energiesysteem 'Nederland' als constante factor naar voren dat een elektriciteitsnetwerk en –voorziening die in staat is om een wisselende vraag met een wisselend aanbod te af te stemmen (*smart grids*) een noodzakelijke voorwaarde is voor een efficiënt en duurzaam energiesysteem.

1. Inleiding

Energie is enerzijds van cruciaal belang voor onze economische ontwikkeling en groeiende welvaart. Anderzijds leidt het gebruik van fossiele energie tot aantasting van het milieu door onder andere de uitstoot van broeikasgassen. Volgens de huidige verwachtingen zal de vraag naar energie verder toenemen. Op termijn zal er schaarste aan fossiele energiedragers ontstaan, leidend tot sterk stijgende energieprijzen. Politiek-strategische overwegingen op het gebied van voorzieningszekerheid op lange termijn en nadelen voor het milieu die verbonden zijn aan het gebruik van fossiele brandstoffen leiden tot de wens om te komen tot een duurzame energiehuishouding. Een duurzame energiehuishouding is een systeem waarbij minimaal beroep wordt gedaan op eindige voorraden fossiele energiedragers en grondstoffen.

Beschouwing van de Europese energiehuishouding, zoals de ECN studie ‘De belofte van een duurzame Europese energiehuishouding’, laat zien dat het ook op langere termijn (2050) lastig is om de energiehuishouding met inzet van hernieuwbare bronnen voldoende duurzaam te maken [Uyterlinde 2007]. Op een kortere termijn lijken de overheidsdoelstellingen op het gebied van energiebesparing (2% per jaar), duurzame energie (20%), CO₂ emissiereductie (30%) in 2020 zeer ambitieus en verre van haalbaar zonder drastische maatregelen [Ministerie van VROM 2007].

De meeste beschouwingen over de toekomstige energiehuishouding gaan uit van een groei van de wereldbevolking, een groei van de economie en een verdere groei van het energiegebruik. Wel zal de groei in de ontwikkelde landen volgens de meest scenariostudies afvlakken. Deze afvlakking komt tot stand door aangenomen besparingspercentages toe te passen en deze gedurende tientallen jaren constant te veronderstellen alsof dit een autonoom proces is. De nog steeds groeiende energievraag wordt vervolgens ingevuld met grotendeels fossiel energiedragers en in toenemende mate met duurzame energie. Deze benadering leidt in al deze beschouwingen niet tot een duurzame energiehuishouding.

In dit rapport wordt een andere benadering gehanteerd. Deze benadering start met de energiefunctie die moet worden vervuld en ontwerpt het totale energiesysteem door vanuit deze functie ‘stroomopwaarts’ het systeem in te richten. Er wordt ingezet op een vergaande beperking van de energievraag ten opzichte van Business As Usual (BAU) door het nemen van concrete maatregelen. Waar mogelijk wordt zoveel mogelijk duurzame energie ingezet. De doelstelling is hierbij om te komen tot een sterk verminderde afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en een minimaal beslag op grondstoffen. Als richtjaar hierbij wordt 2050 gehanteerd.

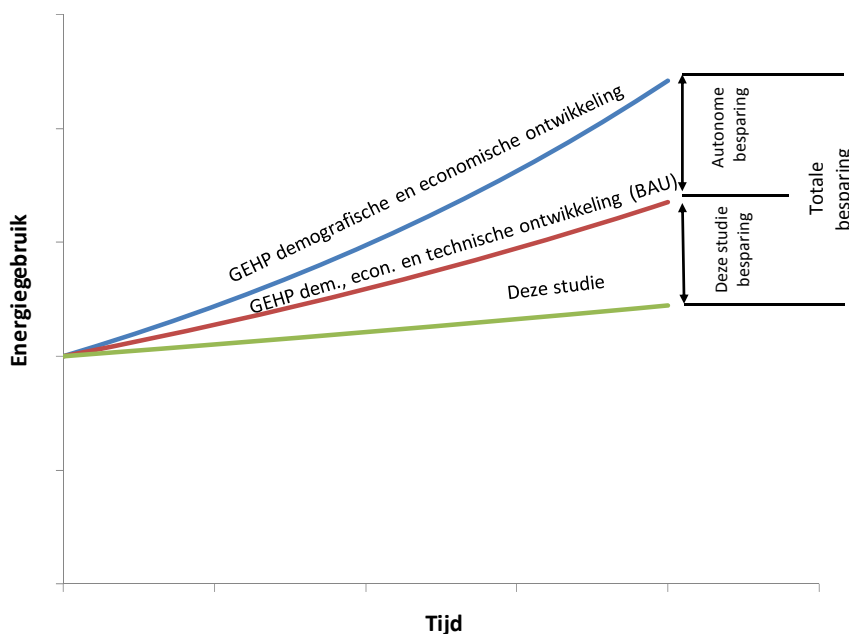
Het is niet de bedoeling in dit rapport de meest waarschijnlijke of meest wenselijke energiehuishouding te beschrijven. Dit rapport dient louter ter illustratie van de aanpak waarin ook consequenties van gemaakte keuzes duidelijk worden.

In hoofdstuk 2 wordt de huidige Nederlandse energiehuishouding beschreven met een projectie naar 2050. Hoofdstuk 3 geeft de visie weer waar dit rapport op is gebaseerd. In hoofdstuk 4 wordt de visie verder uitgewerkt en wordt de ontwerpfilosofie beschreven. Hoofdstuk 5 geeft de resultaten weer van de gehanteerde aanpak en geeft een toekomstig beeld van de Nederlandse energiehuishouding. Tenslotte worden in hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

2. Nederlandse energiehuishouding volgens het GEHP-scenario

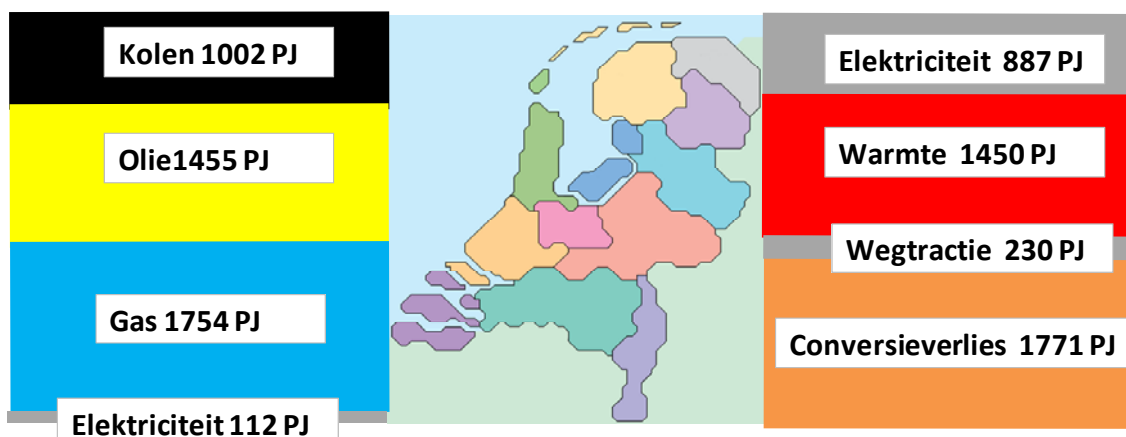
Zoals in de inleiding is aangegeven gaan de meeste studies uit van een groeiende energievraag naar de toekomst. Dat betekent dat de Nederlandse energiehuishouding in 2050 een grotere omvang heeft dan momenteel. In dit rapport wordt gebruik gemaakt van het 'Global Economy – High Price' (GEHP) scenario (Farla, 2006). Dit BAU scenario is een variant van het GE-scenario, dat gekenmerkt wordt door een hoge olieprijs. In dit scenario is onder andere sprake van hoge bevolkingsgroei, hoge economische groei, mondiale vrijhandel en afwezigheid van klimaatbeleid (na 2020). De olieprijs in GEHP bedraagt 40 dollar per vat als gemiddelde olieprijs over de periode van 2015 tot 2040.

Het energiegebruik heeft een sterke correlatie met economische groei. Dat betekent dat met een groeiende economie, het energiegebruik mee zal groeien. Door technologische ontwikkeling en de vervanging van oude technologie door nieuwe, energiezuinige technologie zal de groei van het energiegebruik achterblijven bij de economische groei maar nog steeds groeien. Figuur 2.1 laat zien welke trends er ontstaan indien het energiegebruik gelijk op gaat met de economie (GEHP dem. en econ. ontwikkeling) en indien er autonome besparingen worden gerealiseerd (GEHP dem. econ. en tech ontwikkeling). Het in absolute zin terugdringen van het energiegebruik kan pas indien het besparingspercentage groter is dan de economische groei. Dit is een zeer grote uitdaging die vergaande maatregelen vergt. Ook in dit rapport zal de energievraag nog steeds groeien ten opzichte van de huidige vraag.



Figuur 2.1 *Energiegebruik als functie van de tijd bij verschillende ontwikkelingen*

In het GEHP scenario is het Nederlandse energiegebruik (inclusief autonome besparing) in 2050 gestegen tot 4348 PJ per jaar (exclusief grondstoffen, circa 900 PJ) ten opzichte van 2671 PJ in 2005. Hierin zit een aandeel van 0,4% duurzame energie (16 PJ volgens de substitutiemethode zie hoofdstuk 4) en een import van elektriciteit van 112 PJ. Figuur 2.2 toont de primaire energiedragers + import welke in Nederland worden ingezet aan de linkerzijde en de bestemming daarvan aan de rechterzijde. De bijdrage van duurzame energie is minimaal en is daarom voor de leesbaarheid aan de linkerzijde achterwege gelaten.



Figuur 2.2 Nederlandse energiebalans in 2050, volgens GEHP

Elektriciteit wordt gebruikt voor aandrijving, verlichting en dergelijke. Warmte onder de 100°C wordt vooral in de gebouwde omgeving gebruikt voor klimatiseren en warm tapwater. Het warmtegebruik voor industriële processen vindt plaats op diverse temperatuurniveaus, waarvan het overgrote deel boven 100°C. Wegtractie refereert naar de energie die wordt geleverd door (met name) verbrandingsmotoren in de transportsector. Conversieverliezen zijn verliezen die optreden als de omzetting van de ene naar de andere energiedrager met minder dan 100 % efficiency verloopt, bijvoorbeeld bij een elektriciteitscentrale die aardgas met een rendement van 45% omzet in elektriciteit en 55% conversieverlies als warmte loost.

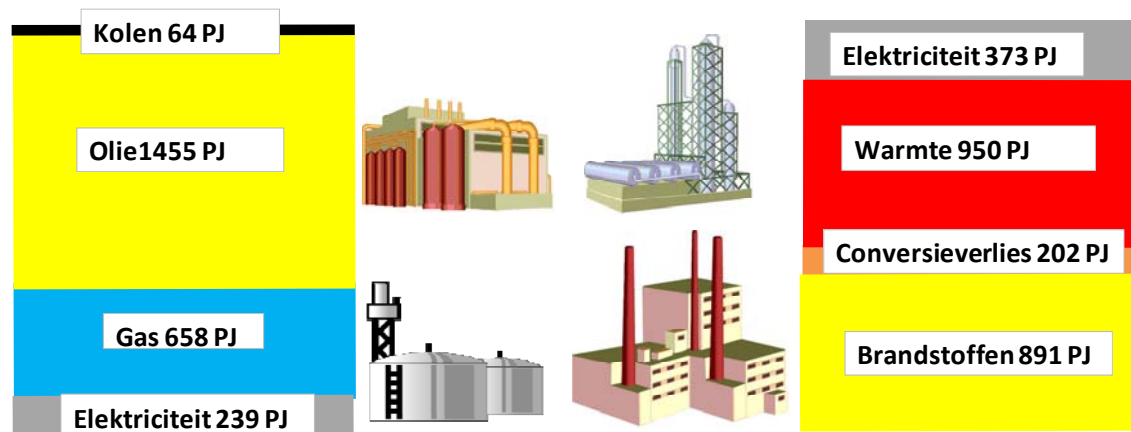
Een tweetal constatering kan worden gemaakt aan de hand van dit figuur. Ten eerste blijkt uit de cijfers voor het warmte- en elektriciteitsgebruik dat in de Nederlandse energiehuishouding de warmtevraag een dominante factor is en daardoor vooral een *warmtehuishouding* is. Van het finale energetische eindgebruik ($894 + 1450 + 230 = 2574$ PJ) is 56% warmte. Ten tweede valt de grote bijdrage van conversieverliezen op. Voor een groot deel zijn dit verliezen die optreden bij de elektriciteitsproductie maar ook het verlies dat optreedt in (vracht)automotoren en in industriële utilitysystemen. Al deze conversieverliezen komen als warmte vrij. Van de 4348 PJ die voor energetische doeleinden wordt gebruikt eindigt 1765 PJ (41 %) nutteloos als restwarmte door conversieverliezen. Het moge duidelijk zijn dat terugdringen van deze verliezen grote prioriteit dient te krijgen.

Vergelijkbare balansen kunnen worden gemaakt voor de verschillende sectoren die in dit rapport worden beschouwd. In Figuur 2.3 is de balans weergegeven voor de elektriciteitssector. De inzet van kolen en gas is overeenkomstig (Farla, 2006). Het gemiddelde rendement van de sector bedraagt 41 %. Dit rendement is vergelijkbaar met het huidige parkrendement en lijkt, gezien de huidige investeringen in nieuwe opwekkingscapaciteit, aan de lage kant maar is vanwege de consistentie overgenomen uit (Farla, 2006). Tevens zit in dit scenario geen kernenergie.



Figuur 2.3 Energiebalans elektriciteitssector 2050, volgens GEHP

In Figuur 2.4 wordt de balans voor de industriële sector weergegeven. De verdeling over de diverse fossiele energiedragers (kolen, olie, gas) is gebaseerd op de verhoudingen zoals die ook in het huidige situatie worden gebruikt. Binnen deze sector is ook de raffinagesector opgenomen. Dit verklaart de hoge olie bijdrage aan de linkerzijde en de productie van brandstoffen aan de rechterzijde. De geëxporteerde brandstoffen en daarvoor geïmporteerde olie worden buiten beschouwing gelaten. Het percentage warmte op het finale eindgebruik ($373 + 950 = 1323$ PJ) bedraagt 72%.



Figuur 2.4 *Energiebalans industrie in 2050, volgens GEHP*

Figuur 2.5 presenteert de energiebalans voor de transportsector. Deze draait grotendeels op brandstoffen, afkomstig uit de raffinagesector. Verder is er een klein deel elektriciteit, met name bedoeld voor het treintransport. Opvallend is hier het grote aandeel conversieverlies. Bij verbrandingsmotoren is een gemiddeld rendement van 25% aangenomen.



Figuur 2.5 *Energiebalans transport in 2050, volgens GEHP*

Van de afzonderlijke sectoren is tenslotte de gebouwde omgeving weergegeven in Figuur 2.6. Deze sector omvat zowel de huishoudens als de dienstensector, maar ook de land- en tuinbouw. In dit schema is niet de bijdrage van bodemwarmte voor warmtepompen (1,5 PJ) en de warmte uit AVI's (4 PJ) opgenomen. De elektriciteitsproductie binnen deze sector ($514 - 392$) is afkomstig uit warmtekrachtcentrales die worden ingezet voor stadsverwarming. Hier vinden ook de grootste conversieverliezen plaats. Daarnaast zijn er conversieverliezen in de CV-ketels. Het aandeel warmte (500 PJ) in het finale eindgebruik bedraagt 49%.



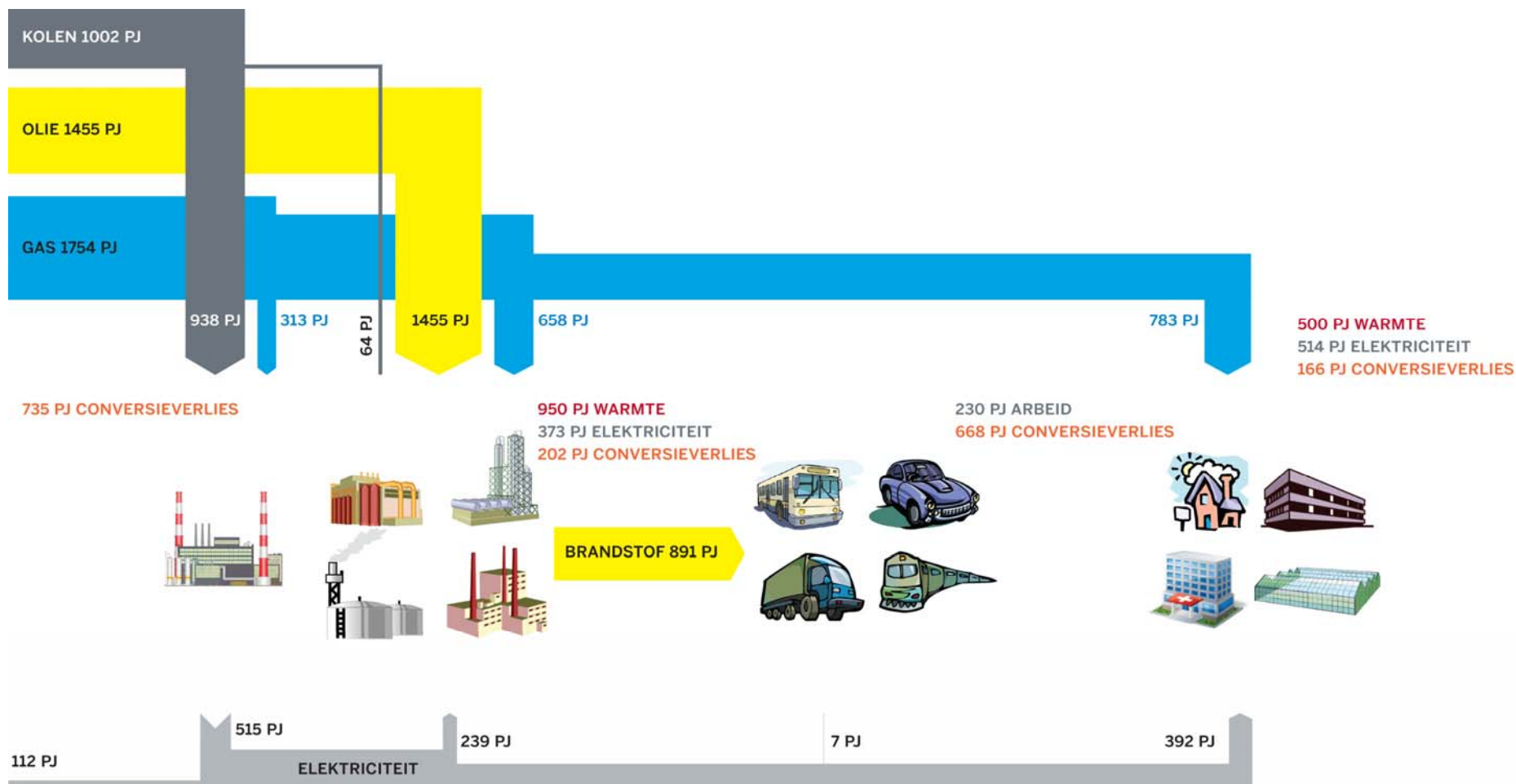
Figuur 2.6 *Energiebalans gebouwde omgeving 2050, volgens GEHP*

Figuur 2.7 geeft een totale weergave van de Nederlandse energiehuishouding in 2050. Hierbij is de grote hoeveelheid fossiele energiedragers die gebruikt wordt als grondstof in met name de (petro)chemische procesindustrie buiten beschouwing gelaten. Dit schema start met de toevoer van primaire energiedragers. Dit zijn energiegrondstoffen in hun natuurlijke vorm vóór enige technische omzetting. Dat zijn bijvoorbeeld steenkool, bruinkool, aardolie, aardgas, uranium, wind, zonnestraling. In de bovenkant van dit figuur staan drie soorten primaire fossiele energiedragers, zijnde kolen, aardolie en aardgas. Deze dragers stromen naar de diverse sectoren die in het midden van de figuur staan. Als sectoren zijn de elektriciteitssector, de industrie, de transportsector en de gebouwde omgeving weergegeven. Binnen deze sectoren vinden conversies plaats waardoor de primaire energiedragers worden omgezet in secundaire dragers zoals elektriciteit, warmte of arbeid. Onderaan de figuur staat de stroom van elektriciteit. Per sector staat aangegeven hoeveel warmte en hoeveel elektriciteit er worden gebruikt. Tevens staan de conversieverliezen gepresenteerd. De warmtelevering van de afvalverwerkingsinstallaties aan de gebouwde omgeving (4 PJ) staat niet weergegeven in dit figuur.

Wat opvalt is de koppeling tussen de diverse sectoren via het elektriciteitsnet en via de productie van brandstoffen voor de transportsector. Dat betekent dat er interactie tussen de sectoren plaatsvindt en dat de diverse sectoren niet onafhankelijk van de anderen kunnen worden beschouwd.

Resumé

- Het GEHP scenario leidt, ondanks technologische ontwikkelingen, tot een groei in het energiegebruik richting 2050. Het energiesysteem in 2050 wordt vrijwel geheel gevoed door fossiele energiedragers.
- Warmte vervult een sleutelrol in de Nederlandse energiehuishouding. Warmte is een lastige energiedrager omdat het (a) slecht is op te slaan vanwege grote benodigde volumes relatief grote verliezen, (b) moeilijk zonder verliezen te transporteren is; en (c) verschillende kwaliteitsniveaus (temperatuur) kent.
- De Nederlandse energiehuishouding is een verspillend systeem. Conversieverliezen vormen een significant deel van de Nederlandse energievraag. De belangrijkste conversieverliezen treden op in elektriciteitscentrales, in tractiemotoren, in industriële utilitysystemen en bij comfortverwarmingssystemen.
- Er is interactie aanwezig tussen de diverse sectoren via het elektriciteitsnet en de productie van transportbrandstoffen door de raffinagesector voor de transportsector.



Figuur 2.7 Nederlandse energiehuishouding in 2050 volgens het GEHP scenario, exclusief grondstoffen

3. Visie

Het is onze visie dat een duurzame energiehuishouding alleen te bereiken is door eerst de energievraag die nodig is voor een gegeven energiefunctie sterk te verminderen, gevolgd door een zo groot mogelijk aanbod van duurzame energie bij de invulling van de resterende vraag.

Vanuit deze visie is door de projectgroep een toekomstbeeld ontwikkeld van de Nederlandse energiehuishouding in 2050. Dit beeld vertrekt vanuit de ongewijzigde gevraagde energiefuncties (comfort, proceswarmte, verlichting, aandrijving), probeert deze met zo min mogelijk energiegebruik in te vullen, ontwerpt het energiesysteem ‘stroomopwaarts’ en eindigt met minimale inzet van fossiele dragers. Vanwege het grote aandeel warmte en de specifieke kenmerken daarvan wordt in deze visie de warmtevraag een leidende rol gegeven. De interacties tussen de diverse sectoren maken het noodzakelijk dat Nederland als een integraal energiesysteem wordt beschouwd.

In deze visie is de gehanteerde aanpak normatief. Dat wil zeggen dat de aanpak leidend is en niet de uitkomst. Dit in tegenstelling tot veel andere energievisies waarbij een gewenste uitkomst (50% CO₂-reductie, 100% duurzaam) wordt vastgesteld. Energievisies wijken af van een scenarioaanpak, waarbij een beeld ontstaat van de energiehuishouding als resultante van veronderstelde uitgangspunten en ontwikkelingen.

In dit rapport is de keuze gemaakt met als eerste doel de inzet van fossiele energie te minimaliseren en niet zozeer het aandeel duurzame energie te maximaliseren. Dit zijn twee verschillende doelen die niet noodzakelijkerwijs tot dezelfde eindsituaties leiden.

In het volgende hoofdstuk wordt deze visie uitgewerkt in een meer concrete ontwerpfilosofie voor het inrichten van het Nederlandse energiesysteem.

4. Ontwerpfilosofie

Om invulling te geven aan de visie van het vorige hoofdstuk en een toekomstbeeld te genereren wordt een ontwerpfilosofie toegepast, die bestaat uit twee delen. Ten eerste wordt een stappenplan gedefinieerd waarlangs de energiehuishouding wordt ingericht met concrete technologieopties. Het doorrekenen van de energiehuishouding gebeurt in het tweede deel, met een Quick-scan model. Beide onderdelen worden in dit hoofdstuk beschreven. Bij het stappenplan worden tevens de uitgangspunten dan wel randvoorwaarden aangegeven. Het hoofdstuk sluit af met een illustratief voorbeeld waarmee de aanpak wordt gedemonstreerd.

4.1 Stappenplan

In de Nederlandse energiehuishouding stroomt energie van aanbod via conversie naar vraag. De meeste studies van energiesystemen volgen deze stromingsrichting. In dit rapport wordt echter een andere aanpak gehanteerd. Deze aanpak gaat stroomopwaarts vanaf de gevraagde functie. Als eerste wordt de behoefte aan energiedragers vanuit de conversiesystemen verminderd door in te grijpen in de vraag. Vervolgens worden de conversiesystemen geoptimaliseerd zodanig dat de conversieverliezen worden teruggebracht. De dan resulterende benodigde vraag naar transporteerbare energiedragers wordt zoveel mogelijk duurzaam ingevuld. Het restant bestaat uit fossiele energiedragers. Dit leidt tot het volgende stappenplan dat uitgaat van de bestaande energiehuishouding en deze volgens de volgende stappen wijzigt:

1. Reductie van de energievraag
In deze stap gaat het om het introduceren van technologieopties die bij gelijkblijvende energie functie (comfortwarmte, proceswarmte, verlichting) minder energie vragen vanuit het conversiesysteem. Daar waar lokale duurzame technologieopties beschikbaar zijn die tot directe functievervulling (zonthermisch, PV) leiden, worden die ook in deze stap meegenomen.
2. Reductie van conversieverliezen
Binnen deze stap worden technologieën geïntroduceerd die tot minder verspilling leiden doordat er een hoger rendement wordt gerealiseerd. Dat kan een betere elektriciteitscentrale zijn, een warmtepomp of een warmtekrachteenheid. Daar waar een warmtepomp bodemwarmte gebruikt, wordt met deze stap ook een deel duurzame energie geïntroduceerd.
3. Inzet duurzame energie
Deze stap betreft grootschalige duurzame energieopties zoals windturbine parken en biomassatoepassingen.
4. Invulling resterende vraag
De nog resterende energievraag wordt met fossiele energiedragers ingevuld. In deze studie wordt geen gebruik gemaakt van kernenergie.

De reden voor de hier gekozen volgorde heeft te maken met het vermijden van lock-in effecten. Bij het starten vanaf de aanbodzijde kunnen investeringkeuzes worden gemaakt die de infrastructuur met het daaraan gekoppelde opwekkingsroute voor vele tientallen jaren vastleggen. Als het systeem eenmaal gedimensioneerd is op de dan optredende energievraag, kan dit een belemmering zijn voor energiebesparing of verduurzaming. Wanneer namelijk de energievraag afneemt in de toekomst, is de infrastructuur overgedimensioneerd en is er dus meer beslag op grondstoffen gelegd dan noodzakelijk. Deze financiële barrière is daarmee tevens een belemmering voor de verbetering van de energiehuishouding.

Het is goed om te realiseren dat de resultaten van eerdere stappen mede de keuzes en het resultaat van de volgende stappen bepalen. Deze onderlinge verwevenheid en beïnvloeding is kenmerkend voor ontwerpvragestukken. Technologieopties moeten robuust en toekomstbestendig zijn.

Voordat het Quick-scan model wordt uitgelegd, worden de binnen dit rapport gehanteerde definities omtrent diverse energiedragers gegeven en de uitgangspunten voor de analyse vastgelegd.

Definities energiedragers

- Finaal: Energie die door eindgebruikers wordt gebruikt.
- Primair: Energie in de vorm zoals wordt aangetroffen in de oorspronkelijk gewonnen energiedrager.
 - ❖ Fossiel: Energie uit kolen, aardgas, aardolie
 - ❖ Duurzaam: Energie uit wind, waterkracht, zon, biomassa en warmte uit de bodem en de buitenlucht

Uitgangspunten

- Het GEHP scenario wordt als referentie gebruikt. De economische structuur blijft ongewijzigd. Dit betekent dat er vanuit wordt gegaan dat dezelfde economische activiteiten worden uitgevoerd als momenteel het geval is. Het GEHP scenario is doorgetrokken naar het richtjaar 2050. Dezelfde aanpak kan ook worden gehanteerd voor ieder willekeurig referentiejaar.
- De gevraagde kwaliteit van de energiefuncties (comfort, communicatie, verplaatsen, productie, etc) blijft onveranderd.
- In de uitwerking van de visie wordt een integrale systeembenadering gehanteerd. Dit zorgt ervoor dat de interactie tussen de diversen onderdelen van het systeem goed worden meegenomen. Tevens leidt deze benadering tot een globaal optimum voor het totale systeem in plaats van lokale optima voor subsystemen. Bij het streven naar een verduurzaming van Nederlandse energiehuishouding is de geografische grens van Nederland als systeemgrens beschouwd.
- Daar waar gelijktijdig warmte en elektriciteit worden gegenereerd, wordt elektriciteit als bijproduct beschouwd. Vanwege de eigenschappen van warmte wordt warmte zo dicht mogelijk bij de eindgebruiker opgewekt.
- Alle genomen maatregelen worden steeds teruggerekend naar het effect op de primaire energiebehoefte. Daarbij is het tot die maatregel gangbare conversiesysteem van belang. Voor de bijdrage van duurzame energie is in de ECN visie de ‘substitutiemethode’ gebruikt die aangeeft hoeveel fossiele energiedragers een duurzame optie verdringt. Dat betekent bijvoorbeeld dat 1 PJ elektriciteitsproductie uit windenergie bij een centrale parkrendement van 40% een hoeveelheid van 2,5 PJ primaire fossiele energiedragers verdringt.
- Voor het elektriciteitssysteem wordt ervan uitgegaan dat alle maatregelen die leiden tot wijzigingen in elektriciteitsverbruik of –productie ten allen tijde kan worden opgevangen. Het elektriciteitsnet vormt daarmee een flexibele ruggengraat van het energiesysteem.
- Bij de uitwerking is naar de energetische en technische aspecten gekeken en nog niet naar de kosten en baten, noch naar emissies.

4.2 Quick-Scan model

Er is een energiebalans van de Nederlandse energiehuishouding opgesteld waarmee inzicht wordt verkregen in wat de consequenties kunnen zijn voor het zichtjaar 2050 ten aanzien van mogelijkheden tot energiebesparing, duurzame invulling en welke technologieopties daarbij een rol spelen. Het bestaat uit drie hoofdelementen:

- Finale gebruikers;
- Functiegebonden conversieprocessen;
- Grootschalige conversieprocessen.

Binnen de finale gebruikers worden drie sectoren onderscheiden op basis van de kenmerken van hun energiebehoefte. Deze sectoren en hun kenmerkende energiebehoefte zijn:

- Industrie, proceswarmte op hoge tot zeer hoge temperaturen
- Transport, wegtractie
- Gebouwde omgeving, comfortwarmte

De verliezen bij het transport van elektriciteit worden als aparte verbruikerspost gemodelleerd. Dit voorkomt complexe toerekening van deze verliezen naar de diverse sectoren eindgebruikers of opwekkers.

De functiegebonden conversieprocessen zijn op de een of andere manier direct gekoppeld aan de individuele finale gebruikers. De koppeling kan bestaan uit bijvoorbeeld (1) een as die de automotor met de wielen verbindt, (2) het leidingsysteem van een verwarmingsketel in een woning, of (3) een stoomleiding die een destillatiekolom verwarmt. De grootschalige conversieprocessen produceren generieke energiedragers zoals elektriciteit en brandstoffen.

In de energiebalans worden de energiedragers warmte, elektriciteit, arbeid en brandstoffen onderscheiden. Het startpunt van de berekening is de behoefte aan finale energiedragers van de finale gebruikers.

De warmte en elektriciteit die in de industrie en de gebouwde omgeving wordt gebruikt, wordt opgewekt met behulp van conversietechnologieën zoals ketels, elektriciteits- of warmtekrachtcentrales. In het quick-scan model zijn deze technologieën gemodelleerd zodat de conversieverliezen die optreden bij het opwekken van finale energiedragers kunnen worden berekend. Door de hoeveelheid finale energiedragers en de conversieverliezen bij elkaar op te tellen wordt de primaire energiebehoefte bepaald.

Hierbij wordt telkens een kwantitatieve beschrijving van de maatregelen gegeven, bijvoorbeeld beperking van een warmtevraag op bepaalde temperatuurniveaus of verbetering van het rendement van een groep conversietechnologieën. Vervolgens wordt met behulp van het Quick-scan model uitgerekend wat het effect van de beschreven maatregelen op het fossiele en duurzame energiegebruik van Nederland is. Met deze informatie wordt ook het aandeel duurzame energie als resultaat weergegeven.

Industrie

Volgens het GEPH scenario gebruiken de industriële processen (inclusief raffinage) elektriciteit (373 PJ) en volcontinu warmte (950 PJ), merendeels op hoge tot zeer hoge (tot hoger dan 1000°C) temperaturen. De industriële warmtevraag is opgedeeld in 4 temperatuurniveaus en is gekoppeld aan industriële conversieprocessen. Voor de hoge temperaturen (> 600°C) is dat directe stook, bijvoorbeeld bij een hoogoven of ondervuring van fornuizen. Bij de lagere temperaturen (< 600°C) wordt de warmte opgewekt in ketels of in warmtekrachtkoppeling. De temperatuurniveaus zijn zodanig gekozen dat deze aansluiten op verschillende typen warmtekrachtkoppelingen. In het model wordt de warmte geleverd door directe stook en warmtekrachtkoppelingen opgegeven, de warmte uit ketels is een sluitpost. De gekozen rendementen van de conversieprocessen leveren de brandstofbehoefte en de elektriciteit uit industriële warmtekracht koppeling. Tenslotte wordt de elektriciteitsvraag van de industrie opgegeven.

Binnen de industrie wordt onder vraagreductie verstaan alle wijzigingen in procesvoering of technologieën die leiden tot verminderde warmtevraag van de primaire processen aan de utilitysystemen van de industrie.

Transport

Binnen de transportsector bestaat de energiebehoefte aan arbeid (230 PJ) in het voertuig. De arbeid nodig voor wegtransport wordt geleverd door benzine-, en diesel-, en elektromotoren. De gekozen rendementen van deze motoren leveren de brandstof- en elektriciteitsbehoefte.

Vraagreductie binnen de transportsector wordt bewerkstelligd met die maatregelen die tot een verminderde vraag aan de (vracht)auto motor zorgt.

Gebouwde omgeving

De woningen, utiliteitsbouw en land- en tuinbouw gebruiken elektriciteit (514 PJ) en seizoensgebonden warmte (500 PJ) op lage temperatuur ($< 100^{\circ}\text{C}$) ten behoeve van klimatiseren. Deze warmte wordt opgewekt met behulp van ketels, micro warmtekracht, warmtepompen of stadsverwarming. Analoot aan de industriële processen wordt de warmte uit micro warmtekracht, warmtepompen en stadsverwarming opgegeven en is warmte uit ketels de sluitpost. De gekozen rendementen van de conversieprocessen leveren de brandstof- en elektriciteitsbehoefte en de elektriciteit uit stadsverwarming en microwarmtekracht. Ten slotte wordt de elektriciteitsvraag van de woningen, U-bouw en land- en tuinbouw opgegeven.

Hoewel er binnen een huis nog vele conversies plaatsvinden van elektrisch naar warmte ((af)wasmachine, droger, koelkast, vriezer) worden deze in dit rapport niet meegenomen. Het enige conversiesysteem voor de gebouwde omgeving dat wordt beschouwd is de opwekking van warmte voor comfort. Reductie van de vraag zijn die maatregelen die er voor zorgen dat er minder warmte wordt gevraagd van het conversiesysteem.

Grootschalige conversieprocessen

De finale gebruikers en de gekoppelde conversieprocessen leveren een vraag naar elektriciteit en brandstoffen. Deze vraag wordt ingevuld door grootschalige conversieprocessen. Hierbij kunnen elektriciteit en brandstoffen uit duurzame bronnen in het model worden opgenomen. Met behulp van de elektriciteit uit centrales wordt de elektriciteitsbalans gesloten en wordt, aan de hand van het opgegeven rendement, de brandstofinzet voor centrales berekend. Tenslotte wordt de hoeveelheid fossiele brandstof berekend uit de som van alle brandstofbehoeften verminderd met de brandstof uit duurzame bron.

4.3 Illustratie van de ontwerpfilosofie

Om een illustratie te geven van de hier gevolgde ontwerpfilosofie wordt een klein energiesysteem opgezet, bestaande uit een woning met een gasaansluiting en een elektriciteitsaansluiting. De elektriciteit komt uit (een heel klein deel van) het centrale park. Deze bestaande woning heeft een jaarlijkse warmtevraag van 45,6 GJ en een elektriciteitsbehoefte van 3500 kWh (12,6 GJ). Het gemiddelde ketelrendement bedraagt 90% en de elektriciteit is afkomstig uit het centrale elektriciteitspark dat een gemiddelde rendement van 40% heeft (inclusief transportverliezen). De jaarlijkse primaire energiebehoefte van dit huis wordt dan $45,6/0,9 = 50,6$ GJ (1600 m^3 aardgas) voor warmte en $12,6/0,4 = 31,5$ GJ voor elektriciteit. Het totaal bedraagt 82,1 GJ.

Stap 1: Reductie van de vraag

De bestaande woning wordt grondig geïsoleerd (dak, muren, vloer) en van dubbele beglazing voorzien. De kieren worden opgespoord en gedicht. De hiermee vervallen natuurlijke ventilatie wordt vervangen door mechanische ventilatie. Voordat de uitgaande lucht naar buiten gaat, wordt warmteterugwinning toegepast, waarmee de binnenkomende lucht wordt voorverwarmd. Er wordt een zonnecollector op het dak geplaatst waarmee jaarlijks 4,8 GJ zonnewarmte wordt verkregen. Tevens is er nog ruimte voor 8 m^2 PV-panelen die een jaarlijks opbrengst genereren van 800 kWh. Tenslotte wordt energiezuinige verlichting toegepast en A++ label apparatuur (wasmachine, droger, afwasmachine, koelkast, vriezer) geïnstalleerd.

De warmtevraag is door al deze maatregelen teruggedrongen tot 8,2 GJ. Het elektriciteitsvraag van het net is gedaald tot 1701 kWh (6,1 GJ). De primaire fossiele energiebehoefte van dit huis is nu teruggebracht tot $(8,2/0,9) + (6,1/0,4) = 24,4$ GJ, een forse reductie ten opzichte van de uitgangssituatie. Het totale primaire energiegebruik bedraagt 37 GJ. Hiervan wordt 12,6 GJ ingevuld met duurzame energie.

Stap 2: Reduceren conversieverliezen

In deze stap worden de conversiesystemen aangepakt. Het huis in het voorbeeld krijgt warmte uit een hoogrendementsketel en elektriciteit uit het centrale park (aangevuld met PV-panelen). De hoogrendementsketel wordt vervangen door een elektrische warmtepomp. Dit systeem heeft een jaarlijks gemiddeld rendement van 4, dat wil zeggen dat per eenheid elektriciteit 4 eenheden warmte worden gegenereerd. In het centrale elektriciteitspark worden alleen nog hoogrendementscentrales toegepast, waardoor het gemiddelde rendement stijgt tot 55%.

Het elektriciteitsvraag vanuit het net neemt door de warmtepomp toe tot van 1701 kWh naar 2278 kWh (8,2 GJ). De primaire fossiele energiebehoefte van het huis is door deze nieuwe conversiesystemen gedaald tot $(8,2/0,55) = 14,9$ GJ.

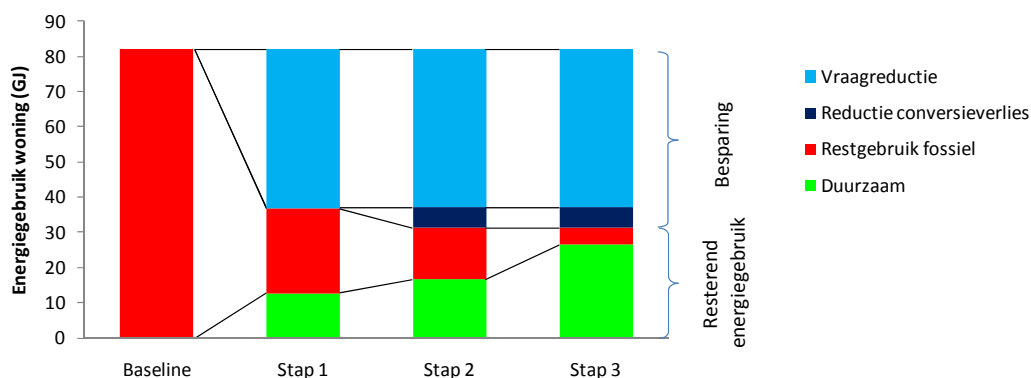
Stap 3 Inzet duurzame energie

Een gedeelte van de duurzame invulling voor een huis is reeds gebeurd in stap 1. Daar gaat het om duurzame energie die ter plekke in een vorm wordt aangemaakt die direct toepasbaar is. In stap 2 komt eveneens een duurzaam aandeel door toepassing van de warmtepomp waarmee bodemwarmte wordt toegepast. In stap 3 kan het aandeel duurzaam nog verder worden verhoogd. Stel dat de centrale elektriciteitproductie voor 33% uit windparken wordt geproduceerd. De overige benodigde elektriciteit wordt uit het centrale park betrokken. De hiervoor benodigde brandstof wordt voor de helft gedekt door synthetisch aardgas vanuit biomassa.

Van de benodigde 8,3 GJ elektriciteit wordt 2,7 GJ door windenergie geleverd. De overige 5,6 GJ komt uit elektriciteitscentrales met een rendement van 55%. Dit vergt een brandstofinzet van 10 GJ. Hiervan is de helft afkomstig van biomassa waardoor de primaire fossiele energiebehoefte daalt tot 5 GJ.

Eindbeeld

Het gevolg van iedere hiervoor beschreven stap is weergegeven in Figuur 4.1. Het energiegebruik van de woning is door het introduceren van vraagreductie en terugdringen van conversieverliezen teruggebracht tot 31,5 GJ/jaar. Daarvan wordt het grootste deel (26,5 GJ) op duurzame manier opgewekt. Het restgebruik fossiel van de woning is gedaald van 82,1 GJ in de uitgangssituatie tot 5 GJ in het eindbeeld.



Figuur 4.1 Aandelen vraagreductie, reductie conversieverlies, duurzaam en resterend fossiel voor een woning

5. Toekomstbeelden 2050

In dit hoofdstuk worden de diverse stappen van voorgestelde methodiek gevolgd voor het Nederlandse energiesysteem. Per stap worden de beoogde maatregelen/technologieën toegepast en de consequenties berekend op het Nederlandse primaire energiegebruik. Tijdens dit proces worden keuzes gemaakt ten aanzien van technologieopties. Om te laten zien hoe deze keuzes doorwerken op het eindbeeld, zijn een tweetal varianten doorgerekend. Deze varianten zijn:

1. Warmtepompen in de gebouwde omgeving, biomassa inzet voor SNG (WPBS)
2. Microwarmtekracht in de gebouwde omgeving, biomassa inzet voor Fischer-Tropsch diesel (WKBF)

De eerste variant wordt per stap besproken. Voor de tweede variant worden alleen de specifieke veranderingen ten opzichte van de eerste variant aangegeven.

5.1 WPBS variant

5.1.1 Stap 1: Vraagreductie

Binnen deze stap wordt per sector gekeken welke opties er zijn om de vraag naar energiedragers terug te brengen zonder in te boeten op de kwaliteit en de kwantiteit van de energiefuncties.

Gebouwde omgeving

Deze sector betreft in dit rapport zowel huishoudens, de dienstensector alsmede de land- en tuinbouw. In het GE-HP scenario wordt uitgegaan van een warmtebehoefte van 500 PJ voor deze sectoren gezamenlijk.

De getallen voor de vraagbeperking zijn gebaseerd op de analyses uit het 'Building Future' programma [Visser 2009]. In de gebouwde omgeving wordt de warmtevraag teruggedrongen door toepassing van passief huis concepten, waarin ruimte is voor isolatiemaatregelen en warmteterugwinning (uit zowel ventilatie als tapwater). De analyses geven aan dat er op termijn 64% kan worden bespaard op de warmtevraag in de woning- en utiliteitsbouw. Hetzelfde percentage is toegepast op de land- en tuinbouw. Dit resulteert in een vraagreductie van 320 PJ per jaar. Dit is een extra vraagreductie ten opzichte van de reeds aangenomen autonome besparing in het GE-HP scenario.

Duurzame warmte uit zon, in combinatie met opslag, en geothermie wordt in de eerste stap meegenomen omdat het voor het effect op het energiesysteem 'Nederland' niet uitmaakt of de resterende warmtevraag, die met conversietechnologie moet worden ingevuld wordt verminderd door bijvoorbeeld isolatiemaatregelen of door warmte uit bijvoorbeeld zonnecollectoren. In dit geval wordt direct gebruik van zonnewarmte middels zonnecollectoren toegepast. Dit levert 80 PJ per jaar op.

Woningen worden voor het grootste deel verwarmd door gasketels met een rendement van 90% en voor een kleiner deel door stadsverwarming. Aangenomen wordt dat bij het verminderen van de vraag de verdeling tussen de gasketels en stadsverwarming hetzelfde blijft.

Tenslotte wordt hier ook nog een besparing op elektriciteitsverbruik meegenomen. Dit is alleen gedaan voor de huishoudens. Door toepassing van efficiënte apparaten (op basis van labelsysteem, stand-by sluipverbruik, Led verlichting en dergelijke), vraaggestuurde toepassing (bijvoorbeeld slimme straat- of kantoorverlichting, aanwezigheidsdetectie) en consumentenvoorlichting ('licht uit!') wordt de elektriciteitsvraag met 53 PJ per jaar teruggebracht. Vervolgens wordt het potentieel aan duurzame elektriciteit uit PV-panelen die in de gebouwde omgeving kunnen worden geplaatst, hier meegenomen. Volgens (Noord, 2003) bedraagt dit potentieel 118 PJ.

In primaire energie termen leiden bovenstaande maatregelen resumerend tot een besparingsbijdrage van 443 PJ per jaar en een duurzame bijdrage van 375 PJ.

Industrie

Een inschatting maken van de mogelijkheden voor vraagreductie in de industrie is geen eenvoudige opgave. De diversiteit aan processen laat het over het algemeen niet toe om generieke maatregelen te identificeren. De industriële vraagbeperking is gericht op de dominante warmtevraag. De industriële warmtevraag wordt zodanig naar verschillende temperatuurniveaus gecategoriseerd dat deze aansluiten op de mogelijkheden van verschillende types warmte-krachtkoppeling. Voor ieder temperatuurniveau is een schatting van de vraagbeperking gemaakt. Deze schattingen zijn gebaseerd op een combinatie van:

- Doorlichtingen van individuele industriële processen waarvan de resultaten generiek voor een gehele branche worden gemaakt;
- Technologieontwikkelingen waarvan het toepassingspotentieel en besparingspotentieel is geschat, bijvoorbeeld voor nieuwe chemische reactoren en katalysatoren, nieuwe scheidingstechnieken, vergaande warmte-integratie en toepassing van warmtepompen.

Bij het terugdringen van de energievraag in industriële processen kan gebruik worden gemaakt van het schillenmodel. Hierbij worden eerst verbeteringen gezocht in het hart van het proces gevolgd door de schillen daaromheen.

Op basis hiervan is door ECN deskundigen ingeschat dat er tussen de 30-35% besparing mogelijk is op het huidige warmtegebruik in de industrie. Daarvan wordt in het GE-HP scenario circa 15% op autonome wijze ingevuld. Daarmee blijft een additioneel potentieel van 15-20% over. De warmtebesparing in de industrie wordt op basis van deze benadering ingeschat op 170 PJ per jaar. Met de bestaande industriële utility systemen met een rendement van 88% resulteert dit in een besparing op het primaire energiegebruik wordt van 193 PJ per jaar. Impliciete aanname hierbij is dat het terugdringen van de vraag volledig voor rekening van de directe stook in ketels komt.

Voor de vraagreductie bij het industriële elektriciteitsgebruik is de ontwikkeling volgens GEHP aangehouden en wordt geen extra besparing ingeboekt.

Transport

In principe zijn er in de transportsector ook mogelijkheden om de vraag te reduceren. Daarbij kan worden gedacht aan het optimaliseren van logistiek, het kritisch beoordelen van woon-werk situatie en daaruit voortvloeiende transportbehoefte, de mogelijkheid tot carpoolen en consumentenvoorlichting ('het nieuwe rijden'). In dit rapport is echter aangenomen dat deze opties zijn meegenomen in de autonome besparingen binnen het GEHP scenario en zijn geen additionele opties meegenomen.

Grondstoffen

Ook hier zijn opties aanwezig voor vraagreductie, zoals hergebruik van 'welvaartsresten', recycling, nieuwe materiaalzuinig industriële processen en consumentenvoorlichting. In dit rapport zijn de grondstoffen echter buiten beschouwing gelaten.

5.1.2 Stap 2: Reductie van conversieverliezen

In deze stap worden de conversieprocessen aangepakt. Voordat de conversiesystemen in de eindgebruikersectoren worden bekeken wordt eerst het centrale elektriciteitsproductie park verbeterd.

Elektriciteitssector

Met centrale elektriciteitsopwekking wordt de ontbrekende elektriciteit tussen vraag (woningen, diensten, industrie etc.) en aanbod (industriële warmtekracht, zon-PV, wind, etc) opgewekt. In de berekeningen is een conversierendement van 52,5% gehanteerd, gebaseerd op 75% kolencentrales met een rendement van 50% en 25% STEG gascentrales met een rendement van

60%. De verhouding tussen kolen- en gascentrales is gelijk gehouden aan het referentie GEHP scenario. Uiteraard zijn de rendementen wel sterk verbeterd ten opzichte van dat scenario.

Gebouwde omgeving

De warmtevraag in de gebouwde omgeving is bij de eerste stap teruggebracht tot 100 PJ per jaar. Er wordt nog 22 PJ aan warmte uit stadsverwarming afkomstig van huisvuilverbranding en elektriciteitopwekking geleverd. De resterende warmtebehoefte is de 'ruimte' voor micro warmtekracht of warmtepompen. Het verschil tussen het energiegebruik van deze opties hangt af van de gehanteerde rendementen. Een micro-warmtekracht systeem met een hoog elektrisch rendement ($> 30\%$) presteert beter dan een warmtepomp, die echter weer minder energie gebruikt dan een micro-wkk systeem met een laag elektrisch rendement ($< 15\%$). In dit rapport is voorlopig een keuze gemaakt voor de warmtepomp als technologie voor het opwekken van warmte voor de warmtevraag in de gebouwde omgeving. Daarbij wordt een elektrische warmtepomp met een jaargemiddeld rendement van 5,4 toegepast.

Industrie

Bij de aandrijving van industriële processen is het belangrijk dat de warmte wordt aangeboden op het temperatuurniveau dat nodig is. De verbranding van brandstoffen levert in veel gevallen een veel hogere temperatuur dan noodzakelijk. In die gevallen kan een warmte-krachtinstallatie worden toegepast die de hoge temperatuur warmte bij verbranding omzet in elektriciteit. De tevens gegenereerde lagere temperatuur warmte is nog steeds van voldoende temperatuur om een industrieel proces aan te drijven. Ten opzichte van het GEHP scenario wordt verhoging van de opbrengst van warmtekracht gerealiseerd door verbeterd totaal rendement, verbeterd conversierendement naar elektriciteit en een groter deel van de industriële warmtebehoefte uit warmtekracht. Niet alle processen lenen zich voor een warmte-krachtinstallatie. Soms is het vereiste temperatuurniveau dermate hoog dat dit niet met een warmtekracht kan worden gerealiseerd. Net als in GEHP wordt de resterende industriële warmte ingevuld door directe stook. Aangenomen wordt dat 50% van de warmte tussen 200 en 600°C met behulp van een warmtekrachtsysteem gebaseerd op een gasturbine wordt geleverd. De hierbij gehanteerde conversierendementen zijn 38% naar elektrisch en 45% naar warmte. Van de benodigde warmte op een temperatuurniveau onder de 200°C wordt verondersteld dat 80% kan worden geleverd door een STEG warmtekracht. Hierbij wordt 45% naar elektriciteit omgezet en 45% naar warmte.

Een tweede effect dat het energiegebruik in de industrie reduceert is het verminderde brandstofverbruik in de transportsector (zie onder). Hierdoor reduceert het energiegebruik in de raffinagesector. Deze energiereductie is berekend op 21 PJ per jaar. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat de Nederlandse raffinagesector niet alleen voor Nederland transportbrandstoffen produceert.

De warmtevraag in de industrie na de eerste stap bedroeg 780 PJ. Dit reduceert tot 759 PJ wanneer de verminderde raffinage wordt meegenomen. Deze warmtevraag wordt vervolgens met de WKK opties ingevuld zoals hierboven beschreven. Dit leidt tot het wellicht tegenstrijdige resultaat dat primaire energiegebruik van de industrie stijgt. Echter, door het grote aandeel WKK in de warmteproductie wordt ook veel meer elektriciteit gegenereerd dan in de uitgangssituatie. Hierdoor kan de elektriciteitsproductie van het centrale park afnemen, hetgeen voor het Nederlandse energiesysteem uiteindelijk tot een vermindering van het energiegebruik leidt.

Transport

De verbrandingsmotor is voor het wegtransport de dominante aandrijftechnologie. In de verbrandingsmotor komt ongeveer 25% van de toegevoerde brandstof als arbeid aan de wielen, de resterende 75% gaat als restwarmte verloren. De keten elektriciteitscentrale (rendement 52,5%) - accuopslag (rendement 90%) – elektromotor (rendement 90%) heeft een totaal rendement van circa 45%. In deze analyse wordt aangenomen dat de helft van het wegtransport in 2050 elektrisch zal zijn.

5.1.3 Stap 3: Inzet van duurzame energie

In deze stap worden de effecten van de opwekking van elektriciteit uit wind en toepassing van biomassa in de beschouwing betrokken. De inzet van kleinschalige, direct inzetbare duurzame energie in de vorm van zonthermisch en zon-PV is reeds in stap 1 meegenomen.

Windenergie

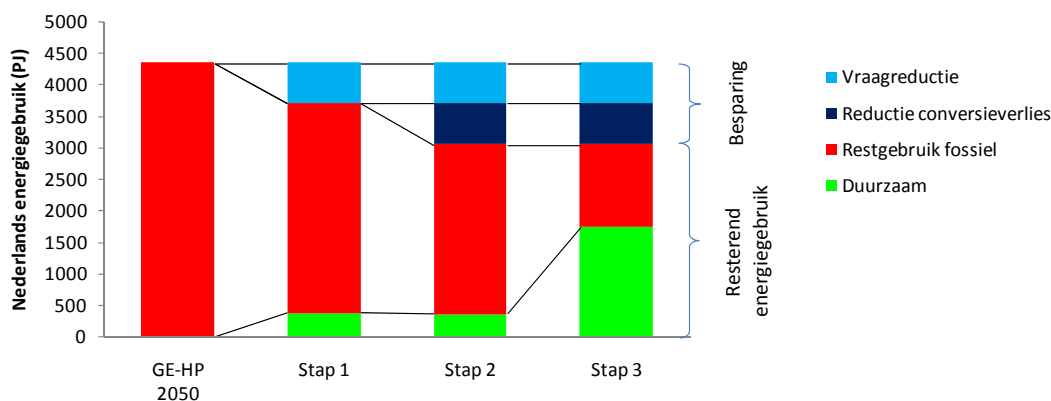
De getallen voor elektriciteit uit wind zijn ontleent aan (Noord 2003). Dit rapport noemt potentiële van 324 PJ_E uit wind op zee en 30 PJ_E uit wind op land. Dit resulteert dus in 354 PJ_E duurzaam uit windenergie. Op basis van het parkrendement van 52,5% komt dit overeen met een primaire energiereductie van 674 PJ.

Biomassa

Volgens (Rabou 2006) is het mogelijk om het Nederlandse energiesysteem jaarlijks van 912 PJ biomassa te voorzien. Er zijn verschillende opties voor de conversie van biomassa naar de uiteindelijk gewenste energiedrager. Ten behoeve van dit rapport zijn directe stook in een WKK, productie van Fischer-Tropsch (FT) diesel, synthetisch aardgas (SNG) en bioethanolproductie beschouwd. In deze variant wordt SNG productie beschouwd. De 912 PJ aan biomassa kan worden omgezet in 638 PJ SNG. Dit is echter meer dan de jaarlijkse behoefte aan aardgas in het resulterende energiesysteem. Daarom is de biomassa inzet teruggeschaald tot de benodigde hoeveelheid aardgas. Er wordt 883 PJ biomassa omgezet in 617 PJ SNG. Daarnaast komt er nog 221 PJ aan warmte beschikbaar bij het SNG proces die nog bruikbaar is in industriële productieprocessen. Deze warmtestromen verdringen een groot deel van het industriële warmtekrachtvermogen dat in de voorgaande stap is geïntroduceerd. Voorwaarde voor het toepassen van de warmte uit het SNG proces is dat de SNG fabrieken in de nabijheid van industriële processen worden gevestigd. Verder zal een groot deel van de biomassa moeten worden geïmporteerd. De aard van de biomassa en de herkomst wordt hier niet verder besproken.

5.1.4 Eindbeeld

In Figuur 5.1 staat het effect van iedere stap weergegeven ten opzichte van de uitgangssituatie GEHP 2050. Het uiteindelijke energiegebruik is teruggebracht van 4348 PJ naar 3049 PJ. Dit gebruik is teruggebracht door zowel vraagreductie (636 PJ) als reductie van de conversieverliezen (662 PJ). Van de uiteindelijke energievraag wordt ruim de helft (1747 PJ) door duurzame energieopties ingevuld en 1302 PJ door restgebruik van fossiele energie. Hoewel dit systeem nog steeds fossiele energiedragers nodig heeft is de afhankelijkheid daarvan sterk teruggebracht. Wat nog opvalt in dit figuur is de daling van het aandeel duurzaam van Stap 1 naar Stap 2. Dit heeft te maken met het introduceren van hoogrendementscentrales in de elektriciteitssector. Hierdoor verdringt een hoeveelheid duurzame elektriciteit minder primaire fossiele energie.



Figuur 5.1 Aandelen vraagreductie, reductie conversieverlies, duurzaam en resterend fossiel voor het Nederlandse energiegebruik in de WPBS variant

In Figuur 5.2 staat weer de totale Nederlandse energiehuishouding weergegeven (exclusief grondstoffen) met de instroom van fossiele energiedragers olie, gas en kolen, maar ook de input van duurzame bronnen zoals biomassa, windenergie, zon-thermisch, zon-pv en bodemwarmte. Niet weergegeven in dit schema (maar wel meegenomen in de berekeningen) is het feit dat de warmte die vrijkomt bij het omzetten van biomassa in SNG direct wordt toegepast in de industrie. Uit dit figuur blijkt dat de gasvoorziening voor een groot deel wordt gedekt door SNG productie. De rol van kolen en aardgas is voor meer dan de helft teruggedrongen ten opzichte van de oorspronkelijke situatie. Dit effect is veel minder sterk bij olie, waar in de industrie en in de transportsector nog steeds veel behoefte aan is.

Ten opzichte van het afnemen van de stromen fossiele energiedragers is ook zichtbaar dat de elektriciteitsstroom groter is geworden. Elektriciteit heeft aan belang gewonnen. Dit belang komt niet alleen tot uiting in de groter wordende stroom maar ook in de aanname die is gedaan dat alle fluctuaties aan de aanbodzijde (bij duurzame bronnen) door het elektriciteitsstelsel kunnen worden opgevangen.

Ten slotte is zichtbaar dat de conversieverliezen sterk zijn teruggedrongen. Het Nederlandse energiesysteem dat op deze wijze wordt ingericht is een veel minder verspillend systeem geworden.

5.2 WKBF variant

In deze variant is er voor gekozen om in plaats van warmtepompen in de gebouwde omgeving de warmtevoorziening te laten plaatsvinden middels microwarmtekracht op basis van een brandstofcel. Daarnaast is de keuze gemaakt om biobrandstoffen ten behoeve van transport vanuit biomassa te maken.

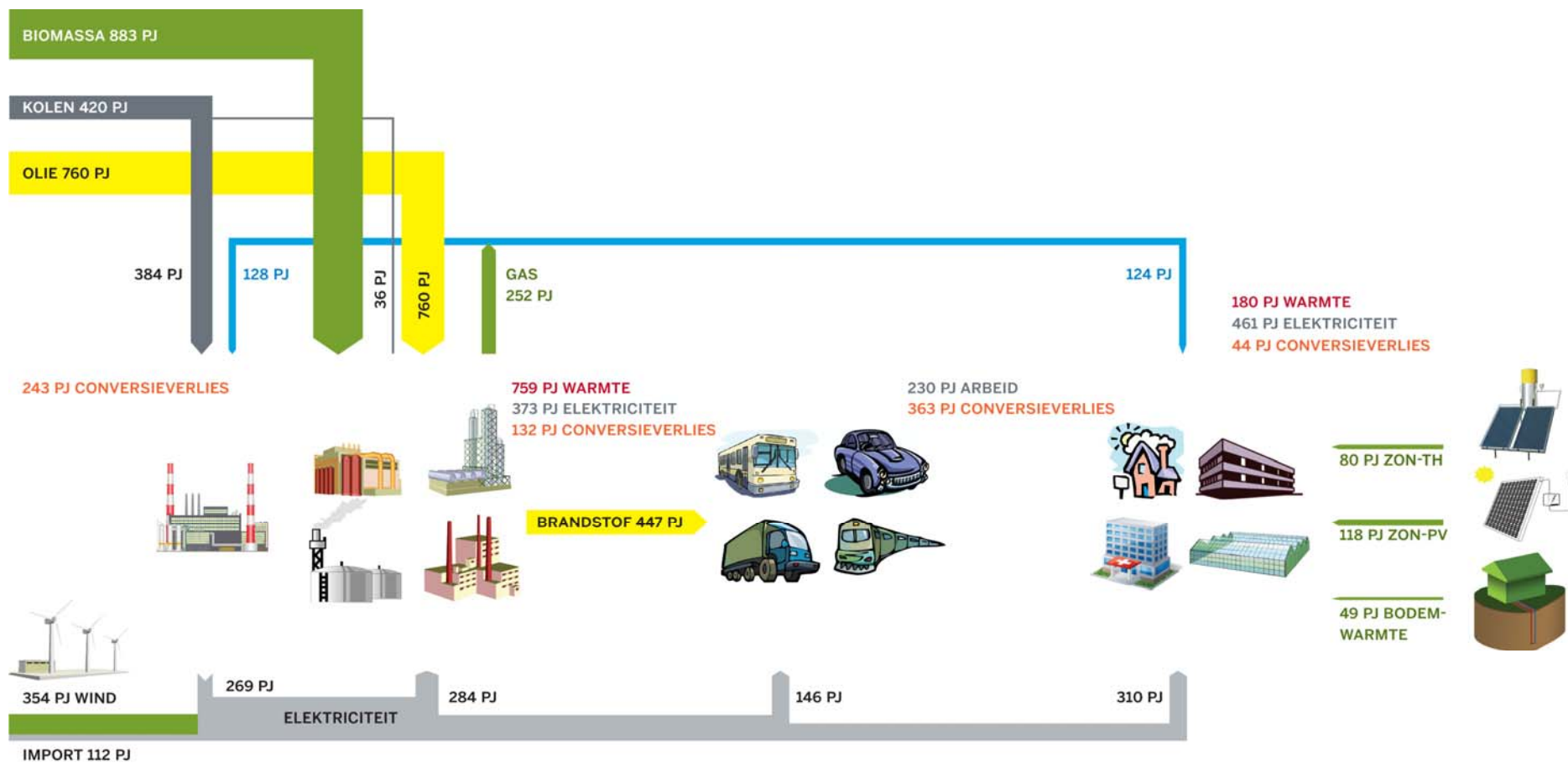
Deze twee keuzes hebben geen consequenties voor de eerste stap: vraagreductie. De introductie van microwarmtekracht heeft gevolgen voor stap 2. Van de 100 PJ warmtebehoefte voor de gebouwde omgeving die in de vorige variant werd geleverd door HR-ketels, stadsverwarming en een (klein) deel warmtepompen wordt aangenomen dat er 60 PJ wordt geleverd door microwarmtekracht systemen. Dit gaat gepaard met een elektriciteitsproductie van 82 PJ per jaar. Gecombineerd met de keuze in deze variant om geen elektrisch vervoer in te voeren, leidt dit tot een forse afname van elektriciteitsproductie door het centrale park.

Tenslotte wordt in stap 3 de biomassa ingezet voor motorbrandstoffen in plaats van SNG in de vorige variant. Hiervoor wordt wederom 912 PJ biomassa ingezet. Tevens vraagt dit proces 34 PJ aan elektriciteit. De output van het FT proces resulteert in 488 PJ biobrandstoffen, 315 PJ aan warmte voor industriële processen en 39 PJ aardgas. In deze variant verdringt de

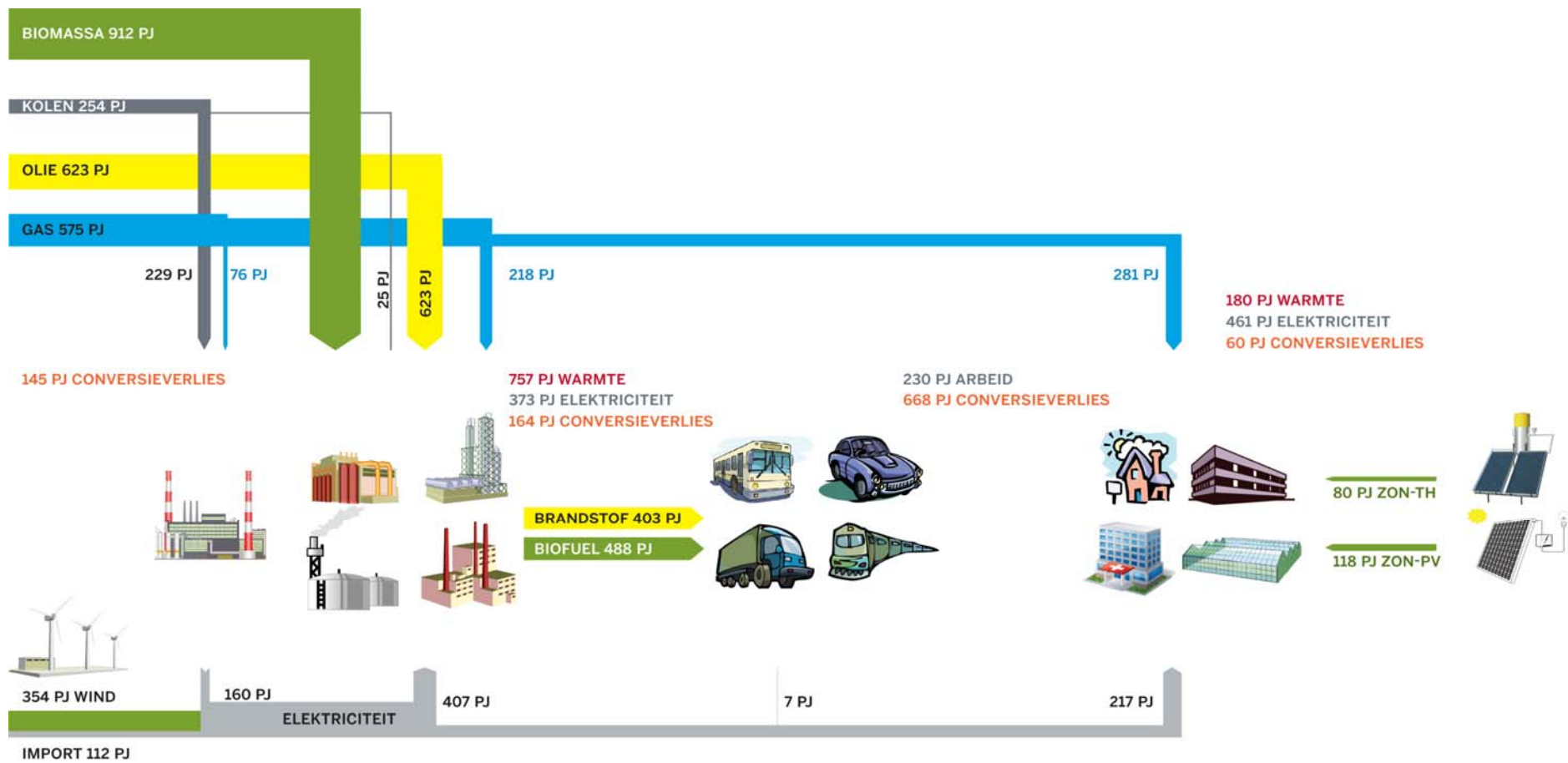
warmteproductie uit het FT proces de inzet van industriële warmtekracht volledig. Er is zelfs nog warmte over die niet nuttig kan worden ingezet. De conversieverliezen van deze omzetting bedragen 104 PJ.

De eindresultaten in termen van bijdragen van vraagreductie, reductie conversieverlies en aandeel duurzaam verschillen niet heel sterk van de vorige variant. Het uiteindelijke energiegebruik in deze variant is teruggebracht van 4348 PJ naar 3187 PJ. Dit gebruik is teruggebracht door zowel vraagreductie (636 PJ) als reductie van de conversieverliezen (524 PJ). Van de uiteindelijke energievraag wordt iets meer dan de helft (1653 PJ) door duurzame energieopties ingevuld en 1534 PJ door fossiele energiedragers.

In dit systeem is elektriciteit vooral belangrijk voor industrie, door het wegvallen van de eigen WKK-productie. De centrale elektriciteitsproductie is sterk verminderd tot 160 PJ. Dit is slechts 18% van het totale elektriciteitsverbruik. De vraag is of de centrale productie voldoende is om het systeem regelbaar te houden met alle decentrale en duurzame opwekkers.



Figuur 5.2 Het Nederlandse energiesysteem in 2050 in de WPBS variant



Figuur 5.3 *Het Nederlandse energiesysteem in 2050 in de WKBF variant*

6. Conclusies en aanbevelingen

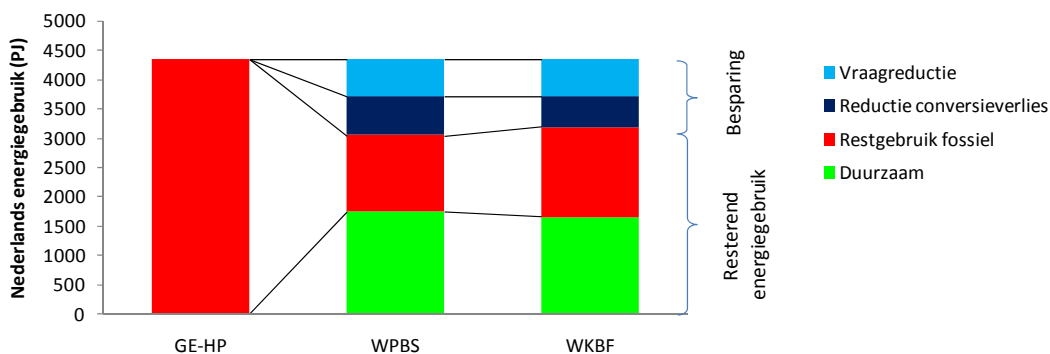
6.1 Conclusies

Uit de in dit rapport gevolgde aanpak blijkt dat een volledig duurzame Nederlandse energiehuishouding in 2050 niet mogelijk is op basis van nu bekende technologische mogelijkheden. Ondanks het feit dat met name in de gebouwde omgeving, de transportsector en duurzame opwekking vergaande maatregelen zijn genomen, wordt nog steeds een significant deel van de Nederlandse energiehuishouding voorzien van fossiele energiedragers.

De resultaten laten zien dat verhoging van de energie efficiency (vraagreductie en reductie conversieverliezen) en de inzet van duurzame energie in ongeveer gelijke mate bijdragen aan de verduurzaming van de energiehuishouding. Ruwweg kan worden gesteld dat de oorspronkelijke energiebehoefte voor $\frac{1}{3}$ wordt gereduceerd door energiebesparing, voor $\frac{1}{3}$ wordt ingevuld met duurzame energie en voor $\frac{1}{3}$ met fossiele energiedragers.

De bijdrage van warmte en restwarmte (conversieverliezen) is sterk teruggedrongen in de berekende eindbeelden. In absolute zin is de energie benodigd voor warmte en die verloren gaat als restwarmte (conversieverliezen) vrijwel gehalveerd ten opzichte van de Ausgangssituation. Ook in relatieve zin is de bijdrage van deze termen afgenomen.

De twee in dit rapport doorgerekende varianten laten nog steeds een stijging van het energiegebruik zien ten opzichte van de huidige situatie, zij het veel minder dan de BAU scenario's. Daar waar het BAU scenario uitkomt op 4348 PJ komen de twee varianten uit op respectievelijk 3049 PJ en 3187 PJ. Het duurzame aandeel wordt berekend op 1747 PJ (57%) en 1653 PJ (52%). De lokale opwekking van duurzame energie bedraagt respectievelijk 358 PJ en 314 PJ (vermeden fossiele energie). Beide varianten staan in Figuur 6.1 weergegeven ten opzichte van het referentie GEHP scenario.



Figuur 6.1 Aandelen vraagreductie, reductie conversieverlies, duurzaam en resterend fossiel voor het Nederlandse energiegebruik ten opzichte van het GEHP scenario in de WPBS en WKBF varianten

Ondanks het feit dat de invulling van de warmtevraag leidend is in dit rapport, komt uit de berekeningen van allerlei varianten van het energiesysteem 'Nederland' als constante factor naar voren dat een elektriciteitsnetwerk en –voorziening die in staat is om een wisselende vraag met een wisselend aanbod te af te stemmen (*smart grids*) een noodzakelijke voorwaarde is voor een efficiënt en duurzaam energiesysteem. Het versterken van een intelligente elektrische infrastructuur (het regelen en afstemmen van opwek, vraag en opslag van elektriciteit en warmte) is daarom een integraal onderdeel van de visie.

Integraal systeemontwerp is een cruciaal element in de gedachtevorming over een duurzame Nederlandse energiehuishouding. Implementeren van technologieopties en beleidsmaatregelen zijn geen losse elementen maar moeten passen binnen een consistent beeld van het energiesysteem. De hier gepresenteerde visie op de aanpak van het systeemontwerp (starten bij de finale vraag) verkleint het risico van lock-in effecten.

Het ontwikkelde Quick-scan rekenmodel is een snelle tool om inzicht te krijgen in het effect van de inzet van technologieopties op de verduurzaming van het integrale energiesysteem, vooral met betrekking tot beperken van conversieverliezen.

6.2 Aanbevelingen

Dit rapport geeft een eindbeeld weer en niet een tijdspad naar dit eindbeeld. Het verdient aanbeveling een dergelijk tijdspad uit te werken. Daarbij moet het gewenste eindbeeld een grote rol spelen om te voorkomen dat er lock-in effecten ontstaan en het gewenste systeem onhaalbaar maken. Technologieopties moeten robuust en toekomstbestendig zijn. Vanuit die visie kunnen ook onderwerpen en technologie worden geïdentificeerd waarin Nederland zinvol haar positie kan versterken. Het is daarbij van belang ook noodzakelijke onderzoekcompetenties en -infrastructuur vast te stellen.

De haalbaarheid van het hier gepresenteerde ontwerp van de Nederlandse energiehuishouding dient nader te worden onderzocht. Immers, technische potentiëlen zijn niet voldoende om een dergelijk systeem te realiseren. Meer specifiek zou aandacht moeten worden besteed aan:

- Een nadere kostenbeschouwing, waarbij de meerkosten van de opties (bijvoorbeeld ten opzichte van het GEHP scenario) bepaald worden en de kosten en baten van de geproduceerde energie op basis van gegevens over investeringen, levensduur, onderhoud, brandstofprijzen berekend worden. Dan kunnen de opties naast een energetische ranking ook een economische ranking krijgen.
- Wat de effecten zijn van de diverse technologieën op ruimtebeslag bij bijvoorbeeld toepassen van zon-thermisch en zon-PV?
- Gaan er problemen optreden bij de import van grote hoeveelheden biomassa?
- De diverse potentiëlen zijn nu afkomstig uit een diversiteit aan bronnen, die niet altijd op dezelfde wijze tot een potentieel komen. Daarom zouden de diverse potentiëlen op een consistente wijze worden ingeschat.

Het belang van elektriciteit neemt in alle berekende beelden toe. De ontwikkeling van een intelligent elektriciteitsnetwerk dat in staat is om een wisselende vraag met een wisselend aanbod te af te stemmen (*smart grids*) biedt een uitgelezen kans voor Nederland om in deze innovatie een positie te verwerven.

Ondanks het feit dat er in het gepresenteerde beeld al een grote reductie tot stand is gebracht in het gebruik van fossiele brandstoffen, zijn er nog meer mogelijkheden die in dit rapport nog niet zijn meegenomen. Zo is er nog niet gekeken naar vraagreductie van elektriciteit in industrie en niet naar vraagreductie bij transport. Daarnaast is het mogelijk om met nieuwe procesvoering en verdergaande vorm van recycling ook het gebruik van energiedragers als grondstof terug te dringen. In de huidige analyse is dit gebruik niet meegenomen. In datzelfde kader kan ook het gebruik van biomassa als grondstof worden geanalyseerd.

Referenties

- Farla, J., Mulder, M. et al., *Achtergronddocument Energie bij Welvaart en Leefomgeving* (WLO), http://www.welvaartenleefomgeving.nl/pdf_files/A06_Energie.pdf, 2006.
- Uyterlinde, M.A. et al. , *De belofte van een duurzame Europese energiehuishouding, Energievisie van ECN en NRG*, ECN-E-07-061, augustus 2007.
- Noord, M. de, Beurskens, L.W.M., Vries, H.J. de, *Potentials and costs for renewable electricity generation : A data overview*, ECN Policy Studies, ECN-C--03-006, February 2004.
- Rabou, L.P.L.M., Deurwaarder, E.P., Elbersen, H.W., Scott, E.L., *Biomassa in de Nederlandse energiehuishouding in 2030*, rapport Platform Groene Grondstoffen, januari 2006.
http://www.senternovem.nl/energietransitiegg/documentatie/downloads_rapporten_en_achtergrondinformatie.asp
- Visser, H. et al., *Sustainable energy concepts for residential buildings- packages for current and future techniques for an energy neutral built environment in 2050*.