

De energievoorziening
van Nederland
Vandaag (en morgen?)



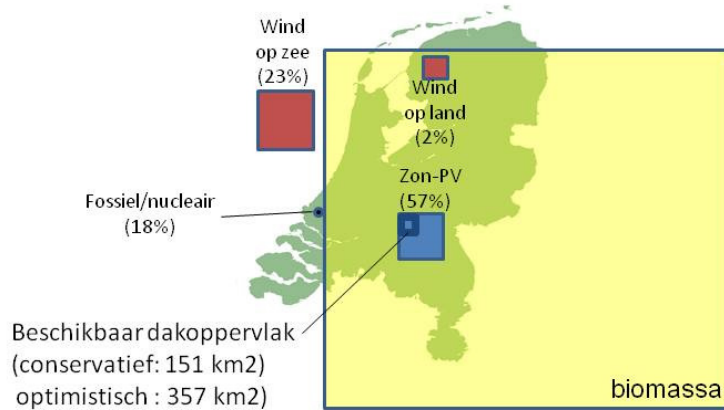
*Blijvend in
bewerking*



Ir. C. Hellinga
TU Delft, Delft Energy Initiative
KIVI NIRIA Stuurgroep Energie

Arnhem, 6 oktober 2010

	km ²	% NL grond
Windland (4 GWi)	- 500	1,5
Windzee (24 GWi)	- 3318	(9,6)
Zon PV (270 GWi)	- 2190	6,4
Biomassa	- 109000	320



Procenten : inzet tbv de geraamde elektriciteitsvraag in 2050
(380TWh/jaar = 1360 PJ/jaar = 63 kWh/p/d)

De energievoorziening van Nederland Vandaag (en morgen?)

Een uitgave ter gelegenheid van het jaarcongres van KIVI NIRIA 'Duurzaam omgaan met energie'.
Ir. C. Hellinga (TU Delft Energy Initiative, Stuurgroep Energie KIVI NIRIA)
Copyright: KIVI NIRIA, TU Delft 2010

U wordt van harte uitgenodigd dit document met bronvermelding te gebruiken.
Dit boekje is bedoeld om inzicht te geven in de huidige en wellicht toekomstige energievoorziening.
Reacties: energie@kiviniria.nl

Meer informatie: www.kiviniria.nl/energie en www.energie.tudelft.nl

Inhoudsopgave

Inleiding	3	
Samenvatting	5	
Deel I De inzet van energiedragers in Nederland anno 2008	7	
I.1	Totaaloverzicht	7
I.2	Eenheden en energiegebruik per Nederlander	9
I.3	Energiegebruik per sector	10
I.4	Bestemming van de energiedragers	11
I.5	Energiegebruik per sector – detaillering	11
I.6	Type energiebehoefte in 2008	13
Deel II Kunnen we in een duurzame energievoorziening gaan voorzien met wind, zon en biomassa van Nederlandse bodem?	14	
II.1	Inleiding	14
II.2	Aannames ten aanzien van de toekomstige energiebehoefte (2050)	15
II.3	Inzet van duurzame energiebronnen voor de geraamde energievraag	18
II.4	Corresponderende oppervlaktebehoefte voor wind-, zon PV en biomassa	18
Deel III Verantwoording van het in deel II gebruikte scenario	21	
III.1	Bebouwd omgeving > 2050?	21
III.2	Industrie – producten > 2050?	22
III.3	Industrie – energie > 2050?	22
III.4	Land- en tuinbouw > 2050?	23
III.5	Transport – nationaal - per vervoerssegment 2008	23
III.6	Transport > 2050?	24
III.7	De inzet van wind-, zonne-energie en conventionele centrales	25
III.8	Kanttekeningen	27
Deel IV Conclusies	29	
Bijlage 1 Opmerkingen bij andere (duurzame) energieopties	30	
Internetsuggesties	32	
Referenties	33	

Inleiding

Het vraagstuk van onze toekomstige energievoorziening is één van de meest urgente van deze eeuw. Onze welvaart staat of valt met de beschikbaarheid van voldoende, betaalbare energie. Vanwege de wereldwijde bevolkingsgroei en door de toename van de welvaart in de zich ontwikkelende wereld, zal de wereldwijde energievraag halverwege deze eeuw mogelijk verdubbeld zijn. De druk op de slinkende fossiele voorraden zal toenemen en de zorg dat de CO₂ emissies als gevolg van ons toenemende energiegebruik tot ernstige klimaatveranderingen gaan leiden, is een extra drijfveer om haast te maken met het bieden van duurzame alternatieven. Bovendien worden fossiele grondstoffen aangewend voor de productie van nu nog vaak onvervangbare materialen. Energievoorziening is de grootste commerciële sector op aarde, en succesvolle duurzame energietechnologie biedt enorme economische kansen. Aan onze ingenieurs de opdracht om een voortrekkersrol te spelen bij de energierevolutie.

Als belangrijkste ingenieursvereniging van Nederland heeft KIVI/NIRIA het energietema prominent op zijn agenda gezet. Het jaarcongres op 6 oktober 2010 "Duurzaam omgaan met energie", biedt een platform om een scherper beeld te krijgen van de technische uitdagingen op vele deelterreinen die tezamen ons nationale energievraagstuk vormen. KIVI/NIRIA ziet dit congres als een aftrap om in de komende jaren gestructureerd kennis uit te wisselen en strategieën te ontwikkelen rondom het energievraagstuk en zal daar een pad voor uitzetten. U wordt op de hoogte gehouden van de mogelijkheden om uw inbreng te leveren.

KIVI/NIRIA acht het daarbij één van zijn taken om de discussie te stroomlijnen vanuit een totaalbeeld op ons energievraagstuk, de ontwikkeling daarvan en de mogelijkheden om daar in de (verre) toekomst met duurzame bronnen in te voorzien met een breed draagvlak. Een stevig beeld vanuit de ingenieurswereld kan belangrijke voeding geven aan de politiek/maatschappelijke discussie en zo een bijdrage leveren aan het versnellen van de transitie.

De eerdere publicatie van de "Smart Energy Mix" met haar updates [12], is een bijdrage aan deze beeldvorming. De TU Delft heeft een quick scan verricht die op de volgende pagina's wordt gepresenteerd die als een vertrekpunt moet worden gezien voor verdere uitwerking en discussie. Daarbij is voor een andere, aanvullende insteek gekozen, waarbij we ons hebben laten inspireren door het voortreffelijke boek van prof. David Mackay "Sustainable energy - without the hot air", dat gratis op internet beschikbaar is (<http://www.withouthotair.com/>) en dat een rijkdom aan informatie biedt over de (on)mogelijkheden van duurzame energieopties.

In het eerste deel trachten we de Nederlandse energiebalans van het CBS inzichtelijk te maken. Hoeveel energiedragers worden in onze economie ingezet, en hoe worden ze aangewend? Hier gaat het om feitelijke informatie en gevoel voor grootteordes van besparingen en de inzet van duurzame bronnen in de diverse sectoren van de economie. "Als we 50% energie besparen in de bebouwde omgeving, welk deel van ons energievraagstuk hebben we dan opgelost?"

In het tweede deel stellen we ons de vraag: kunnen we in 2050 in onze energievraag voorzien met duurzame bronnen op Nederlands grondgebied, wanneer we uitsluitend wind-, zonne-energie (PV) en biomassa inzetten? We stellen ons deze vraag om een beeld te vormen van de potenties. Het moet niet gelezen worden als een pleidooi om de energievoorziening als een nationaal vraagstuk te zien. De omschakeling naar een duurzame energievoorziening heeft een sterke internationale dimensie om tot voldoende energievoorzieningszekerheid en kosten-beheersing te komen, maar dit valt buiten de scope van deze studie.

Het jaar 2050 is "symbolisch" gekozen vanwege de overtuiging dat we dan tenminste 80% CO₂ reductie moeten hebben gerealiseerd om al te drastische klimaatveranderingen te voorkomen. Onze presentatie heeft vooral ten doel aan te geven hoe veelomvattend die uitdaging is. Het gaat ons er niet om een voorspelling te doen. Of wind, zon en biomassa grootschalig zullen doorbreken of niet, is van vele factoren afhankelijk en in de komende 40 jaar zullen er ontwikkelingen plaatsvinden die het beeld drastisch zullen doen kantelen. Wie had in 1970 de wereldwijde doorbraak van mobiele telefonie en internet voorzien? Wie had in 2009 voorspeld dat de winbare gasvoorraden op deze wereld in 2010 opeens veel groter zouden blijken? Feit is in ieder geval dat de ontwikkelingen op energiegebied in het afgelopen decennium in een sterke stroomversnelling zijn gekomen.

Waar we op uit zijn, is om transparantie en structuur te creëren in de discussie. “Heeft Nederland voldoende oppervlak om met zon-PV in onze energievraag te voorzien”? De eerste vraag hoort dan te zijn: hoe groot is die energievraag nu precies? De tweede: welk deel daarvan kunnen we met elektriciteit afdekken en de derde: welk deel kan zon-PV daar redelijkerwijs van uitmaken? We gaan hier systematisch op in en komen onder bepaalde aannames tot indicaties voor het oppervlaktebeslag als we vooral zonnestroom, windturbines en biomassa gaan inzetten. Zicht hierop is ook van belang voor de vervolgvraag hoe we in voldoende mate kunnen voorzien in energieopslagsystemen en slimme (internationale) netwerken om een duurzaam energieaanbod op de vraag af te stemmen. Verder geeft het stof tot nadenken over de vraag hoe we anders dan met deze drie bronnen in onze toekomstige energievraag kunnen voorzien. Vooral de toekomstige behoefte aan vloeibare (en gasvormige) brand- en grondstoffen is een thema dat veel aandacht verdient.

Uw inzichten en bijdrages zijn uiteraard van harte welkom om de discussie verder aan te scherpen en de inzichten up-to-date te houden.

Samenvatting

- **De inzet van fossiele energiedragers (vooral olie en gas) in onze economie is ongeveer tweemaal zo groot als de vraag naar energie door de Nederlandse eindgebruikers (bebouwde omgeving, vervoer, industrie, land- en tuinbouw).**

Wat bij "ons energiegebruik" vaak ten onrechte niet wordt meegerekend, is de inzet van fossiele grondstoffen voor de (chemische) industrie (productie van plastics, kunstmest, enz.), de grote bijdrage die Nederland levert aan het internationale zee- en luchttransport en de warmteverliezen in de elektriciteitscentrales (en de raffinaderijen).

Een uitspraak als "40% van de energie gaat naar de bebouwde omgeving" is dus misleidend en moet zijn: "20% van onze energiedragers wordt ingezet ten behoeve van de bebouwde omgeving". Energie- plus grondstoffenbehoefte voor de industrie vraagt in totaal 30% van de energiedragers, terwijl transportbrandstoffen, inclusief de bijdrage aan het internationale transport, eveneens 30% bedraagt. De rest van de energiedragers, 20%, gaat voor een vijfde naar land- en tuinbouw (4%) en voor vier vijfde naar verliezen, voornamelijk in de elektriciteitscentrales (16%).

- **Bij de overgang naar een duurzame energiehuishouding is een veel grotere inzet van elektriciteit in de economie essentieel.**

Veel duurzame bronnen produceren immers direct elektriciteit, die voor zeer veel toepassingen is in te zetten, met kleine energieverliezen.

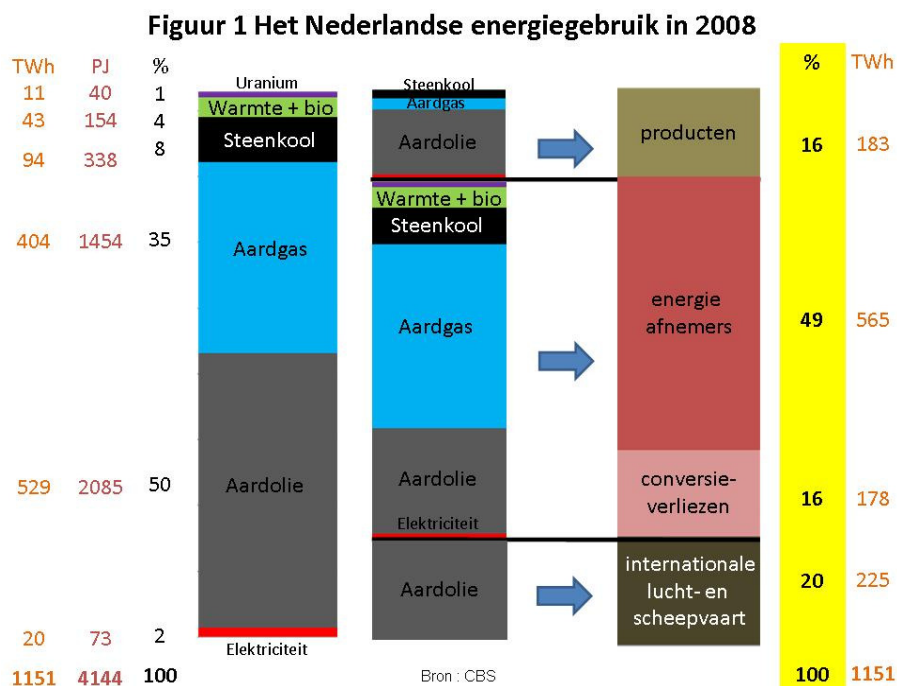
- **We presenteren een scenario waarbij de vraag naar "energiefuncties" tot 2050 met 18% stijgt. Met aannames ten aanzien van energiebesparingsmaatregelen, verbetering van bestaande technologie en de inzet van nieuwe technologie ramen we dat de feitelijke vraag naar energiedragers 17% lager is dan in 2008.**
- **We voeren de vraag naar elektriciteit sterk op door aan te nemen dat deze ook voor ruimteverwarming (via warmtepompen, rest- en aardwarmte), hoogwaardige warmte in de industrie, biomassaverwerking en het lichte wegvervoer zal worden ingezet. De elektriciteitsvraag stijgt dan met een factor 3 ten opzichte van de vraag in 2008**
- **Er blijft dan een aanzienlijke behoefte aan vloeibare en gasvormige brand- en grondstoffen over (lucht- en zeevaart, zwaar wegtransport en grondstoffen voor de (chemische) industrie), waarin we hier voorzien met "biomassa". Het gaat om ongeveer de helft van onze behoefte aan energiedragers in 2050.**
- **Deze biomassabehoefte correspondeert met vijf maal het Nederlandse landbouwareaal, als een gewas volledig voor energie- en grondstoftoepassing zou worden gebruikt. Er wordt dan gerekend met gewassen die de hoogste energieopbrengst in onze klimaatzone hebben.**
- **Voor de productie en verwerking van die biomassa is ook weer energie nodig, waar we hier elektrisch in voorzien (deze energievraag is conservatief geschat op 25% van de energieopbrengst van de biomassa). Deze post is alleen al goed voor 30% van de geraamde elektriciteitsvraag in 2050.**
- **Om die grote elektriciteitsvraag voor het overgrote deel met wind- en zon-PV te dekken is ongeveer 6% van het landoppervlak nodig voor zonnecellen (met het huidige rendement), 1,5 % voor windturbines op land en 3000 km² aan windparken op zee. De inzet van windenergie is dan gesteld op 25% van de jaargemiddelde elektriciteitsvraag, 's zomers wordt de rest met zon-PV ingevuld.**
- **Zon-PV levert in de winter aanzienlijk minder elektriciteit dan in de zomer, wat enigszins gecompenseerd wordt door het feit dat het 's winters weer harder waait. Hier wordt duidelijk zichtbaar dat er grote behoefte is aan nieuwe energieopslagsystemen die seizoensinvloeden kunnen overbruggen. In ons scenario vertalen we dit "wintergat" vooralsnog in de inzet van fossiele (met CO₂**

afvang) of nucleaire elektriciteitscentrales die dan nog in 18% van de toekomstige elektriciteitsvraag moeten voorzien (= 75% van de huidige elektriciteitsvraag door energieafnemers (bebouwde omgeving, industrie-energievraag, nationaal vervoer en land- en tuinbouw).

- Maar ook voor dag (/nacht) fluctuaties kan een duurzaam energievoorzieningsysteem alleen goed functioneren als er voldoende flexibiliteit in de afstemming tussen vraag en aanbod wordt gecreëerd (waar 'smart grids' naast opslagsystemen ook een rol in vervullen). Momenteel schakelen we nog met conventionele elektriciteitscentrales om het wisselende windaanbod te compenseren, wat tot extra energiegebruik en CO₂ emissies van die centrales leidt, die het positieve effect van windenergie (gedeeltelijk) teniet doen en wat tot een "dubbele investering" leidt om een zekere elektriciteitsvraag te kunnen garanderen. In de toekomst zal dit anders moeten.
- Momenteel schakelen we nog met conventionele elektriciteitscentrales om de vraag/aanbod balans in evenwicht te houden, wat tot extra energiegebruik en CO₂ emissies van die centrales leidt, die bijvoorbeeld het positieve effect van windenergie gedeeltelijk teniet doen en wat tot een "dubbele investering" leidt om een zekere elektriciteitsvraag te kunnen garanderen. In de toekomst zal dit anders moeten.
- We besteden geen aandacht aan de kostprijs van wind-, zonne-energie en biomassa in vergelijking met conventionele alternatieven die ook in 2050 nog beschikbaar zullen zijn. 40 jaar is lang, en met voldoende aandacht voor research en development is er in deze periode heel veel te bereiken. Het opbouwen van voldoende productiecapaciteit om bijtijds de duurzame energiesystemen te kunnen leveren en die nieuwe economische kansen geeft, is een andere uitdaging.
- Een belangrijke gevolgtrekking van deze analyse is, dat we het niet kunnen veroorloven ons alleen op duurzame elektriciteitsvoorziening te concentreren, met bijbehorende behoefte aan energieopslag en smart grids, hoe groot die uitdaging ook al is.
- Als we in 2050 een CO₂ emissiereductie van 80% willen realiseren is duurzame elektriciteitsvoorziening ongeveer de helft van onze uitdaging. De overblijvende vraag naar vloeibare of gasvormige energiedragers en grondstoffen in 2050 levert de andere helft van de uitdaging, waar we hier biomassa voor inzetten om te illustreren wat dat in termen van landoppervlak en internationale afhankelijkheid zou betekenen.
- Naast biomassa ligt er ook een kans voor de productie van waterstof en koolwaterstoffen uit CO₂ en water met zonlicht of kernenergie, al is er nog veel ontwikkelwerk nodig voor waterstofopslag, brandstofcellen, en nieuwe processen voor de efficiënte vorming van die koolwaterstoffen. Gaan grote zonnecentrales langs de Afrikaanse kust Europa misschien van brandstoffen voorzien in plaats van met elektriciteit? Wordt nucleaire aandrijving in de zeescheepvaart belangrijk? Wat mogen we verwachten van algenproductie en de productie van brandstoffen met bacteriën (als cyanobacter) – de 3^e generatie biomassaconversie?

Deel I: De inzet van energiedragers in Nederland anno 2008

1.1 Totaaloverzicht



Het CBS rapporteert jaarlijks de inzet van energiedragers in de Nederlandse economie in de energiebalans [1]. We baseren ons hier op die gegevens. In figuur 1 zijn de CBS cijfers voor 2008 in de vorm van een staafdiagram gepresenteerd. Een belangrijk totaalcijfer bij het CBS is "het binnenlands verbruik", 3334 PJ in 2008. (We komen later nog op de eenheden terug). Wat daarin niet meegeteld wordt, is de inzet van brandstoffen voor de internationale zee- en luchtvaart (de CBS post "bunkers")¹. Voor Nederland is dit een relatief grote post (20% van de inzet van energiedragers), vanwege onze doorvoerfunctie. Omdat het hier om een substantiële aardolievraag gaat, voor een sleutelsector in onze economie, nemen we deze post consequent mee in de overzichten. De totale inzet van energiedragers in 2008 in Nederland stijgt dan naar 4144 PJ.

Als we meteen naar de rechterkolom in figuur 1 kijken, zien we dat "energieafnemers" goed zijn voor 49% van de inzet van energiedragers in onze economie. Energieafnemers worden verderop uitgesplitst naar de bebouwde omgeving, de nationale transportsector, de land- en tuinbouw en de industrie (met uitzondering van de energieconversiebedrijven – elektriciteitscentrales en raffinaderijen). Als gesproken wordt over "de Nederlandse energievraag" wordt vaak alleen op dit segment bedoeld. Vandaar dat we hier consequent spreken over de inzet van energiedragers, en niet over de energievraag.

Die energiedragers gaan namelijk ook deels als grondstof ook naar "producten" (16%). We doelen daarmee op chemicaliën die worden gebouwd uit de moleculen in aardolie, steenkool en aardgas. Chemicaliën die zelf niet als energiedrager worden ingezet. Plastics en kunstmest zijn hierbij belangrijke producten.

De energie die nodig is voor deze (chemische) processen valt overigens onder de post industrie – energie, onderdeel van de energieafnemers. Deze inzet van fossiele grondstoffen is uiteraard ook van belang voor het CO₂ vraagstuk. De gevormde producten zullen vroeger of later oxideren, bijvoorbeeld in een vuilverbrandingsoven (in Nederland is deze kringloop al goed gesloten), waardoor de koolstof alsnog als CO₂ in de atmosfeer komt (tenzij vuilverbrandingsovens met CO₂ afvangsystemen zouden worden uitgerust). Ook uit het oogpunt van de grondstofprijs en -beschikbaarheid liggen hier dezelfde uitdagingen als bij de

¹ Lucht- en zeevaart binnen Nederland valt onder de categorie "energieafnemers".

energievoorziening. Als we er van uitgaan dat we in 2050 een CO₂ (equivalenten) emissiereductie van 80% moeten bereiken om al te drastische klimaatveranderingen te voorkomen en de (chemische) industrie zou niet tijdig omgeschakeld zijn naar duurzame grondstoffen, dan mag de energiesector in het meest extreme geval in 2050 dus vrijwel geen CO₂ meer uitstoten.

Verder maken we onderscheid naar de conversieverliezen (16%, voor het overgrote deel in elektriciteitscentrales, en in mindere mate in raffinaderijen). Dit zijn met name warmteverliezen. Dat wil zeggen de warmte die wordt afgevoerd naar de omgeving (lucht en water), en die niet nuttig wordt ingezet voor wijkverwarming enzovoort. We hebben hier ook de eigen energievraag van de energiesector meegerekend (pompen, verlichting, enzovoort). Op het moment dat we duurzame bronnen in gaat zetten die een elektriciteitscentrale overbodig maken komt immers de totale energievraag van die centrale te vervallen en dat wordt zichtbaar gemaakt door te schrappen in de post "conversieverliezen".

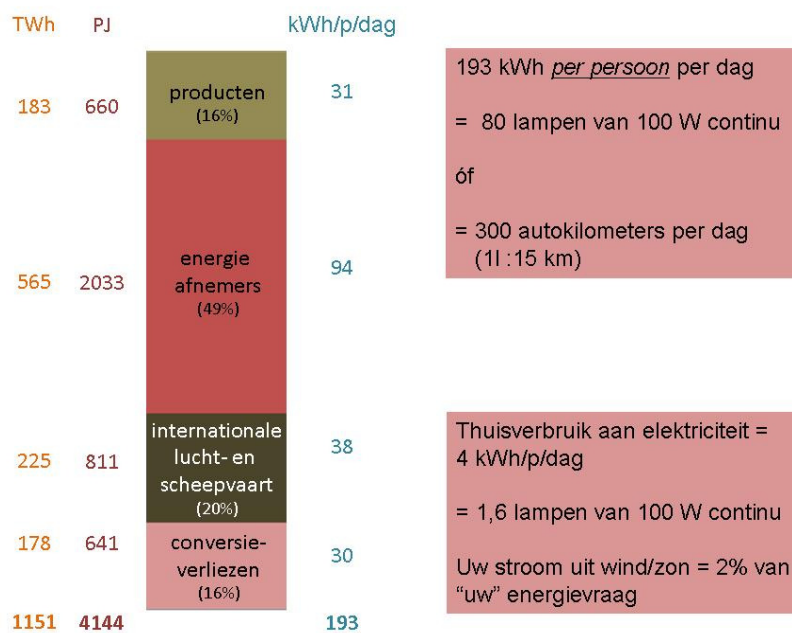
In de linkerkolom zien we dat aardolie goed is voor de helft van onze inzet van energiedragers, gevolgd door aardgas (35%). Tezamen met 85% dus het overgrote deel van de inzet van energiedragers. Elektriciteit doet nauwelijks mee, wat misschien merkwaardig lijkt. Hier gaat het echter alleen om de netto import en om elektriciteit die direct met duurzame bronnen wordt opgewekt (zon en wind). De hoeveelheid elektriciteit die we gebruiken is aanzienlijk groter, maar die wordt voor het overgrote deel geproduceerd uit aardgas. In volgende figuren wordt de inzet van elektriciteit in Nederland zichtbaar.

Verder vinden we hier de CBS categorie warmte, biomassa en afval (die in 3,7% van de nationale behoefte aan energiedragers voorziet). Voorbeelden van biomassa zijn onder andere mest, groente-, fruit- en tuinafval (GFT). Onder warmte wordt geproduceerde stoom (exclusief stoom uit kernenergie) en warm water begrepen. Gezien het nog bescheiden belang van deze categorie wordt hier verder geen aandacht aan besteed.

1.2 Eenheden en energiegebruik per Nederlander

In de wereld van de grote energiestatistieken wordt veelal in PJ (Pèta Joules) gerekend. 1 PJ = 10^{15} Joule. Een miljoen maal een miljard dus. Voor degenen die daar niet vertrouwd mee zijn is dat nogal een abstracte maat. We laten in figuur 2 ook TeraWatturen (TWh) zien. Die zijn misschien al iets tastbaarder omdat ze dichterbij de kiloWattuur (kWh) liggen. 1 TWh = 3,6 PJ en 1 TWh = 10^9 kWh (1 miljard). Een 100 W lamp verbruikt in 10 uur 1 kWh. Een miljard van die lampen 1 TWh in dezelfde tijd. Maar het blijft lastig je een beeld te vormen bij deze grote getallen. In navolging van David Mackay [2] schakelen we hier over naar een maat die dichterbij ons gevoel ligt: kWh per persoon per dag (kWh/p/d). Als we de totale inzet van energiedragers (1151 TWh), vermenigvuldigen met 1000 miljard en vervolgens delen door 16,4 miljoen (het aantal Nederlandse inwoners in 2008) en door 365 dagen per jaar, komen we op 193 kWh/p/d. Voor de toekomst gaan we er overigens van uit dat er geen bevolkingsgroei zal optreden in Nederland.

Figuur 2 Het energiegebruik per Nederlander per dag



"Voor u persoonlijk" wordt dus iedere dag 193 kWh aan energie in Nederland gebruikt². Dat is vergelijkbaar met 80 lampen van 100 W die continu branden (als we niet meetellen dat die elektriciteit ook gemaakt moet worden). Als u een gezin van 4 personen heeft, gaat het zelfs om 320 lampen. Als u met uw gezin 1200 autokilometers per dag rijdt, verbruikt u ook deze hoeveelheid energie.

Een andere vergelijking. 193 kWh/p/d is 50 maal meer dan de hoeveelheid elektriciteit die u thuis gebruikt. Als uw huis door zonnepanelen of windenergie van elektriciteit wordt voorzien, is dus op een duurzame manier in slechts 2% van "uw energievraag" voorzien.

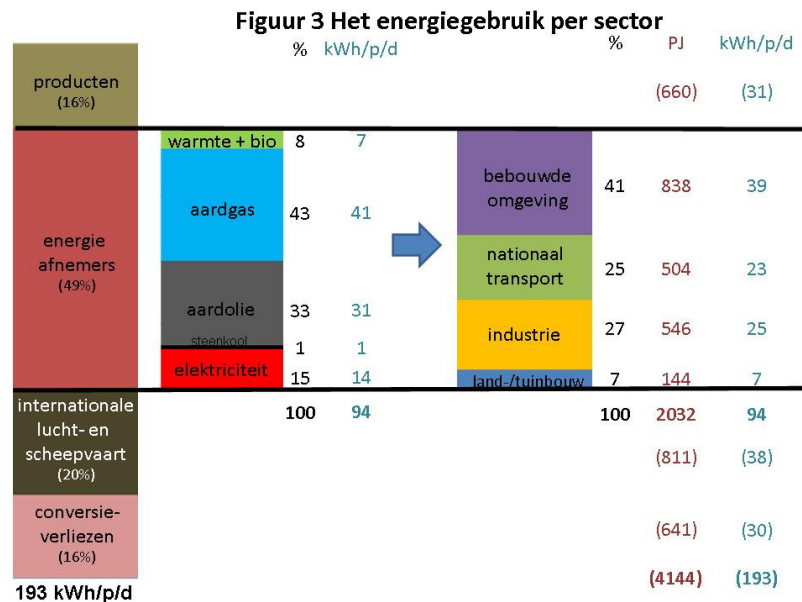
Overigens is dit slechts een indicatie van onze werkelijke "energie-footprint" – de hoeveelheid energie die waar ook ter wereld wordt ingezet ten behoeve van onze levenswijze. We importeren goederen die in toeleverende landen voor een zekere energievraag zorgen. Denk aan automobielen, productiemachines voor de industrie, veevoeder voor onze intensieve veehouderij, enzovoort. Omgekeerd hebben we een grote staal- en (petro)chemische industrie en de landbouwsector, die voor een belangrijk deel hun producten exporteren. Onze inzet van brandstoffen voor het internationale vervoer komt voor een belangrijk deel ten goede aan

² Voor de goede orde zij er op gewezen dat David Mackay een andere methode gebruikt. Hij bouwt de energievraag op uit de persoonlijke energiebehoefte van iedere Brit (verwarming, licht, vervoer, goederen, enzovoort) en komt dan op 125 kWh/p/d. Een post als de brandstofinzet voor de internationale lucht- en zeevaart, die slechts ten dele in onze persoonlijke energievraag voorziet, blijft dan dus buiten beschouwing. Ons cijfer is dus specifiek voor Nederland, terwijl Mackay's cijfer algemener iets zegt over de energiebehoefte van een persoon op een zeker welvaartsniveau.

mensen die buiten onze grenzen wonen. De werkelijke energievraag per persoon is dus een andere, maar dat punt laten we hier verder buiten beschouwing.

1.3 Energiegebruik per sector

Het blok "afnemers" in de vorige figuren is hier opgesplitst naar de gebruikerscategoriën: industrie³ bebouwde omgeving, transport en de land- en tuinbouw. Onder de bebouwde omgeving worden woningen, en dienstverlenende bedrijven en instellingen verstaan (utiliteitsgebouwen), alsmede de bouwnijverheid⁴.



De bebouwde omgeving is de grootste energieafnemer binnen dit blok (41%) gevolgd door het nationale vervoer en de industrie, beide voor ongeveer 25%. De land- en tuinbouw is de kleinste sector met 7%, waar de glastuinbouw overigens het overgrote deel van voor z'n rekening neemt.

Deze cijfers mogen niet uitgelegd worden als zou de bebouwde omgeving de belangrijkste sector zijn, gerekend naar de inzet van energiedragers. Als we de fossiele grondstofbehoefte en de energievraag van de industrie bij elkaar optellen vraagt de industrie 50% meer energiedragers dan de bebouwde omgeving (ca. 30% van het totaal, tegenover 20% voor de bebouwde omgeving). Als we het internationale transport meetellen is de gehele vervoerssector eveneens goed voor ongeveer 30% van onze behoefte aan energiedragers.

Merk op dat elektriciteit momenteel in 15% van de vraag door de energieafnemers voorziet (335 PJ = 14 kWh/p/d)⁵. Als we nadenken over de inzet van wind- en zonne-energie (dus elektriciteit) moeten we dus goed specificeren welke energievraag we daarmee denken te gaan dekken. Als we slechts voorzien in de huidige elektriciteitsvraag moeten we in ieder geval niet de illusie hebben dat we het grootste deel van ons energieprobleem hebben opgelost. Integendeel. Afhankelijk van hoe je rekent is elektriciteit verantwoordelijk voor de inzet van 10-20% van onze energiedragers.

In het tweede deel van deze analyse gaan we daarom een expliciete inschatting te maken van de hoeveelheid elektriciteit die we in onze economie kunnen inzetten om de huidige energiedragers te vervangen. Op basis daarvan komen we dan tot een indicatie van het benodigde landoppervlak voor wind- en zonne-energie.

³ Uitsluitend het energiegebruik. Overigens valt de energievraag van de energieconversiebedrijven (elektriciteitscentrales, raffinaderijen) hier niet onder; deze is opgenomen onder "conversieverliezen",

⁴ In de energiebalans van het CBS wordt de categorie "Huishoudens en overige afnemers" gebruikt. Wij hebben die gesplitst naar "land- en tuinbouw" en "bebouwde omgeving"

⁵ Overigens is de totale door het CBS geregistreerde elektriciteitsafzet in Nederland –inclusief netverliezen (4%) en inzet voor producten (hydrolyse) groter (446 PJ). Hierin zit ook eigen afname door energiebedrijven. Een tweede kanttekening is dat een deel van de gasafname door industrie en landbouw in elektriciteit wordt omgezet voor eigen gebruik.

1.4 Bestemming van de energiedragers

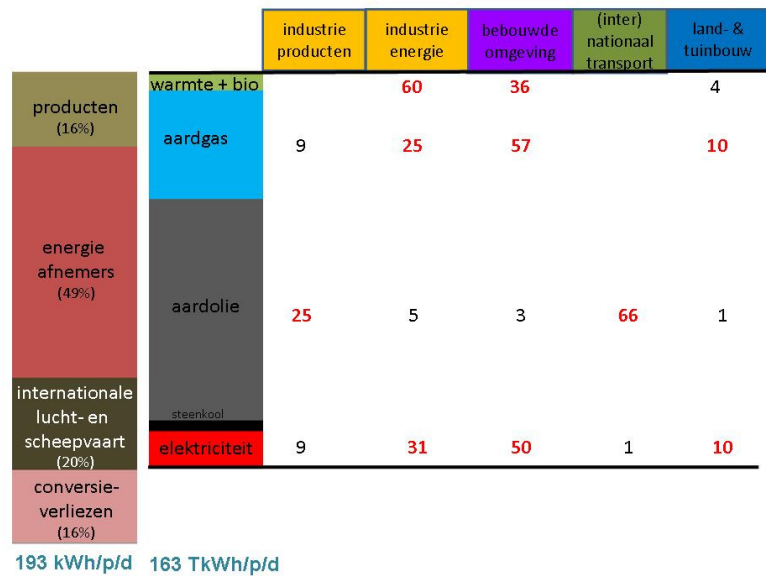
In figuur 4 wordt niet de vraagzijde maar de aanbodzijde centraal gesteld. Waar blijven de energiedragers? (Conversieverliezen zijn daarbij buiten beschouwing gelaten.)

Aardolie gaat voor tweederde naar de vervoerssector, en de inzet als grondstof voor de chemische industrie volgt op afstand met 25%. Hiermee is meer dan 90% van de inzet van aardolie(producten) gedekt.

Aardgas vindt z'n weg voor ruim de helft naar de bebouwde omgeving, een kwart naar de industrie (warmte en elektriciteitsopwekking), en ook de glastuinbouw vraagt met 10% een aanzienlijke inzet.

Elektriciteit gaat voor de helft naar de bebouwde omgeving en voor 1/3 naar de industrie. Ook de glastuinbouw is een belangrijke gebruiker van elektriciteit. Deze wordt voor een belangrijk deel zelf opgewekt uit aardgas met warmtekrachtkoppeling (WKK) installaties.

Figuur 4 Bestemming van de energiedragers (%)



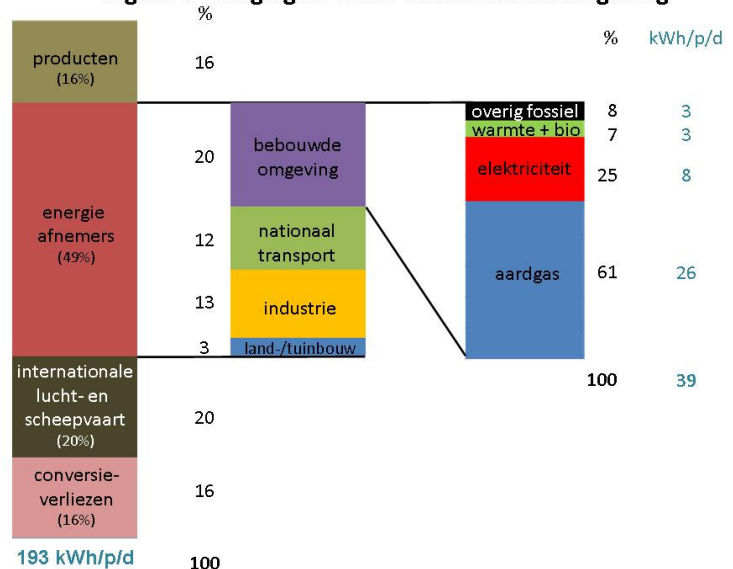
1.5 Energiegebruik per sector - detaillering

In de figuren 5 t/m 9 wordt per sector nader in beeld gebracht welke energiedragers in welke hoeveelheden worden ingezet.

Aardgas en elektriciteit vormen verreweg de belangrijkste energiebronnen van de bebouwde omgeving, die de huishoudens, de dienstverlenende instellingen en bedrijven (utiliteitsbouw) en de bouwnijverheid omvat⁶ (figuur 5). Als elektriciteit wordt omgerekend naar "primaire energie" (de hoeveelheid energie die elektriciteitscentrales vragen om de elektriciteit te produceren), zijn de energievraag voor elektriciteitsvoorziening en de gasvraag (warmtevoorziening) ongeveer even groot. 45% van deze

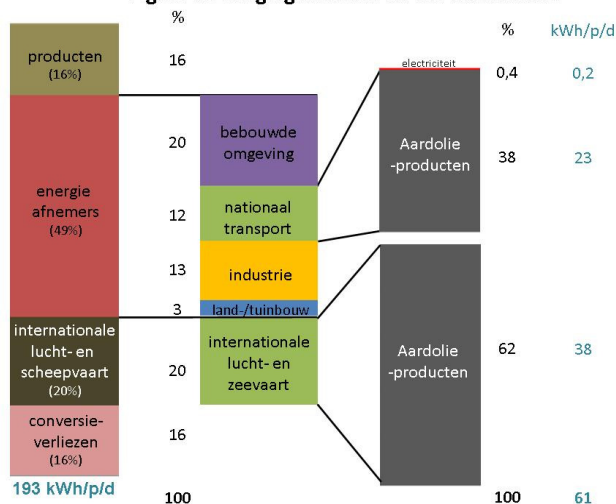
hoeveelheid elektriciteit gaat overigens naar de Nederlandse huishoudens, en 48% van het aardgas. Een gemiddeld Nederlands huishouden (2,24 personen) verbruikte in 2008 1355 m³ aardgas en 3420 kWh aan elektriciteit. Nederland telde in 2008 7,2 miljoen huishoudens.

Figuur 5 Energiegebruik in de bebouwde omgeving



⁶ Deze categorie is niet aanwezig in de CBS energiebalans. In plaats daarvan totaliseert het CBS de hier gebruikte sectoren bebouwde omgeving en land- en tuinbouw binnen "huishoudens en overige afnemers".

Figuur 6 Energiegebruik in de vervoerssector

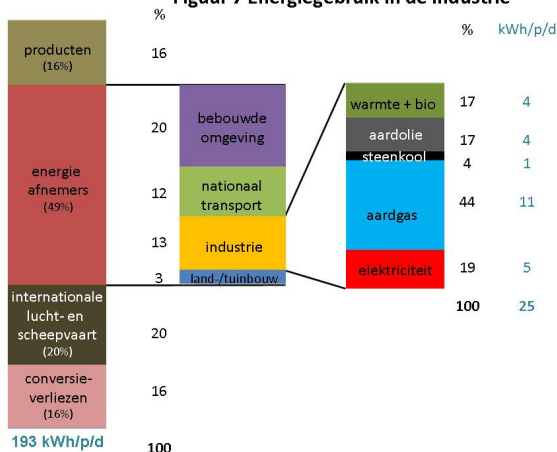


Ons nationale transport (wegvervoer en de lucht- en scheepvaart binnen Nederland) vergt hoofdzakelijk de inzet van aardolieproducten (figuur 6). De hoeveelheid elektrische energie die het trein- en tramvervoer afnemen is verwaarloosbaar (1%). In paragraaf III.5 wordt de energievraag voor het Nederlandse transport uitgesplitst naar de verschillende vervoerscategorieën.

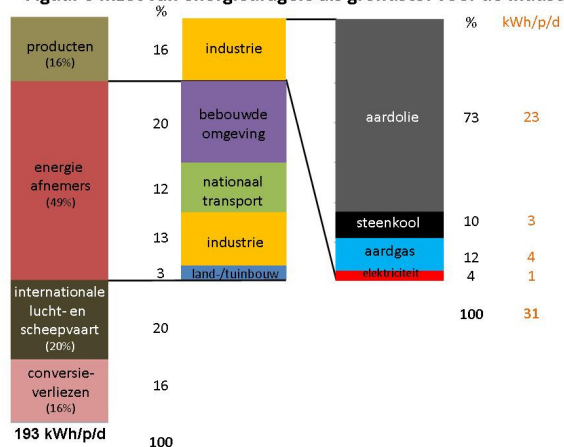
Opvallend is de grootte van de energievraag ten behoeve van de internationale lucht- en scheepvaart in Nederland⁷. Het betreft hier uitsluitend aardolieproducten. Deze vraag is ruim 60% hoger dan de energievraag voor het transport op Nederlands grondgebied. In de CBS energiebalans wordt deze

energievraag begrijpelijkerwijs niet meegenomen in het "binnenlands verbruik". Hier nemen we deze aardoliebehoefte wel integraal mee, gezien het belang van de internationale vervoerssector voor de Nederlandse economie. In een duurzame toekomst zullen we ook in deze energievraag moeten kunnen voorzien. De sector "vervoer" omvat daarmee 61 kWh/p/d (1315 PJ), wat ruim 30% van onze inzet van energiedragers is.

Figuur 7 Energiegebruik in de industrie



Figuur 8 Inzet van energiedragers als grondstof voor de industrie



De industrie vraagt zowel energie voor haar bedrijfsvoering (als onderdeel van de categorie "energieafnemers" (figuur 7), als de inzet van fossiele energiedragers voor de vorming van producten.

Het gaat hierbij dus om grondstoffen waaruit bijvoorbeeld plastics (uit aardolie) en kunstmest (uit aardgas) worden gemaakt (figuur 8). Steenkool wordt vooral in de hoogovens ingezet voor de reductie van ijzerterts tot ruwijzer. Bij de inzet van elektriciteit gaat het vooral om hydrolyseprocessen.

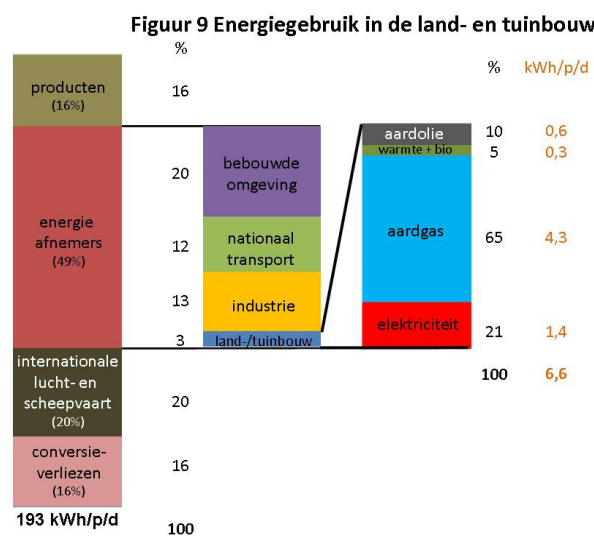
We zien dat de inzet van fossiele grondstoffen iets groter is dan de energievraag van de industrie. Het totaal is met 56 kWh/p/d (1200 PJ) net iets kleiner dan de aardolievraag vanuit de vervoerssector (een kleine 30% van de totale behoefte aan fossiele brand- en grondstoffen).

Onder de categorie "industrie" vallen overigens niet de energiebedrijven (elektriciteitscentrales, raffinaderijen, enzovoort). Als we een gascentrale als voorbeeld nemen, wordt het ingenomen aardgas voor een deel omgezet in elektriciteit. De energie-inhoud van dit deel van het aardgas is geen "gebruik", er komt een andere energiedrager voor in de plaats en het gebruik van die elektriciteit wordt elders verdisconteerd. Het andere deel

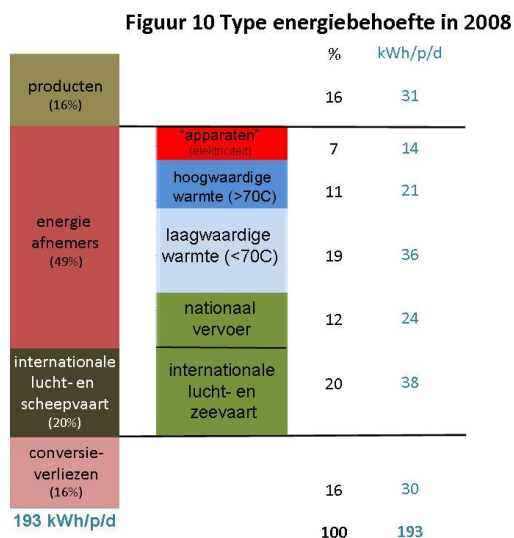
⁷ Het betreft hier de CBS categorie "bunkers". Het aandeel van de internationale zeevaart is het grootst: circa 80%.

wordt omgezet in warmte, die verloren gaat naar de omgeving (warmte-emissies naar de lucht en het oppervlaktewater), of nuttig wordt aangewend voor bijvoorbeeld wijkverwarming. De verloren warmte valt hier onder de categorie "conversieverliezen". De nuttig gebruikte warmte wordt afgenomen door ondermeer de bebouwde omgeving.

Tot slot wordt in figuur 9 het energiegebruik van de land- en tuinbouw getoond. De glastuinbouw is hier veruit de grootste energieafnemer (met 10% van de Nederlandse aardgasvraag), maar het totaal is met 3,5% van de totale inzet van energiedragers in Nederland klein. De cijfers in figuur 9 wijken af van die uit de CBS energiebalans. Het CBS tabelleert de netto elektriciteitsvraag die negatief is, omdat het grote WKK (warmtekrachtkoppelings) vermogen in de glastuinbouw netto elektriciteit aan andere afnemers levert. Hier is de eigen elektriciteitsvraag teruggerekend [6], en de inzet van aardgas evenredig verminderd, onder de aanname dat alle warmte uit de WKK installaties nuttig voor het eigen bedrijf wordt aangewend. De totale energievraag blijft daarmee gelijk aan die uit de CBS energiebalans (144 PJ). Deze uitsplitsing is relevant, omdat we de aardgasvraag in volgende paragrafen vertalen in een (laagwaardige) warmtevraag.



I.6 Type energiebehoefte in 2008



De inzet van energiedragers zoals gepresenteerd in de vorige paragraaf is in figuur 10 getotaliseerd naar het type energievraag waar de energiedragers in voorzien. Zo is de inzet van elektriciteit benoemd als "apparaten" (hier vallen overigens ook lampen onder).

De gasvraag van de bebouwde omgeving en de glastuinbouw is aangeduid als "laagwaardige warmte"⁸. In deze warmtebehoefte kan in de toekomst typisch voorzien worden met warmtepompen, aard- en restwarmte. In al deze gevallen wordt een gasvraag dan vervangen door een elektriciteitsvraag (warmtepompen draaien op elektriciteit en bij aard- en restwarmte is elektrische

pompenergie nodig. Dit is dus een belangrijke categorie in het denken over de inzet van meer elektriciteit voor onze energiebehoefte.

De energievraag van de industrie, anders dan elektriciteit, is (in een verregaande vereenvoudiging – dit moet beter worden uitgewerkt) benoemd als "hoogwaardige warmte". De verwarmingssystemen die voor de bebouwde omgeving en de glastuinbouw kunnen worden ingezet zijn hier minder of niet op hun plaats.

De vervoersbehoefte – nationaal en de internationale lucht- en scheepvaart- wordt als de vierde categorie onderscheiden. Hier is de vraag relevant in welk deel van deze grote categorie we met elektrisch vervoer kunnen voorzien. In deel III wordt per energieafnemende sector expliciet gemaakt hoe we tot deze totalen zijn gekomen.

⁸ In deze vertaalslag is overigens nog niet het gemiddelde ketelrendement bij verwarming meegenomen. Bij HR ketels in de woningbouw ligt dat rendement dichtbij de 100%, maar bij verwarmingsketels in de utiliteitsbouw en de glastuinbouw eerder op 80-90%.

Deel II: Kunnen we in een duurzame energievoorziening gaan voorzien met wind, zon en biomassa van Nederlandse bodem?

II.1 Inleiding

In de media verschijnen veel tegengestelde berichten over de behoefte aan land- en zeeoppervlak voor een duurzame energiehuishouding. Sommigen houden het erop dat wanneer we heel Nederland volzetten met zonnepanelen, we nog niet in 25% van onze energievraag kunnen voorzien, anderen menen dat 3% van het landoppervlak voldoende is. Zulke berichten in de pers geven veel verwarring. Naast de vraag of iedereen de rekensommen op de juiste wijze maakt, gaat het uiteraard ook om de onderliggende aannames. Over welk deel van onze energie-voorziening hebben we het? Dit wordt meestal niet zorgvuldig aangegeven. "Onze huidige elektriciteitsvraag" is een heel ander vertrekpunt, dan "onze toekomstige energievraag". Daar zit een factor 10 in energiebehoefte tussen. Eén van de redenen om deze analyse te maken was om de discussie over het benodigde landoppervlak voor een duurzame energievoorziening van een expliciete basis te voorzien. We doen daarvoor de nodige aannames, maar als u andere inzichten bij heeft, kunt u via de hier voorgestelde benaderingswijze uw eigen antwoorden formuleren.

We pretenderen niet een voorspelling te doen. We rekenen slechts de consequenties door wanneer we aannemen dat wind- en zonne-energie in de verre toekomst de belangrijkste elektriciteitsleveranciers worden⁹. We maken ons geen zorgen over de toekomstige prijs van zon- en windenergie in relatie tot de alternatieven, en zelfs niet over de haalbaarheid van een elektriciteitsvoorzieningsysteem dat voor het overgrote deel op zon-PV en wind is gebaseerd, al is voor iedereen duidelijk dat er veel aan onze energie-infrastructuur moet veranderen om dat tot een serieuze optie te maken. Op windstille, bewolkte dagen hebben we een probleem, 's nachts schijnt er geen zon, en in de winter veel minder dan in de zomer (al waait het dan gemiddeld harder). Als we in de toekomst niet beschikken over goede energieopslagsystemen (batterijen, waterstof, waterkracht, enzovoort) die zowel in fluctuaties over de dag als in seizoensfluctuaties kunnen voorzien, zal het een nog lastiger verhaal worden. Back-up vermogen (bijvoorbeeld met fossiele en/of nucleaire elektriciteitscentrales) is kostbaar (we investeren "dubbel" voor dezelfde energievraag), en gaat ten koste van de energie- en CO₂ prestaties. Een recent artikel becijfert dat de grote inzet van windenergie in Duitsland mogelijk weinig heeft bijgedragen aan energiebesparing en de Duitse CO₂ emissies vanwege het rendements-verlies bij terugschakeling van conventionele centrales als het waait [3]. Dit geeft vooral aan dat ons energiesysteem nog onvoldoende is ingesteld op de inzet van duurzame, "intermitterende" bronnen, die niet vraaggestuurd kunnen werken.

De vraag of Nederland groot genoeg is om zelf in haar duurzame energievoorziening te voorzien moet overigens niet worden opgevat als een pleidooi voor een nationale aanpak van het energievoorziening-vraagstuk. De inzet van duurzame energiebronnen, vraagt om goede elektriciteitsnetten ("smart grids") met internationale uitwisseling om fluctuaties in vraag en aanbod zo goed mogelijk op te kunnen vangen. Dat vermindert de behoefte aan opslagcapaciteit. In een Europees kader kunnen duurzame bronnen eenvoudiger op de beste, goedkoopste locaties worden geïnstalleerd. Het waait niet overal even hard, de zon levert in Zuid-Europa aanzienlijk meer energie dan in Noord-Europa en waterkracht is lang niet overal beschikbaar. Ook de eventuele ontwikkeling van CSP (Concentrating Solar Power) centrales in Noord-Afrika, dan wel de aanvoer van voldoende biomassa uit het buitenland, plaatsen het energievoorzieningvraagstuk in een internationaal perspectief. Overigens zullen ook smart grids geen 100% garantie kunnen geven op "voldoende elektriciteit op ieder moment". Denk aan de dag-/nacht- en seizoensfluctuaties die in Europa vrijwel gelijk lopen. Vloeibare (of gasvormige) brandstoffen uit biomassa kunnen worden opgeslagen om in tijden van tekort de elektriciteitsvoorziening aan te vullen, maar we zullen zien dat de druk op de inzet van biomassa al erg groot is vanuit energiebehoefte waar (vooralsnog) moeilijk met elektriciteit in is te voorzien. Vraagstukken rond voldoende opslag-capaciteit en de beschikbaarheid van duurzaam gevormde brand- en grondstoffen voor toepassingen waar elektriciteit minder of niet

⁹ Als we hier op zonne-energie duiden, bedoelen we uitsluitend op zon-PV (PhotoVoltaics). Zonnecellen die elektriciteit leveren.

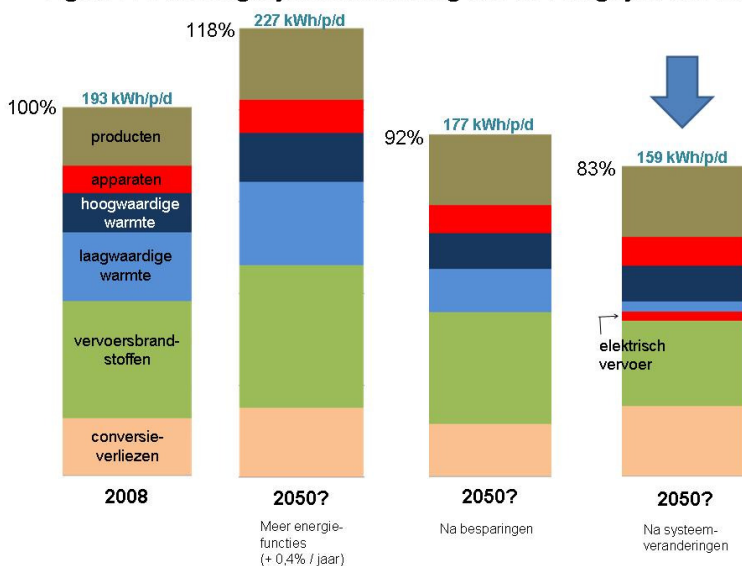
bruikbaar is blijven vaak onderbelicht in de energiediscussie, maar zijn van cruciaal belang voor onze toekomstige energievoorziening, zoals we ook verderop zullen zien.

We kiezen 2050 als het jaar waar we een uitspraak over willen doen. Deze keuze is vooral symbolisch. De overtuiging groeit dat we halverwege deze eeuw internationaal de CO₂-emissies met 80% moeten hebben teruggebracht om een risico op te grote klimaatverandering te voorkomen, in weerwil van de verwachting dat de wereldwijde energievraag dan verdubbeld zal zijn. Ook gegeven het feit dat "duurzame bronnen" nooit volledig CO₂ neutraal zijn en het feit dat bepaalde broeikasgasemissies lastig zijn terug te dringen (als methaan uit de veeteelt en lachgas –door stikstofbemesting- uit de landbouw), ontwikkelende economieën nu lange termijn investering in bijv. kolencentrales doen, betekent dit per saldo dan onze energievoorziening rond 2050 ongeveer volledig "duurzaam" zal moeten zijn, als we dit uitgangspunt omarmen.

We bouwen onze analyse in een paar stappen op. In de eerste plaats doen we een aanname over de stijging van onze behoefte aan "energiefunctionaliteit". Onze economie is op groei gebaseerd en het is weinig waarschijnlijk dat dat zich dat niet vertaalt in meer vervoerskilometers, meer licht, meer gebouwen, meer airconditioning, meer ICT apparatuur, enzovoort. In een tweede stap leggen we daar besparingen overheen. Gangbare apparatuur wordt energiezuiniger (zuiniger auto's die nu al op de markt zijn tellen nog nauwelijks mee in de energieprestaties van het vervoer, enzovoort) en er is nog veel te doen op het gebied van betere isolatie, besparingen in de industrie, enzovoort. Vervolgens gaan we "systeemveranderingen" aanbrengen. Dat deel van het (weg)vervoer dat zich naar de huidige inzichten leent voor elektrische aandrijving maken we elektrisch en we gaan in de warmtevoorziening volledig met elektriciteit voorzien. We krijgen dan een raming van de elektriciteitsvraag op termijn. We houden dan een energievraag over waar we hier met biomassa in gaan voorzien, maar zorgvuldiger geformuleerd gaat het om de behoefte aan vloeibare (en gasvormige) energiedragers en grondstoffen voor de industrie. Als we deze volledig vertalen in een biomassabehoefte- zoals hier gedaan- is daar een bepaald landoppervlak aan toe te rekenen, maar ontwikkelingen, bijvoorbeeld op het gebied van de synthese van koolwaterstoffen uit waterstof en CO₂ onder de invloed van zonne-energie (langs de Noord-Afrikaanse kust?) kunnen het beeld over benodigd oppervlaktebeslag belangrijk wijzigen.

II.2 Aannames ten aanzien van de toekomstige energiebehoefte (2050)

Figuur 11 Een mogelijke ontwikkeling van de vraagzijde tot 2050



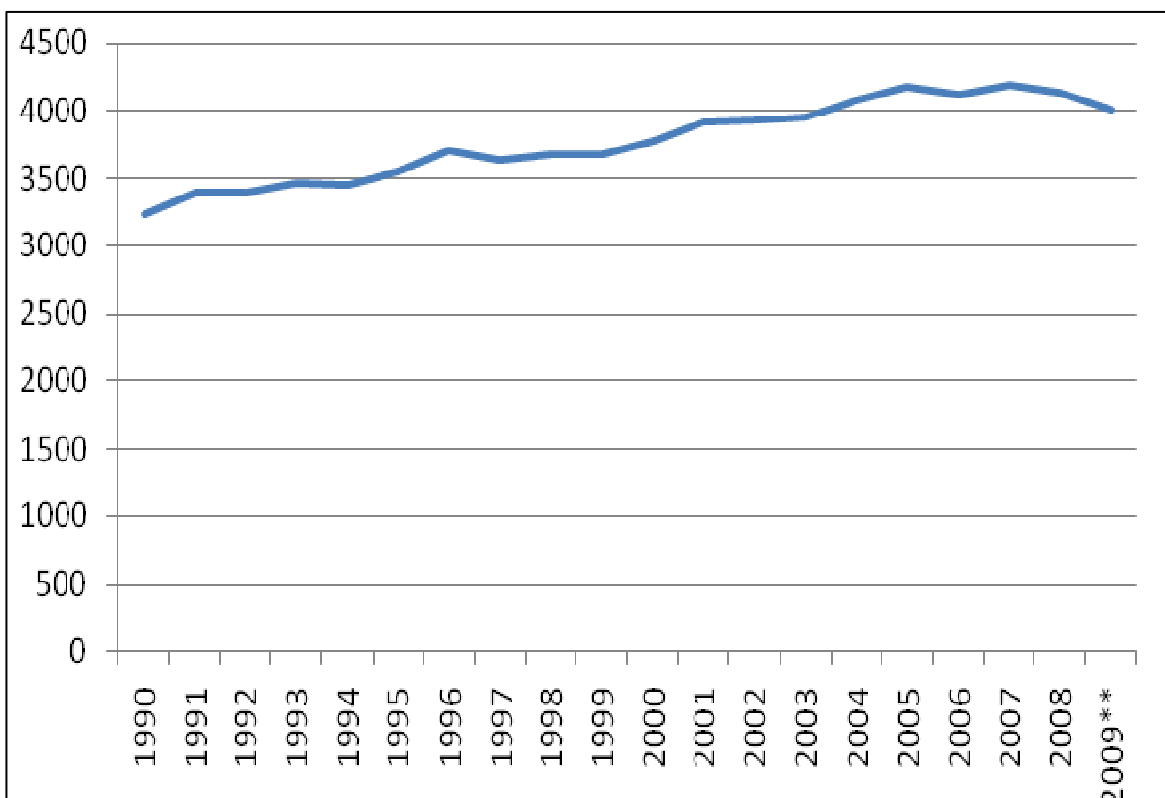
Voor de raming van de energievraag in 2050 toont figuur 11 het resultaat van de 3 genoemde stappen. De linker kolom is overgenomen uit figuur 10 en geeft de energiebehoefte per type energievraag weer in 2008.

Onderstaand wordt die op hoofdlijnen toegelicht. Details over de aannames zijn in deel III te vinden.

1) Toenemende energiefunctieiteit (2^e kolom van links)

We baseren ons op de ontwikkeling van de energievraag in de Nederlandse samenleving over de afgelopen 9 jaar. In figuur 12 zijn de CBS data weergegeven sinds 1990 voor het totaal van de categorieën "binnenlands verbruik" en de Nederlandse bijdrage aan de internationale lucht- en zeevaart ("bunkers").

We zien een gestage groei over de afgelopen 19 jaar, met een afvlakking na 2005 en een afname na 2007. Hier speelt de economische crisis uiteraard ook een rol in. Van 2000 tot 2009 bedroeg de gemiddelde groei 0,68% per jaar. In deze cijfers lopen de groei naar energiefunctieiteit en de beschikbaarheid van zuiniger technologie/bezuinigingsmaatregelen uiteraard door elkaar heen. Wij gaan voor de komende 40 jaar uit van een groei van een stijgende behoefte aan energiefuncties van 0,4% per jaar. Dit zou in 2050 een stijging met 18,3% ten opzichte van 2008 inhouden. We verdelen de groei evenredig over de verschillende energiefuncties.



Figuur 12. Toename van de Nederlandse energievraag in de afgelopen 19 jaar. Het totaal van de CBS categorieën "Binnenlands verbruik" en "bunkers" (internationale zee- en luchtvaart) is geplot.

2) Besparingen en technologieverbetering (3^e kolom van links)

Vervolgens leggen we over de groei bezuinigingsmaatregelen en aannames ten aanzien van efficiencyverbetering van (conventionele) systemen. De belangrijkste zijn:

- In 2050 is de warmtevraag in de bebouwde omgeving per m² vloeroppervlak met 50% gedaald ten opzichte van 2008.
- De energie-efficiëntie voor het gehele wagen, luchtvaart en zeevaart"park" is met 20% toegenomen.
- In de glastuinbouw is 25% besparing op de warmtevraag gerealiseerd (per hectare grondoppervlak).

Het nettoresultaat is een daling van de energievraag met 8% in 2050.

3) Systeemveranderingen (rechter kolom)

Tot slot gaan we nieuwe technologie introduceren. De belangrijkste veranderingen die we hier aannemen zijn :

- Dat deel van het wegverkeer dat zich daar bij uitstek voor leent (personenvoertuigen, en licht vrachtvervoer) wordt met elektrische motoren uitgerust, die ("tank to wheel") 66% energiebesparing geven¹⁰.
- In de laagwaardige warmtevoorziening (woningbouw en glastuinbouw) wordt elektrisch voorzien. Dat betekent dus dat warmtepompen op grote schaal worden ingevoerd, maar ook dat de bijdrage aard- en/of restwarmte groeit. Ook daarvoor is immers elektrische pompenergie nodig. Deze omschakeling naar elektrische warmtevoorziening levert een grote energiebesparing op.

Na deze veranderingen aan de vraagzijde kunnen we een raming maken van de hoeveelheid elektriciteit die in de toekomst ingezet kan worden (Figuur 13). Grosso modo komen we op 40% van de inzet van energiedragers. 50% betreft de inzet van energiedragers als grondstof voor de chemische producten en het vervoer door de lucht, over zee en het zware –lange afstandstransport- over de weg.

Hier zijn meerdere opties voor, maar we vatten dit hier samen onder het hoofd "biomassa".

Aan de aanbodkant gaan we vervolgens voor de elektriciteitsvoorziening veel wind- en zonne-energie introduceren, waardoor een groot elektriciteitscentrales en raffinaderijen overbodig worden (onder de aanname dat we voldoende energieopslagcapaciteit hebben), die dus geen energieverliezen meer kennen. Dat bespaart energie.

Wel blijft er behoefte een aantal (fossiele) centrales om in het stroomtekort in de winter te voorzien (door een beperkte hoeveelheid zonlicht). Die centrales rusten we uit met CO₂ afvang en opslag (CCS - Carbon Capture and Storage), wat vrij veel energie kost (20% stijging van de primaire energievraag van de centrale) en de energievraag dus laat stijgen. Overigens gaan we er wel van uit dat het gemiddelde centrale rendement dan gestegen is tot 50% (momenteel iets boven de 40%).

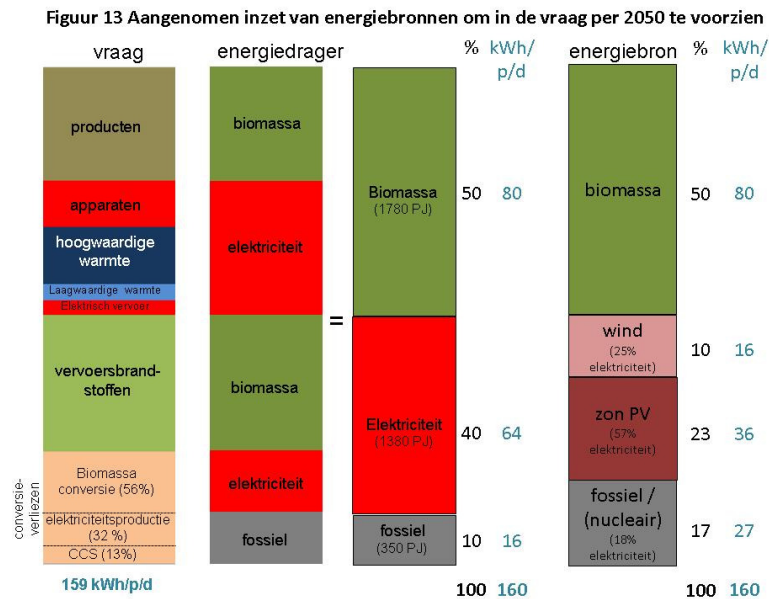
Tot slot vraagt de inzet van grote hoeveelheden biomassa ook energie voor de productie van kunstmest, de omzetting van biomassa naar bruikbare brand- en grondstoffen en transport. Omdat veel technologie nog in ontwikkeling is, is deze post lastig te kwantificeren. We gaan er hier voorzichtig van uit dat deze energievraag niet meer dan 25% bedraagt van de energie die de gewassen leveren. Dit is dus een extra post voor "energieverliezen", waar we overigens elektrisch (dus met wind- en zonne-energie) in gaan voorzien.

Terugkerend naar figuur 11, zijn deze systeemveranderingen in de meest rechtse kolom verdisconteerd, die er per saldo toe leiden dat de energievraag verder daalt. We komen zo op een besparing van 17% ten opzichte van de inzet van energiedragers in 2008. Merk op dat het blok "conversieverliezen" groot is. Dit is met name het gevolg van de aangenomen benodigde energie voor de biomassaproductie en –conversie, die alleen al goed is voor 30% van de totale elektriciteitsvraag.

Ter vergelijking: Het gezaghebbende Internationaal Energy Agency (IEA) gaat in haar referentie scenario ("existing policies") voor de ontwikkeling van de energievraag in Europa uit van een stabilisering per capita tot 2030 (gekoppeld aan een minieme bevolkingsgroei) [5]. In het progressievere "450 scenario"- gericht op het beperken van de lange termijn atmosferische CO₂ concentratie tot 450 ppm, gaat men uit van een daling van de energievraag per capita met 5% in 2030. Onder de aanname dat met name de systeemverandering pas na 2030 op grote schaal hun intrede doen, is onze benadering "redelijk in lijn" met het IEA scenario.

¹⁰ Dit besparingspercentage is gebaseerd op een gemiddeld personenvoertuig dat 1 l benzine op 15 kilometer verbruikt, en in een elektrische variant 0,21 kWh/km zou vragen (inclusief het energieverlies bij op- en ontladen) [2].

II.3 Inzet van energiebronnen voor de geraamde energievraag



Hier maken we een vertaalslag van de aangenomen functionele energiebehoefte in 2050 (linker kolom, overgenomen uit figuur 11) naar de inzet van energiebronnen (rechterkolom).

In de tweede kolom van links geven we aan welke energiedrager we gaan inzetten voor een bepaalde functionele energievraag. In de 3^e kolom van links worden deze slechts gegroepeerd. In de rechterkolom vullen we de vraag in met biomassa, wind, zonne-energie en fossiele of nucleaire elektriciteit. De verantwoording van deze verdeling is in deel 3 te vinden. Op hoofdlijnen zetten we in op een bijdrage van windenergie die 25% van de jaargemiddelde elektriciteitsvraag dekt, en wordt in de resterende elektriciteitsvraag in de zomer volledig voorzien met zon-PV. Omdat windenergie in de zomer minder elektriciteit oplevert dan in de winter, betekent dit dat zon-PV in de zomer 80% van de elektriciteitsvraag moet dekken. In de winter lopen we dan tegen een elektriciteitstekort aan vanwege de geringere zoninstraling, waarvoor hier "conventionele" elektriciteitscentrales worden ingezet. Jaargemiddeld bedraagt het elektriciteitstekort uit zon en wind in onze berekeningen 18%. Wanneer we rond 2050 over goede energieopslagsystemen zouden beschikken, is deze ingreep niet nodig, maar in dat geval hebben we uiteraard wel circa 18% meer windturbines en/of zonnepanelen nodig.

II.4 Corresponderende oppervlaktebehoefte voor wind-, zon PV en biomassa

Op basis van de berekende vraag naar wind-, zonnestroom en biomassa is vrij eenvoudig uit te rekenen met welk oppervlaktebeslag dit correspondeert. We volgen opnieuw David Mackay, die de energieopbrengst voor de verschillende duurzame bronnen tabelleert naar rato van hun energieproductie per eenheid oppervlak (figuur 14).

Figuur 14 Uitgangspunten bij de berekening van het oppervlaktebeslag van windturbines, zon-PV en biomassa

41526 km² totaal oppervlak NL
 - 7645 km² binnenwater + Noordzee
 33880 km² landoppervlak
 (=2000 m² per persoon)

23000 km² landbouwgrond
 (=1200 m² per persoon)



Optie	W/m ²
Zon-PV	5-20 (NL: 11 W/m ²)
Wind op land	2
Wind op zee	3
Biomassa	0,5

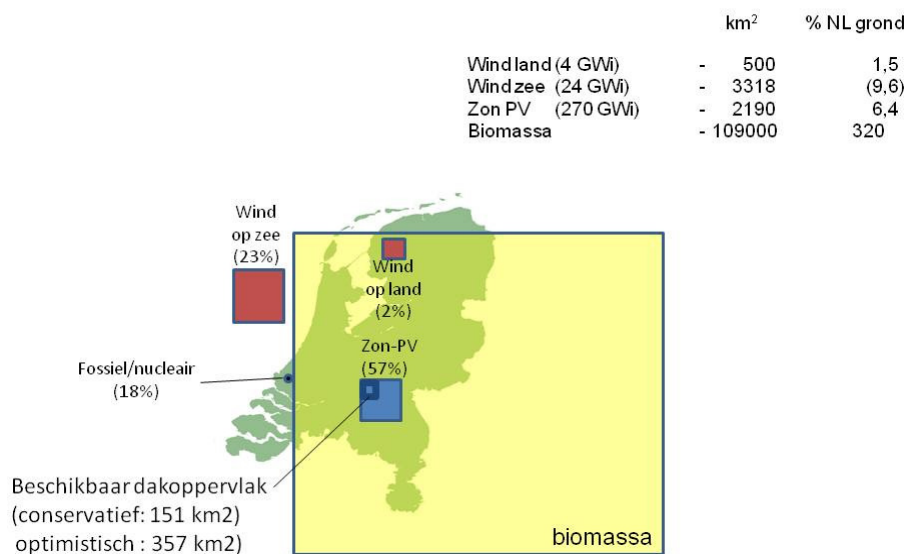
Als voorbeeld nemen we de genoemde $0,5 \text{ W/m}^2$ voor biomassaproductie. Dit cijfer betekent dat jaargemiddeld iedere seconde 5.000 J aan energie per hectare (10.000 m^2) door plantaardige groei wordt geproduceerd. Dit is dus $3600 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 10.000 = 1,58 \cdot 10^{11} \text{ J}$ per hectare per jaar, ofwel 158 GJ per hectare per jaar ($1 \text{ GigaJoule} = 10^9 \text{ Joule}$), ofwel $0,000007 \text{ kWh}$ per persoon per hectare per dag. Voor 1 kWh/p/d is dus 136000 ha nodig (1360 km^2) en om volledig in de energievraag van 2008 met biomassa te voorzien (193 kWh/p/d) 262.000 km^2 , als we geen rekening houden met de energievraag van de plantaardige productie en de verwerking van de biomassa tot bruikbare grond- en brandstoffen. Ruim tienmaal het beschikbare landbouwareaal in Nederland. Overigens correspondeert 158 GJ per ha met een goed energiegewas, bijvoorbeeld hout in onze gematigde klimaatzone, of palmolie in de tropen. In de praktijk met een variëteit aan energiewassen zal het oppervlaktebeslag groter zijn dan hier berekend. Gegevens over de energieopbrengst voor verschillende gewassen per hectare en veel andere kentallen rond biomassaproductie zijn te vinden in [17].

Zon-PV geeft per hectare een 10-40 maal hogere energieopbrengst dan biomassa, afhankelijk van het rendement van de zonnecellen, en de plaats op aarde. In Nederland levert een moderne zonnecel per jaar een opbrengst van ongeveer 100 kWh/m^2 (het geïnstalleerd vermogen is dan 120 Wp (Watt-piek)/ m^2). $100 \cdot 1000 / 365 / 24 = 11 \text{ W/m}^2$, het cijfer dat bovenstaand is getabelleerd.

Op zee waait het gemiddeld harder dan op land, wat het verschil tussen de in figuur 14 genoemde cijfers verklaart. Overigens wordt in referentie [15] voorzien dat de windenergieopbrengst per hectare zeeoppervlak in de komende decennia nog met 50% kan stijgen.

Het 'oppervlaktebeslag' van windturbines is aanzienlijk groter dan dat van zonnepanelen. Hier gaat het er vooral om dat windturbines op een aanzienlijke afstand van elkaar geplaatst moeten worden zodat ze niet in elkaars "windschaduw" staan. Maar de ruimte tussen de turbines is uiteraard voor andere toepassingen te gebruiken, zoals (op land) voor gewasteelt of voor zonnepanelen. Het woord "oppervlaktebeslag" heeft bij windenergie dus een heel andere lading dan bij zonnepanelen. Moet je een rij windturbines op een dijk als oppervlaktebeslag kwalificeren? Hier gaat het veel meer om horizonvervuiling en geluidsoverlast. Voor de bepaling van de grootte van kavels op zee voor de plaatsing van windmolenparken is het benodigde oppervlak uiteraard relevant, maar ook hier geldt dat de open ruimte tussen de turbines voor andere vormen van energieopwekking kan worden gebruikt.

Als we deze cijfers voor de energieproductie per eenheid oppervlak gebruiken om de benodigde oppervlakte voor een duurzame energievoorziening "in 2050" te berekenen komen we op de indicaties uit figuur 15.



Figuur 15. Resulterende oppervlaktebehoeftes voor de inzet van wind- en zonne-energie en biomassa in 2050.

Procenten: inzet t.b.v. de geraamde elektriciteitsvraag in 2050
(380TWh/jaar = 1360 PJ/jaar = 63 kWh/p/d)

De achtergronden van de berekeningen worden in deel III gegeven.

We halen –jaargemiddeld- 57% van onze elektriciteitsvraag, die ongeveer drie maal groter is geworden dan in 2008, uit zon-PV (in de zomer levert zon PV tezamen met windenergie dan – gemiddeld gesproken- onze volledige elektriciteitsvraag). Dit vraagt 2150 km² (40 bij 50 km, de oppervlakte van de provincie Flevoland, 6,4% van het Nederlandse landoppervlak). Het beschikbare dakoppervlak in Nederland voor de installatie van zon-PV bedraagt overigens ongeveer 10% van deze waarde. We baseren deze schatting op het rendement dat met goede –commercieel beschikbare zonnecellen- in 2010 haalbaar is. Als het rendement van de zonnecellen in de komende 40 jaar stijgt, daalt de oppervlaktebehoefte uiteraard navenant (zie ook bijlage 1).

Windturbines leveren in ons scenario 25% van de jaargemiddelde elektriciteitsvraag. We hebben in figuur 15 aangenomen dat een verdubbeling van de huidige energieproductie door windturbines op het land het maximaal haalbare is (dit is 4GW aan geïnstalleerd vermogen – GWi-), en plaatsen de overige turbines op zee. De opbrengst per windturbine is daar 60% groter dan op land, vanwege de hogere windsnelheden, maar wel tegen een momenteel aanzienlijk hogere kostprijs per kWh opgewekte elektriciteit – momenteel een factor 2-3). In oppervlaktebehoefte vertaalt dit zich in windmolenparken die 500 km² op land en 3250 km² op de Noordzee beslaan.

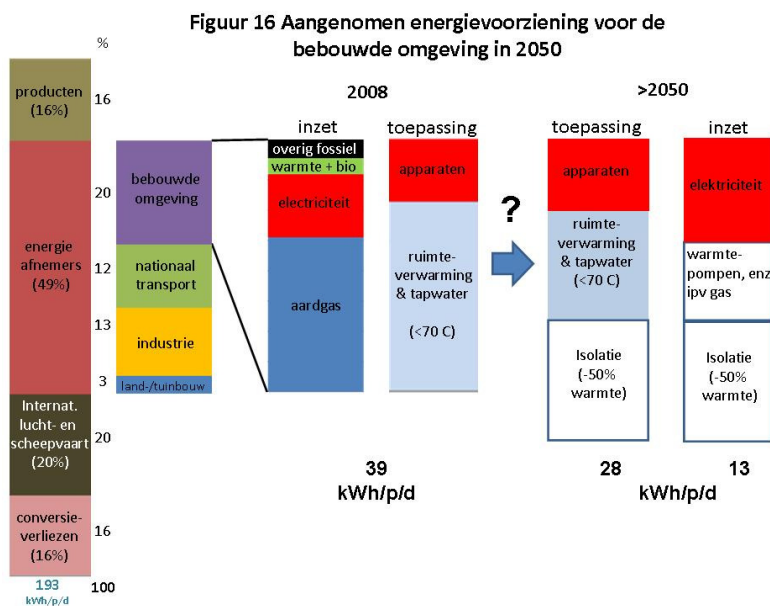
Figuur 15 laat verder zien dat we ter dekking van het “zon-PV gat” in de winter 18% van onze elektriciteit opwekken met fossiel gestookte, of nucleaire installaties. De berekeningen voor het verlies aan conversie-energie zijn overigens gebaseerd op gas of kolen en niet op kernenergie. We rekenen dus met een extra energiebehoefte voor CO₂-afvang en -opslag, wat met kernenergie niet nodig is.

Of het geraamde oppervlaktebeslag van wind- en zonne-energie haalbaar wordt geacht of niet, is een punt van discussie.

De oppervlaktebehoefte voor biomassagroei ten behoeve van de inzet als grondstof/energiedrager (5 maal het huidige landbouwareaal) geeft duidelijk aan dat onze toekomstige energievoorziening een internationale dimensie heeft. Als we de grondstoffen voor onze chemische industrie en de behoefte aan vloeibare/gasvormige brandstoffen inderdaad uit biomassa zouden halen is Nederland veel te klein. We baseren de berekening van de oppervlaktebehoefte hier overigens op “1^e generatie biomassa” – gewassen die volledig voor energie- en grondstoffenproductie worden gekweekt en ingezet. Dit land is dan dus niet meer beschikbaar voor bijvoorbeeld de voedselvoorziening. Bij de tweede generatie biomassa (“energie uit reststromen”) wordt gewasteelt (en andere vormen van biomassa-productie) voor de voedselvoorziening gecombineerd met andere toepassingen van biomassa. De benodigde oppervlaktebehoefte ten behoeve van de energie- en grondstoffenproductie stijgt dan ten opzichte van de hier genoemde cijfers, omdat slechts een deel van het gewas ten behoeve van energie of als grondstof voor de chemische industrie wordt ingezet, waar overigens weer tegenover staat dat nu nog niet gebruikte rest-/afvalstromen beschikbaar komen. De derde generatie biobrandstoffen uit algen of bacteriën (als cyanobacterium) zijn niet gebonden aan (vruchtbare) gronden, maar staan nog in de kinderschoenen. In potentie is met deze technologieën een veel hogere opbrengst per hectare mogelijk. De feitelijke oppervlaktebehoefte over 40 jaar ten behoeve van de inzet van biomassa is dus een andere dan die hier geraamd wordt, zeker wanneer ook alternatieven voor koolwaterstofproductie economisch attractief zullen worden (als koolwaterstofproductie uit water en CO₂ met zonlicht).

Deel III Verantwoording van het in deel II gebruikte scenario

III.1 Bebouwde omgeving > 2050?



In deze en de volgende figuren wordt per sector de huidige inzet van energiedragers (3^e kolom) in een paar stappen vertaald naar de inzet van energiedragers in 2050 (6^e kolom). Eerst vertalen we de huidige inzet van energiedragers naar een functionele behoefte (kolom 4). Voor de bebouwde omgeving zien we bovenstaand dat we "elektriciteit" vertalen in de energiebehoefte van "apparaten" (dus ook verlichting), en dat de overige energiedragers, m.n. aardgas wordt vertaald in ruimte (en tapwater – kleine post) verwarming¹¹.

Voor 2050 leggen we dan de aangenomen groei (voor iedere sector 18%) op en gaan dan energie besparen. Hier nemen we aan dat iedere m² vloeroppervlak in 2050 de helft van de verwarmingsenergie vraagt door betere isolatie (kolom 5). In de 6^e kolom gaan we voor de nieuwe vraag energiedragers inzetten. Voor de warmtevoorziening kiezen we volledig voor elektriciteit (kolom 6). Dit betekent dat we kiezen voor een mix van warmtepompen, aard- en restwarmte. Per saldo betekent dit dat de energievraag van de bebouwde omgeving met een factor 3 daalt, ondanks de groei (lees: meer woningen).

De omschakeling naar elektrische ruimteverwarming is hier dus de belangrijke aanname. Een warmtepomp gebruikt minder elektriciteit dan dat hij aan thermische energie afgeeft. Dit wordt uitgedrukt in de COP (Coëfficiënt Of Performance), die gedefinieerd is als de afgegeven thermische energie gedeeld door de opgenomen elektrische energie. Moderne warmtepompen halen een COP van 4 (als ze een niet te groot temperatuurverschil moeten overbruggen).

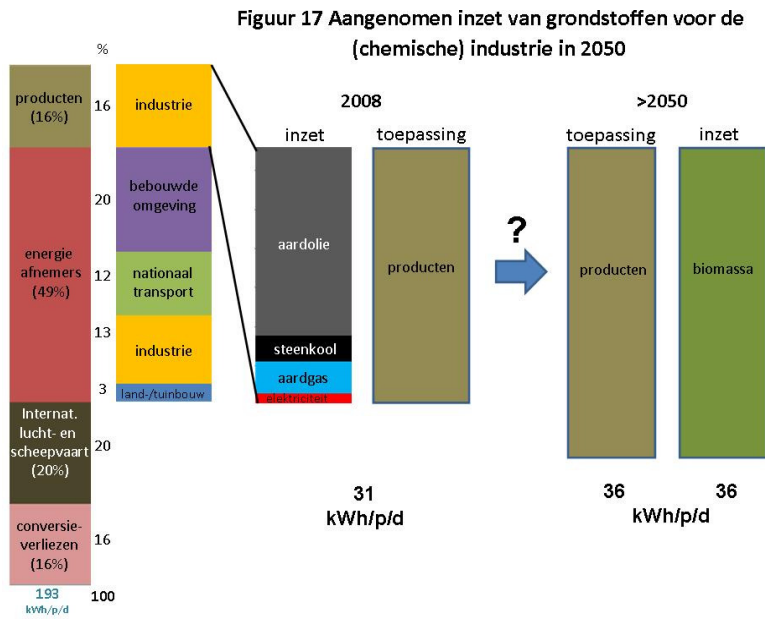
Als restwarmte of geothermie (aardwarmte) wordt ingezet, zijn er elektrische pompen nodig voor watertransport. Ook dat is uiteraard uit te drukken in een COP waarde. Voor aardwarmte kan een COP van 25 haalbaar zijn (afhankelijk van de structuur van de ondergrond), als de waterstroom die door de aardwarmteput wordt gepompt lokaal wordt ingezet, bijvoorbeeld bij een tuinder. Als aan deze bron ook bijvoorbeeld wijkverwarming wordt gekoppeld daalt de COP (eventueel tot onder de 10). We rekenen hier met een COP van 4,4 (0,23 kWh aan elektriciteit geeft 1 kWh aan warmte). Dit is equivalent met de aanname dat in 80% van de warmtevraag wordt voorzien met warmtepompen met een COP van 3, en in 20% met aard- of restwarmte met een COP van 10. Bij andere aannames neemt de gemiddelde COP waarde uiteraard een andere waarde aan. Onze aanname betekent dat ruimte (en tapwater) verwarming in de toekomst 75% minder energie vragen dan anno 2008¹².

Bij verwarming van de bebouwde omgeving zou ook uit kunnen worden gegaan van de inzet van biomassaverbranding. Wij doen dat niet omdat er in onze benadering al een zeer grote vraag naar biomassa komt voor toepassingen waar vooralsnog geen andere alternatieven voor lijken te bestaan.

¹¹ Hier zit overigens nog een onnauwkeurigheid in. We stellen dat 1 kWh aardgas overeen komt met 1 kWh warmte. In werkelijkheid moeten we ook rekening houden met de conversieverliezen in de verwarmingsketels, waardoor de feitelijke warmtevraag vermoedelijk 10-20 % kleiner is.

¹² Merk op dat bij de huidige praktijk van elektriciteitsopwekking (met een elektrisch rendement van circa 40%), pas bij een gemiddelde COP van meer dan 2,5 energiebesparing ontstaat.

III.2 Industrie – producten > 2050?



In de grondstoffenbehoefte van de (chemische) industrie kan –in ieder geval niet rechtstreeks– met elektriciteit worden voorzien. Het gaat hier om de moleculaire samenstelling van die grondstoffen (“massa i.p.v. energie”). Ook weer uitgaande van een toename met 18% tot 2050, kiezen we hier voor biomassa voor het grondstoffenaanbod. Overigens rekenen we hier (onterecht) de behoefte aan biomassa rechtstreeks uit op basis van de energie-inhoud. 1 kWh aardgas wordt vervangen door 1 kWh biomassa. Een zorgvuldiger analyse is nodig waarbij rekening

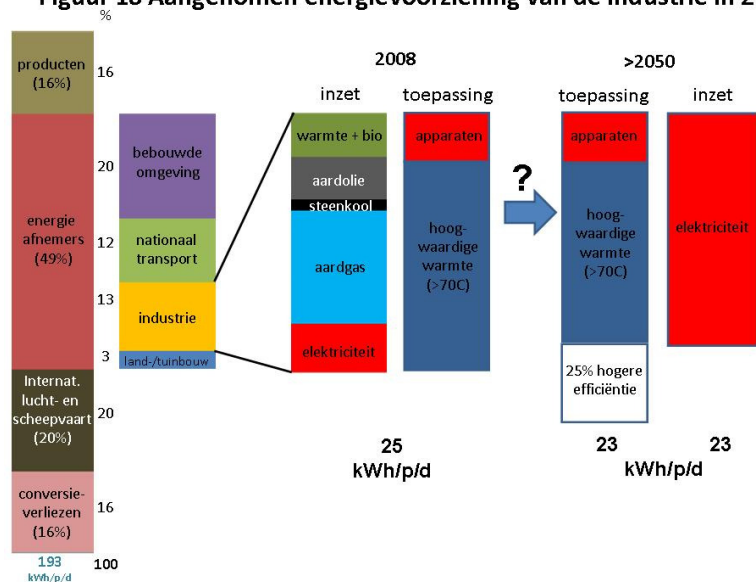
wordt gehouden met de nieuwe chemische omzettingsprocessen, die tot een andere materiaal- (en energie-)behoefte zullen leiden.

We gaan er verder van uit dat grondstofverliezen in de huidige conversieprocessen al minimaal zijn, en dat “meer producten” zich vertaalt in evenredig meer grondstoffen. Het is uiteraard zeer de moeite waard hier een nauwkeuriger analyse voor te maken.

III.3 Industrie – energie > 2050 ?

Voor de energievoorziening van de industrie doen we ook weer een aantal eenvoudige aannames. Nadere studie is nodig voor precisering. We gaan ervan uit dat de huidige elektriciteitsvraag (dit is de elektriciteit die wordt afgenomen van het net) in tact blijft (pompenergie, verlichting, enzovoort). De inzet van andere energiedragers wordt vertaald in “hoogwaardige warmte”. Dit is een beslist aanvechtbaar, bijvoorbeeld omdat een deel van het aardgas in de industrie met warmtekrachtkoppelingssystemen in elektriciteit (en warmte) wordt omgezet.

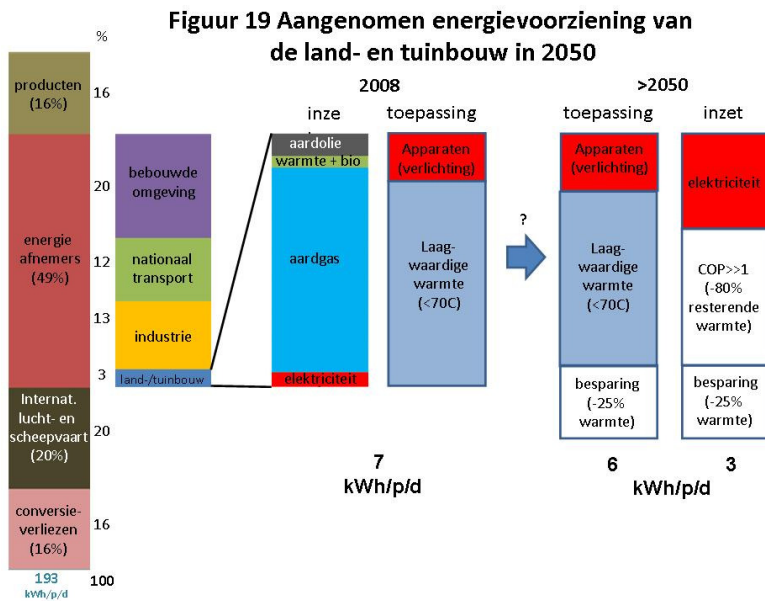
Figuur 18 Aangenomen energievoorziening van de industrie in 2050



Voor de energiebesparingsmogelijkheden nemen we aan dat de inzet van energie per eenheid product met 25% daalt (dit zou 0,7% per jaar zijn van 2008 tot 2050).

Die toekomstige hoogwaardige warmtebehoefte gaan we volledig invullen met elektriciteit (we dekken dan dus ook automatisch de eigen elektriciteitsopwekking) maar nemen nu geen hoge COP waarde aan. Warmtepompen zijn weinig effectief als er hoge temperaturen moeten worden bereikt, en aardwarmte zal in Nederland geen bijzonder hoge temperaturen kunnen leveren (maximaal 130C bij 4 km boordiepte). We zetten de inzet van fossiele energiedragers daarom 1 op 1 om in een elektriciteitsvraag (1 kWh aardgas wordt vervangen door 1 kWh aan elektriciteit, enzovoort).

III.4 Land- en tuinbouw > 2050 ?

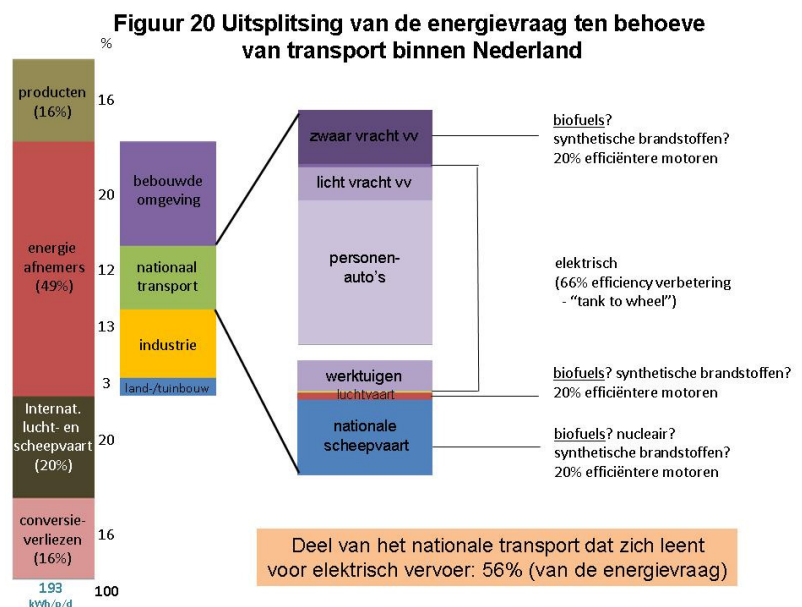


De land- en tuinbouw neemt een bescheiden plaats met 3,5% van de nationale inzet van energiedragers. Het overgrote deel hiervan gaat naar de glastuinbouw. De toekomstige energievraag van de land- en tuinbouw sector is dus vooral gevoelig voor ontwikkelingen in de glastuinbouwsector. We hebben ook hier consistent 18% groei tot 2050 aangenomen, maar uitbreiding van het huidige glastuinbouwareaal van ca. 10.000 ha wordt niet algemeen verwacht. Verder is het de vraag of de vrij sterke energie-intensivering van de afgelopen jaren (ondermeer door de

uitbreiding van het WKK vermogen) nog verder zal doorzetten. Mogelijk overdrijven we de groei hier dus. De huidige elektriciteitsvraag (m.n. belichtingsenergie), is overgenomen uit [6]¹³ We voorzien hier een daling van de warmtevraag met 25%, wat vooral is ingegeven door verwachte verbeteringen op het gebied van de vochtthuishouding in de kassen. Dit zal de huidige behoefte aan verdampingswarmte reduceren. Net als in de bebouwde omgeving nemen we ook hier aan dat de warmtevoorziening volledig elektrisch kan worden, met een COP van 4,4.

III.5 Transport –nationaal- per vervoerssegment - 2008

Vooruitlopend op een inschatting van de toekomstige energievraag van de vervoerssector, maken we hier onderscheid naar de verschillende transportvormen op nationaal niveau¹⁴. Als een van de meest belangrijke systeemveranderingen in de vervoerssector wordt momenteel de elektrificering van wegtransport gezien. Dit geeft een aanzienlijke energiewinst, maakt wegtransport deels onafhankelijk van aardolie, en geeft mogelijkheden voor elektriciteitsbuffering in de accu's van auto's, waar fluctuaties in het wind- en zonne-energieaanbod (enigszins) mee gebufferd kunnen worden.

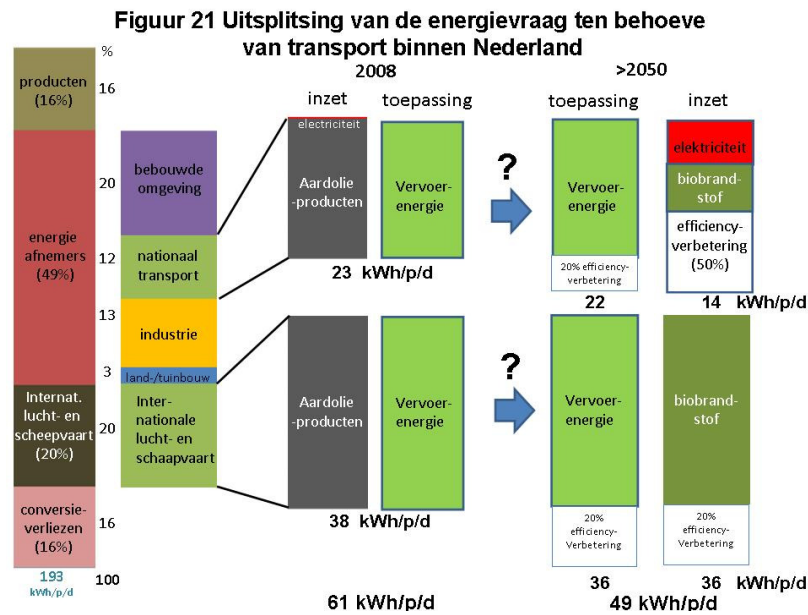


¹³ Het CBS rapporteert in de energiebalans alleen de netto energievraag van de glastuinbouw, die negatief is vanwege de verkoop van elektriciteit uit de eigen WKK installaties.

¹⁴ Deze gegevens zijn afkomstig uit het Milieucompendium, dat zich eveneens baseert op CBS gegevens, maar met wat andere definities werkt voor de toe te rekenen (nationale) scheep- en luchtvaart. Ook worden vervoerscomponent in de CBS energiebalans aan de sectoren waren toegerekend (als 'werktuigen') hier onder vervoer opgenomen. In de CBS cijfers wordt 140 TWh aan de nationale vervoerssector toegerekend, in het milieucompendium 162 TWh. Hierdoor sluipt een kleine inconsistentie in de hier gepresenteerde cijfers (2% van de nationale energievraag).

Vooralsnog wordt elektrisch vervoer vooral haalbaar geacht voor de lichtere wegtransportvormen. We gaan er daarom voorzichtigheidshalve van uit dat alleen het personenvervoer, het lichte vrachtvervoer en werktuigen (samen een kleine 60% van de energievraag voor het transport binnen Nederland) in aanmerking komen voor elektrificering en dat die segmenten volledig op elektriciteit draaien. We nemen dus aan dat de batterijtechnologie in 2050 voldoende doorontwikkeld is om dit qua actieradius en prijsstelling mogelijk te maken, en dat bijladen onderweg mogelijk is. Voor zware vrachtwagens die lange afstanden afleggen zullen vermoedelijk andere oplossingen moeten komen. Voor stadsbussen, vuilophalddiensten, enzovoort ligt het anders, maar die detaillering laten we hier buiten beschouwing.

III.6 Transport > 2050?



Ook hier weer de aanname dat in 2050 de functionele energievraag met 18% is gestegen (meer kilometers over de weg, op zee en in de lucht). We gaan er van uit dat het zware wegtransport, de (inter)nationale scheepvaart en de luchtvaart zich ook in 2050 niet lenen voor elektrische aandrijving, vanwege de grote massa van de benodigde batterijen. Voor al deze vormen van transport gaan we biomassa inzetten.

Elektrisch transport gaan we alleen invoeren voor het personenvervoer over de weg en het lichte vrachttransport, die tezamen goed zijn van 56% van de huidige energievraag (figuur 21). We gaan daarbij uit van elektromotoren die een factor 3 efficiënter zijn dan de huidige verbrandingsmotoren ("tank to wheel", met inbegrip van het verlies bij het op- en ontladen van de batterijen). Een auto met een benzinemotor die 1l op 15 km rijdt, wordt dan vervangen door een elektrische auto die 0,21 kWh elektriciteit per km vraagt [2]. We zien in figuur 21 dat de vraag naar elektriciteit dan wat kleiner is dan de vraag naar biobrandstoffen. Dat geeft misschien een vertekend beeld, omdat je op 1 kWh elektriciteit ongeveer drie maal meer kilometers kunt maken als op 1 kWh aan biobrandstoffen. Met die kleinere hoeveelheid elektriciteit worden dus meer kilometers gereden.

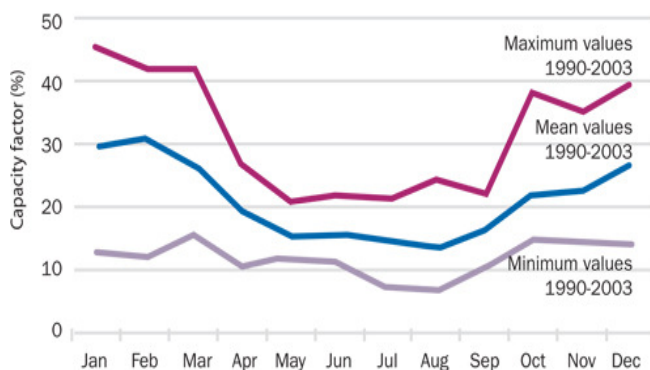
Voor de overige vervoersvormen wordt aangenomen dat door efficiëntere motoren 20% bezuiniging op de brandstofvraag mogelijk is.

III.7 De inzet van wind-, zon-PV en conventionele centrales

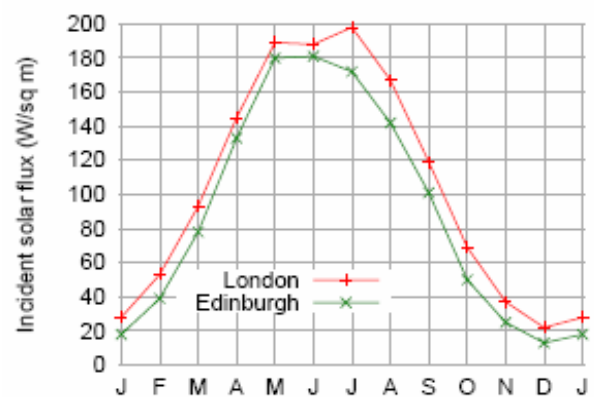
We gaan zo volledig mogelijk met windenergie en zonnestroom in de in paragraaf II.3 geraamde elektriciteitsvraag voor 2050 voorzien (64 kWh/p/d, of 1380 PJ). Dit is overigens ruim drie maal het totale elektriciteitsgebruik in 2008! We vullen een tekort door seizoensfluctuaties aan met fossiel gestookte centrales of kernenergie, om te illustreren wat het gevolg is van onvoldoende opslagcapaciteit op die termijn.

We starten met de aanname dat de windturbines jaargemiddeld in maximaal 25% van de elektriciteitsvraag kunnen voorzien (ivm de netstabiliteit), al wordt hier verschillend over gedacht¹⁵. 25% jaargemiddeld betekent overigens dat bij harde wind windenergie vrijwel alle elektriciteit levert. We leggen verder de beperking op dat wind op land ten opzichte van het huidige geïnstalleerd vermogen (2 GWi) nog mag verdubbelen tot 4 GWi, De rest van de windenergie halen we van de Noordzee. In de zomer (we rekenen voor het gemak met 6 winter- en zomermaanden, waarin de wind- en zonne-energie opbrengsten constant zijn) vullen we de elektriciteitsvoorziening volledig aan met zonnestroom.

Onderstaande figuren geven een indruk van de seizoensfluctuaties van zon en wind in Noord-West Europa.



Figuur 22. Maandelijkse opbrengstfactor van windturbines in Duitsland [5].



Figuur 23. Maandelijkse zoninstraling in Londen en Edinburgh [2].

We zien in de rechter figuur dat het maximale verschil in zoninstraling (dit correspondeert redelijk met de opbrengst van een zonnecel) ongeveer een factor 10 bedraagt (juli versus december).

Voor windenergie loopt het seizoenspatroon omgekeerd (linker figuur). In augustus is de opbrengst van windturbines ongeveer de helft van die in februari. Wind- en zonne-energie compenseren elkaar dus gedeeltelijk voor de seizoensinvloeden. Overigens is de gemiddelde "capaciteitsfactor" (rendement¹⁶) in figuur 22 – ca. 20% - lager dan van een moderne windturbine op een goede windlocatie op land in Nederland. Die ligt op 25%. Het rendement van wind op zee bedraagt op de Noordzee circa 40%.

¹⁵ In een recente studie [14] wordt voor Europa (met een dekkend elektriciteitsnetwerk voor internationale uitwisseling) berekend dat een "100% wind-plus- solar-only scenario" de inzet van 55% windenergie en 45% zon-PV de ideale mix is. De benodigde opslagcapaciteit wordt dan berekend op 1,5-1,8 maal de maandelijkse elektriciteitsvraag. Het promotiewerk van Bart Ummels [16] laat zien dat een zorgvuldige analyse van de inpasbaarheid van windelectriciteit in het net, gedetailleerde berekeningen vraagt met een hoge tijdsresolutie (15 min.). Voor Nederland berekent hij dat in 30% van de huidige elektriciteitsvraag kan worden voorzien met windturbines, zonder dat daar opslagcapaciteit voor nodig is. Wel vraagt dit zorgvuldige regeling van het vermogen van de overige elektriciteitsproductie, waarvoor ook windvoorspellingen nodig zijn.

¹⁶ Het rendement is het deel van het geïnstalleerde vermogen dat jaargemiddeld effectief wordt gebruikt. Een windturbine op van 3 MW die 100% van de tijd inzetbaar is, zou bij continue harde wind $365 \times 24 \times 3 = 26280$ MWh kunnen leveren. In de Nederlandse praktijk levert zo'n windturbine op land 6600 MWh en op zee 10500 MWh.

We vertalen deze gegevens in een eenvoudig rekenschema:

	Winter (6 maanden)	Zomer (6 maanden)
Zon-PV opbrengst (kWh/m ² /6 maanden)	30	70
Bijdrage van zon-PV aan de elektriciteitsvraag (%)	34	80
Bijdrage van wind aan de elektriciteitsvraag (%)	30	20
Wind op land (% rendement)	30	20
Wind op zee (% rendement)	48	32

De jaaropbrengst van een zonnecel wordt dus gesteld op 100 kWh/m², wat met moderne zonnecellen in Nederland momenteel haalbaar is (bij een geïnstalleerd vermogen van 120 Wp/m²¹⁷).

Met deze gegevens gaan we dus de consequenties van volledig met zon en wind opgewekte elektriciteit in de "zomer" bepalen. Uiteraard zouden we ook aan de vraagkant een uitsplitsing naar de zomer- en wintermaanden moeten maken. Omdat we met elektriciteit ook in de warmtevraag gaan voorzien, ligt het voor de hand te denken dat de elektriciteitsvraag in de wintermaanden hoger is dan in de zomermaanden. Maar we zullen ook rekening moeten houden met de opkomst van meer airconditioningsystemen en/of warmtepompen voor koeling in de zomer, met het verplaatsingsgedrag in zomer en winter vanwege het elektrisch vervoer, enzovoort. Deze complexe analyse laten we hier buiten beschouwing, en we rekenen met een "vlak" afnamepatroon van 690 PJ per 6 maanden.

Dit levert:

	Winter (6 maanden)	Zomer (6 maanden)	Winter (6 maanden)	Zomer (6 maanden)	Oppervlak
	PJ	PJ	kWh/p/d ¹⁾	kWh/p/d	km ²
Vraag	690	690	32	32	
Aanbod					
Zon-PV	237	552	11	26	2190
Wind totaal	207	138	10	6,6	
Waarvan wind op land	19	13	0,9	0,6	500
Waarvan wind op zee	188	126	9	5,8	3318
Totaal	444	690	21	32	
Nog te dekken	246	0	11	0	

1) Op jaarbasis (dus niet gedurende 6 maanden).

¹⁷ Wp = "Watt-piek". Het vermogen bij "volle zon" (onder testcondities).

In de winter blijft in deze opzet nog een elektriciteitsvraag van 11 kWh/p/d (246 PJ) over. Merk op dat dat maar liefst 75% is van de elektriciteitsvraag van de energieafnemers in 2008 (14 kWh/p/d – figuur 3). Dit vraagt een opgesteld elektrisch vermogen van 16 GW, dat voor de helft van het jaar actief is, ofwel zestien kolen, gas- en/of kerncentrales.

Op een windstille winterdag zou overigens nog een veel groter “back-up vermogen” beschikbaar moeten zijn. Dit illustreert hoe belangrijk het is dat we bij de inzet van duurzame bronnen kunnen beschikken over voldoende opslagcapaciteit en uitwisselingsmogelijkheden (smart grids) met duurzame bronnen elders, om seizoensinvloeden te kunnen overbruggen, maar uiteraard ook om veel snellere fluctuaties (over de dag) in het wind- en zonne-aanbod goed op de vraag af te kunnen stemmen.

We kiezen hier voor fossiel gestookte centrales, met de eis dat de CO₂ wordt afgevangen en ondergronds wordt geborgen. Dat vraagt 20% extra energie (op vier centrales moet er een naast staan voor de CO₂ afvang). Het elektrisch centralerendement stellen we in 2050 op 50%. Voor de productie van deze 11 kWh/p/d is dus 28 kWh/p/d aan fossiele brandstoffen nodig. Dit is iets meer dan de huidige (2008) gasvraag van de bebouwde omgeving. Het extra energieverlies door de CO₂ opslag zou komen te vervallen als we voor kernenergie zouden kiezen.

III.8 Kanttekeningen

Na een raming voor de toekomstige vraag naar energiedragers, hebben we voor 2050 onderscheid gemaakt tussen de energievraag waar -naar de huidige inzichten – technisch gesproken met elektriciteit in kan worden voorzien en de overblijvende vraag naar energiedragers. Die laatste heeft dan betrekking op de internationale zee- en luchtvaart, het zware (lange afstand)transport over de weg, en de inzet van grondstoffen ten behoeve van de industriële productie van m.n. plastics en kunstmest. Als we onze best doen de elektriciteitsvraag “tot het maximum” op te voeren, zou in 2050 de elektriciteitsvraag verdrievoudigd kunnen zijn ten opzichte van die in 2008. We hebben dan ongeveer de helft van onze vraag naar energiedragers gedekt in dit scenario.

Als we in de overblijvende energie- en grondstoffenvraag inderdaad met biomassa gaan voorzien, leert onze rekensom dat we op een benodigd landoppervlak uitkomen dat vijf maal zo groot is als het huidige landbouwareaal van Nederland. Dit is overigens een conservatieve schatting, omdat we van een hoge energieopbrengst per hectare uitgaan (als snelgroeiend hout in ons klimaatgebied). Bij een meer gedifferentieerde gewasbehoefte kan het oppervlak nog aanzienlijk toenemen.

Daarbij gaan we er van uit dat alle plantaardige producten van een hectare geoogst worden ten behoeve van de productie van brandstoffen en grondstoffen voor de chemische industrie. We zullen daarbij terdege rekening moeten houden met het feit dat de landbouwproductie, het transport en de omzetting van biomassa in bruikbare brand- en grondstoffen nog veel extra energie vraagt (die is hier voorzichtig op 25% van de biomassa energieopbrengst gesteld). Hoe de inzet van biomassa zich gaat vertalen in de aanspraken op grond- (en water-) oppervlak als de 2^e generatie biomassa (uit reststromen) en de 3^e generatie (uit algen en bacteriën) tot ontwikkeling komen, laten we hier buiten beschouwing. Het is in ieder geval belangrijk biomassavoorziening als een internationaal vraagstuk te zien, want ons eigen grondgebied is te beperkt.

Een scherp zicht op de toekomstige biomassabeschikbaarheid en op bijbehorende productie-energie, is dus essentieel voor ons beeld over onze toekomstige energie- en grondstoffenvoorziening. Uiteraard dient daarbij ook aandacht te zijn voor de emissie van broeikasgassen in de biomassaketens. In een recent advies van de Commissie Duurzaamheidvraagstukken Biomassa aan het ministerie van VROM [8] wordt overigens aangegeven dat in 2050 mogelijk in een derde van een eventueel verdubbelde wereldwijde energie- en grondstoffenvraag kan worden voorzien met biomassa [8]. Wij komen hier voor Nederland op een behoefte van 50% uit, maar die hangt deels samen met ons relatief grote aandeel in het internationale transport. Eén en ander roept het gevoel op dat we met onze raming tegen de grenzen van biomassabeschikbaarheid aanlopen, maar het zou niet juist zijn te concluderen dat een dermate grote biomassa-inzet volstrekt irreëel is. De toekomst zal het leren.

Het feit dat we biomassa dringend nodig hebben voor energie- en grondstoftoepassingen waar we minder eenvoudig met elektriciteit in kunnen voorzien betekent wel dat we voorzichtig moeten zijn met ons voor de verdere toekomst rijk te rekenen met de inzet van biomassa voor elektriciteitsopwekking, warmtevoorziening en het lichte wegtransport, zoals in veel toekomstscenario's gebeurt. Op de korte en middellange termijn, waarin we nog van bestaande technologie (als verbrandingsmotoren in onze personenauto's en verbrandingsinstallaties in de elektriciteitscentrales) gebruik moeten maken, ligt het anders.

Maar, het is verstandig ook voldoende aandacht te hebben voor "biomassa-alternatieven". De energieopbrengst van biomassa per eenheid landoppervlak is relatief laag, en wanneer we zonne- (of wind-)energie kunnen inzetten voor de productie van vloeibare en gasvormige energiedragers verlaagt dat de druk op de oppervlaktebehoefte. Waterstofproductie uit wind-, zonnestroom of kerncentrales, is beschikbare technologie met een redelijke efficiëntie, maar het ontbreekt nog aan goede opslagtechnologie en brandstofcellen die breed in de maatschappij inzetbaar zijn. Waterstof kan worden omgezet naar methaan of vloeibare koolwaterstoffen, die het energieconversie- en opslagprobleem eenvoudiger maken, maar dit vergt nog een aanzienlijke technologieontwikkeling.

Overigens wekt dit wel een interessant beeld op ten aanzien van de mogelijkheden van de oogst van zonne-energie in Noord-Afrika voor Europa. Bezwaren tegen elektriciteitsvoorziening vanuit CSP plants (Concentrating Solar Power – de "spiegels in de woestijn") "in de Sahara" zijn onder andere de behoefte aan een nieuw Europabreed dekkend elektriciteitsnet dat kleine energieverliezen geeft, afhankelijkheid van dubieuze regimes en gevoeligheid voor terroristische aanslagen op elektriciteitsleidingen. Als deze centrales niet elektriciteit, maar brandstoffen uit CO₂ en water (langs de Afrikaanse kust) gaan produceren, waarvan voorraden kunnen worden aangelegd en waarvan de distributie meer verspreid is, gaan deze bezwaren minder zwaar wegen. Maar we zullen ook alternatieve vormen van energievoorziening niet uit het oog moeten verliezen. Denk aan nucleaire aandrijving van de internationale scheepvaart, wat voor militaire toepassingen al een gegeven is.

Deel IV: Conclusies

- Uitdagingen op het gebied van het verduurzamen van onze energievoorziening en grondstoffenbehoefte voor de chemische industrie kunnen niet los van elkaar worden gezien. Beide leggen beslag op fossiele voorraden.
- Het internationaal transport wordt vaak niet meegerekend bij onze energiebehoefte. Als we die, tezamen met de grondstoffenvraag van de chemische industrie, meetellen is de inzet van energiedragers in de economie ongeveer tweemaal zo groot als de "energievraag door afnemers", waar vaak op gedoeld wordt met "De Nederlandse energievraag".
- Om tot een betrouwbaar beeld van de mogelijkheden voor inzet van duurzame bronnen te komen is het dus van groot belang vanuit die integrale inzet van energiedragers te redeneren.
- Vervolgens dient de inzetmogelijkheid van elektriciteit expliciet te worden gemaakt. Alleen op basis van de raming van een toekomstige elektriciteitsvraag kunnen betrouwbare uitspraken worden gedaan over het benodigd oppervlak voor zon-PV, windturbines, enzovoort.
- In een ruwe benadering ramen we hier dat de elektriciteitsvraag in Nederland in 2050 met een factor 3 gestegen kan zijn t.o.v. 2008.
- Als we daar vooral met windenergie (25% van de nationale elektriciteitsvraag jaargemiddeld, de capaciteit van wind op land verdubbelen we, de rest wordt op zee opgewekt) en zon-PV (80% van de elektriciteitsvraag in de zomer¹⁸) in gaan voorzien, hebben we bij de huidige opwekkingsrendementen 2150 km² (6% van het landoppervlak) voor zon-PV nodig, en windmolenparken die op land 500 km² beslaan en op de Noordzee 3250 km².
- Om de economie bijna volledig op duurzame elektriciteitsopwekkende bronnen te laten draaien, die niet aanstuurbaar zijn voor hun actuele aanbod, zal ons energiesysteem flexibeler moeten worden om vraag en aanbod op elkaar af te stemmen. Thema's als energieopslag en smart grids zijn uiterst wezenlijk om het hier geschetste scenario werkelijkheid te kunnen laten worden. De sterke seizoensfluctuaties in zon-PV opbrengst zijn een voorbeeld van de uitdagingen die ons te wachten staan.
- Als zon-PV, zoals hier, gedimensioneerd wordt op volledige duurzame elektriciteitsopwekking in de zomer, ontstaat er een serieus gat in de winterse elektriciteitsvoorziening, waar we hier –ter illustratie– met fossiele centrales of kernenergie in voorzien. In ons scenario gaat het om 18% van de jaarlijkse elektriciteitsvraag in 2050 (247 PJ).
- Wat naast de elektriciteitsvraag overblijft is een grondstoffenvraag van de chemische industrie en vloeibare of gasvormige brandstoffen voor het internationaal vlieg- en zeevervoer en het zware wegtransport. Die bedraagt in deze raming ongeveer de helft van onze totale vraag naar energiedragers.
- Hoe die behoefte in de toekomst ingevuld gaat worden is nog een open vraag. Hier zetten we uitsluitend biomassa in, om gevoel voor de consequenties van die aanname te krijgen. We zullen in de toekomst evenwel ongetwijfeld ook synthetisch gevormde brandstoffen zien, die (deels) met de inzet van zonne-energie geproduceerd worden (bijvoorbeeld (via) waterstof uit elektrolyse (en CO₂)). Maar ook zullen inzichten wijzigen ten aanzien van de mogelijkheden tot het elektrificeren van een groter deel van de transportsector, enzovoort.
- Aanscherping van deze eerste analyse en voortschrijdend inzicht zullen tot tot andere conclusies gaan leiden. De hier gepresenteerde resultaten moeten dus niet als een "voorspelling" worden gelezen, maar slecht als een raamwerk voor verdere discussie.

¹⁸ Windturbines leveren in de zomer gemiddeld minder elektriciteit dan in de winter. Hier wordt ermee gerekend dat een jaargemiddelde bijdrage van 25% zich vertaalt in een zomerbijdrage van 20%.

Bijlage 1: Opmerkingen bij (duurzame) energieopties

We hebben ons volledig geconcentreerd op de inzet van wind-energie, zon-PV en biomassa. Uiteraard zullen er meer bronnen beschikbaar zijn. Onderstaand maken we daar een paar opmerkingen over. Ook verwijzen we naar achtergrondinformatie over de verwachte ontwikkelingen rond zon-PV en windenergie.

Zon-PV

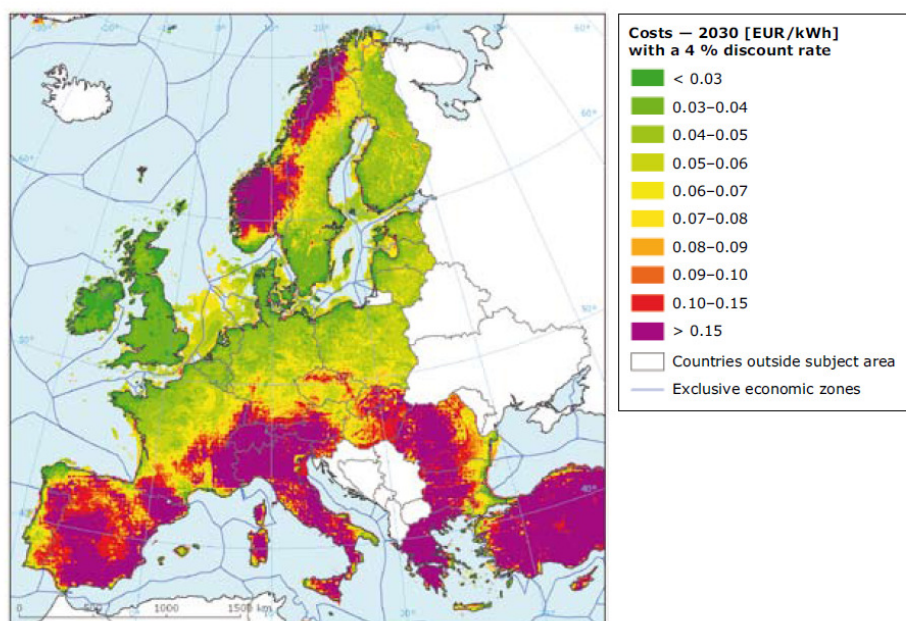
Er is hier bewust niet stilgestaan bij de vraag in hoeverre de inzet van de grote hoeveelheden biomassa, zon-PV en windenergie economisch haalbaar is. Die vraag heeft zeer veel aspecten, waarbij nog niet te voorziene ontwikkelingen in de komende 40 jaar doorslaggevend kunnen zijn voor het antwoord. Een van die aspecten is uiteraard de kostprijsontwikkeling van zon-PV stroom. Een onderbouwde analyse is van het Europese PV Technology Platform is te vinden in referentie [11]:

Table 1. Expected development of PV technology over the coming decades - figures are rounded and indicative, and should be interpreted with reference to the provisos listed below.

	1980	Today	2015/2020	2030	Long term potential
Typical turn-key system price (2007 €/W _p , excl. VAT)	>30	5	2.5/2.0	1	0.5
Typical electricity generation costs southern Europe (2007 €/kWh)	>2	0.30	0.15/0.12 (competitive with retail electricity)	0.06 (competitive with wholesale electricity)	0.03
Typical commercial flat-plate module efficiencies (see below)	up to 8%	up to 15%	up to 20%	up to 25%	up to 40%
Typical commercial concentrator module efficiencies (see below)	(~10%)	up to 25%	up to 30%	up to 40%	up to 60%
Typical system energy pay-back time southern Europe (years)	>10	2	1	0.5	0.25

Windenergie

Vooruitzichten voor de (prijs)ontwikkeling van windenergie in Europa (on- en offshore) worden bijvoorbeeld gegeven in referentie [15], waar onderstaande figuur uit is overgenomen:



Een interessante indicatie in deze referentie is verder dat de energieproductie per eenheid oppervlak van wind op zee tot 2030 met 50% kan toenemen.

Kernfusie

Rond 2050 is er mogelijk zicht op commerciële toepassing van kernfusie. Het is onwaarschijnlijk dat op dat moment al een significante bijdrage geleverd wordt aan de elektriciteitsvoorziening.

Kernsplijting

Verwachtingen zijn dat rond 2030 de IV-e generatie kernreactoren beschikbaar komt. Deze geven een kleiner afvalprobleem, en benutten het natuurlijke uranium aanzienlijk beter (tot een factor 100) dan de huidige reactoren. Dit kan het maatschappelijke draagvlak voor de inzet van kernenergie vergroten. De ontwikkeling van de "nuclear battery" ("een kernreactor in een scheepscontainer") moet in de gaten worden gehouden voor lokale energiebehoeftes, waar met "onomstreden duurzame" bronnen lastig in te voorzien is.

Getijde- en golflagenenergie

Nederlandse condities zijn niet bijzonder gunstig voor deze toepassing. Toekomstige benutting speelt zich eventueel af in de procentensfeer.

Blue Energy

(Elektriciteit uit het concentratieverschil van zout en zoet water). De bijdrage aan de Nederlandse elektriciteitsvraag zal waarschijnlijk hooguit enkele procenten bedragen, als gevolg van infrastructurele belemmeringen.

Waterstof

Verwachtingen rond een waterstofeconomie zijn sterk getemperd, ondermeer door de voorsprong die elektrisch wegvervoer op waterstofaandrijving heeft gekregen. Toch is dat een wat korte termijn blik. Voor langdurige energieopslag en voor de synthese van brand-/grondstoffen gaat waterstof mogelijk een belangrijke rol spelen. Waterstof is een energiedrager, en geen energiebron. Het zal "kunstmatig" gevormd moeten worden. Bij een aanzienlijke inzet van waterstof op termijn, is de ketenefficiëntie van de inzet van waterstof (productie, opslag en omzetting) dus medebepalend voor onze totale energievraag. Een en ander is nog erg in beweging.

Internetsuggesties

Voor meer achtergronden over duurzame energievormen verwijzen we u graag naar het werk van David Mackay: www.withouthotair.com.

Aanbevelenswaardig is verder het door de firma Quintel op internet aangeboden energie transitie model waarmee men u zelf de energievoorziening van Nederland (en enkele andere Europese landen) kan definiëren en ondermeer kan doorrekenen op kosten en CO₂ emissies: www.energietransitiemodel.nl

Tot slot zij verwezen naar een website van de onafhankelijke European Climate Foundation (www.roadmap2050.eu) waar een veelheid aan informatie te vinden is over de vraagstukken die de overgang naar een Europese low-carbon economie omringen.

Referenties

- [1] CBS – energiebalans:
<http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=37281&D1=a,!1,!4&D2=a&D3=0,20,33,%28I-5%29-I&HD=100920-1240&HDR=T&STB=G1>
- [2] David Mackay, *Sustainable energy without the hot air*, UIT Cambridge Ltd., 2008. Zie ook : www.withouthotair.com.
- [3] K. de Groot & C. le Pair: De brandstofkosten van windenergie; een goed bewaard geheim; SPIL 263 – 264 (2009) p.15 ff.; ook: <http://www.clepair.net/wind-SPIL-1.html>
- [4] IEA, How the world energy sector can deliver on a climate agreement in Copenhagen. Special early excerpt of the World Energy Outlook 2009 for the Bangkok UNFCC meeting, October 2009. http://www.iea.org/weo/docs/weo2009/climate_change_excerpt.pdf
- [5] ISET Wind Energy Measurement Network (2004) ; Zie - <http://www.wind-energy-the-facts.org/en/part-2-grid-integration/chapter-2-wind-power-variability-and-impacts-on-power-systems/understanding-variable-output-characteristics-of-wind-power-variability-and-predictability.html>
- [6] N. van der Velden, P. Smit, *Energiemonitor van de Nederlandse Glastuinbouw 2008*, LEI Wageningen UR, dec. 2009.
- [7] Fieke Geurts & Max Rathmann, *Versnelde ontwikkeling van duurzame energie in Nederland. de rol van zon-PV & een verbeterd SDE systeem*, Ecofys, 2009.
- [8] Commissie Duurzaamheidvraagstukken Biomassa, *Eerst kwaliteit dan kwantiteit. Advies over de bijdrage van biomassa aan de duurzame energie doelstellingen*. 3 febr. 2010. (www.corbey.nl/includes/download.asp?media_id=588)
- [9] Lako, P. *Technical and economic features of renewable electricity technologies*, ECN , Dec. 2010
- [10] Energievraag per vervoerssector (Milieucompendium): <http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/indicatoren/nl0030-Energieverbruik-door-verkeer-en-vervoer.html?i=6-40>
- [11] EU Photovoltaic Technology Platform, *A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology*, European Communities, 2007.
- [12] KIVI/NIRIA, Stuurgroep Energie, *Smart Energy Mix*, Publicatie naar aanleiding van het jaarcongres KIVI/NIRIA, 2006.
- [13] www.energietransitiemodel.nl
- [14] Heide, D., von Bremen, L., Greiner, M., Hoffmann, C., Speckmann, M., Bofinger, S., *Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe*, Renewable Energy 35 (2010) pp. 2483-2489.
- [15] EEA Technical report no. 6, *Europe's onshore and offshore wind energy potential. An assessment of environmental and economic constraints*, 2009
- [16] Bart Ummels, Wind Integration, Power system operation with large scale wind power in liberalized environments. Proefschrift Technische Universiteit Delft, 26 februari 2009.
- [17] Platform groene grondstoffen, "Biomassa, hot issue", 2008.
http://www.minlnv.nl/portal/page?_pageid=116,3387931&_dad=portal&_schema=PORTAL&p_file_id=28145