

Naar een groen energieparadijs

Hoe we wereldwijd een klimaatvriendelijk
energiesysteem kunnen realiseren

Ruud Bronmans



Eburon
Utrecht 2023

ISBN 978-94-6301-481-6

Academische Uitgeverij Eburon, Utrecht
www.eburon.nl

Omslagontwerp: Textcetera, Den Haag
Grafisch ontwerp: Studio Iris, Leende

© 2023 R. Bronmans. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de rechthebbende.

INHOUD

VOORWOORD	7
INLEIDING	11
HOOFDSTUK 1 ENERGIE UIT ZONNESTRALEN	25
HOOFDSTUK 2 ENERGIE UIT WIND	37
HOOFDSTUK 3 ENERGIE UIT WATERKRACHT	47
HOOFDSTUK 4 KERNENERGIE	53
HOOFDSTUK 5 KERNREACTOREN	65
HOOFDSTUK 6 KERNCENTRALES	77
HOOFDSTUK 7 BIOMASSA	93

HOOFDSTUK 8 WATERSTOF	115
HOOFDSTUK 9 HET MONDIALE ENERGIEVERBRUIK	141
HOOFDSTUK 10 BEVOLKING	157
HOOFDSTUK 11 GROENE ENERGIESYSTEMEN	187
HOOFDSTUK 12 ENERGIESYSTEMEN IN DE WERELD	211
HOOFDSTUK 13 OP WEG NAAR EEN GROEN ENERGIEPARADIJS	235
BRONNEN EN NOTEN	243
AANBEVOLEN LITERATUUR	271

INLEIDING

Klimaatverandering is zonder twijfel het grootste probleem waarmee de mensheid heeft te kampen, en een probleem dat de mensheid moet oplossen om te overleven. De klimaatverandering is in gang gezet door de voortgaande opwarming van de Aarde. Die opwarming komt voornamelijk door de stijging van de concentratie van kooldioxide (CO_2) in de atmosfeer, als gevolg van de verbranding van fossiele brandstoffen. Voor het begin van de Industriële Revolutie rond het jaar 1850 was het CO_2 -gehalte in de atmosfeer 280 ppm, nu is het al boven de 400 ppm en het is hard op weg naar de 420 ppm, 50 procent meer.

Het lijkt weinig, 280 deeltjes CO_2 per miljoen deeltjes lucht, maar als alle CO_2 door een magische hand naar beneden zou worden gedrukt, wordt dat een laag op het aardoppervlak van meer dan 140 cm dik. Deze dikke deken heeft de planeet heel lang op een tamelijk comfortabele en in ieder geval voor plant, dier en ook mens leefbare temperatuur gehouden. Zonder het broeikas effect van die deken zou de gemiddelde temperatuur van de planeet 31 graden lager zijn. Het grootste deel van de planeet zou verschrikkelijk koud en onleefbaar zijn. Te weinig CO_2 in de atmosfeer is dus niet goed.

Te veel CO_2 ook niet want dan wordt het te warm. Met 420 deeltjes CO_2 per miljoen deeltjes lucht zou de deken meer dan twee meter dik worden. Gelukkig leidt de toename van de concentratie van CO_2 met 50 procent niet tot een versterking van het broeikas effect met 50 procent. Als dat wel zo zou zijn, zou de gemiddelde temperatuur niet 31 graden maar 45 graden hoger worden dan met een atmosfeer zonder CO_2 . Ofwel, de gemiddelde temperatuur zou dan 15 graden hoger zijn

dan nu. De tropen zouden onleefbaar heet worden, en in streken met een gematigd klimaat zou de winter in de zomer veranderen en de zomer zou meer dan tropisch heet worden. Het ijs op de Zuidpool en op Groenland zou afsmelten en de zeespiegel zou daardoor 60 tot 70 meter stijgen. De versterking van het broeikaseffect is gelukkig veel minder, omdat een kleine stijging van de temperatuur van de oppervlakte van de planeet al leidt tot een grote stijging van de warmtestraling van de planeet. Bijzonder groot zelfs, want de hoeveelheid warmtestraling van een object, zoals de Aarde, is evenredig met de vierde macht van de temperatuur van het oppervlak van dat object. Een stijging van de temperatuur van het oppervlak van de planeet met één procent leidt er zodoende al toe dat de planeet circa vier procent meer energie gaat uitstralen richting heelal. Dat houdt het broeikas effect binnen de perken. Maar zelfs de huidige kleine stijging van de gemiddelde wereldtemperatuur met één graad leidt al tot gevolgen die de laatste jaren duidelijk merkbaar worden. Hittegolven, bosbranden en verdroging naast lokaal enorme regenval, om maar wat te noemen.

De belangrijkste oorzaak van de opwarming en daarmee van de klimaatverandering is zoals gezegd de toename van de concentratie van CO₂ door het verbranden van fossiele brandstoffen. Het is niet de enige oorzaak, want ook andere broeikasgassen doen mee, vooral methaan, afkomstig van koeien, en als moerasgas uit bevoeide rijstvelden. De meeste energie wordt nu geproduceerd door fossiele brandstoffen te verbranden. Daarmee is de energievoorziening een groot probleem geworden. Dit verhaal gaat over de mogelijke oplossingen van dit probleem.

Energie

Energie is onmisbaar voor alle menselijke activiteiten. Die energie komt nu nog voor het overgrote deel uit het verbranden van fossiele brandstoffen. De voorraden fossiele brandstoffen, steenkool, bruin-

kool, aardolie en aardgas, zijn eindig en afgezien van steenkool zijn ze bij ongewijzigd verbruik over afzienbare tijd op. Het aardgasveld in Groningen is hiervan een mooi voorbeeld. De exploitatie van het toen grootste aardgasveld in de wereld begon omstreeks 1960. Zestig jaar later, in 2020, was van deze enorm grote voorraad nog slechts een kwart over. Bij ongewijzigde exploitatie zou dit veld dus over twintig jaar leeg zijn. En dit geldt voor vele aardgasvelden, zeker met de toenemende vraag naar aardgas als schone, “CO₂-arme” brandstof. Als landen zoals India flink gaan meedoen, zijn de aardgasvoorraden nog sneller op. En dit geldt ook voor de voorraden aardolie en in mindere mate voor de voorraden bruinkool en steenkool. Hoe dan ook, de voorraden fossiele brandstoffen raken een keer op, wat op zich al een goede reden is om te gaan zien naar andere bronnen van energie. In de vorige eeuw kwam er rond 1970 dan ook een beweging op gang om van fossiele energiebronnen over te stappen op “duurzame” energiebronnen zoals zonne-energie en windenergie.

De opwarming van de aarde en klimaatverandering als gevolg van verhoging van de concentratie van CO₂ in de atmosfeer door het verbranden van fossiele brandstoffen speelde toen nog niet. Dit kwam pas goed in beeld in 1993 met de oprichting van het IPCC, het “Intergovernmental Panel on Climate Change”. Er ontstond toen een beweging om over te stappen op energiebronnen die geen CO₂-uitstoot met zich meebrengen. Beide bewegingen richten zich tegen het gebruik van fossiele energiebronnen, maar om verschillende beweegredenen. Dit verschil is nu nog te merken. De ene beweging heeft het over “duurzame” energiebronnen en de andere beweging over “CO₂-arme” en “CO₂-vrije” energiebronnen.

Kortom, het ging eerst om energieschaarste en vervolgens om opwarming en klimaatverandering. Er is een fundamenteel verschil tussen beide problemen. Het probleem van de eindigheid van fossiele energiebronnen hoeft niet tot een onomkeerbare catastrofe te leiden. Een tekort aan energie uit fossiele energiebronnen zoals aardgas, aardolie en steenkool, kondigt zich aan, wordt geleidelijk erger,

en er is tijd om er iets aan te doen. Het probleem van opwarming en klimaatverandering kan wel tot een onomkeerbare catastrofe leiden. Tegen de tijd dat de gevolgen voor iedereen duidelijk beginnen te worden, kan de concentratie van CO₂ in de atmosfeer zo hoog zijn opgelopen dat er geen weg terug meer is.

Met andere woorden, waar energietekorten overkomelijk lijken, is de opwarming van de planeet potentieel catastrofaal en einde verhaal. Geen tweede kans. De oplossing van dit probleem moet in één keer goed. De oplossing moet ook een blijvende oplossing zijn, dus duurzaam.

Wat is duurzaam?

In de economie stond “duurzaam” ooit voor aanhoudend, als in “aanhoudende economische groei”, zodat de bomen tot in de hemel kunnen groeien. In de ecologie wordt onder duurzaamheid verstaan de eigenschap van biologische systemen om voor onbepaalde tijd divers en productief te blijven. De omschrijving van duurzaamheid in het bekende Brundtland rapport aan de Verenigde Naties uit 1987, “Our Common Future”, luidde net weer wat anders. In het Brundtland rapport staat: “Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.” Ofwel duurzame ontwikkeling is “ontwikkeling die voorziet in de behoeften van de huidige generatie, zonder daarmee voor toekomstige generaties de mogelijkheden in gevaar te brengen om ook in hun behoeften te voorzien”, aldus de bijna letterlijke vertaling in de Wet Milieubeheer, Artikel 4.3, tweede lid. De toekomstige generaties (mensen) mogen dus niet worden geschaad. Verder wordt nog gesteld dat “At a minimum, sustainable development must not endanger the natural systems that support life on Earth: the atmosphere, the waters, the soils, and the living beings”. Duurzame ontwikkeling moet dus niet de natuur schaden.

Duurzaam heeft dus geen eenduidige betekenis. Enerzijds betekent het “voor onbepaalde duur” of zelfs “voor altijd”. Anderzijds staat het in het begrip “duurzame ontwikkeling” voor een ontwikkeling zonder negatieve gevolgen op termijn.

Er valt nog een derde betekenis te onderscheiden, in de zin dat “duurzaam” inhoudt dat de omgeving, de planeet, niet wezenlijk verandert door een menselijke activiteit, zoals het gebruik van een energiebron of een manier van landbouw bedrijven of wat dan ook. Dit is een zeer strikt criterium waar weinig menselijk activiteiten nu aan voldoen. Een voorbeeld van een in deze betekenis duurzame activiteit is het gebruik van waterstof als energiedrager. Eerst met behulp van een elektrische stroom water splitsen in zuurstof en waterstof, om dan later de waterstof weer te combineren met zuurstof tot water, door verbranding of in een brandstofcel, terug naar het begin.

Voorwaarde is wel dat de twee reacties in ongeveer hetzelfde tempo gaan. Water splitsen in waterstof en zuurstof en waterstof laten reageren met zuurstof zijn reacties die allebei vlot verlopen. Biomassa in de vorm van hout gebruiken bijvoorbeeld kan ook in een dergelijke kringloop, maar dat geeft problemen want de ene reactie, verbranden met afgifte van CO_2 , gaat veel harder dan de andere, aangroeien van een boom met opname van CO_2 .

Fossiele brandstoffen zijn duidelijk niet duurzaam in de betekenis van “duurzame ontwikkeling” want hun CO_2 -uitstoot schaadt komende generaties. Ze zijn overigens ook niet duurzaam in de betekenis van “voor onbepaalde duur” beschikbaar, want ze zullen bij ongewijzigd verbruik binnen afzienbare tijd opraken. En duurzaam in de derde betekenis zijn ze ook niet.

De drie verschillende betekenissen van “duurzaam” zijn verwarrend, en daarom is de term “duurzaam” niet erg bruikbaar. Een betere term is zoiets als “groen”. Groen staat als kleur voor “veilig”. Veilig voor planeet, flora en fauna. Met “groen” wordt in dit verhaal verder bedoeld dat gebruik veilig is in de zin van geen ecologische schade aanrichtend, met name niet bijdragend aan klimaatverandering door

de uitstoot van CO₂ of andere broeikasgassen. Groen houdt dus ook in dat er geen of zo weinig mogelijk schade wordt toegebracht aan het ecosysteem, fauna en flora, door andere oorzaken.

Een energiebron is “groen” als die om te beginnen geen CO₂ produceert tijdens het leveren van energie, dus een “CO₂-vrije” energiebron. De term “CO₂-arm” wordt wel gebruikt om aan te geven dat een energiebron niet echt CO₂-vrij is omdat er bij de constructie van die energiebron CO₂ is vrijgekomen, bijvoorbeeld bij het smelten van silicium voor zonnecellen. Dat doet niet meer ter zake vanaf het moment dat alle energiebronnen op de planeet “groen” zijn, als er dus geen fossiele energiebronnen meer worden gebruikt. Het silicium wordt dan gesmolten met groene energie. Een aanduiding als CO₂-arm is dan niet meer van toepassing. Om qua CO₂-uitstoot groen te zijn is het dus alleen nodig dat de energiebron tijdens het produceren van de energie geen CO₂ voortbrengt.

Een energiebron is groen als er ook geen schade wordt toegebracht aan de planeet, niet aan de fauna, door vogels uit de lucht te meppen bijvoorbeeld. Of door de flora te verstoren, bijvoorbeeld door veelvuldig maaien van bermen om biomassa te oogsten. Zo bezien is er geen energiebron te bedenken die volledig groen is. Dat klopt, er zijn ook minstens vijftig tinten groen, van bleekgroen tot diepgroen.

Naar een groen energiesysteem

Het huidige energiesysteem is grotendeels gebaseerd op het verbranden van fossiele brandstoffen, waarbij CO₂ vrijkomt. De uitstoot van CO₂ leidt tot opwarming van de planeet. Een van de akelige dingen van de mondiale opwarming is het zelfversterkende effect. Waar bijvoorbeeld door de opwarming sneeuwbedekking of ijs verdwijnt, wordt er minder zonnestraling weerkaatst en meer zonnewarmte opgenomen, wat de opwarming versnelt. Daarnaast is het denkbaar dat grote hoeveelheden methaan, een sterk broeikasgas, vrijkomen uit

door de opwarming ontdooiende “permafrost” in Siberië, Canada en Alaska. De daardoor versterkte opwarming kan leiden tot nog meer ontdooiende permafrost en nog meer methaan en nog meer opwarming, in een vicieuze cirkel.

Voorkomen is in dit geval niet alleen beter dan genezen, genezen is praktisch bijna onmogelijk. Er zijn technische oplossingen om CO₂ uit de lucht te halen, maar die slurpen energie en daarvoor is er voorsnog veel te weinig groene energie. Bomen planten helpt, maar de planeet heeft niet genoeg land om voldoende bomen te kunnen planten. Biomassa verbranden en de resulterende CO₂ ondergronds opslaan, levert slechts een kleine vermindering van CO₂ in de atmosfeer op vergeleken met de gigantische hoeveelheden CO₂ die de laatste honderd jaar in de atmosfeer zijn gebracht.

Om de uitstoot van CO₂ terug te brengen tot nul is alleen een volledige transitie zinvol: het energiesysteem als geheel moet om. Kleine beetjes helpen niet. Het verbruik van fossiele energie moet heel veel minder. Dus niet met een klein beetje door bijvoorbeeld de thermostaat van de centrale verwarming een graad lager te zetten, maar de cv-ketel op aardgas moet weg. Net zo min helpt tien procent bio-ethanol in de benzinetank. Wat zonder die bio-ethanol over tien jaar met de CO₂-concentratie in de lucht gebeurt, gebeurt met maatregelen als die tien procent bio-ethanol in de tank gewoon een jaar later.

Het helpt niet om wat laaghangend fruit te plukken en te denken dat daarmee de goede weg is ingeslagen. Het plukken van het laaghangend fruit is geen probleem, de echte problemen komen pas daarna. Nu is dit wat voorbarig gesteld aangezien zelfs het laaghangend fruit zoals de vergroening van het huidige stroomverbruik nog niet is geplukt. Het stroomverbruik maakt slechts een vijfde deel uit van het totale energieverbruik door alle eindgebruikers in Nederland, het zogenaamde finale energieverbruik, van zo'n 500 TWh per jaar. Daarna komt het echte werk zoals de vergroening van verwarming, mobiliteit en transport, en vooral de vergroening van de industrie, inclusief de chemische industrie.

Wie gebruiken energie?

De industrie is in Nederland en ook wereldwijd namelijk de grootste verbruiker van fossiele brandstoffen als steenkool, aardolie en aardgas. Daarna komt de dienstensector en dan pas de huishoudens. De industrie is daarmee ook de grootste veroorzaker van CO₂-uitstoot. Ook is de industrie de grootste stroomverbruiker: 34 procent van de elektriciteit in Nederland wordt gebruikt door de industrie, tegenover 32 procent bij de dienstverlening en 21 procent in woningen. Die elektriciteit wordt nog steeds voor een groot deel opgewekt met steenkool en aardgas, fossiele stroom dus.

Er is gek genoeg veel te doen over het verbruik van energie in de vorm van aardgas door huishoudens, ook al tikt dit niet erg aan. Er wordt, niet erg succesvol, campagne gevoerd om de huishoudens van het aardgas af te krijgen. Door de Nederlandse huishoudens wordt tegen de 10 miljard m³ gas per jaar verbruikt, wat ongeveer een kwart is van het totale Nederlandse gasverbruik. Dit huishoudelijke gasverbruik leidt tot 17 Mton CO₂-uitstoot, net geen 11 procent van de totale Nederlandse CO₂-uitstoot. Niet niks, maar ook niet heel veel. Alle woningen van het aardgas af tikt dus niet erg aan qua vermindering van de uitstoot van CO₂.

Dat komt doordat de CO₂-uitstoot door het verstoken van aardgas maar een klein deel van de totale uitstoot van de huishoudens is. Van de CO₂-uitstoot door een doorsnee huishouden komt nu het grootste deel, 29 procent, voor rekening van industriële producten, dus de spullen in de woning, en 21 procent voor rekening van voedingsmiddelen. Spullen en voeding samen zorgen dus voor de helft van de CO₂-uitstoot van een doorsnee huishouden. Mobiliteit, voornamelijk de auto, is goed voor 19 procent van de CO₂-uitstoot. Gas en stroom zijn samen goed voor 18 procent, waarbij gas de hoofdrol heeft vanwege de (centrale) verwarming. Voor vermindering van de CO₂-uitstoot van huishoudens moet dus eigenlijk eerst naar de industrie worden gekeken, inclusief de voedingsmiddelenindustrie, vervolgens naar de

auto, en dan pas naar het gas- en stroomverbruik van de huishoudens zelf. Voor vermindering van de totale CO₂-uitstoot moet vooral naar de industrie worden gekeken.

Die industrie staat overigens voor een groot deel in China, want daar worden een heleboel spullen gemaakt die in Nederland worden gebruikt. In de statistieken wordt het energieverbruik van in China gemaakte spullen die worden uitgevoerd naar Nederland geturfd bij het Chinese energieverbruik. Maar het zou eigenlijk moeten worden bijgeteld bij het energieverbruik van Nederland. De verbruikte energie wordt nu toegerekend aan de producent van de spullen, niet aan de consument ervan. Het zou ook erg lastig zijn om dit te doen, maar de statistieken geven onbedoeld wel een scheef beeld van het energieverbruik door Nederlandse consumenten. Om het Nederlandse energieverbruik door de consument, dus iedereen, volkomen CO₂-vrij te maken, moeten ook China en andere buitenlandse landen overstappen op CO₂-vrije energie, in ieder geval voor hun export. En om de energievoorziening in de gehele wereld CO₂-vrij te maken, moeten alle economieën overstappen op CO₂-vrije energie. De energietransitie is daarmee een mondiale opgave.

Energiebesparing

Besparing van energie wordt vaak genoemd als eerste middel om de CO₂-uitstoot te verminderen. Dit is een open deur en die wordt in dit verhaal niet verder geopend, op de volgende opmerkingen na.

De mogelijkheden voor energiebesparing zijn op een gegeven moment wel uitgeput. Als de spouwmuur eenmaal met isolatiemateriaal gevuld is, en er zijn nog heel veel spouwmuren te vullen, kan die niet nog een keer gevuld worden. Idem voor de ongeïsoleerde daken. Ook kan elke auto op benzine slechts één keer vervangen worden door een stekkerauto, of een stekkerfiets. Een gloeilamp kan maar één keer worden vervangen door een ledlamp. Er zijn steeds minder mogelijkheden voor besparing.

Hoe zuiniger de ledlampen nog gaan worden, de energiebesparing door de overgang van een gloeilamp van 60 watt naar een ledlamp van 5 watt is niet te overtreffen. Van die 5 watt valt misschien nog een of twee watt af te halen, maar dat valt in het niet vergeleken bij de eerdere besparing van 55 watt. Onzuinige machines kunnen vervangen worden door zuinige, maar de besparing wordt steeds minder. De mogelijke besparingen worden steeds kleiner.

Besparing als middel tot vermindering van de uitstoot van CO₂ is dus een aflopende zaak. En daar komt nog bij dat hoe groener de energiebronnen worden, des te minder besparing van energie helpt om de CO₂-uitstoot verder te beperken. Voor alle duidelijkheid, een en ander betekent niet dat er niet bespaard hoeft te worden. Het is juist vanzelfsprekend dat er moet worden bespaard waar mogelijk en nuttig. Maar wie uitgaat van sterke besparingen als middel om de CO₂-uitstoot sterk te verminderen, dient ook met sterk bewijs te komen dat die sterke besparingen realiseerbaar zijn en de CO₂-uitstoot echt sterk verminderen. Besparen zal steeds moeilijker worden. De echte oplossing is over te stappen op groene energiebronnen.

Energie uit groene energiebronnen

De energietransitie is een overgang van fossiele energiebronnen naar het gebruik van groene energiebronnen en groene energiedragers. De enige praktisch gesproken eeuwige groene energiebron is de zon, als leverancier van energie in de vorm van licht en warmte, en daarmee indirect ook van energie uit wind en waterkracht.

De zon is een externe leverancier van energie wat maakt dat de Aarde, onze planeet, geen gesloten systeem is: er komt voortdurend energie bij, in de vorm van instraling door de zon. Er gaat ook voortdurend energie uit, de warmtestraling van de planeet, sinds kort een beetje minder door het versterkte broeikas effect. Een externe bron van energie zoals de zon maakt het mogelijk een economie te draaien

met energetische verliezen: de verliezen worden toch voortdurend door de zon aangevuld, tot de zon ermee ophoudt. Energie verbruiken kan dus gewoon, mits afkomstig, direct of indirect, van een groene bron. Energieverbruik uit groene bronnen is dus wezenlijk anders dan het verbruik van delfstoffen als ijzer, koper, aluminium en dergelijke. Daarvan zijn de winbare voorraden eindig, en daarom is hergebruik wenselijk en ook nodig. Een dergelijke beperking aan het verbruik van groene energie is er niet.

Ecologisch bezien maakt het menselijke energieverbruik op zich weinig tot niets uit. Vaak wordt gesteld dat slechts een kleine fractie van de zoninstraling, een procent van een procent, voldoende is om de mondiale economie te laten draaien. En dat is ook zo. De zon levert de aarde jaarlijks onvoorstelbaar veel energie in de vorming van licht en warmte. Het menselijk energieverbruik op de planeet valt praktisch in het niet vergeleken met de instraling door de zon. Voor de energiehuishouding van de planeet maakt het menselijke energieverbruik dan ook bijzonder weinig uit. De huidige en komende mondiale opwarming is een gevolg van emissies van CO₂ en andere broeikasgassen, niet van het huidige of toekomstige energieverbruik op zich, hoe groot dat ook is of wordt. Tegen energieverbruik op zich is dus geen bezwaar, als het maar energie uit groene bronnen betreft. Het probleem is meer waarvoor die energie wordt gebruikt. Vooral de productie en consumptie van allerlei spullen geeft afval en vervuiling, en legt beslag op schaarse hulpbronnen.

Dit verhaal in hoofdstukken

Dit verhaal poogt inzicht te bieden hoe de energietransitie kan worden gerealiseerd. Om te beginnen worden daarom de diverse groene energiebronnen besproken. Wat kan daarvan verwacht worden? En wat kan er verwacht worden van energiedragers als waterstof? Het mondiale energieverbruik wordt belicht, en aansluitend de groei en

de krimp van de wereldbevolking en de gevolgen voor de ecologie van de planeet. Daarna komen groene energiesystemen aan de orde, de wijze waarop groene energiebronnen en energieopslag samenwerken. De energiesystemen in een aantal landen worden bekeken, met het oog op de mogelijkheden voor de transitie naar groene energie. In het laatste hoofdstuk wordt op de mogelijkheid van een mondiaal groen energiesysteem ingegaan.

De groene energiebronnen

De beschikbare groene energiebronnen zijn de zon, en daarvan afgeleid wind en waterkracht, elk met hun eigen hoofdstuk in dit verhaal, en kernenergie. Kernenergie wordt behandeld in drie hoofdstukken, een over kernenergie zelf, een over kernreactoren, en een over kerncentrales.

Geothermie en ook aquathermie worden als zeer beperkte, hooguit aanvullende bronnen van energie verder buiten beschouwing gelaten. Ook exotische energiebronnen als bijvoorbeeld energiewinning uit verschillen in zoutconcentratie tussen zoet water en zeewater blijven buiten beschouwing. Niet omdat ze exotisch zijn maar omdat de potentiële opbrengst bijzonder gering is.

Biomassa

Ook biomassa wordt als energiebron gebruikt, maar het is de vraag of biomassa als bron van energie groen te noemen valt. Biomassa komt uitgebreid aan de orde in een hoofdstuk waarin ook wordt ingegaan op de rol van biomassa als grondstof. Biomassa blijkt belangrijker te zijn als grondstof dan als brandstof.

Waterstof

Naast groene energiebronnen spelen ook groene energiedragers een rol in de energietransitie, met name waterstof. In het hoofdstuk over waterstof gaat het niet alleen over waterstof in de rol van energiedra-

ger, handig om op voorraad te hebben, maar ook toepassingen ervan in de industrie en als grondstof in de groene chemie.

Het mondiale energieverbruik

Dit hoofdstuk gaat over het energieverbruik wereldwijd. Daarin komt ook de financiële kant van de energietransitie aan de orde. De eerste stap in de mondiale transitie, de vergroening van de stroomopwekking, wordt verkend, met de huidige wereldbevolking als uitgangspunt. Dat leidt tot het daaropvolgende hoofdstuk over die bevolking, waarin de wereldbevolking eerst nog toeneemt en uiteindelijk gaat krimpen.

Bevolking

Energie wordt niet voor niets geproduceerd, maar voor mensen. En hoeveel energie wordt verbruikt, hangt af van hoeveel mensen energie verbruiken, en hoeveel elk mens verbruikt. Dat geldt niet alleen voor energie maar ook voor veel andere zaken, zoals drinkwater en voedsel om maar wat te noemen. Daarbij zijn de grenzen van wat de planeet aan kan, bereikt en overschreden. Het gebruik van biomassa als energiebron raakt hier direct aan. Het gebruik van wind en zon als energiebronnen heeft ook ecologische gevolgen. Waterkracht nog meer. Hoeveel mensen kan de planeet aan? En is er dan nog plaats voor andere dieren dan de mens? En is er naast de tarwe, de mais en de rijst nog plaats voor andere planten? Het hoofdstuk over bevolking gaat ook over de planetaire grenzen, de donut-economie, de ecologische voetafdruk, het uitsterven van soorten, bevolkingsgroei en bevolkingskrimp, en komt tot een mogelijk wat lastig te verteren conclusie.

Groene energiesystemen

Energiebronnen staan niet op zich, ze maken deel uit van een energiesysteem. Een energiesysteem moet ervoor zorgen dat er met de beschikbare energiebronnen voldoende energie wordt opgewekt en

bij de afnemers komt. In dit hoofdstuk wordt op de samenhang van groene energiebronnen en energiedragers ingegaan. Dit aan de hand van enkele scenario's, modellen en simulaties van min of meer groene energiesystemen.

Energiesystemen in vogelvlucht

De energietransitie is een mondiale opgave en enig zicht op de mogelijkheden voor deze transitie in een verscheidenheid van landen is nuttig. In dit hoofdstuk worden de energiesystemen van een aantal landen in grote lijnen besproken, hoe die nu functioneren, en hoe die vergroend zouden kunnen worden. Bij gebrek aan goed uitgewerkte scenario's en plannen een en ander in vogelvlucht.

Op weg naar het groene energieparadijs

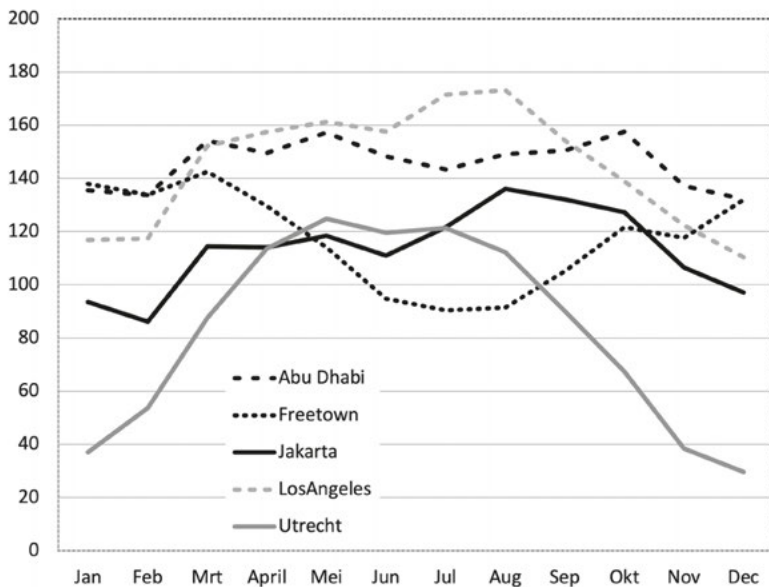
Tot slot wordt nagegaan wat er nodig is voor een mondiaal groen energiesysteem op een planeet met een bevolkingsomvang die de planetaire grenzen niet overschrijdt. Hoe ziet zo'n groen energiesysteem eruit? Valt een mondiale groene economie te realiseren? Is dat het probleem wel of gaat het erom om zo snel mogelijk de CO₂-uitstoot tot nul terug te brengen? Kan dat en hoe dan wel? Komen we dan in een groen energieparadijs?

HOOFDSTUK 1

ENERGIE UIT ZONNESTRALEN

De zon zendt veel energie uit in de vorm van zichtbare, infrarode en ultraviolette straling. Hoeveel daarvan de grond bereikt, hangt af van de plaats op de planeet, tijdstip op de dag en de dag van het jaar, en ook de bewolking. Een overzicht van de zoninstraling op de planeet is te vinden op de mondiale zonatlas (<https://globalsolaratlas.info>). De meeste instraling vindt plaats op plekken met weinig bewolking en niet te ver van de evenaar. Niet rond de evenaar zelf omdat het daar nog wel eens bewolkt wil zijn, en ook niet in bijvoorbeeld West-Europa omdat dat weer te ver van de evenaar af ligt, maar daartussen, in de strook tussen de tropen en de gematigde streken. Zie de bijgaande grafiek van de jaarlijkse zoninstraling in Utrecht, exemplarisch voor West-Europa, Jakarta in Indonesië op de evenaar, Los Angeles in het Zuidwesten van de Verenigde Staten, vaak onbewolkt, Freetown in Liberia op de westkust van Afrika, met veel bewolking, en het Arabische Abu Dhabi, meestal onbewolkt, met soms regen of een zandstorm.

De totale jaarlijkse opbrengst van een standaard zonnepaneel ($1 \text{ kW}_{\text{piek}}$) in Los Angeles is met 1.733 MWh hoger dan de opbrengst in Jakarta, 1.360 MWh, terwijl Jakarta toch bijna op de evenaar ligt en Los Angeles noordelijker. Het is echter vaak onbewolkt in Los Angeles en dat is niet zo in Jakarta. In Freetown (Sierra Leone, West-Afrika) valt midden in de regentijd meer neerslag in een maand dan in Nederland in een heel jaar, en dat vermindert de opbrengst, 1.454 MWh. De opbrengst in Utrecht, 995 MWh over het jaar, is duidelijk veel lager dan in de andere plaatsen, vooral door de lage opbrengst



Afbeelding 1. Zoninstraling in Abu Dhabi, Freetown, Jakarta, Los Angeles, en Utrecht in kWh/m² per maand, op basis van de calculator op globalsolaratlas.info

in de winter. In de zomer scheelt het niet veel. Abu Dhabi ten slotte ligt in de woestijn en tamelijk dicht bij de evenaar, en dat geeft een maximale opbrengst, namelijk 1.750 MWh per jaar.

De zoninstraling in Nederland en omstreken houdt dus niet over vergeleken met dichterbij de evenaar gelegen streken. Maar het verschil is ook niet vreselijk groot: de zoninstraling in Nederland is ruwweg de helft van in zuidelijker gelegen streken. Wel problematisch is de grote afhankelijkheid van het seizoen in Nederland van de zoninstraling. De opbrengst van een zonnepaneel in Nederland is op een winterdag maar een vijfde van de opbrengst op een zomerdag. In de winter verwarmen met warmtepompen op stroom van zonnepanelen gaat in Nederland niet goed. In de zomer komt het voor de airco wel goed uit, althans overdag.