

21^e Van Oosbreelezing

Hoe houden we energie? – duurzaamheid en mentaliteit

Remco Tuinier

Inhoudsopgave:

Voorwoord

1. Inleiding
2. Opwarming van de aarde en CO₂
3. Terug naar de middeleeuwen?
4. Is er een energieprobleem?
5. Taak van de mens(?)
6. De energiebalans: verbruik versus hernieuwbaar
7. Conclusie energiebalans
8. Oplossingen

'If we do not deal with climate change,
it will deal with us'

Laura Kollau, stelling in proefschrift
TU Eindhoven, 2019

Voorwoord

Met de woorden 'Langzaam sterft de aarde.'¹ opende Koningin Beatrix haar kersttoespraak in 1988. Snel daarna ging ik studeren in Wageningen. Ik kwam terecht in een omgeving waar veel gesproken werd over het milieu, en waar men met 'milieu' iets anders bedoelde dan in de omgeving waar ik opgroeide in Soest. In Wageningen werd het mij duidelijk dat de fossiele brandstoffen, evolutionair opgebouwd in miljoenen jaren, er door ons in korte tijd doorheen worden gejaagd. En dat we toekomstige generaties opzadelen met een energieprobleem. Sinds deze periode denk ik veel na over duurzaamheid. Inmiddels denk ik dat de aarde de mens wel overleeft en niet zal sterven. Maar of de mens de eigen ontwikkeling overleeft wordt spannend. De komende decennia zal blijken of de mens juiste keuzes maakt. Ik ben blij dat ik de gelegenheid kreeg om dit thema te gebruiken voor de Van Oosbreelezing.

De bestuursleden van de Van Oosbreestichting dank ik voor de uitnodiging om de Van Oosbreelezing te geven in Amersfoort op 23 maart 2019. De Van Oosbreelezingsen zijn een bijzondere serie en toen ik er zo'n 12 jaar geleden enkele las had ik nooit gedacht dat ik er één mocht geven. Veel elementen in mijn lezing heb ik niet zelf verzonnen: ik raakte zeer geïnspireerd in dit onderwerp door de afscheidslezing² van Hans Lyklema (1930-2017), mijn 'wetenschappelijke grootvader'; de promotor van mijn promotor Gerard Fleer.

Ook raakte ik later onder de indruk van de nuchtere analyse van David MacKay (1967-2016) in zijn boek 'Sustainable Energy – without the hot air' (2009). Recent heb ik veel plezier beleefd aan het boek 'Solar power to the people' van Ad van Wijk en collega's.

Taco Snippen dank ik voor zijn prachtige muzikale bijdragen (eigen werk, Philip Glass, Brahms, Bach, Elton John) tijdens de lezing. Bij alle hoogtepunten in mijn leven: afstuderen, promoveren, huwelijk, oraties was Taco nabij en speelde vaak een belangrijke rol. Als je jong bent denk je soms dat het normaal is zo'n vriend te hebben. Ik realiseer me steeds meer dat dat heel bijzonder is.

Discussies met dr. ir. John van der Schaaf (TU Eindhoven), dr. ing. Ger Koper (TU Delft) en prof. dr. Henk Lekkerkerker (Universiteit Utrecht) over diverse aspecten van dit thema waren zeer nuttig. Dr. ir. Martien Visser (Hanze Hogeschool, Groningen) dank ik voor Fig. 21.

Mariska Tuinier en Johan Kröner dank ik voor het kritisch lezen van de tekst. Ten slotte wil ik Mieke, Luuk en Tim bedanken voor alle tijd, die regelmatig ten koste gaat van 'gezinstijd', die ik kan besteden aan onderwijs en wetenschap, inclusief dit soort bijdragen.

¹ [Trouw artikel over deze toespraak](#)

² J. Lyklema, 'Econatuurkunde oftewel De entropie van het gazon'. [Afscheidslezing J. Lyklema, 1995](#)

1. Inleiding

Wij³

Wij hebben ons stilzwijgend
en in de loop der jaren
de luchten toegeëigend
die van de vogels waren

eens was in het begin
het water van de vissen
ook daar grepen we in
en zonder compromissen

de bomen van het bos
wij hebben ze vermoord
het evenwicht van groen en blauw
werd ruw door ons verstoord

op wat in onze kraam te pas komt
leggen wij beslag
er is geen norm, geen grens, geen vraag
wat wel en niet mag

er is geen halt, vergeet het maar
wij blijven onverzadigbaar

³ Toon Hermans, gedicht uit: 'Nieuw Gebedenboek', Lannoo (2016).

Tweehonderd jaar geleden overleed de Schotse ingenieur James Watt (1736-1819). Zijn werk heeft het leven van de mens sterk veranderd en van velen zelfs mogelijk gemaakt. Sinds de ontwikkeling van de legendarische stoommachine⁴ door Watt⁵ is de mens fossiele brandstoffen, zoals steenkool (zie Fig. 1) en olie, aan het verbranden voor bijvoorbeeld transport, verwarming en industriële processen. Deze brandstoffen zijn 'natuurlijk'. Ze zijn in miljoenen jaren ontstaan uit resten van plantaardig en dierlijk leven.



Figuur 1. Steenkool.

De mens verbruikt deze prachtige vorm van energie op aarde in steeds hoger tempo. Dit heeft consequenties. De wijze waarop de mens met de energiehuishouding op aarde om gaat is het thema van deze Van Oosbreelezing. De titel 'Hoe houden we energie?' betreft dus deze energiehuishouding.

⁴ De eerste bekende beschrijving van een stoommachine wordt toegeschreven aan de Griekse geleerde Heron van Alexandrië (ca 10-70).

⁵ In de periode 1765-1782 verbeterde James Watt eerdere concepten van de stoommachine.

De ondertitel van de lezing geeft inzicht in de focus: duurzaamheid en mentaliteit. In verschillende vormen spreek ik af en toe al zo'n 20 jaar over dit thema. Recent is het een zeer actueel onderwerp geworden; op dit moment is de informatie erover bijna niet bij te houden.

Allereerst worden in de volgende sectie enkele zorgen besproken. Daarna wordt een antwoord gegeven op de vraag: is er een energieprobleem? Dan wordt de rol en verantwoordelijkheid van de mens geduid. Vervolgens wordt er op pragmatische wijze een energiebalans opgesteld. Deze balans is een soort verlies- en winstrekening: hoeveel energie verbruiken we en waaraan besteden we die. En: hoeveel energie kunnen we duurzaam opwekken? Duurzame energie⁶ noem ik energie die opgewekt is via hernieuwbare⁷ bronnen. Na conclusies over de energiebalans worden er een aantal mogelijke oplossingen voorgesteld om de energiebalans te verbeteren.

⁶ Duurzame energie of groene energie is energie waarover voor onbeperkte tijd beschikt kan worden en waarbij, door het gebruik ervan, het leefmilieu en de mogelijkheden voor toekomstige generaties niet worden benadeeld. Bij duurzame energie kan worden gedacht aan waterkracht, windenergie en zonne-energie.

2. Opwarming van de aarde en CO₂

In Tabel 1 staan enkele gegevens over het aantal warme dagen in Nederland sinds 1901. Deze tabel laat zien dat het aantal warme dagen in Nederland lijkt toe te nemen. Dit is in overeenstemming met de wereldwijde waarnemingen van meteorologen die laten zien dat de aarde aan het opwarmen is.

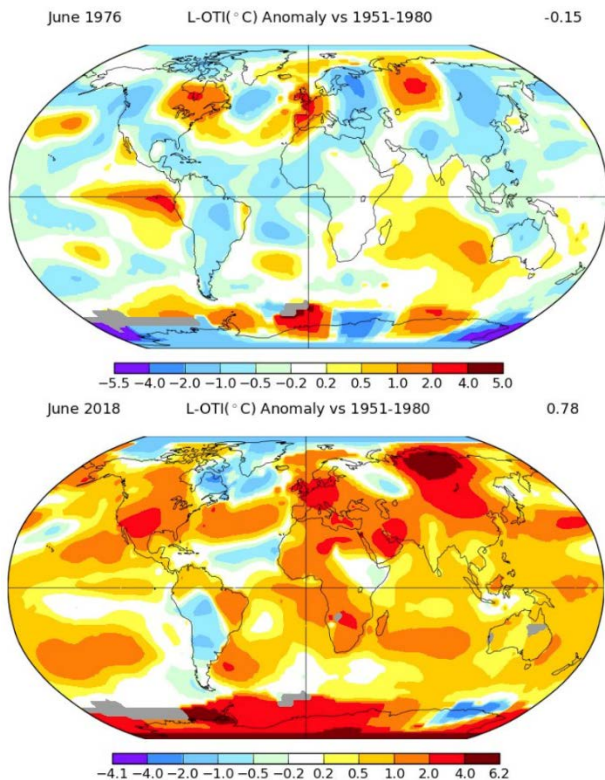
Tabel 1: Overzicht van het aantal tropische⁸ dagen in Nederland. Bron: KNMI via @PKuipersMunneke.

periode:	aantal tropische dagen in Nederland:
1901-1930	34
1930-1960	56
1961-1990	72
1991-2020	>130

Om iets te zeggen over trends in de gemiddelde temperatuur is het van belang om te kijken naar de gemiddelde temperatuur en dien je dat te vergelijken met gemiddelden over langere perioden. Ouderen herinneren zich wellicht nog de hete zomer van 1976. In Fig. 2 is de afwijking van de gemiddelde temperatuur op aarde op verschillende locaties weergegeven in juni 1976 en juni 2018.

⁷ De hernieuwbare bron is de zon. Uiteindelijk zal de kernfusie in het hart van de zon stoppen en zal het leven op aarde eindigen. Aangezien dit nog zeker een paar miljard jaar duurt, beschouw ik de zon als een duurzame energiebron.

⁸ Een tropische dag is volgens de meteorologie een dag waarop de maximumtemperatuur 30 graden Celcius of hoger is. In Nederland is de locatie De Bilt (KNMI) de bepalende locatie.



Figuur 2. Afwijkingen van de gemiddelde temperatuur op aarde (tussen 1951 en 1980) in juni 1976 en juni 2018, samengesteld door Simon Lee, [Blog Simon Lee](#).

Alhoewel het inderdaad warm was in West-Europa (rood) in 1976 waren er op aarde ook veel gebieden waar het kouder was (blauw) t.o.v. de gemiddelde temperatuur. In 2018 was het opnieuw warm in Nederland. Nu is echter te zien dat het op de meeste plekken op aarde duidelijk warmer was dan de gemiddelde temperatuur. Er is sprake van opwarming van de aarde als de gemiddelde temperatuur stijgt en dat is duidelijk de situatie waar we mee te maken hebben.

⁹ Vrijwel alle geleerden zijn overtuigd dat de aarde aan het opwarmen is. Een kritische denker zou kunnen zeggen dat deze opwarmperiode een toevallige variatie is. Die toevallige fluctuatie duurt dan wel erg lang en is daarom onwaarschijnlijk. Het weer is een uitermate complex systeem en wetenschappers zijn dan ook voorzichtig met het trekken van conclusies. De kans dat de aarde *niet* aan het opwarmen is, is uitermate klein.

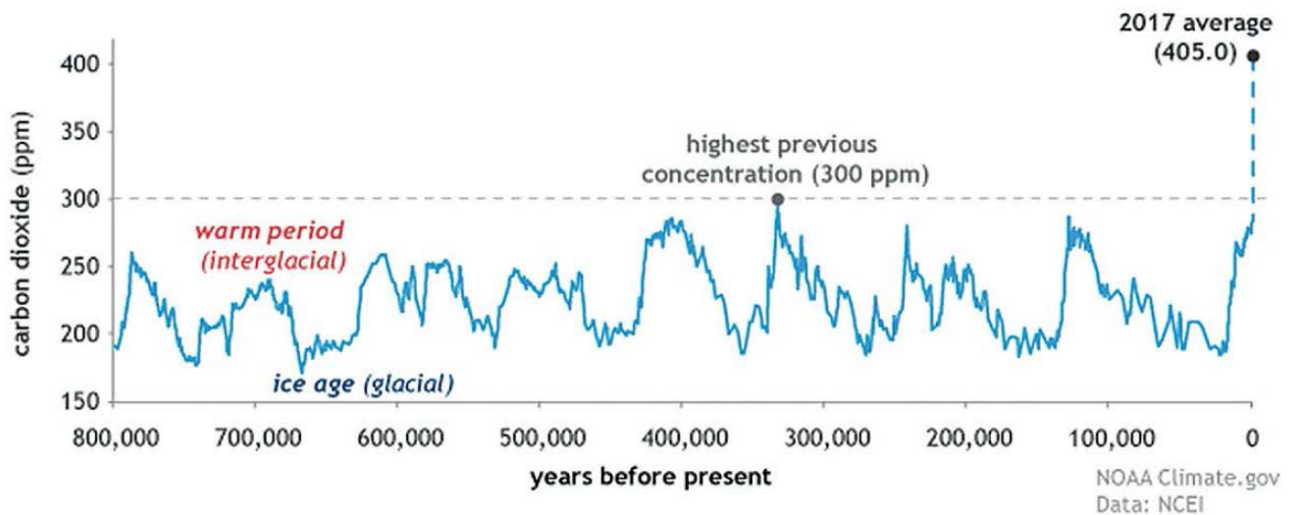
Hoe komt het dat de aarde aan het opwarmen is?⁹

Het is zeer waarschijnlijk dat het *versterkte* broeikaseffect verantwoordelijk is voor de opwarming. In Fig. 3 is te zien dat er zich op aarde tot in de 18^e eeuw tussen de 170 en 300 ppm koolstofdioxide (CO₂) in de atmosfeer bevond¹⁰. De natuurkundige John Tyndall (1820-1893) toonde aan dat er zich in de atmosfeer moleculen bevinden zoals water, methaan en CO₂ die warmte vasthouden¹¹. Dit vasthouden van warmte wordt het broeikaseffect genoemd. Zonder de 250 ppm CO₂ zou de aarde gemiddeld 30°C kouder zijn, zoals op de maan. Heel prettig dus dat er van nature 200-300 ppm CO₂ in de atmosfeer zit. De fysisch-chemicus Svente Arrhenius (1859-1927) berekende dat een verdubbeling van de CO₂ concentratie zal leiden tot een toename van de gemiddelde temperatuur op aarde van 4-6 °C: toename van de CO₂ concentratie (of van andere broeikasgassen) leidt dus tot een versterkt broeikaseffect.

Het gebruik van de stoommachine leidde tot een indrukwekkende industrialisatie in vooral Europa en Noord-Amerika. Er werden vele fabrieken gebouwd en het transport van de mens veranderde snel.

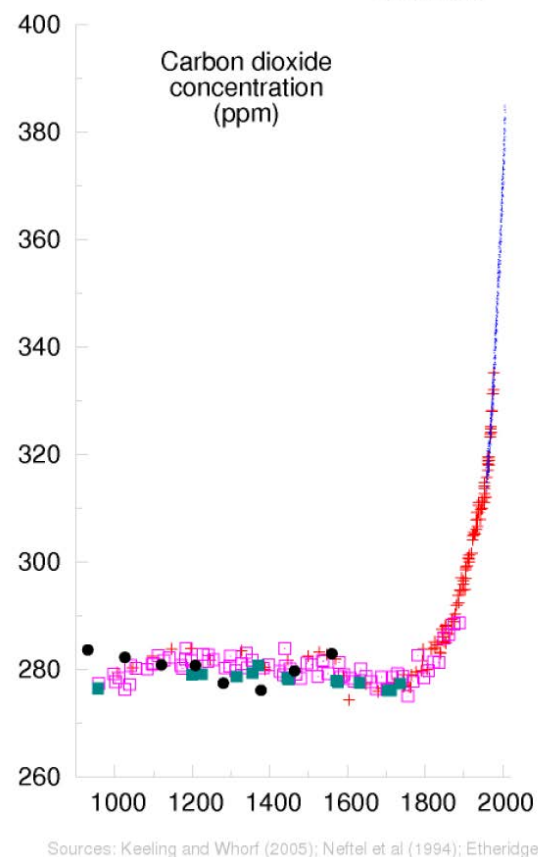
¹⁰ ppm = 'parts per million'. 100 ppm CO₂ betekent dus 100 CO₂ moleculen op een totaal van 10⁶ moleculen in de lucht.

¹¹ Stikstof en zuurstof komen het meest voor in de lucht en houden geen warmte vast.



Figuur 3a. CO₂ concentratie in de atmosfeer (in ppm) tijdens de laatste 800.000 jaar op aarde¹².

Vanaf die periode is er een enorme toename in de hoeveelheid CO₂ in de lucht, zie Fig. 3a en 3b. De huidige hoge concentratie van boven de 400 ppm is geen natuurlijke, toevallige, fluctuatie want de variaties in de CO₂ concentraties waren nooit boven de 300 ppm. De sterke toename van de CO₂ concentratie zou de opwarming van de aarde dus heel goed kunnen verklaren. Wat is de oorzaak van de stijging van de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer? De stoommachine van James Watt is helaas geen *perpetuum mobile*¹³. Een stoommachine werkt slechts als er energie wordt toegevoerd in de vorm van kolen die worden verbrand. In het algemeen kan worden gesteld dat bij veel dagelijkse processen die geïnitieerd worden door de moderne mens complexe koolwaterstoffen worden omgezet, vaak via verbranding, in o.a. CO₂.



Figuur 3b. CO₂ concentratie in de atmosfeer (in ppm) tijdens de laatste, ruim, 1000 jaar op aarde.

In welke landen wordt er nu vooral veel CO₂ richting de atmosfeer uitgestoten?

¹² National Oceanic and Atmospheric Administration website, [link naar de site](#).

¹³ Een perpetuum mobile is een apparaat dat eenmaal in beweging uit zichzelf blijft bewegen.

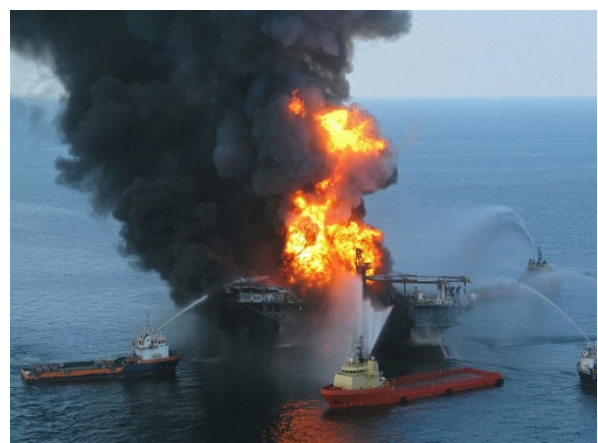
Tabel 2. Voorbeelden van de CO₂ uitstoot per land en het aantal inwoners in die landen in 2008.

land	ton CO ₂ uitstoot per jaar p.p.	aantal inwoners (in miljoenen)
Verenigde Staten	24	326
Australië	26	23
Qatar	37	2
Nederland	13	17
Duitsland	12	81
Frankrijk	9	67
China	3,7	1379
India	1,9	1282
Nigeria	1,3	191

Enkele voorbeelden van het aantal ton CO₂ uitstoot per persoon per jaar staan in Tabel 2. Burgers in West-Europese landen leveren een uitstoot van ongeveer 10 ton CO₂ p.p. per jaar. Welvarende landen waar het vaak warm is en waar men graag met grote zware auto's rijdt (VS, Australië) hebben een meer dan 2 maal zo hoge uitstoot. Als we de twee getallen in elke rij vermenigvuldigen hebben we de totale CO₂ uitstoot per land.¹⁴ Het blijkt dat vooral landen waar de mensen luxe leven en waar veel mensen wonen flink bijdragen aan CO₂ uitstoot. Het 'helpt' ook als er veel fossiele brandstof voorhanden is (Qatar).

Tegenwoordig wordt er wat minder steenkool gebruikt dan in de 19^e eeuw maar deze zijn vervangen door andere fossiele brandstoffen: benzine, kerosine, aardgas en diesel. Ongeveer 120 jaar geleden startte de periode waarin intensief gezocht werd naar nieuwe olievelden. Rond 1900 was dat nog een heldhaftige avontuurlijke

onderneming. Olieboren is tegenwoordig uitermate gecompliceerd. Men moet soms olie winnen die duizenden meters diep ligt en dit leidt soms tot serieuze problemen. Op 20 april 2010 was er een explosie in de Deepwater Horizon, een boortoren bij het Macondo olieveld in de golf van Mexico, zie Fig. 4. Door de explosie stroomden in bijna 3 maanden tijd ongeveer 5 miljard vaten olie de golf van Mexico in. Het illustreert dat het steeds gevaarlijker wordt om olie te blijven winnen, afgezien van de CO₂ uitstoot¹⁵ die het geeft. De Deepwater Horizon was van BP. Over de CO₂ problemen doet BP uitermate ontspannen. U kunt CO₂ emissies eenvoudig neutraliseren volgens BP door zelf wat extra's te betalen zodat BP bomen kan planten. Shell biedt sinds kort dezelfde oplossing aan. Het beleid van multinationals leidt tot een bomenkap van ongekende ordegrrootte.¹⁶ Het planten van enkele bomen met wat geld van welwillende consumenten lijkt dan ook geen realistische oplossing.



Figuur 4. De Deepwater Horizon op 21 april 2010.

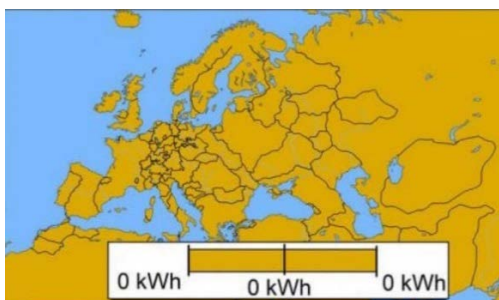
¹⁴ Wellicht komt hier de leuze 'America first' van president Trump vandaan.

¹⁵ Er wordt niet ingegaan op andere broeikasgassen zoals methaan waarvan de hoeveelheid ook aan het toenemen is.

¹⁶ [NOS artikel over ontbossing](#)

3. Terug naar de middeleeuwen?

Kunnen we nog leven zonder fossiele brandstoffen en/of elektriciteit? Er zijn mensen die beweren dat we best zonder elektriciteit kunnen. Ooit was dat mogelijk, zie Fig. 5.



Figuur 5. Elektriciteitsconsumptie in Europa in 1507.

Laten we daar eens serieus naar kijken: de eindfase van de middeleeuwen. In die periode was er in Europa ongeveer 52.000 m² aan land beschikbaar per persoon¹⁷. Dat komt overeen met 7 voetbalvelden. Men verbrandde ongeveer 4 kg hout per dag per persoon. Daar heb je ongeveer 10.000 m² land voor nodig; ruim voldoende dus. In Nederland leven nu ongeveer 400 mensen per km². Dat betekent dus 2.500 m² land beschikbaar per persoon. Onvoldoende dus om van te leven volgens de standaard in het jaar 1507. Er zijn in Nederland (en in de grootste delen van de wereld) te veel mensen om te kunnen leven zoals men dat deed in de middeleeuwen. De vraag is überhaupt of de moderne mens het harde leven van toen aan zou kunnen.

¹⁷ P. Malanima, 'Energy and population in Europe. The Medieval Growth (10th-14th Centuries)', 2011.

¹⁸ [KNMI over zeespiegelstijging](#)

¹⁹ www.overstroomik.nl

4. Is er een energieprobleem?

In 2015 realiseerden veel vertegenwoordigers van de meeste landen op de wereld zich dat de uitstoot van CO₂ moet worden gereduceerd. Dat is hoopgevend, maar hoe dat gerealiseerd moet worden is nog onduidelijk. Een te hoog verbruik van (fossiele) energie lijkt momenteel het kernprobleem en de CO₂ uitstoot een gevolg. Een veelgebruikt argument om in Nederland niets te doen is door te stellen dat dit mondiaal opgelost moet worden. Er is al een heel pragmatische reden voor Nederland om de opwarming en dus de CO₂ uitstoot tegen te gaan. De opwarming leidt ook tot een stijging van de zeespiegel.¹⁸ Nederland is één van de landen dat als eerste voor een groot deel zal worden overspoeld.¹⁹ Een tweede Deltaplan wordt dan dus noodzakelijk.

Terug naar de oorzaak. Een zinnige vraag die kan worden gesteld is de volgende: is er nu een energieprobleem of niet? De Deense milieudeskundige Björn Lomborg is van mening²⁰ dat er geen energiecrisis zal ontstaan: er is volgens hem genoeg energie beschikbaar op aarde, zie ook Intermezzo A. Uit de analyse van de toonaangevende Amerikaanse natuurkundige

²⁰ B. Lomborg, 'The skeptical environmentalist: measuring the real state of the world.' Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2001.

David Goodstein blijkt ²¹ dat er spoedig geen goedkope olie meer verkrijgbaar zal zijn op aarde. En dat dat ons leven sterk zal gaan beïnvloeden. Hoe kunnen zulke slimme mensen het op dit punt oneens zijn? Ook in de Nederlandse media kunnen we dagelijks allerlei verwarrende en strijdige berichten lezen. In september 2011 schreef een journalist in Trouw ²² dat windmolens en zonnepanelen slecht zijn voor het milieu. De bekende argumentatie is dat het veel energie kost om zonnepanelen en windmolens (en elektrische auto's) te maken. Meestal wordt er echter geen levenscyclus analyse (LCA) gemaakt. Dat is een methode waarmee de totale milieubelasting kan worden bepaald en die kan worden vergeleken met de (energie-)opbrengst. Zo leveren 10 zonnepanelen na 14 maanden al meer energie op dan de energie die nodig is om ze te maken. Dus: ja, het maken van zonnepanelen is slecht voor het milieu maar de energie die ze opleveren (men verwacht dat zonnepanelen een levensduur zullen hebben van zo'n 30 jaar) compenseert dit ruimschoots. LCA's worden veel te weinig gemaakt. Veel grote bedrijven die serieus werken aan duurzaamheid gebruiken LCA's veelvuldig. In de journalistiek en bij de overheid lijkt de waan van de dag soms echter belangrijker te zijn dan een zorgvuldige analyse.

²¹ D. Goodstein, 'Out of Gas.' W. W. Norton and Company, New York, 2004

²² [Artikel Trouw over windmolens-en-zonnepanelen](#)

Intermezzo A Zonne-energie

De zon (zie Fig. A) staat op 150 miljoen km van de aarde. De inkomende zonnestraling is $1,74 \cdot 10^{20}$ W, wat overeenkomt met gemiddeld 340 W/m^2 . Per dag straalt de zon dus $1,5 \cdot 10^{22}$ J naar de aarde²³. De aarde is dus geen gesloten systeem; er wordt continu energie toegevoerd naar de aarde. Van de 340 W/m^2 wordt veel energie gereflecteerd of direct omgezet in warmte maar toch komt er nog ongeveer 160 W/m^2 op aarde terecht.



Figuur A. Dé energiebron van de aarde: de zon. Foto: Jessie Eastland.

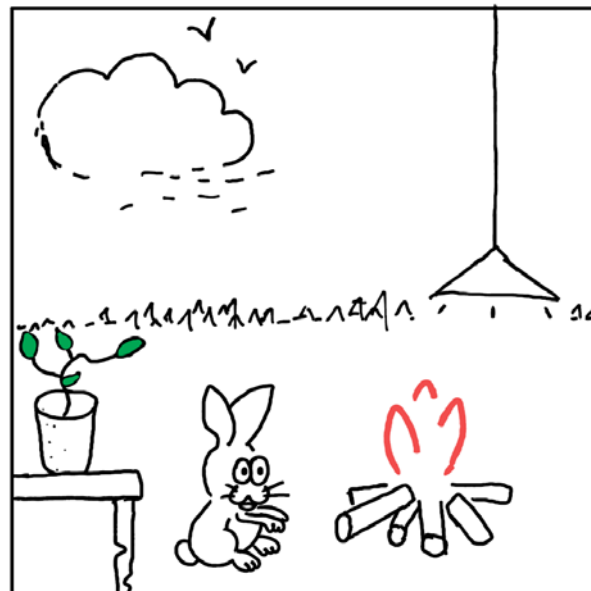
Indien er zonnepanelen in de Sahara worden geplaatst dan is de zoninstraling per jaar ongeveer 2.500 kWh/m^2 . Indien het zonnepark ²⁴ van 500.000 km^2 een bezettingsgraad heeft van 60% dan kunnen moderne zonnepanelen (efficiëntie is 20%) per jaar $1,5 \cdot 10^{14}$ kWh aan elektrische energie opleveren. Dat komt overeen met het wereldwijde energieverbruik in 2016. Dat is zeer hoopgevend.

²³ A. van Wijk, E. van der Roest, J. Boere, 'Solar power to the people', Allied Waters, Utrecht, 2017.

²⁴ Dit zonnepark is ongeveer 700 km bij 700 km groot, zo'n 5% van de Sahara.

Er worden ook continu argumenten verzonnen waarom we maar beter niks kunnen doen. Ten tijde van de eerste discussies over de Klimaattafels in 2018 meldde de Telegraaf dat de transitie toch niet zou lukken door een tekort aan technici.²⁵ Zelfs als dit een probleem is dan is dit oplosbaar.

Tijd voor een nuchtere analyse. Allereerst: is er een energieprobleem? Om die vraag te beantwoorden ga ik op natuurwetenschappelijke wijze te werk. Zo ben ik 'opgevoed' door mijn wetenschappelijke leermeesters en dat werkt vaak effectief. Dat geeft vaak niet direct de oplossing maar je weet wel waar je staat. Laten we kijken wat de hoofdwetten van de thermodynamica²⁶ erover zeggen. Beschouw een fictief geïsoleerd systeem zoals in Fig. 6. Binnen dat systeem vinden allerlei energie-omzettingen plaats. Chemische energie (opgeslagen in een konijn, in hout of in planten/gras) wordt omgezet in bijvoorbeeld bewegingsenergie (het konijntje rent rond) en warmte. Elektrische energie wordt omgezet in warmte (een lamp die brandt). Windenergie wordt omgezet in bewegingsenergie en warmte. De thermodynamica stelt dat de wet van behoud van energie geldt in zo'n geïsoleerd systeem. Met andere woorden: de ene energievorm kan worden omgezet in een andere maar de totale hoeveelheid energie blijft behouden²⁷.



Figuur 6. Energie-omzettingen binnen een geïsoleerd systeem. Binnen dit systeem geldt de wet van behoud van energie. Dit wordt ook wel de Eerste Hoofdwet van de Thermodynamica genoemd. Tekening: Luuk Tuinier.

Met deze Eerste Hoofdwet (EH) kan veel worden verklaard. De EH zegt echter niets over de *richting* van de omzettingen. Stel we laten een bal vallen op aarde. Vlak voordat deze wordt losgelaten heeft de bal een zekere zwaarte-energie: er is een potentiële energie want de zwaartekracht trekt aan de bal richting de grond. Na loslaten zal de bal naar beneden bewegen. Zwaarte-energie wordt omgezet in bewegingsenergie. Vervolgens zal de bal tegen de grond stuiten en weer omhoog bewegen. Tijdens het contact met de grond wordt een deel van de bewegingsenergie omgezet in de energievorm warmte. De hoogte die vervolgens bereikt wordt zal minder zijn dan de oorspronkelijke hoogte: een deel van de zwaarte-energie is

²⁵ [Telegraaf artikel over energietransitie](#)

²⁶ Thermodynamica: de enige theorie die je volledig kunt vertrouwen volgens Einstein.

²⁷ Kernreacties worden buiten beschouwing gelaten. Voor kernenergie zie Intermezzo B.

omgezet in warmte. Dit proces herhaalt zich totdat alle energie omgezet is in warmte. Kennelijk is er een hiërarchie binnen de verschillende vormen van energie. Hierover zegt de Tweede Hoofdwet (TH) van de thermodynamica: de *entropie* kan bij processen in een geïsoleerd systeem niet afnemen. De entropie²⁸ blijft gelijk of neemt (in de praktijk altijd) toe. Bij het vrijkomen van warmte stijgt de entropie en dat verklaart veel processen. Zo stroomt een rivier niet spontaan een berg op. Volgens de EH zou dit kunnen. De rivier onttrekt warmte aan de omgeving en zet dit om in zwaarte-energie en bewegingsenergie. De TH verbiedt dit echter. Als de aarde beschouwd wordt als een geïsoleerd systeem is er dus in feite geen energieprobleem maar is het probleem dat de entropie (snel) toeneemt. Bij alle processen stijgt de entropie. De energie blijft behouden maar wordt omgezet in vormen van een hogere energievorm (fossiele brandstoffen, biomassa) naar een lagere energievorm (warmte). De conclusie is dus dat er voldoende energie is maar dat de activiteiten van de mens er toe leiden dat hogere energievormen in steeds hoger tempo worden gedegradeerd tot de lagere energievorm warmte. Er is dus een entropieprobleem. Maar er is een ontsnappingsclausule: de aarde is geen geïsoleerd systeem. Er wordt continu energie aangevoerd (licht van de zon) die wordt omgezet in lagere vormen van energie, zie Intermezzo A.

5. Taak van de mens (?)

Wat is de taak van de mens bij het beheren van de energiehuishouding op aarde? Heeft de mens hier een taak? Of is energiedegradatie gewoon een effect van de evolutie en moeten we afwachten waar dit toe leidt? Of heeft de mens evolutionair meegekregen dat zij/hij het vermogen heeft hier oplossingen voor te vinden?

Toen ik in het voorjaar van 2018 een maand in Japan was viel het me op dat de Japanners bij elke maaltijd いただきます 'Itadakimasu' zeggen. Deze uitspraak is lastig te vertalen maar ze bedoelen ermee: ik neem wat van de natuur om te kunnen leven en ik ben me bewust dat ik daarmee de aarde belast.

Vaak blijkt dat mensen zich niet bewust zijn van hun gedrag. Fig. 7 geeft een indruk van de wijze waarop mensen met een festivalterrein omgaan. Dit noemen sommigen een feest. Het lijkt mij niet een voorbeeld voor toekomstige generaties over de omgang met de aarde. Als we deze foto zien dan is het niet verwonderlijk dat veel plastics



Figuur 7. Impressie van de ochtend na Pinkpop 2018.

²⁸ Entropie is een maat voor het aantal manieren waarop een systeem georganiseerd kan worden. Soms wordt

entropie gezien als mate van chaos maar dat is niet helemaal correct en kan soms misleidend zijn.

terecht komen in de zeeën en oceanen. De materialen en producenten komen in een kwaad daglicht te staan en de vraag is of dat terecht is. Een organisatie als de Plastic Soup Foundation lijkt volledig af te willen van plastics. Zonder plastics zou de mens de aarde echter nog veel meer belasten: ze maken moderne windmolens en auto's veel lichter en het produceren van een papieren tas²⁹ kost veel meer energie dan een plastic zak.³⁰

De homo sapiens bestaat ongeveer 200.000 jaar. De mens is pas 200 jaar steeds intensiever energie aan het degraderen. Er goed mee om gaan zie ik als een leerproces, ook al is de mensheid³¹ laat met ingrijpen. Ik kan niet voor anderen spreken maar kan wel mijn persoonlijke visie geven aan de hand van enige vragen die je jezelf kunt stellen. Ben ik dankbaar voor alle mogelijkheden die ik tegenwoordig heb als mens? Er is mij zoveel aangereikt: ouders die al van me hielden voor ik er was. Die me hielpen te leren lopen, praten. Ik ben opgegroeid in een land waarin ik heel veel heb mogen leren. Ik kan autorijden, heb genoeg salaris om een auto te betalen en ermee te rijden (al reis ik het liefst met de trein). Ik kan op vakantie gaan naar allerlei plekken in de wereld. Op mijn werkplek werk ik samen met mensen van over de hele wereld. Alleen al in onze vakgroep hebben we acht

nationaliteiten. Als ik me bedenk wat er allemaal voor me is dan denk ik dat ik daar ook zorgvuldig mee om moet gaan in alle dimensies.

Wat wil ik achterlaten? Ik hoop dat mijn achterkleinkinderen ook zoveel kansen en mogelijkheden hebben als wij. Of is het 'na ons de zondvloed'? Zouden we niet zo moeten leven dat we de wereld beperkt belasten?

Als je je realiseert dat het essentieel is voor toekomstige generaties om prettig op aarde te leven dan wordt de volgende vraag een retorische: heeft de mens een verantwoordelijkheid de aarde goed te beheren? Ja, de mens heeft de aarde al ingrijpend naar zijn hand gezet. Gaat de leefbaarheid op aarde ook ten onder aan de mens? Ik hoop van niet. De mens heeft een grote verantwoordelijkheid daar zorgvuldig mee om te gaan. Welk voorbeeld geven we aan de volgende generatie? Het is de vraag of, als wij niets doen, de volgende generaties het nog wel kunnen oplossen.

De Spinozistische uitdrukking: deel van een ondeelbaar geheel te zijn spreekt mij aan. Ik voel mij deel van het grote geheel³². Dat betekent dat ik wil uitstijgen boven de wereld van de kleine 'ik', die vooral bezig is met inbouwkeukens, vliegvakanties, terreinwagens en zo veel mogelijk geld verdienen.

²⁹ [papier versus plastic](#)

³⁰ <https://www.bbc.com/news/business-47027792>

³¹ 'We spreken niet voor niets van mensdom en van dierenrijk' (Hans de Booij in zijn lied 'De tolerantie')

³² H.F.J. Horstmanshoff, Bewogen Woorden, 2011

Ik voel mij verbonden met de mensen in Bangladesh die hun dijken niet gemakkelijk kunnen verhogen als de zeespiegel stijgt en met degenen die door de opwarming op de vlucht zullen slaan. 'In directe zin hebben wij geen invloed op de wereldgebeurtenissen maar wij maken wel deel uit van de wereld.... Het is belangrijk wat wij op onze eigen plaats doen'.³³

Als je deel bent van het grote geheel dan is het onjuist om grondstoffen zo te gebruiken dat toekomstige generaties hier grote nadelen van ondervinden. En dan is verantwoordelijkheid nemen de primaire taak van de meest verantwoordelijken. Daarom zouden landen die het meest hebben bijgedragen aan CO₂ uitstoot sinds het eind van de 18^e eeuw het voortouw moeten nemen om klimaatverandering tegen te gaan.

In de praktijk is dit een complex proces. Binnen de driehoek politici-burgers-bedrijfsleven wijst men vaak naar elkaar. Veel politici doen liever geen zaken die niet goed zijn voor de wekelijkse peilingen. Dat ondermijnt langetermijnbeleid. De grote bedrijven doen vooral dingen waar de aandeelhouders blij mee zijn en dat zijn goede kortetermijnwinsten. De burger let vaak voornamelijk op de eigen portemonnee en kijkt bij alle maatregelen vooral naar

koopkrachtplaatjes. Dat leidt soms tot beleid waar de mens niet zo trots op zou moeten zijn. Zo besloot de Nederlandse overheid opnieuw de vreugdevuren bij Scheveningen tijdens oud en nieuw toe te staan. Zo'n 5 miljoen kg hout werd in korte tijd verbrand. Daarmee kun je 1 miljoen mensen een dag in hun energiebehoefte voorzien in Nederland. Als je dat over hebt voor een vreugdevuur dan moet je wel heel erg blij zijn. Het is mijns inziens niet te verantwoorden naar toekomstige generaties.

De Nederlandse regering besloot in 2018 binnen één dag³⁴ ineens te willen stoppen met de gaswinning uit de bodem in Groningen. Op termijn is het nuttig om te stoppen met de gaswinning, maar zolang er nog vooral elektriciteit wordt opgewekt in Nederland met behulp van geïmporteerde steenkool is het een slecht idee om de gaswinning te stoppen.³⁵

De meeste mensen zijn het erover eens dat er iets moet gebeuren. Maar wat? Er zijn veel losse statements over: duurzame energiebronnen, olie, kernenergie, kernfusie, zonnepanelen, windenergie. Hieronder staan enkele uitspraken die ik in de loop der tijd heb verzameld uit kranten, op feestjes en gesprekken en gehoord op televisie over duurzaamheid, klimaat en milieu: (1)

³³ J.L. Slok in de weekbrief van 9 september 1990.

³⁴ Zo bekende minister Wiebes tijdens zijn lange interviews in het programma Zomergasten in 2018.

³⁵ Tijdelijk doorgaan met de gaswinning zou dan wel moeten in combinatie met een ruimhartige compensatie voor schade door de bevingen.

kernenergie is duur, (2) we hebben enorme hoeveelheden wind en golven, (3) we verbruiken gigantische hoeveelheden energie, (4) de bewoners van L.A. rijden elke dag van de aarde naar Mars, (5) per jaar wordt 1 miljoen ha regenwoud verwoest, (6) elk jaar wordt 7 miljard kg afval in zee gedumpt, (7) windmolens op zee kunnen alle huishoudens voorzien van elektriciteit, (8) kernreactoren leveren weinig op: 10 nieuwe compenseren slechts 4% van de totale uitstoot.

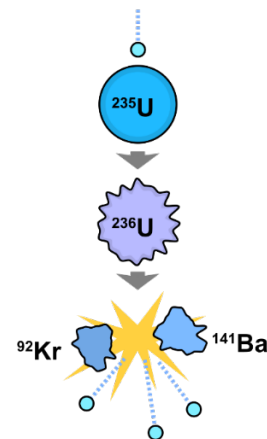
Bovenstaande stellingnames zijn verwarrend. Termen als duur en gigantisch zeggen niet zoveel. Sommige uitspraken zijn grotendeels correct zoals 4-8 maar ze worden niet in perspectief geplaatst. Zo blijkt dat 10 kernreactoren (8) alle huishoudens in NL kunnen voorzien van energie (7).

In de volgende sectie doe ik een poging rationeel de feiten te schatten op basis van natuurwetenschappelijke principes. De discussie zou moeten gaan over getallen en bijvoorbeeld niet over de vraag of zonnepanelen mooi zijn. Het gaat uiteindelijk om een energiebalans: hoeveel energie wordt er gedegradeerd en hoeveel duurzame / hernieuwbare / groene energie kan er potentieel worden opgewekt, want 'nature cannot be fooled'³⁶. In feite pleit ik ervoor om de aanpak van David MacKay ³⁷ te volgen die heel helder

beschreven is in zijn boek, zie ook de website over zijn boek³⁸.

Intermezzo B Kernenergie

Er zijn atomen op aarde zoals thorium of uranium met een zware onstabiele atoomkern die kunnen splijten in twee of meer lichtere kernen. Bij die reactie, zie Fig. B, komen aanzienlijke hoeveelheden energie vrij.



Figuur B. Splijtingsreactie van uranium (U). Een neutron wordt ingevangen door een ^{235}U (atoommassa 235 gram/mol) atoom. Deze wordt dan een ^{236}U , waarna deze splitst in krypton (Kr) en barium (Ba). Bij de splijting komt energie vrij³⁹, want er verdwijnt massa; de totale molmassa wordt 233 g/mol.

Een kernreactor wekt energie op door gebruik te maken van nucleaire energie en lijkt een zeer duurzame energiebron. Gebruik maken van kernenergie is de enige route om de hoofdwetten van de thermodynamica te omzeilen. Er zijn echter een aantal problemen bij het gebruik maken van

³⁶ Een uitspraak van fysicus en Nobelprijswinnaar Richard P. Feynman.

³⁷ D.J.C. MacKay, 'Sustainable Energy – without the hot air,' UIT Cambridge, 2009.

³⁸ www.withouthotair.com

³⁹ voor de liefhebbers: deze energie E kan worden berekend met Einstein's klassieke vergelijking $E = m c^2$.

kernsplijting⁴⁰. Allereerst is het vertrouwen in kernenergie laag door een aantal incidenten. De dramatische kernramp in Tsjernobyl in Wit-Rusland in 1986 heeft vooral in Europa geleid tot weerstand tegen kerncentrales. En een tsunami leidde in 2011 tot grote problemen bij kernreactoren in Fukushima aan de kust bij Japan. Veiligheid wordt dan ook gezien als grootste punt van zorg. Daartegenover staat dat het tegenwoordig mogelijk is om zeer veilige kernreactoren te bouwen. In Zuid-Korea (KEPCO) heeft men daar zeer betrouwbare technologie voor ontwikkeld die relatief niet duur is. Daarnaast is er kernaafval, is de hoeveelheid uranium op aarde⁴¹ beperkt (ruwe schattingen geven aan dat eenvoudig te winnen uranium op aarde bij handhaving van het huidige gebruik over 100 jaar op aarde op zal zijn) en is er veel discussie over de technologie van thoriumreactoren⁴².

Kernenergie kan echter in de, waarschijnlijk, geleidelijke overgang van de grijze energiemix (steenkool, olie, gas) naar duurzame energie (wind, getijden, zon) uitstekend worden gebruikt om de CO₂ uitstoot niet te hard te laten oplopen. In Parijs hebben veel landen in 2015 ambities afgesproken met betrekking tot een afname van de

CO₂ uitstoot. Bij vervolgafspraken zou de nadruk moeten liggen over hoe men de doelen wil bereiken. In realistische scenario's waarin duurzamere samenlevingen worden ontwikkeld zal de CO₂ uitstoot de volgende decennia voorlopig nog flink toenemen. Om de doelstellingen te halen is meer kernenergie op korte termijn nodig. Alleen bij een radicale transformatie naar groene energie kan kernenergie eventueel worden vergeten.

6. De energiebalans: verbruik versus hernieuwbaar

We gaan nu de energiebalans opstellen door systematisch alle vormen van energieverbruik en de mogelijke hernieuwbare / duurzame energie die opgewekt kan worden te bespreken.

6.1 Eenheden

Voor de energiebalans opgesteld kan worden moeten we afspreken in welke eenheid⁴³ we energie uitdrukken. We kunnen immers geen appels met peren vergelijken. De SI eenheid⁴⁴ van energie is de Joule⁴⁵ ($\approx 4,2$ cal). De eenheid van vermogen is 1 Watt = 1 Joule per seconde. Een handige eenheid om het energieverbruik in uit te

⁴⁰ De optie kernfusie wordt hier niet besproken. Dit is al te lang een technologische belofte om op dit moment serieus te bespreken.

⁴¹ [Link naar informatie over uranium](#)

⁴² [Link naar informatie over thorium](#)

⁴³ J. Hermans, 'Energie survival gids, inzicht in energie en uitzicht op de toekomst', Beta Text, Bergen NH, 2009

⁴⁴ Het Internationale Stelsel van Eenheden (uit het Frans: *Système international d'unités*) of SI-stelsel is het metrieke stelsel van uniforme internationale standaardeenheden voor het meten van bijvoorbeeld afstand, massa, snelheid en temperatuur. Dit stelsel werd ingevoerd op 11 oktober 1960 tijdens de *Résolution 12 de la 11e réunion de la CGPM*. Zie ook: [link SI](#)

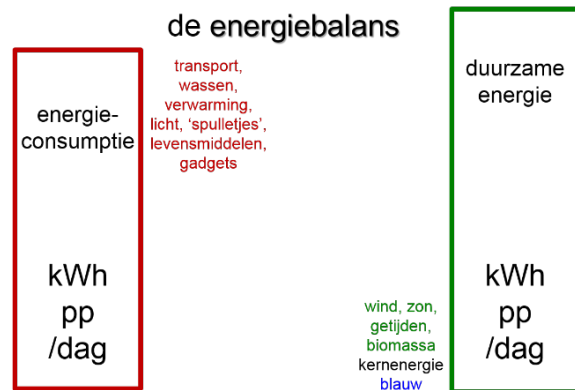
⁴⁵ $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

drukken is in kWh / dag / per persoon (kWh p.p.p.d.). Daar kunnen we ons ook wat bij voorstellen: onze energierekening is per persoon ongeveer 1500 kWh per jaar, dus ruwweg 4 kWh p.p. per dag.

De balans presenteren we zoals schematisch in Fig. 8. De mens verbruikt energie via bijvoorbeeld transport, wassen van kleding, verwarmen van huizen, gebruiken van licht, het kopen van spulletjes, gadgets en levensmiddelen (ze moeten worden gemaakt en getransporteerd). Aan de rechterkant staat de hoeveelheid duurzame energie. Dat is groene energie die opgewekt kan worden via wind- en zonne-energie, getijden, biomassa, kernenergie en blauwe energie⁴⁶. Al deze energievormen worden besproken. Als de duurzame energie groter of gelijk is aan de geconsumeerde energie dan zou de mens duurzaam kunnen leven. Er zijn dan nog veel technische uitdagingen maar dan is er een mogelijkheid om duurzaam te leven.

6.2 Transport

Nu staan er nog geen getallen in Fig. 8. Die gaan we nu bepalen. We kijken eerst naar autorijden. De meeste auto's rijden nog steeds op fossiele brandstoffen zoals olie. Op een pakje boter kunnen we zien hoeveel energie er ongeveer in 100 g olie zit: ongeveer 3.000 kJ = 3 miljoen J.



Figuur 8. Schematische voorstelling van de energiebalans van MacKay. Rood: energieverbruik. Groen: duurzame energie. Als de hoeveelheid opgewekte 'groene' energie (groen) hoger is dan de energie-consumptie (rood) dan is het eventueel mogelijk om duurzaam te leven.

De energie-inhoud van 1 kg olie is dus 30 miljoen J = 30.000 kWs / kg $\approx$ 8,3 kWh / kg $\approx$ 10 kWh. Een gemiddelde Nederlander rijdt ongeveer 60 km per dag. Stel deze persoon heeft een auto die met 1 L ongeveer 15 km rijdt dan verbruikt deze persoon $10 \text{ kWh/L} \cdot 60 \text{ km/dag} / 15 \text{ km/L} = 40 \text{ kWh/dag}$. We hebben de eerste bijdrage berekend: het energieverbruik door autorijden is 40 kWh/dag per persoon. Die staat nu onderaan in de rode kolom van Fig. 9. Zolang er fossiele brandstoffen worden verbruikt leidt autorijden altijd tot directe uitstoot van CO₂. Autofabrikanten beweren dat ze er 'heel veel aan doen' maar autorijden kost gewoon veel energie en leidt tot veel CO₂ uitstoot. Er zijn verschillen. De Ferrari F430 stoot gemiddeld zo'n 420 g CO₂ uit per gereden km, terwijl een Toyota Prius (een hybride auto) ongeveer 104 g CO₂ / km

⁴⁶ aangegeven met blauw in Fig.9 (ook al is blauwe energie 'groen')

uitstoot. Een gemiddelde auto in de VS stoot 250 g CO₂ / km uit en in Europa is dit ongeveer 170 g CO₂ / km. Uitstoot onder de 100 g CO₂ / km is technologisch uitermate uitdagend. Duurzaam rijden op benzine of diesel of gas is dus onmogelijk. Wel kun je duurzame energie opgewekt via bijvoorbeeld zonnepanelen omzetten in elektrische energie of waterstof. Daarmee kun je dus duurzaam autorijden. In Nederland is de energiemix momenteel nog lang niet groen. De meeste elektriciteit (>70%) wordt opgewekt via gas of steenkolen. Rijden met een elektrische auto in Nederland is nu dus nog niet duurzaam.

Er wordt steeds meer gevlogen door Nederlanders. In de laatste 30 jaar is het aantal passagiers dat vliegt vanaf Nederlandse luchthavens 3 maal zo groot geworden en is nu hoger dan 70 miljoen per jaar. Het energieverbruik van de gemiddelde Nederlander door vliegen is ongeveer 30 kWh / dag / p.p. Dat komt dus al aardig in de buurt van het gemiddelde energie-verbruik dat nodig is om een heel jaar auto te rijden. Is hier technologisch veel aan te doen? Op dit moment lijken er weinig opties. Er wordt weleens gesproken over zuiniger vliegtuigen maar de te bereiken winst door energie-besparing is zeer beperkt. Zo verbruikt een Boeing 747 zo'n 42 kWh per 100 km per passagier. De zuinige Bombardier turboprop verbruikt 38 kWh per 100 km per passagier; weinig verschil dus. Er is dus radicaal andere technologie nodig om duurza(a)m(er) te vliegen.

Transport spullen: 12 kWh/dag	Blauwe energie: 4 kWh/dag
Defensie: 4 kWh/dag	Getijden: 11 kWh/dag
Spullen: 48 kWh/dag	Golven: 4 kWh/dag
Landbouw: 15 kWh/dag	Windmolenparken in Noordzee: 32 kWh per dag
"Gadgets" : 5 kWh/dag	Windmolenpark aan zee: 16 kWh/ dag
Verlichting: 4 kWh/dag	Biomassa: voeding, biodiesel, afval: 24 kWh/dag
Verwarming, airco, wassen: 37 kWh/dag	"Plantages" met zonnepanelen: 50 kWh/dag
Vliegen: 30 kWh/dag	Zonnepanelen: 5 kWh/dag
Auto: 40 kWh/dag	Zonneboilers: 13 kWh/dag
	Wind: 20 kWh/dag (op het land)

Figuur 9. De energiebalans voor een gemiddelde persoon per dag in Nederland.

Die is op dit moment niet beschikbaar. In elke toekomstvariant moet het huidige vliegen dus voorlopig zeer worden ingeperkt. De discussie in Nederland gaat vaak over uitbreiding van Schiphol. Het zou moeten gaan over minder vliegen. In Tabel 3 staat de geschatte verbruikshoeveelheid energie aangegeven voor verschillende transportmiddelen.

Tabel 3. Energieverbruik van een aantal transportmiddelen. * = uitgaande van het maximale aantal passagiers. Bij de auto's en fiets is uitgegaan van 1 persoon per transportmiddel. Bij de trein is uitgegaan van een gemiddelde bezetting.

Energieverbruik	[kWh per 100 km per p.p.]
Benzineauto	80
Waterstofcel (Honda)	69
Bus*	20
Electrische auto	18
Trein	3-9
Vliegtuig*	51
Helikopter*	150
Cruiseschip*	103
Fiets	2

De meest efficiënte transportwijzen zijn aangegeven met groen; gebruik maken van de fiets en de trein leidt tot de laagste energiebelasting. Cruises en helikoptervluchten vragen de meeste energie.

6.3 Verbruikte energie in onze huizen

Naast transport zijn er nog vele andere activiteiten van de mens die leiden tot energieverbruik. In onze huizen verbruiken we flinke hoeveelheden energie, zie bijvoorbeeld Fig. 10. Het gemiddelde energieverbruik per jaar in Nederland is ongeveer 3.500 kWh aan elektrische stroom en zo'n 1.500 m³ gas per huishouden. De energie-inhoud van deze hoeveelheid gas is ruwweg 25.000 kWh. Per persoon (een gemiddeld huishouden in Nederland bestaat uit 2,1 personen) verbruikt men dus thuis al 13.500 kWh per jaar. Dat komt overeen met 37 kWh per persoon per dag. Verwarmen, koelen (airco) en wassen zorgen voor het meeste energieverbruik. Veel elektrische apparaten, zoals de TV, zijn de laatste decennia veel efficiënter geworden. Als voorbeeld heb ik verlichting in Fig. 9 buiten het blokje verwarming etc. gehouden. We verbruiken ongeveer 4 kWh per persoon per dag. Dit was 30 jaar geleden, toen gloeilampen nog niet waren vervangen door o.a. LED lampen, nog vele malen hoger.

Regelmatig zijn leuke 'Gadgets' als telefoonladers, playstations, op afstand bestuurbare auto's, stofzuigers, laptops in het nieuws; het zouden energieslurpers zijn. Haal ze uit de stopcontacten

want dat bespaart energie. Dat is waar maar veel moderne apparaten in de 'stand-by' stand verbruiken niet heel veel energie. Stofzuigen komt gemiddeld op 0,2 kWh per persoon per dag. Het kost dus niet zo veel energie en is gezond dus ik raad de lezer aan te blijven stofzuigen. In totaal komen alle gadgets op zo'n 5 kWh p.p.p.d.



Figuur 10. Stofzuigend dienstmeisje in 1912.

6.4 Landbouw

Het kost energie om voedsel te produceren en zeker op de schaal waarop dit gebeurt in Nederland. In dichtbevolkte landen is een enorme hoeveelheid luxe producten in de supermarkt te verkrijgen. De gemiddelde Nederlander eet en drinkt zo'n 3 kWh aan energie-inhoud per dag. Het kost dus al *minimaal* deze hoeveelheid energie om

de voedingsmiddelen te produceren. Daarbovenop is er vaak *extra* energie nodig om de producten te maken. Een veganist verbruikt niet heel veel meer energie dan de genoemde 3 kWh door slechts plantaardige producten te eten. Een liefhebber van melk drinkt wel een halve liter melk per dag. Ook zijn er veel Nederlanders die wel 50 gram kaas per dag consumeren. Daar is ook nog een halve liter melk voor nodig. Een melkkoe produceert gemiddeld 25 liter melk per dag. Dus in feite gebruik men dan per dag 1/25 koe. Een koe verbruikt 25 kWh per dag. Daarbovenop komen nog de productiekosten om kaas te maken in de fabriek. Dat betekent dat de melkliefhebber alleen al via de melkproducten 1,5 kWh per dag *extra* verbruikt. Zuivelproducten, zie Fig. 11, als yoghurt en kwark heb ik dan nog niet genoemd.

Het nuttigen van 2 eieren per dag kost 1 kWh aan energie per dag om deze eieren te produceren. Een enthousiaste vleeseter die 200 g vlees eet per dag verbruikt zo'n 8 kWh per dag. Zoogdieren verbruiken energie en elk dier heeft een zekere periode geleefd en energie verbruikt. In totaal kan



Figuur 11. Enige zuivelproducten.

het energieverbruik van landbouwproducten worden geschat op (gemiddeld) 15 kWh p.p.p.d.

6.5 Spullen

We kopen enorm regelmatig spulletjes waarin veel materialen worden gebruikt. Om deze materialen (denk aan stenen, hout, coatings en plastics waar huizen uit bestaan, automaterialen, asfalt) te produceren wordt energie verbruikt. Spullen als verpakkingen (bestaan o.a. uit aluminium, plastics), computer chips, kranten/tijdschriften, meubels, etc. moeten worden geproduceerd. Al deze spullen doorlopen vier fasen. Eerst worden ruwe grondstoffen (bijvoorbeeld plastics, glas, metalen) geproduceerd. Vervolgens wordt het eindproduct gemaakt. Daarna worden ze gekocht en gebruikt. Sommige producten verbruiken energie als ze worden gebruikt (denk aan de haardroger, de friteuse). De laatste fase is het afvoeren van deze producten en de eventuele recycling. In al deze stappen wordt energie gedegradeerd, ook bij recycling. Veel materialen zijn beperkt beschikbaar op aarde. Daarom ben ik een voorstander van hergebruik van materialen maar bij alle stappen is het zinnig om scherp te kijken naar de hoeveelheid energie die wordt verbruikt. Bij alle (nieuwe) processen is het dan ook zinnig een LCA te maken. Zoals kan worden waargenomen op Koningsdag worden er enorm veel spulletjes verkocht. Soms worden ze niet eens gebruikt. In totaal kost het maken van spulletjes

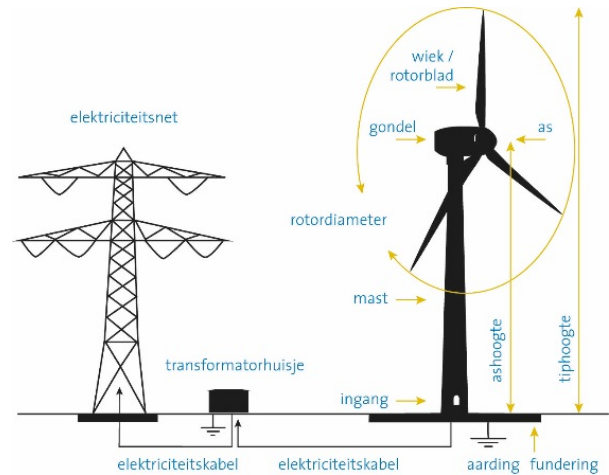


Figuur 12. Tuinmeubeltjes.

gemiddeld 48 kWh p.p.p.d. Dat is dus meer dan we gemiddeld verbruiken bij het rijden met auto's. Al deze spulletjes moeten ook nog eens worden getransporteerd door de producenten van de ruwe grondstoffen, van de halffabricaten en van de eindproducten. Dat leidt ook nog eens tot een extra energieverbruik van 12 kWh p.p.p.d. Ja, het zijn bedrijven die deze energie degraderen maar wij, de consumenten, zijn het die deze spulletjes willen hebben. Verder zal ik dat niet speciaal behandelen maar er is natuurlijk ook enige energie nodig voor defensie. Dat is zo'n 4 kWh p.p.p.d. We hebben nu besproken welke activiteiten van de mens bijdragen aan energieverbruik; de rode kolom van Fig. 9 is nu compleet. Nu gaan we schatten hoeveel van de verbruikte energie in principe duurzaam opgewekt zou kunnen worden.

6.6 Windenergie (op land)

Nederland ligt aan zee en de windsnelheden zijn relatief hoog in kustgebieden. Het is mogelijk om



Figuur 13. Schematische schets (Milja van Hooft) van de onderdelen van een windturbinemolen en aansluiting op het elektriciteitsnet.

die windenergie om te zetten in elektrische energie met behulp van windturbines, zie Figuren 13 en 14. In de periode 1981-2010 was de langjarige gemiddelde windsnelheid zo'n 6 m/s (ongeveer 20 km/uur) aan de kust. Dit geeft per windpark⁴⁷ ongeveer 2 Watt per vierkante meter. In Nederland hebben we per inwoner een oppervlak beschikbaar van 2500 m². Dat betekent dus een vermogen per persoon dat via windturbines kan worden opgewekt van $2 \text{ W/m}^2 \times 2500 \text{ m}^2 \text{ p.p.} = 5 \text{ kW p.p.}$
 $= 120 \text{ kWh p.p. per dag.}$

Dat is een indrukwekkende opbrengst! Dit is echter niet realistisch want dan zouden we *overal* windturbines moeten plaatsen. Als realistischer schatting van het maximale oppervlak waarop we in Nederland windturbines neerzetten neem ik 15%. Dan komen we op de 20 kWh p.p. per dag in

Fig. 9. Er moet worden opgemerkt dat er veel

⁴⁷ In zo'n windpark wordt de windmolendichtheid geoptimaliseerd.

verzet is in Nederland tegen de komst van windparken. Men vindt het uitzicht op windturbines niet mooi en het wordt onnatuurlijk⁴⁸ genoemd. In 2018 en 2019 werden exploitanten van nieuwe parken bedreigd in Noord-Nederland.

Het zal dus niet eenvoudig zijn om windenergie op grote schaal te gaan benutten maar het is een prachtige bron van duurzame energie. Kost het niet erg veel energie⁴⁹ om een windturbine te maken? Uit een levenscyclusanalyse blijkt dat de gemiddelde windmolen ongeveer 8 tot 34 gram CO₂-equivalent per kWh opgewekte stroom uitstoot. Voor een gascentrale is dit zo'n 490 gram en bij een kolencentrale gemiddeld 900 gram per kWh. Het kost dus energie om windturbines te maken maar ze zijn alsnog minstens 10 maal zo efficiënt als klassieke elektriciteitscentrales.



Figuur 14. Klassieke windmolen de Goliath in de Eemshaven tussen moderne windturbines die vaak groot zijn; een tweemaal zo grote windturbine levert 30% meer energie op.

⁴⁸ Dat zijn roltrappen ook maar daar hoor je nooit iemand over.

⁴⁹ [Factcheck de Correspondent](#)

6.7 Zonne-energie

Nederland ligt ver van de evenaar en daardoor is er slechts vanuit het zuiden directe energie van de zon die kan worden omgezet in elektriciteit. Moderne zonnepanelen worden steeds efficiënter en er wordt geschat dat ze zeker 30 jaar functioneren. Na ongeveer 14 maanden gebruik van de panelen is er meer energie opgewekt dan er nodig was om ze te produceren. Het is opmerkelijk dat de overheid zonnepanelen (met cellen die de zonne-energie omzetten in elektrische stroom) of zonnecollectoren / zonneboilers (die verwarmen water) nog niet heeft verplicht bij nieuwbouw. Zonneboilers zijn het meest efficiënt maar zonnepanelen zijn het meest populair. Mijn schattingen (op basis van het boek van MacKay) zijn behoudend⁵⁰ maar ik kom op 13 kWh p.p. per dag voor zonneboilers en 5 kWh p.p. per dag voor zonnepanelen, zie Fig. 9. Naast particuliere panelen kan er natuurlijk zonne-energie worden opgewekt door natuurgebieden anders in te richten en er 'Plantages' met zonnepanelen te plaatsen.

⁵⁰ Wellicht ben ik te behoudend in mijn beschouwing over zonne-energie. Er zijn wetenschappers die op veel hogere schattingen komen. In Appendix A een 'zonnigere' beschouwing die hoopgevend is.



Figuur 15. Zonnepanelen voorzien van een speciale DSM-coating op het dak van een huis in Sittard.

Dit kan veel meer energie opleveren. Een zonnepark (ongeveer 5 W/m^2) is efficiënter dan een windpark (ongeveer 2 W/m^2). Als we in Nederland zoveel mogelijk zonneparken zouden aanleggen zou dit ongeveer 50 kWh p.p. per dag kunnen opleveren, zie Fig. 9. Ook dit zal veel verzet opleveren in Nederland.

6.8 Windenergie, getijden en golven

Nederland bezit een groot deel van de Noordzee. In dat gebied is Nederland steeds meer windparken aan het ontwikkelen. Dit levert minder weerstand op dan op land maar in de kustgebieden leidt het wel tot horizonvervuiling. Bovendien klagen natuurliefhebbers over vogels die sterven ten gevolge van de aanwezigheid van windturbines. In Denemarken bijvoorbeeld (zie Fig. 16), heeft men veel windturbines op zee geplaatst; ze leveren zo'n 10% van de energiebehoefte van de Denen.



Figuur 16. Windturbinepark Middelgrunden in zee (de Sont) bij het Deense Øresund. Afstand tussen twee windturbines: 180 meter. Foto: Kim Hansen.

Er is geschat dat er 30.000 vogels per jaar sterven door de Deense windmolens. Er sterven elk jaar echter ongeveer 1 miljoen vogels door het verkeer en katten doden vele miljoenen vogels per jaar in Denemarken.

Het is inzichtelijk om getallen dus in perspectief te plaatsen. Een redelijke schatting, waarbij 30% van de geschikte gebieden op zee wordt gebruikt voor windturbines, levert zo'n 32 kWh p.p.p.d. op. In de kustgebieden kunnen parken met windturbines zo'n 16 kWh p.p. per dag opleveren, zie Fig. 9.

Door gebruik te maken van verschillen in waterstanden bij eb en vloed kan ook energie worden opgewekt. Getijdenenergie is energie die op deze wijze kan worden gewonnen uit waterkracht. Tijdens vloed kan het opkomende water worden tegengehouden met een dam. Als het vervolgens weer eb is, kan het zeewater via turbines terug naar zee worden geleid. Vervolgens

worden door de turbines verschillende generatoren aangedreven waardoor energie wordt opgewekt. Maximaal zou er, bij intensief gebruik van de hele Nederlandse kustlijn (met grote implicaties voor bijvoorbeeld de scheepvaart en recreatie) zo'n 11 kWh p.p.p.d. kunnen worden opgewekt door gebruik maken van de getijden. Ook kan golfslagenergie worden gebruikt. Dit is energie die direct te winnen is op zee door aanwezigheid van golven. Er zijn verschillende methoden, zie bijvoorbeeld het 'zeeslang' systeem⁵¹ in Fig. 17. Maximale opschaling van dit soort systemen zou 4 kWh p.p.p.d kunnen opleveren.



Figuur 17. Het Pelamis systeem.

6.9 Biomassa

Plantengroei is mogelijk op aarde via de fotosynthese. Water en koolstofdioxide (CO_2) kunnen in aanwezigheid van zonlicht, mineralen en stikstof in de bodem omgezet worden in suikers. Zo groeien planten en bomen. Het maken van 'bio-energie' is hierop gebaseerd: het snel laten groeien van 'groen' materiaal en dan vervolgens 'iets doen'

met dit materiaal wat energie oplevert. Zo kun je snelgroeende planten of bijproducten van de landbouw oogsten en dan verbranden in biomassa centrales; ze worden dan omgezet in elektriciteit of warmte of beide. Dit is in feite het vervangen van steenkool door planten. Ook kunnen planten via chemische processen omgezet worden in ethanol of biodiesel⁵². Als je alles meeneemt kom je op een maximale beschikbare biomassa energiedichtheid van $0,5 \text{ W/m}^2$. Dat levert 24 kWh p.p. per dag. Dat completeert de groene kolom van Fig. 9. Gebruik van biomassa als energiebron kan slechts als er tegelijkertijd enorm veel extra bomen worden geplant.⁵³ Overigens zou Nederland al bijna de helft van de klimaatdoelstellingen halen als elke Nederlander 6 bomen zou planten omdat ze netto CO_2 vangen.

6.10 Blauwe energie

Zout en zoet water verschillen in de zoutconcentratie. In de zeeën is de gemiddelde zoutconcentratie 35 gram per liter. De zoutconcentratie in zoet water varieert sterk. Rivierwater heeft gemiddeld een zoutconcentratie van 0,5 gram per liter. Zoet water is dus niet zoet (er zit geen suiker in) maar bevat weinig zout. Indien zout en zoet water via een membraan met elkaar in contact worden gebracht treedt *osmose*

⁵¹ Er wordt gebruik gemaakt van een boei of vlotter die door beweging een hydraulische pomp aandrijft.

⁵² Er moet wel worden opgemerkt dat verbranden van biomassa leidt tot CO_2 uitstoot. Bomen (en planten) vangen netto echter CO_2 .

⁵³ J.-F. Bastin *et al.*, The global tree restoration potential, *Science* **365** (2019) 76-79, [link artikel](#)

op. Osmose is een diffusieproces waarbij een vloeistof, waarin zouten zijn opgelost, door een zogenaamd halfdoorlatend membraan (een semipermeabele wand) stroomt, dat wel de vloeistof doorlaat maar niet de opgeloste stoffen. Blauwe energie⁵⁴ is energie die afkomstig is uit osmose. Door deze twee waterige systemen te scheiden door een membraan kan via osmose elektriciteit worden gewonnen⁵⁵. Deze blauwe energie kan dus opgewekt worden op plaatsen waar zoet water de zee in stroomt. Bij de Afsluitdijk, zie Fig. 18, worden er experimenten gedaan om te onderzoeken hoeveel dit op kan leveren. Een ruwe schatting laat zien dat er in Nederland op deze wijze 4 kWh p.p.p.d. kan worden opgewekt.



Figuur 18. De Afsluitdijk vanuit den Oever: ontmoeting van zout en zoet water.

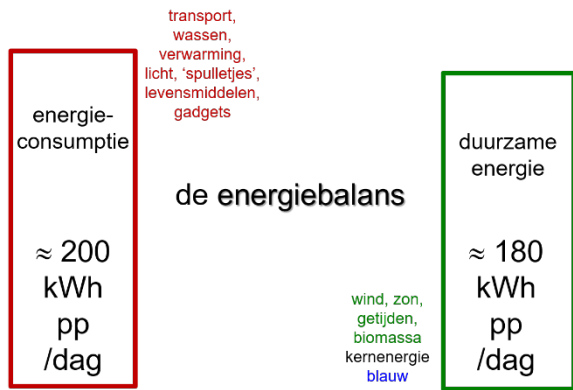
7. Conclusie energiebalans

De energiebalans is opgemaakt in Figuur 9 en wordt nog eens samengevat in Fig. 19. De gemiddelde Nederlander verbruikt per dag zo'n 200 kWh. Dat is een flinke hoeveelheid energie als we dat vergelijken met de meeste inwoners op aarde. Als we op dit moment schatten hoeveel energie er duurzaam ('groen') kan worden opgewekt op basis van de huidige beschikbare technologie dan is dat ruwweg 180 kWh per persoon per dag. Die 180 kWh staat ver boven de huidige hoeveelheid groene energie die wordt opgewekt. Als we die 180 kWh willen halen zal dit enorme consequenties hebben voor de samenleving.

Alle potentiële hernieuwbare energie kan ons energieverbruik op dit moment niet compenseren. Een belangrijke conclusie is dat we op dit moment teveel energie degraderen om duurzaam te kunnen leven. Er moet hard worden gewerkt aan het realiseren van zoveel mogelijk duurzame energie en er moeten oplossingen komen voor het minder verbruiken van fossiele brandstoffen. Dit zal niet kunnen zonder invloed op ons (gemiddeld) luxe leven.

⁵⁴ Soms wordt energie uit getijden en golven ook blauwe energie genoemd.

⁵⁵ 'Membranen voor een nieuwe toekomst', [intreerede prof. Kitty Nijmeijer, 2017](#)



Figuur 19. Overzicht van MacKay's energiebalans voor de gemiddelde Nederlander.

Het functioneren van de maatschappij hangt op lange termijn af van harde natuurwetten zoals de hoofdwetten van de thermodynamica. Daaruit volgt dat energie niet uit niets ontstaat en dat 'op is op' geldt als het gaat om materialen.

Veel grondstoffen en energie zijn slechts beperkt voorradig of te 'herwinnen'. De uitputting van beschikbare energie en materialen komt overeen met de consumptie per persoon maal het aantal mensen.

Zelfs als we de 180 kWh p.p.p.d. aan 'groene' energie gaan realiseren dan zijn er nog allerlei complicaties:

- duurzame energie levert slechts elektrische stroom op. Deze elektriciteit moet worden opgeslagen,
- niet alle verbruikte energie is eenvoudig te vervangen door groene energie. Grote passagiersvliegtuigen vliegen niet op elektrische stroom,

- opslag van fossiele brandstoffen is veel makkelijker dan van groene stroom,
- de opslag van energie batterijen en in waterstof (H₂) als vloeistof schiet tekort, en
- sommige materialen (zoals lithium en kobalt voor batterijen) zijn beperkt beschikbaar.

In het huidige economische systeem wordt alles uitgedrukt in geld. Echter, wat is de *waarde* van energie / materialen? Een € of een \$ heeft tijdelijke economische waarde, terwijl de waarde van een liter fossiele brandstof eigenlijk niet in geld uitgedrukt kan worden.

Het feit dat er natuurwetten zijn die grenzen stellen aan ons functioneren op lange termijn wordt niet of nauwelijks erkend in de maatschappij. De eerder geformuleerde basisregel:

**totale ecologische voetafdruk =
de gemiddelde voetafdruk × het aantal mensen**

wordt vaak genegeerd. Als er bij een nieuw proces of product *iets* minder energie wordt gedegradieerd dan wordt dit vaak duurzaam genoemd. Wellicht is het ietsje duurzamer. Het zou realistischer zijn om het dan iets 'minder milieubelastend' te noemen.

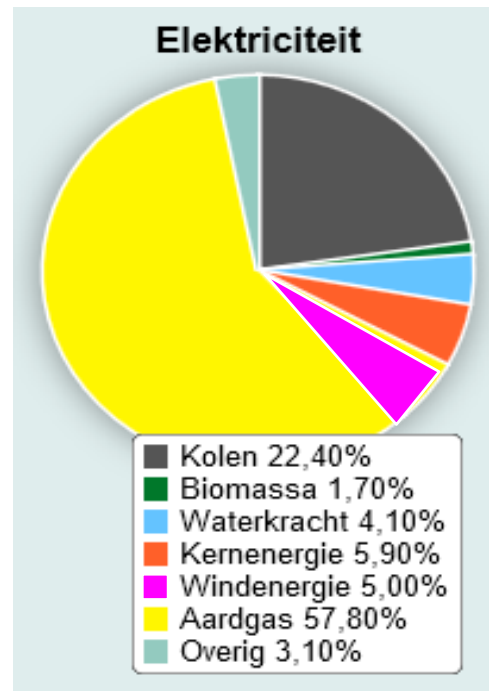
Een groene revolutie (vol gaan voor zonne-energie, wind en getijden etc.) zal helpen maar zal enorm veel weerstand oproepen. Er zijn nu al allerlei actiegroepen die acteren tegen windturbines.

Op de lange termijn zal de mens ofwel het luxe leven deels moeten opgeven en/of er aan moeten bijdragen dat het aantal mensen op aarde afneemt. Nederland zou hierbij samen met andere welvarende landen het voortouw moeten nemen. Bij energiebeleid (recent vaak klimaatbeleid genoemd, terwijl CO₂ uitstoot en klimaatverandering slechts de nare gevolgen zijn van de snelle en overdadige energiedegradatie) zou de MacKay balans continu een centrale rol moeten spelen.

8. Oplossingen

In deze sectie wil ik suggesties doen die kunnen helpen om i) minder energie te verbruiken en ii) te komen tot korte- en een lange-termijn-oplossingen om meer duurzame energie te realiseren.

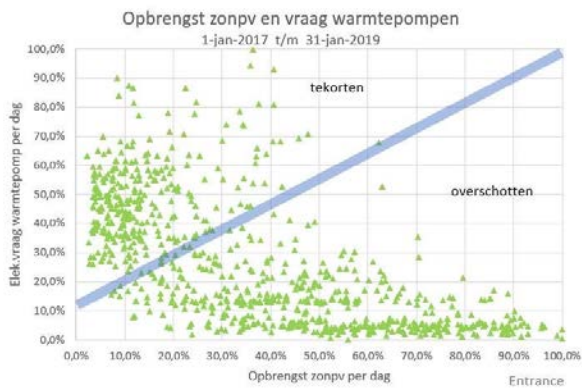
Allereerst pleit ik voor een stimulerende overheid die goed gedrag (meer groen, minder rood) stimuleert. Dus minder belasting op goed gedrag en meer belasting op vliegen, SUVs, verbranden van materialen en brandstoffen. Dit wordt nu in feite vooral aan de markt overgelaten, terwijl vliegen wordt gestimuleerd. Primair moet de overheid sturen op het vergroenen van de 'energiemix', zie Fig. 20.



Figuur 20. De energiemix in Nederland 2019.

Er wordt in Nederland op dit moment vaak gesuggereerd dat 'elektrisch' duurzaam is. Dat is slechts zo als deze elektriciteit afkomstig is van hernieuwbare bronnen. In Nederland blijkt (zie Fig. 19) dat de energiemix op dit moment nogal 'grijs' is: aardgas en steenkool zijn de voornaamste energiebronnen. Hier dient de overheid een enorme slag te maken.

Vervolgens moet gerealiseerd worden dat 'van het gas af' na de vergroening (dus niet zoals de huidige Nederlandse regering het nu aanpakt) alsnog complicaties geeft. Verwarming van huizen via warmtepompen geeft nadelen. Warmtepompen verbruiken veel meer energie (in kWh) dan gebruik van aardgas; een relatief efficiënte, schone energiebron.



Figuur 21. Zonnepanelen versus warmtepompen. Data van www.energieopwek.nl.

Om de warmtepompen 'groen' te laten zijn zou direct gebruik van zonne-energie optimaal zijn. Helaas is net als bij de CV de vraag van warmtepompen het hoogst als de opbrengst van zonnepanelen het laagst is en *vice versa*, zie Fig. 21 waarin de energie-opbrengst van zonnepanelen vergeleken wordt, met de energievraag van warmtepompen in Nederland.

Op het gebied van transport dient de overheid ook meer te sturen. Dus wél belasting op vliegtickets en kerosine en géén belasting op elektrische auto's, treinreizen. Verder zou de EU hogesnelheidstreinreizen sterk moeten stimuleren: technologisch is het mogelijk om in, zeg, 7 uur van Amsterdam naar Madrid te reizen, zie Fig. 22.

Om vliegen te beperken zou men een 'strippenkaart' kunnen invoeren (met de mogelijkheid om bijvoorbeeld maximaal 1 vlucht per jaar te boeken). Je mag je recht op een vlucht verkopen, maar zo maximaliseert de overheid het aantal vluchten. Uiteraard kan dit niet zonder



Figuur 22. De hogesnelheidstrein. De plaatsvervanger van korte vluchten?

afspraken met andere Europese landen die ook zoiets zouden moeten invoeren.

De overheid zou een geleidelijke bevolkingsafname⁵⁶ kunnen aanmoedigen. Als alle mensen op aarde zouden leven als de gemiddelde Nederlander⁵⁷ dan zouden er zeker 3 aardes nodig zijn om de mensheid te voorzien van grondstoffen die we verbruiken. Een eerste kind zou dus belastingtechnisch aangemoedigd kunnen worden maar tweede en meer kinderen zouden ontmoedigd kunnen worden. Ook zou de overheid de burgers energiepakketjes kunnen geven. Dat kan helpen om de hoeveelheid energie die wordt gedegradeerd te maximaliseren. Opnieuw: verkopen mag (maar in beperkte mate).

Er zouden op elk product energielabels zichtbaar moeten zijn zodat de consument inzicht krijgt in de hoeveelheid energie die al gebruikt is om dit

⁵⁶ Dit stuit op ethische bezwaren, ook al was bevolkingspolitiek in de jaren '70 nog een heel normaal thema.

⁵⁷ U kunt uw ecologische voetafdruk eenvoudig uitrekenen via <https://www.footprintcalculator.org/>

product te maken. Dit helpt bij de bewustwording van onze ecologische voetafdruk. De BTW hoogte zou gekoppeld kunnen worden aan deze labels. Zo kan de overheid vlees eten en zuivel nuttigen ontmoedigen.

Het wassen van kleren is een zeer energie-intensieve activiteit. Nu wast vrijwel iedereen thuis zijn of haar kleding met behulp van zijn eigen wasmachine. Een wascentrale per wijk zou flink wat energie kunnen besparen: het water hoeft nauwelijks opgewarmd te worden aangezien wassen een continu proces wordt. Het verwarmen en (toenemend) koelen van huizen kost veel energie. Hier kan de overheid zinnige maatregelen nemen door het beter isoleren van woningen aan te moedigen (0% BTW) en slecht geïsoleerde woningen meer te gaan belasten.

In de politiek moet meer langetermijndenken worden gestimuleerd. Jongeren hebben veel toekomst. Ouderen hebben weinig toekomst. Dat zijn feiten. Daarom zou het logisch zijn om een stemweegfactor te verzinnen die afhangt van de leeftijd⁵⁸.



Figuur 23. Effectieve reductie van energieverbruik door auto's: verlagen van de maximumsnelheid.

Een eenvoudige, impopulaire maar effectieve maatregel die de overheid kan nemen om het energieverbruik van auto's flink te reduceren is het invoeren van een maximumsnelheid van 100 km per uur, zie de symbolische afsluitende Fig. 23. Boven de 100 km/h neemt het verbruik per gereden km snel toe. Waarschijnlijk zal het energieverbruik door autorijden zo'n 20 tot 30% afnemen door deze maatregel.

De energietransitie zal geleidelijk zijn. Ik denk dat kernenergie (zie Intermezzo B) een serieuze optie is om de CO₂ uitstoot tijdens de transitie in te perken. Ten slotte adviseer ik beleidsontwikkelaars om bij de ontwikkeling van maatregelen op het gebied van energie(transitie) gebruik te maken van de energiebalans van MacKay.

⁵⁸ Column Max Pam, Volkskrant, 21 augustus 2019. [link VK column](#)