Rijkswaterstaat
Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Energieke wegen

Innovatie. Informatie. Inspiratie.

Water. Wegen. Werken. Rijkswaterstaat.

Energieke wegen

Innovatie. Informatie. Inspiratie.

Voorwoord

Wil René Jansen

Energieke wegen

Welke wegen kunnen we inslaan om mobiliteit duurzamer te maken en de snelweg meer waarde te geven? Wegen naar de Toekomst, innovatieprogramma van Rijkswaterstaat verkent die (zij)wegen met de reeks 'Innovatie, Informatie, Inspiratie'.

In dit boek staat energie uit de weg centraal. Dit lijkt een belangrijke bijdrage te kunnen leveren aan duurzame mobiliteit. Maar wat is nu al realistisch en waarop moeten we nog wachten? Stel dat energie uit de weg haalbaar is. Dan kan toekomstig elektrisch wegvervoer onafhankelijker zijn van fossiele brandstoffen. Dan zou de snelweg meer waarde krijgen als bron van duurzame energie én we zouden de CO_2-uitstoot verder kunnen terugdringen. Voldoende reden om een zoektocht te starten.

Dit boek laat een boeiende zoektocht zien met af en toe uitstapjes buiten de weg. Naar nieuwe technieken en naar nog ongekende mogelijkheden. Maar ook naar haalbare oplossingen, naar nieuwe combinaties en verrassende opbrengsten. Auteur Auke Hoekstra en projectleider Dineke van der Burg leiden ons door deze zoektocht, en dank zij hen leest u dit boek.

In de reeks 'Innovatie, Informatie, Inspiratie' verscheen eerder het boek 'Elektrisch rijden' dat samen met dit boek 'Energieke wegen' een mooi tweeluik vormt over duurzame mobiliteit.

We hopen dat u, net als ik, verrast en geboeid wordt.
Veel leesplezier en inspiratie,

Wil René Jansen
Programmamanager Wegen naar de Toekomst

Inhoudsopgave

1	**De uitdaging**	**4**
	Miljoenen jaren van stijgend energieverbruik	5
	Onze onvoorstelbare honger naar energie	8
	De missie van onze generatie	8
	Nergens is de transitie zo lastig als in Nederland	10
	Nergens is de transitie zo lastig als in het wegtransport	11
2	**Biobrandstoffen**	**12**
	Brandstof versus voedsel	12
	Benodigde doorbraken	15
	Biobrandstof in watt per vierkante meter	18
3	**Elektrisch rijden**	**20**
	Elektrisch rijden op water(stof)	20
	De brandstof voorbij: rijden op batterijen	22
	Draadloos opladen onderweg	26
	Duurzame elektriciteit in overvloed	30
4	**Weg op wind**	**32**
	Kleine molens worden groot	33
	Tussen droom en daad	37
	Dan liever de lucht in!	38
5	**Warmbloedige weg**	**42**
	Balans versus brandstof	42
	Nooit meer koude voeten	45
	Warmte uit wegdek in de praktijk	50
6	**Spelen met licht**	**52**
	De onstuitbare opmars van zonnepanelen	52
	Zonnecellen langs de weg	58
	Een glazen weg van zonnepanelen	64
7	**De energieke weg**	**66**
	2015: de integrale benadering	66
	2030: duurzaam is standaard	72
	Nawoord	76
	Interviews en bijdragen	80
	Afbeeldingen	81
	Noten	82
	Bronnen	90

1 De uitdaging

De mens heeft een ontzagwekkende grote behoefte aan energie die al miljoenen jaren toeneemt en die sinds de industriële revolutie is geëxplodeerd. Onze generatie moet de overstap maken naar duurzame energie. Dat is een uitdaging van formaat, helemaal voor het energie-intensieve Nederland. Extra lastig is die overstap voor het wegverkeer. Toch gaan we die uitdaging aan. We willen van de weg een 'gesloten systeem' maken dat zelf de energie opwekt die het wegvervoer nodig heeft.

Miljoenen jaren van stijgend energieverbruik

De opkomst van de menselijke beschaving hangt samen met meer energiegebruik.

De meest basale vorm van dierlijk energiegebruik is eten: voedsel is in de eerste plaats energie. Een bijzondere eigenschap van mensen is dat zij al meer dan 2 miljoen jaar werktuigen gebruiken om meer eten te bemachtigen. Bijvoorbeeld door wortels op te graven, te jagen en concurrenten te verdrijven. Koken was de volgende innovatie: weer was er meer energie beschikbaar omdat zaken die voorheen oneetbaar waren ineens wel verteerd konden worden. Zelfs de innovatie daarna – het temmen van dieren – was in eerste instantie puur gericht op het verwerven van voedsel: dieren mesten zichzelf vet en kunnen worden opgegeten als er tijdelijk onvoldoende plantaardig voedsel beschikbaar is.

De grootste innovatie in de geschiedenis van onze beschaving was misschien wel het ontstaan van landbouw, circa tienduizend jaar geleden in het gebied dat we nu Irak noemen. Landbouw gaf mensen de mogelijkheid om de hoeveelheid energie die per vierkante meter werd geproduceerd dramatisch te verhogen. Ineens werd het mogelijk om dorpen te stichten die het voedsel op loopafstand verbouwden. Bovendien konden hongersnoden worden voorkomen door overtollig voedsel in centrale bergplaatsen op te slaan. Een gevolg van zulke bergplaatsen was dat er bijgehouden moest worden wie er hoeveel voedsel had ingebracht en daarom vonden verschillende dorpen het schrift uit: de eerste kleitabletten zijn dan ook een soort voedselbonnen.

Tegenwoordig vinden we het normaal dat er machines zijn die werk voor ons doen maar zoals we zullen zien is dat eigenlijk een heel recente ontwikkeling. Hoewel we enkele eeuwen geleden begonnen zijn om bepaalde werkzaamheden uit te besteden aan lastdieren was ons eigen lijf tot ver in de negentiende eeuw verantwoordelijk voor bijna al het zware werk. De ommekeer kwam pas na de uitvinding van de stoommachine en de introductie van fossiele energie.

Hoeveel mensen kunnen er leven van één vierkante kilometer?

Voor het ontstaan van landbouw leefden mensen als jagers en verzamelaars: ze trokken rond op zoek naar planten en dieren. Dergelijke methoden vroegen meer dan één vierkante kilometer per persoon. Nomaden die kuddes met zich meenamen konden de bevolkingsdichtheid vergroten naar 3 personen per vierkante kilometer. Wisselend landgebruik (waarbij landbouwgrond wordt gebruikt tot hij uitgeput is) maakt bevolkingsdichtheden tot circa 70 mensen per vierkante kilometer mogelijk. Traditionele landbouw vergrootte dat tot circa 800 personen per vierkante kilometer. Moderne landbouw kan circa 2.000 personen voeden met één vierkante kilometer. In de laatste tienduizend jaar hebben we de grond voor onszelf duizenden malen productiever weten te maken.[1]

Afbeelding van een 5000 jaar oud kleitablet uit Zuid Irak. Het registreert energieverbruik in de vorm van voedselrantsoenen.

Intermezzo

De stoommachine en de uitvinding van energie

Toen deze stoomlocomotief in 1896 door Greenville-Alabama (in de Verenigde Staten) reed was de stoomtrein het snelste en meest gebruikte transportmiddel. Aardig detail is dat de opkomst van de stoomtrein gedeeltelijk te danken was aan de stijgende prijs van paardenvoer en de dalende prijs van kolen.

In 1769 kreeg James Watt het patent op de door hem verbeterde stoommachine en luidde daarmee de industriële revolutie in. Watt wilde zijn uitvinding in licentie geven aan producenten. Het idee was dat zij voor een stoommachine die meer arbeid kon verrichten meer geld aan Watt moesten betalen.

Watt had echter een probleem: er bestond nog geen eenheid voor het vermogen van een machine. Watt besloot om de arbeid die een pony kan leveren als uitgangspunt te nemen: hij mat in een kolenmijn hoeveel kilo kolen een pony binnen een uur uit de mijn omhoog kon takelen. Hij vermenigvuldigde deze hoeveelheid met twee en noemde dit de paardenkracht. (Blijkbaar vond hij de term 'ponypower' minder aansprekend dan de term 'horsepower'.) Deze eenheid werd – net als Watt zijn stoommachine – uitermate succesvol en tot op de dag van vandaag wordt het vermogen van veel apparaten in paardenkrachten uitgedrukt.

Met de komst van het wetenschappelijke eenhedenstelsel – het Système International d'Unités of kortweg SI – kwam er een nieuwe maat voor vermogen. Om de bijdrage van James Watt te eren is deze maat naar hem genoemd. Een paardenkracht staat in het nieuwe systeem gelijk aan 746 watt. Intussen is dit nieuwe stelsel overal in gebruik, behalve in Liberia, Myanmar en de Verenigde Staten.

Maar vermogen is niet hetzelfde als energie! Energie is een lastig en ongrijpbaar begrip en het duurde tot 1850 voordat iemand er enigszins vat op kreeg. Die iemand was James Prescott Joule. Zijn experimenten toonden aan dat beweging, warmte en elektriciteit in elkaar omgezet kunnen worden. Joule bewees daarmee dat er een universele grootheid is die ten grondslag ligt aan een hele reeks op het oog volkomen verschillende processen. Dat revolutionaire idee vormde de aanzet voor de thermodynamica en voor universele natuurwetten zoals de wet van behoud van energie.

Het is dan ook geen wonder dat de eenheid voor energie naar Joule genoemd is.

Energie en vermogen zijn simpel naar elkaar om te rekenen: een watt is één joule per seconde en een joule is de energie die nodig is om één seconde lang een vermogen van één watt te leveren. Een andere bekende maat voor energie is de kWh (kilowattuur). Dit is zoals de naam aangeeft de energie die nodig is om één uur lang 1 kilowatt vermogen te leveren. Een kWh is dus gelijk aan 3.600 seconden (een uur) maal 1.000 watt (een kilowatt) ofwel 3.600.000 joule (3,6 megajoule).

Dit is een belangrijk gegeven: het maakt voor het antwoord van een rekensom niet uit of we energiestromen beschrijven in watt of dat we energiehoeveelheden beschrijven in joule of kilowattuur. We mogen kiezen. Wanneer kunnen we nu het beste voor Watt kiezen en wanneer is Joule de beste rekenpartner?

Voor spaarpotten energie die je op een willekeurig nog niet nader bepaald moment kunt 'aanboren' is de joule ideaal. Zo kan je met de joule beschrijven hoeveel gas er nog in de gasbel van Slochteren zit. Of je kunt stellen dat een liter benzine 32 megajoule bevat en een vat ruwe olie 6,1 gigajoule. Ook de energie in voedsel kan je makkelijk in joules uitdrukken. Zo bevat een grote bloemkool 1 kilojoule en een portie patat met mayo 2,5 megajoule ofwel 2.500 keer zoveel.

Maar voor continue energiestromen rekent de watt makkelijker. Dat geldt in het bijzonder voor duurzame energiestromen uit bijvoorbeeld zon en wind: die zitten allesbehalve in een spaarpot. De uitdaging met duurzame energie is vaak om energiestromen op elkaar af te stemmen. Daarom wordt er in dit boek vaak gerekend in watt.

Orde grootes van vermogen

Voluit	In woorden	Afkorting	Orde grootte
watt	één watt	1 W	1 joule energie per seconde
kilowatt	duizend watt	10^3 W of kW	Draaiende wasmachine
megawatt	miljoen watt	10^6 W of MW	Grote windmolen (gemiddeld over een jaar)
gigawatt	miljard watt	10^9 W of GW	Flinke energiecentrale
terawatt	duizend miljard watt	10^{12} W of TW	Het energiegebruik van de totale wereldbevolking was in 2006 16 TW
petawatt	miljoen miljard watt	10^{15} W of PW	De Sahara ontvangt 4 PW zonnestraling
exawatt	miljard miljard watt	10^{18} W of EW	De aardbol onderschept 0,174 EW zonnestraling

Veel voorkomende eenheden voor energie en hun omrekenfactor naar de joule

Afkorting	Naam van de eenheid	Aantal joules	Definitie of toelichting
J	joule	1	Duw een object 1 meter ver met een kracht van 1 newton
MJ	megajoule	10^6	Een miljoen joule
GJ	gigajoule	10^9	Een miljard joule
Wh	Wattuur (watthour)	3.600	Een uur lang 1 watt
kWh	kilowattuur (kilowatthour)	3.600.000	Een uur lang duizend watt
cal	calorie	4,184	De energie nodig om 1 cm^3 water 1 °C op te warmen
kcal	kilocalorie	4.184	Duizend calorieën
Cal	Calorie	4.184	Een hoofdletter betekent hier dus duizend
Btu	Britse thermische eenheid (British thermal unit)	1.055	Verhit 1 pond water met 1 °F
MBtu	duizend Btu	1.055.056	De M staat hier niet voor mega maar voor duizend
MMBtu	miljoen Btu	1.055.056.853	De MM staat hier voor duizend maal duizend
quad	quadrillion Btu	$1{,}055 \times 10^{18}$	Btu maal 10^{15}
toe	ton olie equivalent	$4{,}187 \times 10^{10}$	Energie van een ton ruwe olie
Mtoe	megaton olie equivalent	$4{,}187 \times 10^{16}$	Miljoen ton ruwe olie
BOE	vat (barrel) olie equivalent	$6{,}118 \times 10^9$	Energie van 159 liter (42 gallons) ruwe olie
kgTNT	kilogram TNT (explosief)	4.184.000	Energie bij ontploffingen
eV	electronvolt	$1{,}6 \times 10^{-19}$	Lading electron maal 1 volt
erg	erg	0,0000001	Uit het centimeter-gram-seconde systeem
foe	10^{51} erg	1×10^{44}	Energie van een supernova

Onze onvoorstelbare honger naar energie

Het wereldwijde energiegebruik is de afgelopen eeuw met een factor twintig toegenomen en zal de komende eeuw weer met een factor twee tot vijf toenemen.

De ontwikkeling van de menselijke soort gaat al miljoenen jaren gepaard met een gestadig toenemende energiebehoefte, maar de laatste decennia is er sprake van een versnelling. In de grafiek op deze bladzijden is duidelijk te zien hoe snel. Vooral de toename van 1950 tot nu valt op. Waar komt dat door?

Dat komt door de groei van ons machinepark. Onze behoefte aan biomassa – voedsel voor ons en onze dieren – is de afgelopen 200 jaar verviervoudigd. Dit wordt weergegeven door de smalle groene strook onderaan de grafiek. Die groene strook valt echter in het niet bij de grote zwarte golf in de grafiek die de toegenomen behoefte aan fossiele energie weergeeft. Dit is het voedsel voor ons machinepark: kachels, auto's, industriële installaties en dergelijke. Omdat dit machinepark overal aanwezig is draait alles in onze maatschappij intussen op fossiele energie: huishoudens, boerderijen, ziekenhuizen, politiebureaus, kantoren, fabrieken…

Om dat in perspectief te zetten introduceren we een gemiddelde Nederlander genaamd Gerard Joule. Hij trapt elke werkdag 10 uur lang de longen uit zijn lijf om 20 elektriciteit op te wekken. Als hij trapt wekt hij gemiddeld 100 watt op. Na een jaar heeft Gerard Joule op die manier één gigajoule (GJ) elektriciteit opgewekt. Daar staat tegenover dat hij als gemiddelde Nederlander 235 GJ (7.500W) energie gebruikt. Het is alsof iedere Nederlander 235 man energiepersoneel in dienst heeft!

De taakverdeling onder dat energiepersoneel is ruwweg als volgt: 25 GJ (800W) in het huishouden, 30 GJ (1.000W) voor het wegtransport, 30 GJ (1.000W) voor landbouw en dienstverlening, 60 GJ (2.000W) in de industrie, 55 GJ (1.750W) voor de zee- en luchtvaart en ten slotte 25 GJ (800W) aan diverse verliezen.

Op dit moment gebruiken 500 miljoen van de 6,7 miljard mensen op aarde zulke grote hoeveelheden energie. Als de bevolkingsgroei en welvaartontwikkeling doorgaan zijn dat er eind deze eeuw 9 miljard. Dát bedoelen we met onze onvoorstelbare honger naar energie.

De missie van onze generatie

De transitie naar duurzame energie is een uitdaging die zijn weerga niet kent in de menselijke geschiedenis.

Het vraagteken in de grafiek symboliseert de 'missie van onze generatie': we zullen in korte tijd de transitie naar niet fossiele energiebronnen op gang moeten brengen.

Een dusdanig snelle verandering kwam in verleden eigenlijk alleen voor als er zich een natuurramp voltrok. Bijvoorbeeld de inslag van een meteoriet, 65 miljoen jaar geleden. Het stof dat daardoor in de lucht belandde blokkeerde zoveel zonne-energie dat veel planten afstierven. De dinosauriërs die van deze planten afhankelijk waren stierven vervolgens uit. Overigens maakte de meteoriet wel de weg vrij voor een klein halfaapje waaruit zich later de mens zou ontwikkelen. Auteurs zoals Jeremy Rifkin en James Lovelock vrezen dat de komende jaren even bepalend zullen zijn voor de menselijke ontwikkeling maar dan in negatieve zin.

Anderen wijzen vooral op de gevaren voor onze – intussen mondiale – menselijke beschaving. De geschiedenis leert namelijk dat een groot aantal beschavingen (mede) door energietekorten ten onder

is gegaan. Pregnant is het voorbeeld van Paaseiland: een van oorsprong paradijselijk tropisch eiland. Er ontstond echter een wedloop waarbij de status van een stam werd afgemeten aan de grootte van de standbeelden die zij oprichtte. Om steeds meer en grotere standbeelden te kunnen maken werd al het bos op het eiland gekapt. Bijna niemand overleefde de honger en het kannibalisme dat daarop volgde. Een ander voorbeeld is de Romeinse beschaving. Historicus en kroonprins Willem Alexander verhaalde in jarnuari 2009 bijvoorbeeld hoe het kappen van bossen voor brandstof in belangrijke mate bijdroeg aan haar teloorgang.[2] Mede daardoor braken in Europa de donkere middeleeuwen aan.

Onze huidige beschaving ontsprong tot nu toe de dans doordat wij over wisten te schakelen op fossiele brandstoffen. Maar die overschakeling is slechts tijdelijk. Zo maken we onze belangrijkste fossiele brandstof (olie) circa een miljoen keer sneller op dan zij is ontstaan en als we zo doorgaan is over 30 jaar de koek op. Bovendien zorgen natuurlijke en economische oorzaken ervoor dat de productie ervan achterblijft bij de vraag. Daardoor nemen de spanningen rond olie steeds verder toe. Ten slotte warmen we door het verbranden van fossiele brandstoffen de atmosfeer verder op. Zelfs als we vanaf nu elk jaar minder (in plaats van meer) fossiele brandstof gaan gebruiken neemt de temperatuur tot 2100 met minimaal 2 °C toe. Als we doorgaan op de ingeslagen weg komen we eerder in de buurt van de 6 °C.[3] De impact daarvan op het aardse ecosysteem – waar wij van afhankelijk zijn – begrijpen we nog niet precies maar hij is in ieder geval ingrijpend.

Het is aan onze generatie om een catastrofe te voorkomen en om een toekomst in te luiden waarin energie overvloedig, duurzaam en betaalbaar is. Dit boek kiest daarbij voor een positieve toonzetting door te laten zien dat de technologie om de transitie te maken al beschikbaar is.

Nergens is de transitie zo lastig als in Nederland

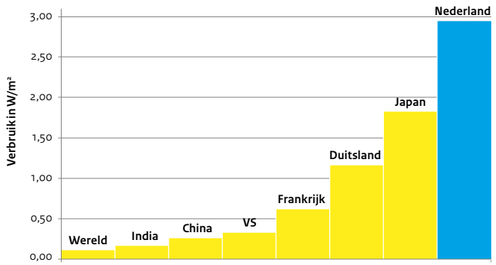
In Nederland is het lastig om de ruimte te vinden die nodig is voor de energietransitie. Als die ruimte toch wordt gevonden vervult Nederland een voorbeeldfunctie en kan zij daarvan bovendien de economische vruchten plukken.

Omdat dit een Nederlands boek is richten we ons op Nederland. En waarom ook niet? We zijn een rijk land met goed ontwikkelde instituties op elk terrein, met veel kennis van duurzame energie en met veel draagvlak onder de bevolking. Maar het is goed om te beseffen dat de Nederlandse energietransitie extreem lastig is. De winning van duurzame energie vraagt oppervlak. Veel meer oppervlak dan voor het winnen van fossiele grondstoffen nodig is. Dat betekent dat wij Nederlanders een uitdaging van formaat hebben; ons energieverbruik is groot in verhouding tot ons oppervlak. Afgezien van enkele stadsstaatjes gebruikt geen enkel land ter wereld zoveel energie per vierkante meter als Nederland.[4] De prangende vraag is dus: waar halen we de ruimte vandaan?

Verder hebben we geen overvloedige waterkracht zoals Noorwegen, geothermiek zoals IJsland of brandende zon zoals Spanje. Integendeel: Nederland is door het grootste bedrijf ter wereld (Shell) en de enorme gasbel onder Slochteren met handen en voeten gebonden aan de fossiele energie.

Maar als we in Nederland bewijzen dat het kan, als we er tegen de stroom in zwemmend in slagen om duurzame energie hier tot een succes te maken, dan kan Nederland moreel en economisch gezien een voortrekkersrol vervullen.

Nederland gebruikt in verhouding tot zijn oppervlakte veel energie
Primair energieverbuik op basis van BP statistisch jaarboek 2010



Nergens is de transitie zo lastig als in het wegtransport

Het biedt wel voordelen voor volksgezondheid, klimaat en wereldvrede.

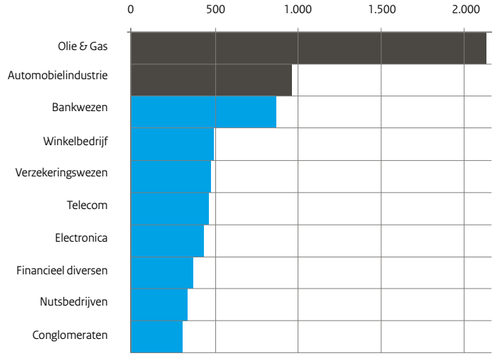
Bijna al onze vervoermiddelen zijn afhankelijk van olie. Dat komt omdat vervoermiddelen onderweg energie moeten kunnen nemen en vloeibare brandstof is daarvoor ideaal. Meer dan de helft van de olie die we jaarlijks omhoog pompen wordt dan ook verbrand in de motoren van het wegvervoer. Dat terwijl olie onze duurste fossiele brandstof is.

Het kost oliebedrijven steeds meer moeite om aan de snel stijgende vraag naar olie te voldoen. Veel analisten verwachten dat dit niet alleen tot hogere olieprijzen maar ook tot meer gewapende conflicten om olie zal leiden.[5] Het ironische is dat die gewapende conflicten op hun beurt weer extra olie verbruiken.[6]

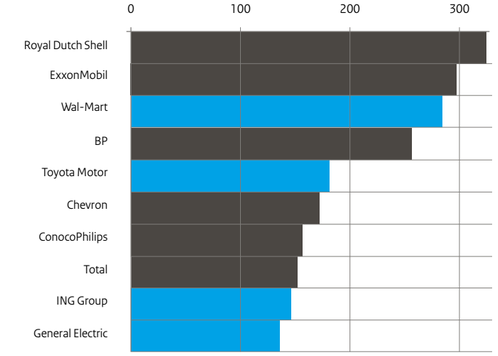
Er zijn ook andere redenen om het wegtransport te verduurzamen. Zo gaan er in Nederland jaarlijks 180.000 gezonde levensjaren verloren door fijnstof uit de uitlaat.[7] Verder zorgt wegverkeer voor 20% van alle menselijke CO_2 uitstoot. Alleen de uitstoot door kolencentrales (25%) en het verbranden van oerwoud (20%) zijn qua omvang vergelijkbaar.

Politiek en economisch is de energietransitie van het wegtransport lastig omdat er grote financiële belangen gemoeid zijn met het gebruik van olie. Als we kijken naar de 100 grootste bedrijven dan zijn de olie-industrie en de auto-industrie momenteel de grootste bedrijfstakken ter wereld met samen een omzet van rond de 4.500 miljard dollar per jaar. In de figuur zijn de sectoren en bedrijven die van olie afhankelijk zijn in zwart weergegeven.

De tien grootste sectoren van 2009
naar omzet in miljarden euro's
(op basis van de Forbes top 100 van 2009)

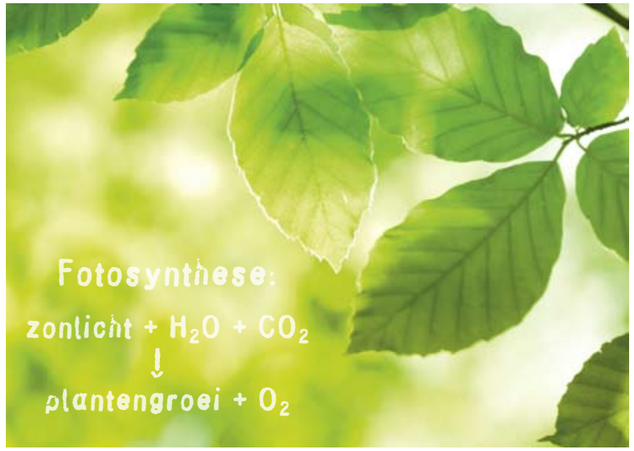


De tien grootste bedrijven van 2009
naar omzet in miljarden euro's
(op basis van de Forbes top 100 van 2009)



2 Biobrandstoffen

We zijn op zoek naar een alternatief voor benzine, diesel en LPG zodat we de energie voor het wegvervoer duurzaam kunnen opwekken. Een compatibele brandstof ligt dan voor de hand. Biobrandstof is daarom de eerste etappe van onze zoektocht. Helaas blijkt er een oppervlak groter dan Nederland nodig te zijn willen we voldoende biobrandstof kunnen verbouwen voor al ons wegvervoer. Verder worden biobrandstoffen beperkt doordat zoet water en vruchtbare grond schaars zijn: er is concurrentie tussen energie, voedsel en natuur.



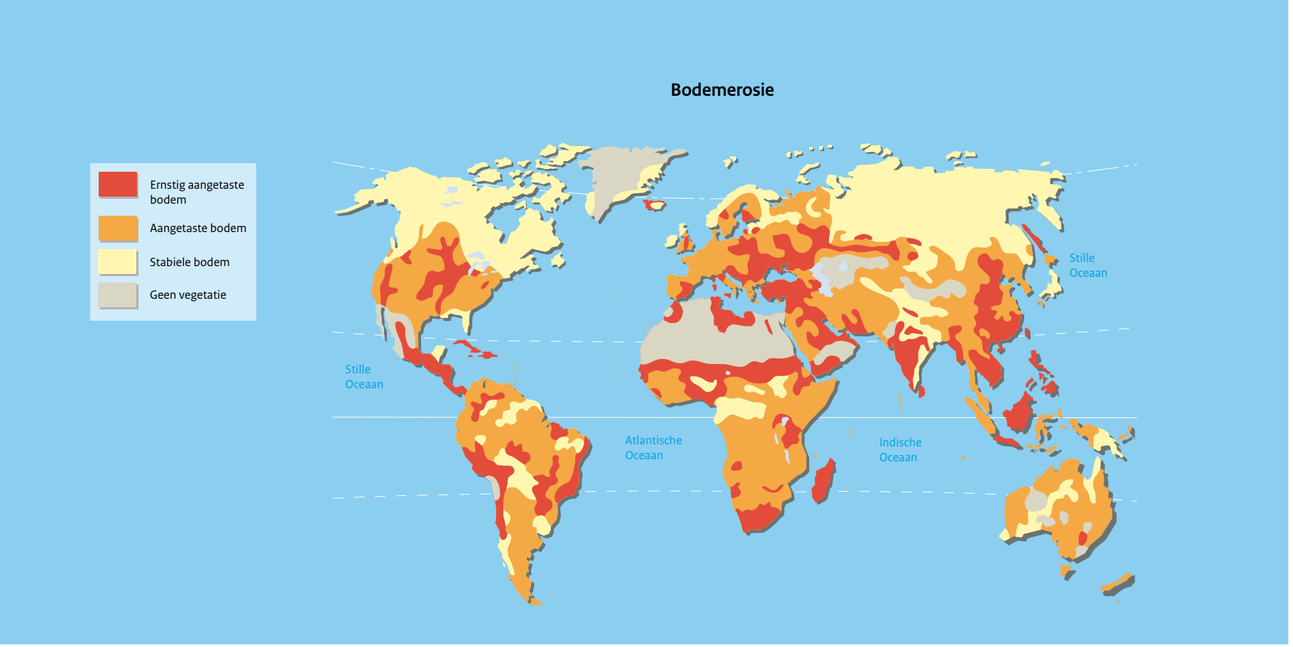
Brandstof versus voedsel

Biobrandstof ontstaat net als fossiele brandstof door fotosynthese. Onze voedselvoorziening en onze natuur zijn van hetzelfde proces afhankelijk. Het op grote schaal toepassen van biobrandstof staat daardoor op gespannen voet met het zeker stellen van andere eerste levensbehoeften.

Fossiele brandstof is niets anders dan 'ingedikte' biomassa uit het verleden. Fossiele brandstof en biobrandstof ontstaan allebei door fotosynthese. Fotosynthese is het proces waarmee de energie in zonlicht samen met water (H_2O) en kooldioxide (CO_2) wordt omgezet in plantengroei en zuurstof (O_2). Daarmee zorgen planten dat we kunnen ademhalen en eten. Gemiddeld eten we per persoon het equivalent van 1 kilo graan per dag. Uitgedrukt in vermogen is dat 165 watt.[8]

Een leefbare atmosfeer door fotosynthese

Fotosynthese zorgt niet alleen voor plantengroei maar heeft ook onze atmosfeer leefbaar gemaakt. Ooit bestond die atmosfeer voor meer dan 95% uit CO_2, net als de atmosfeer van onze zusterplaneten Venus en Mars. De luchtdruk was tientallen malen hoger, de gemiddelde temperatuur lag boven de 200 °C en er zat nauwelijks zuurstof in de atmosfeer. Bacteriën, algen en uiteindelijk planten zorgden ervoor dat de CO_2 grotendeels uit de atmosfeer verdween en werd opgeslagen in rotsen en biomassa. Daardoor nam de luchtdruk af en werd de aarde minder een broeikas. Ook produceerden bacteriën, algen en planten de zuurstof in de atmosfeer die ervoor zorgt dat we kunnen ademhalen. Zonder fotosynthese zou ons oppervlak er misschien net zo uit hebben gezien als deze artist impression van het oppervlak van Venus.



Enkele honderdduizenden jaren geleden ontdekte de mens dat biomassa die ontstaat door fotosynthese niet alleen gebruikt kan worden als voedsel maar ook als brandstof: men ging hout verbranden en daarmee was het concept biobrandstof geboren. In eerste instantie werd biobrandstof alleen gebruikt om eten mee te koken en koude winternachten draaglijk mee te maken. Vanaf circa 5.000 jaar geleden werd biomassa ook steeds vaker gebruikt om metaal mee te smelten. Al snel werd veel meer energie gebruikt in de vorm van biobrandstof dan als voedsel. In 1850 was het verbruik van biomassa opgelopen tot 2.300 watt per persoon. Dat stond gelijk aan 14 kilo hout per persoon per dag[9] en de bossen werden dan ook in een hoger tempo gekapt dan ze terug konden groeien.

Verschillende beschavingen kwamen ten val doordat teveel bos werd gekapt. Onze mondiale beschaving ontsnapte aan dat lot door over te stappen op fossiele brandstof. Intussen is het gebruik van fossiele brandstoffen in Nederland opgelopen tot 7.500 watt per persoon. Dat is bijna 50 keer zoveel als de hoeveelheid energie die we in de vorm van voedsel consumeren! Alleen al ons wegverkeer 'eet' gemiddeld vijf keer zoveel energie als wij zelf.

Nu fossiele brandstof op raakt, richt de aandacht zich weer op biobrandstof. Gezien de lange ervaring die de mens met biobrandstof heeft is dat logisch. Maar in 1850 was er al een tekort aan biomassa en sindsdien is de behoefte aan energie alleen maar verder gestegen. De kern van het probleem is dat natuur, voedselproductie en biobrandstof concurreren om een beperkte hoeveelheid zoet water en vruchtbare grond. Landbouw gebruikt wereldwijd circa 70% van het zoet water en op veel plaatsen zorgt toenemende waterschaarste nu al voor politieke spanningen, uitputting van ondergrondse waterreservoirs, verzilting en woestijnvorming. De waterschaarste wordt door globale opwarming verder verergerd.

Door die waterschaarste en verzilting maar ook door uitputting van de grond zelf neemt van veel landbouwgrond de vruchtbaarheid af.[10] Het resultaat is dat we moeite hebben om voldoende voedsel te produceren terwijl de vraag naar voedsel blijft toenemen. Dat komt doordat de bevolking tussen 2010 en 2050 met ongeveer 50% zal stijgen.[11] Ook de toenemende behoefte aan vlees die gepaard gaat met toenemende welvaart speelt een rol. Voor een kilo rundvlees is bijvoorbeeld 32 kilo graan nodig.[12] Door de toenemende schaarste aan water en voedsel begint zich een consensus af te tekenen: biobrandstof is alleen verantwoord wanneer de concurrentie met voedsel kan worden uitgesloten.[13]

Benodigde doorbraken

Er zijn technologische, politieke, agrarische en economische doorbraken nodig om van biobrandstof een aantrekkelijk alternatief voor fossiele brandstof te maken.

Eerste generatie biobrandstof
Eerste generatie biobrandstof is brandstof die wordt gewonnen uit bestaande voedselgewassen. Het gaat vooral om ethanol uit mais en suikerriet en om biodiesel uit koolzaad en palmolie. Biobrandstof wordt gesubsidieerd om minder afhankelijk te zijn van olie uit het Midden Oosten en om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren. De reductie in broeikasgassen wordt veroorzaakt doordat de plant tijdens zijn groei evenveel CO_2 opneemt als dat er bij de verbranding van de brandstof vrijkomt. Helaas weten we intussen dat eerste generatie biobrandstof de uitstoot van broeikasgassen nauwelijks reduceert en in veel gevallen zelfs vergroot.[14]

Dat komt onder meer omdat er rekening gehouden moet worden met de energie die nodig is voor landbouw, raffinage en transport. Ook blijkt de wereldwijde behoefte aan landbouwgrond dermate groot dat biobrandstofplantages indirect leiden tot de vernietiging van natuur. Vooral het kappen of platbranden van regenwoud levert een grote CO_2 schuld op.[15] Ten slotte zorgt het gebruik van kunstmest voor de uitstoot van nitraatoxide, een krachtig broeikasgas. De hoeveelheid nitraatoxide die vrijkomt bij het bemesten van koolzaad en mais blijkt op zichzelf al voldoende om elke eventuele reductie in kooldioxide van biodiesel teniet te doen.[16]

Daarnaast wijst een reeks van organisaties – waaronder Unesco, de Wereldbank en het IMF – er op dat biobrandstof leidt tot hogere en sterk fluctuerende voedselprijzen. Dat leidt weer tot voedselrellen, armoede en honger(doden).[17] Zoellick, president van de Wereldbank spreekt over 'zeven verloren jaren' in de strijd tegen armoede. "Als de Europese Unie vasthoudt aan de huidige wetgeving aangaande biobrandstof dan zullen honderd miljoen mensen meer honger lijden," stellen Niza en ActionAid.[18] Hoogwaardigheidsbekleders als Jean Ziegler van de Verenigde Naties spreken van een 'misdaad tegen de menselijkheid'. Tegelijkertijd is de politieke realiteit dat in 2010 een toename van 14% eerste generatie biobrandstof wordt gesubsidieerd.[19]

Biobrandstof nu

In 2009 werd circa 74 miljard liter bio-ethanol en 15 miljard liter biodiesel geproduceerd. De ethanol werd voor ruim de helft geproduceerd in de Verenigde Staten (voornamelijk uit mais) en voor een derde in Brazilië (voornamelijk uit suikerriet). Biodiesel is meer een Europese aangelegenheid met een voortrekkersrol voor Duitsland en Frankrijk (die het onder meer produceren uit koolzaad) en een toenemende import uit landen als Maleisië en Indonesië (die het onder meer produceren uit palmolie). In totaal ging het om 0,07 TW ofwel 0,4% van onze totale energiebehoefte.

Eerste generatie biobrandstof wordt voor een belangrijk deel gewonnen uit mais.

Tweede generatie biobrandstof
Inmiddels is in wetenschappelijke kring de hoop gericht op biobrandstof van de tweede generatie die de tekortkomingen van de eerste generatie op moet lossen. In eerste instantie gaat het hierbij om oneetbare (delen van) gewassen waarvan de cellulose via nieuwe innovatieve processen in ethanol kan worden omgezet. Ook ligt de nadruk op genetisch gemodificeerde gewassen die goed gedijen op arme grond die nu braak ligt of gebruikt wordt om vee op te laten grazen. De technologie moet over 10 tot 30 jaar op industriële schaal toegepast kunnen worden.[20]

Met technologie alleen komen we er niet. Om de concurrentie met voedsel en natuur te voorkomen moeten technologische doorbraken gecombineerd worden met politieke, agrarische en economische doorbraken. Samen bepalen ze de potentie van biobrandstof.[21]

Politieke doorbraken op het vlak van natuurbescherming zijn nodig om boskap en – vaak moedwillige – bosbrand te voorkomen. Zo zijn bosbranden in landen als Indonesië verantwoordelijk voor bijna 20% van de wereldwijde door mensen veroorzaakte uitstoot van broeikasgassen. (Dat is bijna tweemaal zoveel als de uitstoot door het wereldwijde wegverkeer.)[22] Anderzijds wijst onderzoek onder de inheemse bevolking uit dat deze vaak al kennis en tradities heeft die natuurbehoud op hoog niveau mogelijk maken.[23] Door die tradities met geld te ondersteunen kan tegen lage kosten en zonder hulp op te dringen de uitstoot van kooldioxide effectief worden gereduceerd terwijl tegelijkertijd de biodiversiteit gehandhaafd blijft. We zijn echter nog ver verwijderd van een situatie waarin de naleving van dergelijk beleid door de lokale autoriteiten kan worden gegarandeerd.[24]

Agrarische doorbraken zijn nodig om de productiviteit van landbouwgrond te verhogen. In theorie kan de productie per hectare zover omhoog dat het grootste deel van de landbouwgrond vrij kan komen voor de productie van biobrandstof.[25] De vraag is waarom dat nu nog niet gebeurt. Misschien is het omdat landen met het grootste potentieel voor verbetering tevens de landen zijn met de slechtste infrastructuur en de zwakste overheden. Het bestaan van goede agrarische technologie lost in dat geval de problemen niet automatisch op.

In deze kas wordt olie gekweekt met behulp van algen.

Economische doorbraken zijn nodig om te zorgen dat biobrandstof niet leidt tot hongerslachtoffers. Biobrandstof is een goede inkomstenbron voor boeren in ontwikkelingslanden en het verbetert de economische situatie van het land als geheel. Anderzijds schept het een vraag vanuit het buitenland die de binnenlandse prijzen opdrijft. Juist in ontwikkelingslanden is er sprake van een arme onderklasse die hierdoor in de problemen komt.

Al met al hebben pleitbezorgers van biobrandstof een punt als ze zeggen dat de problemen technisch zijn op te lossen. En ook is het mogelijk om natuurbehoud, intensieve landbouw en een rechtvaardige verdeling van voedsel los te zien van biobrandstof. Maar tegenstanders hebben een punt als ze zeggen dat je deze zaken niet los van elkaar moet zien omdat de technische mogelijkheden vooralsnog stuklopen op de politieke realiteit van een wereld waarin armoede, corruptie en falende overheden de invoering van biobrandstof contraproductief maken.

Derde generatie biobrandstof
Deze generatie biobrandstof bevindt zich nog in het beginstadium. Het idee is om algen te kweken in plaats van planten. Er zijn bijvoorbeeld plannen, ondermeer van het Nederlandse bedrijf Tendris, om het warme afvalwater en de CO_2 van elektriciteitscentrales te gebruiken om de algen versneld te laten groeien. De potentie van deze technologie is groot maar het is nog te vroeg om een inschatting van de efficiëntie en de kosten te kunnen maken.

Biomassa als grondstof
Steeds vaker wordt plantaardig materiaal gebruikt als grondstof in plaats van brandstof. Zo wordt er hoger in de waardeketen ingestoken. Staatsbosbeheer laat van gemaaid gras bijvoorbeeld graskartonnen dozen maken. Zij is ook in overleg met vertegenwoordigers van grote chemiebedrijven om de grondstof voor bioplastics te leveren. Struikelblok is vaak niet zozeer om de ‘business case’ rond te krijgen. Het probleem is meer dat partijen die tot voor kort niets met elkaar te maken hadden tot langjarige afspraken moeten komen met betrekking tot zaken die tot voor kort ver van hun ‘core business’ af stonden.[26]

Biobrandstof in watt per vierkante meter

Biobrandstof vraagt teveel oppervlak om er al het wegvervoer in Nederland op te laten rijden.

Zoals we gezien hebben concurreert biomassa met voedsel en natuur om hetzelfde schaarse goed: vruchtbare grond. Hoeveel grond zouden we in Nederland nodig hebben om de biomassa voor ons autoverkeer op te verbouwen?

Om dat te kunnen bepalen moeten we kijken naar de opbrengst per oppervlakte. In dit boek doen we dat in watt per vierkante meter, afgekort W/m². De vraag is: hoe groot is de opbrengst in W/m² van biobrandstof in Nederland?

De huidige productie van biobrandstof in gematigde streken zoals Nederland en Duitsland gebeurt nu vaak in de vorm van biodiesel uit koolzaad. Dit produceert netto (rekening houdend met de energie die nodig is voor landbouw en raffinage) circa 0,07 W/m².
De meeste productie komt momenteel uit de Verenigde Staten waar ethanol uit mais wordt gewonnen. Netto levert dit echter geen energie op.[27] Suikerriet in het zonnige Brazilië presteert het beste met netto 0,4 W/m². Professor Reijnders (biobrandstof deskundige van de Universiteit van Amsterdam) kijkt echter breder en schat de netto opbrengst van suikerriet op slechts 0,16 W/m². Net als nieuwe studies die erop wijzen dat kunstmest de CO_2 reductie grotendeels teniet doet, lijkt het er op dat de netto energieopbrengst van biobrandstof lager wordt als er meer aspecten worden meegenomen.

De verwachting is dat de opbrengst per vierkante meter in de toekomst sterk kan stijgen. De meest optimistische investeerders gaan er van uit dat er over 25 jaar 3 W/m² geoogst kan worden met optimaal verbouwde genetisch gemodificeerde gewassen in zonnige streken.[28] Dat nemen we als bovengrens van de theoretisch voorstelbare productie. Aangezien die zonnige streken ongeveer driemaal zoveel energie ontvangen als Nederland lijkt een (bruto) opbrengst van 1 W/m² voor Nederland de theoretische grens.

In het vorige hoofdstuk becijferden we dat de energiebehoefte voor wegvervoer 1.000 watt per Nederlander bedraagt. We hebben per persoon 2.000 vierkante meter landoppervlak beschikbaar. Dat betekent dat met de theoretische techniek van 2035 (die 1 W/m² oplevert) de helft van Nederland nodig is om de voor het wegvervoer vereiste biobrandstof te produceren. Met de techniek van nu (die 0,07 W/m² oplevert) is circa 7 keer het oppervlak van Nederland vereist. En dat oppervlak voorziet dan nog niet in de 6.500 watt per persoon die voor andere doeleinden dan vervoer nodig is.

De conclusie is duidelijk: Nederland kan de energie voor wegvervoer nooit alleen met in Nederland verbouwde biobrandstof opwekken. In het volgende hoofdstuk kijken we daarom naar alternatieven.

Suikerrietplantages nemen in Brazilië de plaats in van tropisch oerwoud.

3 Elektrisch rijden

Conventionele (bio)brandstof voor in een brandstofmotor bleek geen oplossing. Eigenlijk is er op dit moment maar één alternatief voor de brandstofmotor en dat is de elektromotor. De elektromotor gaat bovendien efficiënter met energie om en de benodigde elektriciteit is in theorie overvloedig voorhanden. De vraag is hoe de energie tijdens de reis beschikbaar wordt gesteld: kiezen we bijvoorbeeld voor waterstof, voor batterijen of voor inductie?

Elektrisch rijden op water(stof)

Waterstof is een alternatief voor fossiele brandstof en biobrandstof. Deze brandstof kan worden gemaakt met duurzame elektriciteit. De tussenstap – van elektriciteit naar waterstof en weer terug naar elektriciteit – kost echter extra energie en de technologie staat nog in de kinderschoenen.

In 2003 schreef Jeremy Rifkin de bestseller 'De Waterstof Economie' waarin hij opperde dat waterstof fossiele brandstof zou kunnen vervangen als energiedrager. Het interessante aan waterstof is dat het een brandstof is die met behulp van elektriciteit kan worden gemaakt door water te splitsen in waterstof en zuurstof. Vervolgens kan het olie of biobrandstof vervangen. Een tweede voordeel van waterstof is dat er in de auto gebruik wordt gemaakt van schone en stille brandstofcellen die alleen waterdamp uitstoten.

Om die reden mocht waterstof zich de afgelopen jaren in een brede belangstelling verheugen. De Amerikaanse regering en de autofabrikanten investeerden miljarden euro's in het ontwikkelen van de technologie en er werd een groot aantal kleine pilots uitgevoerd. Arnold Schwartzenegger rijdt bijvoorbeeld in een Hummer op waterstof en in Amsterdam rijden er bussen en varen er rondvaartboten op waterstof.

Er zitten ook haken en ogen aan de invoering van waterstof.
De eerste stap in het proces is het produceren van waterstof. Dit gebeurt nu meestal uit aardgas maar het kan in het laboratorium ook op andere manieren worden gemaakt. Bijvoorbeeld door het splitsen van water met behulp van elektriciteit. Dit is op dit moment kostbaar omdat er elektrodes gebruikt worden die het edelmetaal platina bevatten en in deze stap gaat circa 30% van de energie verloren. In de toekomst komen er wellicht goedkopere en efficiëntere elektrodes. Verder wordt het in de toekomst wellicht economisch haalbaar om waterstof te produceren met behulp van warmte (bijvoorbeeld uit kernenergie) of met een direct gebruik van zonnestraling (fotokatalytisch).[29]

De tweede stap is de distributie van waterstof. Dit kan net als bij LPG middels tankwagens maar die kunnen per rit weinig waterstof meenemen. Een kansrijker initiatief is de aanleg van pijpleidingen naar tankstations maar dit vereist de aanleg van een nieuwe infrastructuur. De kosten voor Nederland worden door TNO geraamd op honderden miljarden euro's.[30] Verder moet de waterstof worden samengeperst zodat het in de auto onder druk kan worden opgeslagen. Bij het samenpersen en distribueren van waterstof gaat circa 30% van de energie verloren.[31]

De derde stap is de opslag van waterstof in tanks aan boord van de auto. Dit is nu al goed mogelijk al is de tank die meegenomen moet worden nog relatief omvangrijk. De tank kan kleiner worden gemaakt als het gas onder hogere druk wordt opgeslagen maar dit vraagt betere materialen en kost meer energie. In de toekomst wordt er wellicht gebruik gemaakt van materialen die de waterstof als een spons op kunnen zuigen maar ook die technologie staat in de kinderschoenen.

De vierde stap is het omzetten van waterstof in elektriciteit. De prijs van de brandstofcellen die hiervoor nodig zijn neemt snel af maar op dit moment kosten de cellen nog zeker tienduizenden euro's per auto.[32] Bij deze omzetting in de brandstofcel gaat circa 50% van de energie verloren.

Al met al biedt waterstof ons een perspectief op een duurzame, schone en stille auto maar zijn er op vier gebieden doorbraken nodig: bij het splitsen van water, bij de distributie, bij de opslag en bij de omzetting naar elektriciteit. Dat bracht Steven Chu – de Nobelprijswinnende minister van energie die is aangesteld door de Amerikaanse president Obama – ertoe om in 2009 te zeggen: "De waterstofauto heeft vier wonderen nodig. Dat is een probleem. Zelfs om heilig verklaard te worden door de katholieke kerk heeft iemand maar drie wonderen nodig."[33]

De brandstof voorbij: rijden op batterijen

Bij de elektrische auto draait het om de batterij. Die begint langzaam volwassen te worden. Voordeel is dat de elektrische auto circa vier maal minder energie gebruikt dan een waterstof- of benzine auto. De energie die voor wegverkeer nodig is neemt hiermee af van 1.000 naar 250 watt per persoon.

Is er geen manier om een auto te maken die direct op elektriciteit rijdt zonder de tussenstap naar brandstof te maken? De uitdaging zit hem niet in de aandrijving. De elektromotor is in vrijwel alle opzichten superieur aan de verbrandingsmotor. Zo zet een elektromotor 90% van de energie om in beweging terwijl een verbrandingsmotor maar 25% van de energie omzet in beweging.[34] Een elektromotor is ook sterker, compacter, gemakkelijker door een computer aan te sturen en praktisch onderhoudsvrij. Vooral in steden is de afwezigheid van motorgeluid en uitlaatgassen een pré.

De uitdaging zit hem niet in de efficiency. Als de tussenstap via brandstof wordt overgeslagen kan een elektrische auto op dezelfde hoeveelheid zonnestralen ruim drie maal zover rijden als een auto op waterstof en bijna duizend maal zover als een auto op biodiesel (zie figuur op pagina 25).

De uitdaging zit hem ook niet in de prijs van de energie. Elektriciteit kost circa 3,3 cent per kilometer tegen 10 cent per kilometer voor benzine.[35]

De uitdaging zit hem puur in de batterij. De energie die bij andere auto's wordt meegenomen in de vorm van brandstof moet bij een elektromotor worden opgeslagen in een relatief zware en dure batterij. Een batterij waarmee 500 kilometer ver gereden kan worden – heel normaal voor een benzine auto – weegt al snel 1.000 kilo en kost meer dan een complete middenklasser. Bovendien duurt het veel langer om die batterij op te laden dan om te tanken. Toch brengen alle grote autobedrijven binnen enkele jaren elektrische auto's op de markt en zeggen veel van hen: 'de toekomst is elektrisch'.[36] Hoe zit dat?

Een belangrijke ontwikkeling is dat batterijen steeds meer energie per kilo kunnen opslaan. Daardoor kunnen ze steeds beter concurreren met brandstof. De ontwikkeling van lithiumbatterijen voor laptops en mobiele telefoons vertaalt zich nu in autobatterijen die ruim drie maal zoveel energie per kilo kunnen meenemen als een traditionele loodaccu. In het laboratorium liggen intussen batterijen die nog drie tot vijf maal zoveel energie per kilo kunnen meenemen. Grote partijen als IBM zijn bezig om met behulp van supercomputers lithiumlucht batterijen te ontwikkelen waarvan zij verwachten dat ze 10 keer meer energie per kilo kunnen meenemen dan de huidige lithium-ion batterijen. Een elektrische auto kan dan 500 kilometer ver rijden op een batterij van 50 kilo.[37] De kosten dalen de laatste jaren snel.[38]

Ook snelladen vergemakkelijkt de concurrentie met brandstof. Zo bestaan er combinaties van oplaadstations en batterijen die in vijf minuten genoeg op kunnen laden om een elektrische auto 200 kilometer ver te laten rijden. Een alternatief voor snelladen is het vervangen van lege batterijen door volle batterijen. Het bedrijf Better Place heeft laten zien dat zij deze operatie op een 'tankstation' binnen twee minuten kan uitvoeren.[39]

Maar is het eigenlijk wel nodig dat een elektrische auto 500 kilometer ver kan rijden op een batterij? Kunnen we met een relatief kleine, lichte en goedkope batterij ook al niet veel brandstof besparen? Dit is precies de insteek van de autofabrikanten. Zij verwachten in eerste instantie vooral plug-in hybrids te verkopen. Dit zijn auto's die elektrisch kunnen worden opgeladen maar die zo nodig ook kunnen overschakelen op benzine. Ze zijn naast een elektromotor en batterij ook voorzien van een benzinetank en een kleine benzinemotor genaamd een 'range extender'. In Nederland rijdt een auto gemiddeld 30 kilometer per dag. Volgens berekeningen van het kennisinstituut voor de mobiliteit zou een batterij waarmee 100 kilometer ver kan worden gereden dan gemiddeld 90% brandstof uitsparen.[40] Benzine tanken is dan nog slechts incidenteel nodig.

De plannen van de Nederlandse netbeheerders versterken de effectiviteit van batterijen. Zij hebben aangekondigd overal oplaadpunten bij parkeerplaatsen te willen plaatsen. Zo kan de auto zowel op het startpunt als op het eindpunt worden opgeladen. De effectieve actieradius van de batterij verdubbelt hierdoor. Zij schetsen een plaatje waarin autobezitters vrijwel nooit meer naar een tankstation hoeven te rijden.[41]

Opladen op de parkeerplek is ook noodzakelijk om het totaalconcept van een duurzaam 'smart grid' optimaal te laten werken. Dit 'smart grid' (slimme elektriciteitsnetwerk) houdt ondermeer in dat de auto en het elektriciteitsnetwerk elkaar kunnen aansturen. De batterij van de auto wordt een collectieve opslagbuffer die gebruikt kan worden voor het opvangen van onverwachte belastingen en die opgeladen kan worden op momenten dat de elektriciteit het overvloedigst (en het goedkoopst) is. Bij een dreigende overbelasting kan het opladen van de auto tijdelijk worden uitgesteld. Bij een stroomstoring kunnen autobatterijen dienen als noodstroom. En als het aandeel van zonne-energie en windenergie verder toeneemt kunnen de autobatterijen de fluctuaties in het netwerk helpen compenseren.

Al met al maakt de elektrische auto het niet alleen mogelijk om olie te vervangen door duurzame energie maar hij draagt actief bij aan de invoering van duurzame energie. De rol van de autobezitter verschuift van consument van olie naar mede-eigenaar van het smart grid.

Voor wegvervoer op brandstof is zoals we zagen 1.000 watt per Nederlander nodig. Elektrische auto's zijn ruim vier keer zo zuinig dus als al het wegvervoer elektrisch zou zijn dan was hiervoor circa 250 watt per Nederlander nodig.[42] In 'De uitdaging' gaven we aan dat we van wegvervoer een gesloten systeem willen maken. Dit betekent dat er binnen het systeem 250 watt per Nederlander geproduceerd moet worden in de vorm van elektriciteit.

Intermezzo

Hoeveel voertuigkilometers per vierkante meter zonneschijn?

Wegvervoer kan worden uitgedrukt in voertuigkilometers. De uitdaging voor de energieneutrale weg is om met zo weinig mogelijk oppervlak (uitgedrukt in vierkante meters) zoveel mogelijk voertuigkilometers mogelijk te maken.

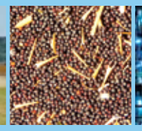
Een vierkante meter grond ontvangt in Nederland circa 100 watt zonne-energie. Dat staat gelijk aan 875 kWh per jaar. Een doorsnee auto heeft ongeveer 0,15 kWh per kilometer nodig om zaken als rolweerstand en luchtweerstand te overwinnen. In theorie kan een auto dus bijna 6.000 kilometer rijden met de zonne-energie die jaarlijks op een vierkante meter grond valt. Maar hoever komt een auto in de praktijk? En wat is het verschil tussen biodiesel, waterstof en elektriciteit?

Biobrandstof heeft het bij die vergelijking het moeilijkst omdat fotosynthese door koolzaad per vierkante meter slechts 4,9 kWh van de 875 kWh die de zon levert in plantengroei weet om te zetten.[43] Netto blijft daarvan bovendien maar 0,6 kWh over. Dat komt vooral omdat niet de hele plant gebruikt kan worden om brandstof van te maken. Bovendien is er energie nodig voor het zaaien, bemesten, oogsten, raffineren en distribueren en die wordt van de opbrengst afgetrokken. Ten slotte volgt een verbrandingsmotor die circa 25% efficiënt is. Uiteindelijk blijft er slechts 0,15 kWh over. Precies genoeg om 1 kilometer mee te rijden.

Waterstof wordt – als het geheel duurzaam wordt opgewekt – gemaakt van elektriciteit, bijvoorbeeld opgewekt door zonnecellen. Een veld vol met doorsnee zonnecellen die een efficiency van 15% hebben levert ongeveer 105 kWh per jaar op. Bij de productie van waterstof gaat daarvan de helft verloren. Bij de omzetting in de auto door de brandstofcel gaat nogmaals de helft verloren. Er blijft ongeveer 28 kWh over. Rekening houdend met alle overige verliezen brengt de elektromotor uiteindelijk 23 kWh op de wielen over. Dat is genoeg voor ruim 150 reiskilometers.

De directe omzetting naar elektriciteit, zonder de tussenstap naar brandstof, is het efficiëntst. Van de 105 kWh die de zonnepanelen per vierkante meter leveren blijft na transport en het opladen van de batterijen 90 kWh over. Rekening houdend met overige verliezen brengt de elektromotor 75 kWh naar de wielen over. Dat is genoeg voor 500 reiskilometers.

Een auto op biodiesel rijdt **1 kilometer** per jaar op 1 vierkante meter zonneschijn



Koolzaad levert **4,9 kWh** per m²

Na zaaien, bemesten, oogsten, raffineren en distribueren blijft daarvan **0,6 kWh** over

Brandstofmotor benut daarvan **0,15 kWh**

Een auto op waterstof rijdt **150 kilometer** per jaar op 1 vierkante meter zonneschijn

Zonnepaneel levert **105 kWh** per m²

Na electrolyse, compressie, distributie en gebruik brandstofcel blijft daarvan **28 kWh** over

Auto op waterstof benut daarvan **23 kWh**

Een auto op elektriciteit rijdt **500 kilometer** per jaar op 1 vierkante meter zonneschijn

Zonnepaneel levert **105 kWh** per m²

Na transport en opladen blijft daarvan **90 kWh** over

Auto op elektriciteit benut daarvan **75 kWh**

Deze tram krijgt zijn energie draadloos van onder de grond. Hij wordt binnenkort getest.

Draadloos opladen onderweg

Als de weg een elektrische auto onderweg op kan laden dan kan de batterij klein, licht en goedkoop blijven terwijl de auto eindeloos verder rijdt. Pilots zijn nodig om de veiligheid en betaalbaarheid van deze technologie te kunnen inschatten. In het buitenland is die stap al gezet.

De batterij en de manier waarop hij kan worden opgeladen is de bottleneck van de elektrische auto. Toch hebben we al sinds jaar en dag elektrisch vervoer wat dit probleem omzeilt. Denk aan de trein, tram, metro en trolleybus. Deze elektrische voertuigen hebben (net als speelgoed raceauto's) geen batterijen nodig omdat zij hun energie onder het rijden aftappen van elektriciteitsleidingen. Zulke elektriciteitsleidingen boven, naast of in de weg zijn voor auto's wellicht onpraktisch maar er is een alternatief: draadloos inductief opladen.[44]

Draadloos inductief opladen van stilstaande voertuigen wordt al tientallen jaren toegepast. Zo worden sommige stadsbussen in Triest en Turijn inductief opgeladen als ze stoppen bij een halte. Het inductief opladen van taxi's en bussen in Nederland kan maatschappelijk draagvlak voor inductief opladen creëren en zou de eerste stap kunnen zijn naar dynamisch inductief opladen.

Dynamisch inductief opladen wordt overigens al toegepast: in fabrieken rijden steeds vaker elektrische voertuigen die onder het rijden worden opgeladen vanuit de vloer. Expert inductief opladen de heer Reker van Vahle vertelde ons hoe er initieel scepsis was over de betrouwbaarheid en veiligheid maar dat die intussen is verdwenen.

Openbaar vervoer zal steeds vaker inductief worden opgeladen. Zo wordt heeft de firma Bombardier een prototype ontwikkeld en getest van een inductief opladende tram. Bombardier is 's werelds grootste producent van trams – de trams rijden onder meer in Rotterdam en Den Haag – dus dat zij zich aan inductie committeren is veelzeggend. Projectdirecteur Stefan Krispin schetste ons een toekomst waarin inductief ladende trams de standaard worden: "misschien niet over 10 jaar maar zeker over 20 jaar." Hij verwacht dat de aanschafkosten van een inductief systeem uiteindelijk niet hoger zullen zijn dan van een systeem met bovenleiding terwijl de onderhoudskosten veel lager zullen uitvallen. Momenteel leggen Bombardier en de gemeente Augsburg samen een proeftraject aan zodat het systeem in de praktijk getest en gecertificeerd kan worden. Siemens en Alstom (de andere tramproducenten in de top 3) werken eveneens aan een inductief oplaadbare tram en de gemeente Amsterdam heeft interesse getoond voor het concept.[45]

Opladen tijden het parkeren, in fabrieken en bij trams is dus goed mogelijk. Maar om de technologie toe te passen bij elektrische auto's moeten er nog enige horden worden genomen.

De luchtspleet tussen de elektriciteitsleiding in het wegdek en de ontvanger in de auto moet klein zijn. Als de luchtspleet minder dan een centimeter is – zoals bij de tram van Bombardier – is de efficiency meer dan 95%. Maar als de afstand 13 centimeter is – zoals bij een proefproject in Korea – neemt de efficiency af naar 74%. Misschien zal het rendement over een grote luchtspleet nog verder verbeteren maar in een gesprek met de heer Kümmel van het Duitse automotive ingenieursbureau IAV werd ons verteld dat een efficiency van 80% bij een luchtspleet van 15 centimeter wel eens het maximaal haalbare zou kunnen zijn. Het is dus zaak om de ontvanger onder de auto zo dicht mogelijk boven het wegdek te laten zweven.

Linksboven: De bussen in Turijn laden op terwijl de passagiers instappen. Zo raakt de batterij nooit leeg.

Linksonder: Met deze kleine wagens demonstreert het Zuid Koreaanse onderzoeksinstituut KAIST dat opladen tijdens het rijden ook voor auto's functioneert.

Rechts: Deze bus kan tijdens het rijden worden opgeladen, als er tenminste overgegaan wordt tot het aanleggen van inductiestroken in de weg.

De meeste menselijke bestuurders slingeren teveel om een goede efficiency bij de overdracht van energie te behalen. IAV oppert dat inductief opladen het beste gecombineerd kan worden met zogenaamde 'lane assist' functionaliteit. Deze technologie is te koop in duurdere automodellen en zorgt ervoor dat een auto de rijbaan computergestuurd blijft volgen zolang de chauffeur niet ingrijpt.

Voetgangers en chauffeurs mogen niet aan een overdosis elektromagnetische straling worden blootgesteld. De heer Kümmel geeft aan dat het product dat IAV ontwikkelt aan de strengste regels van de Europese Unie met betrekking tot de langdurige blootstelling aan elektromagnetische straling zal voldoen. Verder wordt het systeem uitgeschakeld als er geen auto overheen rijdt die opgeladen wordt en is de straling binnenin de auto verwaarloosbaar omdat de auto zelf voor afscherming zorgt.

Ondanks deze uitdagingen zien veel experts kansen voor opladen onder het rijden. Carsten Struve van Bombardier droomt er van. IAV heeft een werkend schaalmodel gebouwd en zoekt partners voor een proeftraject. En het Zuid-Koreaanse onderzoeksinstituut KAIST heeft een proefproject op ware grootte gebouwd en wil hierna busbanen van inductie gaan voorzien.

Inductief opladen wordt bij al deze plannen gecombineerd met batterijen. Minder druk bereden stukken kan de auto afleggen op de batterij en zodra hij weer op een druk bereden weg rijdt treft hij een oplaadstrook aan die de batterij weer oplaad. Slechts een klein deel van de weg hoeft zo van inductieve oplaadstroken te worden voorzien. Deze methode is bijvoorbeeld ideaal wanneer tegen lage kosten een systeem van trolleybussen moet worden geïntroduceerd.

Inductief opladen onderweg. Het is een droom die pas sinds kort relevant is want het heeft alleen zin bij de grootschalige introductie van elektrisch wegvervoer. Maar als die grootschalige introductie inderdaad plaatsvindt, dan zou inductief opladen weleens het ei van Columbus kunnen zijn.

Intermezzo

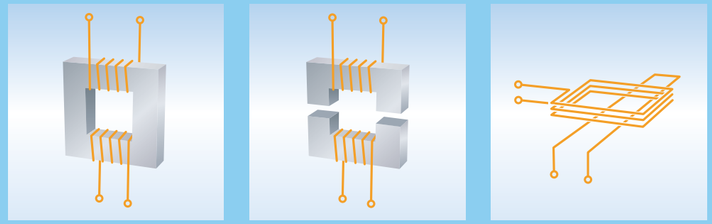
Hoe werkt dynamisch inductief opladen?

Twee stroomdraden in de weg wekken een elektromagnetisch veld op dat door een spoel onder de auto wordt opgepikt (zie illustraties). De huidige systemen gebruiken een frequentie van tussen de 20 en 100 kilohertz en het voltage ligt tussen de 400 en 750 volt. Om een auto onderweg op te laden is circa 30kW nodig. Daarvoor zijn flinke stromen nodig: bij 400 volt gaan die richting de 100 ampère.

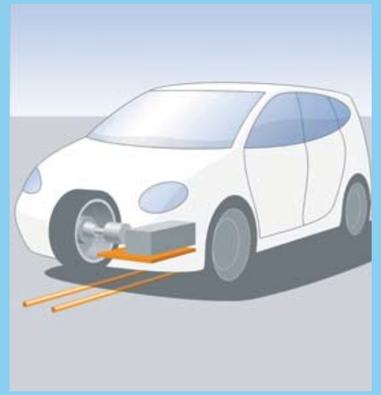
Het systeem is slim genoeg om alleen ingeschakeld te worden als er een auto overheen rijdt. Ook kan het bepalen welke auto er overheen rijdt zodat het stroomverbruik aan de juiste partij in rekening gebracht kan worden. De efficiency is afhankelijk van de afstand tussen de leidingen in het wegdek en de spoel onder de auto.

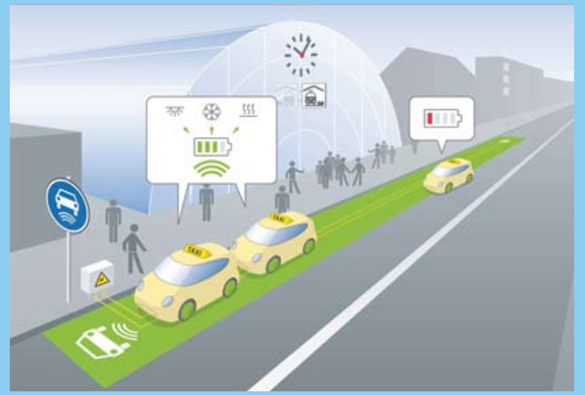
Een 3kW systeem dat gebruikt kan worden op parkeerplaatsen zal volgens een expert van de leverancier tussen de € 1.000,- en € 2.000,- gaan kosten. De helft daarvan zijn de kosten voor de apparatuur in het wegdek en de helft zijn de kosten voor de apparatuur in de auto. Deze kosten zijn echter exclusief assemblage in de auto en in de weg en uitgaande van massaproductie. Hij stelt zich voor dat een dergelijk systeem bijvoorbeeld ideaal zou zijn op taxistandplaatsen.

Over de kosten van een dynamisch systeem van 30kW is nog weinig bekend. Het is duidelijk dat de kosten hem vooral zullen zitten in de schakel elektronica en nauwelijks in de hoeveelheid grondstof zoals koper. Niet duidelijk is wat het systeem na opschaling zou kosten. Uiteraard dient dit uitgezocht te worden voordat de invoering van inductief opladen onderweg in overweging kan worden genomen.

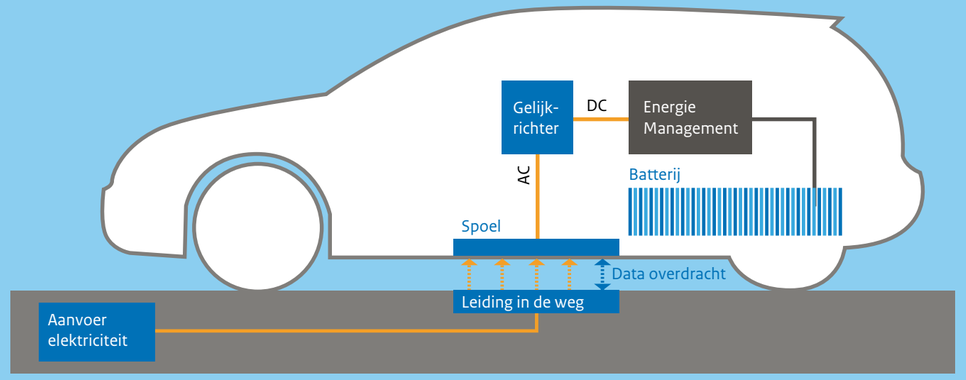


Inductief opladen werkt in principe hetzelfde als een transformator. Voor de lezer die dat principe al kent zijn de bovenstaande drie plaatjes wellicht instructief. Het eerste plaatje symboliseert een gewone transformator met een weekijzeren kern waarmee wisselstroom wordt overgedragen van een primaire winding (onder) naar een secundaire winding (boven).
In het tweede plaatje wordt de kern voorzien van een luchtspleet zonder dat hiermee de werking wordt aangetast.
In het derde plaatje wordt de secundaire winding vervangen door een spoel (die onder de auto wordt gemonteerd) terwijl de primaire winding uitgestrekt wordt tot een leiding in het wegdek.





Voor inductief opladen onderweg is het noodzakelijk dat er twee stroomdraden in de weg aangebracht worden alsmede een spoel onder de bodem van de auto. De draadloze overdracht werkt met behulp van elektromagnetische velden. De leidingen in de weg wekken een elektromagnetisch veld op met behulp van wisselstroom. Dat elektromagnetische veld wordt opgepikt door een spoel onder de auto die het weer omzet naar elektriciteit.



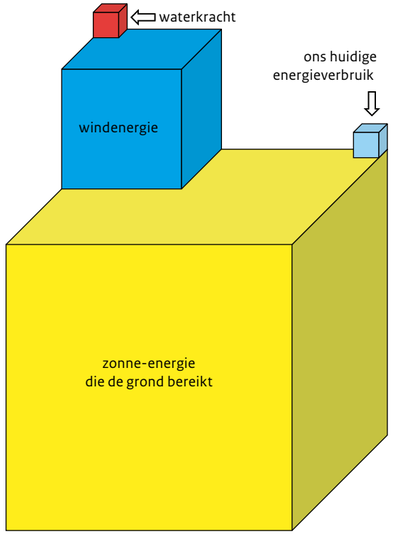
Duurzame elektriciteit in overvloed

Als we elektrisch gaan rijden, is er dan wel voldoende duurzame elektriciteit voorhanden? In potentie in ieder geval wel: de zon schenkt ons elk uur meer energie dan de mensheid in een jaar nodig heeft. Van die zonne-energie kan op vele manieren (bijvoorbeeld met windmolens en zonnecellen) elektriciteit worden gemaakt.

Zonnepanelen, zonnecollectoren en biobrandstoffen zetten de zonnestralen die de aarde raken direct om in energie. (Fossiele brandstoffen zijn biobrandstoffen uit het verleden.) Windmolens maken gebruik van luchtstromingen die ontstaan doordat zonnestralen het aardoppervlak opwarmen. Energie in golven ontstaat weer doordat de wind een deel van zijn energie afgeeft aan het water. Waterkrachtcentrales ten slotte worden aangedreven door een combinatie van zonnestralen waarmee water wordt verdampt, en windenergie waarmee waterdamp wordt verplaatst. Uiteindelijk valt de waterdamp als neerslag in bergen naar beneden waarna het langs de turbines van de waterkrachtcentrale omlaag kan stromen.

Alleen aardwarmte, getijdenkracht en kernenergie zijn niet van de zon afkomstig. Hun bijdrage beperkt zich echter tot minder dan 0,02% van de energie die als zonnestraal de aarde bereikt.

In het hoofdstuk over biobrandstof werd toegelicht dat grootschalige omzetting van zonlicht naar biobrandstof problematisch is omdat de efficiëntie van die omzetting laag is zodat er meer grond nodig is dan Nederland bezit. In dit hoofdstuk werd geschetst dat rijden op elektriciteit in plaats van brandstof ook een optie is. Dat is van belang omdat de opwekking van duurzame elektriciteit veel efficiënter is en dus veel minder oppervlak vraagt. In de volgende hoofdstukken kijken we wat er mogelijk is.



Deze figuur visualiseert hoeveel energie beschikbaar is uit verschillende bronnen. Het lichtblauwe blok stelt de 16 terawatt voor die de mensheid gebruikt, het gele blok de 175.000 terawatt zonne-energie die op land valt en het blauwe blok de 1.000 terawatt wind die potentieel beschikbaar is. Er hoeft dus maar een fractie van de beschikbare hoeveelheid zon en wind benut te worden. De totale hoeveelheid beschikbare waterkracht is enkele terawatts en daarvan is circa de helft al in gebruik.

De onvoorstelbaar grote energieproductie van de zon

De zon produceert gemiddeld 389 duizend miljard terawatt en 175 duizend terawatt daarvan bereikt de aarde. Misschien is het goed om die onvoorstelbare getallen in perspectief te plaatsen: hoewel maar 0,0000001% van de energie van de zon de aarde bereikt is dat jaarlijks nog steeds honderd maal zoveel als de totale bekende reserve aan olie, gas en kolen. Ongeveer 25 duizend terawatt komt door de atmosfeer heen op het vasteland terecht. Dat is circa 1.500 keer de 16 terawatt die de mensheid verbruikt.

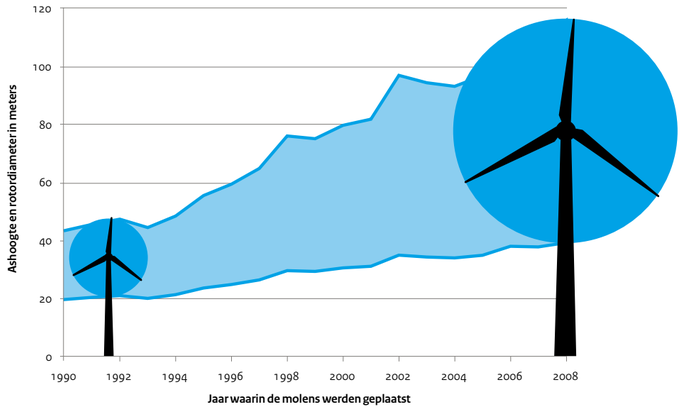
4 Weg op wind

Elektrisch rijden is een alternatief voor fossiele brandstof maar waar halen we de benodigde elektriciteit op een duurzame manier vandaan? Nederland is al eeuwen het land van de windenergie. Kunnen we daarmee ons wegvervoer van energie voorzien? Dat blijkt te kunnen: 0,1% van onze Noordzee of 0,4% van onze grond volstaat. Alleen zal de energie waarschijnlijk niet worden geproduceerd door kleine windmolens op het wegdek maar door vliegers hoog in de lucht en grote windmolens langs de kust en op zee.

Visualisatie van een scenario voor een energieneutraal datacenter dat wordt gevoed met kleine windmolens langs de weg.

Windmolens worden steeds groter

De ontwikkeling in Nederland op basis van de gegevens van het CBS



Kleine molens worden groot

Grote windmolens zijn goedkoper en leveren de energieneutrale weg meer energie.

Kleine windmolens op en om de weg: het is een vaak terugkerend idee. Artist impressions tonen ons een weg waarlangs kleine innovatieve windmolens zijn geïntegreerd in het landschap.

Maar in de praktijk worden windmolens juist groter. In 1990 was de gemiddelde nieuwe molen 0,2 megawatt met een diameter van 24 meter en een ashoogte van ongeveer 33 meter. In 2008 was dat toegenomen naar 2,3 megawatt met een diameter van 77 meter en een ashoogte van ongeveer 78 meter.[46] Waarom is dat?

De voordelen van grote windmolens worden goed geïllustreerd door een proef met 12 verschillende kleine windmolens – in diameter variërend tussen 1 en 5 meter – die in 2009 werd gedaan in Schoondijke (Zeeland). De prestaties van de windmolens werden vergeleken met elkaar, met een grote windmolen en met de door de fabrikant opgegeven specificaties.[47]

Wat allereerst opviel was dat de zes innovatieve designs (waarvan vier met verticale as) slecht presteerden. Hun stroom was vier keer zo duur als die van hun conventionele concurrenten. Dat lag zowel aan de hogere aanschafprijs als aan de lagere efficiency.

Ook de conventionele kleine molens leverden dure stroom: gemiddeld € 1,20 per kilowattuur. De goedkoopste windmolen uit de proef kostte € 0,35 per kWh, volgens het rapport twaalf maal duurder dan een grote windmolen.[48]

Vergeleken met de beste kleine windmolen uit de proef scoort een grote windmolen op drie gebieden beter:

1. De efficiency waarmee de energie uit de lucht gehaald wordt is 2 maal zo hoog.[49]
2. Het vermogen van de wind is 2,5 maal zo groot. Dit komt omdat de grote windmolen op een hogere toren staat. Hij kan daarom gebruik maken van de krachtiger wind die op grotere hoogte waait.[50]
3. De prijs per vierkante meter lucht die wordt bestreken is 2,5 maal zo laag. Dit komt door schaalgroottevoordelen bij de productie van grote machines.[51]

Al met al levert een vierkante meter lucht die door een grote windmolen wordt bestreken 5 maal zoveel energie tegen half zo hoge kosten.

Dit prijsverschil neemt bij plaatsing langs de weg verder toe en de energieopbrengst van grote molens is bovendien hoger per strekkende meter weg.

Grotere molens vangen betere wind. Op tien meter hoogte vangt een goede locatie langs de kust vijf maal zoveel wind als een locatie langs een weg in het binnenland. Dat betekent ruwweg vijf maal goedkopere stroom. Op honderd meter hoogte presteert de locatie langs de kust nog maar anderhalf maal zo goed. Daarmee blijft het prijsverschil tussen kust en binnenland bij een grote molen enigszins binnen de perken.[52]

Grotere windmolens benutten per strekkende meter weg meer oppervlak. Dat komt omdat ze niet alleen breder maar ook hoger zijn. Het aantal windmolens dat langs de weg past wordt bepaald door hun breedte. Maar het oppervlak dat ze benutten wordt bepaald door hun breedte maal hun hoogte. Een voorbeeld maakt dit wellicht inzichtelijk. Langs tien kilometer weg passen 540 kleine windmolens met een diameter van 3,7 meter. Samen hebben ze een oppervlak van zesduizend vierkante meter. Langs dezelfde weg passen 16 grote windmolens. De grote molens hebben samen een oppervlak van tweehonderdduizend vierkante meter: vierendertig maal zoveel.[53]

Als de effecten van betere windcondities, meer oppervlak en grotere efficiency met elkaar vermenigvuldigd worden blijken grote molens langs een weg in het binnenland in dit specifieke voorbeeld ruim 200 maal zoveel energie te leveren als kleine molens.[54]

Qua vogelsterfte (een vaak terugkerend discussiepunt) zijn grote windmolens in het voordeel omdat zij per molen nauwelijks meer vogelsterfte blijken te veroorzaken terwijl ze tientallen malen meer energie leveren. Een recente studie schat dat windmolens op dit moment 50 duizend vogelslachtoffers per jaar maken. Overigens zijn er ook andere industrietakken die vogelslachtoffers veroorzaken. Voor verkeer wordt het aantal bijvoorbeeld geschat op 2 miljoen per jaar.[55]

Dat wil niet zeggen dat kleine windmolens geen toekomst hebben. Integendeel. De prijs van kleine windmolens blijft dalen en kleine molens zijn een goed alternatief voor een aggregaat op locaties waar een aansluiting met het elektriciteitsnet ontbreekt. Denk bijvoorbeeld aan mobiele wegsignalering of aan afgelegen huizen. Op plekken met uitzonderlijk veel wind – bijvoorbeeld op een brug of langs de rand van het dak van een flat – kunnen ze steeds vaker concurreren met de elektriciteitsprijs die wordt betaald door eindgebruikers. Maar voor de grootschalige energievoorziening door energieproducenten – in het bijzonder langs de weg – zijn grote windmolens geschikter.

Intermezzo

Land van molens

Wind is na biomassa verreweg de belangrijkste bron van duurzame energie in Nederland. En hoewel Denemarken en Duitsland ons voorbij zijn gestreefd in het gebruik ervan wordt geen enkel land ter wereld zozeer geassocieerd met windmolens als Nederland.[56]

De opbrengst van windmolens is sinds de gouden eeuw sterk verbeterd. De beste traditionele windmolen – van het type dat in souvenirwinkels te koop is – had een efficiency van 2%. De beste moderne windmolens hebben een efficiency van 50%. Ze zijn dus 25 maal zo efficiënt. Bovendien kunnen moderne molens veel hogere windsnelheden de baas zodat zij op locaties met harde wind tot 120 maal meer vermogen kunnen leveren.[57]

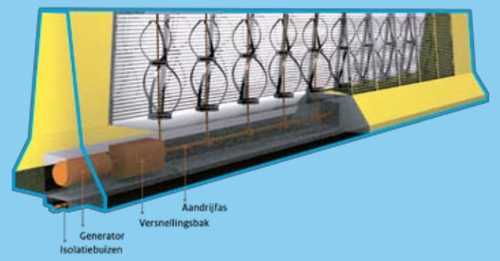
Windmolens in Wijk bij Duurstede anno 1670 zoals geschilderd door van Ruysdael.

Intermezzo

Windmolens die het verkeer afremmen

Iedereen die zich op de fiets tegen de wind in een weg baant leert respect op te brengen voor de kracht van de wind. Voor het wegverkeer is luchtweerstand een belangrijke bron van energieverbruik, vooral op de snelweg. De luchtweerstand neemt namelijk kwadratisch toe met de snelheid. Dat betekent dat een auto die drie keer zo hard rijdt (bijvoorbeeld 120 in plaats van 40) maar liefst 9 maal zoveel luchtweerstand moet overwinnen. Op de snelweg is het heel normaal dat 80% van de benzine opgaat aan het gevecht met de lucht.[58]

Windmolens vlak boven of naast de weg zouden volgens sommigen met die rijwind energie op kunnen wekken. Dit is echter niet verstandig. Als het concept al zou werken dan zou dit namelijk ook tot gevolg hebben dat de lucht waar het verkeer zich een weg doorheen baant minder eenvoudig aan de kant geduwd kan worden. De windmolen veroorzaakt dus een hoger benzineverbruik van de auto. Omdat er in de auto en de windmolen verliezen optreden kost de windmolen per saldo meer energie dan hij oplevert.



Tussen droom en daad

Elektrisch vervoer en windmolens maken samen duurzaam wegverkeer mogelijk maar de windmolens worden waarschijnlijk niet langs de weg geplaatst.

Grote molens hebben een fundering nodig met een doorsnee van 25 meter: dat is bijna de breedte van een snelweg. Zulke kolossen kunnen praktisch gesproken niet op de weg maar wel langs de weg worden geplaatst. Circa 6.000 grote windmolens langs de weg zouden voldoende energie leveren voor al het wegverkeer.[59] Er is weglengte genoeg. Zo is de 4.000 kilometer snelweg in Nederland ruim voldoende om 6.000 windmolens langs te plaatsen. Maar 'tussen droom en daad staan wetten in de weg en praktische bezwaren'.[60]

Voor de rentabiliteit van een windmolen is de hoeveelheid wind de belangrijkste variabele en de windcondities aan de kust of op zee zijn – zelfs op 100 meter hoogte – beter dan de condities in het binnenland. Het is dan ook de vraag of de windmolens langs de weg komen te staan of op locaties die uitgezocht zijn op hun hoge windopbrengst. Andere randvoorwaarden aan een locatie zijn dat er geen slagschaduwen of rukwinden op het wegdek optreden en dat er geen geluidsoverlast voor omwonenden optreedt. Ten slotte moet er voor alle plekken toestemming worden verkregen.

Gezien die randvoorwaarden is er een goede kans dat windmolens op locaties worden geplaatst waar windcondities optimaal en bewoning minimaal zijn. Een vaak genoemde optie is de Noordzee. De meerprijs van windmolens op zee neemt af naarmate de ervaring ermee toeneemt en de windcondities op de Noordzee zijn uitzonderlijk goed. De energie voor het wegvervoer kan komen uit 3.000 windmolens die samen een gebied van 35 kilometer in het vierkant nodig hebben. Dat is minder dan 0,1% van het deel van de Noordzee waar Nederland rechten op kan laten gelden.[61] Een voorwaarde voor windmolens op zee is wel dat er ook een zogenaamd 'stopcontact op zee' komt en dit is met de huidige stand van de techniek nog een kostbare aangelegenheid.[62]

Duurzaam wegverkeer wordt in dit scenario mogelijk gemaakt door de elektrificering van de weg in combinatie met de energie die wordt opgewekt door een windpark op de Noordzee. Voor het gesloten systeem waar in dit boek naar wordt gezocht zou het eleganter zijn als de opwekking dichterbij de weg kon plaatsvinden.

Dan liever de lucht in!

Op grote hoogte is geconcentreerde en goedkope windenergie beschikbaar, ook langs wegen in het binnenland.

De grafiek laat zien dat de windenergie vlak boven de grond in het niet valt bij de windenergie in hoger sferen. Wie het windvermogen meet op 10, 100, 1.000 en 10.000 meter ziet het vermogen toenemen van 100 naar 300, 800 en ten slotte 4.500 W/m².[63] Windmolens op de grond gebruiken dus maar een fractie van het beschikbare potentieel aan windenergie.

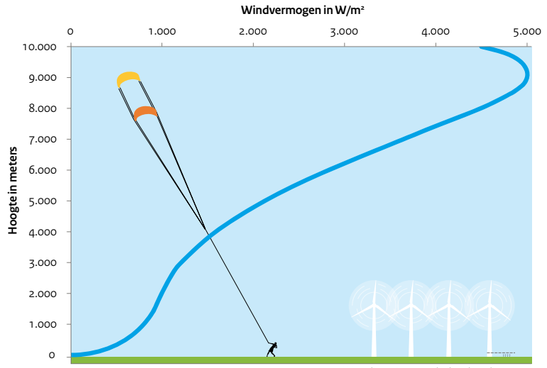
Om de wind op grotere hoogte te oogsten is een nieuwe generatie windenergie nodig: high altitude wind power. Dit levert vergeleken met traditionele windmolens constantere energie. Doordat de 'vliegers' zich op grote hoogte bevinden is de zichtbaarheid en hoorbaarheid op de grond beperkt. Het relatief geringe materiaalverbruik zorgt ervoor dat de prijs tussen de € 0,01 en € 0,04 komt te liggen. Dat is goedkoper dan traditionele windenergie en zelfs goedkoper dan kolen.[64]

De energieneutrale weg en high altitude wind power zijn goed te combineren. In plaats van 6.000 grote windmolens zoals beschreven in de vorige paragraaf zijn slechts 700 relatief compacte vliegers nodig.[65] En anders dan bij conventionele windmolens is de plaatsing in het binnenland niet duurder maar goedkoper.[66]

Er zouden bijvoorbeeld 7 parken van 100 vliegers kunnen worden aangelegd. Elk park beslaat circa 5 kilometer in het vierkant. Voor de 7 parken samen zou 0,5% van de landbouwgrond – eventueel landbouwgrond die nu voor biomassa gebruikt wordt – een dubbele bestemming moeten krijgen. De vliegerparken fungeren als de 'tankstations' van de elektrische weg. De energie die ze leveren wordt met korte – en dus goedkope – leidingen naar de weg getransporteerd. De weg zelf transporteert de energie verder naar oplaadpunten voor elektrische auto's of laadt de auto's direct inductief op via het wegdek.

Wil high altitude wind power in Nederland slagen dan is een belangrijke rol weggelegd voor het ministerie van Verkeer en Waterstaat. Zo moet haar Inspectie Verkeer en Waterstaat het luchtruim boven de vliegerparken reserveren, net zoals dat nu gebeurt voor luchthavens, militaire oefenterreinen, beveiligde locaties, reclamevluchten, weerballonnen en dergelijke. In de opstartfase moeten in samenspraak met Verkeer en Waterstaat tijdelijke proeflocaties gevonden worden. Alleen dan kan de high-altitude windindustrie zich in Nederland verder blijven ontwikkelen.

Op grotere hoogte levert wind (veel) meer vermogen



Ware hoogte van windmolens is 120 m.

Intermezzo

High altitude wind power: slimmer, lichter en goedkoper

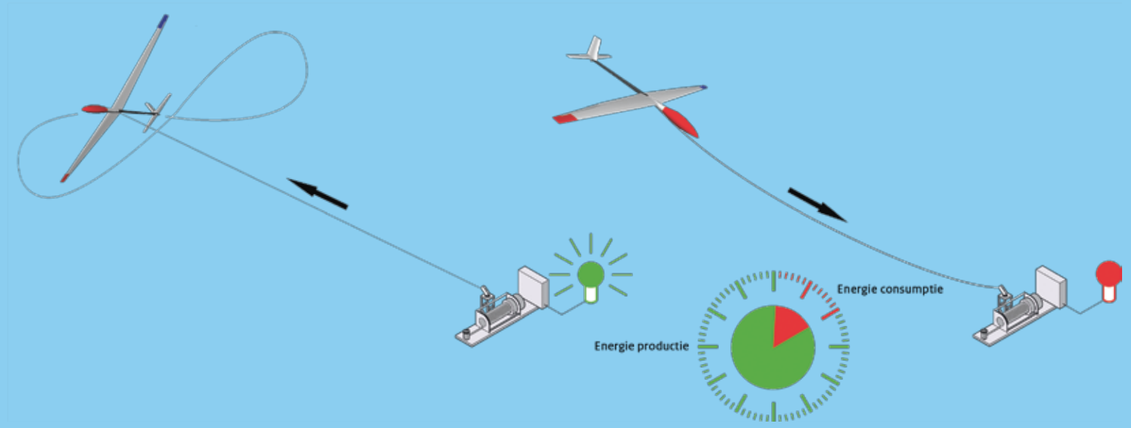
De essentie van high altitude wind power (ook wel airborne wind power genoemd) is simpel: duur materiaal wordt vervangen door goedkope intelligentie. De toren van de windmolen wordt vervangen door een touw. De wieken worden vervangen door een vlieger. De vlieger wordt aangestuurd door een automatische piloot. Een typisch systeem weegt minder dan 10% van wat een conventionele windmolen weegt.[67]

Het verschil tussen een windmolen en high altitude wind power is vergelijkbaar met het verschil tussen windsurfen en kitesurfen. Bij windsurfen zitten mast en zeil vast aan de surfplank, net zoals de wiek vastzit aan de windmolen. Bij kitesurfen en high altitude wind power worden mast en zeil vervangen door een vlieger aan een touw. Dat werkt niet alleen voor surfplanken maar ook voor grote vrachtschepen. De firma Skysails verkoopt bijvoorbeeld vliegers die het brandstofgebruik van vrachtschepen met 10 tot 50% reduceren.

De zogenaamde capaciteitsfactor is hoog: vliegers leveren gemiddeld 55 tot 60% van hun piekvermogen. (Een conventionele windmolen levert gemiddeld 15 tot 25% van zijn piekvermogen.) Doordat de energie op een relatief grote hoogte wordt opgewekt zijn zichtbaarheid en hoorbaarheid op de grond gering. Het belangrijkste probleem van high altitude wind power is wellicht de angst dat de vlieger neerstort op een manier waarbij gewonden vallen. De kans hierop is echter klein, onder meer omdat de vlieger vastzit aan een touw en veel lichter en trager is dan een vliegtuig.

Er worden ruwweg twee methoden onderzocht om met behulp van vliegers elektriciteit te maken.

De eerste methode werkt met propellers die aan de vlieger worden bevestigd. Deze propellers worden door de langsstromende wind aan het draaien gebracht en drijven generatoren aan. Door de hoge windsnelheid langs de vlieger kunnen de propellers vergeleken met de wieken van een windmolen klein zijn. De energie wordt met een elektriciteitsdraad naar de grond gestuurd. Deze methode wordt onder meer gebruikt door de firma's Makani (met geld van Google) en Joby Energy uit de Verenigde Staten en Sky WindPower uit Australië.



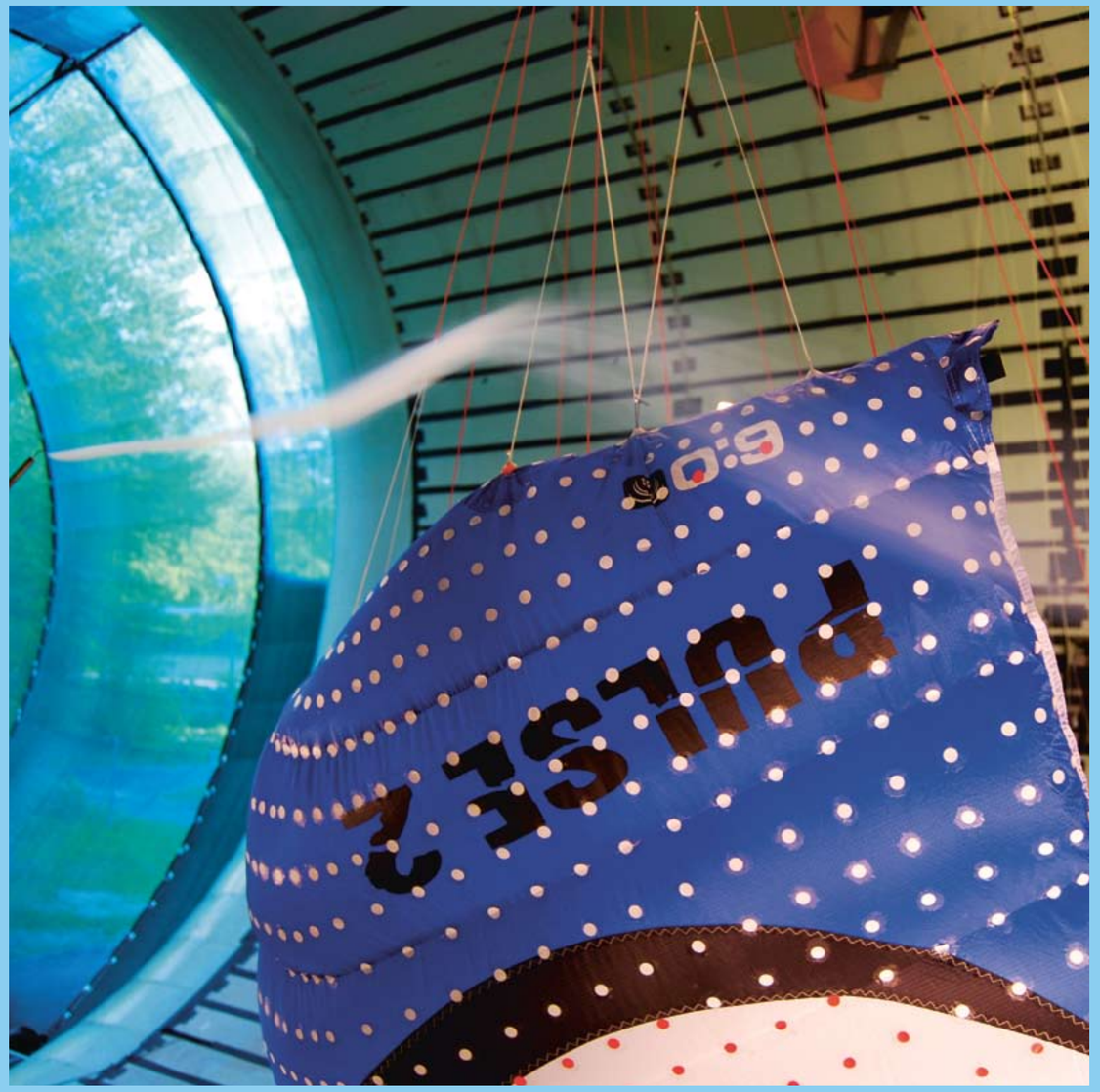
De tweede methode laat de vlieger een yo-yo beweging maken. De as van de yo-yo is een klos met touw die zich op de grond bevindt. Eerst stijgt de vlieger op. Daarbij wordt de klos afgerold en dit drijft een generator aan die elektriciteit opwekt. Als de klos is afgerold maakt de vlieger een duikvlucht en wordt de klos snel weer opgerold (zie illustratie). De hoogte ligt tussen circa 300 en 500 meter. De methode wordt in Italië gebruikt door Kitegen en in Nederland hebben de Kite Power group van de TU Delft en Ampyx Power uit Den Haag prototypes die van dit systeem gebruik maken.

Misschien is het logisch dat Nederland, internationaal bekend als het land van de windmolen, een prominente rol speelt bij het ontwikkelen van deze nieuwe generatie windenergie.

De firma Ampyx Power heeft een prototype van 10 kilowatt en een concept dat gebruik maakt van componenten die standaard op de markt verkrijgbaar zijn: een zweefvliegtuig, autopilot, kunststof kabel, lier en windturbine. Zij wil eind 2013 met een 1 megawatt systeem op de markt komen. Dit systeem gebruikt een zweefvliegtuig met een spanwijdte van 35 meter en levert evenveel energie als een windmolen met een toren van 100 meter en een diameter van 70 meter. Het Noorse energiebedrijf Statkraft heeft al geïnvesteerd met de motivatie dat Ampyx Power de potentie heeft om het eerste bedrijf ter wereld te worden dat onbeperkt duurzame energie op kan wekken die goedkoper is dan kolen.[68]

Ampyx Power is een spin-off van de Kite Power group van de Technische Universiteit Delft, een onderdeel van de vakgroep van ex-astronaut Wubbo Ockels. Zijn einddoel is de door hem bedachte laddermolen waarbij een grote lus met daaraan tientallen grote vliegers tot in de stratosfeer (op tien kilometer hoogte) reikt. Op dit moment onderzoekt de Kite Power Group onder meer hoe high altitude wind power gebruik kan maken van zachte vliegers van textiel. Zachte vliegers zijn goedkoop, licht en veilig maar er is onderzoek nodig om ze slijtvast en goed bestuurbaar te maken.

Ondanks alle potentie is er voor high altitude wind power slechts weinig budget. “Als ik het onderzoeksbudget van de windmolen-industrie had dan was high altitude wind power binnen enkele jaren toonaangevend”, stelt Roland Schmehl, hoofd van de Kite Power group, om dan te verzuchten: “maar dat budget heb ik natuurlijk niet.”



5 Warmbloedige weg

Kan warmtewinning uit wegdek ons misschien aan energie voor het wegvervoer helpen? Warmtewinning uit wegdek is een beproefde techniek waarmee Nederland internationaal voorop loopt. In combinatie met warmte-koude opslag en een warmtepomp is de techniek ideaal om gebouwen mee te verwarmen en te koelen. Het wegdek blijkt het systeem in balans te kunnen brengen. Voor de elektrische auto hebben we echter geen warmte nodig maar elektriciteit. De omzetting van warmte uit wegdek naar elektriciteit blijkt lastig: daarbij gaat ruim 95% van de energie verloren.

Balans versus brandstof

Door in de zomer overtollige warmte op te slaan en die in de winter te hergebruiken kan brandstof worden bespaard. Een warmtecollector in het wegdek zorgt voor balans.

Nederland is niet alleen het land van de windmolen maar ook het land van de aardgasbel. De gasbel onder Slochteren is de grootste op het vasteland van Europa en leverde al meer dan € 175 miljard op.[69] Meer dan de helft van dat aardgas gebruiken we in Nederland voor het verwarmen van gebouwen en kraanwater.[70] Omgerekend is dat meer dan 1.500 watt per persoon: anderhalf maal wat er nu voor het wegverkeer wordt gebruikt en zes maal zoveel als er voor volledig elektrisch wegverkeer nodig is. Voor huishoudelijk gebruik geldt dat warmte ruim ¾ van de energievraag is.[71]

Gebouwen worden niet alleen verwarmd als het koud is maar ook gekoeld als het warm is. Dat gebeurt met elektriciteit die voornamelijk wordt opgewekt met aardgas en kolen. Bij sommige goed geïsoleerde gebouwen – bijvoorbeeld veel nieuwe kantoren – is de energiebehoefte voor koeling groter dan de energiebehoefte voor verwarming. Zowel koeling als verwarming gebeurt op dit moment met fossiele brandstof en dit verbruikt meer energie dan het wegvervoer.

Het kan ook anders: er bestaan systemen waarmee het gebruik van fossiele energie voor het verwarmen en koelen van gebouwen tot een fractie wordt teruggebracht. Deze systemen zorgen dat de overtollige warmte in de zomer aan het gebouw wordt onttrokken en wordt opgeslagen zodat de warmte in de winter aan het gebouw kan worden teruggegeven. Door een warmtecollector in het wegdek toe te voegen aan het systeem wordt het initiële rendement vergroot en blijft het rendement ook op langere termijn gewaarborgd. Hoe dat allemaal werkt wordt verderop in dit hoofdstuk toegelicht.

Een warmtecollector in het wegdek heeft ook voordelen voor de wegbeheerder. In de zomer wordt het wegdek gekoeld zodat er minder spoorvorming optreedt. In de winter kan de weg desgewenst ijs en sneeuwvrij worden gemaakt zonder te strooien.

Nederland loopt voorop bij het ontwikkelen en toepassen van warmtecollectoren in het wegdek. Het systeem is binnen Nederland meer dan tien keer toegepast. De enige implementaties in het buitenland die wij konden vinden (twee in Schotland en twee in België) zijn uitgevoerd door het Nederlandse bedrijf Road Energy Systems.[72]

Intermezzo

Energie uit wegbeweging

Iedere fietser weet dat er op een zandpad harder moet worden getrapt dan op een asfaltweg. Officieel uitgedrukt ondervindt de fietser op het zandpad een grotere rolweerstand. Voor een weg die energie opwekt als er auto's overheen rijden geldt hetzelfde: de rolweerstand neemt toe. Dat betekent dat de auto's die er overheen rijden extra benzine verbranden. In de verbrandingsmotoren van die auto's gaat driekwart van de energie verloren. Al met al geen energiebesparende maatregel.

Het Israëlisch bedrijf Innowattech pakt het slimmer aan. Zij zetten de vervorming van het asfalt die toch al plaatsvindt met piëzo elektrische elementen om in elektriciteit. Maar is het dan niet slimmer om te investeren in een weg die minder vervormt – bijvoorbeeld van beton – dan in piëzo elektrische elementen?

Energie uit wegbeweging kan ook worden geoogst op plekken waar auto's moeten remmen. Bijvoorbeeld bij steile afdalingen in Zwitserland: een weg met een hogere rolweerstand is hier geen gek idee. In Engeland vervangt men sommige verkeersdrempels door 'kinetische platen'. De supermarktketen Sainsbury heeft de systemen onlangs geïnstalleerd voor één van haar winkels. Maar zouden de bezoekers zich ervan bewust zijn dat de energie uit de 'kinetische platen' met hún benzine wordt opgewekt en dat dit per saldo zorgt voor méér milieuvervuiling?[73]

De beroemde – of beruchte – kinetische platen voor de supermarkt van Sainsbury's Gloucester in Engeland.

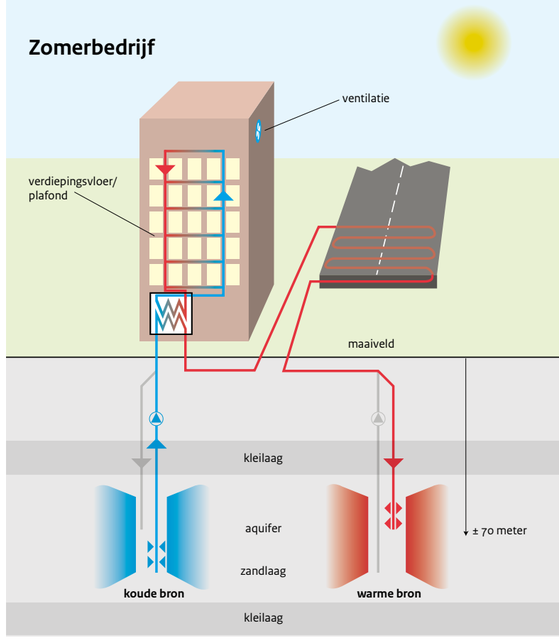
Nooit meer koude voeten

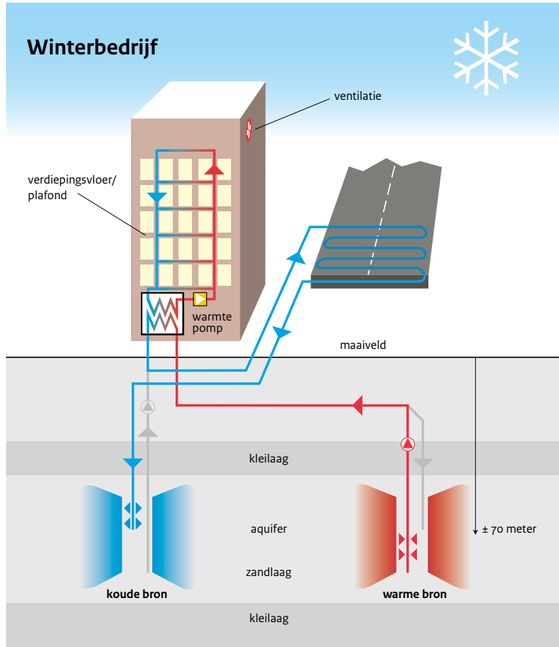
Een systeem dat zomerwarmte aanbiedt in de winter en winterkoude in de zomer kent de volgende componenten: warmte-koude opslag in diepe zandlagen; een warmtepomp; vloerverwarming en een warmtecollector in het wegdek.

In de figuur is geschetst hoe een dergelijk systeem werkt.

Zomerbedrijf
In de zomer wordt er water uit een koude bron omhoog gepompt. Deze koude bron bevindt zich op enkele tientallen meters onder de grond in een poreuze zandlaag die is ingesloten door twee kleilagen. Dit wordt ook wel een aquifer genoemd. Hoewel de diepte van de aquifer van plek tot plek verschilt, kan bijna overal in Nederland een aquifer worden gevonden, simpelweg door omlaag te boren. Het koude water stroomt langs een warmtewisselaar die de temperatuur van het water uit de koude bron overbrengt op het water dat binnen het gebouw circuleert. In het gebouw zijn leidingen aangebracht in de vloeren (en eventueel in de muren en het plafond) waarmee de warmte in het gebouw geabsorbeerd kan worden door het koude water. Resultaat is dat het gebouw afkoelt en het water opwarmt. Het opgewarmde water stroomt vervolgens door een leidingstelsel in het asfalt heen. Hierbij wordt het water verder verwarmd. Gemiddeld over het jaar kan de warmtecollector in het asfalt wel 30 W/m² warmte leveren. Uiteindelijk komt het water, nadat het is verwarmd door het gebouw en door de warmtecollector in het wegdek in de warme bron terecht.

Winterbedrijf
In de winter wordt er water uit de warme bron omhoog gepompt. Dit warme water wordt via een warmtewisselaar aangeboden aan een warmtepomp. De warmtepomp is een vernuftig apparaat dat de temperatuur van het water opvoert tot bijvoorbeeld 35 °C (voor vloerverwarming) of zelfs 70 °C (voor heet water uit de kraan). Hoe groter het temperatuurverschil, hoe meer energie hier voor nodig is. Het warme water wordt door de leidingen in het gebouw gepompt. Daarbij warmt het gebouw op en koelt het water af. Desgewenst wordt het water verder afgekoeld door middel van de leidingen in het wegdek om ten slotte weer in de koude bron te eindigen, klaar voor hergebruik als de zomer opnieuw aanbreekt. Overigens kan het water uit de warme bron ook door het wegdek worden gepompt om de weg te ijsvrij te houden zonder dat er gestrooid hoeft te worden.





Warmte-koudeopslag
Het gebruik van een koude bron en een warme bron wordt ook wel warmte-koude opslag of WKO genoemd. De efficiency is opvallend hoog: meestal is meer dan 80% van de warmte die in de zomer is opgeslagen in de warme bron in de winter nog beschikbaar om het gebouw mee te verwarmen en het hele jaar door om heet water mee te maken. In verband met de steeds verder stijgende prijzen van aardgas en elektriciteit neemt het aantal WKO installaties snel toe.

Warmtepomp
Een warmtepomp is een apparaat dat met een relatief kleine investering van energie de temperatuur van het water kan verhogen. Zo kan de temperatuur van het water uit de warme bron worden verhoogd tot de temperatuur die nodig is voor verwarming of voor heet kraanwater. Hoe groter het gewenste temperatuurverschil, hoe groter de investering in energie. De werking wordt in een apart kader verder toegelicht.

Vloerverwarming
De verwarming en koeling van het gebouw werkt het beste als er gebruik gemaakt wordt van vloerverwarming. Hierbij worden er waterleidingen aangebracht in de vloer en eventueel ook in de muren en het plafond. Het water waarmee het gebouw wordt verwarmd hoeft bij vloerverwarming slechts weinig te worden verwarmd: 35 °C zal in veel gevallen voldoen. Traditionele radiatoren die het moeten hebben van luchtcirculatie verwarmen alleen effectief bij een relatief hoge temperatuur van 60 °C of meer. Koelen kan met water dat direct uit de koude bron wordt gepompt. Daarmee wordt airconditioning overbodig.

Warmtecollector
Veel systemen hebben echter een grote onbalans. Huishoudens in reguliere woningen hebben bijvoorbeeld meer warmte dan koeling nodig. Die warmte wordt bij een regulier WKO systeem onttrokken aan de bodem waardoor de temperatuur in de grond afneemt. Veel systemen zien als gevolg hiervan hun rendement na verloop van tijd dalen en er zijn zelfs gevallen bekend waarin het systeem bevriest. Door een warmtecollector op te nemen in de kringloop kan er warmte aan het systeem worden toegevoegd en zal de grond niet afkoelen. Verder zorgt de warmtecollector ervoor dat het water uit de warme bron op een hogere temperatuur wordt aangeboden. Daardoor hoeft de warmtepomp minder werk te verrichten en neemt het rendement van het complete systeem sterk toe.

Intermezzo

De Carnot limiet stelt grenzen aan elektriciteit uit warm wegdek

Processen die warmte omzetten in beweging of elektriciteit zijn onderhevig aan de Carnot-limiet. Deze limiet betekent in de praktijk dat zelfs met perfecte technologie maximaal 5% van de warmte uit asfalt omgezet kan worden in elektriciteit.

In 1824 publiceerde de Fransman Sadi Carnot het boek Over de bewegende kracht van het vuur. Hierin beschrijft hij de theorie achter de warmtemotor, ook wel de Carnot-cyclus genoemd. De theorie geldt voor alle apparaten waarin temperatuurverschillen omgezet worden in arbeid of waarin arbeid omgezet wordt in temperatuurverschillen. Denk aan warmtepompen, elektriciteitscentrales, auto's, stoommachines, stirling motoren en koelkasten. Ook apparaten zonder bewegende delen die gebruik maken van het thermo-elektrisch effect (zoals Peltier elementen) vallen onder de theorie.

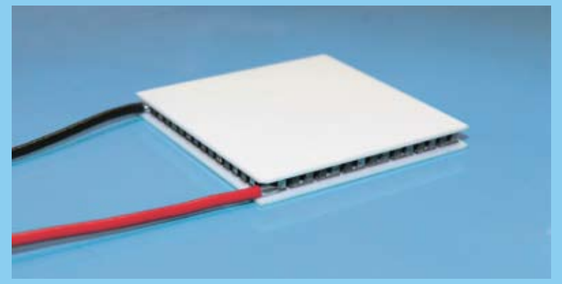
Een belangrijke conclusie uit het boek staat tegenwoordig bekend als de Carnot limiet:

"Het rendement van een warmtemotor kan nooit hoger zijn dan het temperatuurverschil tussen de warme en de koude kant, gedeeld door de temperatuur van de warme kant."

Hoe kleiner de temperatuurverschillen, hoe lager het rendement. Het gaat daarbij om de temperatuur ten opzichte van het absolute nulpunt, uitgedrukt in graden Kelvin. De temperatuur moet worden uitgedrukt in graden Kelvin. Dat betekent dat er 273 bij de temperatuur in °C opgeteld moet worden.

Het warme water dat uit het wegdek komt zal gemiddeld over het jaar genomen rond de 22 °C zijn. Het oppervlak van het asfalt kan een stuk heter worden maar de warmtecollector ligt niet op het oppervlak maar iets eronder, in een laag waarin de temperatuurverschillen minder groot zijn. Verder neemt de totale hoeveelheid energie die de warmtecollector absorbeert sterk toe als het water er sneller doorheen stroomt. Een consequentie van sneller stromend water is dat de uitstroomtemperatuur lager is.

Stel dat de warme kant bestaat uit water uit asfalt van 22 °C en de koude kant uit grondwater van 7 °C. Dan is het temperatuurverschil 15 graden. De warme kant uitgedrukt in graden Kelvin is 22 plus 273 ofwel 295 K. Het maximale theoretische rendement is daarmee 15 gedeeld door 295 ofwel 5%. Dus hoe nieuw en baanbrekend de technologie ook is, 5% is een harde limiet aan het rendement waarmee warmte in wegdek naar elektriciteit kan worden omgezet. In de praktijk liggen de rendementen nu op maximaal 3%.

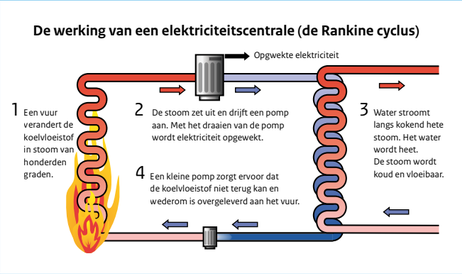


Dit Peltier element is een warmtemotor zonder bewegende delen van slechts enkele milimeters dik. Het bestaat uit twee geleidende platen met kleine halfgeleiders ertussen. Zodra er stroom loopt worden de halfgeleiders aan de ene kant koud en aan de andere kant warm. Het werkt ook andersom: als er een temperatuurverschil optreedt gaat er een stroom lopen.

Intermezzo

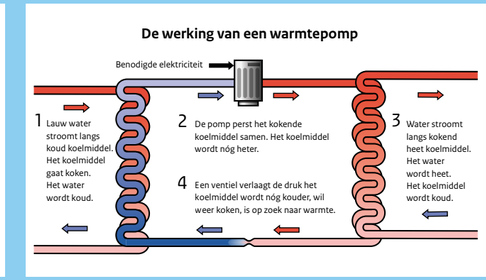
Uitleg van de Rankine cyclus en de warmtepomp

De Rankine cyclus is het proces waarmee uit fossiele brandstof of kernenergie elektriciteit wordt gewonnen.



Stap 1 - Water wordt verhit tot honderden graden Celsius. De hitte kan bijvoorbeeld afkomstig zijn van het verbranden van fossiele brandstoffen of van het splitsen van atoomkernen.
Stap 2 - Door de hitte verandert water in stoom onder hoge druk en dit drijft de pomp c.q. turbine aan. Het draaien van de turbine wordt door een generator omgezet in elektriciteit.
Stap 3 - De stoom die uit de turbine komt is sterk afgekoeld. Een zogenaamde condensator zorgt voor verdere afkoeling en de stoom verandert weer in water.
Stap 4 - Water wordt door een kleine pomp weer naar het vuur geleid zodat het proces opnieuw kan beginnen.

De warmtepomp lijkt erg op dit proces, alleen wordt er nu geen elektriciteit geproduceerd maar geïnvesteerd.



Stap 1 - Aan de linkerkant stroomt lauwwarm water – van bijvoorbeeld 20 °C – het systeem binnen. Dit water verwarmt via een warmtewisselaar (de langs elkaar kringelende buizen) een koelvloeistof. De koelvloeistof is zo gemaakt dat hij gaat koken zodra hij ook maar een klein beetje warmer wordt. Dat kan zelfs bij temperaturen onder het vriespunt zijn. Er stroomt vervolgens gasvormig koelmiddel naar de pomp toe.
Stap 2 - Het gasvormige koelmiddel wordt door de pomp samengeperst. Door het gas samen te persen wordt de temperatuur verhoogd. Hoe hoger de druk, hoe hoger de temperatuur. Het samen persen kost echter wel energie. Hier geldt: als het gas heter moet worden door het sterker samen te persen is er meer elektriciteit nodig.
Stap 3 - Heet koelmiddel stroomt langs water dat we op willen warmen. Dit water wordt bijvoorbeeld opgewarmd tot 40 °C voor de vloerverwarming of tot 70 °C voor de douche. Tegelijkertijd koelt het gasvormige koelmiddel af.

Stap 4 - Koud koelmiddel stroomt door een zogenaamd reduceerventiel. Dit verlaagt de druk. Door de drukverlaging neemt de temperatuur van de koelvloeistof verder af en wordt hij vloeibaar. De cyclus kon opnieuw beginnen.

Dit systeem kan gebruikt worden om de temperatuur van water uit wegdek te verhogen maar ook om een koelkast te koelen. Bij een koelkast wordt de inhoud van de koelkast (links in de figuur) gekoeld door de ruimte waar de koelkast zich in bevindt (rechts in de figuur) te verwarmen. Supermarkten kunnen hun winkelruimte bijvoorbeeld verwarmen met hun koelvitrines. Bij een airconditioner is het de woning die gekoeld wordt (links) terwijl de buitenlucht wordt verwarmd (rechts).

Het rendement van een warmtepomp wordt vaak uitgedrukt met een COP: een coefficient of performance. Hoe hoger de COP hoe beter. Een COP van 5 wil bijvoorbeeld zeggen dat er voor elke 5 watt die het systeem levert 1 watt moet worden geïnvesteerd om de pomp aan te drijven.

Op elk proces dat warmte omzet in werk of omgekeerd is de Carnotlimiet (zie elders) van toepassing. Dus ook op de warmtepomp. Dat betekent dat bij een temperatuurverhoging van 22 °C naar 32 °C (bijvoorbeeld voor vloerverwarming) minimaal 3% energie verloren gaat terwijl bij een temperatuurverhoging van 22 °C naar 72 °C (bijvoorbeeld voor heet water) minimaal 14% energie verloren gaat.[76] In de praktijk zijn de verliezen groter.[77]

De Maastoren - het hoogste gebouw van Nederland - krijgt zijn elektriciteit uit de Rankine cyclus en zijn warmte uit een warmtepomp.

Warmte uit wegdek in de praktijk

WKO, warmtepompen en warmte uit wegdek vergroten het wooncomfort en verkleinen de CO_2 uitstoot op een economisch rendabele manier. Aan wegdek is geen gebrek. Knelpunt is de toenemende organisatiebehoefte.

Vijverstate is een wooncomplex met 68 appartementen, dat in 2005 werd opgeleverd in Koggenland (Tussen Alkmaar en Hoorn). Gewoonlijk maakt een dergelijk complex gebruik van centrale verwarming en airconditioning maar bij Vijverstate zijn deze vervangen door vloer- en plafondverwarming. In de zomer worden de woonruimtes gekoeld met water uit de koude bron onder het gebouw en als er behoefte is aan warm water of verwarming dan komt dit uit de warme bron onder het gebouw.

Vijverstate heeft driemaal zoveel behoefte aan warmte als aan koude: zonder speciale maatregelen zouden de bronnen onder het gebouw steeds verder afkoelen en zou het rendement steeds verder afnemen. Het systeem wordt daarom beter in evenwicht gebracht met een warmtecollector. In principe kan de warmtecollector worden aangebracht in elk donker oppervlak dat vol in de zon ligt. Bij Vijverstate is gekozen voor het zwarte wegdek voor de deur. Daarbij geldt 'de wet van 10%'. De warmtecollector in het wegdek heeft een oppervlak dat minder dan 10% van het woonoppervlak bedraagt. De investering in de warmtecollector bedroeg minder dan 10% van de kosten van het totale duurzame systeem. De investering in het totale duurzame systeem was iets meer dan 10% van de totale kosten van het wooncomplex. De vaste lasten namen door het duurzame systeem met ongeveer 10% af.[78]

Het resultaat is een complex dat door gebruik te maken van warmte-koudeopslag, warmtepompen en warmtecollectoren in wegdek een energiebesparing van ruim 70% voor klimaatbeheersing en warm water realiseert. Met zonnepanelen op het dak zou het gebouw een netto energieproducent kunnen worden.[79] En misschien nog wel belangrijker: de nauwkeurige klimaatbeheersing wordt door de bewoners bijzonder op prijs gesteld.

Wegdek kan een grote hoeveelheid warmte leveren. Bij Vijverstate is dat bijvoorbeeld 35 W/m². Als de resultaten van Vijverstate gegeneraliseerd zouden worden naar de gehele bevolking zou iedere Nederlander gemiddeld 8 vierkante meter wegdek nodig hebben om zijn huishoudelijke behoefte aan warmte in balans te brengen. Daarvoor is circa ¼ van het beschikbare wegoppervlak nodig.[80]

Bij de overige gebouwen zijn de vraag naar warmte en koeling over het algemeen meer in evenwicht. Daardoor hebben deze gebouwen relatief weinig wegdek nodig om hun energievraag mee te balanceren. Er is dan ook wegdek genoeg om mee in de behoefte aan gebouwverwarming te voorzien.

Vijverstate demonstreert hoe een warmtecollector in het wegdek een relatief goedkope en effectieve aanvulling is op een project dat warmte-koudeopslag en warmtepompen toepast. Aangezien het gebruik van warmte-koudeopslag en warmtepompen een stormachtige groei doormaakt is het economisch gezien logisch dat het gebruik van warmtecollectoren in het wegdek ook een stormachtige groei te wachten staat.

Dat brengt echter een toegenomen organisatiebehoefte met zich mee: partijen die voorheen autonoom waren moeten afspraken maken. In het geval van Vijverstate moest er expertise worden ingebracht omtrent aquifers, warmtepompen en warmtecollectoren in wegdek, moest een vergunning worden verleend door de Provincie en moesten gemeente en woningbouwcorporatie de hogere investeringskosten voor hun rekening nemen. De wegbeheerder diende niet alleen een weg maar ook een energie producerend systeem aan te leggen, met geld dat werd gegenereerd vanuit het complex.

Het systeem dat in Vijverstate is toegepast wordt economisch gezien nog interessanter als de schaalgrootte toeneemt. Denk bijvoorbeeld aan de zuidas, het nieuwe zakendistrict van Amsterdam aan weerszijden van de A10. Tegelijkertijd is het een uitdaging van formaat om ook de toegenomen organisatiebehoefte tot op dit niveau op te schalen.

De warmtecollector voor wooncomplex Vijverstate wordt aangelegd.

6 Spelen met licht

De directe omzetting van zonlicht in elektriciteit is sterk in opkomst en wordt voortdurend goedkoper. Een weg voorzien van zonnepanelen zou meer energie opwekken dan het verkeer dat eroverheen rijdt nodig heeft. Er is echter flink wat ontwikkeling nodig voor de 'zonneweg' een feit is.

De onstuitbare opmars van zonnepanelen

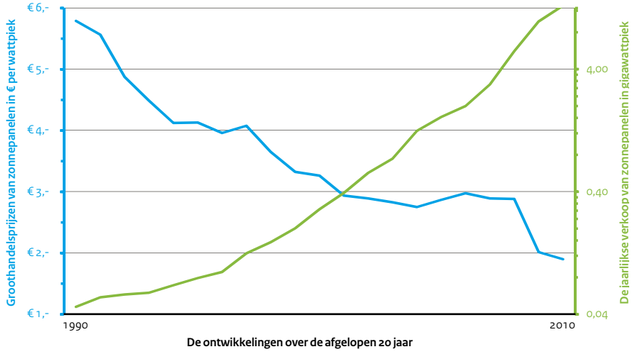
Zonnecellen zijn schaars en duur maar worden steeds overvloediger en goedkoper.

Het lijkt haast magie. Neem 10 kilo van de meest voorkomende substantie in de aardkorst (zand) en haal daar 5 kilo silicium uit. Smeer de silicium op een zonnige plek uit over 15 vierkante meter en sluit er elektriciteitsdraden op aan. De opgewekte energie is voldoende om 30 jaar lang auto mee te rijden. In dit scenario vervangt 10 kilo zand 18 duizend liter benzine.[81]

Misschien komt het door die 'magische' mogelijkheden dat zonnecellen altijd de aandacht hebben getrokken van de knapste koppen en de grootste namen. De theoretische verklaring kwam bijvoorbeeld van Einstein en daarvoor ontving hij in 1921 de Nobelprijs. Einstein bedacht dat straling zich gedraagt als een stroom elementaire deeltjes die we nu fotonen noemen. Het halfgeleidermateriaal van een zonnecel absorbeert die fotonen. Als dat gebeurt, komt er energie vrij waardoor er een elektron los springt van zijn atoom. De wijze waarop een zonnecel geconstrueerd is zorgt ervoor dat de losgeslagen elektronen dezelfde kant op stromen. Zo produceert een zonnecel elektrische stroom.

De bekendste uitvinder van de vorige eeuw – Thomas Edison – zei in 1931: "Ik zou mijn geld op zonne-energie zetten. Wat een energiebron! Ik hoop dat we niet hoeven te wachten tot olie en kolen op zijn voordat we dat oppakken." Zijn woorden bleken profetisch. Het duurde tot 1958 voor er een zonnecel op de markt kwam, maar die had niet tot doel om het gebruik van fossiele brandstof terug te dringen. De zonnecel werd ontwikkeld door het leger van de Verenigde Staten dat de ruimtewedloop met Rusland wilde winnen.[82] Het duurde tot de oliecrises van 1973 en 1979 voordat de ontwikkeling van de zonnecel echt op gang kwam.

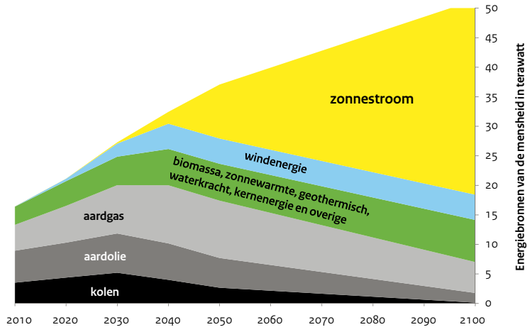
Naarmate de productie van zonnecellen stijgt, daalt de prijs



Deze figuur toont hoe de productie van zonnecellen en de prijs van zonnecellen zich de afgelopen 20 jaar hebben ontwikkeld. De verticale assen zijn voor de leesbaarheid logaritmisch weergegeven. De productie van zonnecellen (de rode lijn) is de afgelopen twintig jaar fors gestegen van iets meer dan 0,04 gigawatt naar 13 gigawat: een verdriehonderdvoudiging. Tegelijkertijd is de prijs per wattpiek (de blauwe lijn) gedaald van € 5,80 in 1990 naar circa € 1,90 in 2010.

Een scenario voor de toekomstige energievoorziening van de mensheid

Bron: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen



Dit scenario geeft aan hoe de mensheid tussen nu en het jaar 2100 in zijn energie zou kunnen voorzien. Het is in 2003 opgesteld door het wetenschappelijke adviesorgaan van de Duitse regering, de WBGU. Hoewel het een scenario en geen voorspelling is, laat het zien dat de WBGU op termijn een dominante rol voor zonnecellen verwacht.

Het probleem van zonnecellen was in eerste instantie dat ze veel te duur waren. Maar door al het geld dat wordt geïnvesteerd in research en schaalvergroting (intussen bijna € 30 miljard per jaar[83]) worden zonnecellen steeds goedkoper. Hun prijs wordt meestal uitgedrukt in wattpiek. (Dat is een maat voor de hoeveelheid vermogen die een zonnepaneel levert als de zon er op schijnt met een intensiteit van 1.000 W/m².) De eerste zonnecellen uit 1955 kostten meer dan € 1.000,- per wattpiek. De huidige cellen kosten af fabriek nog maar € 1,- per wattpiek: een duizendvoudige prijsverlaging. Sommige fabrikanten claimen dat zij de komende vier jaar de productiekosten nogmaals kunnen halveren.[84] Aangezien er voor zonnecellen relatief weinig grondstof nodig is, zitten de kosten vooral in het ontwikkelen van de kennis die nodig is om het productieproces te verbeteren. Kennisontwikkeling zal zich blijven vertalen in prijsdaling. Wat dat betreft lijkt de zonnecel op dat andere 'magische' product dat gemaakt wordt van silicium: de computerchip.

Sinds 1975 is de jaarlijkse productie van zonnecellen met gemiddeld 32% per jaar gestegen. De afgelopen 10 jaar zelfs met 50% per jaar. Dat is voor een belangrijk deel de verdienste van de regeringen van Japan en Duitsland die de eerste ontwikkelingen met subsidieregelingen stimuleerden. Het is de vraag hoe het nu verder gaat. Enerzijds leveren zonnecellen nog maar 0,02% van onze energiebehoefte. Anderzijds was de groei de afgelopen tien jaar zo sterk dat als die groei doorzet binnen 25 jaar al onze energie uit zonnecellen komt.[85] Volgens veel experts is de vraag dan ook niet of maar wanneer zonnecellen de grootste energiebron worden.[86]

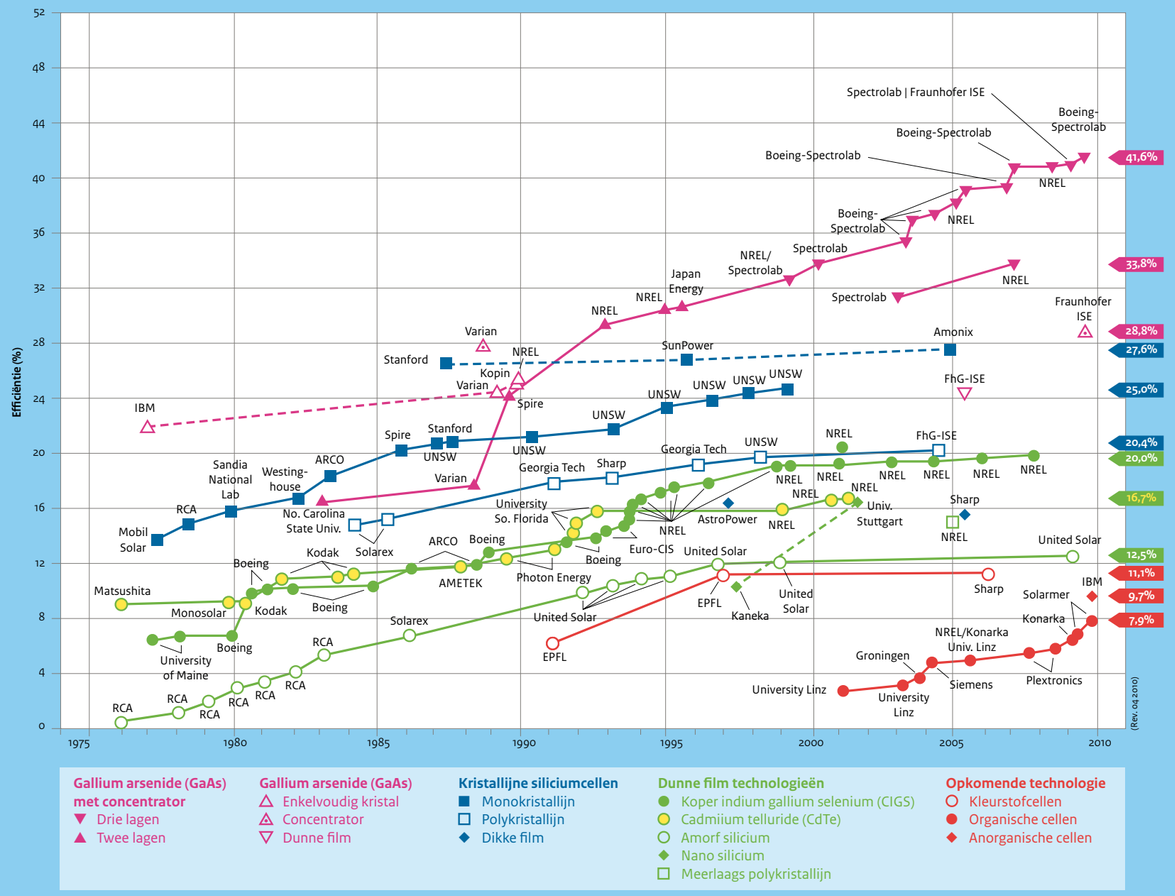
Intermezzo

Verschillende soorten zonnecellen

Op dit moment worden de meeste zonnecellen gemaakt van polykristallijne silicium, gewonnen uit siliciumdioxide ofwel zand.

Zoals in de figuur is te zien zijn er ook vele andere mogelijkheden en in laboratoria wordt zelfs gewerkt aan 'zonneverf'. Deze diversiteit zorgt bij veel experts voor optimisme onder het mom van: "Er is altijd wel één technologie die er in slaagt om goedkoper te worden dan fossiele brandstof." Het algehele optimisme vertaalt zich ook in investeringen. Tegen de crisis in nam de hoeveelheid durfkapitaal tussen 2001 en 2009 toe van € 270 miljoen naar € 1,7 miljard.[88] In totaal werd er in 2009 € 28 miljard in zonnecellen geïnvesteerd.

De efficiëntie van verschillende soorten zonnecellen in het laboratorium



Intermezzo

Kosten en opbrengsten van zonnepanelen langs de weg of op uw dak

Hoe kunnen de kosten en opbrengsten van zonnepanelen worden berekend? Dat is het makkelijkst uit te leggen met een rekenvoorbeeld waarbij iedereen zich iets voor kan stellen: zonnepanelen op je dak. Exact dezelfde rekenmethode geldt ook voor zonnepanelen in of langs de weg. Eén kanttekening: bij deze berekening worden aannames gedaan die in de praktijk van geval tot geval verschillen. Voorbeelden van aannames zijn de efficiency van de zonnepanelen, hun prijs en hun oriëntatie.

De 'kracht' van een zonnepaneel wordt uitgedrukt in wattpiek ofwel Wp
Elke zonnepaneel heeft een aanduiding in wattpiek of Wp. Dat is een maat voor de hoeveelheid energie die het paneel kan leveren. Als de aanduiding bijvoorbeeld 150 Wp is dan betekent dit dat het zonnepaneel in optimale omstandigheden 150 watt zal leveren. Die optimale omstandigheden waarin een paneel zijn piekvermogen levert zijn als volgt gedefinieerd: de opbrengst wanneer het zonnepaneel 1.000 W/m² aan zonne-energie ontvangt.[89]

Een ruwe vuistregel: 1 wattpiek levert in Nederland 1/10 watt ofwel 1 kWh per jaar
Wie in Nederland een dak heeft dat optimaal op de zon gericht is ontvangt ongeveer – gemiddeld over het hele jaar – 115 W/m² in plaats van 1.000 W/m². Een zonnepaneel levert in Nederland daarom bij benadering 115/1.000-ste ofwel 11,5% van zijn aangegeven piekvermogen. Voor een zonnepaneel van 150 Wp is dat 17 watt gemiddeld. In de praktijk blijft daar ongeveer 15 watt van over. Dat staat gelijk aan 130 kWh per jaar. Simpel gezegd: 1 Wp levert 1/10 watt ofwel 1 kWh gemiddeld. (Let op: deze uitspraak geldt voor Nederland. In Zuid-Spanje levert 1 Wp bijna dubbel zo veel.)

Zonnepanelen kosten op dit moment circa € 2,- per wattpiek, exclusief installatie
Op dit moment zijn zonnepanelen af fabriek verkrijgbaar vanaf € 1,- per Wp. Nadat de tussenhandel, de leverancier en de fiscus (via de BTW) hun aandeel hebben gehad ligt de prijs voor de consument op circa € 2,- per Wp. Als de installatie door een vakman wordt gedaan en er rekening wordt gehouden met onderhoud komt de prijs voor het totale systeem op € 3,- tot € 4,- per Wp. (Let op: de prijs verandert voortdurend. € 2,- per wattpiek is nu een scherpe prijs maar zal over vijf jaar waarschijnlijk worden gezien als duur.)

Huizen met zonnedaken in Heerhugowaard.

In nieuwbouw zou de prijs kunnen dalen tot € 2,- per wattpiek inclusief installatie
Stel dat er een nieuwbouwwijk gebouwd wordt met rijtjeshuizen die zo ontworpen zijn dat ze een flink dak op het zuiden hebben van 50 m².[90] Heerhugowaard kent daar goede voorbeelden van. Stel dat er zonnepanelen van 15% efficiency ofwel 150 Wp per m² worden gebruikt en dat de aannemer voor deze grote order van zonnepanelen een prijs kan bedingen van € 1,50 per Wp. Stel dat de zonnepanelen gebruikt worden in plaats van een regulier dak en dat de meerprijs van de installatie daardoor beperkt blijft tot € 0,50 per Wp (dat is € 75,- per m²). Dan zijn de meerkosten van dit zonnedak € 2,- per Wp. (Let op: dit is goedkoper dan bij een bestaand huis waarop zonnepanelen achteraf worden aangebracht.)

Een zonnedak van 50 m² kost dan € 1.000,- per jaar
De kosten van dit zonnedak zijn 50 m² maal 150 Wp maal € 2,- ofwel € 15.000,-. Stel dat dit geld geleend wordt als onderdeel van een annuïteitenhypotheek met een looptijd van 25 jaar en een rente van 4,5%. De kosten van de voor het zonnedak benodigde lening bedragen dan € 1.000,- per jaar. (Let op: een hypotheek is een relatief goedkope vorm van lenen. Anderzijds kunnen de kosten – afhankelijk van het inkomen – lager uitvallen als er gebruik gemaakt kan worden van hypotheekrenteaftrek.)

Daarmee ligt de prijs op 15 cent per kWh. Dat is goedkoper dan elektriciteit van het lichtnet
De opbrengst van het dak is 130 kWh per m² maal 50 m² ofwel 6.500 kWh per jaar. De kosten waren € 1.000,- per jaar. De kosten per kWh zijn dan € 0,15. Dat is goedkoper dan de € 0,22 die eindgebruikers nu gemiddeld betalen. (Een dak als dit levert genoeg energie om de elektriciteitsbehoefte van een gemiddeld huishouden en anderhalve elektrische personenauto te dekken. Dit betekent dat huizen met grote zonnedaken netto elektriciteitsproducenten kunnen zijn.)

De vraag is hoe de prijs van elektriciteit zich zal ontwikkelen. De prijs nam de afgelopen 20 jaar toe met 3,0% per jaar waarvan circa de helft door inflatie.[91] Als de prijsontwikkeling en inflatie de komende 25 jaar met 3% per jaar zouden doorzetten dan verdubbelt dit de prijs van elektriciteit. De prijs van het zonnedak blijft daarentegen constant op € 0,15 per kWh. In het eerste jaar levert het dak de eigenaar dan € 450,- op en in het 25e jaar maar liefst € 1.900,-.[92]

Het gekke is dat er 'normaal' anders gerekend wordt. Er wordt dan uitgegaan van een maximale terugverdientijd van 10 jaar. Wie zo rekent moet inderdaad geen zonnedak kopen. Maar hij is wel een dief van zijn eigen portemonnee.

De werkelijke economische kosten van fossiele elektriciteit zijn lager
De voorgaande berekening klopt voor de huiseigenaar maar maatschappelijk gezien ligt de zaak complexer. Kolencentrales leveren bijvoorbeeld geen stroom tegen € 0,22 per kWh maar eerder tegen € 0,05 per kWh. De sprong van € 0,05 naar € 0,22 komt voort uit belastingen, administratie en onderhoud van het elektriciteitsnet.

Op termijn zal kolenstroom duurder worden door inflatie en doordat vervuiling en klimaatschade meer aan kolencentrales worden toegerekend. Hoe snel dit zal gaan is niet duidelijk en op dit moment is € 0,05 per kWh de economische realiteit waar de elektriciteitsproducenten mee werken.

Het zal nog enige tijd duren voor de prijs van zonnestroom onder de € 0,05 duikt. Dat het op termijn gebeurt, is echter waarschijnlijk. Zo is het voorstelbaar dat grootverbruikers al in 2015 een prijs realiseren van € 1,- per Wp ofwel € 0,09 per kWh.[93] In Zuid-Spanje zou de opwekkingprijs bij dergelijke aanschafkosten zelfs daadwerkelijk de begeerde € 0,05 per kWh bedragen.

Zonnecellen langs de weg

Geluidsweringen met zonnepanelen langs de snelweg zijn een goed idee. Het beschikbare oppervlak is echter beperkt.

Langs steeds meer snelwegen staan schermen die de geluidshinder reduceren. Door die schermen te voorzien van zonnepanelen kunnen ze niet alleen geluid afvangen maar ook energie leveren. Twee vliegen in één klap zonder extra ruimtebeslag of horizonvervuiling. De zonnepanelen kunnen in allerlei configuraties worden aangebracht. Zelfs wegen die van noord naar zuid lopen kunnen van zonnepanelen worden voorzien. Zulke wegen staan 'haaks op de zon' en de conventionele wijsheid zegt dat een zonnepaneel dan weinig energie opbrengt. Door verticale zonnepanelen te plaatsen die aan beide zijden licht kunnen opvangen kan de opbrengst van een geluidswal haaks op het zuiden staat echter hoger zijn dan van een geluidswal die pal op het zuiden is gericht.[94]

De verwachting is dat de toepassing van zonnepanelen in geluidswallen tot één van de goedkoopste vormen van zonnestroom zal leiden. Allereerst omdat de kosten voor de fundering en de bevestiging van de panelen toch gemaakt moeten worden, of er nu zonnepanelen toegepast worden of niet. Verder gaat het al snel om flinke projecten en dat levert schaalgroottevoordelen op: de gebruikte technieken kunnen gestandaardiseerd worden; de materialen kunnen met korting worden ingekocht; en de overhead van het project kan over een groot aantal vierkante meters worden verdeeld.

Intussen is het idee toegepast in Duitsland, Zwitserland, Italië, Oostenrijk, Groot-Brittannië en Australië. Het grootste project staat in Aschaffenburg (Duitsland) en levert gemiddeld 265 kilowatt. Het grootste project in Nederland staat in Amstelveen langs de A9 en levert gemiddeld 22 kilowatt.[95]

Maar kunnen we uit zonnecellen in geluidswallen ook alle energie halen die voor elektrisch wegvervoer nodig is? Dit is onderzocht en de resultaten zijn ontnuchterend. Als alle geluidswallen die de komende vijf jaar in Nederland worden aangelegd van zonnecellen worden voorzien levert dit 5 megawatt.[96] Als alle bestaande geluidswallen ook van zonnecellen worden voorzien neemt dat toe naar 11 megawatt. Nu is 11 megawatt zeker de moeite waard – er kunnen 50.000 auto's mee worden aangedreven – maar het is maar 0,1% van de energie die elektrisch wegvervoer nodig heeft.

We kunnen er theoretisch ook voor kiezen om alle snelwegen aan beide zijden te voorzien van een wand met zonnepanelen van 4 meter hoog. Dit zou kostbaar zijn en niet iedereen zou het mooi vinden. Maar stel. Zelfs dan leveren al die zonneschermen langs de snelweg maar 7% van de energie die het wegvervoer nodig heeft.

De meest extreme – en kostbare – mogelijkheid is het overdekken van de snelweg met zonnepanelen. Uitgaande van zonnecellen die 25% lichtdoorlatend zijn – zodat de automobilist niet het gevoel krijgt dat hij in een tunnel rijdt – levert dit zelfs als alle snelwegen overdekt worden 'maar' 13% van de energie die voor het wegvervoer nodig is.

Bovendien is het zogeheten 'bronbeleid' van Verkeer & Waterstaat er op gericht om geluidsoverlast zoveel mogelijk bij de bron aan te pakken – bijvoorbeeld met stillere motoren, stillere banden en stiller asfalt – in plaats van met geluidsschermen en overkappingen.

Al met al zijn zonnepanelen in geluidswallen langs de snelweg een uitstekend idee. We moeten echter niet verwachten dat dit genoeg energie oplevert om een groot deel van het wegvervoer mee van energie te voorzien. De reden daarvoor is simpel: hooguit 1/10 van het wegoppervlak in Nederland is snelweg. De overige 9/10 blijft met de focus op de snelweg buiten beschouwing. Sterker nog, als parkeerplaatsen en dergelijke worden meegenomen beslaat de snelweg maar 1/20 van het oppervlak dat voor wegvervoer wordt vrijgehouden. Wat we nodig hebben is een manier waarmee we zonnepanelen in kunnen bouwen in al dat wegdek!

Intermezzo

Beter zicht met minder licht

Een recente studie neemt de invloed van verlichting op Nederlandse verkeersongevallen onder de loep. Zij constateert dat op onverlichte wegen het aantal ernstige verkeersongevallen 's nachts tweemaal zo hoog is als op verlichte wegen.[97] Het energieverbruik van die verlichting is in verhouding met vervoer beperkt: slechts 0,03% van de energie die aan wegvervoer wordt besteed komt voor rekening van wegverlichting.[98]

Maar licht kan ook hinderlijk zijn. Veel Nederlanders vinden het jammer dat het nooit meer donker is. Het kan het dag-nacht ritme in de war brengen en voor slaapstoornissen zorgen. Natuurgebieden worden door het licht van de weg ontregeld. En de sterrenhemel heeft een groot deel van zijn luister verloren: zo is vrijwel nergens in Nederland de Melkweg meer te zien.[99]

Bovendien is meer licht niet automatisch veiliger. Zo schijnt een flink deel van alle verlichting nutteloos omhoog of brandt zij terwijl er geen weggebruiker in de buurt is. Dat er in België tweemaal zoveel dodelijke ongelukken gebeuren terwijl de snelweg overal verlicht is geeft aan dat meer licht niet automatisch beter is. Ook is niet duidelijk welk lichtniveau, oor het verkeer optimaal is: onderzoek hiernaar stamt uit de jaren dertig van de vorige eeuw.

Dat het verkeer in Nederland veilig is en dat verlichting daaraan veel bijdraagt komt vooral omdat de aanpak hier relatief slim is.[100] En het kan nog slimmer: recent is bijvoorbeeld een gevaarlijke fietsersoversteekplaats in een natuurgebied (in Castricum) voorzien van LED's in het wegdek die oplichten als er een auto nadert en die de vluchtheuvel midden in de weg en de kromming van de weg verlichten. De oversteekplaats is nu veilig, de lichthinder voor het natuurgebied is minimaal en de energiebehoefte is minder dan 1% van wat zij met gewone straatverlichting zou zijn geweest.

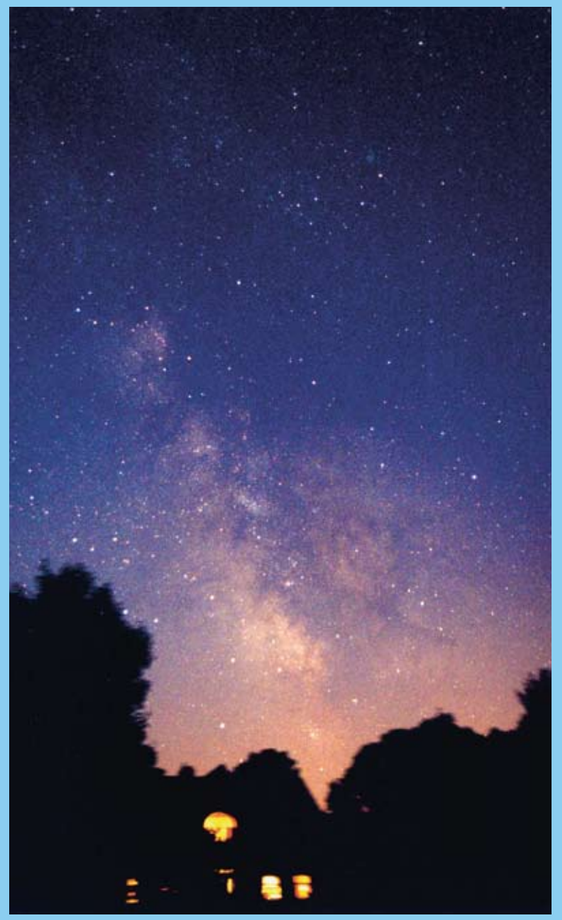
Er is steeds meer interesse voor verlichting die niet de hele weg verlicht maar vooral de loop van de weg duidelijk maakt. Onderzoek van Rijkswaterstaat onder ouderen geeft aan dat zij het meeste last hebben van gebrekkige verlichting. Zij geven aan dat het voor hen belangrijk is dat de loop van de weg goed te volgen is maar dat zij niet zozeer willen dat het algemene verlichtingsniveau omhoog gaat.

Een elegante invulling daarvan is het gebruik van 'kattenogen' die niet alleen reflecteren maar die het licht van de koplampen via een glasvezelkabel in de weg honderden meters vooruit geleiden. Zo ziet de automobilist een spoor van lichtjes voor zich die verder reikt dan de lichtbundel van zijn koplamp, terwijl er geen extra elektriciteit gebruikt wordt.

Als krachtiger licht nodig is kan er net als in Castricum gewerkt worden met LED lampjes in het wegdek of in de vangrail. De energie kan desgewenst uit kleine zonnepanelen komen waar de LED lamp in gemonteerd is. Misschien wel de meest luxe oplossing is 'lichtgevende wegmarkering'. Zo onderzoekt het bedrijf Xebra het gebruik van verf die actief licht geeft als er stroom op wordt gezet.

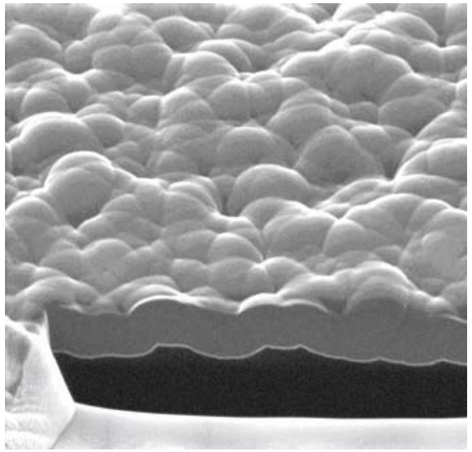
Autofabrikanten denken intussen een stap verder: waarom zou je je beperken tot licht? Licht is schaars in het donker en extra licht is vrijwel nutteloos bij mist. Daarom is in sommige nieuwe auto's een infrarood nachtcamera als optie beschikbaar. De bestuurder 'ziet' daarmee allerlei zaken (zoals het verloop van de weg en overstekende voetgangers) die normaal gesproken in de duisternis of in de mist zouden verdwijnen.[101]

TNO denkt nóg een stapje verder: waarom zouden die sensoren alleen in de auto kunnen zitten? Zij stelt zich een toekomst voor waarin intelligente sensoren in de weg informatie geven aan de automobilist. Zo kan deze niet alleen door dichte mist maar zelfs om het hoekje kijken.[102]



Op de linkerfoto de sterrenhemel tijdens een stroomstoring. Rechts dezelfde 'sterrenhemel' een dag later toen alles weer 'normaal' was. (Genomen in Goodwood, Canada, op 14 en 15 augustus 2003.)

De bestuurder van deze BMW 5 wordt met een icoon op zijn voorruit gewaarschuwd voor voetgangers op de weg. Op zijn monitor op het dashboard (op de foto voor de duidelijkheid iets vergroot) kan hij zien dat uitwijken voor de tegenligger tot een ongeval kan leiden, omdat er rechts twee voetgangers op de weg lopen.



Onder de microscoop is goed te zien dat glas dat geëtst is een ruw oppervlak heeft. Etsen wordt gebruikt om glas minder reflecterend te maken zodat zonnecellen achter het glas efficiënter worden en kan wellicht ook helpen om wegdek te ontspiegelen.

Structuurglas is doorzichtig maar geeft banden meer grip.

Een glazen weg van zonnepanelen

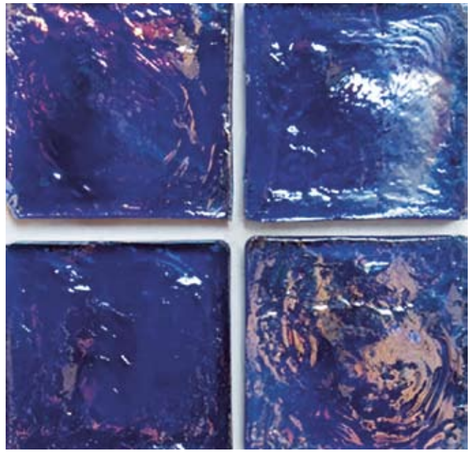
Zonnepanelen in het wegdek zouden al het wegverkeer van energie kunnen voorzien. Daarvoor moet nog wel een glazen wegdek ontwikkeld worden.

Energetisch gezien is het de ultieme oplossing: een weg die zelf energie opwekt en de auto's die erop rijden draadloos van energie voorziet. Geen conflicten om olie, vervuiling en broeikasgassen maar een schoon en gesloten systeem. Dat kan als er een manier zou zijn om zonnepanelen in te bouwen in het wegdek.

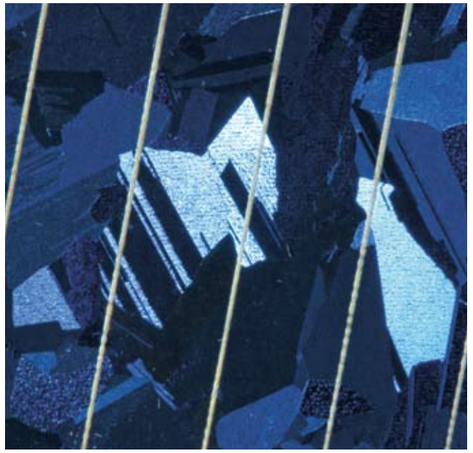
Zo'n 2% van het oppervlak van Nederland is verkeersterrein (de helft daarvan wegen). Dat is 60m² per persoon. Als een kwart daarvan voorzien zou worden van reguliere zonnecellen dan zou dat alle benodigde energie leveren voor het wegverkeer. En als voertuig en wegdek voorzien worden van de mogelijkheid om inductief stroom over te dragen kunnen de voertuigen zelfs onder het rijden stroom afgeven (bijvoorbeeld als ze snel moeten remmen of als het netwerk even energie tekort komt) of opnemen (als ze hun batterij onder het rijden op willen laden).

In Nederland speelt TNO met het idee van zonnepanelen in wegdek. Zij willen eind dit jaar een laboratoriumopstelling hebben en de komende jaren is de ambitie om te komen tot een proef met een stukje fietspad. In de Verenigde Staten is Solar Roadways de pleitbezorger van een weg met zonnepanelen. De grootste uitdaging is volgens Solar Roadways de ontwikkeling van een transparante toplaag die aan alle eisen voldoet.[103] Hij moet stroef zijn zodat banden als het nat is voldoende grip hebben maar ook transparant en kras vast zodat de zonnecellen eronder hun werk kunnen doen. Hij moet het zonlicht niet in de ogen van de chauffeur reflecteren. Hij moet sterk zijn zodat er vrachtwagens overheen kunnen rijden terwijl er steentjes op de weg liggen, zonder dat de toplaag breekt. Als de weg van asfalt is moet de toplaag samen met het asfalt kunnen vervormen zonder te breken. En idealiter helpt hij ook bij het afvoeren van water en het absorberen van geluid. De toplaag die op dit moment het beste aan al die eisen kan voldoen is glas maar de bovengenoemde eisen zijn stuk voor stuk flinke uitdagingen.

Glas kan stroef, mat en transparant gemaakt worden door het reliëf te geven. Het grove reliëf kan eenvoudig aangebracht worden door het glas voordat het geheel is afgekoeld over een rol met een gestructureerd oppervlak te laten lopen. Het glas neemt dan de structuur van de rol over. Dergelijk glas wordt vaak gebruikt voor deuren die licht doorlaten maar ook privacy bieden. Het aardige is dat wetenschappers die zonnepanelen verbeteren ook al enige tijd op zoek zijn naar manieren om glas minder reflecterend te maken. Zij etsen soms het glas om ervoor te zorgen dat het glas minder licht reflecteert en er meer licht op de zonnecel valt. Er zijn dus aanknopingspunten voor glas dat zowel voor wegdek als zonnecel optimaal is.



Als glazen vloertegels zoals deze voorzien worden van zonnecellen kunnen er boulevards en pleinen ontstaan die energie leveren.



Zo zou de weg er in de toekomst – onder het glas – uit kunnen zien.

De krasvastheid van glas is uitzonderlijk goed en glazen vloertegels behoren tot de meest duurzame vloerbedekking. Helaas is kwarts (het hoofdbestanddeel van zand en het materiaal waarvan glas gemaakt wordt) nóg harder. Blijft glas transparant als het wordt blootgesteld aan de combinatie van zand en wegverkeer? Het zojuist besproken reliëf is hier van belang. Wellicht zorgt dit ervoor dat alleen de meest uitstekende delen van het reliëf bekrast raken en onderzoek zou uit moeten wijzen welke reliëfs het beste voldoen. Verder zou glas een coating kunnen krijgen die harder is dan zand. Bijvoorbeeld van Aluminium Oxynitride, een materiaal dat nu onder andere gebruikt wordt in ruiten van pantservoertuigen. Zichzelf herstellende coatings – die vooral ontwikkeld worden om autolak duurzaam glanzend te maken – zijn een derde optie.

Wanneer de weg van asfalt is moet het glas flexibel genoeg zijn om met de geleidelijke vervorming van het asfalt mee te bewegen. Flexibel glas bestond vroeger alleen in mythen[104] maar al in 1935 kwamen er verende glazen springplanken op de markt.[105] Op dit moment staat glas van de rol (u leest het goed) volop in de belangstelling omdat hierop goedkoop computerschakelingen, OLED beeldschermen en zonnecellen geprint kunnen worden. Een alternatief voor flexibel glas is het gebruik van losse glazen 'zonnetegels': elke tegel is dan een kleine zonnecel. Zulke tegels kunnen de vervorming van de weg volgen en tevens een decoratief karakter hebben. Ze zouden ook gebruikt kunnen worden op plekken waar nu – bijvoorbeeld uit esthetische overwegingen – voor tegels of klinkers wordt gekozen. Als de ondergrond van de weg bestaat uit beton is flexibel glas niet nodig.

Ten slotte is het zaak dat het glas niet breekt, zelfs niet als het aan grote belastingen wordt blootgesteld. Denk aan de extreme kracht op één punt van het glas wanneer er een zware vrachtwagen over een kiezel rijdt. Dit vereist allereerst dat het glas ondersteund wordt door een goed passende en stijve onderlaag. Beton ontlast het glas in deze situatie wellicht meer dan asfalt en in ieder geval moeten glas, zonnecel en asfalt goed verlijmd worden. Daarnaast is het zaak dat de breeksterkte van glas wordt vergroot. Solar Roadways ziet dit als misschien wel de grootste uitdaging en op de Universiteit van Pennsylvania, waarmee zij samenwerkt, wordt veel onderzoek gedaan naar het vergroten van de breeksterkte van glas. De mogelijkheden zijn groot want op dit moment is de breeksterkte van glas nog geen honderdste van haar theoretisch maximum. Met de combinatie van een goede ondergrond en eventueel versterkt glas hoeft zelfs een vrachtwagen die over een kiezel rijdt geen probleem te zijn.

7 De energieke weg

Hoe zal het verder gaan met de aanzetten die in dit boek zijn beschreven? We schetsen de mogelijke situatie in 2015 en 2030. We pretenderen niet dat we voorspellingen of aanbevelingen kunnen doen maar het leek ons passend af te sluiten met twee prikkelende, ambitieuze en inspirerende toekomstbeelden.

2015

2015: de integrale benadering

Plotselinge rampen – zoals een financiële crisis of een olieramp – baren veel opzien. Geleidelijke groeiprocessen vallen veel minder op. Toch is hun impact des te groter, vooral als ze elkaar versterken. Dit geldt zeker voor de ontwikkelingen op het gebied van duurzame energie. Geleidelijke verbeteringen op talloze terreinen zorgen ervoor dat de kosten blijven dalen terwijl de opbrengsten blijven stijgen.

> "Het vallen van een boom baart meer opzien dan het groeien van een bos."
>
> *Boeddhistisch spreekwoord*

Net zo belangrijk als de technologische verbeteringen zijn de boekhoudkundige verbeteringen. In 2015 wordt er bijvoorbeeld eerst gekeken naar maandelijkse lasten – inclusief de kosten voor energie – en dan pas naar aanschafkosten. Maar om de voordelen van duurzame energie écht uit te buiten is een integrale benadering nodig. Een benadering die naar het hele bos kijkt in plaats van naar een individuele boom. Een benadering die kijkt hoe alle groeiende bomen elkaar in de tijd beïnvloeden.

Neem de elektrische auto. Het gaat daarbij niet alleen om de inkomsten uit autoverkopen maar ook om minder broeikasgassen en minder gezondheidsproblemen. Dat is een voorbeeld van kijken naar het hele bos in plaats van naar één boom. Naarmate er meer elektrische auto's verkocht worden is er meer behoefte aan oplaadpunten en naarmate er meer oplaadpunten zijn worden er meer elektrische auto's verkocht. Dat is een voorbeeld van hoe twee groeiende bomen elkaar beïnvloeden. Om de opbrengsten van zo'n integraal systeem te kunnen berekenen moeten vertrouwde rekenmethodes ingeruild worden voor simulatiemodellen. Maar als die stap eenmaal is genomen blijkt duurzaamheid vaak lonend, ook bedrijfseconomisch bekeken.

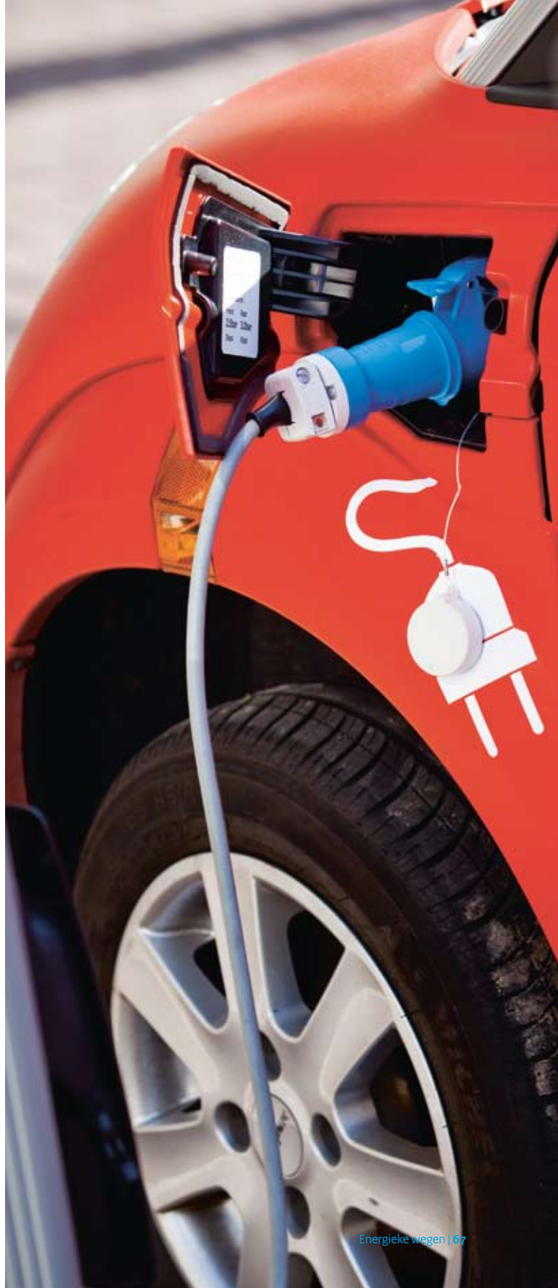
De grootste uitdaging is om alle partijen die belang hebben bij de integrale 'business case' samen te laten werken. Anders gezegd: er kan geld worden verdiend met 'polderen'. Niemand is dan ook verbaasd dat Nederland in 2015 een lichtend voorbeeld is voor de integrale invoering van duurzame energie. Hieronder geven we daarvan enkele voorbeelden.

Een echte proeftuin voor elektrisch rijden

Alle grote autofabrikanten verkopen auto's die uit het stopcontact kunnen worden opgeladen: de zogenaamde plug-in's. Nederland liep in 2010 al voorop bij de invoering van hybriden (¼ van alle Priussen in Europa werd in Nederland verkocht) en in 2015 lopen we voorop bij de invoering van de plug-in's. Dit komt door de integrale aanpak:

Financiën en Economische Zaken dragen hun steentje bij met belastingvoordelen voor kopers en subsidies voor ondernemers. (Er is ook een stimuleringsregeling voor elektrische scooters: bewoners worden steeds minder vaak gewekt door de krantenbezorgster of door de zoon van de buren die 's ochtends van een feest terugkomt.) Verkeer en Waterstaat helpt door de snelle invoering van regelgeving en van snellaadpunten en batterijwisselstations langs de snelweg. Rijkswaterstaat heeft verschillende pilots lopen met inductief opladen onder het rijden en partnert met lokale overheden en energieleveranciers om er een levensvatbaar 'business model' voor te ontwikkelen. Horeca ketens proberen de bestuurders van elektrische auto's ertoe te verleiden om bij hen voor de deur op te laden en worden onverwacht succesvol als ontmoetingsplaatsen voor het Nieuwe Werken.

De behoefte aan rust en schone lucht in de stad vertaalt zich in parkeerplaatsen (met oplaadpaal) voor elektrische auto's. Bestelwagens (die een groot deel van het fijnstof in de stad uitstoten) worden versneld elektrisch. Huishoudens die een tweede of derde auto willen krijgen daar in Amsterdam een parkeervergunning voor, mits de auto elektrisch is. Taxi's zijn steeds vaker elektrisch. In Nijmegen zijn de taxistandplaatsen bij het station zelfs al voorzien van inductief opladen. Groningen begint met de invoering van 'trolleybussen' die inductief (dus zonder bovenleiding) opgeladen worden.



Verwarmen en koelen met brandstof is 'uit', balanceren met de grond en de weg is 'in'
Een andere geleidelijke trend die uitmondt in een succesvolle integrale benadering is het duurzaam koelen en verwarmen van gebouwen met behulp van zogenaamde warmte-koudeopslag (WKO) en warmtepompen.

In 2010 was dit al aan de gang. Zo was het hoogste gebouw van Nederland (de Maastoren in Rotterdam) voorzien van duurzame verwarming en koeling. T58 (een bedrijventerrein in Nijmegen) bood alle bedrijven op het terrein goedkope duurzame warmte- en koeling. En in hoofdstuk 5 lieten we zien hoe het appartementencomplex Vijverstate met 70% minder aardgas een betere klimaatbeheersing wist te realiseren.

In 2015 is duurzaam verwarmen en koelen net zo normaal als spouwmuurisolatie en dubbel glas. In de nieuwbouwwijken zijn WKO systemen vrijwel standaard. De weg wordt door architecten en ingenieursbureaus automatisch in hun berekeningen meegenomen als de manier om het systeem in balans te brengen en te houden.

De meeste impact heeft de glastuinbouw die in 2010 nog 10% van het Nederlandse aardgasverbruik voor haar rekening nam. In 2015 is op last van de Europese Unie de subsidie op aardgas die zij kreeg afgeschaft.[106] Nu zit er subsidie op gesloten kassen met warmte-koude opslag. Het resultaat is een kas waarin niet meer gestookt hoeft te worden.

Zonnecellen zetten door
De prijs van zonnecellen blijft dalen. Een integrale aanpak zorgt ervoor dat een dak van zonnepanelen in de nieuwbouw in 2015 goedkoper is dan elektriciteit uit het stopcontact. Architecten zorgen voor grote daken op het zuiden. Ondernemers zijn verplicht om kopers niet alleen dakpannen maar ook een 'zonnedak' te offreren. Banken nemen het zonnedak desgewenst mee in de hypotheek. Hypotheekverstrekkers kunnen de kopers voorrekenen dat de hypotheeklasten weliswaar hoger worden maar dat dit ruimschoots wordt gecompenseerd door de lagere elektriciteitskosten. De meeste kopers profiteren graag van deze integrale aanpak: het levert geld en een goed gevoel op.

Er is in 2015 een groot kantorencomplex in aanbouw dat aan de buitenzijde niet is voorzien van zwart marmer – zoals oorspronkelijk gepland – maar polykristallijne zonnecellen. De architect claimt dat de zonnecellen goedkoper waren dan marmer en dat hun uitstraling beter past in deze tijd. Bovendien wordt de energierekening volgens hem negatief: het gebouw produceert meer energie dan het gebruikt.

Nieuwe geluidsschermen langs de weg worden meestal voorzien van zonnecellen. De ministeries van V&W, EZ en OCW slagen er in om samen te werken en dit leidt ertoe dat het voor Nederlandse ondernemers aantrekkelijk wordt te investeren in de ontwikkeling van betere schermen. Nederland exporteert haar zonneschermen inmiddels op grote schaal naar Duitsland. Graffiti spuiters ontzien de nieuwe zonneschermen. Het is niet duidelijk of dit komt omdat ze voor duurzame energie zijn of omdat ze weten dat het glas makkelijk schoon te maken is.

Verschillende voetgangerszones, fietspaden en parkeerplaatsen zijn als proef voorzien van zonnetegels: stoeptegels voorzien van een zonnecel met een glazen reliëfstructuur daar overheen.
Ze worden niet alleen gezien als energiebron maar ook als de meest luxe bestrating en ze hebben door de combinatie met LED's standaard de mogelijkheid intelligente bewegwijzering en lichtshows weer te geven.

Er is een X-prize uitgeschreven voor het ontwikkelen van een weg met zonnecellen onder een transparante toplaag. Verschillende Nederlandse bedrijven dingen mee.

Deze huizen in Zuid Engeland leveren sinds 2002 meer energie dan ze verbruiken. In 2015 zal dat een stuk minder uitzonderlijk zijn.

Intermezzo

Beton als basis

Beton is een goed alternatief voor asfalt. Voor de multifunctionele weg is het zelfs superieur.

Als we vandaag de dag aan wegdek denken, dan denken we aan asfalt. De twee zijn bijna synoniem geworden. Asfalt heeft dan ook vele voordelen: het is relatief goedkoop; beweegt mee met de ondergrond; is vrij eenvoudig te repareren en is te recyclen. Bij een weg van beton denken de meeste mensen direct aan de Duitse 'Autobahn' die onder Hitler werd aangelegd of aan de Belgische snelweg (ondermeer de A21). Wat aan die wegen het meest opvalt, zijn de dwarsgroeven tussen de betonplaten die zich bij het rijden op een uitgesproken manier manifesteren.

Maar nu hebben we de betonweg 2.0. Hij werd ontwikkeld naar aanleiding van het programma 'Wegen naar de Toekomst' van Rijkswaterstaat. De ontwikkeling gebeurde door een samenwerkingsverband van Betonson, Heijmans, Arcadis en Ingenieursbureau M+P. Hij kreeg de naam 'Modieslab' mee.

De irritante overgangen tussen de betonnenplaten zijn bij de nieuwe betonweg vrijwel onmerkbaar geworden door de toepassing van een slimme voegconstructie: het is een soort 'kliklaminaat' met een nauwkeurige aansluiting tussen de platen. De betonnen platen zijn voorzien van een toplaag van ZOB (zeer open beton) dat een geluidsreductie van wel 8db kan bieden. Bij de overgang van ZOAB naar ZOB (bijvoorbeeld op het proefvak in Nieuwegein) wordt het in de auto en langs de weg ineens opvallend stil. De weg blijft 20 tot 40 jaar perfect vlak en de toplaag hoeft niet om de 7 tot 12 jaar vervangen te worden zoals bij asfalt. Individuele platen kunnen snel worden uitgewisseld. Daardoor levert de betonnen weg minder files en kosten door onderhoudswerkzaamheden op. Water wordt snel afgevoerd (nog sneller dan bij ZOAB) en de aanvangsstroefheid is hoog.

Sinds Modieslab in 2005 werd ontwikkeld is het op verschillende plaatsen toegepast. Bijvoorbeeld op een deel van het verkeersplein Ouderijn; op de Diamantstraat in Hengelo; en voor een stille bus- en trambaan (met ingegoten tramrails) in Blankenberge. De ervaringen zijn positief.

De betonweg 2.0 is ook relatief milieuvriendelijk. Hij heeft een lagere rolweerstand dan asfalt zodat het verkeer minder benzine verbruikt en minder uitlaatgassen uitstoot. Er is minder bandenslijtage en dat scheelt fijnstof. Het beton is zijn lange levensduur goed te recyclen. Onlangs won Modieslab dan ook de prijsvraag 'Frisse kijk op luchtkwaliteit'. Het belangrijkste nadeel is de aanschafprijs die al snel twee tot driemaal zo hoog is. Dat komt vooral door de fundering. Die moet voor de stijve betonplaten beter zijn dan voor meebewegend asfalt. (Bij een stabiele ondergrond kan het beton op een asfaltweg worden gelegd maar in veel gevallen moeten er heipalen de grond in.) Net als bij andere vormen van duurzaamheid – denk aan windmolens en zonnepanelen – zijn de kosten over de gehele levensduur echter een heel ander verhaal. Het consortium dat Modieslab in de markt heeft gezet schat dat je uiteindelijk – als je alle kosten over een levensduur van 20 tot 25 jaar meerekent – goedkoper uit bent.

Speciaal voor de multifunctionele weg hebben de in de fabriek geproduceerde betonplaten veel voordelen. Denk bijvoorbeeld aan het inbouwen van warmtewinning; inductiestroken; verlichting; draadloos Internet; elektriciteitsleidingen; sensoren; antigeluid en zonnecellen. Deze apparatuur kan bij het gieten van het beton onder geconditioneerde omstandigheden worden ingebouwd. Dat is relatief goedkoop. De kwaliteit van het werk kan nauwkeurig worden gemonitord wat leidt tot een hogere betrouwbaarheid. Individuele platen zijn bij eventuele storingen snel te vervangen. Ook kwetsbare apparatuur kan worden ingebouwd: zij wordt beschermt door het keiharde beton dat (anders dan asfalt) niet vervormt. Als er een fundering nodig is kan deze 100 jaar meegaan en zij biedt de mogelijkheid tot het aanleggen van watergangen, faunapassages en kabels en leidingen onder de weg.

2030

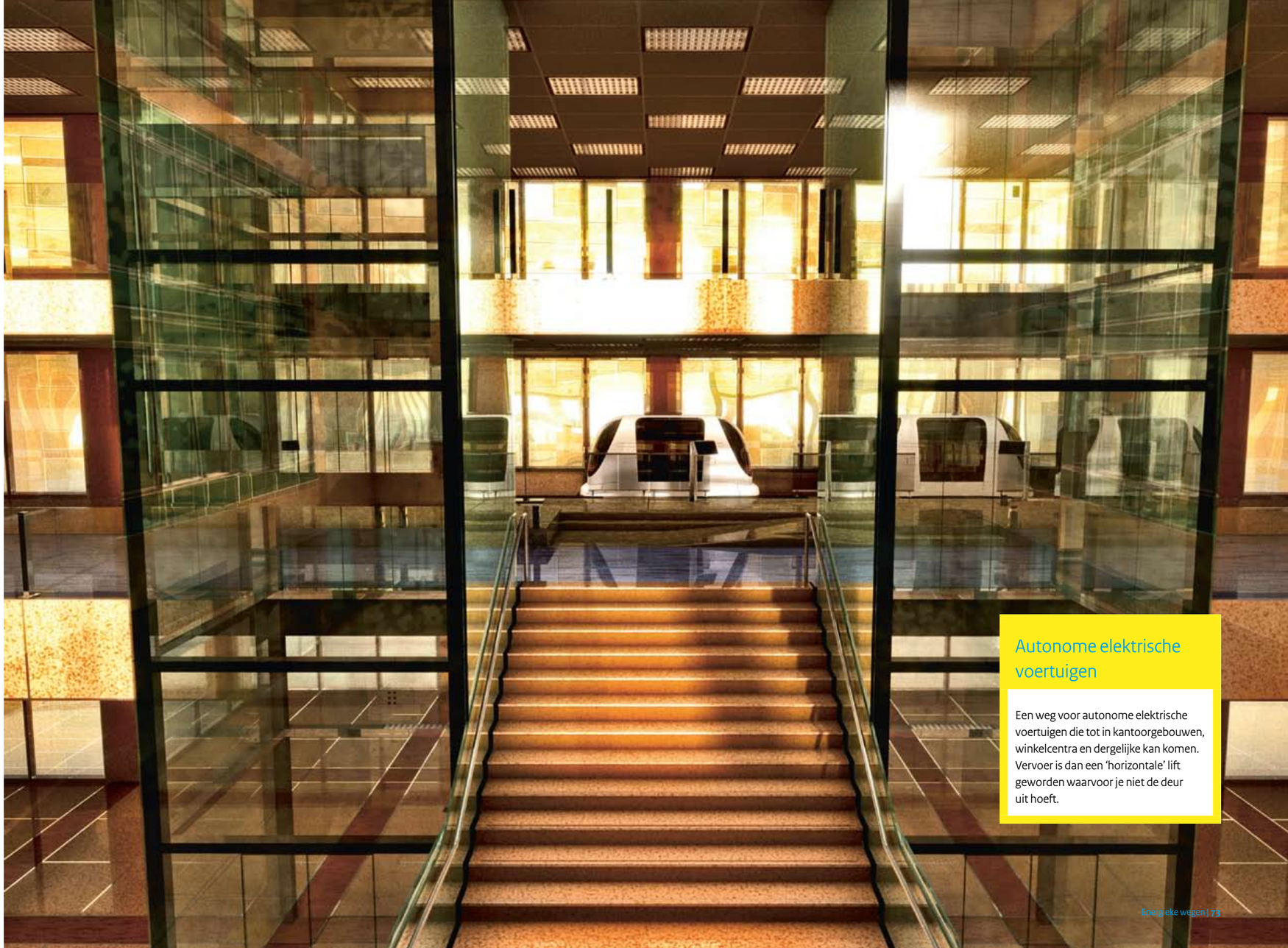
2030: duurzaam is standaard

De energietransitie is in volle gang en het is menens. Olie is duurder en schaarser dan ooit en het aantal conflicten om olie neemt toe. Wat ook toeneemt, is de frequentie van orkanen, bosbranden en mislukte oogsten. Door droogte, verzilting en mismanagement verandert steeds meer landbouwgrond in woestijn. Stukken van Afrika en Indonesië zijn de facto overgenomen door Chinese landbouwers die voedsel produceren voor hun thuisland, met alle internationale spanningen van dien. Maar het is ook een kleinere wereld dan in 2010. Uitgezonderd de allerarmsten kan iedereen communiceren met iedereen en taalbarrières zijn geslecht door realtime vertaalprogramma's. Dat zorgt voor een snellere en effectievere aanpak van problemen.

Wereldwijd is er een 'sense of urgency' als het gaat om duurzame energie. Er worden jaarlijks duizenden miljarden euro's in geïnvesteerd. De vraag naar fossiele brandstof is over zijn piek heen. Tweede generatie biobrandstof wordt volop gebruikt als grondstof. Slash and burn (in 2010 goed voor 20% van het menselijke broeikasgas) is teruggedrongen doordat regenwouden behandeld worden als natuurparken die met internationale steun in stand gehouden worden. Milieubewuste carnivoren kunnen kiezen voor een lapje kweekvlees.

In China en India gaat de transitie het snelst omdat zij de minste fossiele infrastructuur hebben en omdat de kosten van fossiele brandstof een relatief groot percentage van hun totale inkomen vormen. Het Midden Oosten werkt mee omdat zij beseffen dat zij het van duurzame energie zullen moeten hebben als de olie op begint te raken. Abu Dhabi was in dat opzicht een trendsetter. Bovendien hebben zij een droom: ooit zal de woestijn veranderen in een oase (zie afbeelding op pagina 74).

Elektrisch vervoer is de norm en waterstof is aan een comeback bezig
In 2030 lijkt het lot van benzineauto's op dat van rokers: ze worden op steeds meer plekken geweerd. De meeste nieuwe auto's die verkocht worden zijn dan ook in staat om volledig elektrisch te rijden. Er staan overal laadpalen en op verzorgingsplaatsen langs de snelweg is snelladen en batterijen wisselen mogelijk. Gemeenten en ministeries hebben hun gehele vloot elektrisch gemaakt, inclusief een mooie bolide voor de burgemeester of minister.



Autonome elektrische voertuigen

Een weg voor autonome elektrische voertuigen die tot in kantoorgebouwen, winkelcentra en dergelijke kan komen. Vervoer is dan een 'horizontale' lift geworden waarvoor je niet de deur uit hoeft.

In Abu Dhabi zal duurzame stroom voor wegverkeer in belangrijke mate worden opgewekt met behulp van zonnewarmtecentrales. De restwarmte die overblijft kan gebruikt worden om water te ontzilten en daarmee groene oases in de woestijn de scheppen.

General Motors voorziet een toekomst met compacte zelfsturende tweewielers zoals deze. Die kunnen je dan overal in de stad afzetten en ophalen.

Inductie is uit de pilotfase. Taxistandplaatsen worden standaard voorzien van inductief laden. Wie het zich kan permitteren laat het ook inbouwen in zijn eigen parkeerplek. In Nijmegen en Amsterdam zijn inmiddels alle taxi's elektrisch. In Groningen rijden er elektrische bussen die worden opgeladen met inductiestroken in de weg.

Drukke trajecten krijgen standaard inductiestroken. Voor autobezitters die deze trajecten vaak gebruiken is de aanschaf van een inductiesysteem in de auto interessant. Van hier naar het Ruhrgebied en terug is de snelweg voorzien van een inductiestrook op de rechter rijbaan. Verschillende vervoersbedrijven rijden eroverheen met elektrische vrachtwagens.

Waterstofauto's zijn de nieuwe hybriden. Hoewel ze meer energie gebruiken zijn ze ideaal voor tochten waarbij de actieradius (zonder op te laden) belangrijk is of voor gebieden waarin een elektriciteitsnet met oplaadpunten ontbreekt. Net als volledig elektrische auto's zijn ze stil en schoon. Er zijn inmiddels ook elektrische vliegtuigen op waterstof in gebruik, vooral voor militaire toepassingen.

Informatie- en communicatietechnologie heeft het vervoer getransformeerd
Zelf sturen is er in veel gevallen niet meer bij: te gevaarlijk. De automatische piloot is bijvoorbeeld verplicht als de automobilist in een snel en energiezuinig 'treintje' over de snelweg wil rijden. Ook in andere situaties staan de computers in de auto en de sensoren in de weg voortdurend met elkaar in contact. Daardoor kunnen de bestuurder en de automatische piloot worden gewaarschuwd voor naderend gevaar. Bijvoorbeeld een auto die plotseling remt of een kind dat plotseling oversteekt. Energie gebruiken of terugleveren gaat automatisch: elektrische auto's maken onderdeel uit van een smart grid en kiezen namens hun eigenaar wanneer dit het voordeligst is.

In verschillende steden wordt gewerkt met slimme 'stadsauto's'. Dit zijn kleine zelfsturende tweepersoons auto's. De reiziger kan onderweg ongehinderd om zich heen kijken en heeft uiteraard internet connectiviteit. Ze worden opgeroepen met de mobiele telefoon. Daarop is te zien waar 'jouw' vervoermiddel zich nu bevindt en over hoeveel seconden het waar zal parkeren. Het vervoermiddel wordt per minuut gehuurd of is onderdeel van een vervoersabonnement. Als het niet in gebruik is parkeert het voertuig zichzelf en wordt het opgeladen. Deze slimme opvolger van de witte fiets blijkt populairder dan taxi, tram en bus.

Interessant is de interactie tussen stadsauto en nieuwbouwwijk. In 2010 werden er incidenteel wijken en vakantieparken gebouwd waarin bewoners hun auto aan de rand van de woonwijk parkeerden: rondom de huizen hoeft er dan geen ruimte ingepland te worden voor wegen en parkeerplaatsen; de woonomgeving is stiller; er is meer plaats voor tuinen; en kinderen en huisdieren kunnen zonder gevaar voor lijf en leden buiten spelen. Incidentele ambulances, brandweerauto's en verhuiswagens kunnen gebruik maken van 'corridors' die over speelplaatsen en gazons lopen: multifunctionele wegen. De belangstelling voor het concept nam snel toe nadat de wijken voorzien werden van eigen stadsauto's zodat bewoners de laatste tweehonderd meter geen boodschappen meer hoefden te sjouwen. In combinatie met een stad die slimme stadsauto's gebruikt is de synergie nog sterker. De bewoners van de wijk gebruiken de 'echte' auto eigenlijk alleen nog maar voor lange ritten buiten de stad en veel bewoners hebben geen eigen auto meer. Hun energieverbruik voor vervoer is daardoor drastisch afgenomen.

Stil vervoer wordt financieel gestimuleerd. Dat gebeurt niet alleen door de motor elektrisch te maken maar ook met lichtere constructies, stille banden en met aerodynamisch vormen die minder windgeruis veroorzaken. De grootste geluidsreductie komt in 2030 uit het gebruik van antigeluid. De beschikbare rekenkracht en de slimme communicatie tussen auto en weg maken opmerkelijke geluidsreducties mogelijk.

Bovenal zorgt informatietechnologie ervoor dat we minder reizen. Het Nieuwe Werken is standaard geworden. Met meerdere personen videoconferencen terwijl er samen aan een document wordt gewerkt is in 2030 net zo normaal als SMS'en nu. Militairen, gamers en hippe zakenlui gebruiken zelfs omgevingen waarin alle participanten zich visueel en auditief volledig in een gezamenlijke virtuele wereld bevinden.

Elektriciteit in overvloed
Er zijn elektriciteitsleidingen over de Noordzee aangelegd die Nederland, Engeland, Denemarken en Noorwegen met elkaar verbinden. Parken met windvliegers kunnen op deze leidingen aansluiten (de zogenaamde 'stopcontacten op zee') en leveren energie die goedkoper is dan van kolencentrales. Elektrische auto's, supergrids en smart grids vangen fluctuaties in de windkracht op. Emeritus hoogleraar Wubbo Ockels is getuige van de eerste echte laddermolen tot in de stratosfeer. De windvlieger is het nieuwe symbool voor Nederland als land van wind. Zonnepanelen zijn (nog) duurder dan wind maar leveren de energie direct waar hij nodig is. De meeste nieuwe gebouwen zijn door hun zonnecellen netto-energieproducenten.

Er wordt steeds vaker gekozen voor betonnen multifunctionele wegen met ondermeer: inductief opladen, internet-connectiviteit, dynamische OLED-verlichting en antigeluid. Maar de grootste doorbraak is elektriciteit die wordt gewonnen met de weg. De X-prize is gewonnen door een bedrijf dat er in geslaagd is om wegdek een slijtvaste en transparante slijtlaag te geven die het inbouwen van zonnecellen in de weg mogelijk en rendabel maakt. Rijkswaterstaat heeft twee projecten van de toplaag voorzien en de eerste resultaten zijn goed. Als het zo doorgaat levert de weg in 2050 meer energie dan hij kost.

Auto's die als rijen winkelwagens opgesteld staan op strategische punten in de stad.

Nawoord

De zoektocht naar een energieneutrale weg is ten einde

Ten minste, de tocht in dit boek. We zochten naar kansen en mogelijkheden voor inwinning van duurzame energie om en bij de weg. We deden dat met een positieve grondhouding; het glas moest half vol in plaats van half leeg.

Tijdens het schrijven werden we zelf verrast en geboeid door de ontwikkelingen van de laatste paar jaar en de kansen die er liggen. Op onder meer het gebied van warmte-koude opslag en van wind- en zonne-energie vindt veel innovatie plaats. De beweging om meer en meer gebruik te maken van duurzame energie is in gang gezet en zal gestaag doorgaan. Omdat het moet – fossiele brandstof raakt op –, omdat het economisch rendabel gaat worden en omdat het een fijn gevoel geeft niet mee te werken aan de uitputting van grondstoffen. Ook het groeiend gebruik van de elektrische auto zal een sterke stimulans zijn voor de inwinning van duurzame energie.

Het boek is uniek in haar soort geworden. Wij zijn geen geïntegreerde publicatie tegengekomen waarin methoden om ons wegvervoer duurzaam te maken zo helder en duidelijk naast elkaar zijn gezet. We zijn daar trots op en hopen dat veel mensen baat bij dit boek hebben.

In dit boek wordt schone energie geplaatst in de context van een energieneutrale weg. Er wordt uitgegaan van een gesloten systeem; er moet voldoende energie worden gewonnen om of bij de weg om er al het vervoer over die weg mee te laten rijden. Het idee is sympathiek; zelfvoorziening voedt het gevoel van zelfstandigheid en onafhankelijkheid van de mens. Het idee is ook discutabel, omdat er andere insteken zijn te bedenken met evenveel relevantie. Bovenal is het idee inspirerend; van wegvervoer in Nederland een duurzaam gesloten systeem maken is – vergeleken met andere landen en bedrijfstakken – uitzonderlijk lastig. In dit boek laten we niettemin zien dat het kan.

Auke Hoekstra
Auteur
Cleantech Strategies

Dineke van der Burg
Projectleider
Rijkswaterstaat

Interviews en bijdragen

Remi Blokker, Bluerise
Wim van de Boogaard, Rijkswaterstaat
Wim van den Boom, Wegbouwkundig Buro van den Boom
Ewald Breunesse, Shell
Ton van den Brink, Rijkswaterstaat
Scott Brusaw, Solar Roadways
Dineke van der Burg, Rijkswaterstaat
Noud van Deurzen, Betonson
Ellemieke van Doorn, Rijkswaterstaat
Mees Drevijn, D.D. Creative
Jan Coen van Elburg, RebelGroup Advisory
Marleen van den Ham-Aertsen, InnovatieNetwerk
Bob Hamel, Rijkswaterstaat
Frank van Hedel, Staatsbosbeheer
Pascal Heijnen
Dirk van Heijst, Hermans Energy
Frank Hieminga, Dystec
Iris Hoekstra-Roscam Abbing, SDB
Joke Jager, Rijkswaterstaat
Wil René Jansen, Rijkswaterstaat
Fred Jonker, CUR
Harald Kerres, Xebra
Leon Kester, TNO
Matthijs de Kleine, Rijkswaterstaat
Petra van Konijnenburg, Rijkswaterstaat
Diederik Koning, Ampyx Power
Barry Koperberg, OPAi oneplanetarchitecture institute
Stefan Krispin, Bombardier
Steffen Kümmell, IAV
Bas Lansdorp, Ampyx Power
Wubbo Ockels, Delft University of Technology
Marco Raven, SierraVision
Tjerk Reijenga, BEAR Architecten Gouda (NL)
Ulrich Reker, Vahle
Bram Renker, Arcadis
Marcel Roozendaal, Ooms Avenhorn Holding BV
Roland Schmehl, Delft University of Technology
Paul Sijben, Perzonae
Simon P. Smiler, citytransport.info
Lonneke Tabak, Universiteit Utrecht
Stijn Verplak, IF Technology
Cees Volkers, ECN
Bianca van de Waardt, Rijkswaterstaat
Aart de Wachter, Delft University of Technology
Sten de Wit, TNO
Paul van der Woerd, Terts
Gruus van Woerkom, Byte
Arthur ten Wolde, IMSA

Afbeeldingen

Cover. Neville Mars, Dynamic City Foundation (solar forest)
Peter Hilz / Hollandse Hoogte
Pagina 4. NASA
Pagina 5. © Trustees of the British Museum
Pagina 8. Samengesteld door de auteur op basis van verschillende bronnen
Pagina 13. ESA - AOES Medialab
Pagina 14. Datasource: UNEP, International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), World Atlas of Desertification, 1997. Illustration by Philippe Rekacewicz, UNEP/GRID-Arendal
Pagina 17. Verticrop van Valcent Products
Pagina 21. Jeroen Oerlemans / Hollandse Hoogte
Pagina 22. Bas Beentjes / Hollandse Hoogte
Pagina 23. Bram Belloni / Hollandse Hoogte
Pagina 25. Samengesteld door de auteur op basis van verschillende bronnen
Pagina 26. Bombardier
Pagina 27. citytransport.info
Pagina 27. Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)
Pagina 28. Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV)
Pagina 29. Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV)
Pagina 30. Samengesteld door de auteur op basis van verschillende bronnen
Pagina 31. Gabriel Perez Diaz, SMM, Instituto de Astrofisica de Canarias (IAC)
Pagina 33. Ontwerp 'Energie-zelfvoorzienende databrug' door RAU architecten voor OZZO
Pagina 39. Kite Power group, Technische Universiteit Delft
Pagina 40. Ampyx Power
Pagina 41. Kite Power group, Technische Universiteit Delft
Pagina 43. Road Energy Systems / Ooms Avenhorn Holding
Pagina 44. Sainsbury's
Pagina 45. Road Energy Systems / Ooms Avenhorn Holding
Pagina 49. Door Syb Wartna op flickr.com.
Pagina 51. Road Energy Systems / Ooms Avenhorn Holding
Pagina 53. Samengesteld door de auteur op basis van verschillende bronnen
Pagina 53. Illustratie door de auteur op basis van het WBGU rapport 'World in Transition – Towards Sustainable Energy Systems' uit 2003
Pagina 55. National Renewable Energy Laboratory – National Center for Photovoltaics
Pagina 56. © BEAR Architecten Gouda (NL)
Pagina 59. Tineke Dijkstra / Hollandse Hoogte
Pagina 61. Todd Carlson
Pagina 62. BMW Group
Pagina 64. Opname onder de microscoop van glas met een 'Aluminium-Induced Texture' (AIT). University of New South Wales, Sydney, Australia – School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering.
Pagina 67. Bram Belloni / Hollandse Hoogte
Pagina 68. Door telex4 / Tom Chance op flickr.com.
Pagina 72. ULTra PRT
Pagina 71. © ANP PHOTO 2010 / MobieSlab Wegdek, Tom Borsboom
Pagina 74. Saharaforestproject.com
Pagina 74. General Motors EN-V
Pagina 75. William Lark Jr, MIT
Pagina 76. General Motors EN-V

Noten

[1] De cijfers zijn afgeleid uit een grafiek in (Smil 2000) pagina 108.

[2] Zie (Koppelaar 2009) voor een transcriptie van de speech die de prins gaf op de 'world future energy summit' in Abu Dhabi.

[3] Zie (IPCC 2007) pagina 51.

[4] Voor energieverbruik per land zie (BP 2010).

[5] Tekenend is dat het Amerikaanse leger – tot voor kort een partij die zich niet uitliet over olieschaarste – zich nu ook aangesloten lijkt te hebben bij de experts die waarschuwen voor olieschaarste en de daaruit voortvloeiende spanningen. Een artikel in de Guardian van 10 april (Macalister 2010) zet de belangrijkste conclusies op een rij van een studie van het leger (United States Joint Forces Command 2010): "Het productieoverschot kan tegen 2012 geheel verdwenen zijn en tegen 2015 zou het tekort 10 miljoen vaten per dag kunnen zijn" en "Hoewel het moeilijk is om te voorspellen welke economische, politieke, strategische effecten zo'n tekort zou produceren, zou het zeker de groeiperspectieven in zowel industrielanden als ontwikkelingslanden reduceren. Een dergelijke economische vertraging zou onopgeloste spanningen verder verergeren."

[6] Het gebruik van olie door oorlogsmachinerie is indrukwekkend. Zo verbruikt het Amerikaanse leger in Irak vier maal zoveel brandstof als alle geallieerde strijdkrachten in de tweede wereldoorlog bij elkaar. Enkele voorbeelden: per soldaat wordt er meer dan 35 liter per dag gebruikt, een Abrams tank rijdt ongeveer 1 op 1 (80 liter per 100 km) en een B52 gebruikt 12.500 liter per uur. In totaal gebruikt het Amerikaanse leger bijna 20 miljoen ton olie per jaar. Dat is 20% van het totale energieverbruik van Nederland en anderhalf maal het energieverbruik van het totale Nederlandse wegvervoer. Zie (Karbuz 2010).

[7] Een goede inventarisatie is in 2009 gemaakt door de RIVM. Hun conclusie is dat er per persoon één tot anderhalf gezond levensjaar verloren gaat door de uitstoot van fijnstof. Dat vertaalt zich in minimaal 180.000 gezonde levensjaren per jaar. Dit wordt vaak ook uitgedrukt als 18.000 doden per jaar maar deze wijze van formuleren wordt door de auteurs afgeraden. Zie (Knol, et al. 2009).Daarmee is de impact ongeveer half zo groot als van roken. Zie onder meer (Trouw 2005). Hoewel kolencentrales ook veel fijnstof uitstoten zijn de gevolgen voor de volksgezondheid relatief gering omdat deze uitstoot op grotere afstand van bevolkingscentra plaatsvindt. De uitstoot van kolencentrales is bovendien beter te beheersen omdat zij gecentraliseerd is. Nieuwe technieken voor het schoonmaken van uitstoot of voor het opslaan van CO_2 zijn voor deze centrales dan ook veel makkelijker mogelijk. Daarom moeten de gezondheidsconsequenties van fijnstof voor het overgrote deel aan wegtransport worden toegeschreven. Een laatste kanttekening is dat een deel van het fijnstof wordt veroorzaakt door banden op wegdek. Welk deel is ons niet bekend.

[8] Die 165 watt is de gemiddelde hoeveelheid een Nederlander anno nu eet maar voor de volledigheid moet worden gezegd dat er in 1850 – het jaartal waarvoor we dit voorbeeld geven - gemiddeld veel minder werd gegeten. Zo lag het wereldgemiddelde volgens de cijfers van het World Resources Insitute in 1961 op circa 100 watt (ofwel 3,5 GJ per jaar ofwel 2.254 calorieën per dag). In 1850 was het voedselgebruik per Nederlander waarschijnlijk nog lager dan het wereldgemiddelde in 1961.

[9] Zie (Smil 2008) pagina 188-190.

[10] Natuur en landbouw zijn afhankelijk van een vruchtbare toplaag, meestal aangeduid met de Engelse term top soil. De processen die deze toplaag vruchtbaar maken worden nog maar zeer beperkt begrepen. Als deze grond uitgeput raakt is er nog geen oplossing voorhanden waarmee de grond binnen enkele tientallen jaren weer vruchtbaar kan worden gemaakt. Bovendien kan de top soil in bepaalde omstandigheden vrij eenvoudig verdwijnen. Zo leidt het kappen van tropisch oerwoud er vaak toe dat de landbouwgrond die vrijkomt binnen enkele jaren wegspoelt waarna er onvruchtbare grond achterblijft. Dit proces noemt men bodemerosie.

[11] Uitgaande van het gemiddelde scenario van de Verenigde Naties. Zie bijvoorbeeld dit persbericht: (United Nations 2009).

[12] Voor 1 kg vlees is veel plantaardige voeding nodig: 32kg bij koeien, 11kg bij varkens en 4kg bij kippen. Bij het totale bereidingsproces gaat er vervolgens nog meer energie verloren. Puur energetisch gezien bevat gekookt vlees slechts een klein deel van de energie die er in geïnvesteerd is: 2% bij rundvlees, 5% bij varkensvlees en 7% bij kippenvlees. Als we alleen kijken naar dierlijke eiwitten dan is de efficiency van de omzetting als volgt: 5% in rundvlees, 13% in varkensvlees, 25% in kippenvlees, 30% in eieren en 40% in melk. Simpel gezegd: een vegetariër die zijn dierlijke eiwitten helemaal uit melk haalt verbruikt daarvoor 8 maal minder voedsel dan iemand die zijn dierlijke eiwit geheel uit rundvlees haalt. Zie (Smil 2008) pagina 299.

[13] Een veelheid aan studies waarschuwt intussen voor de invloed van biobrandstof op voedselschaarste en hogere voedselprijzen. Zie ondermeer (Searchinger et al 2008) en (Fargoine et al 2008).

[14] Deze mening is ondermeer zo geformuleerd door Lester Brown, oprichter en president van het Earth Policy Institute en Jonathan Lewis, klimaatspecialist en advocaat werkend voor de Clean Air Task Force in de Washington Post van 22 april 2008. Zie (Brown en Lewis 2008).

[15] "Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases through Emissions from Land-Use Change." Zie (Searchinger et al 2008). Een goede weergave is ook terug te vinden in een interview met Louise Fresco en Lucas Reijnders, professoren aan de Universiteit van Amsterdam: (Jansen 2009).

[16] Deze bevinding werd in eerste instantie gerapporteerd door Paul Crutzen, een Nobelprijswinnende chemicus verbonden aan het Max Planck instituut in Duitsland: (Crutzen 2008). Zij werd in 2009 bevestigd door de International Council for Science (een samenwerkingsverband van wetenschappelijke instellingen) in een rapport dat ook online beschikbaar is: (Howardth en Bringezu 2009).

[17] Dominique Strauss-Kahn, hoofd van het IMF: "For a long time we will have a deficit in foodstuffs. ... I have listened to some Ministers ... who are very, very strongly against this kind of thing, talking about crime against humanity using foodstuff to produce biofuels. ... I think that we absolutely need to work on that and very rapidly." Zie (International Monetary Fund 2008).

[18] Zie (Niza 2010).

[19] Jean Ziegler is special rapporteur on the right to food van de Verenigde Naties. De schatting van de stijging van de productiviteit komt van F.O. Licht. Zie bijvoorbeeld (ICIS news 2010).

[20] Edward Smeets in (Ublad 2008).

[21] De schattingen lopen sterk uiteen. De meest optimistische studie is (Smeets 2008) die 100% mogelijk acht wanneer alle huidige landbouwgrond op een technologisch optimale manier wordt ingezet. Daardoor zou ¾ van de huidige landbouwgrond kunnen worden vrijgemaakt, ondanks de toenemende vraag naar voedsel. De bijdrage van biomassa uit afvalstromen en de resten van landbouw en bosbouw is in hun model relatief beperkt. Ewald Breunesse, manager energietransitie van Shell gaf in een interview met de auteur aan dat Shell zelfs op de lange termijn hooguit 10 tot 20% van de autobrandstof (en dus 2,5 tot 5% van het totale energiegebruik) uit biobrandstof denkt te kunnen halen. Lester Brown van het Earth Policy Institute schat dat in 2020 0,2 terawatt (circa 1%) uit biomassa zou kunnen komen – (Brown 2009) pag. 132 – maar raadt wel aan om deze energie te gebruiken voor het aandrijven van elektrische auto's omdat dit 82% efficiënter is dan het direct gebruiken van dezelfde biomassa als autobrandstof.

[22] Voor een handig overzicht in een prachtig plaatje zie: (World Resource Institute 2009). Dit zijn berekeningen van het World Resource Institute uit 2005 op basis van IPCC berekeningen uit 2000. Van de totale menselijke uitstoot van broeikasgassen is de verdeling in dit overzicht: 13,5% door transport (9,9% wegvervoer, 2,3% overig vervoer, 1,6% vliegvervoer), 13,5% door landbouw en 18,3% door ontbossing.

[23] In (Atran en Medin 2010) wordt beschreven hoe de gewoontes (in dit geval ondermeer religies) van bepaalde natuurvolkeren in het Amazonegebied een opvallende congruentie bevatten met moderne wetenschappelijke opvattingen over het behoud van de biodiversiteit in deze habitats. Atran stelt dat het financieren van de juiste stammen en het bieden van een rudimentaire bescherming tegen boskap en stropen deze habitats tegen ongelofelijk lage kosten kan laten floreren. Dat is belangrijk omdat dergelijke habitats een grote biodiversiteit bevatten en grote hoeveelheden kooldioxide vastleggen.

[24] Zie ondermeer (Jansen 2009).

[25] Zie (Smeets 2008).

[26] Gesprek van de auteur met de heer Frank van Hedel die hiervoor binnen Staatsbosbeheer verantwoordelijk is. Overigens interesseert het u wellicht ook (als u eenmaal in deze voetnoot bent aangeland) dat er vaak bewust niet voor biomassa wordt gekozen. Zo streeft Rijkswaterstaat met het beheer van de berm langs de snelheid drie zaken na: weinig maaien; weinig dieren en grote biodiversiteit onder het plantenleven. Het effect is een uniek milieu waarin veel plantensoorten voorkomen die elders in Nederland zeer schaars zijn. Uit een gesprek van de auteur met Wim van den Boogaard van Rijkswaterstaat.

[27] In (Pahl en McKibben 2008) wordt uitgegaan van 1.190 tot 1.500 liter per hectare (0,13-0,16 W/m^2) voor rapeseed/koolzaad en 1.590 liter voor Jatropha. In (Cushion en Whiteman 2010) wordt op pagina 97 op basis van cijfers van de FAO uitgegaan van 1.100 liter per hectare (0,13 W/m^2). Op pagina 118 worden ook bruto/netto waarden gegeven. Mais heeft ongeveer evenveel energie in de vorm van fossiele brandstof nodig (ondermeer voor transport, raffinage en bemesting met kunstmest) als het aan ethanol oplevert. Rapeseed/koolzaad heeft half zoveel nodig zodat er een netto opbrengst van 0,07 W/m^2 overblijft. Vervolgens wordt kwalitatief ingegaan op de gevolgen van veranderend landgebruik en kunstmest die bij deze bruto/netto berekening nog niet is meegenomen. Veel studies gaan ervan uit het verbranden van mais en rapeseed/koolzaad per saldo meer broeikasgas oplevert dan het gebruik van fossiele brandstoffen.

[28] Zie het optimale scenario op pagina 87 van (Sovacool en Brown 2007).

[29] In het laboratorium zijn er een aantal doorbraken op dit gebied gerealiseerd. Zo heeft professor Nocera (Bulls 2008) een goedkope elektrode zonder platina weten te produceren. Deze ontwikkeling staat echter nog in de kinderschoenen, onder meer omdat de efficiency van deze elektrode vooralsnog extreem laag is. Hetzelfde geldt voor de ontwikkelingen rond fotokatalytische waterstofproductie. Commercieel verkrijgbare waterstof wordt op dit moment gemaakt van aardgas. Dat is in de overgangsfase een uitstekende optie maar het zorgt niet voor een reductie in de uitstoot van broeikasgassen of voor een verminderde afhankelijkheid van fossiele brandstoffen.

[30] Zie (Hanschke, et al. 2009) pagina 103: 'TNO schat de kosten voor een landelijk dekkende waterstofinfrastructuur op minimaal enkele honderden miljarden. ECN lijkt hiervoor een lagere schatting te hebben gehanteerd.'

[31] Zie (Hoekstra 2009) pagina 40.

[32] In oktober 2009 was de prijs van een Honda Clarity volgens Fortune nog $300.000,-. Zie (Copeland 2009).

[33] Zie (United Press International 2009).

[34] Dit zijn gemiddelden. Er zijn ook elektromotoren die 95% efficiënt zijn en de efficiëntie van een benzinemotor ligt ongeveer tussen de 15% en 35%.

[35] De gemiddelde Nederlandse auto gebruikt 7,5 liter benzine per 100 kilometer (CBS 2004). Een Toyota Prius gebruikt in de praktijk ongeveer 5 liter per 100 kilometer. Tegen de huidige benzineprijs van € 1,55 zit de prijs per kilometer daarmee op 7,8 cent voor een Prius en 11,6 cent per kilometer voor de doorsnee auto. We hebben 10 cent als gemiddelde aangehouden. Om de prijs van elektrisch rijden te berekenen moeten we bepalen welk type auto we vergelijken. Het verbruik van elektrische auto's werkt namelijk iets anders dan het gebruik van auto's met brandstofmotoren. Bij auto's met brandstofmotoren zorgen grote motoren voor een groter verbruik terwijl bij een elektrische auto eigenlijk alleen gewicht en luchtweerstand tellen. Zo is een elektrische sportwagen als de Tesla zuiniger dan een Prius die elektrisch rijdt terwijl een vergelijkbare benzinesportauto twee tot vier maal zoveel op benzine gebruikt als een Prius die op benzine rijdt. Als we sportauto's zouden vergelijken zou het prijsvoordeel van de elektrische auto dus veel groter zijn. Als we uitgaan van de Toyota Prius dan is het verbruik 0,15 kWh per kilometer. Uitgaande van een elektriciteitsprijs van 22 cent per kilowattuur komt de prijs per kilometer daarmee op 3,3 cent.

[36] Bijvoorbeeld Robert Lutz, een topman van General Motors die in een interview met Newsweek stelde: "The electrification of the automobile is inevitable" (Naughton 2007). Richard Smokers, expert duurzame mobiliteit van TNO stelt dat het wagenpark de komende decennia een verregaande elektrificering door zal maken. Zie (Hoekstra 2009) pagina 54.

[37] De loodaccu was bijna 100 jaar de beste oplaadbare batterij maar de laatste jaren gaan de ontwikkelingen snel. Het is tekenend dat bedrijven met een achtergrond in consumentenelektronica en computers hier een voortrekkersrol hebben. Zo vond Sony de lithium batterij uit en is IBM bezig om – met behulp van supercomputers – de lithiumlucht batterij te ontwikkelen. In theorie kan de lithiumlucht batterij 11 kWh per kilogram opslaan. Voor een actieradius van 500 kilometer is dan nog slechts een batterij van 7 kilogram nodig. IBM zelf speculeert over een batterij die een tien keer grotere dichtheid heeft dan de huidige lithium-ion batterijen ofwel 50 kilo voor 500 kilometer. Alles uitgaand van 0,15 kWh per kilometer.

[38] Zie (Hoekstra 2009) pagina 44.

[39] Zie (Hoekstra 2009) pagina 48 en 49.

[40] Voetnoot op basis van berekening KIM die mij toegestuurd is.

[41] Zie ondermeer het interview met André Postma van Enexis op bladzijde 46 van (Hoekstra 2009).

[42] Voor de synergie tussen elektrisch rijden en duurzame elektriciteitsopwekking verwijzen we u naar (Tabak 2010). Een gemiddelde personenwagen gebruikte volgens het CBS in 2004 7,5 liter per 100 kilometer. Uitgedrukt in kWh is dat 67 kWh per 100 kilometer. Een middenklasser als de Toyota Prius gebruikt wanneer hij helemaal op basis van elektriciteit gevoed wordt 15 kWh per 100 kilometer. Het verschil is een factor 4,444. Hoewel er hier en daar elektrische vrachtwagens ontwikkeld worden (denk aan de elektrische vuilniswagen 'Binkie' die in Rotterdam wordt getest) kennen we geen benchmarks voor elektrisch vrachtvervoer. Wellicht is een elektrische vrachtwagen slechts vier maal zo zuinig en misschien is hij wel vijf maal zo zuinig. Om ons niet rijk te rekenen gaan we voor het totale wegvervoer uit van een factor vier.

[43] De hoeveelheid zonne-energie die planten in biomassa weten om te zetten wordt internationaal aangeduid met net primary productivity of NPP. De waarde van 4,9 kWh/m^2 voor koolzaad is overgenomen uit (Stöglehner 2003).

[44] Aanraken van bovenleidingen is dodelijk. Daarom moeten ze op een flinke hoogte worden aangebracht. Op die hoogte hangen ze echter nog steeds in de weg van bijzonder vervoer dat hierdoor dus in de problemen kan komen. Bovendien is niet duidelijk hoe een kleine personenwagen contact moet maken met een leiding op relatief grote hoogte: dat zou een flinke constructie vereisen, vergelijkbaar met wat we in de kermis kennen van botsauto's maar voor grotere vermogens. Al met al is dit idee nooit echt aangeslagen. Er zijn ook alternatieven mogelijk met mechanisch afgeschermde sleepcontacten naast of in de weg die worden geactiveerd als de auto passeert. Dergelijke systemen blijken tot nu toe echter relatief gevoelig voor mechanische problemen (bijvoorbeeld bij regen en sneeuw) en er bestaan twijfels over de veiligheid. Tegelijkertijd is de hoeveelheid onderzoek naar deze opties uiterst beperkt wat in schril contrast staat met het maatschappelijk nut. Wie bijvoorbeeld in staat is om een betaalbaar, betrouwbaar en veilig systeem van sleepcontacten te ontwerpen zou hiermee een grote impact kunnen hebben.

[45] Naast het interview dat de auteur had met Stefan Krispin, projectleider Primove van Bombardier komt deze informatie uit een artikel in het Parool (Stil 2009) en van de website van Bombardier (Bombardier 2010).

[46] De diameter is afgeleid van de gegevens van CBS. Zie (CBS 2010). Voor elk jaar is het aantal molens en hun gezamenlijke oppervlak gegeven waaruit de gemiddelde diameter valt af te leiden. De hoogte van de windmolen is helaas niet precies bekend. Daarom is deze geschat op basis van het gemiddelde verband tussen diameter en ashoogte. Zie hiervoor (Hassan 2010).

[47] Zie (Ingreenious BV 2009). De kleine windmolens werden elk op een 12 meter hoge mast gemonteerd en de masten werden op ruime afstand van elkaar in een open veld gezet. Overigens is er door Ingreenious een vergelijking gemaakt met een doorsnee grote windmolen die geen onderdeel was van de proefopstelling.

[48] Bij de proef werd er uitgegaan van een terugverdientijd van 15 jaar (exclusief rente) en er werd geen geld in rekening gebracht voor onderhoud en dergelijke. Dit zijn relatief rooskleurige aannames. Misschien verklaart dit een deel van de afwijking tussen de 2,7 cent per kWh voor een grote windmolen die in het rapport wordt genoemd en de 6-8 cent per kWh die in de literatuur usance is.

[49] Het rapport gaat – net als de meeste literatuur – uit van een efficiency van 50% voor een grote windmolen. Het verschil in efficiency met de Skystream is dan om precies te zijn 1,9. Dat is afgerond naar 2.

[50] Om de resultaten uit het rapport te verifiëren zijn we uitgegaan van de Enercon E-126 met een masthoogte van 136 meter. De kleine windmolens waren voor de proef allemaal op een mast van 12 meter hoogte geplaatst. De factor 2,5 die impliciet volgt uit het rapport betekent dat de gemiddelde windsnelheid op grotere hoogte 35% hoger lag. (Het vermogen van de wind is het verschil in windsnelheid (een factor 1,35) tot de macht drie.) Dit is een conservatieve aanname. Er zijn namelijk ook plekken waar het verschil in windsnelheid tussen 15 en 136 meter oploopt tot een factor 2. Het verschil in vermogen is loopt dan op tot een factor 8.

[51] Deze waarde is direct overgenomen uit het rapport.

[52] Er is uitgegaan van het gebruikelijke logaritmische windprofiel met een referentiesnelheid op 1.000 meter hoogte van 13 m/s. Langs de weg is verondersteld dat Zo=0,5 en Do=2. Op de wadden is uitgegaan van Zo=0,05 en Do=0,005. (Zo beschrijft de ruwheid van het terrein en Do de hoogte van obstakels op het terrein.) Overigens zijn de verschillen groter als wordt gekeken naar de windsnelheden die worden genoemd op de windkaart van Nederland op 100 kilometer hoogte van Senter Novem. Deze gegevens zijn hier niet gebruikt omdat er ook vergeleken diende te worden met de gegevens op 10 meter hoogte.

[53] Windmolens worden normaal gesproken op minimaal vijf maal hun diameter uit elkaar geplaatst. Dat levert 16 grote molens en 541 kleine per 10 kilometer. Het oppervlak is pi maal het kwadraat van de straal. Dat is 12.500 m^2 voor de grote windmolen en 11 voor de kleine.

[54] De efficiency van grote molens is 2 maal zo hoog. Het oppervlak is 34 maal zo groot. Het vermogen van de wind is 5/1,5=3,33 maal zo groot: 2 x 34 x 3,33 = 227.

[55] Dit is onderzocht in een studie waarin de Vogelbescherming en Nuon samenwerkten. De studie is niet online beschikbaar maar krantenberichten waarin de resultaten worden beschreven zijn eenvoudig te vinden.

[56] Een snelle Google search leert dat de combinatie windmills en Netherlands vaker voorkomt dan de combinatie met elk ander land. Ook Denemarken en Duitsland (waar het overgrote deel van de windmolens staat) scoren lager. Grappig is dat windmolens in combinatie met Nederland een veel vaker voorkomend woord is dan respectievelijk dijken (dikes), tulpen (tulips) en klompen (clogs).

[57] Voor diverse berekeningen met klassieke windmolens verwijzen we naar (V. Smil 2008) pagina 186. Hier wordt een optimaal opgetuigde klassieke Nederlandse windmolen als uitgangspunt genomen. De molen levert op de as 7.500 watt maar omdat hij interne verliezen heeft van 61% blijft daar slechts 2.925 watt van over. – De windmolen heeft een rotordiameter van 30 meter. Het oppervlak van een cirkel met een diameter van 30 meter is 706 m^2. De molen levert 4,14 W/m^2 op. – Er werd uitgegaan van een windsnelheid van 8,5 m/s. De formule voor windkracht is ½ * de dichtheid van lucht (1,225 kg/m^3 op zeeniveau) * de luchtsnelheid tot de derde macht. Dit betekent dat de wind een vermogen leverde van 188 W/m. De efficiency van deze laatste generatie Oudhollandse molen was dus 2,2%. – Een moderne molen met een wiekdoorsnede van 30 meter heeft volgens de Danish Wind Industry Association een efficiency van circa 40%. Een moderne windmolen van 30 meter is dus 18 maal zo efficiënt. – Moderne windmolens kunnen ook profiteren van de hogere windsnelheden waar de meeste energie in zit. Het piekvermogen van een moderne molen van 30 meter doorsnede ligt daarom rond de 350 kW. Dat is ongeveer 120 maal zoveel.

[58] Zie bijvoorbeeld (Rogers 2007) waarin de berekening wordt gemaakt voor een VW Jetta met een constante snelheid van 120 kilometer per uur. Overigens verschillen de luchtweerstand en rolweerstand per type auto. De rolweerstand is vooral afhankelijk van de breedte en het soort banden. De luchtweerstand is afhankelijk van de vorm. Zo hebben een Hummer H2en een Citroën CV2 een dubbel zo grote luchtweerstand als een Toyota Prius of een Honda Insight en die hebben weer een dubbel zo grote luchtweerstand als de Ford Probe V of de Aptera Motors Mk-0. Aerodynamisch de meest interessante auto van de afgelopen jaren is wellicht de Mercedes-Benz Bionic Car gebaseerd op de Boxfish. Bij het ontwerp van de auto liet men zich inspireren door een vis met de toepasselijke soortnaam koffervis. De auto weet veel binnenruimte te combineren met een opvallend lage luchtweerstand. De luchtweerstand van een auto kan worden uitgedrukt in een luchtweerstand coëfficiënt (Cd) die aangeeft hoeveel energie er nodig is om een auto met een bepaald frontaal oppervlak door de lucht heen te 'duwen'. De boxfish heeft ondanks zijn wat hoekige vorm een Cd van 0,19. Daarmee is hij aerodynamischer dan de zeer aerodynamische Prius (0,25) en véél aerodynamischer dan een Hummer (0,57) of een baksteen (2,0).Overigens: als er onregelmatig wordt gereden, bijvoorbeeld doordat er veel wordt opgetrokken en afgeremd, gaat hier ook veel energie naar toe. Een elektrische auto verliest minder energie bij het optrekken en kan een deel van de remenergie terugwinnen maar zelfs bij een elektrische auto gaat in het stadsverkeer een belangrijk deel van de gebruikte energie verloren bij het remmen. Maar slim anticiperend autorijden ('het nieuwe rijden') is voor een elektrische auto qua brandstofverbruik minder relevant dan voor een benzineauto.

[59] We gaan wederom uit van de Enercon E-126 die met een tussenruimte van 5 maal de rotordiameter (630 meter) wordt neergezet. De windmolen heeft een piekvermogen van 5 megawatt. Op toplocaties haalt hij een gemiddeld vermogen (een capaciteitsfactor) die 33% van 5 MW. Het landelijk gemiddelde ligt op 20 tot 25%. Wij gaan hier uit van een gemiddelde capaciteitsfactor van 13%. Vermenigvuldig: 6.000 * 5 * 0,13 = 3,9 gigawatt. Dat is ongeveer de 250 watt per persoon die we nodig hebben voor het wegvervoer.

[60] Uit het gedicht 'Het Huwelijk' van Willem Elsschot. Het complete couplet luidt: "Maar doodslaan deed hij niet, want tussen droom en daad staan wetten in de weg en praktische bezwaren, en ook weemoedigheid, die niemand kan verklaren, en die des avonds komt, wanneer men slapen gaat."

[61] Op basis van de ECN windkaart van de economische zone van Nederland, uitgaande van 90 meter hoogte zijn de windcondities op zee minimaal 50% beter dan de windcondities aan de kust. Zie (ECN 2004). Er wordt steeds meer ervaring opgedaan met het staande houden van molens op zee en de verwachting is dat de kosten hiervan verder zullen dalen. Elektriciteitstransport door het water ten slotte (bijvoorbeeld met behulp van HVDC) wordt steeds goedkoper. Plaatsing zou gebeuren in de Netherlands Exclusive Economic Zone (NEEZ) die in totaal 55.000 km^2 beslaat. ECN schat dat 27% daarvan bestaat uit gebied dat minder dan 35 meter diep is maar wel meer dan 12 nautische mijlen van de kust licht. Zie (Koopman, Noord en Uyterlinde 2004). Ongeveer 8% van dat ondiepe gebied is voldoende om al het wegverkeer in Nederland van stroom te voorzien.

[62] Zie onder meer het rapport van Ecofys hierover (Burges, et al. 2009).

[63] De grafiek geeft het gemiddelde windvermogen boven De Bilt weer. In dit hoofdstuk zijn alle waardes voor 0 tot 200 meter gebaseerd op de windkaarten van Senter Novem in combinatie met een log wind profile. Zo ook hier waarbij is uitgegaan van de gemiddelde waardes voor De Bilt. Gegevens voor 1.000 meter en hoger zijn gebaseerd op gemiddelden voor de periode 1961-1980 zoals gemeten boven De Bilt en verstrekt door associate professor Roland Schmehl van de Kite Power group van de TU Delft. Voor de volledigheid kan gemeld worden dat op de meetlocatie in De Bilt waarvan de waardes voor 1.000 meter en hoger zijn afgeleid ook 0 kW op 0 meter en 0,1 kW op 111 meter is gemeten. Dat is minder dan gemiddeld in De Bilt.

[64] Bas Lansdorp (general manager Ampyx Power) schat de prijs op onder de drie cent. Op internet en in de vakliteratuur is ook een groot aantal interviews te vinden met onderzoekers en ondernemers op het gebied van high altitude wind. Alle schattingen liggen tussen de € 0,01 en 0,04 per kilowattuur. Enerzijds moeten deze schattingen worden gerelativeerd omdat niemand op dit moment meer heeft dan een prototype en het nog zeker drie jaar duurt voor er praktijkgegevens van commerciële installaties beschikbaar zijn. Anderzijds gaat het om een combinatie van proven technologies zodat de kosten van de afzonderlijke componenten wel op basis van praktijkgegevens bekend zijn. Overigens moeten hierbij de kosten voor het transport van de elektriciteit nog worden opgeteld.

[65] De windmolen in kwestie – waar er in het binnenland dus heel ruwweg 6.000 van nodig zijn – heeft een diameter van 126 meter. De vlieger – waar er ruwweg

700 van nodig zijn – heeft een spanwijdte van 85 meter. Dat is qua spanwijdte vergelijkbaar met een groot passagiersvliegtuig zoals de Jumbo Jet (Boeing 747). Het gewicht is echter 100 maal lager en de vlieger vliegt veel langzamer. De vliegers waar de Kite Power group van de TU Delft aan werkt zijn groter maar ook lichter en zacht als een parachute zodat ze zelfs indien ze neerstorten relatief ongevaarlijk zijn.

66 Plaatsing op de Noordzee is nog steeds een optie. Dit is relatief goedkoop omdat de fundering van een vlieger vergeleken met die van een windmolen simpel is. Bij een conventionele windmolen oefenen de wieken hoog boven het oppervlak een kracht uit op de toren. De toren heeft daarom de neiging omver geduwd te worden. Net zoals een zeilschip met een hogere mast een zwaardere en diepere kiel nodig heeft om overeind te blijven kost het ook een grote hoeveelheid materiaal om een windmolen op het water overeind te houden. Een vlieger daarentegen trekt aan een kabel die direct boven het wateroppervlak bevestigd is. Het fundament is niet meer dan een gewicht dat zwaar genoeg is om niet uit het water getild te worden en enkele ankers om het mee op zijn plek te houden. Plaatsing op het land blijft echter goedkoper, vooral qua onderhoud. Anders dan conventionele windmolens is de locatie daarbij weinig kritisch. Het gaat om de wind op honderden meters hoogte en die is over heel Nederland relatief constant.

67 De gewichtscalculatie is gebaseerd op de opgave van Ampyx Power. Hierbij is een windmolen met een piekvermogen van 2 MW vergeleken met een powerplane van 1 MW die dezelfde hoeveelheid energie levert. De specificatie van vlieger versus molen: 25 versus 210 ton staal; 3,5 versus 19,5 ton plastics en vezels; 3 versus 20 ton koper; en 40 versus 575 ton beton.

68 Statkraft is zelf de grootste leverancier van duurzame energie in Europa. Zij maken vooral gebruik van Noorse waterkracht. Die is nu al goedkoper dan kolen. De meeste waterkracht die beschikbaar is, is wereldwijd echter al ontwikkeld. Waterkracht kan dan ook nauwelijks meer groeien. Wind kan daarentegen veel meer energie leveren dan onze beschaving nodig heeft. Mits de prijs daalt en er een infrastructuur komt die ermee om kan gaan dat de wind niet altijd waait. Dat laatste bijvoorbeeld door de toepassing van smart-grids en supergrids. Statkraft stelt in een aanbevelingsbrief voor Ampyx Power dat high altitude wind power op dit moment de enige duurzame energiebron is met het potentieel om net als waterkracht goedkoper te worden dan kolen. Zij zegt de vijftien leidende bedrijven op dit gebied onderzocht te hebben waarna zij er drie kansrijk achtte. Zij heeft uiteindelijk alleen geïnvesteerd in Ampyx Power. Een belangrijke overweging was dat Ampyx Power overwegend gebruik maakt van proven technology uit andere gebieden zodat zij snel resultaten kan boeken.

69 Zie (Pals 2009).

70 Dit op basis van gegevens van het CBS voor 2008 aangaande het binnenlands gebruik van in totaal 45.935 miljoen m^3 (1.454 PJ). Huishoudens gebruikten 23%, diensten en overheid 23% en glastuinbouw 8%. Dit is aardgas dat vrijwel volledig wordt gebruikt voor het verwarmen van gebouwen. Verder gebruikt de chemische en aardolieverwerkende industrie 16%. De overige 24% wordt gebruikt voor het opwekken van elektriciteit.

71 ECN presenteert deze gegeven in de categorie 'Energie in cijfers' op de site energie.nl. Omgerekend gaat het in 2007 om 526 watt voor verwarming, 169 watt voor warm water, 29 watt om mee te koken en 180 watt elektriciteit. Dat betekent dat 695 watt van de in totaal 904 watt wordt gebruikt voor verwarming en warm water ofwel 77%.

72 Er zijn verschillende systemen die intussen in verschillende publicaties zijn gedocumenteerd. Bijvoorbeeld in (Weijers en Groot 2007) en (Gieselaar 2000). Het zonneweg systeem is ontwikkeld door de KEMA en gebruikt een poreuze laag asfalt. Een voordeel van dit systeem is dat het eevnoudig te recyclen is. Het is echter nog niet in de praktijk toegepast. Het WinnerWay-systeem maakt gebruik van 25 mm cosslinked polyethyleenbuizen in beton. Het systeem is ontwikkeld door Van den Boom Wegenbouwkundig Bureau BV in combinatie met Arcadis Bou/Infra BV, IF Technology BV en Velta BV. Het systeem is in opdracht van Rijkswaterstaat aangelegd bij de Haringvlietsluizen maar intussen is het systeem weer vervangen door gewoon asfalt. Road Energy Systems maken gebruik van polyethyleen buizen direct in asfalt. Dit systeem is ontwikkeld door Ooms Avenhorn Holding BV in samenwerking met WTH Vloerverwarming BV. Het systeem is op 13 plekken aangelegd waarbij projecten in omvang variëren tussen de 450 en 10.000 vierkante meter. Zie ondermeer (Bondt 2006). In 2010 won het systeem de Mercedes Benz BlueEFFICIENCY Award voor de Nederlandse ondernemer met de beste duurzame innovatie gelinkt aan mobiliteit.

73 De Guardian heeft hier enkele artikelen aan gewijd. Zie ondermeer (Press Association 2009). Treehugger spreekt van 'Highway Robbery' en 'energiediefstal'. Overigens zijn in de Guardian behalve positieve ook kritische artikelen geplaatst. Zo rekent een natuurkundeprofessor voor dat de kinetische platen hooguit 0,002 kWh per auto opleveren ofwel 0,03% van de energie die een gemiddelde rit naar de supermarkt kost. Dit onder de kop: 'Praten over 'kinetische energie platen' is volstrekte energieverspilling'. Zie: (MacKay 2009).

74 Dit op basis van een telefonisch interview met de heer Stijn Verplak van IF Technology, een ingenieursbureau met veel kennis op het gebied van WKO. De heer Verplak schat dat de efficiency over het algemeen tussen de 70 en 90% ligt.

75 De literatuur over Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) houdt zich al enige tijd bezig met de vraag hoe er elektriciteit gewonnen kan worden uit het relatief kleine temperatuurverschil tussen het koude water diep in de oceaan en het warmere water aan het oppervlak. Dit geeft een goed inzicht in de maximale rendementen die met lage temperatuurverschillen behaald kunnen worden. Wij hebben nog geen commerciële systemen kunnen vinden die worden verkocht om bij een dergelijk klein temperatuurverschil elektriciteit op te wekken.

76 32 °C is 305 K. De Carnot limiet is dan 10/305 ofwel 3%. 72 °C is 345 K. De Carnot limiet is dan 50/345 ofwel 14%.

77 De Engelstalige Wikipedia pagina genaamd Heat Pump is een uitstekend beginpunt voor meer informatie over warmtepompen. (Geraadpleegd op 5 juli 2010.) Het appartementencomplex Vijverstate dat navolgend beschreven wordt heeft in de praktijk een CIP van 7,2 wat correspondeert met een verlies van 14%. Dit is het gecombineerde totaal van gebouwverwarming, war water en de pompen die het water van en naar de bronnen en door het gebouw pompen.

78 Marcel Roozendaal van Road Energy Systems verschafte de volgende kerngegevens: de prijs van een asfaltcollector ligt tussen de € 80,- en € 120,- per m^2 exclusief BTW. Uitgaande van het gemiddelde van € 100,- per m^2 waren de kosten van de collector bij Vijverstate € 83.000,-. De prijs van het hele duurzame systeem (zonder subsidie) was circa € 1 miljoen op een project van in totaal € 8 miljoen. Ooms heeft samen met haar partners ingeschat dat de woonlasten door het systeem 10% zijn afgenomen vergeleken met een gebouw zonder duurzaam systeem.

79 Op de factsheet die wij van Road Energy Systems ontvingen staat de CO_2 reductie. Het wooncomplex bespaart 54% CO_2 bij verwarming en dat is 72.628 kilo. Dat betekent dat het overblijvende gebruik 61.868 kilo CO_2 uitstoot. Het complex bespaart 81% bij koeling en dat is 80.235 kilo CO_2. Dat betekent dat gebruik 15.245 kilo CO_2 uitstoot. Gecombineerd betekent dat een besparing van 72% en een overblijvende uitstoot van 77.113 kilo. Een kilo CO_2 komt overeen met ongeveer 2 kWh (conservatief uitgaande van de relatief CO_2 arme energiemix van Eneco). Dat maakt het energieverbruik is 154.226 kWh per jaar ofwel gemiddeld 17.581 watt. De autonome energievraag is onbekend. We gaan ervan uit dat de 55+ appartementen gemiddeld door anderhalve persoon worden bewoond die een reguliere hoeveelheid elektriciteit gebruiken (een eigen aanname). Het bewoonbaar oppervlak is 8.800 m^2 in drie woonlagen zodat het dakoppervlak 2.933 m^2 is. In Nederland vangt een vierkante meter plat dak ongeveer 100 watt zonne-energie op zodat er bij een zonnepaneel met een efficiency van 15% en de nodige verliezen ongeveer 13 W/m^2 overblijft. In totaal kan het dak dus 13 maal 2.933 ofwel 38.100 watt leveren. Voor de overige elektriciteitsvraag moeten enkele aannames gemaakt worden. Het project is bedoeld voor ouderen van 55+ en de verwachting is dat de bewoners over het algemeen 75+ zullen zijn. We nemen aan dat de helft van de appartementen wordt bewoond door een alleenstaande (in totaal levert dat 102 bewoners) en dat de elektriciteitsbehoefte gelijk is aan die van de gemiddelde Nederlander (183 watt). Dat geeft een vraag van in totaal 102 maal 183 ofwel 18.666 watt. Samen met de behoefte vanuit klimaatbeheersing is dat 18.666 plus 17.581 ofwel 36.247 watt. Dat is minder dan de 38.100 watt die het dak bij benadering kan leveren. Een berekening voor de terugverdientijd van het systeem is te vinden als intermezzo in het hoofdstuk over zonnepanelen langs en in de weg.

80 Op basis van gegevens van het CBS valt af te leiden dat er per persoon circa 60 vierkante meter verkeersterrein is (inclusief parkeerplaatsen, eigen weg en dergelijke. Daarvan is 30 vierkante meter openbare weg en daarvan is weer 3 vierkante meter autosnelweg. Voor de elektriciteit (170 watt per persoon) zou 11,5 vierkante meter zonnepaneel nodig zijn.

81 De meeste zonnecellen werken met behulp van silicium. Dat is na zuurstof het meest voorkomende element in de aardkorst (25% van de massa). Zand bestaat bijvoorbeeld voornamelijk uit silica ofwel SiO2. Silica bestaat voor 47 gewichtsprocent uit silicium. Tien kilo zand bevat dus circa 4,7 kilo silicium. Nieuwe zonnecellen werken met plakjes silicium van 0,13 mm dik. Een liter silicium bevat dus 100/0,13 ofwel 770 van die plakjes: samen 7,7m^2. Een liter silicium weegt 2,33 kilo dus een kilo silicium bevat genoeg voor 7,7/2,3 ofwel 3,35 m^2. Tien kilo zand bevat dus silicium voor 3,35 x 4,7 ofwel 16 m^2 zonnecel. Een middenklasse elektrische auto gebruikt ongeveer 0,15 kWh per kilometer en gemiddeld rijdt men in Nederland 12.000 km per jaar. De auto verbruikt dan 1.800 kWh per jaar ofwel 205 watt gemiddeld. Een vierkante meter zonnecel die plat op de grond gelegd wordt levert ongeveer 13 watt dus 205/13 ofwel 16 m^2 levert de benodigde energie. Een zuinige benzine auto gebruikt 5 liter benzine per 100km. Na 30 jaar van 12.000 kilometer per jaar is dat 30 x 12.000 x 5 / 100 ofwel 18.000 liter benzine. Uiteraard wordt hierbij aan allerlei zaken voorbij gegaan. Bijvoorbeeld: de energie die nodig is om de zonnecel, de autobatterij en de benzine te maken; de verliezen bij de productie van silicium; het soort kwarts waar het beste silicium uit gezuiverd kan worden; het zand dat nodig is om het glas van de zonnecel mee te maken; de materialen die nodig zijn voor de contacten aan voor en achterzijde van de laag silicium; het smart grid dat ervoor moet zorgen dat stroomverbruik en stroomopwekking op elkaar worden afgestemd; en alternatieve zonnecellen zoals de dunne-film silicium (die met dezelfde hoeveelheid silicium een veel groter oppervlak bestrijkt).

82 De eerste satelliet met zonnecellen was de Vanguard 1. De minieme zonnecellen van de kleine satelliet (1,5 kilo en 165 mm doorsnee) deden zes jaar hun werk. De prijs van zonnecellen lag in die tijd nog boven de $1.250,- dollar (in 1955) per wattpiek.

83 Zie (Pernick, et al. 2010).

84 Op dit moment zijn fabrieken met de laagste prijzen in staat om zonnecellen te verkopen voor $1 per wattpiek. Voorbeelden zijn First Solar, QS Solar en Trina Solar. Zie bijvoorbeeld (Koot 2009). First Solar heeft aangekondigd dat zij haar huidige kostprijs van $0,81 in 2014 verlaagd hoopt te hebben naar tussen de $0,52 en $0,62. Zie (Thin Film Today 2009). Dat betekent dat de fabriek met de laagste prijs een verder prijsreductie van 23 à 36% hoopt te realiseren binnen vier jaar. Het Chinese Trina Solar heeft aangekondigd dat zij met haar siliciumpanelen concurrerend wil worden aan de thin film van First Solar.

85 Er zijn verschillende instanties die de hoeveelheid zonnecellen in de wereld inschatten. De schattingen kunnen soms wel 30% uit elkaar liggen. Zie bijvoorbeeld (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century 2010), (European Photovoltaic Industry Association 2010) en (NREL 2010). Uitgaande van de NREL rapportage wordt de geinstalleerde hoeveelheid voor 2010 geschat op 25 gigawatt piekvermogen. Met een conservatieve capaciteitsfactor (een maat voor de zonnigheid van de plek waarop de zonnecellen opgesteld zijn) van 0,13 levert dit 0,003 terawatt. Het totale energieverbruik van de wereld is op dit moment circa 15 terawatt dus 0,003 TW is 0,003/15 ofwel 0,02% .Een groei met 50% per jaar levert 21 terawatt in 2029. Een groei met 30% per jaar levert 15 terawatt in 2037. Uiteraard kan een exponentiële groei niet simpelweg worden geëxtrapoleerd maar anderzijds wordt de snelheid waarmee een exponentiële groei kan doorbreken vaak onderschat.

86 Onder de wetenschappers die zonnecellen ontwikkelen is deze stelling veelgehoord. Voorbeelden van bekende personen die denken dat zonnecellen de grootste energiebron zullen worden zijn Nobelprijswinnaar Richard Smalley, futuroloog en uitvinder Ray Kurzweil, oprichter van 'better place' Shai Agassi en schrijver/adviseur Jeremy Rifkin.

87 Zie: (WBGU 2003).

88 Zie (Pernick, et al. 2010).

89 Voor wie het precies wil weten moet hier nog aan worden toegevoegd: bij 25 °C.

De opbrengst van de meeste zonnepanelen neemt langzaam af als de temperatuur oploopt. Er zijn ook uitzonderingen. Zo werd in augustus 2010 bekendgemaakt dat er nu een materiaal is wat het beter doet als de temperatuur hoger wordt. Dat is een mogelijke doorbraak voor centrales die met CSP (concentrated solar power) werken. Zulke centrales concentreren zonlicht en verhitten daarmee buizen waardoor een vloeibaar medium (bijvoorbeeld water, olie of zout) stroomt. Zij zetten die hitte vervolgens om naar elektriciteit. Als de buizen voorzien zouden worden van materiaal dat zonlicht ook direct – en liefst bij hoge temperaturen – omzet in elektriciteit zou dezelfde installatie op twee manieren tegelijk energie kunnen oogsten met als gevolg een veel grotere energieopbrengst. Zie: (Bergeron 2010).

[90] Een voorbeeld van een wijk waar dat is gebeurd is.

[91] Deze gegevens komen van de ECN site energie.nl/energie in cijfers/elektriciteit-starieven zoals geraadpleegd op 18 juli 2010. ECN zegt zich te baseren op cijfers van Eurostat voor de periode 1-1-1991 t/m 1-7-2009. Deze data laat een relatief voorspelbare stijging zien (van 7,7 cent per kWh in 1991 naar 18,8 cent per kWh halverwege 2009). Als op basis van deze cijferreeks een exponentiële regressie-curve wordt gemaakt levert dit een curve met een exponent van 0,0300 (R2=0,96). Als we die curve extrapoleren krijgen we 22 cent in 2010 en 44 cent in 2035.

[92] Toegankelijke berekeningen en metingen zijn onder meer te vinden op www.siderea.nl. Om makkelijk te rekenen kan uitgegaan worden van een paneel met een efficiency van 15% en een oppervlak van 1 m^2. Een dergelijk paneel heeft een piekvermogen van 150 wattpiek ofwel Wp. De prijs van het paneel is op dit moment ongeveer € 300,-. Installatie kost ongeveer € 150,- (tenzij u het zelf doet) en voor onderhoud wordt ook een post van € 150,- opgenomen.
Samen € 600,-. De zon levert in Nederland bij een optimaal gericht dak ongeveer 114 W/m^2 of 1.000 kWh/m^2 op. Een zonnepaneel van 15% reduceert dat tot 17 W/m^2 of 150 kWh/m^2. Na diverse verliezen afgetrokken te hebben blijft er per saldo circa 15 W/m^2 of 130 kWh/m^2 over. Bij een prijs van € 0,22 per kWh is dat € 28,60. Dit zijn allemaal ruwe schattingen omdat de stand van het dak, de hoeveelheid zon, de efficiency van de panelen, de verliezen van de inverter en nog veel meer zaken de opbrengst beïnvloeden. Ook de kosten van panelen, installatie en onderhoud zijn van geval tot geval verschillend.

[93] First Solar gaat ervan uit dat zij in 2015 voor € 0,45 per Wp kan leveren. Zie bijvoorbeeld (Thin Film Today 2009). Uitgaande van 25% winst voor de fabrikant en directe afname van de fabriek betekent dat € 0,56 per Wp voor de grootverbruiker. Inverters , grond en verankering van de panelen moeten dan plaatsvinden voor € 0,44 per Wp. Dat is absoluut gezien weinig maar normaal wordt de opslag gerekend in procenten en 80% opslag voor de rest van het systeem is fors.

[94] Deze panelen zijn aan beide zijden transparant. Ze krijgen de grootste opbrengst niet als de zon op zijn hoogst staat maar in de ochtend en avond. Het zou kunnen dat de prijs per wattpiek hoger is dan van zonnepanelen die aan 1 kant transparant zijn. Zie pagina 16 van (Weijers en Groot 2007). Overigens is een groot deel van de gegevens in de paragraaf afkomstig van of gebaseerd op dit document.

[95] Een recent overzicht van zonnepanelen langs de weg is te vinden op http://www.pvresources.com/en/noise.php (geraadpleegd op 28 juli 2010). De gegevens zijn opgegeven in wattpiek. Het grootste project in Aschaffenburg is 2,65 megawattpiek en het project in Amstelveen is 216 kilowattpiek. Er is uitgegaan van een gemiddelde opbrengst die daar ruwweg 1/10 van is. Zie ook het intermezzo waarin de opbrengst van zonnepanelen wordt voorgerekend.

[96] Voor onderzoek naar het potentieel van geluidswallen in Nederland en Europa met een onderbouwing van de genoemde 5 MW, zie (Goetzberger sd). Een recent overzicht van zonnepanelen langs de weg is te vinden op http://www.pvresources.com/en/noise.php (geraadpleegd op 28 juli 2010). De gegevens zijn opgegeven in wattpiek. Het grootste project in Aschaffenburg is 2,65 megawattpiek en het project in Amstelveen is 216 kilowattpiek. Er is uitgegaan van een gemiddelde opbrengst die daar ruwweg 1/10 van is. Zie ook het intermezzo waarin de opbrengst van zonnepanelen wordt voorgerekend.

[97] In 2009 is er een uitgebreide Noorse studie uitgekomen waarin op basis van Nederlandse ongelukkenstatistieken de impact van wegverlichting is onderzocht: (Wanvik 2009). Zij constateert reducties van boven de 50%, zowel voor doden als voor gewonden en zowel voor snelwegen als voor lokale wegen. De studie concludeert dat wegverlichting uitzonderlijk kosteneffectief is, uitgaande van de Noorse normen voor DALY's (disability adjusted life years) en medische kosten. In 2010 is er bovendien een internationale meta-analyse uitgevoerd door de Cochrane collaboratie: (Beyer en Ker 2010). De conclusie van deze studie is vooral dat er een schrijnend tekort is aan actueel en kwalitatief hoogwaardig onderzoek. Zij constateren wel dat wegverlichting lijkt te helpen. Ook spreken ze hun verbazing uit over het feit dat er wereldwijd slecht $1 wordt geïnvesteerd per DALY dat verloren gaat door verkeersongelukken.

[98] Een studie van ECN stelt dat in 1999 de openbare verlichting 2.6 miljoen verlichtingspunten en 645 gigawattuur bedroeg. (Dit is 74 megawatt of 4,5 watt per persoon gemiddeld: 0,06% van het totale energiegebruik.) Zo'n 6 tot 7% van de lichtpunten bevond zich op rijkswegen. Uitgaand van een gelijk energiegebruik per lichtpunt gaat het om 5 megawatt of 0,3 watt per persoon. Dat is 0,03% van het huidige energiegebruik van het wegverkeer. Zie: (Bremmers, Veltman en Fernhout 2000).

[99] Deze claims (en etterlijke anderen) worden op een rij gezet op de site: www.lichthinder.nl.

[100] (Wanvik 2009) stelt (op pagina 47): "De enige reden die is gevonden voor het buitengewoon grote effect van wegverlichting in Nederland is dat de kwaliteit van wegverlichting buitengewoon groot zou kunnen zijn in dit land." Hij wijst daarbij op het kennisniveau in Nederland, wat volgens hem ondermeer blijkt uit de leidende rol die Rijksoverheid en Philips hebben gespeeld in de CIE (divisie 4: Lighting for Signalling and Transport).

[101] 'Het systeem vergrootte het zicht van automobilisten met 400%' aldus een artikel in Science Daily waarin Peirre-Albert Breton van Thales Avionics de resultaten van het Europese SEE project beschrijft. Zie (Science Daily 2006). BMW heeft interesse voor de toepassing van het systeem. Belangrijkste probleem is dat het systeem nu nog gebruikt maakt van omvangrijke camera's en dat de kosten nog rond de € 5.000,- liggen. Er moet dus nog een adaptie naar goedkopere technologie worden gemaakt.

[102] Gesprek van de auteur met Dr. Leon Kester van TNO die zich bij TNO bezighoudt met 'Intelligent Sensor Networks'.

[103] Solar Roadways is hier relatief uitgesproken in. Sten de Wit van TNO wil zich in correspondentie met de auteur de uitspraak liever niet voor zijn rekening nemen dat een transparante toplaag de grootste uitdaging is of dat de transparante toplaag waarschijnlijk van glas gemaakt zal worden.

[104] Isodorus van Sevilla verhaalt hoe Julius Caesar vlak voor het begin van onze jaartelling bezoek gekregen zou hebben van een ambachtsman met een beker van flexibel glas. Ongelovig gooide Caesar de beker op de grond waarna de ambachtsman de gemaakte deuk met een hamer wegwerkte. Caesar liet de ambachtsman daarop onthoofden omdat hij vreesde dat flexibel glas de waarde van goud en zilver zou ondermijnen.

[105] Zie (Time 1935).

[106] In 2007 is door de Europese Comissie een verlenging tot 2012 gegeven op de ontheffing van energiebelasting voor de glastuinbouw omdat de sector een relatief groot deel van haar inkomsten besteed aan aardgas. Tegelijk is aangegeven dat deze milieuschadelijke ontheffing van tijdelijke aard moet zijn. Zie ondermeer (Natuur en Milieu 2010). Een aardig kort overzicht van 'milieu-schadelijke subsidies' is (Beers 2010). Deze Delftse econoom en hoogleraar innovatiemanagement stelt dat huishoudens € 192,- per ton CO_2 betalen terwijl grootverbruikers € 2,- per ton betalen. Als het doel is om de uitstoot van CO_2 te verminderen is dat volgens hem een onhoudbare situatie die innovatie afremt.

Bronnen

Atran, Scott, en Douglas Medin. "The Native Mind and the Cultural Construction of Nature." *Amazon.* 2010. http://www.amazon.com/Native-Mind-Cultural-Construction-Nature/dp/0262514087/ref=sr_1_3?ie=UTF8&s=books&qid=1272473570&sr=1-3 (geopend 4 29, 2010).

Banse, Martin, Meijl van Hans, en Geert Woltjer. "Consequences of EU Biofuel Policies on Agricultural Production and Land Use." *Choices: the magazine of food, farm, and resource issues.* 23 3 2008. www.farmdoc.illinois.edu/policy/choices/20083/theme1/2008-3-05.pdf (geopend 4 27, 2010).

Beers, Cees van. "Subsidies op energiegebruik landbouw en industrie niet meer van deze tijd." *Me Judice.* 3 2010. http://www.mejudice.nl/artikel/379/subsidies-op-energiegebruik-landbouw-en-industrie-niet-meer-van-deze-tijd (geopend 8 12, 2010).

Bergeron, Louis. "New solar energy conversion process discovered by Stanford engineers could revamp solar power production." *Stanford University.* 2 8 2010. http://news.stanford.edu/news/2010/august/new-solar-method-080210.html (geopend 8 30, 2010).

Beyer, FR, en K Ker. "Street lighting for preventing road traffic injuries (Review)." *The Cochrane Collaboration.* 2010. http://www.thecochranelibrary.com/SpringboardWebApp/userfiles/ccoch/file/Safety_on_the_road/CD004728.pdf (geopend 8 7, 2010).

Bijsterveld, Karl. "Tempo maken met warmte-koudeopslag." *Duurzaam.* 1 2010. http://www.iftechnology.nl/files/Doc/publicaties/Tempo_maken_met_energieopslag.pdf (geopend 6 6, 2010).

Bombardier. "Bombardier and Stadtwerke Augsburg to Pilot PRIMOVE Catenary-Free and Contactless Tramway System Technology." *Bombardier.* 26 5 2010. http://www.bombardier.com/en/transportation/media-centre/press-releases/details?docID=0901260d8010cf10 (geopend 5 31, 2010).

Bondt, Dr.ir.Arian de. "Winning en benutting van warmte/koude uit wegen." *Road Energy Systems.* 11 2006. http://www.roadenergysystems.nl/ (geopend 7 2, 2010).

BP. "BP Statistical Review of World Energy 2010." *BP.* 6 2010. http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622 (geopend 8 24, 2010).

Bremmers, P., A.T. Veltman, en J.T. Fernhout. "Energieverbuik in openbare verlichting en verkeersregelinstallaties." *Energy research Centre of the Netherlands.* 2000. http://www.ecn.nl/docs/library/report/2000/c00095.pdf (geopend 8 7, 2010).

Brown, Lester M. *Plan B 4.0: Mobilizing to Save Civilization.* New York: W.W. Norton & Company, 2009.

Brown, Lester, en Jonathan Lewis. *Washington Post.* 22 4 2008. http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2008/04/21/AR2008042102555.html (geopend 4 28, 2010).

Bulls, Kevin. "Solar-Power Breakthrough." *MIT Technology Review.* 31 7 2008. http://www.technologyreview.com/energy/21155/ (geopend 8 13, 2010).

Burges, K., D. Schoenmakers, G. Papaefthymiou, en V. Schüler. "Project kabel op zee." *Ecofys.* 2009. http://www.ecofys.nl/com/publications/documents/dsresource.pdf (geopend 7 24, 2010).

CBS. *CBS Statline.* 2010. http://statline.cbs.nl/StatWeb/dome/?LA=NL (geopend 6 24, 2010).

Copeland, Michael. "The Hydrogen Car Fights Back." *CNN.* 14 11 2009. http://money.cnn.com/2009/10/13/technology/hydrogen_car.fortune/index.htm (geopend 8 1, 2010).

Crutzen, P.J. "N_2O Release from Agro-biofuel Production Negates Global Warming Reduction by Replacing Fossil Fuels." *Atmospheric Chemistry and Physics,* 29 1 2008: 389-95.

Cushion, Elizabeth, en Adrian Whiteman. *Bioenergy Developments.* Washington: The World Bank, 2010.

Diamond, Jared. *Ondergang.* Spectrum, 2006.

ECN. "Mean Wind Speed at the Netherlands' Exclusive Economic Zone (NEEZ)." *ECN.* 2004. http://www.ecn.nl/nl/units/wind/rd-programma/aerodynamica/innovative-applications/offshore-wind-atlas/90-meter/ (geopend 6 12, 2010).

European Photovoltaic Industry Association. "Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2014." *EPIA.* 2010. http://www.epia.org/fileadmin/EPIA_docs/public/Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_until_2014.pdf (geopend 7 18, 2010).

Fargoine et al, Joseph. "Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt." *Science,* 29 Februari 2008: 1235-38.

Gieselaar, D. "De markt voor warmtewinning uit asfalt." *Senter Novem.* 2000. http://www.senternovem.nl/mmfiles/Warmte_uit_Asfalt_tcm24-123181.PDF (geopend 6 2, 2010).

Goetzberger, A. "Evaluation of the potential of PV noise Barrier technology for electricity production and market share." *Thermie B Project, final report, VI-2,* 6 1999.

Hanschke, C.B., M.A. Uyterlinde, P. Kroon, H. Jeeninga, en H.M. Londo. "Duurzame innovatie in het wegverkeer." *ECN.* 1 2009. www.ecn.nl/docs/library/report/2008/e08076.pdf (geopend 8 12, 2010).

Hassan, Garrad. "Hub Heigt Trends." *Wind Energy - The Facts.* 2010. http://www.wind-energy-the-facts.org/en/part-i-technology/chapter-3-wind-turbine-technology/technology-trends/hub-height.html (geopend 6 24, 2010).

Hoekstra, Auke. *Elektrisch rijden.* Utrecht: Rijkswaterstaat, 2009.

Howardth, R.W., en S. Bringezu. "Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use." *Proceedings of the Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) International Biofuels Project Rapid Assessment.* 2009. http://cip.cornell.edu/scope/1245782000 (geopend 4 28, 2010).

ICIS news. *ICIS.com.* 23 3 2010. http://www.icis.com/Articles/2010/03/23/9345161/fo-licht-sees-light-at-end-of-tunnel-for-biofuels-video.html (geopend 4 28, 2010).

Ingreenious BV. "Eerste evaluatie meetresultaten testveld kleine windturbines Zeeland." *Provincie Zeeland.* 19 5 2009. http://provincie.zeeland.nl/milieu_natuur/windenergie/kleine_windturbines/de_turbines (geopend 7 6, 2010).

International Monetary Fund. *www.imf.org.* 13 April 2008. http://www.imf.org/external/np/tr/2008/tr080413.htm (geopend April 27, 2010).

IPCC. "Climate Change 2007: Synthesis Report." *IPCC.* 2007. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf (geopend 10 12, 2010).

Jansen, Boris. *Biobrandstof, duurzaamheid en biodiversiteit.* 6 8 2009. http://www.uva.nl/duurzaamheid/duurzaamheid.cfm/EEE1E4A1-1321-B0BE-685B2DF9788A169D (geopend 4 28, 2010).

Karbuz, Sohbet. "DoD Energy Use in 2009." *Blogspot.* 24 7 2010. http://karbuz.blogspot.com/ (geopend 7 26, 2010).

Knol, Anne, Karel van Velze, Eva Kunseler, en Leendert van Bree. "Interpretatie van vroegtijdige sterfte door luchtverontreiniging." *RIVM.* 2009. www.rivm.nl/.../Knol_van_Velze_2009_Interpretatie_vroegtijdige_sterfte_luchtverontreiniging.pdf (geopend 7 30, 2010).

Kooper, Annemieke. *Nederlands Dagblad.* 14 April 2008. http://www.stichtingmilieunet.nl/andersbekekenblog/klimaat/wouter-bos-biobrandstof-een-misdaad-tegen-de-mensheid.html (geopend April 27, 2010).

Koopman, H.J.T., M. de Noord, en Ms M.A. Uyterlinde. "Large Scale Offshore Wind Energy in the North Sea. A Technology and Policy Perspective." *ECN.* 2004. www.ecn.nl/docs/library/report/2003/rx03048.pdf (geopend 6 12, 2010).

Koot, Edwin. "Solar module sales price of $1 per Watt no longer theory." *Solarplaza.* 7 4 2009. http://solarplaza.com/article/solar-module-sales-price-of-1-per-watt-no-longer (geopend 7 18, 2010).

Koppelaar, Rembrandt. "A Prince and Four Peaks: Peak Oil, Gas, Coal and Uranium." *The Oil Drum.* 1 2009. http://www.theoildrum.com/node/4991 (geopend 10 12, 2010).

Macalister, Terry. "US military warns oil output may dip causing massive shortages by 2015." *The Guardian.* 11 4 2010. http://www.guardian.co.uk/business/2010/apr/11/peak-oil-production-supply (geopend 7 20, 2010).

MacKay, David. "Talk of 'kinetic energy plates' is a total waste of energy." *The Guardian.* 17 6 2009. http://www.guardian.co.uk/environment/cif-green/2009/jun/17/renewable-energy-kinetic-road (geopend 7 7, 2010).

Natuur en Milieu. "Groen goud- 15 belastingvoorstellen voor een groene en innovatieve economie." *Natuur en Milieu.* 7 2010. www.snm.nl/pdf/100625_snm_groengoud10web_def.pdf (geopend 8 12, 2010).

Naughton, Keith. "Bob Lutz: The Man Who Revived the Electric Car." *Newsweek.* 22 11 2007. http://www.newsweek.com/2007/12/22/bob-lutz-the-man-who-revived-the-electric-car.html (geopend 5 26, 2010).

Niza. "The impact of industrial biofuels on people and global hunger." *www.niza.nl.* Februari 2010. http://www.niza.nl/documenten/Niza%20rapporten/meals_per_gallon_20100215.pdf (geopend April 27, 2010).

NREL. "2008 Solar Technologies Market Report." *NREL.* 1 2010. http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/46025.pdf (geopend 7 18, 2010).

Pahl, Greg, en Bill McKibben. *Biodiesel: Growing a New Energy Economy.* Vermont: Chelsea Green Publishing Company, 2008.

Pals, Fred. "Exxon Set to Tap 'Enormous' Slochteren Field for 50 More Years." *Bloomberg.* 17 6 2009. http://www.bloomberg.com/apps/news?pid=newsarchive&sid=acSosbq7Qkro (geopend 7 12, 2010).

Pernick, Ron, Clint Wilder, Dexter Gauntlett, en Trevor Winnie. "Clean Energy Trends 2010." *Clean Edge.* 2010. http://www.cleanedge.com/reports/accessReport.php?rp=/reports/index.php&report=Trends2010 (geopend 7 18, 2010).

Press Association. "Sainsbury's brings green power to the checkout with 'kinetic plates'." *The Guardian.* 15 6 2009. http://www.guardian.co.uk/environment/2009/jun/15/sainsburys-kinetic-plates-speed-bumps (geopend 8 7, 2010).

Provincie Noord-Holland. "Waarom brandt het licht hier? Openbare verlichting op provinciale wegen in Noord-Holland." *Provincie Noord-Holland.* 2005. http://www.noord-holland.nl/web/file?uuid=6c1af099-6055-4a7f-beef-664c124e4efa&owner=5ea7bb40-aca5-4d10-936d-1d7f98bae963 (geopend 8 7, 2010).

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. "Renewables 2010 Global Status Report." 2010. http://www.ren21.net/globalstatusreport/g2010.asp (geopend 18 7, 2010).

Rogers, Ernie. "Lessons on Fuel Economy." *www.tdiclub.com.* 2007. pics.tdiclub.com/data/516/Fuel_Economy_2.pdf (geopend 6 7, 2010).

Safire, William. "Location, Location, Location." *New York Times.* 26 6 2009. http://www.nytimes.com/2009/06/28/magazine/28FOB-onlanguage-t.html (geopend 6 11, 2010).

Schwartz, Evan. "Roll to Roll Processing for Flexible Electronics." *Cornell University.* 11 5 2006. http://people.ccmr.cornell.edu/~cober/mse542/page2/files/Schwartz%20R2R%20Processing.pdf (geopend 19 7, 2010).

Science Daily. "Infrared System Helps Pilots And Drivers See In Fog And At Night." *Science Daily.* 5 2006. http://www.sciencedaily.com/releases/2006/05/060503100242.htm (geopend 8 7, 2010).

Searchinger et al, Timothy. "Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases through Emissions from Land-Use Change." *Science,* 29 Februari 2008: 1238-40.

Smeets, E.M.W. "Possibilities and limitations for sustainable bioenergy production systems." *Universiteit Utrecht.* 2008. http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2008-0717-200447/UUindex.html (geopend 4 28, 2010).

Smil. *Energies: an illustrated guide to the biosphere and civilization.* MIT Press, 2000.

Smil, Vaclav. *Energy in Nature and Society.* Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2008.

Sovacool, Benjamin, en Marilyn Brown. *Energy and American Society - Thirteen Myths.* Dordrecht: Springer, 2007.

Stil, Herman. "Geen draadje meer boven de tram." *Het Parool.* 22 1 2009. http://www.parool.nl/parool/nl/4/AMSTERDAM/article/detail/1131641/2009/01/22/Draadloze-tram-verlost-steden-van-bovenleidingen.dhtml (geopend 5 31, 2010).

Stöglehner, Gernot. "Ecological footprints - a tool for assessing sustainable energy supplies." *Journal of Cleaner Production* 11, 2003: 267-277.

Tabak, Lonneke. *The synergy between electric mobility and renewable energy: the role of the electric car in future scenarios.* Master Thesis, Utrecht: University of Utrecht, 2010.

Thin Film Today. "First Solar goes for reduction in manufacturing cost." *Thin Film Today.* 1 7 2009. http://social.thinfilmtoday.com/news/first-solar-goes-reduction-manufacturing-cost-0 (geopend 7 27, 2010).

Thin Film Today. "First Solar goes for reduction in manufacturing cost." *Thin Film Today.* 2 7 2009. http://social.thinfilmtoday.com/news/first-solar-goes-reduction-manufacturing-cost-0 (geopend 7 18, 2010).

Time. "Science: Flexible Glass." *Time.* 22 7 1935. http://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,754987,00.html (geopend 7 17, 2010).

Trouw. *18000 doden door fijn stof is een voorzichtige schatting.* 2008 6 2005. http://www.agripress.be/start/artikel/96619/nl/ (geopend 5 2010, 7).

Ublad. "Biobrandstoffen? Vooral doorgaan." *Universiteit Utrecht.* 2008. http://igitur-archive.library.uu.nl/chem/2009-0306-203003/UUindex.html (geopend 4 29, 2010).

United Nations. "World Population to Exceed 9 Billion by 2050." *United Nations.* 11 3 2009. www.un.org/esa/population/publications/wpp2008/pressrelease.pdf (geopend 8 15, 2010).

United Press International. *UPI Science News - Congress passes hydrogen car funding bill.* 2009. http://www.upi.com/Science_News/2009/10/17/Congress-passes-hydrogren-car-funding-bill/UPI-41201255816054/ (geopend 05 26, 2010).

United States Joint Forces Command. "Joint Operating Environment 2010." *Federation of American Scientists.* 2010. http://www.fas.org/man/eprint/joe2010.pdf (geopend 7 20, 2010).

Wanvik, Per Ole. "Road Lighting and Traffic Safety." *Norwegian University of Science and Technology.* 3 2009. http://ntnu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:214139 (geopend 8 7, 2010).

WBGU. "Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit." *Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen.* 2003. http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003.html (geopend 8 12, 2010).

Weijers, E.P., en G.J. Groot. "Energiewinning uit weginfrastructuur." *Energieonderzoek Centrum Nederland.* 2007. www.ecn.nl/docs/library/report/2007/e07057.pdf (geopend 7 1, 2010).

World Resource Institute. "World greenhouse gas emissions by sector." *maps.grida.no.* 2009. http://maps.grida.no/go/graphic/world-greenhouse-gas-emissions-by-sector2 (geopend 8 10, 2010).

Colofon

Auteur
Auke Hoekstra, oprichter
Cleantech Strategies

Projectleiding en redactie
Dineke van der Burg, senior adviseur
Wegen naar de Toekomst

Opdrachtgever
Wil René Jansen, programmamanager
Wegen naar de Toekomst

Communicatie en huisstijl
Bianca van de Waardt, communicatieadviseur
Wegen naar de Toekomst

Eerste druk: september 2010

Aan dit boek kunnen geen rechten worden ontleend.

Dit is een uitgave van

Rijkswaterstaat

Kijk voor meer informatie op
www.rijkswaterstaat.nl/wnt
of bel 0800 - 8002
(ma t/m zo 06.00 - 22.30 uur, gratis)

Auteur: Auke Hoekstra

ISBN/EAN: 978-90-815096-2-6