SOLAR POWER TO THE PEOPLE

Ad van Wijk, Els van der Roest, Jos Boere

November 2017

COLOFON

© 2017. De auteurs en Allied Waters.
Alle rechten voorbehouden.

ISBN/EAN:978-90-827637-0-6

ISBN 978-1-61499-832-7 (online)
DOI 10.3233/978-1-61499-832-7-i (English)

Uitgever
Allied Waters
www.alliedwaters.com
Telefoon: +31 (0)30 6069600
Mail: secretariataw@alliedwaters.com

Vormgeving: WarmGrijs, Hilversum
Infographics: Flow design, Utrecht
Eindredactie: Lydia Lijkendijk, Deventer
Foto's: Shutterstock
Druk: Xerox, Utrecht

De uitgave van Solar Power to the People is mede mogelijk gemaakt door:
• Gemeente Nieuwegein
• KWR
• Pitpoint
• KWR-onderzoeksprogramma Water in de Circulaire Economie
• Stedin
• Topsector Water
• Volkerwessels
• Waternet

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING **5**

1. SOLAR POWER TO THE PEOPLE **7**

1.1 De zon als oneindige energiebron 9

1.2 Ons energie- en watergebruik 18

2. DUURZAME ENERGIESYSTEMEN IN DE TOEKOMST **29**

2.1 Het energieverbruik wordt all-electric 31

2.2 De duurzame energieproductie wordt all-electric en goedkoop 36

3. SOLAR POWER TO THE PEOPLE WERELDWIJD **39**

3.1 Waterstof voor transport en opslag van duurzame energie 43

3.2 Waterstof en biomassa als grondstoffen voor de chemie 55

3.3 Elektriciteit en waterstof voor de productie van metalen 56

3.4 De waterstofkringloop voor energie én drinkwater 59

4. SOLAR POWER TO THE PEOPLE IN ONZE STAD OF ONS DORP **67**

4.1 Van elektriciteit naar waterstof 70

4.2 Van elektriciteit naar warmte 73

4.3 Van elektriciteit en regen naar water 76

4.4 Van waterstof naar elektriciteit voor back-up 77

5. SOLAR POWER TO THE PEOPLE IN NIEUWEGEIN-UTRECHT **79**

5.1 Hoe ziet ons gebied in Nieuwegein-Utrecht eruit? 80

5.2 Het Solar Power to the People-systeem in Nieuwegein-Utrecht 82

5.3 Vraag en aanbod van energie en water in Nieuwegein-Utrecht 85

REFERENTIES **93**

"Singing power to the people

Power to the people

Power to the people

Power to the people, right on ..."

John Lennon, 1971

John Lennon schreef deze protestsong *Power to the People* nog voor de Club van Rome zijn boek *Limits to Growth* uitbracht in 1972, nog voor de eerste energiecrisis van 1973 en ruim voor de commissie Brundtland haar rapport *Our Common Future* publiceerde in 1987. De club van Rome bracht de grenzen aan het gebruik van eindige grondstoffen voor het voetlicht. De energiecrises maakten duidelijk dat de fossiele energiebronnen geconcentreerd waren in een aantal landen. En in het rapport *Our Common Future* werd voor het eerst het begrip 'duurzaamheid' geïntroduceerd.

Met het woord 'power' bedoelde John Lennon natuurlijk de macht, het stond niet voor energie. Maar hij wilde juist verandering, de macht aan de mensen. Nu willen we ook verandering, van een fossiele naar een duurzame energievoorziening. We moeten de energie van de zon naar de mensen brengen. *Power to the People* in een nieuwe betekenis: *Solar Power to the People*, energie van de zon naar de mensen!

SAMENVATTING

In Nieuwegein-Utrecht realiseren we een uniek energiesysteem. Negenhonderd woningen met zonnecellen en regenwateropvang, en een zonnepark van 8,6 megawattpiek (MWp) met regenwateropvang, produceren samen 10 miljoen kilowattuur (kWh) elektriciteit en 60.000 kubieke meter regenwater per jaar. Daarmee kunnen we voldoen aan de gehele vraag naar energie van deze woningen voor zowel verwarming en elektriciteit als mobiliteit. Ook voorzien we hiermee in de behoefte aan demiwater; ultraschoon water voor het produceren van waterstof en voor onder andere de vaatwasser en wasmachine in de woningen. Op deze manier besparen we bovendien op het gebruik van zeep.

Dankzij opslag in de grond komt dit systeem op elk moment van het jaar tegemoet aan de vraag naar warmte en demiwater. Zo brengen we de energie van de zon naar de mensen: *Solar Power to the People!*

Solar Power to the People, energie van de zon naar de mensen brengen, dat is waar het om gaat in een duurzaam energie- en watersysteem. De zon levert ons in een uur meer energie dan de wereld in een jaar gebruikt. Er is dus genoeg duurzame energie, maar het gaat erom dat we deze energie in de juiste vorm, op de juiste plaats en op het juiste moment kunnen gebruiken.

De energie van de zon zorgt niet alleen voor warmte en licht, maar ook voor wind, regen en biomassa. Via zonnecellen en windturbines produceren we gemakkelijk al onze benodigde energie, in de vorm van elektriciteit. Met de neervallende regen voorzien we eenvoudig in onze waterbehoefte. En een heel klein beetje biomassa levert ons de koolstof voor het maken van chemische producten.

Wereldwijd kunnen we in 2020 in de woestijnen via zonnecellen elektriciteit produceren voor 2 à 3 dollarcent per kWh. Rond 2040 is dit naar verwachting gezakt tot minder dan 1 dollarcent per kWh. In 2040 moet het ook mogelijk zijn om met drijvende windturbines in de oceanen elektriciteit te produceren voor 1 dollarcent per kWh. Deze elektriciteit brengen we bij de mensen via waterstof. Elektriciteit en water worden via elektrolyse omgezet in waterstof en zuurstof. Waterstof kunnen we onder druk, vloeibaar of omgezet in ammoniak, transporteren over de wereld, opslaan en gebruiken wanneer we dit willen. Uit waterstof (elektriciteit), koolstof (biomassa), zuurstof (elektriciteit) en stikstof (lucht) kunnen we al onze chemische producten in bulk produceren. En met waterstof en elektriciteit kunnen we ook al onze metalen produceren.

In de stad, het dorp of op het platteland, waar we wonen en werken, produceren we voornamelijk elektriciteit met zonnecellen. Maar in landen zoals Nederland produceren we in de zomer te veel en in de winter te weinig. Het teveel aan elektriciteit in de zomer kunnen we omzetten in waterstof of warmte.

Regenwater vangen we via zonnepanelen op en bufferen we in de grond. Hieruit kunnen we via omgekeerde osmose het demiwater leveren voor de waterstofproductie, en na re-mineralisatie voorzien we ook in ons drinkwater. De waterstof kan via een waterstofnet, het omgebouwde aardgasnet, worden vervoerd en opgeslagen. Warmte kunnen we in de zomer met een warmtepomp produceren, opslaan in de grond en in de winter gebruiken voor verwarming. De batterijen van een elektrische auto leveren in de zomerperiode 's nachts elektriciteit. En in de winter leveren de brandstofcellen uit waterstof de benodigde elektriciteit.

In het project in Nieuwegein-Utrecht brengen we voor het eerst zonne-energie en regen voor de productie van elektriciteit, warmte, waterstof en demiwater naar de mensen in een nieuwbouwwijk. We brengen daar *Solar Power to the People*, energie van de zon naar de mensen. Waar, wanneer en in welke vorm ze die energie maar nodig hebben!

1 SOLAR POWER TO THE PEOPLE

1.1 De zon als oneindige energiebron

De energiebalans van de aarde

Als je op een mooie zomerdag naar buiten loopt en de zon voelt branden, krijg je meteen een idee van de hoeveelheid energie die van de zon op de aarde straalt. Zelfs op een afstand van 150 miljoen kilometer is de energie van de zon nog steeds groot genoeg om al het leven hier op aarde mogelijk te maken. De inkomende zoninstraling op aarde is 340 watt per vierkante meter (W/m^2) [1], [2], wat neerkomt op 173.800 terawatt (TW) (= $173.800*10^{15}$ watt). Dat betekent dat de zon na een uur schijnen al 625 exajoule (EJ, $625*10^{18}$J) aan energie naar de aarde heeft gestuurd. Dit is al meer dan de totale wereldwijde energiebehoefte van 556 EJ in 2016 [3].

In een uur tijd ontvangt de aarde meer zonne-energie dan we wereldwijd in een jaar gebruiken.

De zon levert dus ontzettend veel energie aan de aarde. Wat gebeurt er met al deze energie? Een deel van het invallende zonlicht wordt weerkaatst (100 W/m^2), een deel wordt geabsorbeerd door de atmosfeer (77 W/m^2) maar een ander groot deel komt daadwerkelijk op aarde terecht (163 W/m^2) [1], [2]. Deze energie wordt gebruikt om andere processen op aarde aan te drijven, zoals het waaien van de wind en verdamping van water. Indirect zijn windenergie en waterkracht dus vormen van zonne-energie. Daarnaast is zonlicht ook de drijvende kracht achter fotosynthese. Daarmee zorgt het voor de productie van biomassa, waarbij het zo belangrijke zuurstof geproduceerd wordt.

Zijn alle vormen van energie dan eigenlijk zonne-energie? Niet helemaal, want er zijn nog twee andere duurzame energiebronnen. De eerste is getijdenenergie, die ontstaat door de aantrekkingskracht (zwaartekracht) van de aarde, de maan en ook nog een beetje de zon. Het totaal aan getijdenenergie wordt geschat op 115 EJ per jaar [4]. Dat is best veel, maar toch minder dan 15 minuten zoninstraling.

De tweede energiebron die niet door de zon wordt beïnvloed is geothermie. Geothermie is warmte die de aardbodem afgeeft onder invloed van een langzaam verval van radioactieve elementen in het binnenste van de aarde. Het totaal aan geothermische energie wordt geschat op zo'n 1.000 EJ, minder dan 100 minuten zoninstraling [5].

Er zijn dus ook energiebronnen die niet direct of indirect uit de zon voortkomen, al is hun potentie vele malen minder dan de energie van de zon. In elk geval

kunnen we concluderen dat er geen sprake is van een tekort aan energie, er is meer dan genoeg. De uitdaging zit vooral in het omzetten van die energie naar voor ons bruikbare energiedragers. Maar met de huidige ontwikkelingen in de technologie van wind en zon is dit amper een probleem te noemen. Het gaat uiteindelijk vooral om de verdeling van deze energie naar plaats en tijd. Hoe krijgen we de gevraagde energie bij ons thuis op het juiste moment?

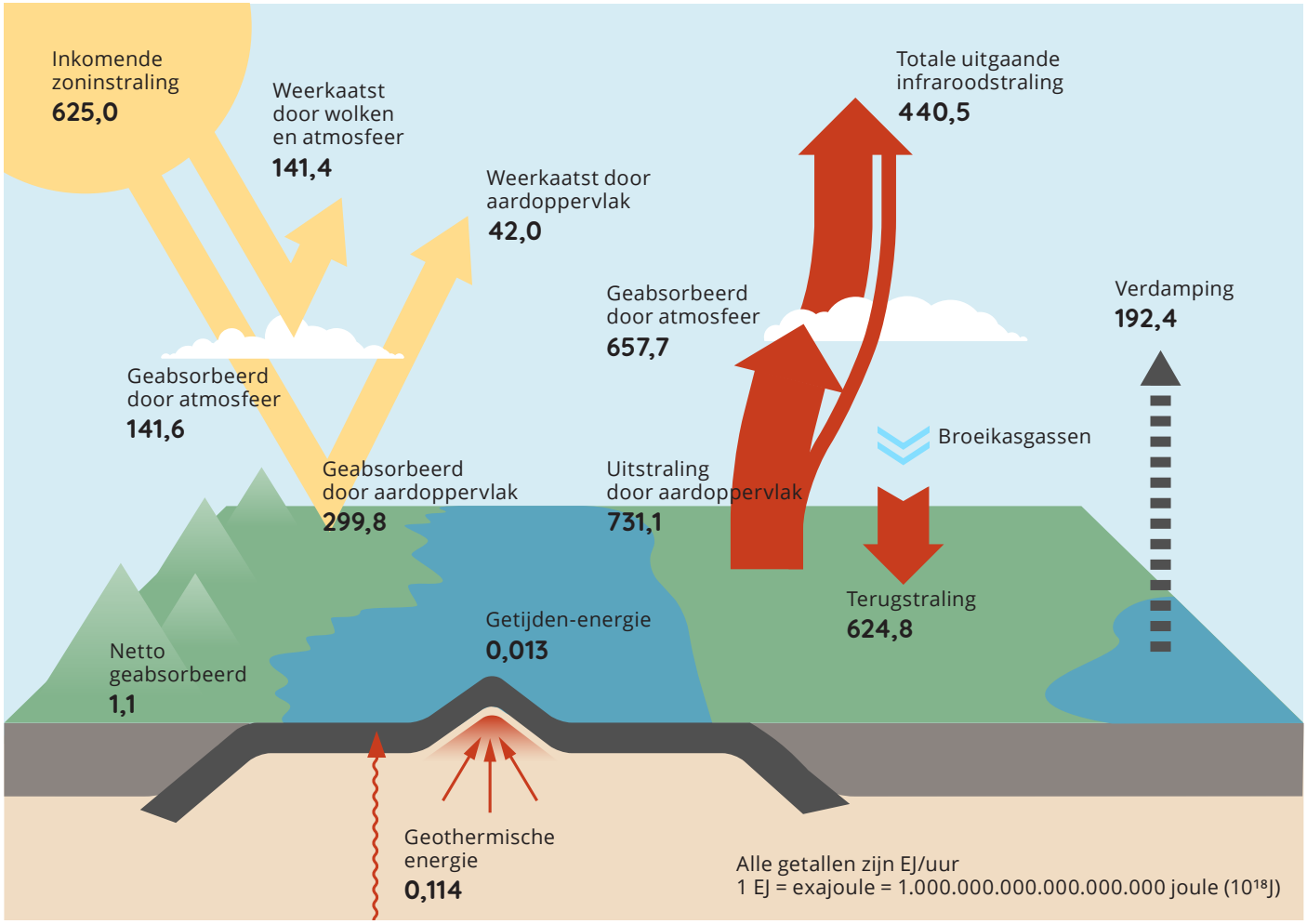
Zoninstraling wereldwijd

We stelden al dat er geen tekort is aan energie, en dat vooral de zon veel meer energie levert dan we op aarde gebruiken. Wat betekent dit dan precies? Laten we eens nagaan welk oppervlak aan zonnepanelen nodig is om te voldoen aan de wereldwijde energiebehoefte. Een zonnepaneel brengt niet overal hetzelfde op; een zonnepaneel in Nederland kan rekenen op ongeveer 1.000 kWh per vierkante meter per jaar aan zoninstraling [6], terwijl dit in de Saharawoestijn kan oplopen tot boven de 2.500 kWh/m^2/jaar. Het wereldwijde energiegebruik in 2016 is 556 EJ, of omgerekend zo'n 155*10^{12} kilowattuur (kWh) oftwel 155.000 terawattuur (TWh).

De efficiëntie van zonnepanelen is in 2017 zo'n 20% [7], dit betekent dat 20% van de invallende zonnestraling wordt omgezet in elektriciteit. Er moet ook wat ruimte tussen de panelen zijn, zodat ze geen schaduw geven op het paneel erachter. Verder houden we in de woestijn geen rekening met schaduweffecten, er zijn daar niet veel bomen. We rekenen daarom met een bezettingsfactor van 60% [8]. Dit betekent dat er, bij 2.500 kWh per vierkante meter per jaar aan instraling met 20% efficiëntie en een bezettingsgraad van 60%, 300 kWh per vierkante meter per jaar aan elektriciteit kan worden opgewekt. In totaal is dan een oppervlakte van 520.000 vierkante kilometer (km^2) nodig, een gebied van 720 bij 720 kilometer, oftewel een ruime 5% van de totale oppervlakte van de Sahara.

Als we een gebied zo groot als Spanje bedekken met zonnepanelen, kunnen we het jaarlijkse wereldwijde energiegebruik opwekken.

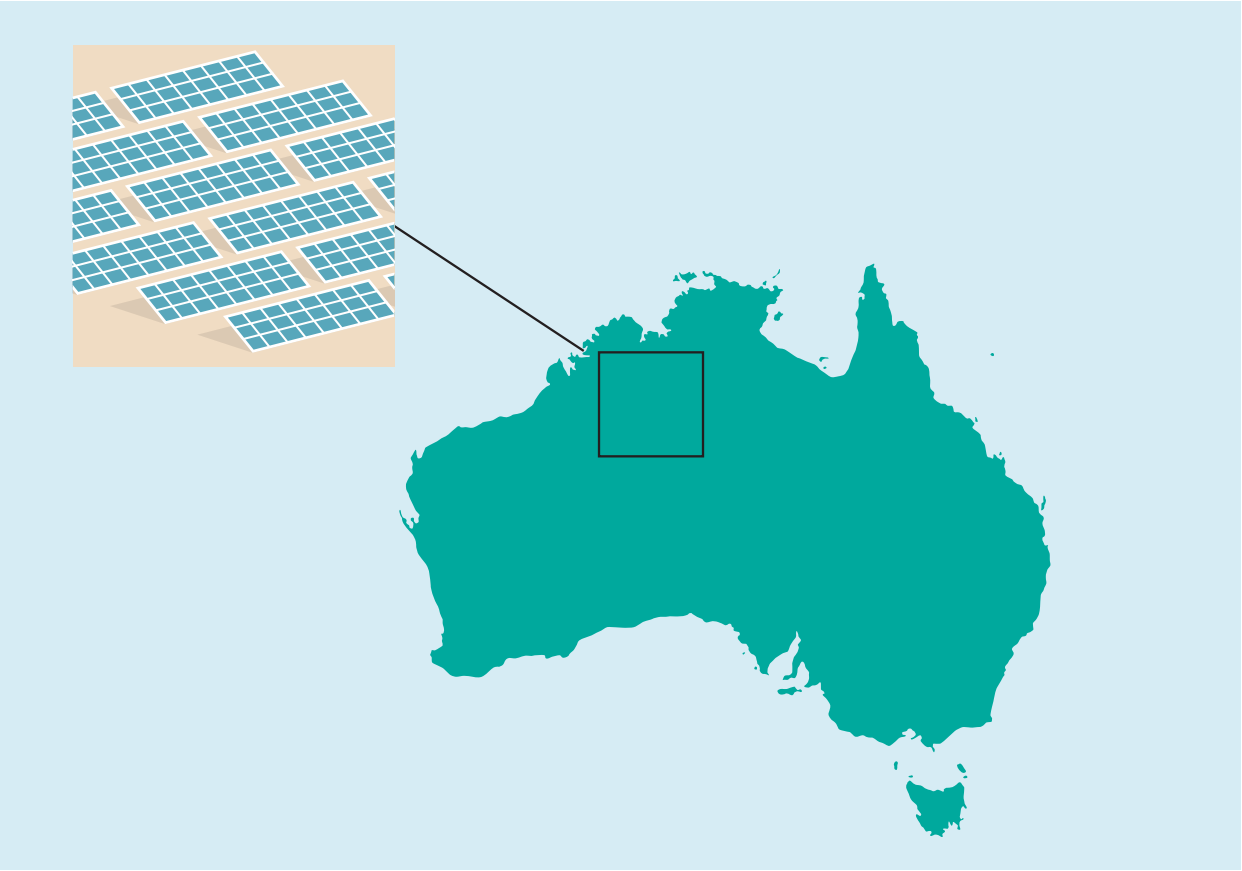
In Australië ligt de Grote Victoriawoestijn, met 650.000 km^2 de grootste woestijn van Australië. Alleen al deze woestijn is groot genoeg om alle energie voor de hele wereld te produceren. Australië is nu een van de grootste kolenproducenten en -exporteurs. Maar het land kan ook met gemak eenzelfde hoeveelheid energie uit zon exporteren.



De energiebalans van de aarde [2], [4], [5].

Een ander woestijngebied met een hoge instraling is de Arabische woestijn, 2,3 miljoen km^2, waar Saudi-Arabië, Oman, Jemen en de golfstaten zich bevinden. Dit gebied is nu rijk aan olie en gas, maar zou in de toekomst met gemak eenzelfde hoeveelheid energie uit zonne-energie kunnen exporteren als het nu levert uit olie en gas. En de voorraad zonne-energie is oneindig.

En zo zijn er op alle continenten dergelijke woestijngebieden te vinden met een hoge instraling. In de Verenigde Staten en Mexico, in China en Mongolië, in Syrië en Irak, et cetera.



Benodigd oppervlak wereldenergieproductie door zon.

Windenergie wereldwijd

Zoals gezegd, is windenergie indirect afkomstig van de zon. De zon warmt de aardatmosfeer namelijk niet gelijkmatig op. In bepaalde gebieden is de zoninstraling hoger, waardoor meer water verdampt en lucht wordt opgewarmd. Warme lucht heeft een lagere dichtheid dan koude lucht, en beweegt daarom omhoog. Hierdoor ontstaat een drukverschil met koudere lucht in naastgelegen gebieden, en de warme lucht verplaatst zich dan naar koudere gebieden. Als de lucht vervolgens afkoelt, beweegt deze weer omlaag. Zo ontstaat een hogedrukgebied en krijg je wind aan het aardoppervlak. Wind is dus niets anders dan lucht die van een hogedrukgebied naar een lagedrukgebied stroomt.

Offshore windturbines, die 1,5% van het oppervlak van de Grote Oceaan innemen, kunnen het jaarlijkse wereldwijde energiegebruik opwekken.

Dit mechanisme heeft onder meer tot gevolg dat in het gebied tussen de evenaar en de keerkringen zogenaamde passaatwinden ontstaan. Dit zijn winden die een zeer constante richting hebben: noordoostelijk op het noordelijk halfrond, en zuidoostelijk op het zuidelijk halfrond. Een groot deel van het jaar waait het daar zeer hard, terwijl er een aantal maanden per jaar bijna geen wind is.

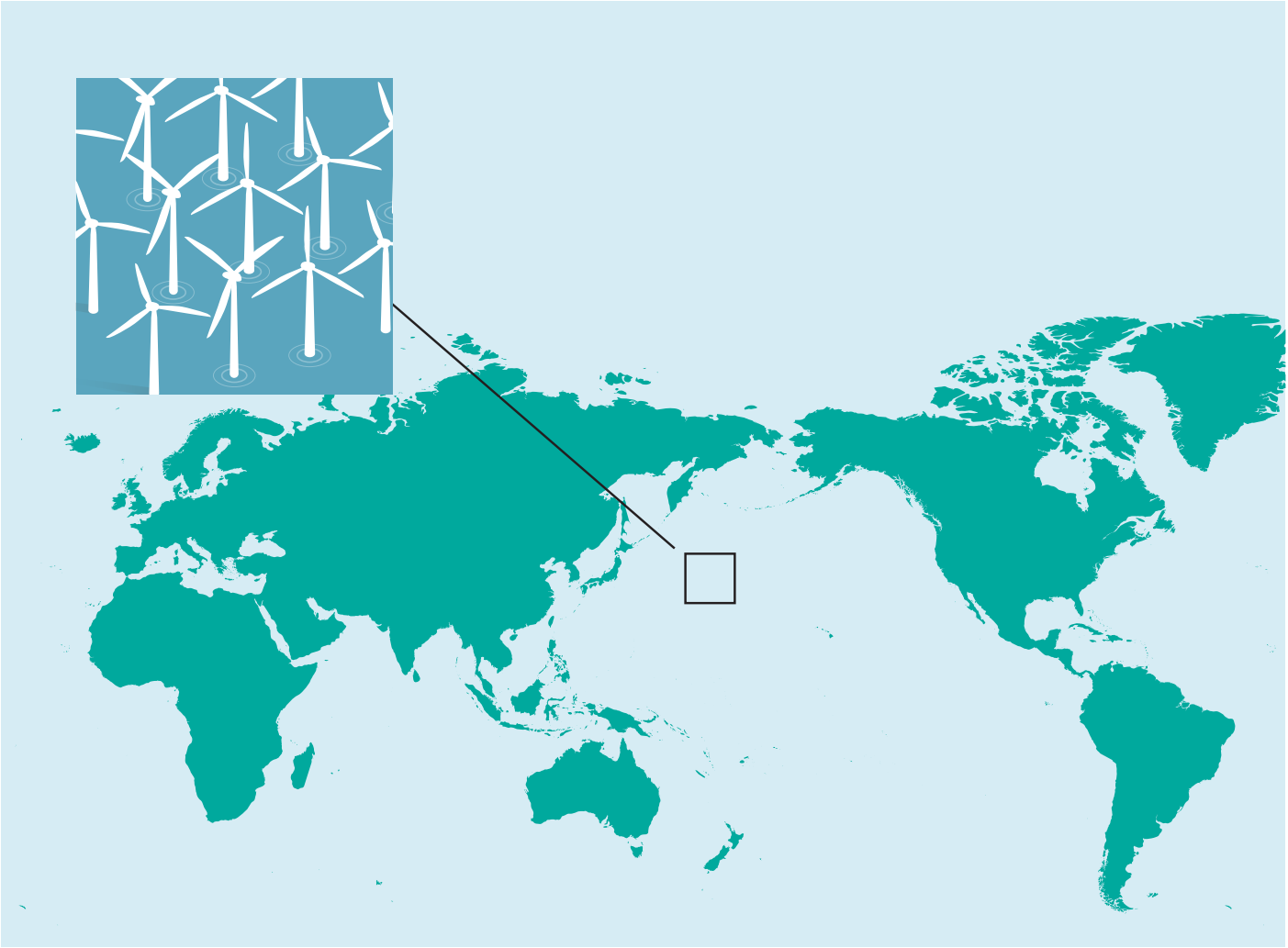
Wind kan ook worden veroorzaakt door andere effecten. Zo kan een overgang van zee naar land zeewind veroorzaken. Op warme dagen warmt het land, en daarmee de lucht boven land, een stuk sneller op dan boven zee, waardoor luchtdrukverschillen ontstaan. De warme lucht stroomt bovenlangs richting zee, waar deze afkoelt en daalt. Hierdoor neemt de luchtdruk boven zee toe en waait uiteindelijk koele wind van zee het land op. Een dergelijke sterke zeewind zie je bijvoorbeeld in Californië. Een koude golfstroom betekent koud zeewater met koude lucht daarboven. Je hebt in Californië dus sterke zeewinden, die toevallig ook nog eens goed correleren met de elektriciteitsvraag voor airconditioning wegens de nabijgelegen Mojavewoestijn in Utah en Arizona, die veel hete lucht produceert.

Op zee heb je constante hoge windsnelheden, een windsnelheid van 15 meter per seconde is hier niet vreemd. Dit komt omdat het zeeoppervlak niet 'ruw' is en de wind door het oppervlak van de zee niet veel wordt afgeremd. Op land zorgen begroeiing en bebouwing voor een veel grotere afremming van de wind en heb je dus lagere windsnelheden dan op zee. Gemiddelde windsnelheden van boven de 10 meter per

seconde op 80 meter hoogte zien we op het noordelijk halfrond in de Grote Oceaan ter hoogte van Japan en in de Atlantische Oceaan ter hoogte van het Verenigd Koninkrijk. Maar vooral op het zuidelijk halfrond onder Zuid-Afrika en Australië, en ter hoogte van Patagonië-Argentinië, zijn er grote gebieden met zeer hoge windsnelheden.

Laten we nu eens uitrekenen hoeveel zeeoppervlak we nodig hebben voor de totale wereldwijde energieconsumptie van 556 EJ ofwel 155.000 TWh. Op de oceaan kunnen we grote drijvende windturbines neerzetten van 10 MW of zelfs meer. Dergelijke windturbines hebben bladen van wel zo'n 100 meter lang. Als je deze windturbines op plaatsen in de oceaan neerzet met gemiddelde windsnelheden op ashoogte van 10 meter per seconde of meer, dan werken deze windturbines bijna altijd op vol vermogen. De bedrijfstijd ligt dan tussen de 60 en 70%. Ze halen, anders gezegd, zo'n 6.000 vollast-uren. Een windturbine van 10 MW produceert dan 60 miljoen kWh per jaar. De windturbines moeten op voldoende afstand van elkaar staan, omdat ze anders in elkaars 'vuile' wind staan en dus minder opbrengen. Laten we eens veronderstellen dat we 1 turbine van 10 MW per vierkante kilometer plaatsen. Dan heb je 2,6 miljoen windturbines van 10 MW nodig om de wereldenergieconsumptie te verzorgen. Dit betekent een gebied van 2,6 miljoen vierkante kilometer, waar per vierkante kilometer maar één turbine staat. Windturbines nemen netto dus veel minder ruimte in, vissen hebben er geen last van en schepen kunnen er bij wijze van spreken gewoon tussendoor varen. Om het in perspectief te plaatsen: we hebben zo'n 1,5% van de Grote Oceaan nodig om alle energie voor de wereld te kunnen produceren.

Grootschalige duurzame elektriciteitsproductie is het goedkoopst in gebieden, oceanen en woestijnen die ver weg liggen van waar mensen wonen en werken.



Benodigd oppervlak wereldenergieproductie door wind.

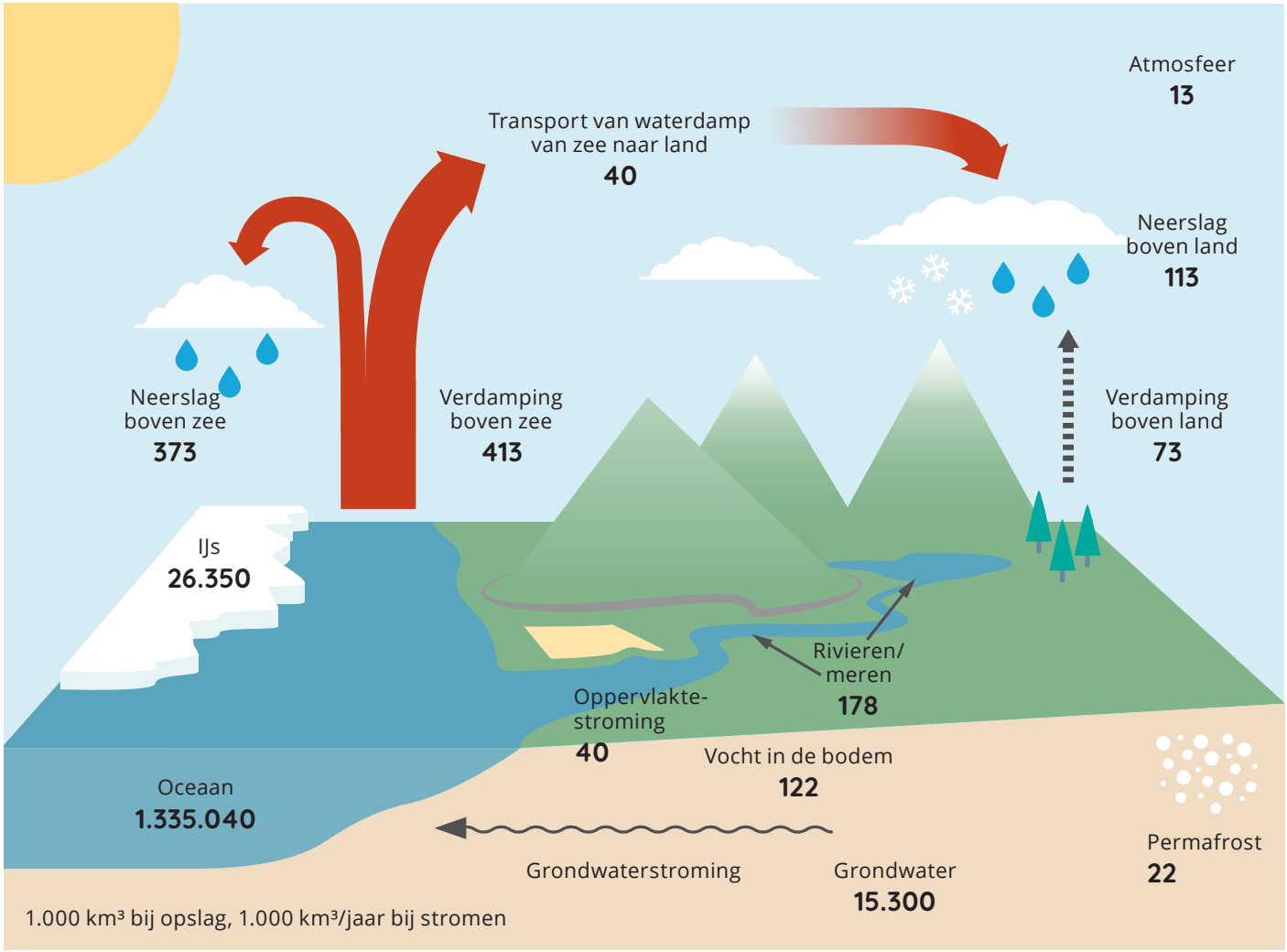
De waterkringloop

Er valt in twee weken tijd meer regen op land dan we wereldwijd aan zoet water gebruiken in een jaar.

Een deel van de energie van de zon (86,4 W/m^2) zorgt voor verdamping van water. In totaal wordt elk jaar zo'n 413.000 kubieke kilometer (km^3) aan zeewater en 73.000 km^3 aan oppervlaktewater en transpiratie van planten omgezet in waterdamp [9]. De wolken die hierbij ontstaan blijven vaak niet op dezelfde plek. Uiteindelijk valt 373.000 km^3 aan water weer neer boven zee [9]. Maar een deel van de wolken die boven zee ontstaan breekt pas open boven land, waardoor hier meer regen valt (113.000 km^3 per jaar) dan er water verdampt (73.000 km^3 per jaar). Afhankelijk van waar dit water valt, kan hier ook weer energie uit worden onttrokken in de vorm van waterkracht.

Naast dat je energie kunt halen uit water, is de waterkringloop ook belangrijk voor de toevoer van zoet water. De totale zoetwaterproductie wordt geschat op 150.000 km^3 per jaar, waarvan driekwart door neerslag, en de rest uit rivieren en grondwater [10]. In 2010 gebruikten we wereldwijd 4.000 km^3 van dit water. In twee weken valt er op land dus meer dan voldoende regen om de hele wereld een jaar lang van zoet water te voorzien. Op het eerste gezicht lijkt er dan ook meer dan voldoende zoet water te zijn. Maar in sommige gebieden valt veel neerslag, zoals in het tropisch regenwoud, in het midden van Afrika en bijvoorbeeld Indonesië. Ook in Noordwest-Europa en het oostelijke deel van de Verenigde Staten valt over het algemeen voldoende neerslag, tussen de 725 en 5.000 millimeter per jaar. Terwijl in noordelijk Afrika, het Midden-Oosten of het zuiden van Australië minder dan 250 millimeter per jaar valt. Net als bij het energievraagstuk geldt dus ook voor water dat niet zozeer de hoeveelheid, maar vooral de verdeling naar tijd en plaats een probleem is.

Er is geen energiecrisis of tekort aan water, het gaat vooral om de verdeling van water en energie naar tijd en plaats.



Waterkringloop [11].

1.2 Ons energie- en watergebruik

Wij mensen kunnen niet zonder energie en water. In de loop der tijd zijn we steeds meer energie en water gaan gebruiken. Maar hoeveel eigenlijk, en waar gebruiken we al die energie en dat water voor?

Waar gebruiken we energie voor?

Energie wordt gebruikt in heel veel onderdelen van ons moderne leven. We gebruiken energie om comfortabel te wonen en werken in onze huizen en kantoren. Energie gebruiken we om ons te verplaatsen in onze auto's, boten en vliegtuigen. We gebruiken energie in de industrie, voor het maken van producten, maar ook als grondstof voor producten zoals plastic of kunstmest. En we gebruiken energie voor kracht en licht, in de vorm van elektriciteit: voor verlichting en om een scala aan apparaten voor ons te laten werken.

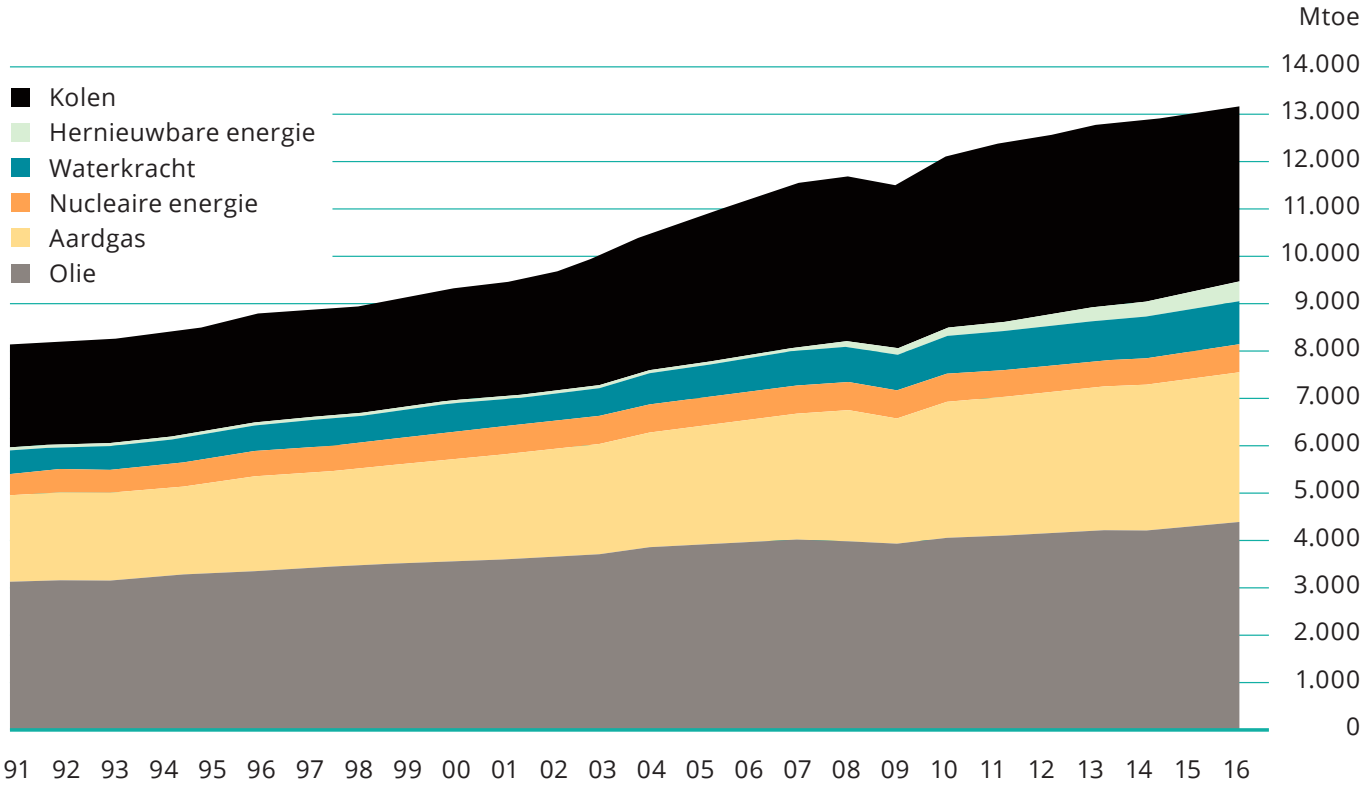
In een fossiel energiesysteem moeten we de energie in de vorm van olie, gas en kolen eerst uit de grond halen. We moeten het transporteren per schip of pijplijn, en omzetten in een bruikbare energiedrager zoals elektriciteit of benzine, alvorens we het kunnen gebruiken om te rijden of voor verlichting. Dus ook voor het maken van bruikbare energiedragers hebben we energie nodig. Daarom hebben we een tweetal maten om het energiegebruik te meten, namelijk primair en finaal energieverbruik. De hoeveelheid energie die we uit de grond halen noemen we het primaire energiegebruik. En de hoeveelheid energie die in de tank van onze auto gaat, of ons huis binnenkomt als elektriciteit, noemen we het finale energieverbruik. Vooral bij elektriciteitsgebruik zit er een behoorlijk groot verschil tussen primair en finaal verbruik, wat voornamelijk wordt veroorzaakt door het omzettingsrendement van elektriciteitscentrales.

Primair energieverbruik wereldwijd

Het primaire energieverbruik wereldwijd was in 2016 totaal 13.276 Mtoe (megaton olie-equivalent) volgens de *BP Statistical Review* [3]. Als we dit omrekenen naar een gewone energiemaat, namelijk joule (1 Mtoe = $41{,}868*10^{15}$ J), dan is het wereldwijde primaire energieverbruik 556 EJ = $556*10^{18}$ joule. Omgerekend in kWh (1 kWh = 3,6 MJ) is dit 155.000 miljard kWh, oftewel 155.000 TWh.

In 2016 is wereldwijd 556 EJ aan energie verbruikt. Tien procent was afkomstig van duurzame energiebronnen.

Het gaat in de *BP Statistical Review* [3] overigens alleen over commercieel verhandelde energie. Veel biomassagebruik, zoals hout en mest, dat wordt ingezet om te koken of voor verwarming in ontwikkelingslanden, zit niet verwerkt in deze statistieken.



Primair energieverbruik wereldwijd van 1991-2016 [3].

Solar Power to the People Primair energiegebruik wereldwijd - 2016			Bron: [3]
Bron	**Primair energieverbruik Mtoe**	**Primair energieverbruik EJ**	**Primair energieverbruik %**
Olie	4.418	185	33,3
Gas	3.204	134	24,1
Kolen	3.732	156	28,1
Nucleair	592	25	4,5
Waterkracht	910	38	6,8
Hernieuwbaar	42	18	3,2
Totaal	13.276	556	100

Elektriciteitsverbruik wereldwijd

Het elektriciteitsverbruik wereldwijd in 2014 was 24.816 TWh [11]. Daarvan was 23,7% afkomstig uit duurzame energie, 10,5% was nucleair en de rest (65,8%) kwam van fossiele energie. Daarvan bestond een groot deel uit kolen [11]; bij de fossiele elektriciteitsproductie is het aandeel van kolen nog verreweg het grootst. Als het gaat om duurzame energie levert waterkracht het grootste aandeel.

In de periode 2005-2015 is het elektriciteitsverbruik met 2,8% per jaar gegroeid, terwijl het primaire energieverbruik in dezelfde periode met 1,8% per jaar toenam. Het elektriciteitsgebruik groeit dus harder dan het primaire energieverbruik. Dit geeft aan dat elektriciteit een steeds grotere rol speelt in onze totale energievoorziening.

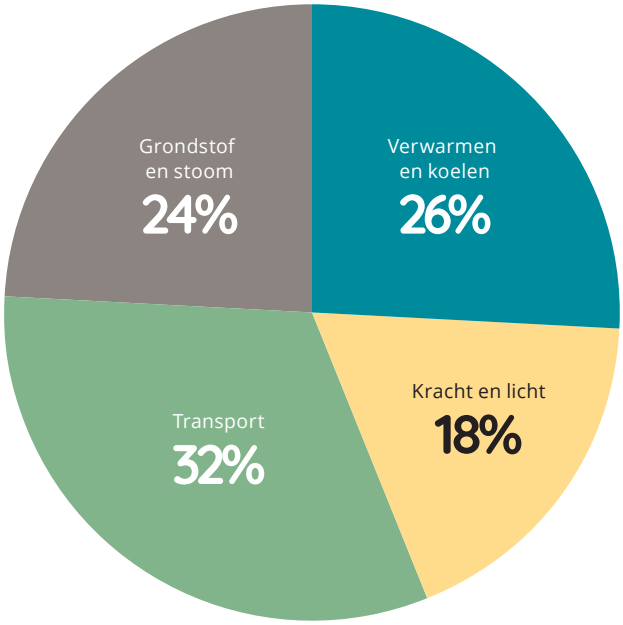
In 2014 was het elektriciteitsverbruik wereldwijd 25.000 TWh. Bijna een kwart daarvan is door duurzame energie opgewekt.

Solar Power to the People **Elektriciteitsgebruik wereldwijd - 2014**		Bron: [13]
Bron	**TWh**	**%**
Fossiel	16.322	65,8
Nucleair	2.617	10,5
Waterkracht	4.023	16,2
Wind	960	3,9
Geothermie en biobrandstof	562	2,3
Zon	332	1,3
Totaal	24.816	100

Finaal energieverbruik wereldwijd

Het finale energiegebruik geeft aan waar we energie voor gebruiken. Het is de hoeveelheid energie die via de gas- en elektriciteitsmeter ons huis binnenkomt, of de brandstof die in onze tank gaat. Het finale energieverbruik delen we daarom in aan de hand van de vier energiefuncties die er zijn: verwarmen en koelen, transport, grondstof en stoom in de industrie en tot slot kracht en licht voor apparaten en verlichting.

Ruwweg kunnen we zeggen dat deze vier energiefuncties allemaal ongeveer een kwart van het finale energieverbruik voor hun rekening nemen. De beschikbare data zijn uit 2010 [12], maar in de loop der tijd is de verhouding tussen de verschillende energiefuncties niet erg veranderd. De energie die we voor transport gebruiken, komt voornamelijk van olie. In de industrie wordt energie gebruikt als grondstof en voor stoomproductie. Binnen de industrie nemen kolen, olie en gas wereldwijd ruwweg allemaal een derde van het finale energiegebruik voor hun rekening. Gas neemt de helft van het energiegebruik voor verwarmen en koelen van



Het finale energiegebruik is ruwweg in vieren te verdelen: verwarmen en koelen, transport, grondstof en stoom, kracht en licht.

Finaal energiegebruik wereldwijd [12].

gebouwen voor zijn rekening. Het gebruik van kolen en olie voor verwarmen en koelen is de laatste decennia teruggedrongen om milieu- en gezondheidsredenen. Kracht en licht zijn volledig afkomstig van elektriciteit.

Waar gebruiken we water voor?

Mensen hebben een steeds grotere energiebehoefte, maar naast energie is water misschien nog wel noodzakelijker. Een dag of zelfs een week zonder elektriciteit lukt nog wel, maar een week zonder water levert veel meer problemen op. Water is van enorm belang voor het welzijn van de mens, en niet alleen in de vorm van drinkwater. Ook bij hygiëne en het voorkomen van ziekten speelt water een belangrijke rol.

In de landbouw is water onmisbaar. Zonder irrigatie zouden we nooit sperzieboontjes uit Kenia kunnen eten, of rijst uit Thailand. Naarmate we meer energie en met name elektriciteit zijn gaan produceren, werden andere functies van water steeds belangrijker, zoals koelen en verwarmen. Daarnaast wordt water ook daadwerkelijk binnen industriële processen gebruikt, vooral in de vorm van demiwater.

Wereldwijd bestaan grote verschillen in hoe water wordt gebruikt, de waterkwaliteit en beschikbaarheid van water. Door klimaatverandering en globalisering verandert de beschikbaarheid van water doordat er meer droge gebieden komen, terwijl in andere gebieden juist een overschot aan water een steeds groter probleem zal vormen.

Drinkwater

Ons lichaam bestaat voor 64% uit water, en om gezond te blijven heeft een mens per dag zo'n tweeënhalve tot drie liter drinkwater nodig [13]. In 2015 had 71% van de wereldpopulatie toegang tot een veilige drinkwaterbron. In dat jaar zijn ook de nieuwe *Sustainable Development Goals* geformuleerd, en nummer zes hiervan gaat over het toegankelijk maken van veilig drinkwater voor iedereen in 2030. Tegelijkertijd omvat het drinkwatergebruik slechts 0,2% (8 kubieke kilometer) van het totale water dat wereldwijd per jaar wordt gebruikt.

Iedereen heeft 3 liter schoon drinkwater per dag nodig.

Hygiëne, sanitatie en koken

Naast drinkwater gebruiken we in huis nog veel meer water, voor het bereiden van eten, het spoelen van een toilet, douchen en wassen van kleding. De WHO heeft als minimumnorm hiervoor 5 tot 12 liter water per dag aangehouden [13]. Maar onder normale omstandigheden ligt dit getal in de meeste landen veel hoger. Wereldwijd is het gemiddelde 180 liter per persoon per dag. Tussen landen kunnen de verschillen groot zijn. In een land als de Verenigde Staten wordt, naast drinkwater, ruim 500 liter per persoon per dag gebruikt in het huishouden. Brazilië gebruikt minder dan de helft (230 liter per persoon per dag), maar in China en Duitsland is dit een stuk minder (rond de 150 liter per persoon per dag). In India gaat het om zo'n 118 liter per persoon per dag.

Voor hygiëne, sanitatie en koken gebruiken we wereldwijd gemiddeld 180 liter per persoon per dag.

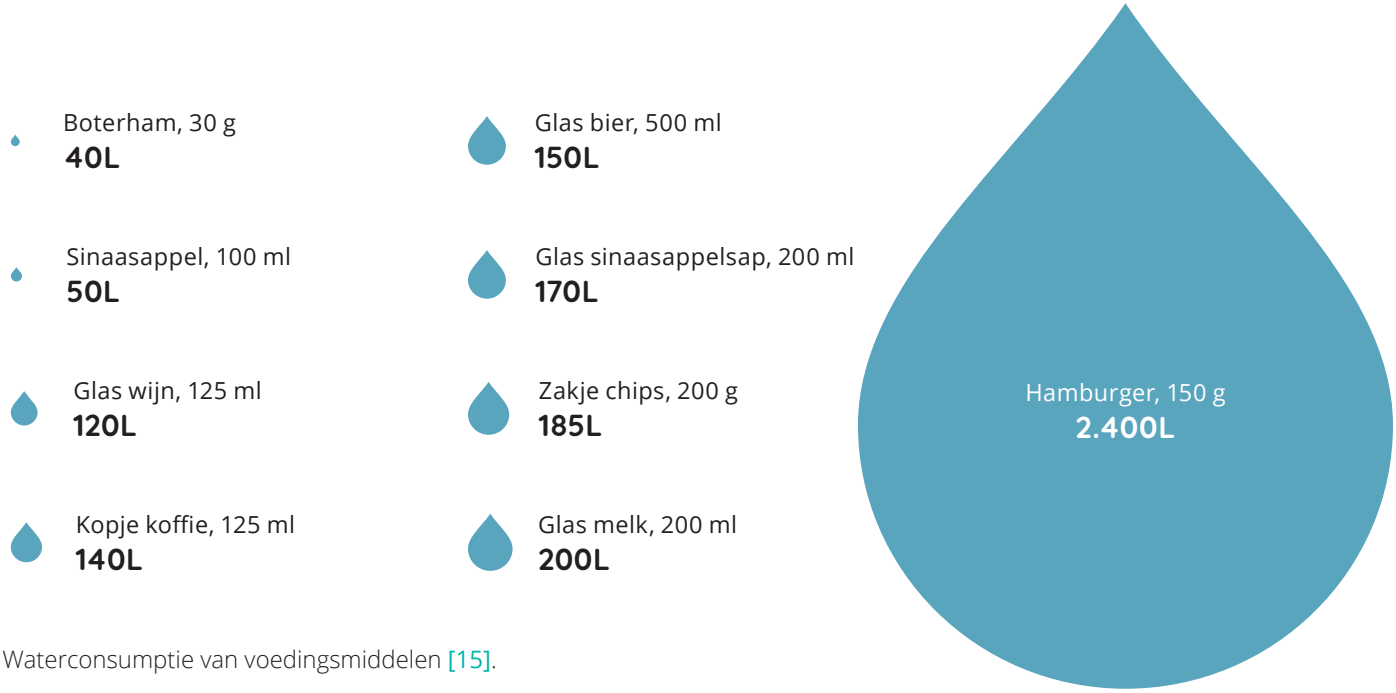
Het watergebruik voor hygiëne, sanitatie en koken is wereldwijd 456 kubieke kilometer, oftewel 11,4% van het totale watergebruik [14].

Landbouw en irrigatie

Wereldwijd wordt het meeste water gebruikt in de landbouw, met name voor irrigatie. Het gaat om 2.769 kubieke kilometer (km^3) per jaar, of bijna 70% van de totale waterconsumptie [14]. Naast irrigatie zijn ook de veehouderij en aquacultuur (de kweek van vis, schaal- en schelpdieren) grootverbruikers. Watergebruik in de landbouw bepaalt dus in grote mate het wereldwijde watergebruik. In India wordt 688 km^3 water per jaar gebruikt in de landbouw, 90,4% van het totale watergebruik van dit land. In de Verenigde Staten is landbouw ook een belangrijke sector, met een watergebruik van 175 km^3 per jaar, wat neerkomt op 12,7% van het totale watergebruik van het land. Dit percentage is lager omdat de industrie in de Verenigde Staten ook in grote mate bijdraagt aan het watergebruik. In China wordt 64,5% (764 km^3) van het water gebruikt voor landbouw- en irrigatiedoeleinden. In Brazilië is dit een vergelijkbaar percentage van 60%; hier wordt bijvoorbeeld veel soja verbouwd voor veevoer, maar ook suikerriet voor de productie van bio-ethanol. In Duitsland echter vindt amper irrigatie plaats, want door het klimaat in Noordwest-Europa hebben de meeste gewassen voldoende aan het regenwater. De Duitsers hebben voor landbouw en irrigatie daarom slechts 0,21 km^3 water nodig per jaar (0,6%). Naast de rol die de landbouwsector speelt in een land, is het ook belangrijk te beseffen dat klimatologische omstandigheden en het soort gewassen dat wordt geteeld, een grote rol spelen bij het watergebruik.

Het watergebruik voor landbouw en irrigatie is wereldwijd een kleine 70% van het totale watergebruik.

Het zoetwatergebruik om ons voedsel te produceren is enorm, zo stellen we vast. Daarbij gaat het overigens niet alleen om het watergebruik in de landbouw, maar ook om het watergebruik voor het schoonmaken, verpakken, vervoeren, het bereiden en de verspilling van (een deel van) het voedsel. Als we dit allemaal meenemen, dan kost het drinken van een kopje koffie 140 liter water en het eten van een hamburger zelfs 2.400 liter [15].



Waterconsumptie van voedingsmiddelen [15].

Industriële processen

Industriële processen gebruiken over het algemeen veel water. Het gaat dan niet zozeer om het daadwerkelijke verbruik van water door omzetting in iets anders, maar meer om transport van energie. Om processen te koelen wordt koelwater gebruikt, meestal in de vorm van oppervlaktewater dat via koelwatersystemen langs de processen wordt geleid, waarna een deel van het koelwater wordt verdampt in open recirculerende koeltorens. Daarnaast circuleert er water tijdens industriële processen. Meestal is dit demiwater, dat is omgezet in stoom. In dit geval is water dus geen drager van koude, maar juist van warmte door stoom te produceren en hiermee processen aan te drijven.

Ook voordat energie kan worden geproduceerd speelt water al een belangrijke rol bij het delven van grondstoffen, zoals in kolenmijnen. Bij het delven van olie en gas hangt het watergebruik sterk af van de toegepaste technologie, maar een vuistregel is dat voor de minder conventionele winning van

energie (schaliegas, teerzanden) veel meer water nodig is dan voor conventionele winning. In totaal was er in 2014 bijna 400 km^3 aan water nodig voor energieproductie, dat is ongeveer de helft van het totale watergebruik van de industrie [16]. Dat betekent ook dat ongeveer 10% van de totale wereldwijde waterconsumptie wordt gebruikt voor de productie van elektriciteit. In totaal wordt namelijk 19% (786 km^3) van het totale watergebruik toegeschreven aan industriële processen. In geïndustrialiseerde landen zie je dat dit percentage veel hoger ligt; in Duitsland is dit 85% (32,6 km^3/jaar), en in de Verenigde Staten 51%, of 284 km^3/jaar. Brazilië en China zitten meer in de buurt van het gemiddelde met respectievelijk 17% en 23%. India besteedt het grootste deel van zijn waterconsumptie aan landbouw, zoals we al eerder zagen. Industrieel watergebruik omvat daar maar 2,2% van het totale watergebruik.

Het watergebruik voor industriële processen is ongeveer 800 kubieke kilometer per jaar, waarvan de helft voor energieproductie (mijnbouw en elektriciteitsproductie).

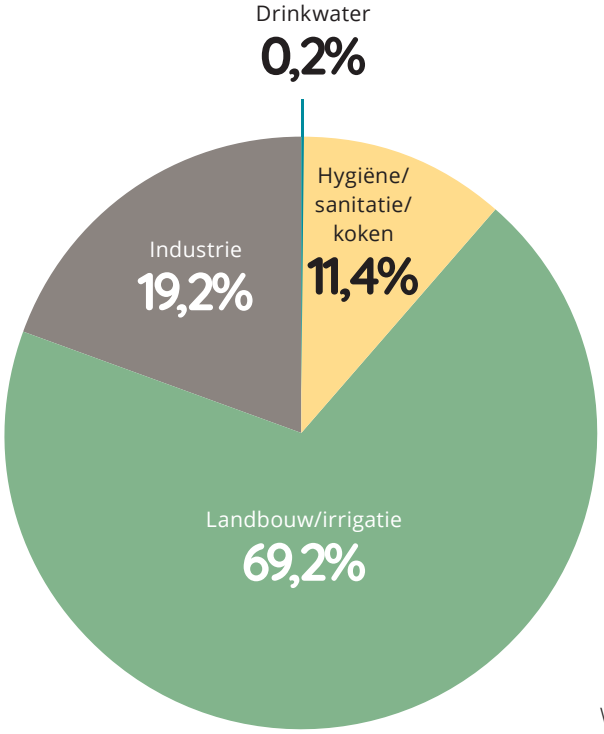
Het wereldwatergebruik

Water is onmisbaar voor het leven op aarde en voor ons mensen. We gebruiken water om te drinken, maar ook voor onze hygiëne en sanitatie, voor het produceren van voedsel en ook voor de productie van energie. Belangrijk om te beseffen is dat dit water niet allemaal dezelfde kwaliteit hoeft te hebben. Aan drinkwater worden vanzelfsprekend hoge eisen gesteld, maar tegelijkertijd is dit ook maar een fractie van het totale watergebruik. Voor irrigatie en industriële toepassingen is een andere kwaliteit water nodig, maar wel in veel grotere hoeveelheden.

Het wereldwatergebruik in 2010 was 4.000 kubieke kilometer, een kleine 1.600 liter per persoon per dag.

In totaal was het wereldwatergebruik in 2010 4.000 km^3. Dit komt neer op een verbruik per persoon per dag van een kleine 1.600 liter, waarvan slechts 3 liter voor drinkwater. Drinkwater neemt dan ook maar een heel kleine fractie van het totale watergebruik voor zijn rekening: 0,2%. Verreweg het meeste water, bijna 70%, wordt gebruikt voor landbouw en irrigatie.

Solar Power to the People	Wereldwatergebruik					Bron: 1[17] 2 [18] 3[19] 4[20] 5[21] 6[14]
Km³ per jaar	**VS[1]**	**Brazilië[2]**	**India[3]**	**China[4]**	**Duitsland[5]**	**Wereld[6]**
Drinkwater	0,3	0,2	1,4	1,5	0,1	8
Hygiëne/sanitatie/koken	61,8	17	54,6	73,5	5,3	456
Landbouw/irrigatie	175,1	44,9	688	392,2	0,2	2769
Industrie	248,4	12,7	17	140,6	32,6	768
Totaal	486	75	761	608	38	4001



Wereldwatergebruik [14].

2 DUURZAME ENERGIE-SYSTEMEN IN DE TOEKOMST

Vóór de industriële revolutie was ons energieverbruik beperkt en eigenlijk geheel duurzaam. We hadden de zon of verbrandden wat hout, stro of gedroogde mest voor warmte en licht. Dieren deden het zware werk, we gebruikten ze voor ons transport. Waterkracht en windenergie gebruikten we om meel te malen of water op te pompen.

In het midden van de 18e eeuw kwam de stoommachine die, met kolen gestookt, het zware werk en transport overnam van paarden. Dat was veel eenvoudiger en gemakkelijker. En aan het eind van de 19e eeuw werden de eerste elektriciteitscentrales gebouwd. Met elektriciteit kon je nog makkelijker licht en kracht leveren. Als laatste technologie, begin 20e eeuw, werd de verbrandingsmotor geïntroduceerd voor vervoer. Benzine, gemaakt uit olie, was daarvoor de ideale brandstof.

Ons energiesysteem werkt nog steeds op dezelfde manier. Voor het verwarmen van onze gebouwen zijn we overgestapt van hout naar kolen, toen olie en nu vaak gas. Maar we verbranden dat nog steeds in een ketel. Voor transport gebruiken we hoofdzakelijk een verbrandingsmotor, waar we benzine, diesel of gas in stoppen. In de industrie gebruiken we veel stoom, geproduceerd in grote ketels, voor proceswarmte. En kolen, olie en gas worden in de industrie gebruikt als grondstof voor het maken van producten zoals ijzer, plastics, nylon of kunstmest. Elektriciteit gebruiken we inmiddels overal voor: voor kracht, warmte, stoom en licht. Maar elektriciteit wordt vooral nog gemaakt door een ouderwetse stoommachine, gecombineerd met een generator. Vooruit, er is nog een technologie bijgekomen: de gasturbine. Die wordt, in combinatie met een stoomturbine, ingezet voor efficiëntere elektriciteitsproductie, voor transport in de luchtvaart en voor het maken van stoom in de industrie.

Ons energiesysteem is dus niet veel veranderd in de afgelopen honderd jaar. Het systeem is gebaseerd op fossiele energiebronnen, kolen, olie en gas, met de energie-conversietechnologieën stoomturbine, gasturbine, verbrandingsmotor, generator en ketel.

Maar hoe ziet de toekomst van onze energiesystemen eruit? Hoe gaan we onze energiefuncties invullen en waar gebruiken we dan allemaal energie voor? En hoe gaan we de benodigde energie daarvoor produceren? Laten we eens een poging wagen om in de toekomst te kijken.

2.1 Het energieverbruik wordt all-electric

Laten we allereerst eens kijken naar de toekomst van ons energiegebruik. We gebruiken energie voor verwarmen en koelen, voor transport, voor licht en kracht voor onze apparaten, en in de industrie als grondstof en stoom voor allerlei processen. We lopen deze vier delen van ons energiegebruik langs.

Verwarmen en koelen

In grote delen van de wereld verwarmen we onze huizen, scholen, kantoren, winkels en kassen voornamelijk via ketels die aardgas, olie of zelfs nog kolen verstoken. Helaas zijn onze gebouwen niet echt energie-efficiënt, ze hebben over het algemeen slecht geïsoleerde vloeren, daken, muren en ramen. Dus er is een hele slag te winnen door onze woningen en gebouwen goed te isoleren.

Een nieuwbouwwoning kunnen we bouwen zonder energie voor verwarmen en koelen. Bijvoorbeeld in Duitsland bouwen ze nieuwbouwwoningen, 'passiefhuizen' genoemd, die zo goed ontworpen en geïsoleerd zijn, dat de mensen en apparaten zelf, plus warmteterugwinning uit de ventilatielucht, voldoende warmte produceren. Er is geen energie meer nodig voor verwarmen en koelen. Maar in de meeste nieuwbouwwoningen, en ook in bestaande goed geïsoleerde gebouwen, heb je in de winter nog steeds energie nodig om te verwarmen en in de zomer om te koelen. Hoe doe je dat dan duurzaam? Eigenlijk niet echt moeilijk als je je het volgende bedenkt:

- in de zomer heb je het warm en wil je koelen en
- in de winter heb je het koud en wil je verwarmen.

Als we nu het overschot aan warmte of energie van de zomer naar de winter kunnen brengen, en omgekeerd het overschot aan koude van de winter naar de zomer, dan hebben we in principe geen extra energie meer nodig. Het gaat dus om opslag van warmte en koude en een duurzaam energiesysteem voor verwarmen en koelen.

In de toekomst worden onze gebouwen en woningen veel energiezuiniger. We verwarmen of koelen ze dan met duurzame warmtebronnen, warmtepompen en efficiënte warmteopslag.

Dus als we nu 's zomers warmte in de bodem opslaan en er 's winters weer uithalen, dan zijn we klaar. Natuurlijk verliezen we wat energie, maar met een warmtepomp die een klein beetje elektriciteit gebruikt, kunnen we het huis altijd op het juiste temperatuurniveau krijgen. Deze techniek, die we nu al op veel plaatsen toepassen, heet WKO (warmte-koudeopslag).

Natuurlijk kan de warmte of koude ook uit een andere bron via een leidingennet aan gebouwen worden toegevoerd. Dat moet dan wel duurzame warmte zijn, bijvoorbeeld uit een geothermische bron, of restwarmte uit de industrie - maar dan wel restwarmte afkomstig van een duurzame energiebron. Met warmtewisselaars en vooral warmtepompen kunnen we de warmte of koude altijd op het gewenste temperatuurniveau krijgen.

In dichtbevolkte gebieden is warmtedistributie wel economisch aantrekkelijk, maar in kleine dorpen op het platteland ligt dat anders. Mogelijk is een alternatief om het gasnet daar om te bouwen naar een waterstofnet. Uiteraard moeten dan ook eerst de gebouwen en woningen goed geïsoleerd worden, maar daarna kan aan de resterende warmtevraag worden voldaan via waterstof verstookt in boilers of ketels.

Rond de evenaar, of zeg maar tussen de keerkringen, is er echter geen warmtevraag maar altijd een koelvraag. Het hele jaar rond wil je gebouwen en woningen koelen. Dat gebeurt via airco's die elektriciteit gebruiken om koude te maken. Dat kan prima, maar vaak is in de nabijheid ook wel een goede koude bron te vinden, bijvoorbeeld in de zee of in het oppervlaktewater. Zo kun je bijvoorbeeld in het Caraïbisch gebied heel goed koelen met zeewater, door het koude zeewater van zo'n 6 à 9 graden Celsius, opgepompt van een diepte van enkele honderden meters, via een warmtewisselaar direct gebouwen en woningen te laten koelen.

De toekomst is dus aan veel energiezuinigere gebouwen met duurzame koude- en warmtebronnen, in combinatie met elektrische warmtepomptechnologie en efficiënte warmte- en koudeopslag-systemen. Maar in oude steden, dorpen en op het platteland kan waterstof door aangepaste gasleidingen een goed alternatief zijn voor duurzame warmte.

Transport

Voor rijden, varen en vliegen gebruiken we nu vooral olie, die in een raffinaderij wordt verwerkt tot benzine, diesel, LPG, kerosine, et cetera. In grote tankauto's wordt de brandstof naar tankstations gereden, waar we vervolgens de tank vullen van onze auto, boot, bus en truck. De techniek waarmee we daarna onze auto's en boten laten rijden en varen is de afgelopen honderd jaar niet veranderd: dat is een verbrandingsmotor met een efficiëntie van slechts zo'n 25%. De afgelopen paar

decennia is er hard gewerkt om ook aardgas als transportbrandstof te introduceren in de vorm van *compressed natural gas* (CNG) of *liquified natural gas* (LNG) omdat het minder kooldioxide (CO_2) uitstoot. Ook zijn er biobrandstoffen op de markt gekomen: biodiesel, ethanol, bio-CNG en bio-LNG, allemaal gemaakt uit planten of plantenresten. Op zich prima, maar je blijft zitten met een verbrandingsmotor met een slecht rendement.

In de toekomst gaan we autonoom en elektrisch rijden, varen en vliegen, met elektromotoren, batterijen én brandstofcellen met waterstof.

Daarom wordt er de laatste jaren hard gewerkt aan de elektrische auto, want een elektromotor heeft een efficiëntie van wel zo'n 95%. Maar de grote vraag is: Hoe neem je nu die elektriciteit mee in je auto of boot? Batterijen is een optie, maar je hebt heel veel gewicht aan batterijen nodig om voldoende elektriciteit op te slaan waarmee je dan zo'n honderd tot vierhonderd kilometer kunt rijden. En het kost een behoorlijke tijd om die batterijen vervolgens weer op te laden. Toch is dit best een acceptabele oplossing voor auto's die niet veel kilometers per dag rijden. Maar wat doen we met auto's, bussen, trucks, boten en treinen die wel kilometers maken?

Daarvoor is de brandstofcel in opkomst. Een brandstofcel zet waterstof om in elektriciteit met een rendement van 60% [22]. Vervolgens drijft de elektromotor de wielen aan. Deze vervoermiddelen worden FCEV genoemd, *Fuel Cell Electric Vehicles*. We tanken dan waterstof net zoals je nu aardgas (CNG) tankt.

In de toekomst zien we nog een heel belangrijke ontwikkeling in de transportsector en dat is autonoom rijden of varen. De verwachting is dat een dergelijke ontwikkeling zorgt voor minder auto's die bovendien ook nog eens zuiniger rijden, doordat niet de mens maar de auto zelf rijdt.

Autonoom elektrisch rijden, varen en vliegen - met batterijen maar zeker ook met brandstofcellen en waterstof - hebben de toekomst als het gaat om transport.

Grondstof en stoom in de industrie

De industrie gebruikt energie om stoom te produceren die nodig is om bepaalde processen goed te laten verlopen. In onder andere de papier-, voedings- en chemische industrie is dat het geval. In heel veel processen valt nog veel energiewinst te behalen door efficiencyverbetering. Maar ook door elektrificatie van industriele processen kunnen processen efficiënter en vooral schoner worden gemaakt.

In de toekomst zien we steeds meer elektrische productieprocessen en nieuwe productietechnieken, zoals 3D-printing. Als grondstof in de industrie gebruiken we waterstof en biomassa.

Daarnaast gebruikt vooral de chemie energie als grondstof, ook wel 'feedstock' genoemd, om daaruit andere chemische materialen te maken. De chemie gebruikt nu nog vooral fossiele brandstoffen zoals olie en gas als grondstof. Zo worden heel veel chemische materialen zoals ethyleen, plastics, nylons en polymeren gemaakt uit olie. Ook aardgas is een grondstof voor het maken van chemische materialen, zoals methanol en ammoniak (kunstmest).

In een groene economie moeten we deze chemische materialen niet meer maken uit fossiele brandstoffen maar uit groene grondstoffen en 'afval'. Die groene grondstoffen kunnen we winnen uit biomassa, bijvoorbeeld hout, stro of algen en zeewier. Ook kunnen we diverse chemische grondstoffen recyclen uit afval. Maar een heel interessante groene grondstof kan gemaakt worden uit biomassa, en vooral ook uit elektriciteit, namelijk waterstof. Als deze elektriciteit afkomstig is van een duurzame bron is dit dus groene waterstof.

Veel productieprocessen zijn nu nog grootschalige productieprocessen. Onder meer *additive manufacturing*, oftewel 3D-printen, kan dit productieproces sterk veranderen. Daarbij kan een gepersonaliseerd product *on demand* en *on the spot* worden gemaakt. Dit kan leiden tot minder afval, minder transport en lichtere producten en kan daardoor zorgen voor een aanzienlijke energiebesparing. Ook kan 3D-printen een grote rol spelen in een circulaire economie, waarbij producten makkelijker op locatie kunnen worden gerepareerd, aangepast of deels gerecycled.

Het toekomstig energiegebruik voor de productie van stoom is deels te verminderen door efficiëntieverbeteringen, en te vervangen door gebruik van elektriciteit in processen.

Licht en kracht voor onze apparaten

Om al onze apparaten, machines, pompen, compressoren, verlichting, computers en telefoons te laten werken, gebruiken we elektriciteit. Natuurlijk kunnen we veel van onze apparaten nog veel energie-efficiënter maken. Dat is zeker het geval bij verlichting via toepassing van ledverlichting.

Maar in de toekomst komen er ook vele nieuwe apparaten en systemen bij die elektriciteit zullen gaan gebruiken, denk aan 3D-printers, robots, drones, zendmasten, datacenters, het 'internet of things' en de cloud. Al deze apparaten zullen werken op elektriciteit. De vraag naar elektriciteit neemt toe door een uitbreiding en toenemende penetratie van apparaten.

In de toekomst neemt elektriciteitsgebruik toe voor nieuwe apparaten zoals 3D-printers, drones en robots.

Al het eindgebruik van energie wordt elektriciteit

In de toekomst wordt het eindgebruik van energie in onze samenleving elektrisch. Niet alleen voor kracht en licht, maar ook voor alle andere energiefuncties. Bij verwarming en koeling gaat de elektrische warmtepomp een grote rol spelen. Ook in de industrie wordt elektriciteit belangrijker. Evenals in de transportsector, doordat alle auto's worden uitgerust met een elektromotor voor de aandrijving. Meer en meer nemen de elektromotor, warmtepomp, batterij en brandstofcel de functies over van verbrandingsmotor, ketel, generator en stoomturbine.

Het eindgebruik van energie voor verwarming en koeling, transport, grondstof en stoom in de industrie en voor kracht en licht, wordt meer en meer elektrisch.

Solar Power to the People Toekomstige ontwikkelingen in energiegebruik	
Energiegebruik	**Toekomstige ontwikkelingen**
Verwarmen & koelen	Energiebesparing, thermische opslag, warmtepompen, waterstofboilers
Transport	Elektrisch, autonoom, batterijen, waterstof-brandstofcellen
Grondstof & stoom in de industrie	Elektrische processen, warmtepompen, digitale processen, 3D-printen, bio-based, waterstof
Kracht & licht	Nieuwe apparaten (robots, 3D-printen, '*internet of things*'), warmtepompen, waterstof-brandstofcellen

2.2 De duurzame energie-productie wordt all-electric en goedkoop

De energie die we nodig hebben in een duurzame samenleving moet natuurlijk alleen maar uit duurzame energiebronnen komen. Dat is op zich geen enkel probleem want, zoals we al hadden laten zien, de zon geeft ons in een uur tijd meer energie op aarde dan we in een jaar wereldwijd gebruiken. Op heel veel manieren kunnen we de duurzame energiebronnen omzetten in nuttige energiedragers. Maar de meeste en belangrijkste energieconversie-technologieën zetten duurzame energie om in elektriciteit. Dat doen we van oudsher al uit waterkracht en geothermie, maar tegenwoordig meer en meer uit wind en zon.

Was en is waterkracht veelal de goedkoopste vorm van elektriciteitsproductie, anno 2017 zien we dat de combinatie zon en wind, op plekken waar de zon goed schijnt en de wind hard waait, wereldwijd de goedkoopste vorm van elektriciteitsproductie is – of in een paar jaar zal worden. Zonne-energie kan in gebieden in het Midden-Oosten, Brazilië, Chili, Mexico, India, China, Australië en Afrika in 2020 elektriciteit produceren voor 2 à 3 dollarcent per kWh. Windenergie kan in gebieden zoals Marokko, Mexico, Argentinië, de Verenigde Staten, China, India, delen van Afrika, Mongolië en Kazachstan elektriciteit produceren, in 2020 ook voor 2 à 3 dollarcent per kWh. En voor offshore wind zien we in 2017 de eerste *tender offers* in Duitsland en Denemarken voor minder dan 4 eurocent per kWh.

In 2040 produceren we grootschalige zonne- en windelektriciteit voor minder dan 2 dollarcent per kWh. Op zeer goede locaties zelfs voor minder dan 1 dollarcent per kWh.

Zoals duidelijk wordt uit een studie van Lazard uit januari 2017, kan ook in de Verenigde Staten elektriciteit die geproduceerd is uit wind en zon concurreren met elektriciteit die geproduceerd is uit gas en kolen. Elektriciteit uit wind kan voor 3 dollarcent/kWh geproduceerd worden, uit zon voor 4,5 dollarcent/kWh, uit gas voor 5 dollarcent/kWh en uit kolen voor 6 dollarcent/kWh [23].

De onderzoekers van Bloomberg New Energy Finance voorspellen in hun *Energy Outlook Report 2017* dat de kosten voor zon tot 2040 met zo'n 66% zullen dalen; de kosten voor wind *onshore* dalen met 47% en voor wind *offshore* met maar liefst 71% [24]. Alle duurzame vormen van elektriciteitsproductie (zon, wind *onshore*, wind *offshore* en ook waterkracht) kunnen tegen 2040 elektriciteit produceren voor minder dan 2 dollarcent per kWh. En op diverse plekken op de wereld zelfs voor minder dan 1 dollarcent per kWh.

3 SOLAR POWER TO THE PEOPLE WERELDWIJD

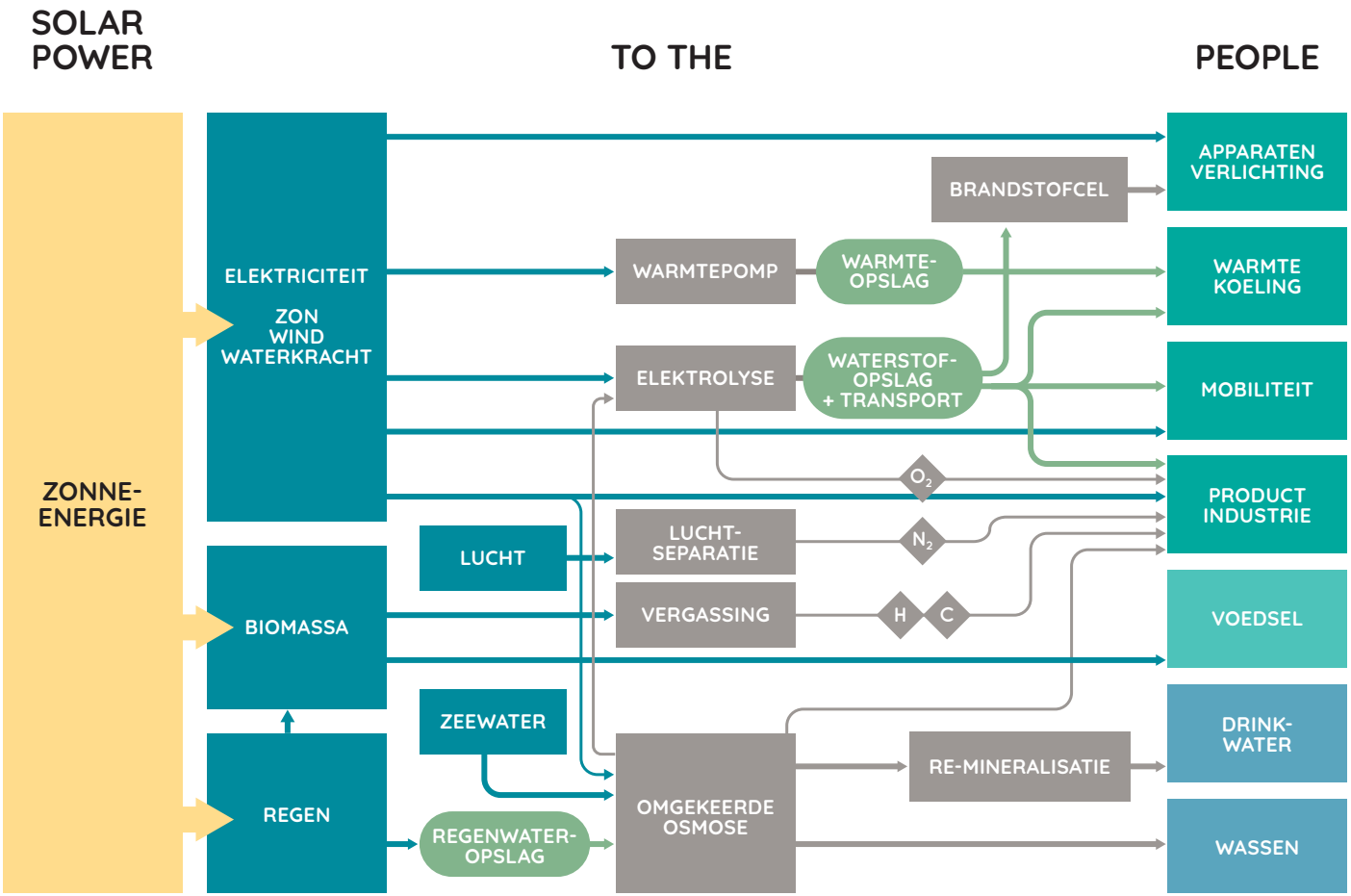
We produceren met onze duurzame energiebronnen voornamelijk elektriciteit. Via waterstof transporteren we die elektriciteit over de wereld voor gebruik op de plaats en tijd dat we het nodig hebben.

Alle mensen van schone en betaalbare energie en water voorzien, is een enorme uitdaging. Gelukkig zijn of worden alle technieken om uit zon, wind en water, energie en drinkwater te maken, steeds goedkoper dankzij de technologieontwikkelingen en vooral de massaproductie. Het wordt zelfs uiteindelijk goedkoper om energie en water te produceren uit duurzame bronnen dan uit fossiele bronnen. Maar dan zijn we er nog niet, we moeten namelijk de energie en het water wel bij de mensen brengen.

Productie van energie uit zon, wind en water is namelijk afhankelijk van waar je je op de wereld bevindt én afhankelijk van het tijdstip. Veelal wonen en werken we niet op die plekken waar de zon het hardst schijnt (woestijnen) of de wind het hardst waait (oceanen). Bovendien willen we ook energie gebruiken in de nacht als de zon niet schijnt of op momenten dat het niet waait. Dat geldt ook voor ons zoete water. Het regent namelijk niet overal op de aarde evenveel en zeker ook niet altijd. In een duurzaam energie- en watersysteem moeten we dus energie en water over afstanden en tijd kunnen transporteren en we moeten ze kunnen opslaan.

Energie en water zijn weliswaar met voedsel de belangrijkste eerste levensbehoeften, maar uiteindelijk gaat het erom hoe, waarvoor en met welke kwaliteit we energie en water gebruiken. We willen namelijk niet sec energie maar energiefúncties, zoals een goede maaltijd kunnen bereiden, een comfortabele woning hebben of 's avonds een boek kunnen lezen. Dat geldt ook voor water, we willen namelijk water drinken, ons kunnen douchen of de tuin kunnen besproeien. We moeten dus de duurzame energie kunnen omzetten naar de juiste energiefuncties, diensten of producten.

In een duurzaam energiesysteem produceren we met zon, wind en water voornamelijk duurzame elektriciteit. Dat betekent dat we uiteindelijk deze duurzame elektriciteit naar de mensen moeten kunnen brengen op het moment dat er om gevraagd wordt. Bovendien wil je deze elektriciteit kunnen omzetten in al die energiefuncties, diensten en producten die mensen vragen. Laten we eerst eens nader kijken hoe we de duurzame energie (voornamelijk elektriciteit) over de wereld kunnen vervoeren en opslaan en hoe we er basisproducten mee kunnen maken, zoals chemische producten en metalen, maar wie weet ook drinkwater.


SOLAR POWER
TO THE
PEOPLE
ZONNE-ENERGIE
ELEKTRICITEIT
ZON
WIND
WATERKRACHT
BIOMASSA
REGEN
LUCHT
ZEEWATER
REGENWATER-OPSLAG
WARMTEPOMP
WARMTE-OPSLAG
ELEKTROLYSE
WATERSTOF-OPSLAG + TRANSPORT
LUCHT-SEPARATIE
VERGASSING
OMGEKEERDE OSMOSE
BRANDSTOFCEL
O_2
N_2
H
C
RE-MINERALISATIE
APPARATEN VERLICHTING
WARMTE KOELING
MOBILITEIT
PRODUCT INDUSTRIE
VOEDSEL
DRINK-WATER
WASSEN

3.1 Waterstof voor transport en opslag van duurzame energie

Zoals gezegd, de productie van elektriciteit door zon en wind is afhankelijk van het zon- en windaanbod. En dit aanbod verschilt per plaats op aarde en fluctueert sterk in de tijd. Daarom is transport en opslag van elektriciteit over de hele wereld een belangrijke uitdaging.

Natuurlijk kunnen we elektriciteit in batterijen opslaan, maar dit is een oplossing voor transport van kleine hoeveelheden elektriciteit en voor het overbruggen van korte termijnen, omdat de energiedichtheid in batterijen gering is. Daarom is conversie van elektriciteit in een andere vorm van energie vaak een betere optie om grotere volumes voor langere tijd te kunnen opslaan en transporteren.

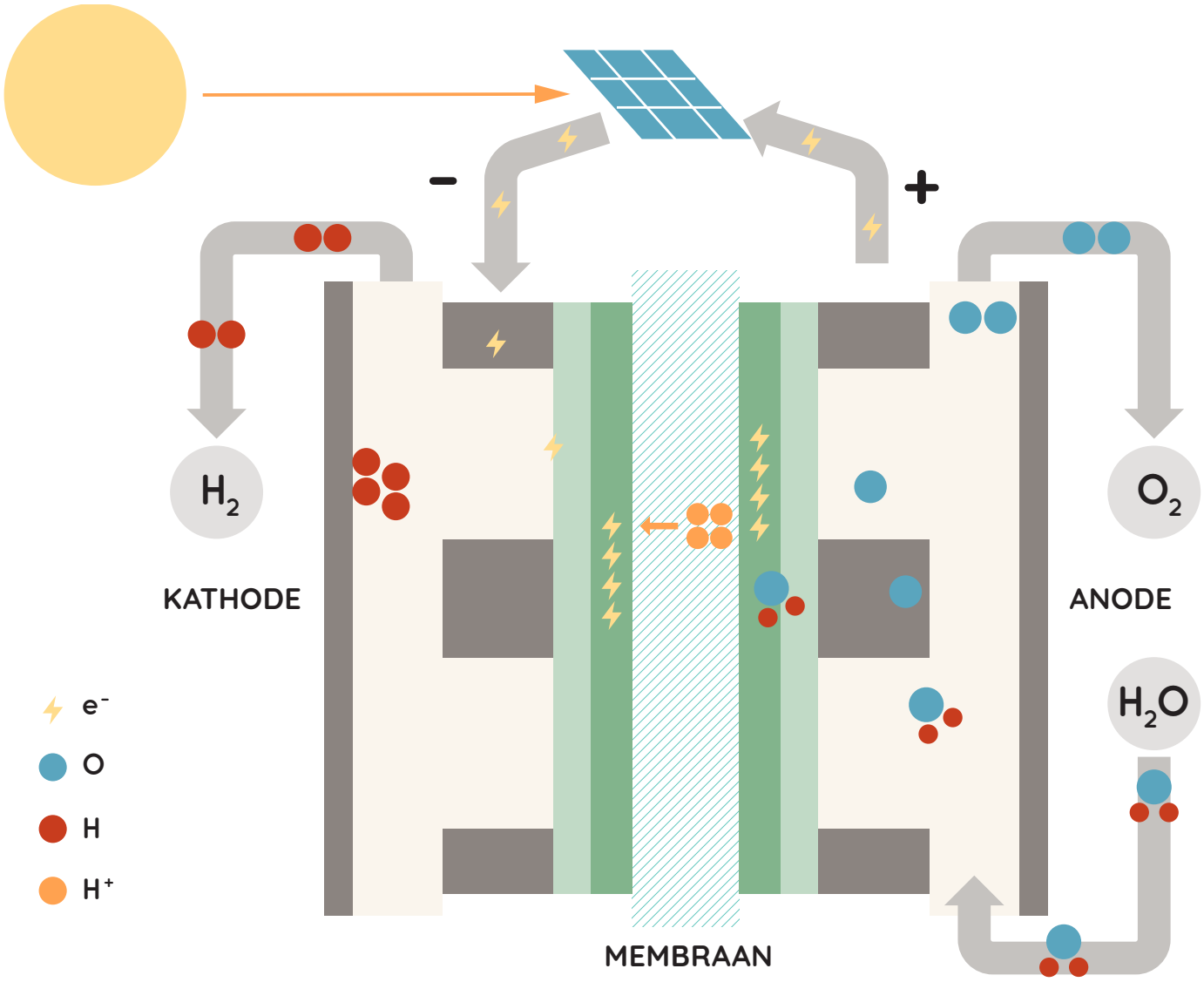
Een al tientallen jaren toegepaste conversie-opslagtechniek bestaat uit het oppompen van water met behulp van elektriciteit om het vervolgens op te slaan in een stuwmeer. Op momenten dat je elektriciteit nodig hebt, valt het water door waterkrachtturbines naar beneden en wek je weer elektriciteit op. We converteren dus elektriciteit in zogenaamde potentiële of gravitatie-energie en converteren het daarna weer terug in elektriciteit.

Het probleem is dat je hiermee geen energie van het ene continent naar een ander continent kunt vervoeren. De enige manier om elektriciteit over grote afstanden en op grote schaal te kunnen opslaan, is door elektriciteit om te zetten in een brandstof. En die brandstof is waterstof!

Waterstofproductie uit elektriciteit

De omzetting van elektriciteit naar een brandstof, naar chemische energie dus, biedt echter wél de mogelijkheid voor grootschalige opslag van energie, als ook voor transport van energie over grote afstanden. Hoe kunnen we nu elektriciteit omzetten in een brandstof? Eigenlijk is er maar een manier waarop dat grootschalig kan: via elektrolyse van water. Elektrolyse van water is de decompositie van water (H_2O) in waterstof (H_2) en zuurstof (O_2), veroorzaakt door een elektrische stroom door het water.

Er zijn verschillende vormen van waterelektrolyse, waarvan de alkalische elektrolyse en de PEM-elektrolyse verreweg de belangrijkste vormen zijn. De PEM-elektrolyser (*polymer exchange membrane*) is de laatste jaren sterk in opmars. Deze bevat een membraan dat zorgt voor de geleiding van de protonen (H+), de scheiding van de gassen en de elektrische isolatie van de elektrodes (anode (+) en kathode (-)). De PEM-elektrolyser reageert vooral goed op fluctuerende elektriciteitsproductie, wat natuurlijk speelt bij zon- en windelektriciteit.



PEM-elektrolyser [27].

Waterstof wordt geproduceerd door elektrolyse van water (H_2O), door splitsing in waterstof (H_2) en zuurstof (O_2).

De ontwikkelingen in de PEM-elektrolysetechniek gaan razendsnel, zowel qua efficiëntie als kosten. Was de efficiëntie van een PEM-elektrolyser in 2010 nog zo'n 65%, in 2017 is dat rond de 80% en voor 2050 is de efficiëntieverwachting 86%.

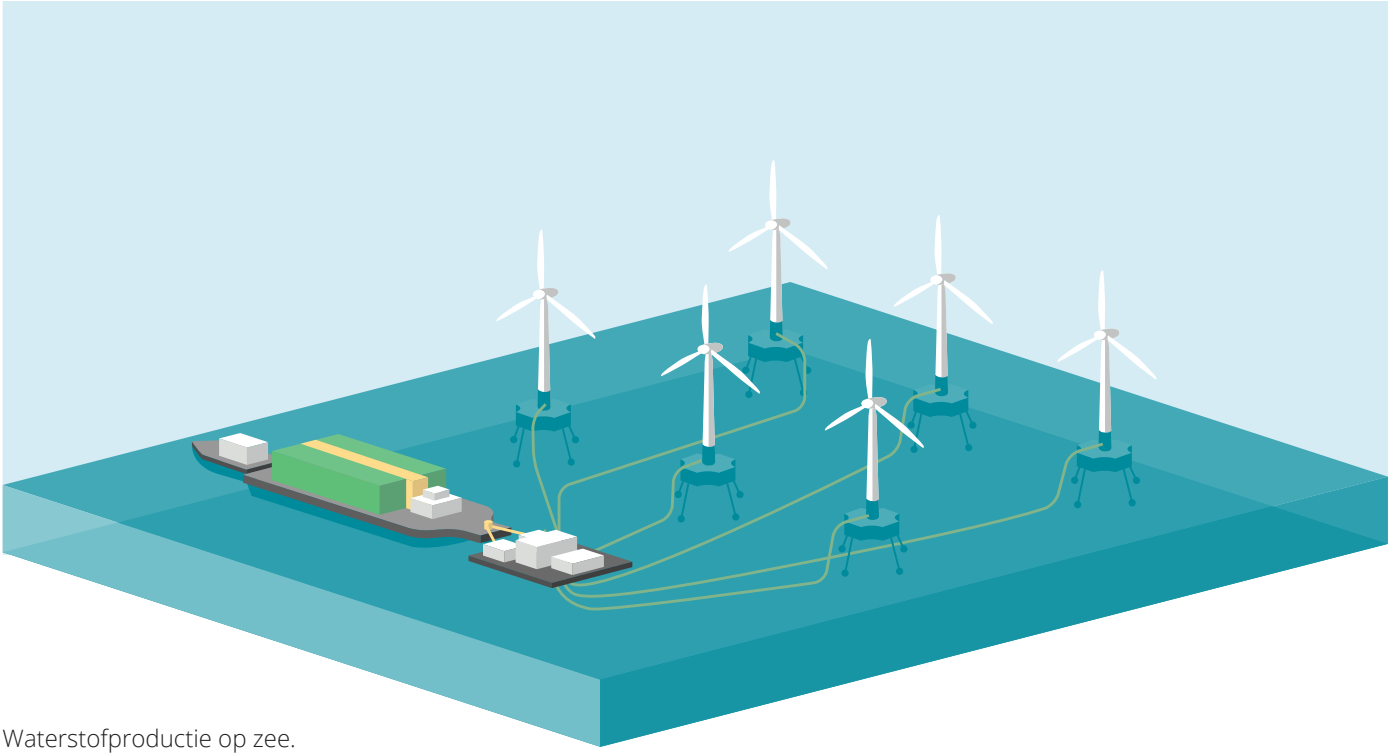
Daarnaast is ook nog wat energie nodig om demiwater te maken, waterstof te reinigen en te comprimeren. In totaal is dan in 2050 49 kWh elektriciteit nodig om 1 kilo waterstof te maken met een energie-inhoud van 39,4 kWh per kilo. Met de kostendaling voor een PEM-elektrolyser gaat het nog sneller. In 2015 kostte deze techniek nog rond de 2.000 euro per kilowatt (kW); in 2020 is dat gedaald tot rond de 600 euro per kW, in 2030 naar verwachting tot 350 euro per kW en in 2050 zelfs tot 250 euro per kW [26].

Solar Power to the People **Waterstofproductie door PEM-elektrolyse** Bron: [26]

Component	Energiegebruik (2050) kWh/kg H_2
PEM-elektrolyser	45,8
Waterstofzuivering	1,1
Compressie (500 bar)	1,9
Koelen (-40 graden Celsius)	0,15
Omgekeerde osmose van zeewater + pompen	0,05
Totaal	49,0

De kosten van elektrolyse dalen razendsnel, van 2.000 euro per kilowatt in 2015 naar 600 euro per kilowatt in 2020.

Met de PEM-elektrolysetechniek kun je nu overal op aarde waar je zeer goede windregimes, zonne-instraling, geothermiebronnen of waterkracht hebt, elektriciteit omzetten in waterstof en transporteren naar de plek waar je het nodig hebt.



Waterstofproductie op zee.

Waterstoftransport onder druk

Waterstof is een gas, het lichtste element, en daarom is de energiedichtheid per volume-eenheid niet hoog. In een kubieke meter zit onder atmosferische druk maar zo'n 3 kWh (10,8 megajoule) aan energie. Om een behoorlijke hoeveelheid energie in de vorm van waterstof te kunnen vervoeren, moet je het gas daarom bijvoorbeeld sterk comprimeren.

Bij grootschalige elektriciteitsproductie uit zon of wind kunnen we waterstof produceren, comprimeren, opslaan in waterstoftanks in een containerrack, en direct vervoeren naar de eindgebruiker.

De ontwikkeling in de tanks, 'tubes' genaamd, om waterstof onder druk te kunnen vervoeren, gaan snel. Waterstof opslaan en vervoeren over de weg kan via tubetrailers. In 2015 was het gebruikelijk om waterstof te vervoeren in tubes onder een druk van 120 à 200 bar. Het nieuwste tubetrailersysteem (2017) met koolstofvezelvaten slaat waterstof op onder een druk van 500 bar en kan op deze wijze 1.100 kilo waterstof vervoeren per keer. Een kilo waterstof heeft een energie-inhoud van 39,4 kWh. Daarmee vervoert zo'n tubetrailer 43,3 MWh. Een dergelijke 40 voet-container weegt bijna 30 ton. De energiedichtheid per gewichtseenheid is dus 1,46 kWh per kilo.

Waterstofvervoer per truck [27].

Nu kunnen we op diverse manieren op zeer afgelegen plekken elektriciteit produceren uit zon, wind of water. Deze elektriciteit zetten we via elektrolyse om in waterstof. In al deze gevallen kan de waterstof worden gecomprimeerd en opgeslagen in tubes in een containerrack. Deze containers kun je nu plaatsen op een groot

containerponton waarna een sleepboot de containers naar een haven vaart. Daar worden de containers direct op een truck geplaatst en naar een waterstoftankstation gereden. Op deze manier hoeft er, vanaf de productie van waterstof tot aan het waterstoftankstation, geen enkele keer waterstof te worden overgepompt of behandeld.

Vloeibaar waterstoftransport

We kunnen nog meer energie in een schip vervoeren, als we de waterstof vloeibaar maken en gewoon in een min of meer normale tank stoppen. Eigenlijk net zoals bij aardgas, dat je in grote tankschepen LNG (*liquefied natural gas*) over de oceanen vervoert. Methaan wordt vloeibaar bij een temperatuur van -162 graden Celsius. Maar waterstof moet nog verder worden gekoeld, tot bijna bij het absolute nulpunt, tot -252,9 graden Celsius. In vloeibare vorm kun je per volume-eenheid achthonderd keer meer waterstof meenemen dan waterstof in gasvorm onder atmosferische druk. Nu wordt er alleen op kleine schaal vloeibare waterstof gemaakt voor raketbrandstof. Het vloeibaar maken van waterstof vergt daarbij zo'n 10 kWh per kilo waterstof. De verwachting is echter dat dit ongeveer wordt gehalveerd als we op grote industriële schaal vloeibare waterstof gaan maken [28].

Vloeibare waterstof neemt achthonderd keer minder ruimte in beslag dan waterstofgas. In 2030 kost het zo'n 5 kWh aan energie om 1 kilo vloeibare waterstof te maken.

Onder andere Kawasaki Industries uit Japan ontwikkelt momenteel een hele logistieke keten om waterstof vloeibaar te maken, te vervoeren per schip, op te slaan in tanks en vervolgens per tankwagen naar bijvoorbeeld een tankstation te brengen. Deze keten zou in 2020 operationeel moeten zijn, waarbij vloeibare waterstof uit Australië naar Japan wordt gebracht. Japan wil namelijk de Olympische Spelen van 2020 helemaal in het teken zetten van waterstof.

Vloeibare waterstof op transport per schip [29].

Van waterstof naar ammoniak

Waterstof kun je dus gecomprimeerd of vloeibaar via een schip over zee vervoeren. Maar we kunnen waterstof ook omzetten in een andere chemische stof, die vloeibaar is en makkelijker te vervoeren. Op afgelegen plekken op aarde, zoals in de woestijn of midden op de oceaan, zijn lucht, woestijnzand of zeewater de enige grondstoffen die we voorhanden hebben. Eigenlijk is de lucht dan de meest voor de hand liggende bron, want daarin zitten stikstof (78%) en zuurstof (21%). En met stikstof (N_2) uit de lucht en waterstof (H_2) uit elektriciteit en water kunnen we ammoniak maken (NH_3).

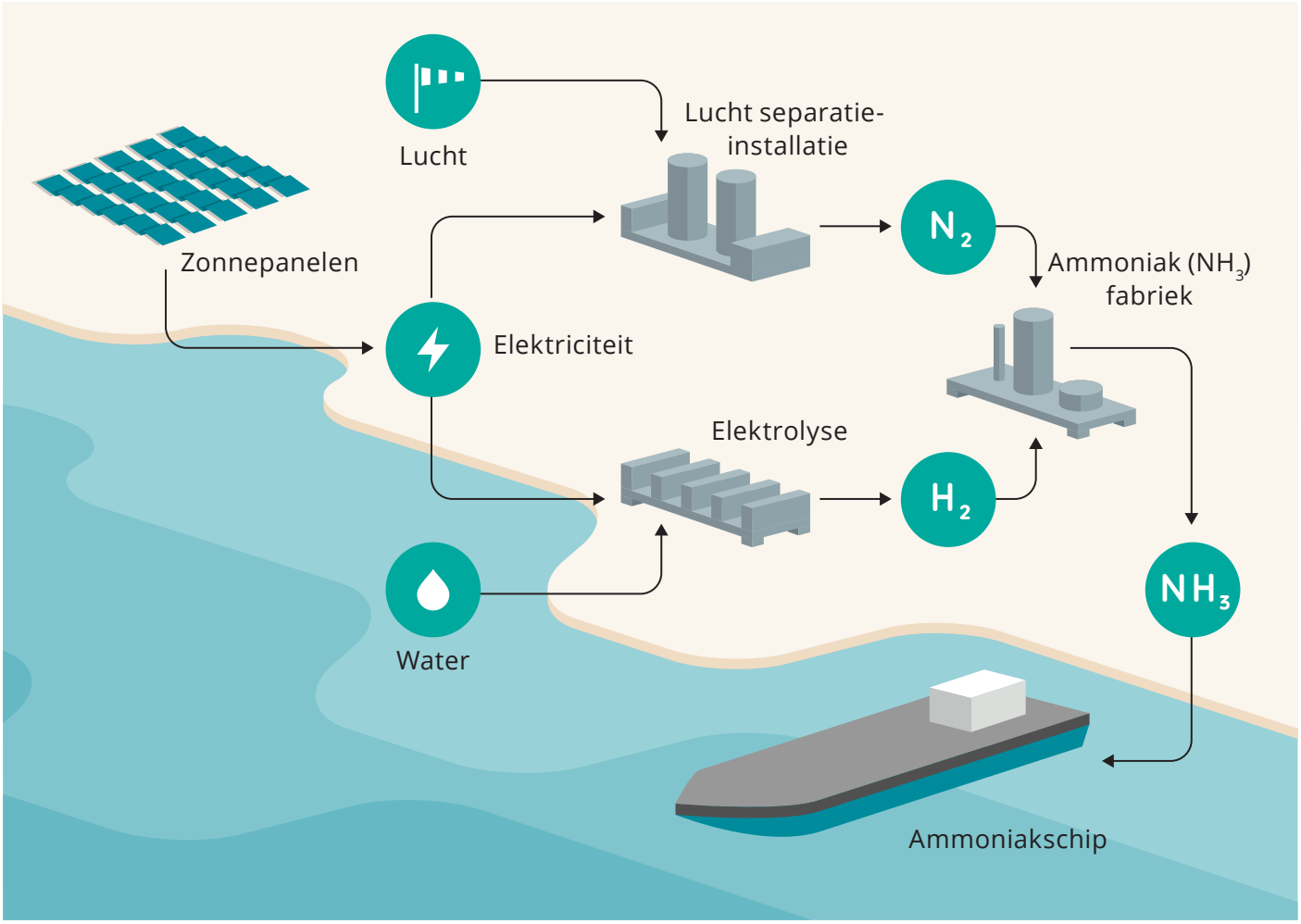
Waterstof met stikstof uit de lucht vormt ammoniak. Ammoniak is bij een druk van 10 bar vloeibaar en kan zo gemakkelijk worden vervoerd.

Op deze afgelegen plekken kunnen we geen brandstoffen maken met koolstof erin, zoals methanol (CH_3OH) of mierenzuur (CH_2O_2). We kunnen daar nog wel aan zuurstof komen, maar koolstof is het probleem. Dus ammoniak is de enige chemische stof die we met de beschikbare grondstoffen, namelijk stikstof uit de lucht en waterstof, op deze plekken kunnen maken. Bovendien is ammoniak niet alleen handig om energie te kunnen vervoeren, maar we gebruiken ook heel veel van deze stof. Ammoniak is namelijk, naast fosfaat, het hoofdbestanddeel van kunstmest. Van alle ammoniak die we in de wereld maken, namelijk 150 miljoen ton in 2015, is 80% bestemd voor kunstmest. Ammoniak is daarmee een product dat direct kan worden gebruikt en dat niet alleen maar een energiedrager is.

Andere brandstoffen, waar koolstof voor nodig is, kun je niet in de woestijn of op de oceanen maken. Daar is namelijk geen koolstof voorhanden.

Het proces en de installaties om stikstof uit de lucht te halen, bestaan al. En ook het proces om ammoniak te maken uit waterstof en stikstof wordt op vele plaatsen in de wereld toegepast. Bovendien is de gehele logistieke keten al aanwezig om ammoniak per schip, trein en truck te vervoeren en op te slaan in tanks. Het enige verschil is dat de waterstof nu niet uit aardgas wordt geproduceerd, maar uit elektriciteit van zon, wind of waterkracht.

Transport van ammoniak per schip, zoals Japan van plan is, is een van de manieren om zonne-energie eerst te converteren in waterstof, vervolgens om te zetten in ammoniak en dit te vervoeren. De ammoniak kan dan rechtstreeks worden gebruikt in de industrie om er onder meer kunstmest van te maken. Maar Japan wil deze ammoniak ook weer kraken en er de waterstof vanaf halen, om de waterstof vervolgens te gebruiken als transportbrandstof.



Zon-waterstof-ammoniakcyclus [30].

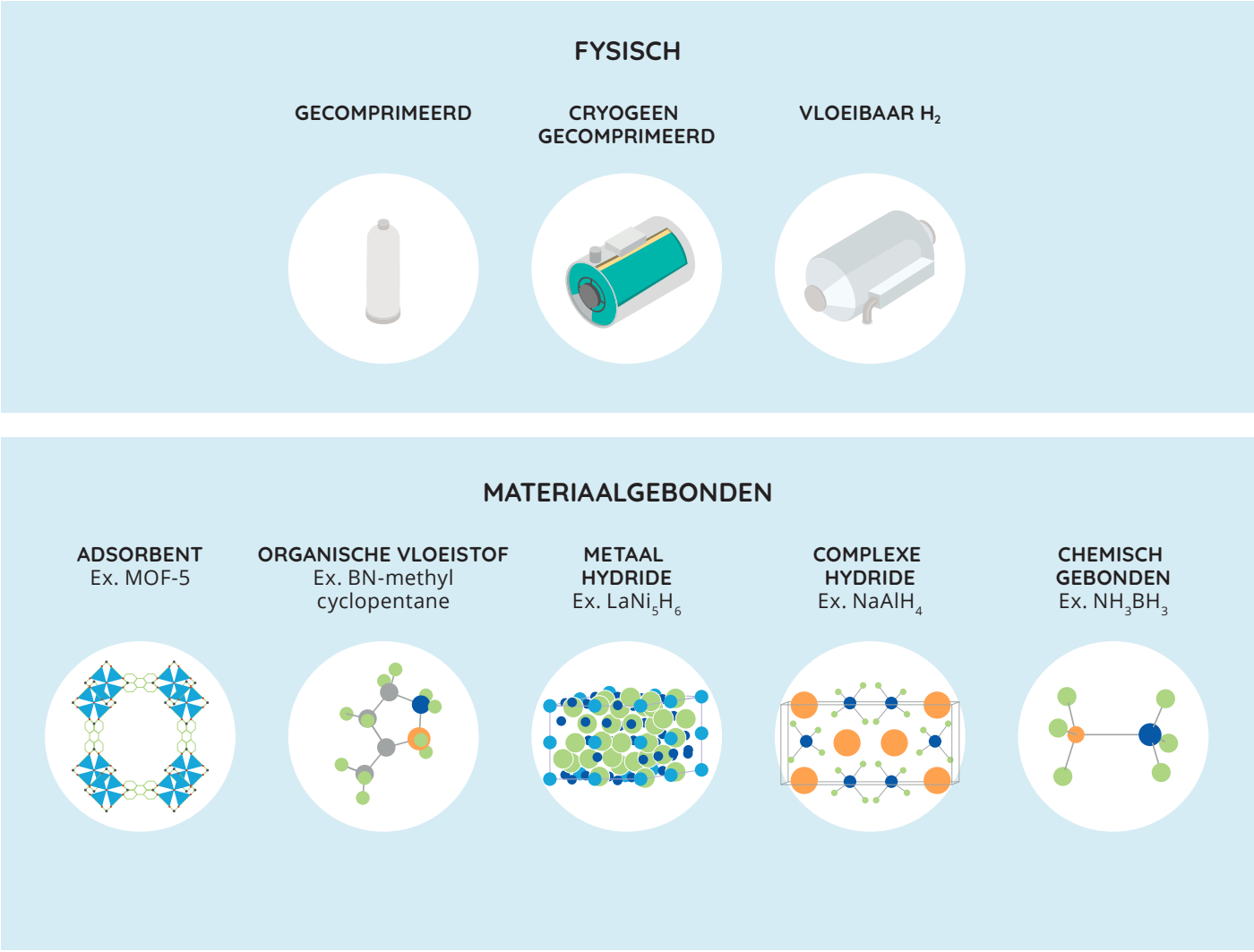
Waterstof voor grootschalige opslag van energie

Waterstof kunnen we opslaan onder druk, vloeibaar of in de vorm van ammoniak. Maar er zijn nog andere opslagmethoden. Zo kunnen we waterstof binden aan metaalhydriden, aan organisch chemische hydriden zoals tolueen, of we kunnen waterstof adsorberen aan een vast of vloeistofoppervlak. Metaalhydride-opslag wordt gebruikt om kleine hoeveelheden waterstof veilig op te kunnen slaan, bijvoorbeeld voor gebruik in scooters of fietsen. Binden aan tolueen gebeurt nu onder meer in een project van Brunei en Japan voor transport en opslag van waterstof tussen beide landen [31].

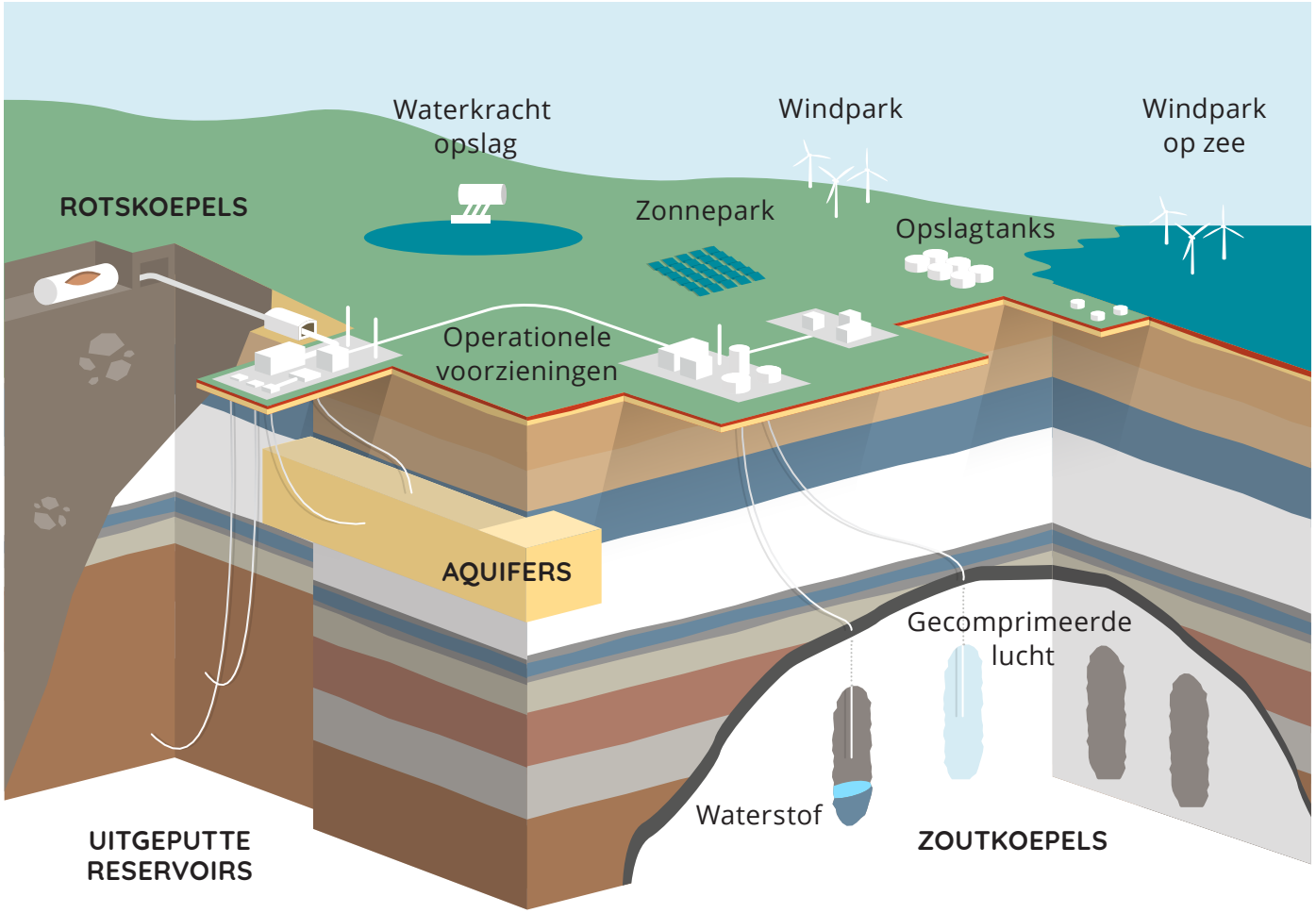
Waterstof kan onder druk of vloeibaar worden opgeslagen als gas, of gebonden aan een ander chemisch element.

Waterstofopslag in zoutkoepels is een bewezen techniek, veilig en goedkoop. En er zijn wereldwijd vele zoutkoepels beschikbaar.

Zoals gezegd kunnen we waterstof in gasvorm onder druk opslaan in tanks, maar ook net zoals aardgas, onder de grond in zoutkoepels of lege gasvelden. Waterstofopslag in zoutkoepels kan plaatsvinden in grote hoeveelheden, net zo gemakkelijk en veilig als de opslag van aardgas, en is een bewezen techniek. In de wereld zijn vele zoutkoepels beschikbaar voor waterstofopslag, zodat waterstof in gasvorm onder druk wereldwijd in grote hoeveelheden kan worden opgeslagen. Air Liquide heeft in de Verenigde Staten al waterstofopslag in zoutkoepels in bedrijf genomen [33].



Manieren van waterstofopslag [32].



Waterstofopslag in zoutkoepels [34].

3.2 Waterstof en biomassa als grondstoffen voor de chemie

Waterstof is een grondstof voor het maken van chemische producten zoals ammoniak, methanol en waterstofperoxide. Waterstof wordt nu veel gebruikt in raffinaderijen, om de zware oliefracties te kraken. Maar ook de voedings- en glasindustrie gebruiken waterstof.

In een duurzaam energiesysteem is koolstof schaars. Het kan alleen economisch worden gewonnen uit biomassa. Daarom willen we alleen koolstof gebruiken als het echt niet anders kan: in de chemie als grondstof voor producten.

Voor het maken van chemische producten zoals polymeren, plastics, nylon en ammoniak heb je echter naast waterstof ook veelal zuurstof, stikstof én koolstof nodig. Zuurstof en stikstof zitten in de lucht, maar koolstof niet. Momenteel worden zowel waterstof als koolstof uit fossiele brandstoffen gewonnen, die we ook wel koolwaterstoffen noemen. Maar in een duurzaam energiesysteem kan dat niet meer. Mogelijk kunnen we in de verre toekomst koolstofdioxide uit de lucht halen, maar de enige echte bron die we voor koolstof hebben, is biomassa.

Hoe gek het nu ook klinkt: in een duurzaam energiesysteem wordt koolstof dus schaars, want dat moet uit biomassa komen. En biomassa willen we vooral als voedsel gebruiken, als materiaal om mee te bouwen of producten te maken en natuurlijk gewoon als natuur. We willen dan ook alleen koolstof gebruiken waar het niet anders kan, namelijk als grondstof in de chemie. Dat betekent dat we in principe geen biomassa meer voor elektriciteitsproductie willen gebruiken, geen biofuels of biogas als transportbrandstof en geen houtpellets of biogas voor verwarming.

Een interessante combinatie voor het produceren van zowel duurzame waterstof en zuurstof als koolstof voor de chemie vormen elektrolyse én biomassavergassing. Via elektrolyse maken we waterstof en zuurstof. Via biomassavergassing van getorreficeerde biomassa maken we een zogenaamd syngas, dat voornamelijk bestaat uit waterstof, koolmonoxide en kooldioxide. Stikstof halen we dan nog uit de lucht. Zo kunnen we alle bulk-chemische producten maken via een duurzaam energiesysteem.

Biomassavergassing van getorreficeerde biomassa is een techniek in ontwikkeling. Torrefactie is het proces om een gestandaardiseerd biomassaproduct te maken van allerlei soorten vaste biomassaresiduen, zoals houtresten, stro en kokosnootschillen. Torrefactie is hetzelfde proces als koffiebonenbranden, het maakt de biomassa waterafstotend en breekt de vezels. Vergassing van getorreficeerde biomassa is daardoor een stuk gemakkelijker dan vergassing van de biomassa zelf.

Waar biomassa beschikbaar is of per schip aangevoerd kan worden, en waar goedkope duurzame elektriciteit aanwezig is (of waar we per pijplijn of schip waterstof en zuurstof aan kunnen voeren) en waar al een chemiecluster aanwezig is, kunnen we nu een volledig groene chemiecluster realiseren. Een van de geschikte plekken daarvoor in Nederland is het Eemshaven-Delfzijlgebied in Groningen.

3.3 Elektriciteit en waterstof voor de productie van metalen

Voor het produceren van metalen zoals ijzer, aluminium en koper uit het metaal erts, dat uit de grond gehaald wordt, is veel energie nodig. Het metaalerts bevat veelal het metaal in geoxideerde vorm, oftewel: gebonden met zuurstof. Bij ijzer noem je dat verroest ijzer. Er is veel energie nodig omdat een redoxproces, een metaal ontdoen van de zuurstof, bij hoge temperaturen verloopt. Daarnaast is er een grondstof nodig om het zuurstof aan te binden. Laten we eens de twee meest gebruikte metalen bespreken.

Aluminium wordt uit bauxiet geproduceerd. Allereerst wordt de aluinaarde (aluminiumoxideverbindingen) vrijgemaakt van bauxiet. Daarna hebben we veel elektriciteit nodig om het zuurstof er vanaf te krijgen en er aluminium van te maken. Om aluminium te maken van aluminiumoxide hebben we ongeveer 15 kWh per kilo aluminium nodig [37]. Daarom zien we dat de aluminiumfabrieken vooral op die plaatsen in de wereld staan waar goedkope elektriciteit is. Interessant is dat dit vooral plaatsen zijn waar veel goedkope waterkracht aanwezig is. Een goed voorbeeld is IJsland, dat een groot potentieel heeft aan waterkracht en geothermie. Dit heeft ervoor gezorgd dat verschillende grote aluminiumbedrijven daar in de afgelopen decennia hun alu-

miniumproductiefabrieken hebben neergezet. IJsland produceert nu zo'n 800.000 ton aluminium per jaar [35]. En er zijn diverse plannen om de productie nog verder uit te breiden.

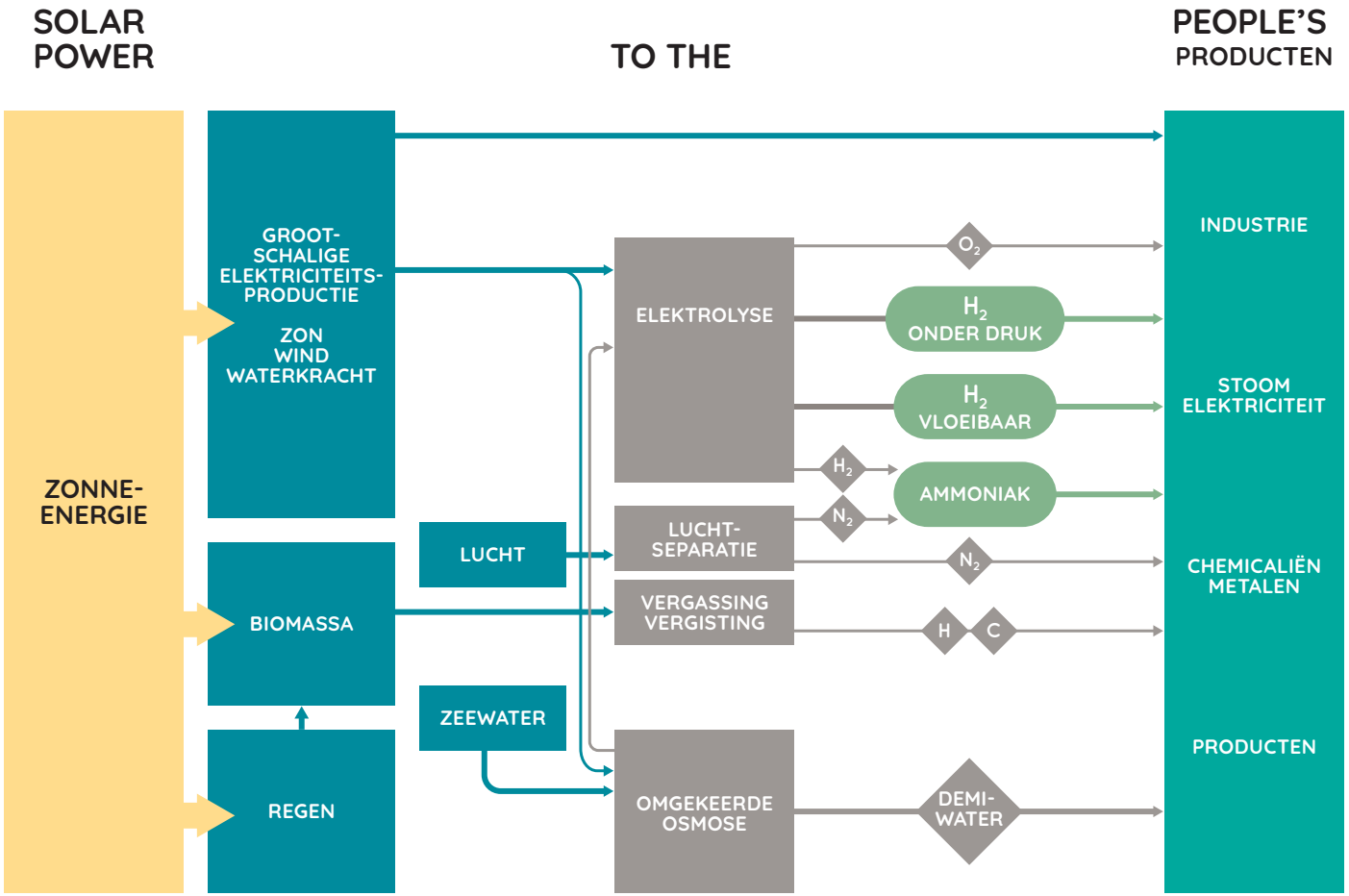
IJzer en aluminium worden geproduceerd uit erts, waarin metaal gebonden is aan zuurstof. Om dit zuurstof van het metaal af te krijgen, zijn hoge temperaturen nodig, en een energiegrondstof om de zuurstof aan te binden. Dit kan prima met elektriciteit en waterstof in plaats van met fossiele brandstof en koolstof.

Om ijzer te maken van ijzererts, een mengsel van diverse ijzeroxides, wordt ijzererts in een hoogoven bij hoge temperaturen gereduceerd (ontdaan van zuurstof) met behulp van cokes (ontgaste steenkool; koolstof dus). De hoge temperaturen ontstaan door kolen te verbranden. Dit proces is dus sterk afhankelijk van fossiele brandstof, in dit geval steenkool. Maar in de toekomst zouden we ook het maken van ijzer op een duurzame manier willen doen. In principe kan dat. De hoge temperaturen kunnen we ook prima bereiken met elektriciteit of waterstof. Het reductieproces gebruikt nu koolstof om van ijzeroxide (FeO) met koolstof (C) ijzer (Fe) te maken, met als afvalproduct koolstofdioxide (CO_2). Maar het reductieproces zou ook met waterstof kunnen werken. Dan levert ijzeroxide met waterstof ook ijzer met als afvalproduct water (H_2O) en dus geen CO_2 meer.

Huidig proces: $2FeO + C \longrightarrow 2Fe + CO_2$

Toekomstig proces: $FeO + H_2 \longrightarrow Fe + H_2O$

Voor het winnen van andere metalen, zoals koper, lithium en silicium, kunnen we ook productieprocessen bedenken, waarbij de benodigde hoge temperaturen door elektriciteit of waterstof worden geleverd. En waarbij het reductieproces wordt uitgevoerd met waterstof in plaats van koolstof.


SOLAR POWER
TO THE
PEOPLE'S PRODUCTEN
ZONNE-ENERGIE
GROOT-SCHALIGE ELEKTRICITEITS-PRODUCTIE
ZON
WIND
WATERKRACHT
BIOMASSA
REGEN
LUCHT
ZEEWATER
ELEKTROLYSE
LUCHT-SEPARATIE
VERGASSING VERGISTING
OMGEKEERDE OSMOSE
O_2
H_2 ONDER DRUK
H_2 VLOEIBAAR
H_2
N_2
AMMONIAK
N_2
H
C
DEMI-WATER
INDUSTRIE
STOOM ELEKTRICITEIT
CHEMICALIËN METALEN
PRODUCTEN

3.4 De waterstofkringloop voor energie én drinkwater

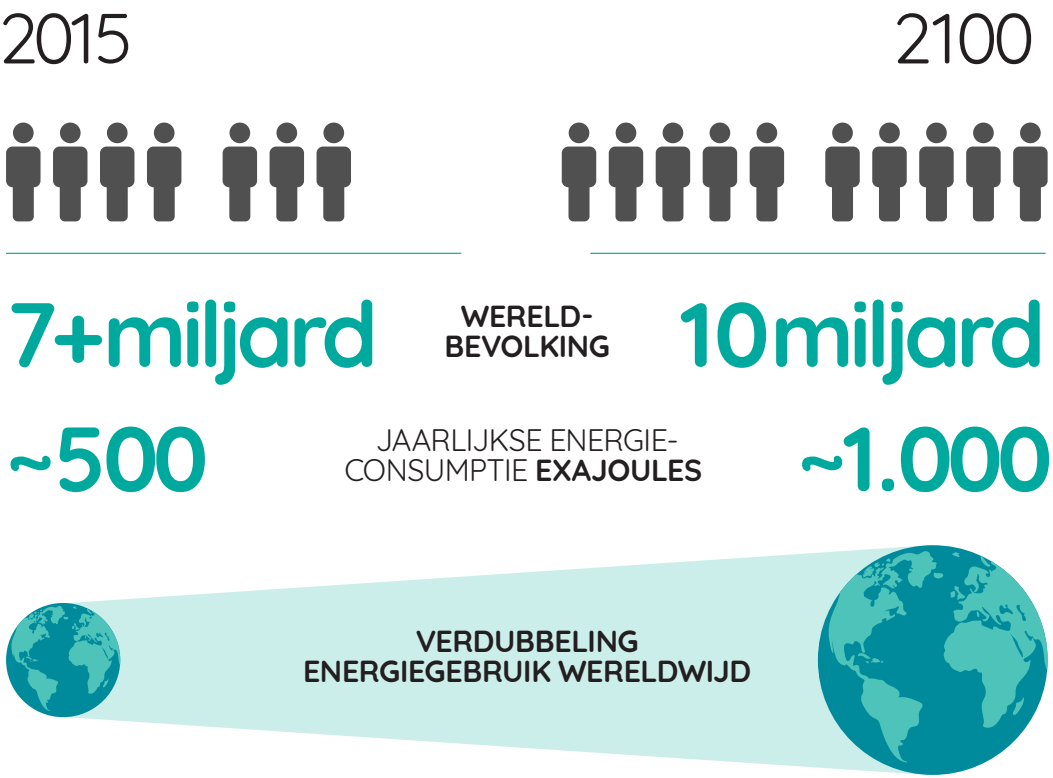
Laten we eens een globale analyse doen van een wereldwijd duurzaam energiesysteem. Allereerst: wat verwachten we dat de energievraag in de toekomst zal worden? Shell doet al meer dan veertig jaar scenario-analyses, en in haar 2016 scenario's voorspelt Shell dat we in het jaar 2100 zo'n 10 miljard mensen hebben, die gezamenlijk een primaire energieconsumptie kennen van 1.000 exajoule (EJ, $1.000*10^{18}$ J) [36].

In een duurzaam energiesysteem wordt veel energie via waterstof over de wereld getransporteerd. Maar daarmee transporteren we ook een bron voor schoon water.

Laten we dit eens als uitgangspunt nemen en kijken hoe we die 1.000 EJ duurzaam kunnen opwekken. We pakken dit aan via een zogenaamde 'generalistische back-casting methode'. We hebben vier grote bronnen van duurzame energie: zon, wind, waterkracht en biomassa. Met biomassa willen we zo min mogelijk doen, vanwege de concurrentie met landbouw en natuur. Maar we hebben biomassa nu eenmaal nodig voor de koolstof, met name als grondstof in de chemische industrie. Er is immers geen koolstof meer beschikbaar vanuit fossiele energiebronnen. Laten we eens een ruime aanname doen voor de energie uit biomassa die nodig is als koolstof *feedstock* in de chemie, namelijk 50 EJ per jaar. We produceren 50 EJ in de vorm van syngas (biomassavergassing) en biogas (biomassavergisting). De rest, 950 EJ moet dus door zon, wind en water worden geproduceerd. En deze bronnen produceren in principe elektriciteit. De 950 EJ elektriciteit is zo'n $265*10^{12}$ kWh (265.000 TWh), ruim tien keer de elektriciteitsproductie in 2016.

In een volledig duurzaam energiesysteem gaat het alleen nog maar om kosten en niet om de energie-efficiëntie.

De productie van elektriciteit door zon en wind, op plaatsen waar de zon goed schijnt of de wind hard waait, wordt zeer goedkoop. Een prijs van rond de 0,01 euro per kWh is zeker mogelijk. Maar de prijs voor elektriciteit uit zon en wind in gebieden waar het niet hard waait, of



Energieverbruik in 2100 volgens Shell [39].

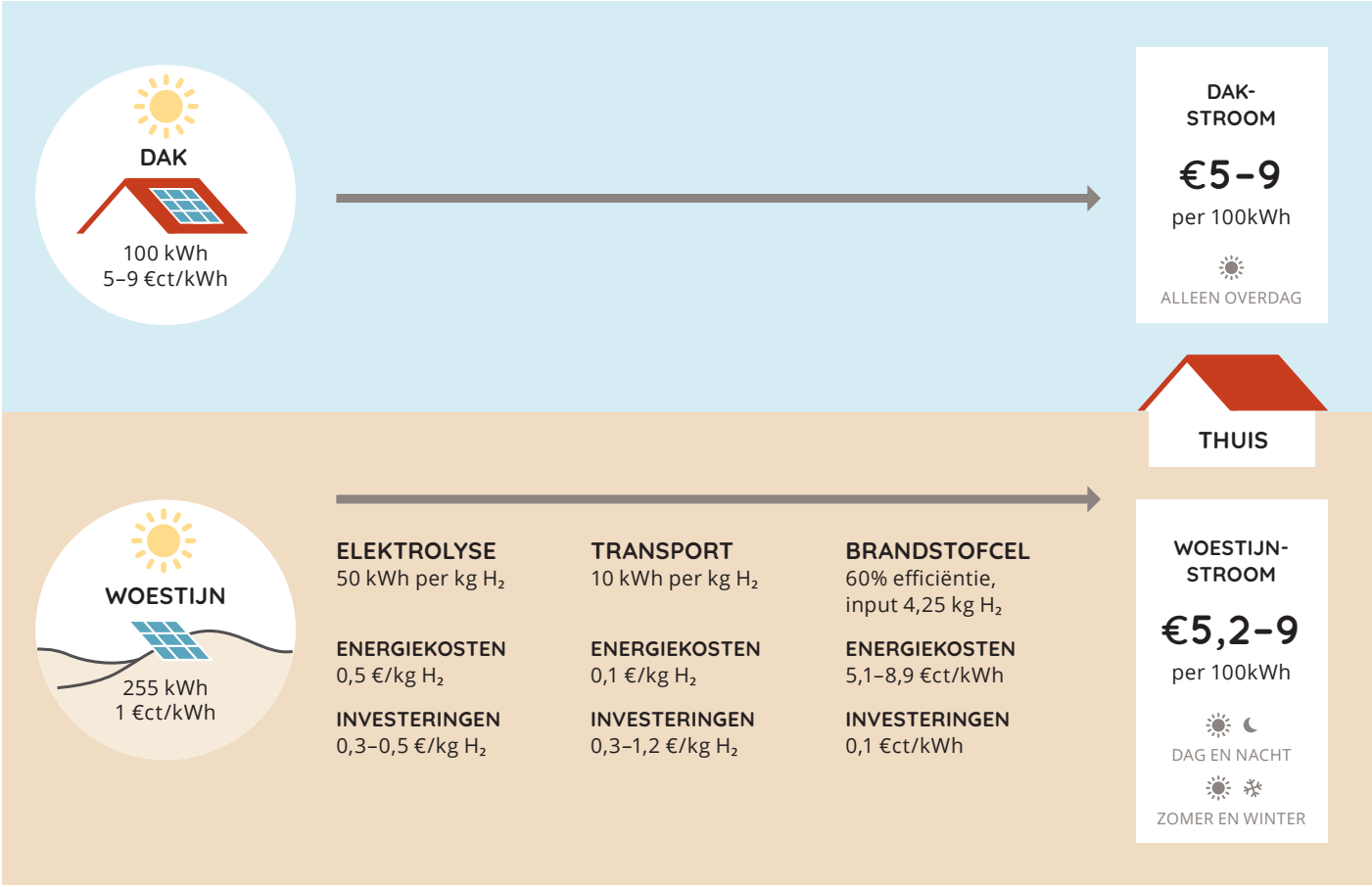
waar de zon veel minder schijnt, ligt aanzienlijk hoger. Ook zal de prijs voor zonne- en windelektriciteit, geproduceerd op plekken waar we leven, hoger liggen, doordat de grond duurder is, kleinere systemen geplaatst kunnen worden en er aanvullende maatregelen nodig zijn. Het ligt bovendien gevoelig grootschalige windparken dicht bij woningen en gebouwen te plaatsen, vanwege geluidsoverlast en horizonvervuiling. Nu kunnen zonnepanelen zeker op huizen en gebouwen worden geplaatst, en kunnen we in de omgeving van industrieterreinen ook prima wind- en zonneparken realiseren. De verwachting is echter wel dat we de bulk van onze

duurzame energie toch op díe plekken in de wereld gaan produceren waar het hard waait of de zon goed schijnt en waar geen mensen wonen. Dit betekent wel dat je dan kosten moet maken voor conversie naar waterstof, transport en opslag, en de waterstof deels terug moet converteren naar elektriciteit. Dat hoeft geen probleem te zijn, als de kosten maar lager zijn dan het in de nabijheid produceren en opslaan van elektriciteit.

Onze veronderstelling is dus dat we in de toekomst een zeer groot deel van de elektriciteit via waterstof transporteren naar de plaats waar we het gaan gebruiken. We veronderstellen dat dat 75% van de 1.000 EJ is. Zo'n 200 EJ = 55.000 TWh consumeren we wel direct als elektriciteit, dat wordt dus zelf geproduceerd of komt via een elektriciteitsnet bij mensen en bedrijven. Deze 200 EJ komt van de zonnepanelen op daken van huizen en gebouwen, zonneparken en windparken die relatief dicht bij de gebruiker staan en aan een elektriciteitsnet gekoppeld zijn. 750 EJ wordt zeer grootschalig geproduceerd, op plekken waar de zon goed schijnt, de wind hard waait of een grote waterkrachtcentrale kan worden gebouwd. Deze plekken zijn ver weg van waar we wonen: midden op zee, in de woestijn of in andere zeer

Woestijnstroom versus dak-stroom uit zonne-energie

Laten we eens een sommetje maken om te illustreren dat woestijnstroom een vergelijkbare kostprijs levert als dak-stroom. Een zonne-energiesysteem op ons dak kost ruwweg 2 à 3 keer zo veel per paneel als een zeer grootschalig zonne-energiesysteem in de woestijn. Bovendien produceert dit systeem in de woestijn 2,5 à 3 keer zo veel elektriciteit als bij ons op het dak. Laten we aannemen dat een zonne-energiesysteem in de woestijn voor 1 eurocent per kWh elektriciteit produceert. Dat betekent dat een zonne-energiesysteem op ons dak voor 5-9 eurocent per kWh elektriciteit produceert. De zonne-elektriciteit uit de woestijn moeten we eerst via elektrolyse omzetten in waterstof, vloeibaar maken of comprimeren, in een schip vervoeren en in een waterstofpijplijn stoppen om er vervolgens met een brandstofcel weer elektriciteit van te maken. Om dan 1 kWh elektriciteit bij ons thuis te krijgen, heb je zo'n 2,55 kWh woestijn-elektriciteit nodig, een ketenefficiëntie van minder dan 40%. Maar wat blijkt? Ondanks al de extra investeringskosten voor elektrolyse, compressie, vervoer en brandstofcellen, levert de woestijnstroom een vergelijkbare prijs op als onze dakstroom. En bovendien is de woestijnstroom nu wel op elk gewenst moment beschikbaar, dag én nacht, zomer én winter. Dit voorbeeld laat zien dat het in een duurzaam energiesysteem niet gaat om de ketenefficiëntie, maar uiteindelijk alleen om de kosten.



Zonnestroom – dak versus woestijn.

verlaten gebieden in de wereld. De 750 EJ is het equivalent van 210.000 TWh elektriciteit. Deze elektriciteit kunnen we niet via een elektriciteitskabel vervoeren. Daarom zetten we deze elektriciteit om in waterstof; dat kunnen we immers wel makkelijk over grote afstand per schip of pijplijn vervoeren en gemakkelijk opslaan. Als we elektriciteit in waterstof willen omzetten, hebben we naast elektriciteit ook zeer schoon water nodig (demiwater, oftewel gedemineraliseerd water). Dat kunnen we via omgekeerde osmose maken uit zeewater of op-

pervlaktewater. In een elektrolyser wordt dit water nu gesplitst in waterstof en zuurstof. We hebben zo'n 50 kWh nodig om 1 kilo waterstof te produceren, inclusief de elektriciteit die nodig is om demiwater te maken. Met de 210.000 TWh produceren we dan 4,2 miljard ton waterstof.

Waterstoftransport krijgt wereldwijd dezelfde omvang als olie- en gastransport.

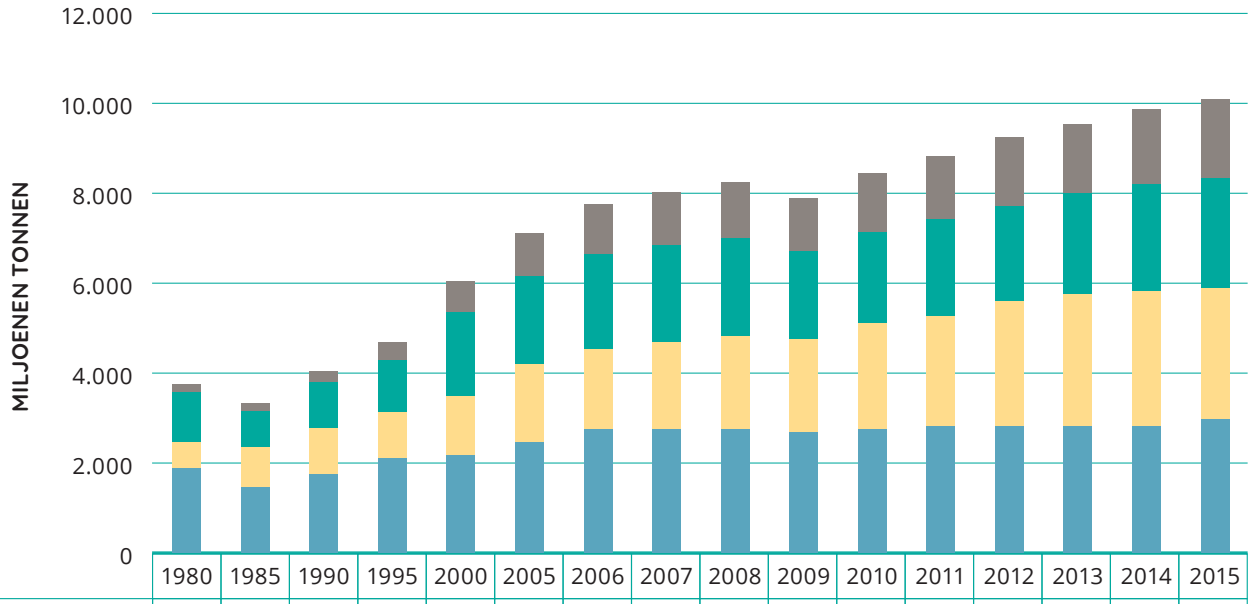
Waterstof onder druk, vloeibaar of eventueel nog verder omgezet naar ammoniak, vervoeren we per schip of pijplijn naar die plekken op de wereld waar we het gaan gebruiken. Het gaat om een hoeveelheid van zo'n 4,2 miljard ton waterstof. Het grootste deel daarvan zal per schip worden vervoerd, zeg zo'n 3 miljard ton. Dat is eenzelfde hoeveelheid in tonnen die we nu als olie en gas over de wereld vervoeren [37]!

Solar Power to the People **Duurzame energieproductie wereldwijd**

	Technologie EJ	Productie EJ	Productie TWh	Productie ton H_2
Biomassa	Biomassavergassing (syngas) Biomassavergisting (biogas)	50		
Electriciteit Direct gebruik	Zon op daken Zonneparken Windparken Kleine waterkrachtcentrales	200	= 55.000	
Electriciteit Waterstof	Grote afgelegen zonneparken Grote afgelegen windparken (*onshore* + *offshore*) Waterkracht op grote schaal	750	= 210.000	= $4{,}2*10^9$
Totaal		1.000		

Het waterstof wordt na transport weer gebruikt:

- in de industrie als grondstof, maar ook om stoom mee te produceren;
- voor transport om op te rijden;
- in gebouwen en woningen om te verwarmen en te koken en
- natuurlijk ook voor de productie van elektriciteit op momenten dat er te weinig duurzame elektriciteit wordt geproduceerd.



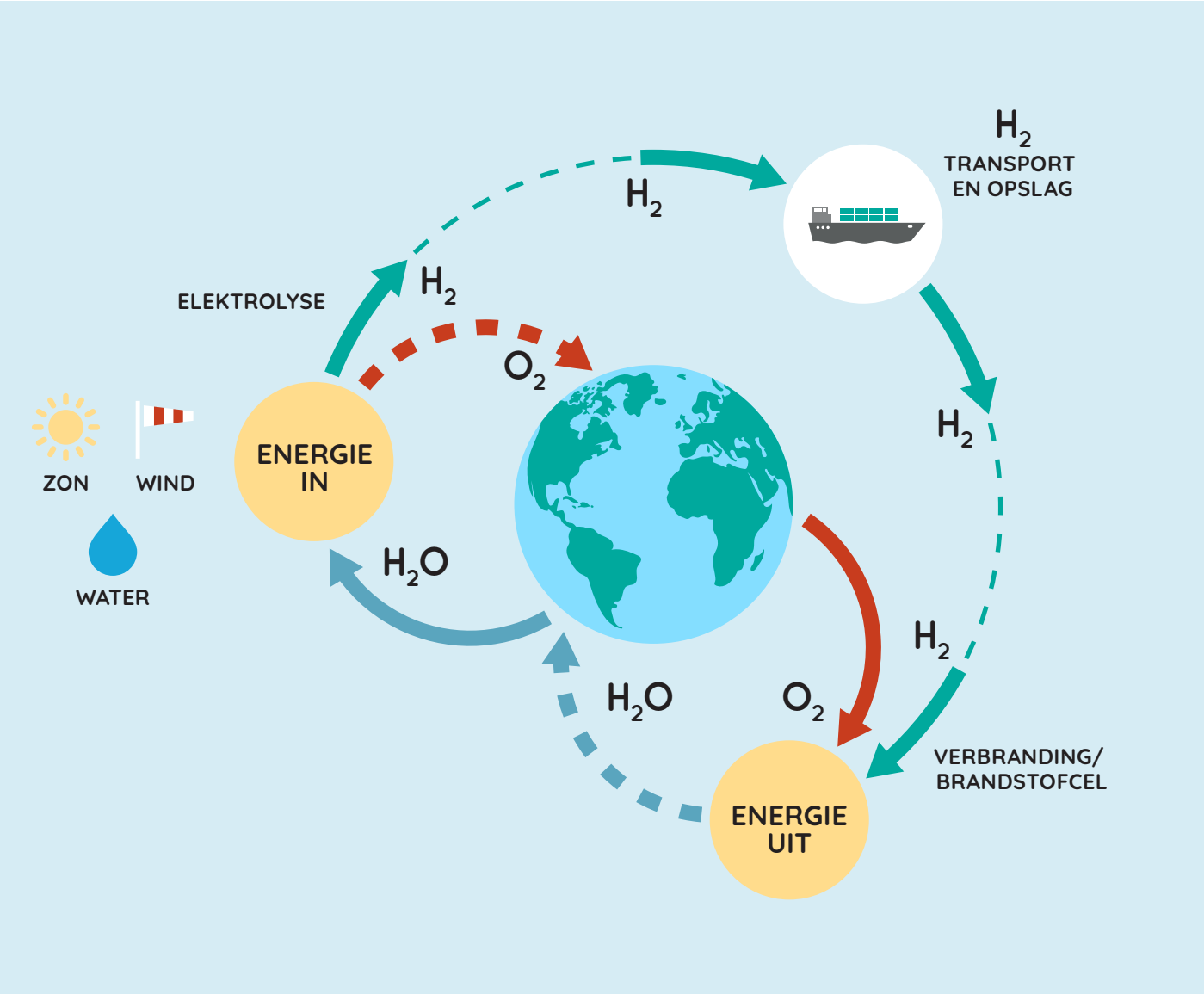
	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Containers	102	152	234	371	598	1.001	1.076	1.193	1.249	1.127	1.280	1.393	1.464	1.544	1.640	1.687
Vracht, anders dan belangrijkste bulkgoederen	1.123	819	1.031	1.125	1.928	1.975	2.112	2.141	2.173	2.004	2.022	2.112	2.150	2.218	2.393	2.463
Belangrijkste bulkgoederen	608	900	988	1.105	1.295	1.711	1.814	1.953	2.065	2.085	2.335	2.486	2.742	2.923	2.985	2.951
Olie en gas	1.871	1.459	1.755	2.050	2.163	2.422	2.698	2.747	2.742	2.642	2.772	2.794	2.841	2.829	2.825	**2.947**

Wereldwijd transport per schip [37].

Maar als we het waterstof dan weer gebruiken in een brandstofcel (auto) of in een boiler/ketel, voor energieproductie, dan is het 'afval' product weer zeer zuiver water. Zo zuiver dat het niet gek is om dit als bron voor drinkwater te zien. Dan moeten we er nog wel mineralen en zouten aan toevoegen om het drinkbaar te maken. We produceren dus niet alleen energie, maar mogelijk ook drinkwater. En ook nog eens op de plek waar de mensen zijn.

Om hoeveel water gaat het dan eigenlijk? Per kg waterstof produceer je afgerond 9 kg oftewel 9 liter zuiver water. Als we dus die 4,2 miljard ton waterstof weer gaan gebruiken, dan resulteert dat in 37,8 miljard m^3 schoon water, water dat in principe geschikt is om drinkwater van te maken. Nu zullen we niet al dit water beschikbaar krijgen, want een deel van de waterstof wordt gebruikt als grondstof, een deel komt vrij op plekken waar je het mogelijk niet kunt opvangen of alleen tegen hoge kosten, en noem maar op. Maar een derde moet toch wel mogelijk zijn, zeg zo'n 12,5 miljard m^3 drinkwaterproductie op de plaatsen waar we het gebruiken. Hé, 10 miljard mensen, die ieder 3 liter water per dag drinken, dat is 11 miljard m^3 per jaar. Een duurzame waterstofkringloop voor energie én voor drinkwater! En als het geen drinkwater wordt dan zijn er genoeg andere nuttige bestemmingen voor dergelijk zuiver water.

Solar Power to the People **Waterstof voor energie en drinkwater**	
Totale wereldbevolking	**10 miljard**
Primair energiegebruik per jaar	1.000 EJ
Drinkwatergebruik per jaar	11 miljard m^3
Waterstofproductie	4,2 miljard ton
Drinkwaterproductie uit waterstof	1/3 van 37,8 miljard m^3 = 12,5 miljard m^3



Waterstofkringloop [38].

4 SOLAR POWER TO THE PEOPLE IN ONZE STAD OF ONS DORP

Zon en regen zorgen voor energie en water, via zonnecellen, omgekeerde osmose, batterijen, elektromotoren, brandstofcellen en elektrolysers.

Iedereen voorzien van schone en betaalbare energie en water is niet alleen een mondiaal vraagstuk. Nee, het heeft ook met onze directe leefomgeving te maken, met onze steden, dorpen en het platteland waar we wonen, werken en recreëren. Hoe kunnen we voor een gezonde en schone leefomgeving zorgen? Hoe kunnen we ervoor zorgen dat onze huizen comfortabel en prettig zijn om in te wonen? Hoe verplaatsen we ons, en hoe komen we aan onze producten en diensten? Laten we eens een poging wagen om een beeld te schetsen van onze duurzame energie- en watervoorziening in onze directe leefomgeving.

Hoe ziet onze stad of ons dorp eruit in 2050?

Laten we eens proberen te bedenken wat de toekomst allemaal zou kunnen brengen.

Onze huizen en gebouwen zijn comfortabel en gezond, ze zijn goed geïsoleerd en worden prima geventileerd. Veel energie voor verwarmen of koelen is niet meer nodig. Maar wat nog aan warmte nodig is, wordt via een warmtenet of via een elektrische warmtepomp geleverd. Op het platteland, in kleine dorpen en soms in de oude binnensteden is het aardgasnet blijven liggen en aangepast om waterstof voor verwarmen en koken naar deze woningen en gebouwen te brengen.

Op alle daken van woningen en gebouwen liggen zonnepanelen die elektriciteit produceren en die zijn voorzien van een systeem om ook het regenwater op te vangen. We hebben veel meer elektrische apparaten om ons heen gekregen. Denk aan intelligente ledverlichting, schermen, digitale tv, internet, tablets, computers, smartphones, robots, drones, camera's en 3D-printers naast onze koelkast, wasmachine, vaatwasser en onze keukenapparaten. Het 'internet of things' heeft zijn intrede gedaan, waardoor we onze apparaten ook op afstand kunnen monitoren en bedienen. Doordat de apparaten veel efficiënter geworden zijn en we ze via het internet of things efficiënt en zuinig kunnen gebruiken, valt het elektriciteitsverbruik per saldo niet eens zoveel hoger uit dan in 2017.

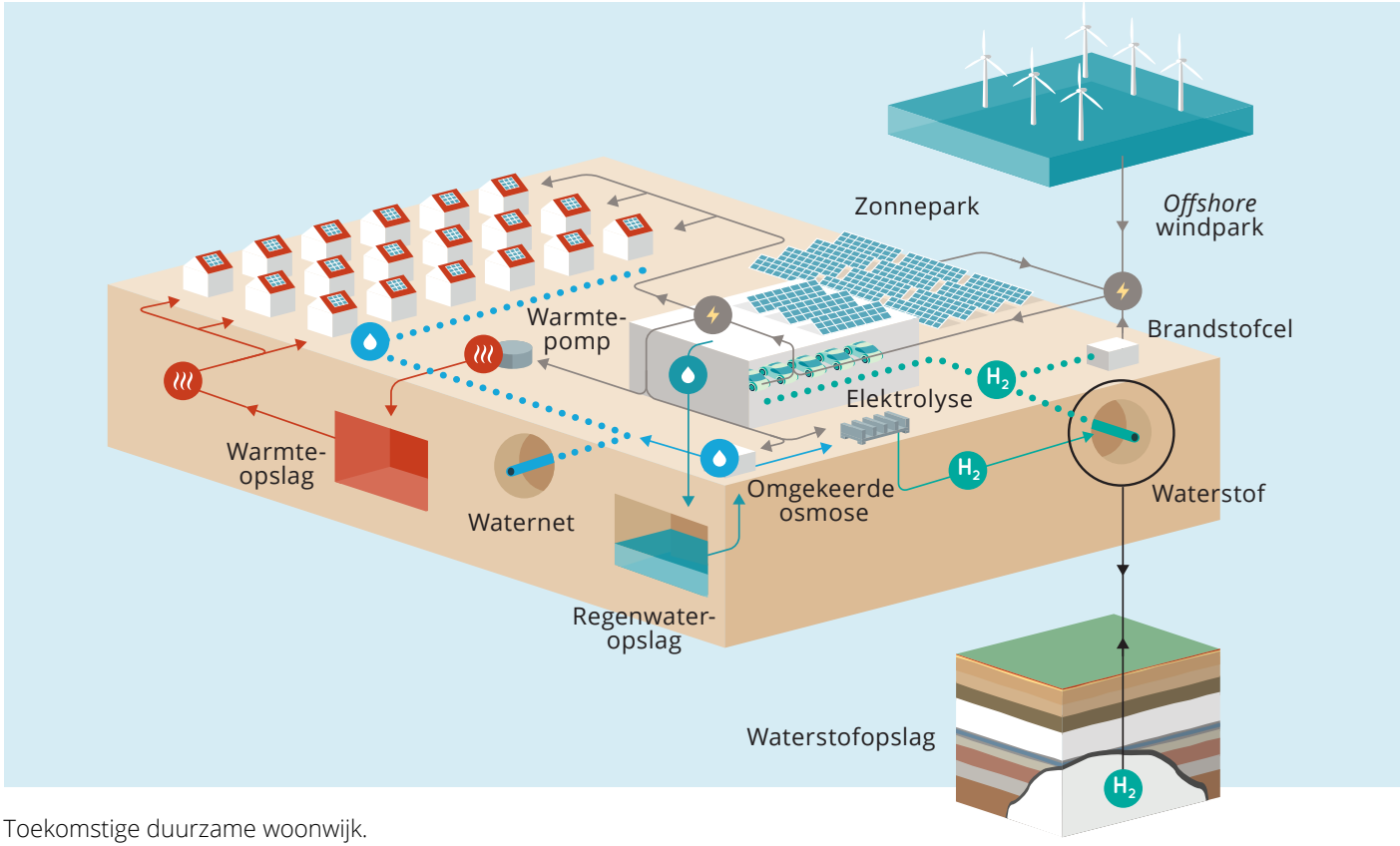
De inkopen en boodschappen doen we digitaal, vanuit onze luie stoel. Deze worden bezorgd via robots en drones. Robots lappen de ramen en stofzuigen. Als er wat kapot is aan de apparaten of in ons huis, print de 3D-printer een vervangend onderdeel. Afval wordt zoveel mogelijk direct omgezet in nieuwe grondstoffen die via robots en drones worden afgevoerd.

We verplaatsen ons in elektrische voertuigen die via batterijen of een brandstofcel-waterstofsysteem van elektriciteit worden voorzien. Natuurlijk rijden onze voertuigen autonoom en zijn we van bezit naar gebruik gegaan. We bestellen via onze smartphone het voertuig dat we die dag willen gebruiken. Hoe ziet ons voertuig er dan uit? Een stuur is niet nodig, koplampen ook niet, en hebben we nog wel een voorruit? En hoe zien onze wegen eruit, hebben we dan nog wel verkeersborden, stoplichten en verlichting nodig?

De voertuigen worden niet voor de deur geparkeerd maar parkeren zichzelf in grote parkeergarages, waar ze aan het elektriciteitsnet, waterstofnet (aangepast aardgasnet) en waternet worden gekoppeld. De voertuigen kunnen daar worden 'volgetankt' met elektriciteit en/of waterstof. Maar ze kunnen ook elektriciteit aan het net leveren. En de brandstofcel-waterstofauto's kunnen ook water aan het waternet leveren.

Bij deze parkeergarages staat een energie- en waterconversie-unit. Batterijen en vliegwielen slaan korte-termijnfluctuaties aan elektriciteit van de zonnepanelen op en leveren die elektriciteit weer terug op momenten van piekvraag. Elektrolysers maken in de zomer, of als de stroom goedkoop is, waterstof van de overtollige stroom van de zonnepanelen, dat in het waterstofnet wordt gepompt. Brandstofcellen kunnen met waterstof uit het waterstofnet ook elektriciteit leveren als er structureel te weinig productie is of wordt voorzien. Warmtepompen maken uit overtollige zonne-energie, of als stroom goedkoop is, warmte van zo'n 40 à 60 graden Celsius en slaan dat op in de bodem voor gebruik in de winter. Het verzamelde regenwater van de zonnepanelen wordt in de bodem opgeslagen. En een omgekeerde osmose-unit maakt uit het opgeslagen regenwater in de bodem demiwater voor de waterstofproductie, en water voor gebruik in de woningen en gebouwen dat in het waternet wordt gepompt.

De energie- en waterconversie-unit is aangesloten op een groter elektriciteitsnet, waterstofnet en waternet. Elektriciteitsproductie van windturbines, waterkrachtcentrales of zonneparken kan zo worden aangevoerd. Er is ook een aansluiting op het waterstofnet, het omgebouwde aardgasnet. Met name dit waterstofnet wordt beide kanten op gebruikt: bij te veel productie van waterstof in de wijk, stad, het dorp of op het platteland, wordt vooral waterstof via het net naar een grootschalige opslag van waterstof gepompt. Daar wordt het eventueel opgeslagen, bijvoorbeeld onder druk in zoutkoepels, vloeibaar gemaakt of omgezet naar ammoniak en in tanks opgeslagen. Het waternet is vooral een back-upnet en -voorziening geworden, omdat het meeste water uit regenwater wordt gemaakt.



Toekomstige duurzame woonwijk.

4.1 Van elektriciteit naar waterstof

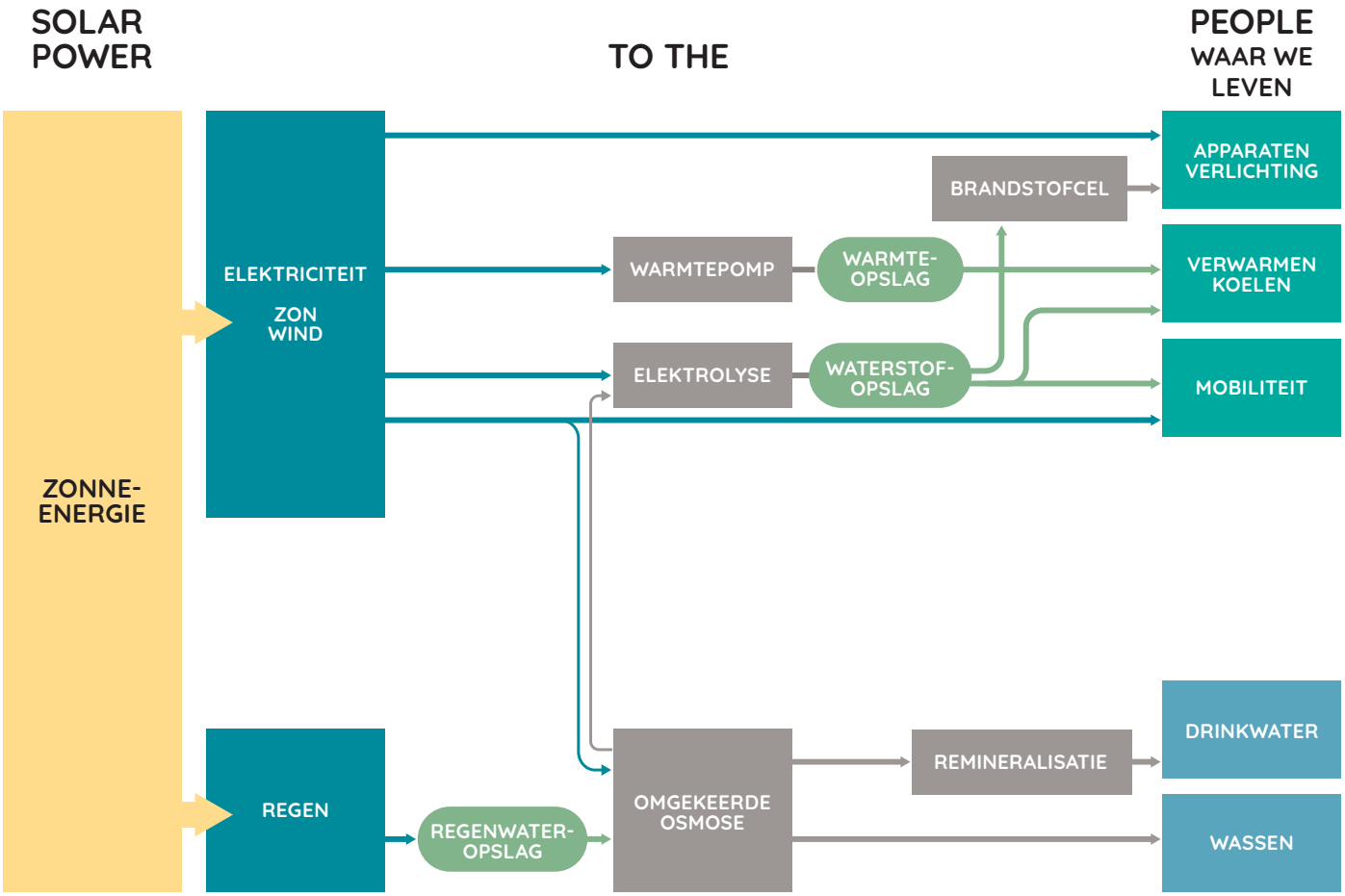
Elektriciteit produceren we in onze steden en dorpen met zonnecellen. Die plaatsen we overal op en we integreren ze overal in. Zonnepanelen op muren en daken, zonnecellen geïntegreerd in dakpannen, ramen, bruggen, wegen, banken en verlichting of zonnecelverf op onze muren, kozijnen en deuren.

Elektriciteit die over is uit zonnepanelen in een wijk, stad of dorp wordt anno 2017 teruggeleverd aan het elektriciteitsnet. Deze elektriciteit kan immers elders wel worden gebruikt, omdat er toch nog geen grote

penetratie van zonnepanelen en zonnecellen is. Maar als in de toekomst op elk huis en gebouw zonnepanelen liggen, is er in de zomer een groot overschot aan elektriciteitsproductie. Overal, in elke wijk en stad, in elk dorp en ook op het platteland is dat overschot er. Opslag in batterijen voor gebruik in de nacht doen we natuurlijk eerst. Dat kan een deel van dit overschot opvangen, maar lang niet alles.

Elektriciteit van zonnepanelen slaan we op in batterijen voor dag-nachtopslag en zetten we om in waterstof voor zomer-winteropslag.

Dus deze elektriciteit zal in de zomer ergens in het systeem moeten worden geabsorbeerd. Een voor de hand liggende manier om dit te doen is elektriciteit omzetten in waterstof, die immers veel makkelijker is op te slaan. Dat kunnen we doen door elektrolysers, maar waar zet je deze elektrolysers neer? Plaatsen we ze decentraal in de wijk, naast de grote parkeergarage, zoals hierboven is geschetst? Of plaatsen we de elektrolysers meer regionaal of centraal? In de eerste situatie, bij decentrale plaatsing in de wijk, hoeven we het elektriciteitsnet niet aan te passen, te verzwaren of zelfs tweerichting te maken. We lossen het probleem van overproductie decentraal op en gebruiken eigenlijk het waterstofnet, het omgebouwde aardgasnet dus, voor de afvoer van overtollige zonnestroom. Natuurlijk pas nadat de waterstof eerst zoveel mogelijk is gebruikt voor waterstof tanken. Uiteraard bepaalt in alle gevallen een goede economische systeemanalyse wat een verstandige keuze is: decentraal of centraal elektrolysers plaatsen. Maar een decentrale oplossing is in ieder geval wel een robuuste oplossing.


SOLAR POWER
TO THE
PEOPLE
WAAR WE LEVEN
ZONNE-ENERGIE
ELEKTRICITEIT
ZON
WIND
REGEN
REGENWATER-OPSLAG
WARMTEPOMP
WARMTE-OPSLAG
ELEKTROLYSE
WATERSTOF-OPSLAG
BRANDSTOFCEL
OMGEKEERDE OSMOSE
REMINERALISATIE
APPARATEN VERLICHTING
VERWARMEN KOELEN
MOBILITEIT
DRINKWATER
WASSEN

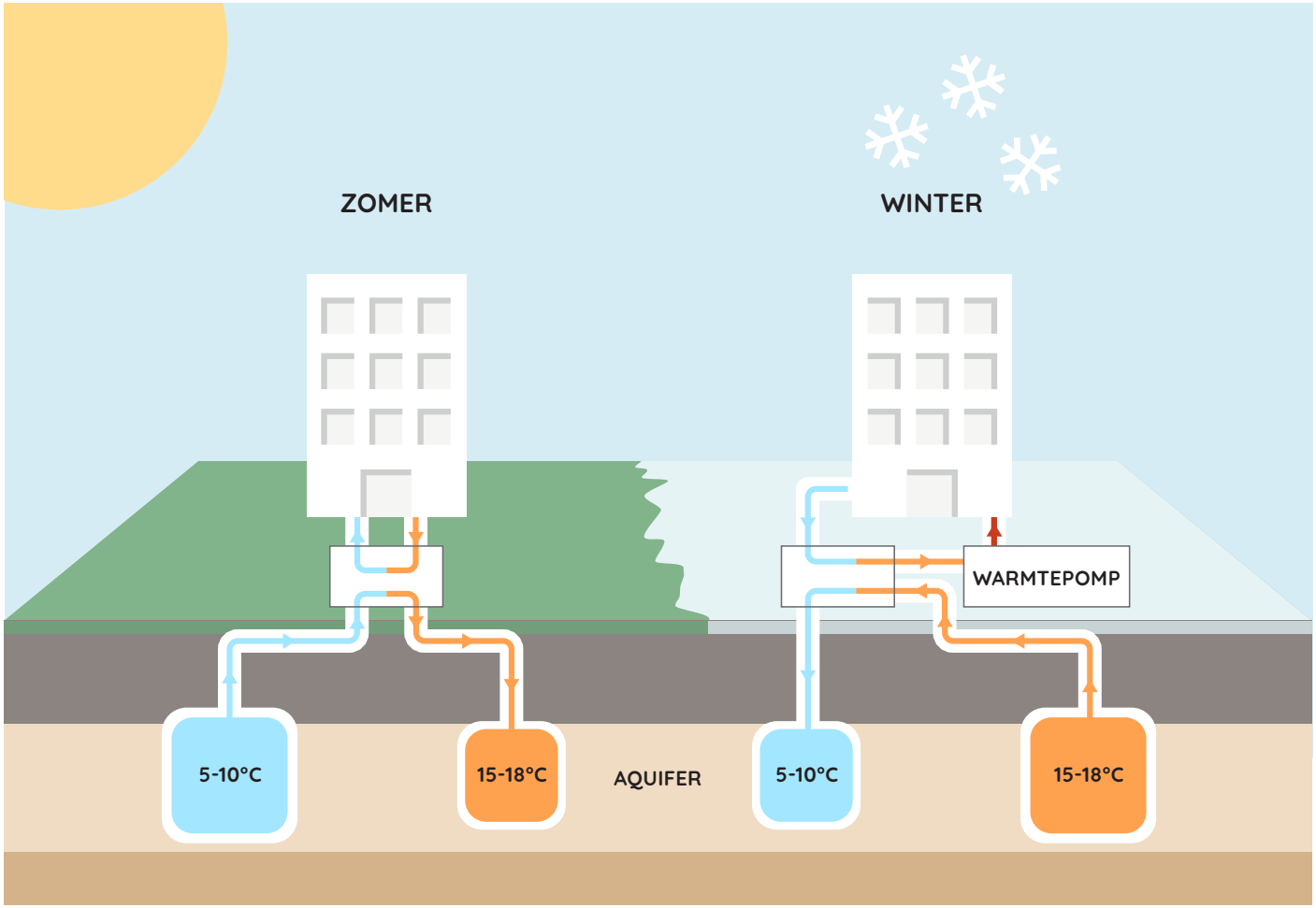
4.2 Van elektriciteit naar warmte

In 2017, met een nog niet volledig duurzame energievoorziening, zijn twee verschillende warmtesystemen mogelijk voor gebieden waar een warmtenet een optie is. De eerste optie is een grootschalig warmtenet, dat de warmte distribueert op een temperatuurniveau van 70 à 90 graden Celsius. Deze stadsverwarmingssystemen bestaan in diverse steden al tientallen jaren. De warmtebron ervan is restwarmte van fossiele elektriciteitscentrales of afvalverbrandingscentrales, maar dat is geen duurzame warmte. Deze grootschalige warmtedistributiesystemen kunnen ook worden gevoed door een geothermische bron en op deze manier is dit wel duurzame warmte.

Warmte van 40 à 60 graden Celsius kunnen we in de zomer produceren met een warmtepomp uit zonne-elektriciteit, opslaan in de bodem en in de winter gebruiken.

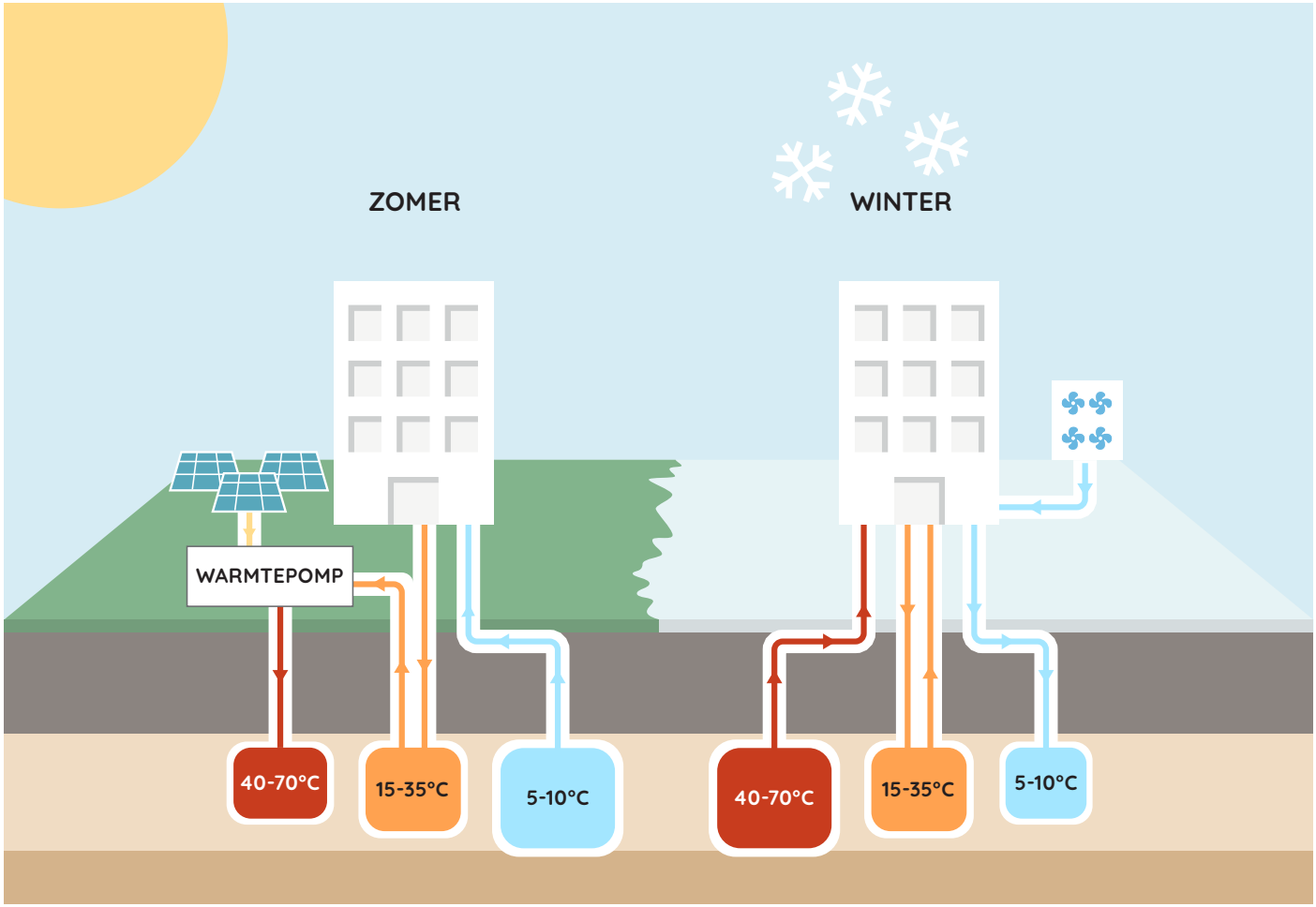
De tweede optie is een warmtepomp WKO-systeem (warmte-koudeopslag). Warmte uit de zomer wordt opgeslagen in de grond in een bron op een temperatuurniveau van 15 à 20 graden Celsius, en de koude in de winter wordt opgeslagen in een tweede bron op een temperatuurniveau van 5 à 10 graden Celsius. In de zomer kunnen we gebouwen nu rechtstreeks koelen met de koude bron. Maar in de winter kan niet rechtstreeks worden verwarmd met de warme bron, die is daarvoor te koud. In de winter moet een warmtepomp in het gebouw of de woning de warmte uit de bron oppompen naar een gewenst niveau van zo'n 30 à 40 graden Celsius. Daarvoor moet dus een warmtepomp in een woning of gebouw worden geplaatst. In de winter gebruikt de pomp elektriciteit. Maar in een duurzaam energiesysteem met zonnepanelen op alle daken, hebben we nu juist veel te weinig elektriciteitsproductie in de winter. Bovendien zorgt het aansluitvermogen van al die warmtepompen ervoor dat we de capaciteit van het elektriciteitsnet in dat gebied zeker moeten verdubbelen.

Daarom is het bij een volledig duurzaam energiesysteem interessant om te kijken of we de warmte juist in de zomer kunnen produceren met een grote centrale warmtepomp in plaats van in de winter. Deze warmte, op een temperatuurniveau van zo'n 40 à 60 graden Celsius, slaan we 's zomers op in een aquifer in de bodem. En in de winter pompen we de warmte weer uit de aquifer in het warmtenet, dat het gebouw of de woning direct verwarmt. We kunnen de gebouwen ook eenvoudig koelen in de zomer door koude van de winter in



Lage temperatuur warmteopslag in de bodem.

een koude bron in de grond op te slaan. In de bodem hebben we nu drie bronnen: een koude bron van 5 à 10 graden Celsius, een warme bron van 40 à 60 graden Celsius en een balanceringsbron van 15 à 35 graden Celsius [39]. Er is op deze manier geen warmtepomp per woning of gebouw nodig, geen elektriciteitsgebruik op momenten van schaarste in de winter en bovenal geen elektriciteitsnetverzwaring .



Hoge temperatuur warmteopslag in de bodem.

Een voorbeeld voor een Nederlandse woning

Laten we eens een voorbeeldje uitwerken voor een Nederlandse woning, waar gemiddeld 2,2 mensen wonen. Het huis van deze mensen heeft een dakoppervlak van 60 vierkante meter (m^2), waarvan de helft bruikbaar is voor zonnepanelen. Deze zonnepanelen produceren in Nederland zo'n 5.400 kWh per jaar. Dan produceren we aan elektriciteit met de zonnepanelen meer dan genoeg voor het gebruik van een warmtepomp voor verwarming en warm tapwater én voor al het elektriciteitsverbruik in huis. Er valt in Nederland gemiddeld ruim 800 millimeter neerslag per jaar, dus op 60 m^2 valt ongeveer 50 m^3 regenwater, waarvan natuurlijk een deel verdampt. Per persoon gebruiken we zo'n 120 liter water per dag. Dat komt overeen met 96 m^3 in het jaar. Dus op deze manier zijn we er met regenwater nog niet. Maar we kunnen zeker nog een stuk zuiniger met ons water omgaan, denk aan ultra-zuinige toiletten en recycle-douches.
Voor zowel energie als water moet het dus mogelijk zijn om op ons huis voldoende zon en regen op te vangen om in onze energie en waterbehoefte te voorzien. Maar het probleem is de opslag van energie en water. Dat lijkt moeilijk te regelen op woningniveau.

4.3 Van elektriciteit en regen naar water

Anno 2017 wordt drinkwater veelal geproduceerd op grote schaal, door het oppompen van water uit de grond, of uit oppervlaktewater. Dit water wordt gezuiverd tot drinkwaterkwaliteit en daarna via een waternet getransporteerd en gedistribueerd naar gebruikers. In landen die niet over voldoende oppervlakte- of grondwater beschikken en die aan zee liggen, wordt zeewater opgepompt. Via verdamping van dit zeewater produceert een grote energie- en waterfabriek zoet water, dat gedistribueerd wordt via een waternet. In deze landen maken ook veel hotels en grote gebouwen hun eigen drinkwater uit zeewater via omgekeerde osmose-installaties.

Het gevallen regenwater in woonwijken wordt nu veelal opgevangen op daken en dan via het riool afgevoerd, of het moet op een of andere manier zijn weg vinden naar het oppervlaktewater. Zonde, want regenwater is een behoorlijk schone waterbron. We zouden het regenwater dus graag willen opvangen via onze daken met zonnepanelen of via onze zonnepaneelparken. Dit regen-

water slaan we dan op in de grond, ook in een aquifer. Als we het water nodig hebben, pompen we het weer op. We kunnen dit water direct gebruiken voor onze planten. Maar we kunnen er ook via omgekeerde osmose demiwater van maken en, met behulp van elektriciteit, waterstof. En van dit demiwater kunnen we, door het aan te vullen met mineralen en zouten, drinkwater maken.

Een huis vangt, in veel gebieden in de wereld, voldoende zon en regen om in de eigen elektriciteits- en drinkwaterbehoefte te voorzien.

Op de meeste plaatsen in de wereld geeft de zon voldoende energie. Er valt voldoende regen om te voorzien in onze eigen energiebehoefte voor verwarmen, koelen en elektriciteit, maar ook om te voorzien in onze eigen drinkwaterbehoefte.

4.4 Van waterstof naar elektriciteit voor back-up

Een teveel aan elektriciteit slaan we op in batterijen, of zetten we om in waterstof. Maar het komt natuurlijk ook voor dat de zonnepanelen niet voldoende elektriciteit produceren; 's nachts, maar ook in de winter overdag. De elektriciteit die we tekortkomen, kunnen we uiteraard van het elektriciteitsnet betrekken. Maar ook in de stad of het dorp kunnen we het tekort aan elektriciteit zelf produceren met brandstofcellen die, met een rendement van 60 à 70%, waterstof omzetten in elektriciteit en demiwater met zuurstof uit de lucht.

Brandstofcel-waterstofauto's kunnen de benodigde elektriciteit produceren op momenten dat er niet voldoende zonne-elektriciteit is.

Die brandstofcellen zijn er in principe al, want ze zitten in onze brandstofcel-waterstofauto's. Als die auto's geparkeerd staan, en dat is meer dan 90% van de tijd, dan zouden we de brandstofcellen in de auto kunnen gebruiken om elektriciteit te produceren als we tekortkomen. Elke brandstofcel in een auto heeft een vermogen

van zo'n 100 kW, genoeg om in principe honderd woningen van elektriciteit te voorzien. We hebben dus maar een fractie van alle auto's nodig om met de brandstofcellen in de auto's het tekort aan elektriciteit te produceren op de momenten dat de zonnepanelen onvoldoende opbrengen [28].

Als we de elektriciteit nu produceren met de auto's die geparkeerd staan in een parkeergarage, dan heb je een geweldige back-up elektriciteitscentrale. De waterstof kan via het waterstofnet naar deze 'centrale' worden gebracht. Maar niet alleen produceren de auto's elektriciteit, ze produceren ook demiwater, dat na re-mineralisatie in het waternet kan worden teruggeleverd. En als je helemaal een robuust elektriciteitssysteem wilt hebben, zetten we er gewoon een stationaire brandstofcel bij voor de zekerheid [40].

5 SOLAR POWER TO THE PEOPLE IN NIEUWEGEIN-UTRECHT

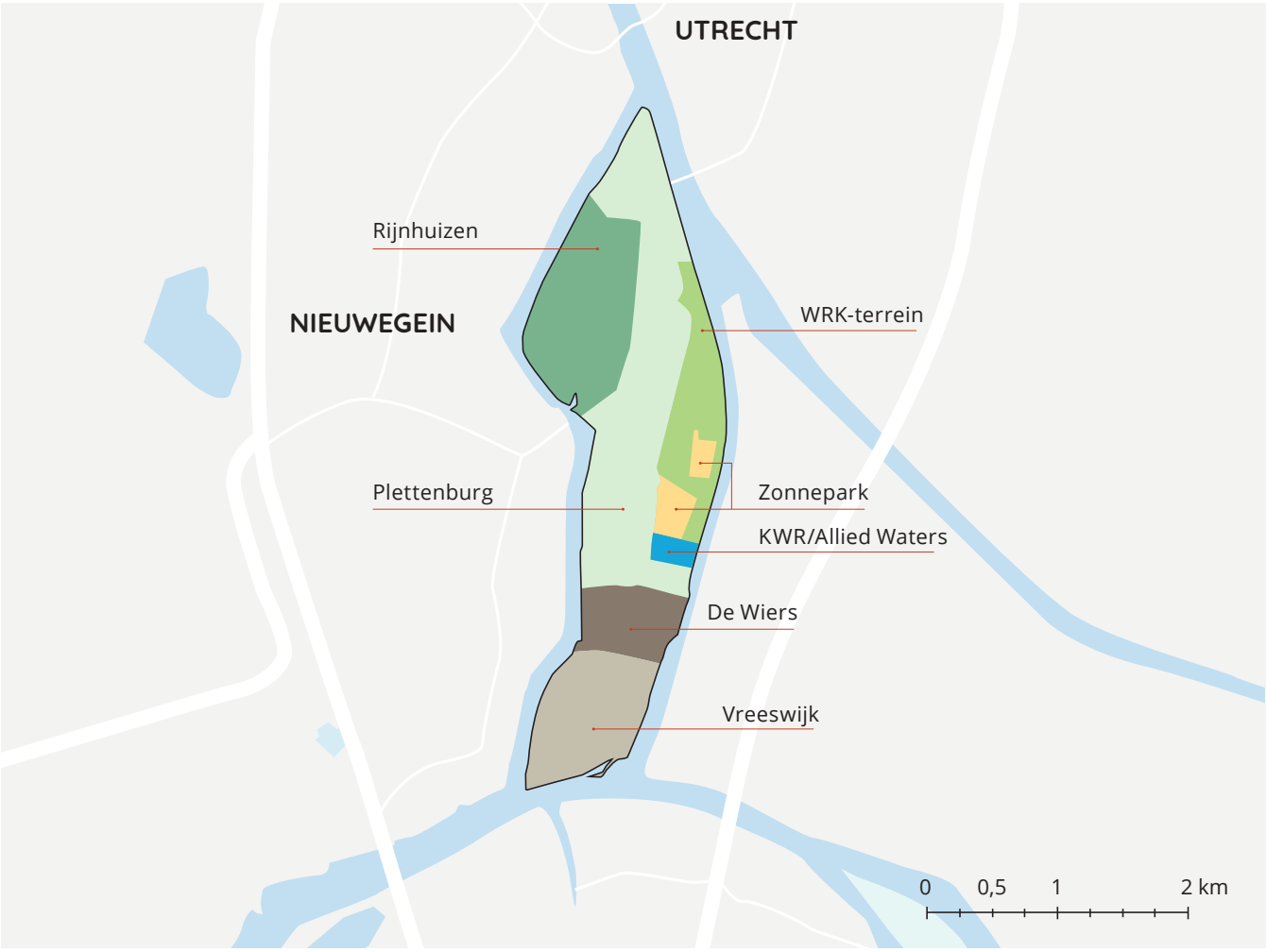
We kunnen een mooi toekomstbeeld schetsen, maar de vraag is altijd: Hoe kom je van het nu naar de toekomst? Hoe kom je van het huidige fossiele energiesysteem naar een duurzaam energiesysteem? Hoe ontwikkelen de technologie en onze behoeften zich? En hoe kunnen we die gewenste of gedroomde ontwikkeling naar een duurzame energie- en watervoorziening vormgeven? In Nieuwegein-Utrecht gaan we een poging wagen om in een gebied, omgeven door twee kanalen en de rivier de Lek, een eerste fase van een duurzaam *Power to the People* energie- en watersysteem te realiseren.

5.1 Hoe ziet ons gebied in Nieuwegein-Utrecht eruit?

Het gebied wordt omgeven door twee kanalen en de rivier de Lek in het zuiden. Aan de oostkant loopt het Lekkanaal en aan de westkant het Merwedekanaal. In het zuiden, tegen de Lek aan, ligt het oude historische dorpje Vreeswijk, met daarboven het woningbouwgebiedje De Wiers. Boven De Wiers ligt het bedrijventerrein Plettenburg. Daarin, tegen het Lekkanaal aan, ligt ook het WRK-terrrein van het Amsterdamse drinkwaterbedrijf (Waternet) en het Noord-Hollands drinkwaterbedrijf (PWN) van waaruit Lekwater naar de duinen wordt getransporteerd. Bovendien bevindt zich hier ook het mooie duurzame gebouw van KWR Watercycle Research Institute. Tussen de N408 en het Merwedekanaal, in het Noordwesten van Plettenburg, bevindt zich Rijnhuizen, met een oud historisch waterliniefort.

In het gebied Rijnhuizen worden nieuwbouwwoningen ontwikkeld, en worden kantoorpanden tot woningen omgebouwd. In totaal gaat het om zo'n negenhonderd nieuwe woningen. Het bedrijventerrein Plettenburg herbergt verder een busremise en diverse opleidingsinstituten voor de transportsector. De drinkwaterbedrijven halen op hun WRK-terrein oppervlaktewater uit het Lekkanaal. Ze zuiveren het water voor, en pompen het via grote leidingen naar een duingebied waar het verder gezuiverd wordt. Dit water is uiteindelijk bestemd voor de drinkwatervoorziening van Amsterdam en een deel van Noord-Holland. Het Amsterdamse drinkwaterbedrijf ontwikkelt dan ook een paar grote zonneparken op dit terrein. Een park van 3 megawattpiek (MWp) is in aanbouw, waarvan de elektriciteit vooral bestemd is voor de pompen op het terrein. Een tweede park van 8,6 MWp wordt in 2018 gerealiseerd.

Negenhonderd woningen en een 8,6 megawattpiek zonnepark worden in dit gebied in Nieuwegein-Utrecht ontwikkeld.



Hier gaat het gebeuren in Nieuwegein-Utrecht.

Natuurlijk kan de elektriciteit van dit zonnepark aan het openbare elektriciteitsnet worden teruggeleverd, maar dan moet de netaansluiting worden verzwaard. Daarom zijn we gaan onderzoeken hoe we met de elektriciteit van dit

zonnepark een duurzaam energiesysteem voor dit gebied kunnen realiseren. **Hoe brengen we deze *Solar Power to the People* van Nieuwegein-Utrecht?**

5.2 Het Solar Power to the People-systeem in Nieuwegein-Utrecht

Het zonnepark levert elektriciteit, maar we hebben niet alleen elektriciteit nodig voor verlichting en het laten werken van apparaten. We willen ook een comfortabel huis, of ergens naartoe rijden, douchen of van een heerlijke maaltijd genieten. Bovendien levert dit zonnepark veel elektriciteit in de zomer, maar weinig in de winter. Daarom is dé oplossing een deel van de elektriciteit om te zetten in een andere energiedrager, die een andere energiefunctie kan vervullen.

Van elektriciteit naar warmte

We gaan het volgende doen: op 2 kilometer afstand van het zonnepark bevindt zich de wijk Rijnhuizen, waar zo'n negenhonderd nieuwe woningen worden ontwikkeld. De ambitie is om deze woningen zo duurzaam mogelijk te bouwen. Een duurzame warmtevoorziening is dan ook noodzakelijk. Doen we dat met een klassiek warmte-koudeopslagsysteem, dan moet in elke woning een warmtepomp worden geplaatst, die in de winter warmte uit de bodem op een gewenste temperatuur kan brengen. Zo'n warmtepomp gebruikt dus elektriciteit in de winter, wanneer er weinig zonne-elektriciteit wordt geproduceerd.

We kunnen dat slimmer doen. Door in de zomer, wanneer we toch veel zonne-elektriciteit hebben, met een warmtepomp warm water te maken van zo'n 60 graden Celsius, dit in de bodem in een aquifer op te slaan en in de winter te gebruiken voor verwarming van de woningen. Nieuw hieraan is niet alleen de productie van warmte met zonne-elektriciteit, maar ook de opslag van deze warmte in de grond. Normaal wordt warmte in de grond opgeslagen met een temperatuur die niet hoger is dan 20 graden Celsius, maar wij willen dat doen op een temperatuurniveau van 40-60 graden Celsius. De optimale temperatuur wordt nog onderzocht.

De zonnepanelen op de daken en het zonnepark leveren elektriciteit en vangen regenwater op. Elektriciteit kunnen we omzetten in warmte en waterstof, regenwater in demiwater.

Via een warmtenet komt de warmte in de woningen terecht. In de woning is alleen een warmtewisselaar nodig om het huis te verwarmen. Wel is misschien nog een beetje extra energie nodig voor tapwater. Dit bespaart niet alleen een warmtepomp in de woning, maar ook hoeft het elektriciteitsnet in de wijk niet te worden uitgebreid, omdat er geen warmtepompen in de woning nodig zijn.

Van elektriciteit en regen naar waterstof

Een deel van de elektriciteit van het zonnepark willen we via elektrolyse van water omzetten in waterstof. Naast elektriciteit hebben we dus water nodig, zeer schoon demiwater zelfs. Daartoe vangen we regenwater op met de zonnepanelen. Dit regenwater zetten we dan met behulp van een omgekeerde osmose-installatie om in demiwater.

We gaan de waterstof in eerste instantie gebruiken om brandstofcelvoertuigen op te laten rijden. We willen er eigenlijk de brandstofcel-waterstofauto's van de bewoners van de nieuwbouwwoningen op laten rijden. Maar omdat er nog geen landelijk dekkend waterstoftankstation-netwerk is, en er daardoor geen brandstofcelauto's worden verkocht, laten we in de praktijk eerst andere auto's en voertuigen waterstof tanken. Dit kunnen brandstofcelauto's zijn van een aantal bedrijven in de buurt, taxi's en brandstofcelvoertuigen van de gemeente, zoals veegwagens en wagens van de plantsoenendienst. Naast de productie van waterstof, moet dus een waterstoftankstation in de buurt worden gerealiseerd.

Van regen en elektriciteit naar demiwater

Voor de productie van waterstof hebben we demiwater nodig, dat we maken uit door de zonnepanelen opgevangen regenwater. Maar de hoeveelheid regenwater die we met de zonnepanelen opvangen, is vele malen groter dan we nodig hebben voor de waterstofproductie. Wat kunnen we dan nog meer doen met dit demiwater?

We gaan in de nieuwbouwwijk, naast de gewone drinkwaterleiding, een tweede demiwaterleiding naar de woningen brengen. Dit demiwater gebruiken we bijvoorbeeld in de vaatwasser en de wasmachine. Door demiwater te gebruiken in de vaatwasser en de wasmachine besparen we op het gebruik van wasmiddelen. Dit scheelt uiteraard in de kosten, maar is zeker ook goed voor het milieu.

Het opvangen van het regenwater op het zonnepark, maar ook op de daken van de nieuwbouwwoningen, betekent dat dit regenwater niet meer door het riool

hoeft te worden afgevoerd. Dit heeft als voordeel dat de rioolbuis niet zo'n grote diameter hoeft te hebben. Maar bovendien is het voordeel dat de afvalwaterzuivering veel dikker afvalwater krijgt aangeboden. Daar kunnen biogas en materialen dus makkelijker uit worden gewonnen. En er is niet zoveel elektriciteit meer nodig om het afvalwater te zuiveren, simpelweg omdat het regenwater er niet meer inzit.

Een slim DC-elektriciteitsnet

Zonnepanelen produceren elektriciteit, maar deze elektriciteit is gelijkstroom, oftewel DC (*Direct Current*). Daarom is een omvormer nodig om de gelijkstroom van de zonnepanelen om te zetten in wisselstroom. Het elektriciteitsnet levert namelijk wisselstroom, oftewel AC (*Alternating Current*). Werkten vroeger al onze apparaten op wisselstroom, inmiddels werkt bijna elk apparaat op gelijkstroom. Dus in elk apparaat zit een omvormer die van wisselstroom gelijkstroom maakt!

In ons systeem werken de omgekeerde osmose-installatie, net als de warmtepomp en de elektrolyser, op gelijkstroom. Dus we leggen een gelijkstroomnet aan tussen het zonnepark en deze installaties, waardoor we de omzettingsverliezen, van DC naar AC en weer terug naar DC, kwijt zijn.

Ook in de nieuwbouwwijk willen we, in eerste instantie alleen in de openbare ruimte, een gelijkstroomnet aanleggen. Hierop is de ledverlichting aangesloten, en ook de elektrische oplaadstations voor elektrische auto's met batterijen zijn erop aangesloten. Leds en batterijen werken immers ook op gelijkstroom. Ook kunnen de zonnepanelen die op de woningen liggen direct op een dergelijk gelijkstroomnet worden aangesloten. In de toekomst zou ook in de woning een gelijkstroomnet veel handiger en efficiënter zijn.

5.3 Vraag en aanbod van energie en water in Nieuwegein-Utrecht

Wat kunnen we nu doen met de hoeveelheid elektriciteit die het zonnepark produceert? En hoe zorgen we ervoor dat we op elk moment aan de vraag naar elektriciteit, warmte, waterstof en demiwater kunnen voldoen?

Het aanbod van elektriciteit en de vraag naar energie voor elektriciteit, warmte, water en waterstof zijn in balans op jaarbasis, maar niet op elk moment.

Het aanbod van zon en regen

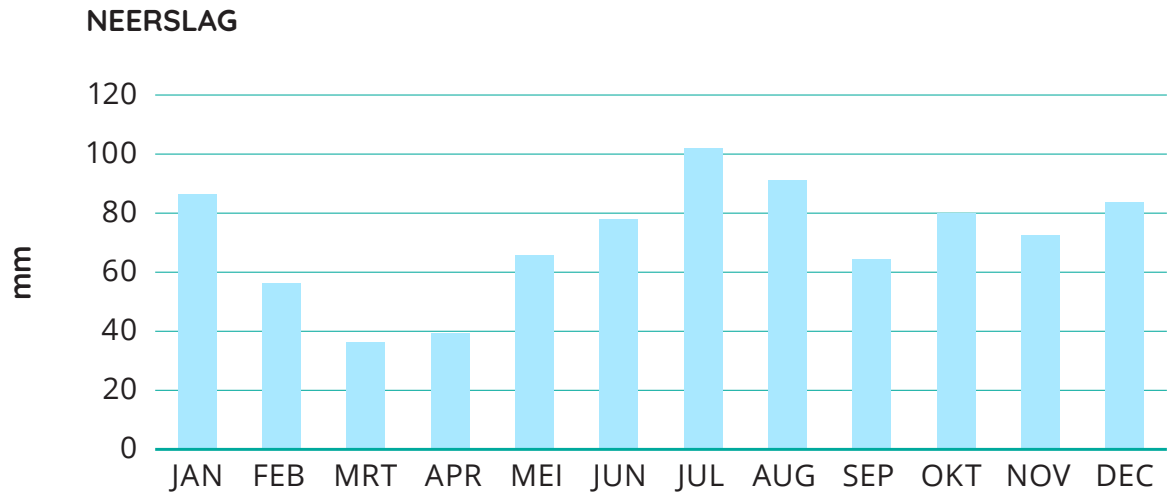
Het geplande zonnepark heeft een piekvermogen van 8,6 MWp. Door de gekozen oriëntatie oost-west, schatten we dat dit zonnepark in totaal zo'n 7 miljoen kWh per jaar produceert. De zonnepanelen fungeren ook als regenwateropvang. In totaal kan per jaar zo'n 40.000 kubieke meter (m^3) regenwater worden opgevangen. Dit regenwater wordt opgeslagen in de grond, in een aquifer.

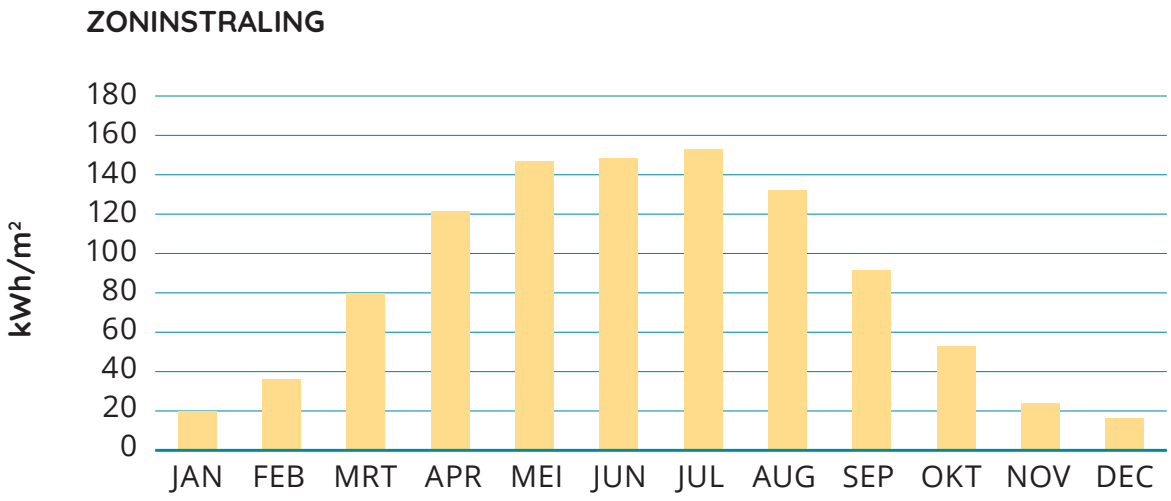
In de nieuwbouwwijk komen op de woningen ook zonnepanelen te liggen, en wordt regenwater opgevangen van de daken. De zonnepanelen zouden zoveel elektriciteit moeten leveren dat vraag en aanbod gedurende het jaar met elkaar in evenwicht zijn. Als we uitgaan van een gemiddeld gebruik van een woning van 3.300 kWh per jaar, dan hebben we voldoende aan 4 kWp per woning aan zonnepanelen. In totaal gaat het in de wijk om een opgesteld zonnepaneelvermogen van 3,6 MWp. Het regenwater van de daken wordt opgevangen en via een leiding naar het gebied van het zonnepark geleid. We veronderstellen dat we per woning zo'n 30 vierkante meter (m^2) regenopvang hebben. Dat betekent dat deze woningen afgerond zo'n 20.000 m^3 regenwater opvangen. Dit regenwater slaan we, samen met het regenwater van de zonnepanelen, op in de grond.

De vraag naar elektriciteit, warmte, waterstof en demiwater

Het uitgangspunt is dat we de nieuwbouwwijk in zijn geheel van duurzame energie willen voorzien. Deze nieuwbouwwoningen produceren hun eigen elektriciteit door zonnepanelen op hun daken. Dit is nog niet op elk moment van het jaar in balans, maar wel binnen een jaar.

Dat betekent dat we met de elektriciteit van het zonnepark de warmte voor deze woningen willen leveren en de brandstof voor de auto's, in ons geval dus waterstof.





Zon en regen in Utrecht-Nieuwegein (gemiddeld over de periode 2011-2016) [41].

Zo ziet dat systeem eruit:

- Het elektriciteitsgebruik van een nieuwbouwwoning in dit gebied wordt ingeschat op zo'n 3.300 kWh per jaar [42]. In totaal gebruiken de huizen dan 900*3.300 = 3 miljoen kWh aan elektriciteit.

- Vanuit een koele bron pompen we water op met een temperatuur van zo'n 25 graden Celsius. Met een warmtepomp, die elektriciteit van het zonnepark gebruikt, pompen we deze warmte op naar een niveau van 40 tot 60 graden Celsius. Dit water slaan we op in de warme bron in de grond. Het moet mogelijk zijn dat deze warmtepomp een COP (*Coëfficiënt of Performance*) van 3 haalt. Dat betekent dat je met 1 kWh electriciteit = 3,6 MJ dan 3*3,6 = 10,8 MJ aan warmte produceert. De warmtevraag van deze goed geïsoleerde nieuwbouwwoningen wordt ingeschat op 12 gigajoule (GJ) voor verwarming en 9 GJ voor warm tapwater. In totaal dus 21 GJ aan warmte. De negenhonderd woningen gebruiken in totaal dan 19.000 GJ warmte. Daarvoor is afgerond 1,75 miljoen kWh aan elektriciteit nodig.

- In Nederland beschikt gemiddeld bijna ieder huishouden over een auto (0,93 auto per huishouden). We veronderstellen dat de helft een elektrische brandstofcel-waterstofauto heeft en de andere helft een elektrische batterij-auto. Een auto in Nederland rijdt gemiddeld zo'n 13.000 kilometer per jaar [43]. Bij een brandstofcel-waterstofauto is het waterstofverbruik 1 kilo waterstof per 100 kilometer. Dit betekent dat een huishouden per jaar 130 kilo waterstof verbruikt. In totaal gebruiken 450 huishoudens dan 58.500 kilo waterstof. Als we veronderstellen dat we momenteel nog zo'n 55 kWh nodig hebben om 1 kilo waterstof te produceren, dan hebben we in totaal 325 miljoen kWh nodig. Daarnaast hebben we zo'n 9 liter demiwater nodig per kilo waterstof. In totaal 500 m^3 demiwater. Dit produceren we via omgekeerde osmose uit regenwater. Het elektriciteitsverbruik is ongeveer 1 kWh per m^3 demiwater, totaal 500 kWh, dus een verwaarloosbare hoeveelheid. We hebben nog wat verlies van water in de omzetting van regenwater naar demiwater, maar in totaal hebben we minder dan 1.000 m^3 regenwater nodig. Dat is slechts een kleine fractie van al het regenwater dat we opvangen. De elektrische batterij-auto rijdt gemiddeld ook 13.000 km per jaar. Met 1 kWh kun je zo'n 5 kilometer rijden [44], dus per jaar verbruikt deze auto 2.600 kWh. In totaal wordt dus 450*2.600 = 1,17 miljoen kWh verbruikt.

- In de wijk wordt naast het gewone drinkwaternet een demiwaternet aangelegd voor het watergebruik van onder andere wasmachine en vaatwasser. Per dag per persoon wordt 120 liter water verbruikt, daarvan is zo'n 50 liter voor de toiletten, wasmachine, vaatwasser en andere apparaten [48]. Gemid-

deld wonen er 2,2 mensen in een huis in Nederland, dus in totaal verbruikt deze nieuwbouwwoning dan 2,2*50*365 = 40.150 liter per jaar, oftewel zo'n 40 m^3 per jaar. De negenhonderd woningen gebruiken dan in totaal 36.000 m^3 demiwater. Om van regenwater via omgekeerde osmose deze hoeveelheid demiwater te maken, hebben we 36.000 kWh nodig. We verliezen natuurlijk ook wat water, laten we veronderstellen zo'n 10%. Dit betekent dat we in totaal 40.000 m^3 regenwater nodig hebben. We moeten ook nog 70 liter drinkwater leveren per persoon per dag. In totaal voor de woningen is dit 2,2*70*365*900 = 50.000 m^3 (afgerond) drinkwater per jaar. Dit levert het drinkwaterbedrijf extern aan.

- In een wijk wordt, naast energie voor verwarming en tapwater, elektriciteit voor alle apparaten en verlichting in huis en energie voor rijden, ook elektriciteit gebruikt in de openbare ruimte. Dat is voor de openbare verlichting circa 65 kWh per huishouden per jaar [46], [47]. Voor pompen in het warmtenet ongeveer 50 kWh per huishouden per jaar [48], en voor het rioleringssysteem en regenwaternet samen gemiddeld 0,5 kWh/m^3, wat neerkomt op circa 40 kWh per huishouden per jaar [49]. Ruim genomen komt dit in totaal neer op 200 kWh per woning. Voor deze nieuwbouwwijk van negenhonderd woningen is dat 180.000 kWh.

De jaarlijkse energiebalans en energie-balancering

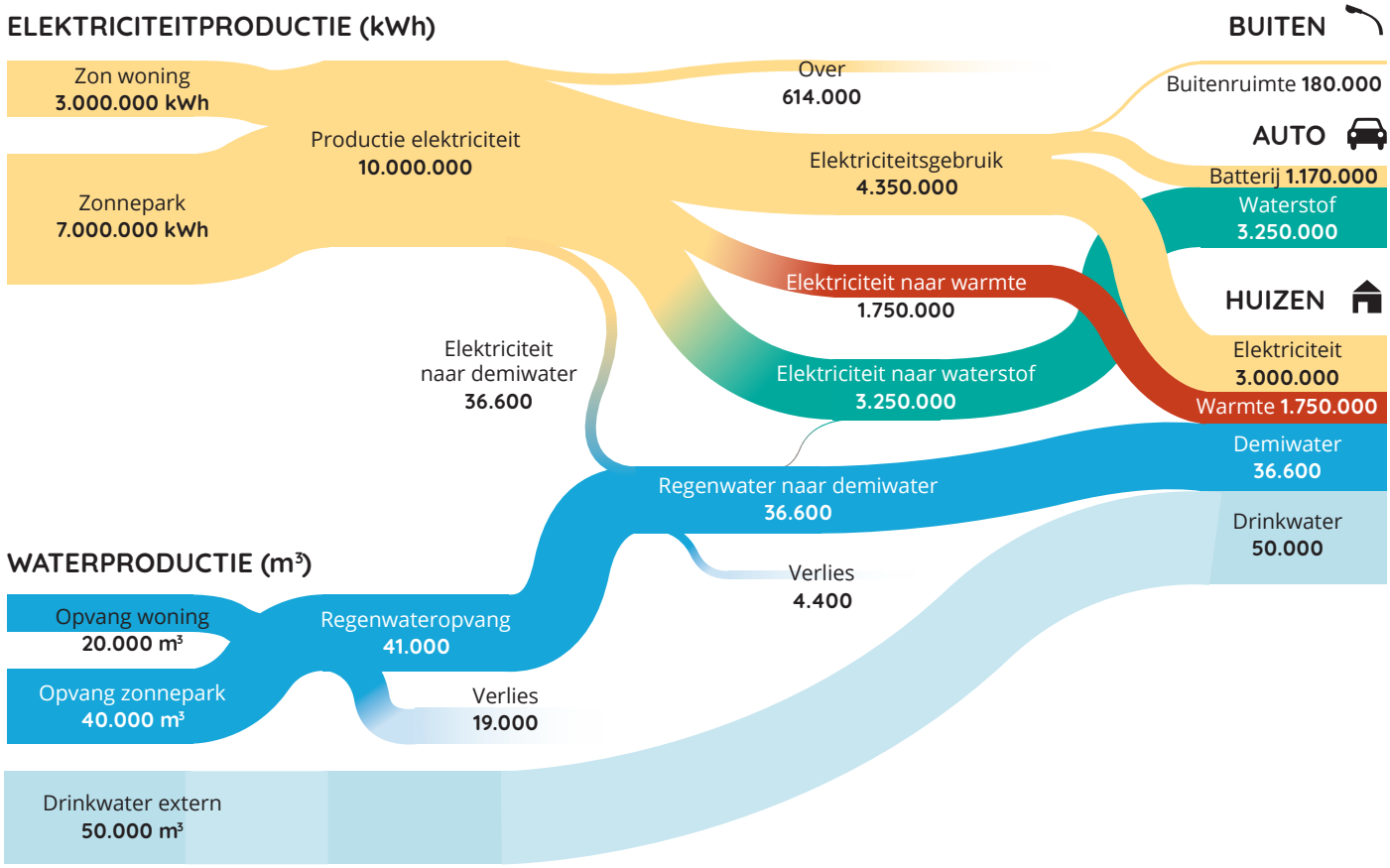
Als we nu de energiebalans van deze nieuwbouwwijk met negenhonderd woningen met een zonnepark van 8,6 MWp eens op een rijtje zetten, dan zien we het volgende.

Er wordt in totaal 10 miljoen kWh aan zonne-elektriciteit geproduceerd (7 miljoen door het zonnepark, 3 miljoen in de wijk), terwijl het verbruik 9,4 miljoen kWh is. Dus een dergelijk systeem van woningen met een zonnepark kan de jaarlijkse energiebalans in evenwicht brengen. Daarvoor is echter wel een ongeveer 2,5 keer zo groot zonnepark nodig als het 'zonnepark' dat zich op de woningen bevindt.

De grootste energieverbruiker is de auto, gevolgd door elektriciteitsverbruik in de woning en dan het warmteverbruik. Ten opzichte van het warmteverbruik is het elektriciteitsverbruik bijna twee keer hoger en het energieverbruik voor auto's is bijna drie keer zo hoog.

Alhoewel de geproduceerde en verbruikte elektriciteit wel in balans zijn over een jaar, is die balans er niet op elk moment in dat jaar. In de zomer is er een overschot en in de winter een tekort. Ook is er 's nachts geen productie van elektriciteit en overdag mogelijk te veel. In dit systeem lossen we deze onbalans als volgt op:

- Een deel van het overschot aan elektriciteit in de zomer zetten we om in warmte. De warmte kunnen we opslaan in de grond, voor gebruik in de winter. Daarmee zijn de warmteproductie en warmtevraag op elk moment in het jaar met elkaar in evenwicht te brengen.



Solar Power to the People in Nieuwegein-Utrecht.

- Een deel van het overschot aan elektriciteit kunnen we ook omzetten in waterstof voor direct gebruik om te tanken. Daarbij is wel een kleine waterstofbuffer nodig bij het tankstation. Maar we hebben dan zeker nog niet voldoende waterstof geproduceerd voor al het tanken van waterstof. Met name niet voor de waterstof die in de winter nodig is.

- Het tekort in de nacht kan in de zomermaanden goed worden opgevangen door de batterijen in de elektrische auto's. Zelfs bij een bezettingsgraad van één elektrische batterij-auto op twee woningen moet dit goed mogelijk zijn.

- Dan blijven we nog met een tekort aan elektriciteit en waterstof zitten tijdens de winter. Allereerst de waterstof. Op momenten dat de elektriciteit van het net goedkoop is, dus als het hard waait, kunnen we elektriciteit inkopen om er via de elektrolyser waterstof van te maken om te tanken. Zo kunnen we ook altijd de overschotten in het elektriciteitsnet absorberen.

- De tekorten in waterstof kunnen we ook op een andere manier oplossen. Daarbij kunnen we tubetrailers inzetten, die waterstof over de weg vervoeren. Als er een waterstofnet, dat wil zeggen een omgebouwd aardgasnet, ligt tot aan het waterstoftankstation, kunnen we dat gebruiken om op elk moment de tekorten aan waterstof aan te vullen. Deze waterstof wordt ergens op de wereld goedkoop geproduceerd en via schepen of transportwaterstofleidingen naar het land, in dit geval Nederland, gebracht.

- Het tekort aan elektriciteit in de winter kunnen we ook oplossen via het elektriciteitsnet. Als het hard waait, is dat geen probleem, want dan kun je elektriciteit direct van het net betrekken. Maar als het niet hard waait, moet de elektriciteit uit opslag komen, bijvoorbeeld uit opgepompt water. Of uit de omzetting van waterstof in elektriciteit in centrales of brandstofcellen. Waterstof kan immers wel in grote hoeveelheden worden opgeslagen.

De jaarlijkse waterbalans en waterbalancering

Als we nu de waterbalans van deze nieuwbouwwijk met negenhonderd woningen met een zonnepark van 8,6 MWp eens op een rijtje zetten, dan zien we het volgende.

De benodigde hoeveelheid regenwater is ruim voldoende om te voorzien in de demiwatervraag voor waterstofproductie en een demiwaternet in de wijk dat water levert voor onder andere vaatwasser en wasmachine. Het demiwatergebruik voor waterstofproductie is slechts een fractie van het verbruik. Er is nog regenwater over voor ander watergebruik, irrigatie of drinkwaterproductie.

Naast demiwater is er ook gewoon drinkwater nodig om te drinken, koken en douchen. Dit drinkwater wordt in dit geval extern aangevoerd. Het regenwater zou in een tiental procenten van dit drinkwater nog kunnen voorzien, maar kan lang niet al het benodigde drinkwater produceren.

Om het regenwater bovengronds te bufferen zouden enorme tanks nodig zijn, en die zijn duur. Daarom is opslag van regenwater ondergronds in aquifers een betere en goedkopere optie, waardoor op elk moment in het jaar voldoende regenwater, en dus demiwater, voorhanden is.

Er is ruim voldoende regenwater om te voorzien in de vraag naar demiwater voor waterstofproductie en voor gebruik in huis voor onder andere vaatwasmachine en wasmachine. Door opslag van regenwater in de bodem is op elk moment voldoende demiwater beschikbaar.

In Nieuwegein-Utrecht start Solar Power to the People

In Nieuwegein-Utrecht realiseren we dit unieke project, waarbij we de zonne-energie bij de mensen brengen. We produceren elektriciteit door zonnecellen op de daken van de woningen en via een zonnepark. Een deel van de zomerse zonne-elektriciteit zetten we met een warmtepomp om in warmte, en via een elektrolyser in waterstof. De warmte van 40 à 60 graden Celsius slaan we op in de grond in een aquifer, voor gebruik in de winter. De waterstof gebruiken we als brandstof in brandstofcel-waterstofauto's en voertuigen om te rijden. Voor de productie van waterstof hebben we naast elektriciteit ook demiwater nodig, dat is zeer schoon water. Daarvoor vangen we regenwater op met de zonnepanelen, met behulp van opvanggootjes onder de panelen. Deze regen bufferen we ook in de grond en gebruiken we om demiwater te maken via omgekeerde osmose. Maar de regen levert ons veel meer demiwater dan we voor de waterstofproductie nodig hebben. Daarom leggen we een tweede demiwaternet in de woningen aan, waarmee we onder andere de wasmachine en vaatwasser laten draaien. Door dit heel schone water besparen we ook op zeepgebruik.

We hebben met dit systeem een eerste belangrijke stap gezet naar een volledig duurzaam energie- en watersysteem. Er is zeker nog een verdere ontwikkeling nodig om waterstof te kunnen bufferen en duurzame elektriciteit te produceren als de zon niet voldoende elektriciteit opwekt. Ook voor bestaande bouw moeten we dergelijke energie- en watersystemen ontwikkelen. In Nieuwegein-Utrecht zetten we de eerste stappen in het brengen van zonne-energie naar de mensen: *Solar Power to the People!*

REFERENTIES

[1] K. E. Trenberth, J. T. Fasullo, and J. Kiehl, "Earth's global energy budget," *Bull. Am. Meteorol. Soc*., vol. 90, no. 3, pp. 311–323, 2009.

[2] NASA, "The Nasa Earth's Energy Budget Poster," 2016. [Online]. Available: https://science-edu.larc.nasa.gov/energy_budget/. [Accessed: 29-Jun-2017]

[3] BP, "BP Statistical Review of World Energy 2017," *BP Stat. Rev. World Energy*, p. 52, 2017 [Online]. Available: https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf

[4] World Energy Council, *World Energy Resources* 2016. London, 2016.

[5] IEA, "Technology Roadmap - Geothermal Heat and Power," Paris, 2011 [Online]. Available: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Geothermal_Roadmap.pdf

[6] W. van Sark, "Opbrengst van zonnestroomsystemen in Nederland," 2014.

[7] V. Aggarwal, "What are the most efficient solar panels on the market?," 2017. [Online]. Available: http://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/. [Accessed: 12-Sep-2017]

[8] Debets, "Windmolenpark v.s. zonneweide," Stadskanaal, 2014 [Online]. Available: https://www.google.nl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj72YeMg5DWAhXLh7QKHTrRB6oQFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.aaenhunze.nl%2Fbis%2Fdsresource%3Fobjectid%3D848a0abb-0631-48bb-8f42-46efe9d5a164%26type%3DPDF&usg=AFQjCNEy5_1

[9] K. E. Trenberth, L. Smith, T. Qian, A. Dai, and J. Fasullo, "Estimates of the Global Water Budget and Its Annual Cycle Using Observational and Model Data," *J. Hydrometeorol*., pp. 758–769, 2007.

[10] FAO AQUASTAT, "Aquastat - Long-term average annual precipitation and internal renewable water resources." FAO, 2016 [Online]. Available: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en

[11] IEA, "Key World Energy Statistics 2016," *Statistics (Ber)*., p. 80, 2016 [Online]. Available: http://www.oecd-ilibrary.org/energy/key-world-energy-statistics-2009_9789264039537-en

[12] WWF, Ecofys, and OMA, The Energy Report - 1*00% Renewable Energy by 2050*. 2011 [Online]. Available: http://assets.panda.org/downloads/101223_energy_report_final_print_2.pdf

[13] World Health Organization, "How much water is needed in emergencies," *Technical Notes on Drinking-Water, Sanitation and Hygiene in Emergencies*., no. 9. WHO, Geneva, pp. 1–4, 2013.

[14] FAO AQUASTAT, "Water withdrawal by sector," no. September, pp. 1–2, 2016 [Online]. Available: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/tables/WorldData-Withdrawal_eng.pdf

[15] A. Y. Hoekstra, "The water footprint of food," in *Water for food*, J. Förare, Ed. The Swedish Research Council for Environment, 2008, pp. 49–60 [Online]. Available: http://doc.utwente.nl/77216/

[16] IEA, *Water Energy Nexus*. Paris: OECD/IEA, 2016.

[17] FAO, "Country fact sheet - United States of America." 2016 [Online]. Available: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/cf/readPdf.html?f=USA-CF_eng.pdf

[18] FAO, "Aquastat website - Brazil profile," 2016. [Online]. Available: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/BRA/index.stm. [Accessed: 01-Aug-2017]

[19] FAO, "Aquastat website - India profile," 2016. [Online]. Available: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/IND/index.stm. [Accessed: 01-Aug-2017]

[20] FAO, "Aquastat website - China profile," 2016. [Online]. Available: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/CHN/index.stm. [Accessed: 01-Aug-2017]

[21] FAO, "Germany - country fact sheet." 2016 [Online]. Available: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/cf/readPdf.html?f=DEU-CF_eng.pdf

[22] H. Ammermann, P. Hoff, M. Atanasiu, J. Ayllor, M. Kaufmann, and O. Tisler, *Advancing Europe's energy systems: Stationary fuel cells in distributed generation*. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) & Roland Berger, 2015 [Online]. Available: http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Fuel_Cells_Study_20150330.pdf

[23] Lazard, "Lazard's Levelised Cost of Energy Analysis (version 10.0)," no. December, pp. 1–21, 2016 [Online]. Available: https://www.lazard.com/media/438038/levelized-cost-of-energy-v100.pdf

[24] Bloomberg Energy Finance, "New Energy Outlook 2017," 2017. [Online]. Available: https://about.bnef.com/new-energy-outlook/#toc-download. [Accessed: 05-Sep-2017]

[25] "PEM Elektrolyzer." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer_electrolyte_membrane_electrolysis. [Accessed: 03-Oct-2017]

[26] V. Oldenbroek, L. A. Verhoef, and A. J. M. van Wijk, "Fuel cell electric vehicle as a power plant : Fully renewable integrated transport and energy system design and analysis for smart city areas," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–31, 2017 [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.155

[27] KraftHand, "Neue Speichertechnologie von Linde zum effizienteren Transport von Wasserstoff," 2013. [Online]. Available: https://www.krafthand.de/aktuell/details/article/linde-transport-von.html. [Accessed: 03-Oct-2017]

[28] U. Cardella, L. Decker, and H. Klein, "Economically viable large-scale hydrogen liquifaction," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 171, 2017 [Online].
Available: http://stacks.iop.org/1742-6596/755/i=1/a=011001?key=crossref.0cdd0e5fffab2dd74a68d0f9f4f1296b

[29] Kawasaki, "Hydrogen Road," 2017. [Online].
Available: http://global.kawasaki.com/en/stories/hydrogen/. [Accessed: 03-Oct-2017]

[30] "Renewable hydrogen — how it works," 2017. [Online].
Available: http://www.abc.net.au/news/2017-05-11/hydrogen-graphic/8518118. [Accessed: 03-Oct-2017]

[31] Mitsui & co., "The World's First Global Hydrogen Supply Chain Demonstration Project," 2017. [Online].
Available: http://www.mitsui.com/jp/en/release/2017/1224164_10832.html. [Accessed: 05-Sep-2017]

[32] Energy.gov, "Hydrogen storage." [Online].
Available: https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage. [Accessed: 03-Oct-2017]

[33] Air Liquide, "USA: Air Liquide operates the world's largest hydrogen storage facility," 2017. [Online]. Available: https://www.airliquide.com/media/usa-air-liquide-operates-world-largest-hydrogen-storage-facility. [Accessed: 05-Sep-2017]

[34] KBB Underground Technologies, "Store hydrogen in natural gas deposits," 2017. [Online]. Available: http://forschung-energiespeicher.info/en/project-showcase/analysen/projekt-einzelansicht//Wasserstoff_unter_Tage_speichern/. [Accessed: 03-Oct-2017]

[35] H. Jóhannesson, "Aluminium overtakes fish in Iceland," 2011. [Online]. Available: http://www.nordregio.se/en/Metameny/About-Nordregio/Journal-of-Nordregio/Journal-of-Nordregio-no-2-2011/Aluminium-overtakes-fish-in-Iceland/. [Accessed: 12-Sep-2017]

[36] Shell International BV, "Pathways To Net-Zero Emissions Better Life With Healthy Planet," 2016 [Online]. Available: http://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/a-better-life-with-a-healthy-planet.html

[37] UNCTAD, *Review of Maritime Transport 2016*. 2016 [Online].
Available: http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2016_en.pdf

[38] B. David, "Session: NH3 Fuel Use," *2016 NH3 Fuel Conference*. Oxford, 2016 [Online].
Available: https://nh3fuel.files.wordpress.com/2016/09/bill-david-cracking-ammonia-nh3fa2016.pdf

[39] M. Bloemendal and N. Hartog, "Thermal Energy Storage with Zeolite for Heating and Cooling Applications," in *EGU General Assembly 2017*, 2017 [Online]. Available: http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-3626.pdf

[40] A. van Wijk and L. Verhoef, *Our car as power plant*. Delft: IOS Press/Delft University Press, 2014 [Online].
Available: http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2016_en.pdf

[41] KNMI, “Database - Daggegevens van het weer in Nederland,” 2017. [Online]. Available: http://projects.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/selectie.cgi. [Accessed: 04-Sep-2017]

[42] Milieucentraal, “Gemiddeld Energieverbruik,” 2017. [Online]. Available: https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/snel-besparen/grip-op-je-energierekening/gemiddeld-energieverbruik/. [Accessed: 05-Sep-2017]

[43] CBS, “Personenauto’s rijden gemiddeld 37 kilometer per dag,” 2012. [Online]. Available: https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2012/10/personenauto-s-rijden-gemiddeld-37-kilometer-per-dag. [Accessed: 06-Sep-2017]

[44] E. Helmers and P. Marx, “Electric cars: technical characteristics and environmental impacts,” *Environ. Sci. Eur*., vol. 24, no. 1, p. 14, 2012 [Online]. Available: http://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/2190-4715-24-14

[45] L. van Thiel, “Watergebruik Thuis 2013.” TNS NIPO/Vewin, 2014 [Online]. Available: http://www.kraanwater.nu/SiteCollectionDocuments/Publicaties/Watergebruik thuis 2010.pdf

[46] Energie Overheid, “Dossier: Openbare Verlichting,” 2014. [Online]. Available: http://www.energieoverheid.nl/dossiers/openbareverlichting/. [Accessed: 06-Sep-2017]

[47] CBS, “Aantal huishoudens per provincie,” 2017. [Online]. Available: http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=71486ned&D1=0-2,23-26&D2=0&D3=0,5-16&D4=(l-1)-l&HD=170906-0920&HDR=T,G3&STB=G1,G2%0A. [Accessed: 06-Sep-2017]

[48] B. L. Schepers and T. Scholten, “Ketenemissies warmtelevering,” Delft, 2016 [Online]. Available: http://www.ce.nl/publicatie/ketenemissies_warmtelevering/1776

[49] Inspectie Leefomgeving en Transport, “Prestatievergelijking drinkwaterbedrijven 2015,” 2016 [Online]. Available: http://edepot.wur.nl/414022

Over de auteurs

Ad van Wijk (1956) is hoogleraar Future Energy Systems aan de Technische Universiteit van Delft. Hij is tevens verbonden aan KWR Watercycle Research Institute op het thema Water & Energie. Daarnaast bekleedt hij diverse adviesfuncties in bedrijven en maatschappelijke organisaties.

Els van der Roest (1991) heeft zich na haar opleiding Energy Science aan de Universiteit van Utrecht als onderzoeker bij KWR Watercycle Research Institute gespecialiseerd in duurzame concepten rondom Water & Energie.

Jos Boere (1959) is plaatsvervangend directeur van KWR Watercycle Research Institute en directeur van Allied Waters, dat duurzame, innovatieve concepten helpt ontwikkelen en vermarkten. 'Driving the circular economy' is het centrale motto van Allied Waters.