



Ad van Wijk, Els van der Roest, Jos Boere

GROENE ENERGIE VOOR IEDEREEN

Hoe waterstof en elektriciteit onze toekomst dragen

GROENE ENERGIE VOOR IEDEREEN

Hoe waterstof en elektriciteit onze toekomst dragen

GROENE ENERGIE VOOR IEDEREEN

Hoe waterstof en elektriciteit onze toekomst dragen

Ad van Wijk, Els van der Roest, Jos Boere



Voorwoord

Omdat het klimaat verandert, willen we overschakelen van fossiele naar duurzame energie. Dit heeft grote gevolgen. Niet alleen gebruiken we straks andere bronnen van energie – zon en wind in plaats van olie, kolen en gas – ook transport en opslag van energie moeten op de schop. Bovendien moeten we op zoek naar andere bronnen van koolstof als grondstof voor de (chemische) industrie. Dit boek laat zien wat er nodig is voor een nieuw, duurzaam energiesysteem en waarin dat verschilt van het huidige fossiele systeem.

In de zomer is er meer zon dan in de winter, en boven zee waait het harder dan boven land. De hoeveelheid duurzame energie is dus niet altijd en overal gelijk. Bovendien nemen zonnepanelen en windturbines veel ruimte in beslag. Duurzame energie kun je dan ook het best opwekken op plekken met veel zon of wind én met veel ruimte, zoals woestijnen en oceanen. Deze energie breng je vervolgens in de vorm van waterstof naar de plekken waar we wonen en werken. Dit gasvormige molecuul ontstaat door de elektrolyse van water en heeft een groot voordeel: je kunt het goedkoop transporteren en opslaan.

Woestijnen en oceanen zijn niet alleen bronnen van schone energie, maar ook van materialen, water en voedsel. Zo kun je uit brine, de reststroom die overblijft na ontzilting van zeewater, onder meer lithium en kalium winnen. Maak je de zeewaterpijpleiding iets groter, dan kun je in de woestijn zelfs irrigatiewater maken en voedsel produceren. Ook in de oceanen zijn verrassende oplossingen mogelijk, bijvoorbeeld voor de sargassumplaag. Dit zeewier spoelt in grote

hoeveelheden aan en vervuult kusten en stranden. Vang je het in de oceaan al op, dan los je een afvalprobleem op én boor je tegelijkertijd een bron van schone energie, koolstof en waterstof aan.

Voor de omschakeling naar duurzame energie is meer nodig dan het vervangen van fossiele energie. Het hele energiesysteem moet anders worden ingericht. In energie-scenario's moet je daarom ook kijken naar variaties in ruimte en tijd en naar de kosten voor transport en opslag. Ook moet je rekening houden met de schaarste aan ruimte in dichtbevolkte en agrarische gebieden, want die drijft de kosten van duurzame energie flink op. Daarnaast moet je letten op het gebruik van materialen, want in de toekomst bepaalt dat de kosten van het energiesysteem.

Dit boek kun je dan ook lezen als een pleidooi om breder te kijken naar energiesystemen, namelijk als onderdeel van een geïntegreerd systeem voor de levering van duurzame energie, materialen, water en voedsel. En voor een evenwichtige beoordeling van zo'n systeem introduceren we een set duurzame doelen: schoon, betaalbaar, betrouwbaar, circulair, verzekerd van energie- en materiaalaanbod, veilig en rechtvaardig.

We sluiten af met een hoopvolle boodschap: groene energie voor iedereen is haalbaar en betaalbaar, dankzij de schone energiedragers waterstof en elektriciteit.

Ad van Wijk

INHOUD



WAT IS EEN DUURZAAM ENERGIESYSTEEM? 8

- Onderdelen van een energiesysteem 10
- Conversie naar energiedragers 16
- Duurzame-energiesysteemdelen 26



SCHONE ENERGIE, MATERIALEN EN VOEDSEL UIT DE OCEANEN 82

- Groot potentieel duurzame energie 84
- Offshore windenergie 87
- Offshore zonne-energie 95
- Energie uit temperatuurverschillen 98
- Energie uit getijden, golven en osmose 100
- Kansen voor eilanden en kustgebieden 102



WELKE ROL SPELEN RUIMTE EN TIJD? 38

- Huidig energiesysteem 40
- Variaties in ruimte en tijd 45
- Overschotten en tekorten duurzame energie 50
- Hoe vervoeren we energie? 54
- Hoe slaan we energie op? 58
- Hoeveel kost 1 kWh zonne-energie uit Marokko in Duitsland? 64



SCHONE ENERGIE, MATERIALEN EN VOEDSEL UIT DE WOESTIJNEN 66

- Zonne- en windenergie uit de woestijnen 68
- Water in de woestijnen 74
- Chemische producten en materialen uit zeewater 76
- Landbouw in de woestijnen 78



SCHONE ENERGIE EN MATERIALEN UIT BIOMASSARESTSTROMEN 104

- Indirecte bron van zonne-energie 106
- Bron van waterstof en koolstofdioxide 108
- Geïntegreerde rioolwaterzuivering 111
- Sargassum: van plaag naar nuttige grondstof 118



NAAR EEN DUURZAAM ENERGIESYSTEEM IN 2100 124

- Van fossiel naar duurzaam 126
- Groene energie voor iedereen 136

A nighttime photograph of a city skyline, featuring the Burj Khalifa as the central focus. The city is illuminated with various lights, and the sky is a deep blue. The image is used as a background for the text overlay.

1

WAT IS EEN DUURZAAM ENERGIESYSTEEM?

Moderne samenlevingen kunnen niet zonder energie. Daarom hebben ze een goed functionerend energiesysteem nodig dat energiediensten kan leveren, zoals verwarming of koeling van je huis, transport van en naar het werk en het opladen van je telefoon. Maar wat verstaan we eigenlijk onder een duurzaam energiesysteem? Hoe maken we van duurzame energiebronnen geschikte energiedragers, zoals elektriciteit, warmte en waterstof? En welke doelen heeft zo'n energiesysteem?

Onderdelen van een energiesysteem

Als afnemer heb je er vaak geen erg in, maar voor veel energiediensten (zoals het verwarmen of koelen van je huis of het opladen van je telefoon) is een energiesysteem nodig. Zo'n systeem kan energie opslaan en vervoeren, omzetten en afleveren, zodat iedereen altijd en overal kan beschikken over energie. Uit welke onderdelen bestaat zo'n systeem en hoe werkt het?

Waaruit bestaat een energiesysteem?

Het doel van een energiesysteem is het leveren van energiediensten, bijvoorbeeld een behaaglijke temperatuur in huis, de bereiding van een maaltijd of de productie van papier of kunstmest. Afhankelijk van de te leveren dienst, gebruik je hiervoor een energiedrager, zoals bijvoorbeeld hout, gas, olie, elektriciteit of waterstof, en een apparaat of systeem dat de energiedienst levert. Als je bijvoorbeeld de energiedrager hout in een kachel in huis verbrandt, levert dat een warm huis (de energiedienst). Via een energie-infrastructuur ontvangt de afnemer van de betreffende energiedienst de gewenste energiedrager. Anders gezegd: tussen de leverancier en de afnemer van energiediensten zit een energie-infrastructuur om ervoor te zorgen dat de gewenste energie met de juiste kwaliteit, in de gevraagde hoeveelheid en op het juiste moment de eindgebruiker bereikt. Om dit voor elkaar te krijgen, is het nodig dat je energie tijdelijk in het energiesysteem kunt opslaan, op verschillende tijdschalen: van seconden, minuten, uren en dagen tot en met seizoenen. En daarvoor zul je de energie eerst moeten winnen uit een energiebron en omzetten in een energiedrager.

We staan hier wat langer stil bij enkele belangrijke begrippen en onderdelen: energiediensten, energie-infrastructuur, energiebronnen en energiedragers.

Energiediensten

Er zijn vijf categorieën energiediensten:

- 1 verwarming en/of koeling van gebouwen
- 2 mobiliteit (rijden, varen, vliegen)
- 3 levering van kracht en licht
- 4 levering van hogetemperatuurwarmte voor industriële processen
- 5 levering van energie als grondstof voor vooral chemische producten (de moleculen waarmee je producten maakt, zoals plastics)

Voor al deze energiediensten is energie nodig, in verschillende hoeveelheden, afhankelijk van omgevingsfactoren, gedragsfactoren, specifieke kenmerken en de efficiëntie van apparaten en installaties.

Met uitzondering van de omgevingsfactoren zijn al deze factoren en kenmerken te beïnvloeden door degene die de energiedienst afneemt. De benodigde energie wordt uiteindelijk geleverd door energiedragers, elk met eigen conversietechnologieën en kenmerken.

Door het specifieke energiegebruik kun je de energie-efficiëntie van twee energiediensten gemakkelijk met elkaar vergelijken

Twee voorbeelden van energiediensten, de factoren die van invloed zijn op het energiegebruik en mogelijke energiedragers

| | | Energiedienst | |
|---|---|--|---|
| | | Temperatuur in huis | Autorit van A naar B |
| Factoren die van invloed zijn op het energiegebruik | Omgevingsfactoren | <ul style="list-style-type: none"> Buitemtemperatuur Windsnelheid Instraling | <ul style="list-style-type: none"> Windsnelheid en richting Buitemtemperatuur Wegkenmerken (o.a. weerstand) |
| | Gedragsfactoren | <ul style="list-style-type: none"> Binnentemperatuur Thermostaatinstellingen | <ul style="list-style-type: none"> Rijstijl en -snelheid Binnentemperatuur |
| | Specifieke kenmerken | <ul style="list-style-type: none"> Grootte van de woning (inhoud in m³) Type woning (appartement, vrijstaand, ...) Isolatiegraad van vloeren, muren, dak, glas | <ul style="list-style-type: none"> Gewicht van de auto Aerodynamica Installaties in auto (verwarming/koeling, geluid, communicatie, beveiliging) |
| | Efficiëntie van apparaten en installaties | <ul style="list-style-type: none"> Warmteafgiftesysteem Leidingen Conversie energiedrager naar warmte | <ul style="list-style-type: none"> Transmissie naar wielen Terugwinning remenergie Conversie energiedrager naar beweging en elektriciteit |
| Mogelijke energiedragers | | <ul style="list-style-type: none"> Hout, kolen, olie, aardgas, warm water, elektriciteit, waterstof | <ul style="list-style-type: none"> Benzine, diesel, ethanol, aardgas, elektriciteit, waterstof |

Naast het totale energiegebruik voor een energiedienst is ook het specifieke energiegebruik een interessante factor. Bij het verwarmen van huizen heb je het dan over het energiegebruik per m² en bij autorijden over het energiegebruik per km. Heel precies geformuleerd is het specifieke energiegebruik 'het energiegebruik per fysieke eenheid van de geleverde energiedienst, bij gestandaardiseerde omgevings- en gedragsfactoren'. Door dit specifieke energiegebruik kun je de energie-efficiëntie van twee energiediensten gemakkelijk met elkaar vergelijken: 'Hoeveel elektriciteit gebruikt jouw auto? Die van mij rijdt 5 (kilometer) op 1 (kWh).'

Energie-infrastructuur, -transport en -opslag
Levering van energie gebeurt via een energie-infrastructuur. Elke energiedrager heeft een eigen infrastructuur, met eigen opslagkarakteristieken. Toch kun je ook in algemene termen wel iets zeggen over hoe een energie-infrastructuur met opslagfaciliteiten eruit ziet. Een grootschalig transportnetwerk wordt gevoed vanuit grote energiebronnen met conversie naar de betreffende energiedrager en levert rechtstreeks aan grootverbruikers, zoals de industrie en aan het middelgrote netwerk. Dit middelgrote transportnetwerk wordt daarnaast gevoed vanuit middelgrote energiebronnen met conversie naar de energiedrager,

levert aan middelgrote bedrijven en grote gebouwen, en aan het distributienetwerk. Dit distributienetwerk wordt daarnaast dan weer gevoed door kleine energiebronnen met conversie en levert op zijn beurt dan aan kleine energiegebruikers, zoals woningen. Deze gehele keten van leveringen werkt ook andersom: het distributienet kan terugleveren aan het middelgrote netwerk, dat weer kan terugleveren aan het grootschalige transportnetwerk.

Elektriciteit bestaat niet uit moleculen, maar uit elektronen. Die kun je niet opslaan in een tank en langdurig bewaren

Is een energiedrager opgebouwd uit moleculen (zoals het geval is bij hout, benzine, gas, waterstof en warm/koud water), dan is het mogelijk om (kleine, middelgrote of grote) opslagfaciliteiten te integreren in de energie-infrastructuur. Kortetermijnopslag gebeurt vooral in opslagtanks, langdurige opslag in ondergrondse reservoirs zoals zoutkoepels, lege gasvelden of aquifers, van waaruit je op elk gewenst moment de gevraagde volumes van een energiedrager kunt leveren.

Voor elektriciteit ligt dat iets anders. Die bestaat niet uit moleculen, maar uit elektronen. Elektronen kun je niet opslaan in een tank en bewaren voor later. Kleinschalige, kortdurende opslag van elektriciteit is wel mogelijk met batterijen. En door water naar een hoger gelegen bekken te pompen (zodat je er later een waterkrachtcentrale mee kunt voeden), kun je ook een wat grotere hoeveelheid elektriciteit gedurende een iets langere periode op een indirecte manier opslaan. Maar een wezenlijk kenmerk van een elektriciteitssysteem is en blijft dat vraag en aanbod op elk moment in balans moeten zijn. Grootschalige opslag van energie voor langere duur gebeurt daarom altijd in de vorm van moleculen, die je op het gewenste moment kunt converteren naar elektriciteit. Nu bedoelen we met moleculen nog kolen, hout, aardgas en aardolie, in de toekomst ook waterstof.

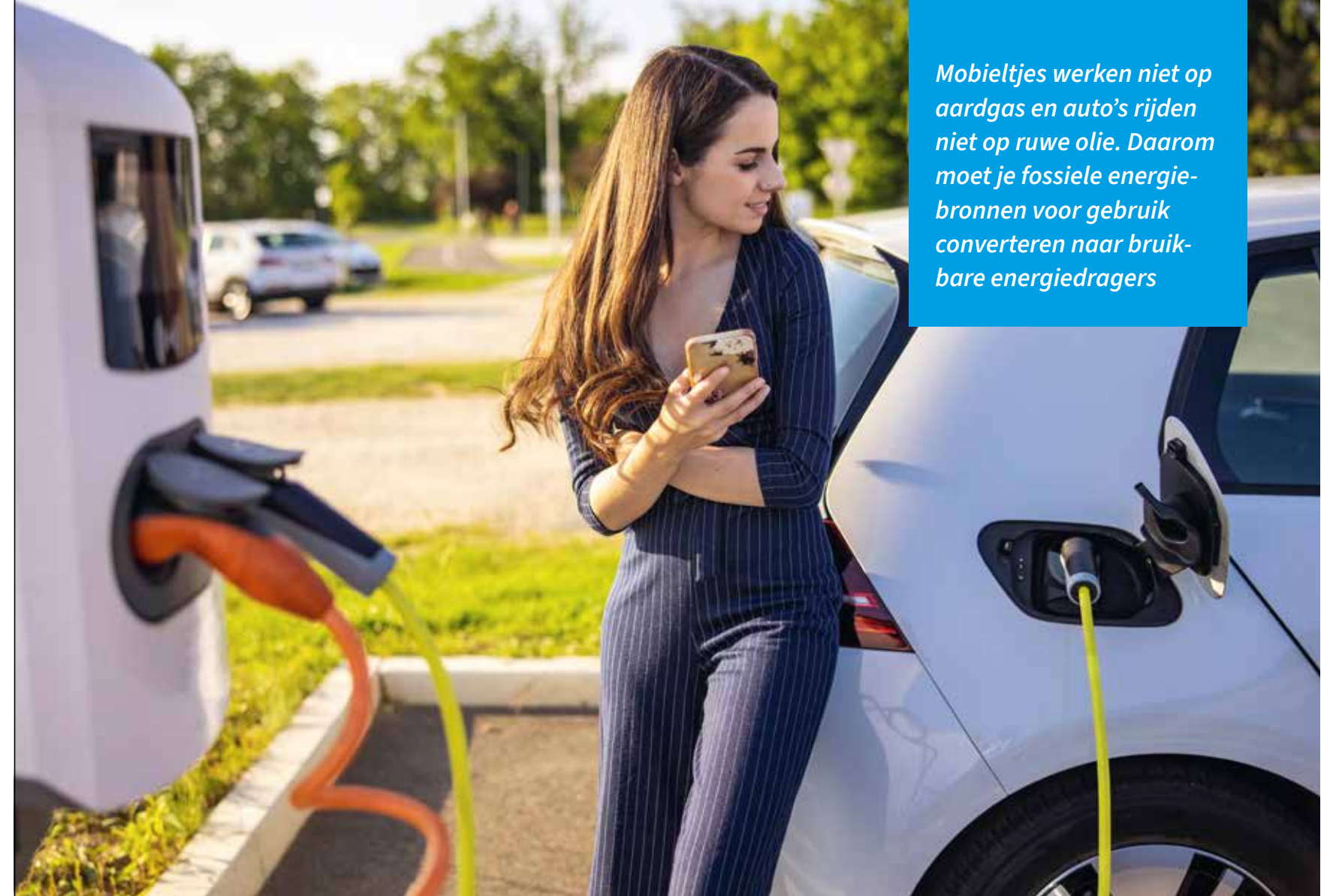
Conversie van energiebronnen naar energiedragers

Energiebronnen kun je onderverdelen in fossiele bronnen (kolen, aardolie en aardgas), uranium en duurzame bronnen (zon, wind, waterkracht, biomassa, golfenergie, geothermie, getijdenenergie, ...). Omdat uranium en de duurzame energiebronnen zelf geen energiedrager zijn, is het nodig deze energiebronnen voor gebruik eerst te converteren^[1]. Zo kun je zonne-energie met behulp van fotovoltaïsche cellen omzetten in elektriciteit, met fotolyse-cellen in waterstof, en met zonnecollectoren in warm water; biomassa kun je converteren naar warmte, biogas, elektriciteit of waterstof; geothermie of aardwarmte kun je omzetten in warm water of, in het geval van diepe geothermie bij een hoge temperatuur, in elektriciteit. Via een transportnetwerk kun je deze bruikbare energie vervolgens afleveren op de plek van bestemming.

Mobieltjes werken niet op aardgas en auto's rijden niet op ruwe olie. Daarom moet je ook fossiele energiebronnen voor gebruik converteren. Daarnaast kent uit de grond opgepompte aardolie grote verschillen in samenstelling (van koolwaterstofmoleculen) en verontreiniging (onder andere zwavel). In raffinaderijen wordt ruwe olie daarom verwerkt tot gangbare olieproducten, zoals benzine, diesel en kerosine. Omdat deze energiedragers voldoen aan geüniformeerde specificaties, kunnen ze via een energie-infrastructuur worden getransporteerd en gedistribueerd. Ook aardgas wordt, nadat het uit de grond is gewonnen, ontdaan van verontreinigingen en opgewerkt tot een uniforme kwaliteit. Dit resulteert in verschillende energiedragers: hoogcalorisch gas (met weinig stikstof) en laagcalorisch gas (met een hoger percentage stikstof), elk met een eigen transportsysteem. Een met hoogcalorisch gas gestookte boiler werkt niet op laagcalorisch gas, net zomin als andersom.

Net als aardgas, is er ook elektriciteit in verschillende kwaliteiten. Met zonnecellen maak je gelijkstroom, maar in het distributienet zit wisselstroom met een frequentie van 50 of 60 Hz en een voltage van 110 of 230 volt^[2]. Om gelijkstroom het elektriciteitsnet in te krijgen, dien je deze

Mobieltjes werken niet op aardgas en auto's rijden niet op ruwe olie. Daarom moet je fossiele energiebronnen voor gebruik converteren naar bruikbare energiedragers



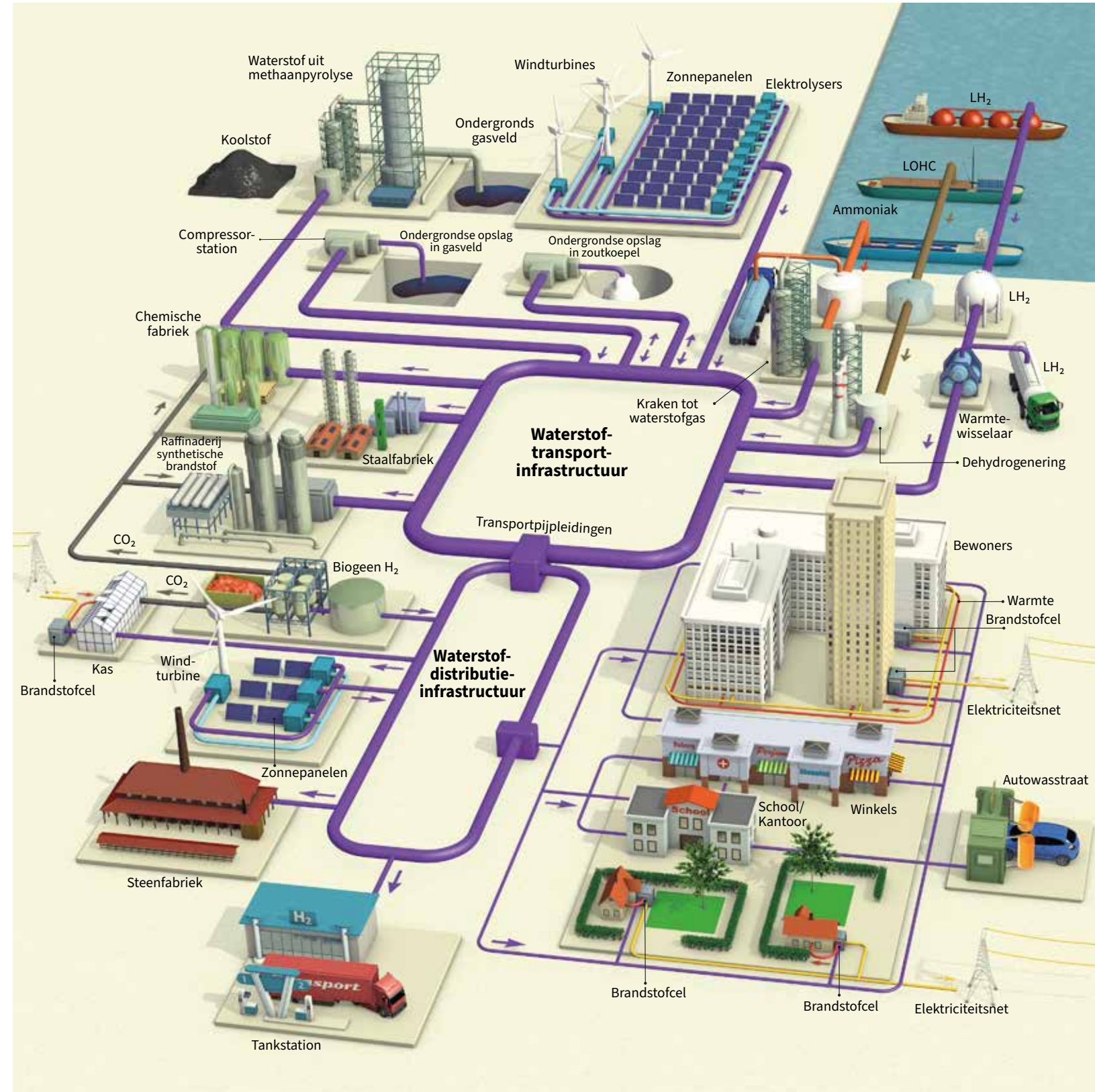
Opladen van een batterij van een elektrische auto

dan ook eerst om te vormen naar de juiste wisselstroom. Maar tegenwoordig werken bijna al onze apparaten op gelijkstroom. Bijvoorbeeld alle elektronica, waarvoor nu een gestandaardiseerde USB-stekker in Europa verplicht wordt gesteld. Als je je mobiele telefoon oplaadt, zorgt de oplaadstekker er daarom voor dat de door het elektriciteitsnet geleverde wisselstroom (met een hoog voltage) wordt omgevormd naar gelijkstroom (met een laag voltage). Omdat batterijen ook op gelijkstroom werken, moet de wisselstroom uit het net worden omgezet naar gelijkstroom, voordat je je elektrische auto kunt opladen.

Hoe ziet een duurzaam waterstofsysteem eruit?

Eerder hebben we in algemene termen geschetst hoe een energiesysteem eruitziet. Hier gaan we dieper in op een duurzaam waterstofsysteem – een van de belangrijke duurzame energiesystemen voor de toekomst.

De energiediensten die waterstof kan leveren, zijn: verwarming en koeling van gebouwen, mobiliteit (rijden, varen en vliegen), hogetemperatuurwarmte voor industriële processen en elektriciteit. Daarnaast kun je waterstof gebruiken als reduceermiddel bij de productie van ijzer en



Schakelstation hoogspanningsnet

als grondstof voor chemische producten en synthetische brandstoffen. De waterstofinfrastructuur is vergelijkbaar met die voor aardgas. Transport en distributie van waterstofgas vinden plaats via pijpleidingen. Waterstof kan ook getransporteerd worden per schip, maar dan moet er eerst een vloeistof van worden gemaakt. Dat kan door waterstof vloeibaar te maken, het te binden aan stikstof en zo ammoniak te maken, of door het te binden aan een vloeibare organische waterstofdrager (LOHC, liquid organic hydrogen carrier). Waterstof kun je opslaan in de ondergrond, net als aardgas in lege gasvelden, zoutkoepels of rotskoepels. Bovengronds kun je waterstof opslaan in tanks (waterstof onder druk, vloeibaar, gebonden aan een drager zoals een LOHC, ingevangen in een molecuulstructuur, enz.). Grootchalige, langdurige opslag van

waterstof speelt dan ook een belangrijke rol bij het balanceren van een duurzaam waterstof- en elektriciteitsstelsel. Onderdelen van een duurzaam waterstofsysteem zijn de productie van waterstof via de omzetting van een energiebron naar waterstof, en (mogelijk) de winning van waterstof. Grootchalige omzetting naar waterstof zonder fossiele CO₂-emissies kan op drie manieren: (1) met duurzame en nucleaire elektriciteit via elektrolyse van water (2) uit aardgas via methanapyrolyse en (3) uit biomassa via diverse conversietechnieken. Grootchalige productie zal vooral plaatsvinden bij de bron, op locaties waar dat goedkoop kan. Kleinschalige waterstofproductie is mogelijk met zon, wind of uit biomassa-reststromen en zal vooral lokaal plaatsvinden.

Conversie naar energiedragers

Om energie uit duurzame bronnen te kunnen gebruiken, moeten we die eerst omzetten in een hanteerbare vorm: een energiedrager. Welke conversietechnologieën hebben we daarvoor tot onze beschikking en waar vindt die conversie dan plaats?

We willen toe naar een energiesysteem dat gebruikmaakt van duurzame energiebronnen. Vrijwel al die bronnen zijn terug te voeren naar de zon. De zonne-energie die de aarde bereikt, is gemiddeld zo'n 340 Watt per vierkante meter^[3]. Daarmee zorgt de zon ook voor wind (door luchtdrukverschillen), voor de verdamping van water en voor de groei van planten. De zon is daarom de bron van wind- en golfenergie, energie uit waterkracht en biomassa, energie uit temperatuurverschillen in de oceaan en energie uit zoutconcentratieverschillen tussen zoet en zout water. Slechts twee duurzame energiebronnen zijn niet toe te schrijven aan zonne-energie: getijdenenergie (opgewekt door de aantrekkingskracht van de maan en de zon) en geothermische energie (opgewekt door radioactief verval in het binnenste van de aarde). Vergeleken met dat van de zon is het potentieel van deze twee energiebronnen uitermate klein.

De zon is de bron van vrijwel alle duurzame energie, zoals zon, wind, golven, waterkracht en biomassa

Van duurzame bron naar bruikbare energie

Zon, wind, waterkracht en biomassa zijn bronnen van duurzame energie. Om duurzame energie te kunnen gebruiken, is het nodig de bronnen eerst om te zetten in energiedragers (zoals elektriciteit), gas (zoals waterstof en methaan), warmte of in grondstoffen zoals waterstof (H₂) koolstof (C), koolstofdioxide (CO₂) en zuurstof (O₂). Met energiedragers kunnen we energiediensten leveren, bijvoorbeeld verwarming, koeling of verlichting in huis. Met grondstoffen kunnen we materialen en producten maken, bijvoorbeeld plastics of kunstmest. Er zijn al veel conversietechnologieën ontwikkeld om duurzame energie om te zetten in nuttige energiedragers en grondstoffen. Sommige zijn al helemaal uitontwikkeld ('commercieel'), andere verkeren nog in een onderzoeksstadium (O&O).

Deze tabel laat zien dat je uit duurzame energiebronnen verschillende energiedragers kunt produceren: elektriciteit, waterstof, warmte en koude. En dat je reststromen van biomassa niet alleen kunt omzetten in energiedragers, maar ook in grondstoffen (koolstof, in verschillende vormen). Bij de elektrolyse van water ontstaat naast waterstof – energiedrager én grondstof – ook een tweede grondstof: zuurstof, waarvan het grootste deel overigens naar de lucht zal worden geventileerd.

Duurzame energiebronnen en conversietechnologieën

| Bron | Conversieproces/-technologie | Stand van de techniek* | Output |
|---|---|--|--|
| Zonlicht | Zonnecollector | Commercieel | Warmte |
| Zonlicht | Zonnecel (PV) Concentrating Solar Power (CSP) | Commercieel Commercieel | e ⁻ (Elektriciteit) e ⁻ + Warmte |
| Zonlicht | Zonnecel (PV) op oppervlaktewater Zonnecel (PV) op oceanen | Commercieel Eerste installaties | e ⁻ e ⁻ |
| Zonlicht + water | Zonnecel met geïntegreerde elektrolyser CSP met geïntegreerde elektrolyser Zonnecel geïntegreerde elektrolyser op oceanen | Technisch ontwerp O&O O&O | H ₂ + O ₂ H ₂ + O ₂ H ₂ + O ₂ |
| Zonlicht + water | Foto-elektrochemische cel | Prototype | H ₂ + O ₂ |
| Wind | Windturbine op land Windturbine op zee Drijvende windturbine Stationaire vlieger (kite) | Commercieel Commercieel Bijna commercieel Pilot | e ⁻ e ⁻ e ⁻ e ⁻ |
| Wind + water | Windturbine met geïntegreerde elektrolyser op land Windturbine met geïntegreerde elektrolyser op zee Drijvende windturbine met geïntegreerde elektrolyser Vlieger (kite)-schepen | Bijna commercieel Technisch ontwerp Technisch ontwerp Prototype | H ₂ + O ₂ H ₂ + O ₂ H ₂ + O ₂ H ₂ + O ₂ |
| Waterkracht | Turbine | Commercieel | e ⁻ |
| Waterkracht + water | Turbine met geïntegreerde elektrolyser | Commercieel | H ₂ + O ₂ |
| Omgevingswarmte + duurzame e ⁻ | Warmtepomp | Commercieel | Warmte |
| Geothermie | Warmtewisselaar | Commercieel | Warmte |
| Geothermie | Stoomturbine | Commercieel | e ⁻ + Warmte |
| Getijdenenergie | Turbine | Commercieel | e ⁻ |
| Zeewater-airconditioning | Koud zeewater voor directe koeling | Commercieel | Koude |
| Blauwe energie (osmose) | Energie uit zoutgradiënten met behulp van membranen | Pilot | e ⁻ |
| Golven | Golfenergieconvertor | Pilot | e ⁻ |
| Oceaanstromen | Stromingsturbine | Pilot | e ⁻ |

| Bron | Conversieproces/-technologie | Stand van de techniek* | Output |
|---|--|--|--|
| Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) | Elektriciteit uit thermische gradiënt met behulp van lagetemperatuurcyclus (Rankine-cyclus) | Pilot | e ⁻ |
| Vaste biomassa, biogeen afval | Ketel, oven, kachel/fornuis | Commercieel | Warmte |
| Vaste biomassa, biogeen afval | Stoomturbine | Commercieel | e ⁻ + Warmte |
| Vaste biomassa, biogeen afval | Vergassing Plasmavergassing | Bijna commercieel Eerste installaties | H ₂ + CO ₂ + C H ₂ + CO ₂ |
| Natte biomassa, biogeen afval | Vergisting + ketel | Commercieel | Warmte + CO ₂ |
| Natte biomassa, biogeen afval | Vergisting + gasmotor/gasturbine | Commercieel | e ⁻ + Warmte + CO ₂ |
| Natte biomassa, biogeen afval | Vergisting + stoom-methaanomvorming Superkritische watervergassing Vergisting + methaanpyrolyse Microbiële elektrolysecel | Technisch ontwerp Eerste installaties O&O O&O | H ₂ + CO ₂ H ₂ + CH ₄ + CO ₂ H ₂ + C H ₂ + CH ₄ |

* Ontwikkelingsfasen: onderzoek & ontwikkeling (O&O) → prototype → technisch ontwerp → pilot → eerste installaties → bijna commercieel → commercieel

Dat deze conversietechnologieën naast energiedragers ook grondstoffen produceren, schept mogelijkheden voor chemische productieprocessen. De belangrijkste bouwstenen voor de chemische industrie zijn namelijk waterstof, koolstof, zuurstof en stikstof. Van deze vier grondstoffen kan alleen stikstof niet via een energieconversie worden gewonnen. Maar stikstof en ook zuurstof kun je gemakkelijk uit de lucht halen met een elektrische luchtscheidingsinstallatie, en elektriciteit is wél een product van de omzetting van duurzame energie.

Fossiele versus duurzame energiebronnen

Er zijn belangrijke verschillen tussen fossiele en duurzame energiebronnen, bijvoorbeeld wat betreft herkomst, beschikbare hoeveelheid en vindplaats.

Fossiele energie winnen we uit de ondergrond, olie- en gasvelden en kolenmijnen; vrijwel alle duurzame energie is afkomstig van de zon. We winnen deze energie rechtstreeks (zonne-energie), uit de atmosfeer (windenergie), uit de hydrosfeer (getijdenenergie uit de oceanen, waterkracht uit stuwmeren) en uit de biosfeer (bijvoorbeeld zeewier of houtafval). Fossiele energie winnen we op specifieke locaties, zoals de olievelden in Saudi-Arabië, waar deze in grote concentraties in de grond voorkomt. Zonne- en windenergie kun je overal op aarde winnen, van dichtbij tot ver weg van de eindgebruiker, maar de energiedichtheid kent grote ruimtelijke verschillen: in de Sahara is er meer zonne-energie dan op de Noordpool.

Dat omzetting van duurzame energie ook grondstoffen oplevert, schept mogelijkheden voor het maken van chemische producten en synthetische brandstoffen

De energiedichtheid van zon en wind kent grote ruimtelijke verschillen: in de Sahara is er meer zonne-energie dan op de Noordpool



De zon op de Noordpool staat nooit hoog aan de hemel

Vergelijking van enkele kenmerken van fossiele en duurzame energiebronnen

| Kenmerk | Fossiele energiebronnen | Duurzame energiebronnen |
|------------------------|--|--|
| Herkomst | Geosfeer | Zon, atmosfeer, hydrosfeer, biosfeer, geosfeer |
| Hoeveelheid | Eindige voorraad | Onuitputtelijke bron |
| Vindplaatsen | Geconcentreerd op beperkt aantal locaties | Ongelijkmatig verspreid over de hele wereld |
| Benodigd landoppervlak | Beperkt, voor winning aardolie en aardgas Groot, voor winning kolen | Groot, voor conversie |
| Tijdsverloop | Continue opbrengst | Fluctuerende opbrengst |

De efficiëntie van elektrolyzers bereken je op basis van de HHV (Higher Heating Value) en niet de LHV (Lower Heating Value) van een brandstof

Hoe efficiënt is een elektrolyser?

Om deze vraag te beantwoorden maken we eerst een uitstapje naar verwarmingsketels. Je zou zeggen dat je het rendement daarvan uitdrukt als de hoeveelheid warmte die een ketel produceert, gedeeld door de energie-inhoud van de gebruikte brandstof. Maar omdat in ouderwetse ketels een deel van de warmte via de schoorsteen verloren ging, werd in deze som niet de totale chemische energie-inhoud (Higher Heating Value, kortweg HHV) van een brandstof gebruikt, maar het totaal minus de condensatiewarmte van de in de rookgassen aanwezige waterdamp. Deze gecorrigeerde chemische energie-inhoud staat bekend als de Lower Heating Value (kortweg LHV). Omdat moderne verwarmingsketels de warmte uit de rookgassen terugwinnen, is nu het rendement van verwarmingsketels bóven de 100% als je het berekent op basis van de LHV. Dat klopt natuurlijk niet. In werkelijkheid ligt het rendement van deze ketels, als je het berekent met de HHV, zowel voor aardgas- als waterstofgestookte ketels rond de 97%. Naarmate het verschil tussen de HHV en de LHV groter is en de verhouding HHV/LHV dus een grotere waarde heeft, is ook de fout in het met de LHV berekende rendement groter. Zo is de werkelijke energie-inhoud van 1 kg waterstof, de HHV van waterstof, 39,4 kWh. Maar de energie-inhoud van 1 kg waterstof uitgedrukt

Verhouding tussen Higher Heating Value (HHV) en Lower Heating Value (LHV) voor een aantal brandstoffen ^[1]

| Brandstof | HHV/LHV |
|-----------|---------|
| Kolen | 1,03 |
| Olie | 1,06 |
| Aardgas | 1,10 |
| Waterstof | 1,18 |

in LHV, is slechts 33,3 kWh. En omdat waterstof de hoogste HHV/LHV heeft, is deze vertekening voor waterstof het grootst. Maar nu wordt ook de efficiëntie van elektrolyzers vaak uitgedrukt op basis van de LHV van waterstof. Daarmee wordt de werkelijke efficiëntie flink onderschat, omdat je een deel van de energie die in waterstof zit, niet meerekent. Een voorbeeld: bedraagt de LHV-efficiëntie van een elektrolyser 70%, dan is de (werkelijke) HHV-efficiëntie maar liefst 82,8%.

Het vermogen van een apparaat of installatie drukken we uit in watt (W), oftewel de energie (in joule) die per seconde kan worden geleverd. Stel je het vermogen van een magnetron in op 1.000 W, dan gebruikt hij elke seconde 1.000 joule. Hoe meer vermogen, hoe sneller je gerecht opwarmt.

De hoeveelheid geleverde of gebruikte energie drukken we uit in kilowattuur (kWh). Staat een wasmachine met een vermogen van 1 kW (1.000 watt) één uur aan, dan is zijn energiegebruik 1 kWh, wat gelijk is aan 3.600.000 joule.

Voor het omzetten van zonne- en windenergie in elektriciteit of waterstof is meer ruimte nodig dan voor het winnen van olie of gas en de conversie daarvan naar elektriciteit of waterstof. Zo is er een oppervlakte van 80 km² nodig voor de productie van 10 TWh elektriciteit met een zonnepark dat is geplaatst in de woestijn en een bedrijfstijd heeft van 2.100 uur ^[4]. Maar er is slechts 1 km² nodig voor dezelfde elektriciteitsproductie met een gasgestookte centrale met een rendement van 60%, ook als je alle ruimtebeslag voor winning, transport en elektriciteitscentrales meerekent ^[5]. Voor kolenwinning en conversie naar elektriciteit is echter wel veel ruimte nodig, meer nog dan voor zonne- en windenergie. Voor de productie van 10 TWh elektriciteit met een kolencentrale is ongeveer 200 km² nodig ^[6]. Een laatste verschil tussen fossiele en duurzame energie gaat over de beschikbaarheid in de tijd. Omdat fossiele energiebronnen worden gewonnen uit statische (en

eindige) voorraden, varieert de beschikbaarheid vrijwel niet met de tijd. Bij de winning van energie uit zon en wind is dat wel het geval: beide (onuitputtelijke) bronnen kennen sterke fluctuaties in de tijd, van seconden- tot en met seizoensfluctuaties.

Waterstofproductie met duurzame energie

Nu omzetting van zon en wind naar elektriciteit echt goedkoop is geworden, wordt ook de omzetting naar de energiedrager waterstof interessant. Alhoewel de kosten van waterstofproductie via elektrolyse hoger zullen liggen dan de kosten van elektriciteitsproductie uit zon, wind en waterkracht, zijn de kosten van transport en opslag van waterstof veel lager dan die voor dezelfde hoeveelheid energie in de vorm van elektriciteit. Dat betekent dat je ver weg van de vraag opgewekte, goedkope zonne- en windenergie in de vorm van waterstof goedkoper op het

Vermogen en gebruik

| | | | |
|-----|-------------|--------------------------------|---------------------|
| W | watt | 1 watt (= 1 joule per seconde) | = 0,001 kW |
| kW | kilowatt | 1.000 watt | = 1 kW |
| MW | megawatt | 1.000.000 watt | = 1.000 kW |
| GW | gigawatt | 1.000.000.000 watt | = 1.000.000 kW |
| TW | terawatt | 1.000.000.000.000 watt | = 1.000.000.000 kW |
| Wh | wattuur | 1 wattuur (= 3.600 joule) | = 0,001 kWh |
| kWh | kilowattuur | 1.000 wattuur | = 1 kWh |
| MWh | megawattuur | 1.000.000 wattuur | = 1.000 kWh |
| GWh | gigawattuur | 1.000.000.000 wattuur | = 1.000.000 kWh |
| TWh | terawattuur | 1.000.000.000.000 wattuur | = 1.000.000.000 kWh |

TECHNOLOGIE VOOR DE TOEKOMST

Omkeerbare brandstofcel

Eén apparaat met twee functies: elektrolyser én brandstofcel

Waterstof maak je door in een elektrolyser water te splitsen in waterstof en zuurstof. De benodigde elektriciteit is afkomstig van een duurzame bron, bijvoorbeeld zon of wind. Uit 9 kg water maak je zo 1 kg waterstof en 8 kg zuurstof. In een brandstofcel gebeurt het omgekeerde: 1 kg waterstof reageert met 8 kg zuurstof uit de lucht en produceert daarbij elektriciteit en 9 kg water. De techniek van een elektrolyser is hetzelfde als die van een brandstofcel, met als enige verschil dat het elektrochemische proces is omgekeerd. Je zou dus ook één apparaat kunnen gebruiken, waarvan je de werkingsrichting kunt omkeren. Zo'n apparaat noemen we een omkeerbare brandstofcel en die kun je bijvoorbeeld gebruiken om vraag en aanbod van elektriciteit met elkaar in balans te brengen^[8]. Maar met deze technologie kun je ook woningen en gebouwen te allen tijde voorzien van elektriciteit en warmte, ook al varieert het aanbod zonne-energie sterk. Is er een overschot aan zonne-energie, dan werkt dit apparaat als elektrolyser en produceert het waterstof. Is er een tekort aan zonne-energie, 's nachts en in de winter, dan werkt het apparaat als brandstofcel en produceert het elektriciteit. In beide situaties wordt ook warmte geproduceerd van zo'n 60-80°C, die je prima kunt gebruiken voor verwarming of voor de productie van warm tapwater^[9]. Waar zo'n omkeerbare brandstofcel ook goed van pas komt, is in de ruimte, bijvoorbeeld als we een onderzoeksstation gaan bouwen op de maan of op Mars^[10].

Omkeerbare hogetemperatuurbrandstofcel die vraag en aanbod van elektriciteit met elkaar in balans brengt^[11]



juiste moment bij de gebruiker kunt krijgen dan in de vorm van elektriciteit. De meerkosten van waterstofproductie in vergelijking met elektriciteitsproductie wegen dan op tegen de lagere transport- en opslagkosten voor waterstof. Hierover meer in hoofdstuk 2.

Uitbreiding van de elektrolysecapaciteit

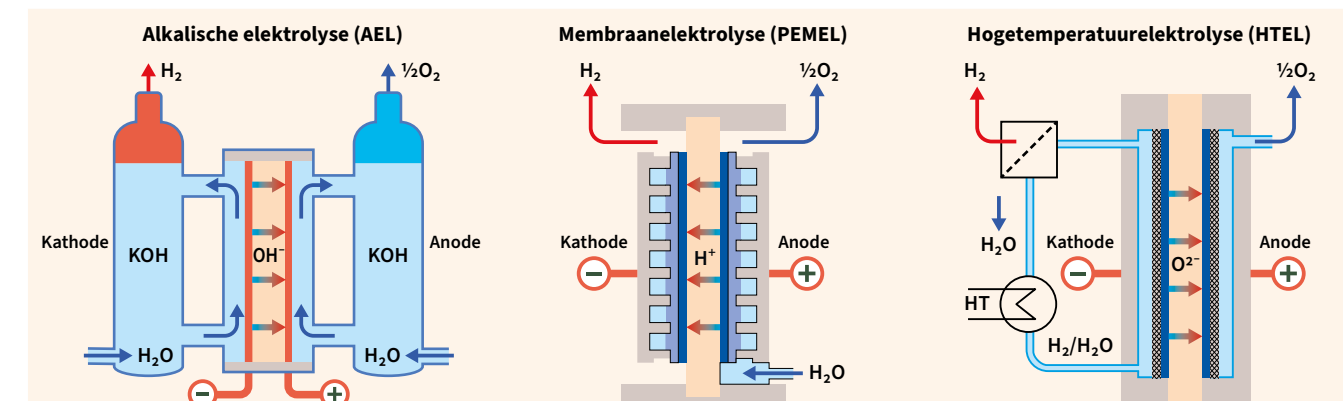
Elektrolyse is geen nieuw proces of nieuwe techniek. Elektrolyse wordt namelijk al zo'n honderd jaar gebruikt om chloor te produceren uit zout. Eerst wordt het zout opgelost in water, waarna een alkaline-elektrolyser het zout (natriumchloride) splitst en er chloor vrijkomt. Maar doordat het zout in water is opgelost, wordt door de elektrolyse ook het water gesplitst. Als 'bijproduct' van de chloorproductie wordt dus ook waterstof geproduceerd.

Elektrolyse wordt al zo'n honderd jaar gebruikt om chloor te produceren, met waterstof als bijproduct

Wereldwijd bedraagt de elektrolysecapaciteit voor chloorproductie zo'n 20 GW. Voor waterstofproductie zijn deze alkaline-elektrolyzers nu aangepast en specifiek ontworpen om waterstof en zuurstof te produceren uit heel zuiver gedemineraliseerd water.

Voor waterstofproductie wordt de productiecapaciteit van alkaline-elektrolyzers nu overal ter wereld uitgebreid. Als variant op alkaline-elektrolyzers worden ook anion-elektrolyzers ontwikkeld. Daarmee zijn enkele specifieke problemen van alkaline-elektrolyzers, onder andere rond lage belasting en het opstarten, grotendeels opgelost. Daarnaast worden er ook PEM-elektrolyzers (Proton Exchange Membrane) ontwikkeld en op steeds grotere schaal geproduceerd. Verder bestaan er hogetemperatuurelektrolyzers, zoals SOEC-elektrolyzers (Solid Oxide Electrolysis Cell), die weliswaar veel duurder zijn, maar geschikt voor specifieke toepassingen.

Werkingsprincipe van verschillende typen elektrolyzers^[7]



| Technologie | Alkalische elektrolyse (AEL) | Membraanelektrolyse (PEMEL) | Hogetemperatuurelektrolyse (HTEL) |
|--|--|-------------------------------|--|
| Temperatuurrange | 40 - 90 °C | 20 - 100 °C | 700 - 1.000 °C |
| Reactie kathode (waterstofevolutive reactie) | $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ | $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ | $H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$ |
| Ladingdrager | OH ⁻ | H ⁺ | H ⁺ |

Prijsverlaging door massaproductie

De technologiestructuur van elektrolyzers lijkt veel op die van zonnecellen, batterijen en brandstofcellen. Elektrolyzers bestaan uit afzonderlijke elektrolysecellen die voor een grotere output op elkaar zijn gestapeld tot een stapel, de 'stack'. Als dan nog meer output gewenst is, worden meerdere stacks achter elkaar geplaatst. De cellen hebben geen draaiende onderdelen en enkele veelgebruikte typen, waaronder alkaline- en PEM-elektrolyzers, maken ook geen gebruik van hoge temperaturen. Er zijn dus geen dure, hittebestendige materialen nodig, en ze vergen ook niet veel onderhoud. Dankzij deze technologiestructuur worden elektrolyzers door massaproductie van cellen en stacks snel goedkoper, net zoals dat gebeurt met zonnecellen en batterijen.

Prijsverlaging door elektrolyserintegratie

Elektrolyserinstallaties zijn opgebouwd uit modulaire eenheden: 'stacks' met een vermogen tussen 1 en 10 MW, die werken op gelijkstroom. Zonnepanelen produceren gelijkstroom en na de eerste elektriciteitsconversiestap doen windturbines dat ook. Integreer je echter de

elektrolyser (installeren van elektrolyserstacks in plaats van de DC/AC-omvormers [gelijkstroom naar wisselstroom]) in een zonnepark of een windturbine, dan vermijd je meerdere elektriciteitsconversiestappen. Nu wordt nog vooral gedacht aan grootschalige elektrolyserinstallaties die naast of in de buurt van grootschalige elektriciteit producerende zonne- of windparken worden geplaatst.

Door massaproductie van cellen en stacks worden elektrolyzers snel goedkoop

De productie van waterstof werkt dan als volgt: in een zonnepark produceert een rij zonnepanelen laagspannings-gelijkstroom. Deze wordt in het zonnepark door transformators omgezet in een middenspanningswisselstroom. In een windpark wordt in elke windturbine de geproduceerde wisselstroom eerst omgezet in laagspannings-gelijkstroom, om daarna, ook weer in de windturbine, te worden omgezet in middenspanningswisselstroom.

Door integratie van elektrolyserstacks met zonnepanelen en windturbines worden elektriciteitsconversiekosten en -verliezen vermeden

Vervolgens wordt de middenspanningswisselstroom met 'infield' kabels naar een transformatorstation gebracht, waar deze wordt omgezet in hoogspanningswisselstroom of, voor transport over grote afstanden, naar hoogspanningsgelijkstroom. In een grootschalige elektrolyserinstallatie moet deze hoogspanning vervolgens weer omgezet worden naar laagspanningsgelijkstroom, want die is nodig voor de elektrolyserstacks. Dit betekent aanzienlijke kosten- en elektriciteitsverliezen, die met de diverse elektriciteitsconversies gepaard gaan. In zo'n grootschalige elektrolyserinstallatie blijken de investeringskosten voor de benodigde elektriciteitsconversies zelfs hoger dan de investeringskosten voor de elektrolyserstacks^[12]. Door integratie van elektrolyserstacks met een rij zonnepanelen of een windturbine worden de zogenaamde BOS (balance of system)-kosten (alle andere kosten dan die voor de elektrolyserstacks) sterk verlaagd. Naar schatting kan het vermijden van de diverse elektriciteitsconversies leiden tot ruim € 0,50 lagere waterstofproductiekosten per kilo^[13].

Door de elektrolyserstacks te integreren, ontwikkel je in feite een zonne- of windpark dat geen elektriciteit, maar waterstof produceert. En daarvoor hoef je maar één keer, en niet twee keer, ontwikkel-, engineering- en vergunningskosten te maken. Bovendien kun je op deze manier gestandaardiseerde 'producten' maken, zoals een wind-waterstofturbine en een elektrolyserstack gekoppeld aan een rij zonnepanelen. Door zo'n productstandaardisatie zullen de investeringskosten nog verder dalen.

Witte waterstof

Uit fossiele energie of water kunnen we waterstof produceren, maar waterstof komt ook voor op verschillende locaties in de bodem. Deze waterstof noemen we 'natuurlijke' of 'witte' waterstof. In de bodem kan waterstof worden

gevormd door geochemische, chemische en biologische processen, of door radiolyse (het splitsen van moleculen door middel van radioactiviteit). Op verschillende plaatsen op aarde is waterstof in de bodem gevonden. In Mali wordt al sinds 2012 een kleine waterstofbron gebruikt in een gasmotor. Maar ook op andere plaatsen, waaronder Australië, Frankrijk, de Verenigde Staten en Rusland, is natuurlijke waterstof in de bodem gevonden. Het is nog onduidelijk of het hierbij gaat om grote hoeveelheden en hoe we deze waterstof schoon en goedkoop kunnen winnen^[14].

Waar produceer je welke duurzame energie?

Duurzame energiebronnen zijn niet overal op de wereld aanwezig. En ze zijn ook niet overal op de wereld even goed. Bovendien is er niet overal genoeg ruimte om duurzame energie te produceren. Verschillende vormen van duurzame energie kun je alleen produceren op specifieke plekken. Dat beperkt de toepasbaarheid. Zo is er voor waterkracht niet alleen water nodig, maar ook een flink hoogteverschil, zoals in bergachtige gebieden. Voor blauwe energie (uit osmose) kun je terecht op plekken waar zoet en zout water kunnen mengen, zoals bij riviermondingen in zee. Winning van aardwarmte is alleen mogelijk als het hete water of de warmte niet al te diep in de grond zit én er in de directe nabijheid een geconcentreerde warmtevraag bestaat. Koeling met zeewater kan alleen aan de kust, op plekken waar de zee snel diep en koud wordt én er op korte afstand een geconcentreerde koudevraag bestaat.

Voor de productie van zonne- en windenergie ligt dat net iets anders. Vrijwel overal ter wereld schijnt de zon wel eens en waait het af en toe, zij het niet in gelijke mate. De hoogste zonne-instraling vindt plaats in woestijnen – veelal grote, vrijwel onbewoonde gebieden. Voor wind geldt min of meer hetzelfde. De hoogste windsnelheden treden op boven de oceanen, waar veel ruimte beschikbaar is en helemaal niemand woont. Ook dicht bij de energievraag kun je vaak wel een deel van de benodigde energie produceren met zon en wind. Maar alleen in woestijnen en boven zeeën of oceanen kun je duurzame energie écht goedkoop

Door integratie van elektrolyserstacks met zonnepanelen of windturbines ontwikkel je een geïntegreerd zonne- of wind-waterstofpark dat goedkoper waterstof levert dan zonder integratie



Geothermische centrale op IJsland

produceren. Als je die energie vervolgens omzet in waterstof, kun je goedkope duurzame energie ook goedkoop over grote afstanden vervoeren en in grote hoeveelheden opslaan.

Alleen in woestijnen en boven oceanen kun je zonne- en windenergie écht goedkoop produceren

Bij energieproductie uit biomassa gaat het vooral om biomassa-reststromen, zowel natte (zoals mest, slib en groente- en fruitafval) als droge (zoals houtresten, zaagsel en stro). Deze reststromen vind je bij productielocaties en verwerkingsindustrieën. Zo produceren koeien, varkens en kippen mest in de stallen van een veeteeltbedrijf en bestaat het restproduct van houtzagerijen uit zaagsel. Je kunt deze reststromen kleinschalig verwerken op het bedrijf zelf, maar vaak is het economisch aantrekkelijker

om het op een wat grotere schaal in te zamelen en te verwerken. Ook bij de consumptie van voedsel en het gebruik van biomaterialen zoals hout, papier en karton komen reststromen vrij. Deze zijn vaak klein en ontstaan op veel verschillende plekken. Wil je dit type biomassa op grote schaal als energiebron gebruiken, dan vereist dit een fijnmazig inzamelsysteem. Naast het gebruik van biomassa-reststromen kijken we ook naar het telen van zeewier voor voedsel, energie, grondstoffen en materialenproductie. Maar zeewierteelt vindt plaats op zee.

Samenvattend kun je stellen dat de productie van duurzame energie om verschillende redenen sterk is gebonden aan specifieke plekken en daarbij in de tijd varieert. Voor veel bronnen is er een groot en goedkoop potentieel, maar ligt dit energieaanbod ver verwijderd van de energievraag. In een duurzaam energiesysteem zijn transport en opslag dan ook van groot belang.

Duurzame-energiesysteendoelen

Elk energiesysteem moet ervoor zorgen dat mensen en bedrijven op het juiste moment de gewenste energiediensten kunnen afnemen. Maar waar moet een energiesysteem eigenlijk aan voldoen? En wat is het verschil tussen een fossiel en een duurzaam energiesysteem?

Het beoordelen en vergelijken van energiesystemen gebeurt vaak aan de hand van hun doelen. Bij een fossiel energiesysteem ging het voornamelijk om 'betaalbaar', 'betrouwbaar', 'zekerheid van energielevering' en 'veilig'. Voor een duurzaam energiesysteem zijn daar echter enkele doelen bijgekomen, namelijk 'schoon', 'circulair',

'zekerheid van materialenaanbod' en 'rechtvaardig'. Veel van deze doelen zijn niet volledig te bereiken. Zo kun je nooit een 100% betrouwbaar of 100% veilig energiesysteem realiseren. Maar je kunt deze doelen wel in kwantitatieve termen formuleren.

Doelen van een duurzaam energiesysteem



Schoon



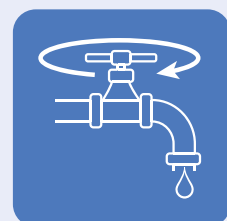
Betaalbaar



Betrouwbaar



Circulair



Zekerheid energielevering



Zekerheid materialenaanbod



Veilig



Rechtvaardig

De energiediensten die een duurzaam energiesysteem levert, moeten schoon, betaalbaar, betrouwbaar en circulair zijn. Ze moeten zekerheid bieden over energie- en materialenaanbod en tevens veilig en rechtvaardig zijn.

Schoon

Een energiesysteem is schoon als er geen of slechts geringe emissies van verontreinigende stoffen plaatsvinden naar lucht, water of bodem. Voor veel emissies bestaan wettelijke normen, uitgedrukt in de hoeveelheid emissie per eenheid energieproductie of per eenheid energiegebruik. Daarnaast kan een energiesysteem als doel hebben de totale hoeveelheid emissies in een bepaald tijdsbestek terug te brengen naar een bepaald niveau.

Het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen die verantwoordelijk zijn voor klimaatverandering, is op dit moment een belangrijk mondiaal milieudoel. Het belangrijkste broeikasgas is CO₂, dat vrijkomt bij de verbranding van fossiele brandstoffen. Andere gassen die bijdragen aan het versterken van het broeikaseffect zijn – in volgorde van belangrijkheid – methaan (CH₄), lachgas (N₂O), CFC's, HFC's en HFC's^[15]. Er worden specifieke broeikasgasemissiedoelstellingen gesteld, bijvoorbeeld per gereden kilometer of per ton staal. Maar er worden ook totale broeikasgasemissiedoelen gesteld, zoals 'de totale broeikasgasemissies moeten in 2030 55% minder zijn dan de emissies in 1990.'

Voor een inherent schoon energiesysteem moeten we overstappen op hernieuwbare energiebronnen en herbruikbare materialen

Waterstof is geen direct broeikasgas, omdat het waterstofmolecuul geen dipoolmoment (maat voor de polariteit van een binding of molecuul) heeft dat de absorptie van infraroodstraling verhindert. Waterstof werkt echter als een indirect broeikasgas. Alle indirecte broeikasgaseffecten van waterstof worden veroorzaakt door de oxidatie ervan in de atmosfeer. Deze oxidatie beïnvloedt de levensduur van andere broeikasgassen in de atmosfeer. Waterstof reageert onder andere met OH⁻-radicalen, waardoor die niet kunnen reageren met methaan, dat wel een sterk broeikasgas is. Al komt er bij verbranding of chemische reactie van water-

stof geen waterstof vrij, in de gehele keten kan op diverse plekken wel waterstof weglekken. De hoeveelheden die weglekken zijn normaal gesproken zeer gering, maar er is natuurlijk wel aandacht nodig voor het voorkomen of verminderen daarvan. Aan de andere kant zal waterstof aardgas (methaan) gaan vervangen, waardoor er minder methaan in de atmosfeer terecht komt. Per saldo wordt het broeikasgaseffect dus juist kleiner^[16].

Het energiesysteem stoot ook andere stoffen uit. Vooral emissies naar de lucht, die optreden bij de conversie naar energiedragers, kunnen lokaal veel luchtverontreiniging veroorzaken. Bij de verbranding van fossiele en biobrandstoffen komen naast CO₂ ook stikstofoxiden (NO_x) en fijnstof vrij. Bij het gebruik van elektriciteit en waterstof treden in principe geen lokale emissies van CO₂, NO_x en fijnstof op. Dit geldt overigens alleen als je bij het omzetten van waterstof naar elektriciteit en warmte gebruikmaakt van een brandstofcel – een elektrochemische conversie waarbij chemische energie direct wordt omgezet in elektriciteit en warmte. Zou je de waterstof in plaats daarvan verbranden, dan komt er namelijk wel NO_x vrij, maar geen CO₂ en fijnstof. Elektriciteit en waterstof staan ook wel bekend als 'koolstofvrije' energiedragers, omdat er bij gebruik geen CO₂ vrijkomt.

Naast luchtverontreinigingen kunnen er emissies optreden naar het oppervlaktewater en de bodem. Bij thermische elektriciteitsproductie wordt bijvoorbeeld veel koelwater gebruikt, dat meestal wordt geloosd op het oppervlaktewater. Voor de winning van fossiele brandstoffen en grondstoffen is bovendien veel water nodig, en vaak ook chemicaliën. Na gebruik worden de verontreinigde reststromen geloosd of gestort.

Zulke emissies kun je vaak terugdringen met zogeheten 'end-of pipe'-technologieën. Zo verminderen katalysatoren de NO_x-emissies door auto's, verminderen filters de uitstoot van fijnstof en zijn waterzuiveringsinstallaties goed in het zuiveren van afvalwater, zodat je het veilig kunt lozen op het oppervlaktewater. Maar het vermijden van emissies



In de Himalaya worden zonneboilers gebruikt om voedsel te bereiden en water te koken

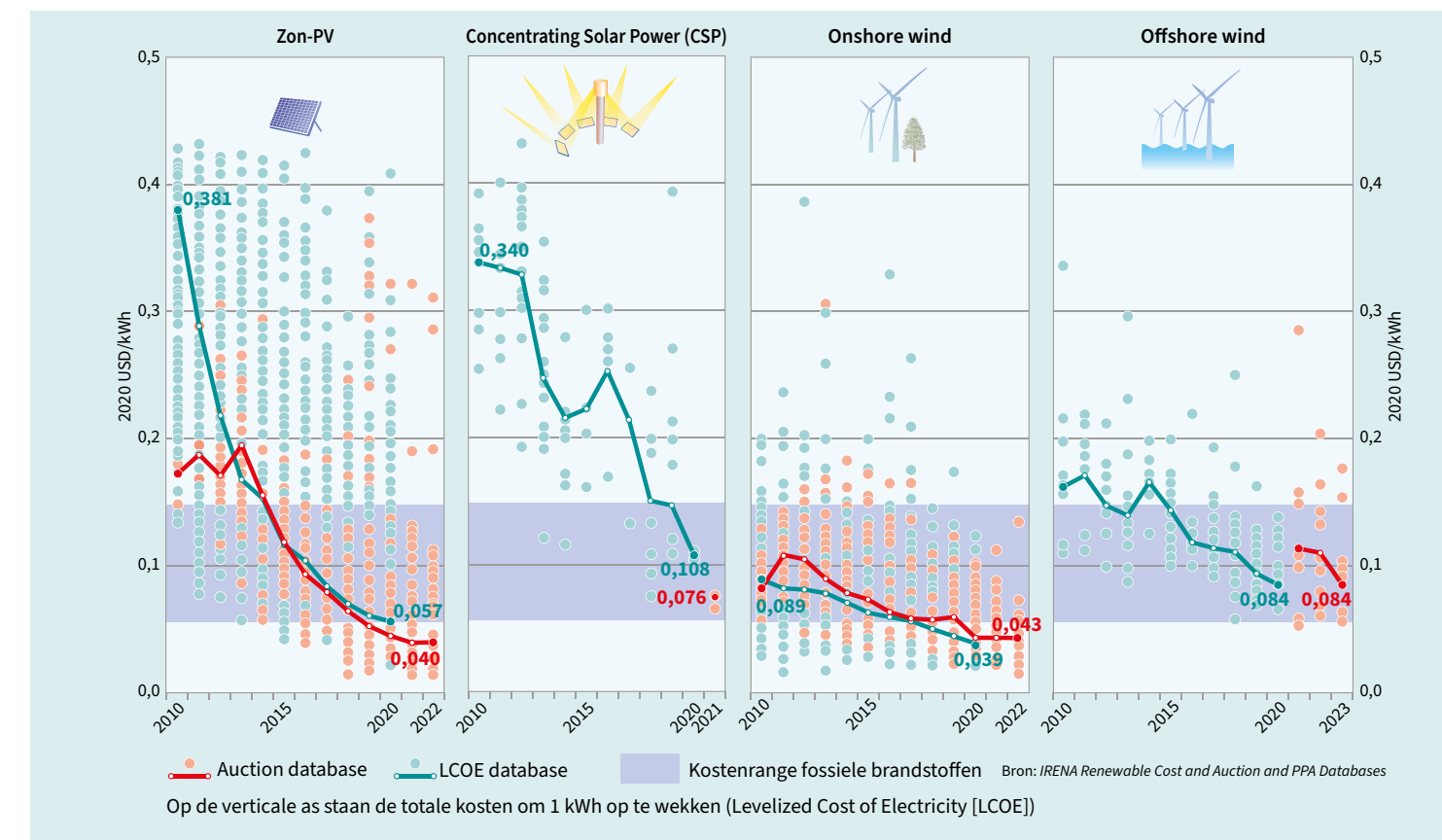
bij de bron en bij de conversie dient de voorkeur te krijgen. Met end-of-pipe-oplossingen blijft er namelijk altijd veel onzekerheid bestaan over de feitelijke emissiereductie. De gebruikte technologieën zijn in de praktijk niet altijd voldoende effectief en worden in veel gevallen zelfs helemaal niet toegepast. Voor een schoon energiesysteem moeten we daarom uiteindelijk overstappen op hernieuwbare energiebronnen en herbruikbare materialen. Alleen dan zullen er minder emissies bij de bron optreden. Maar omdat zelfs in een duurzaam energiesysteem emissies optreden, blijft er altijd aandacht nodig voor het verminderen van emissies, in alle onderdelen van het energiesysteem.

Betaalbaar

Een betaalbaar energiesysteem is een voorwaarde voor economische ontwikkeling en een goede kwaliteit van

leven. De snelle economische ontwikkeling in de afgelopen eeuw is mede mogelijk gemaakt door de beschikbaarheid van goedkope fossiele energie: aardolie, aardgas en kolen. Conversietechnologieën en transportnetwerken zorgden ervoor dat deze energie in de vorm van bruikbare energiedragers (brandstoffen, elektriciteit en gas) beschikbaar werd voor alle sectoren van de economie: van landbouw tot delfstoffenwinning, van chemiebedrijf tot voedselproducent en van horecaonderneming tot transporteur. Betaalbare energie bevorderde ook de kwaliteit van leven van de bevolking, want hiermee konden we huizen verwarmen, koelen en verlichten, en onszelf en alle mogelijke goederen goedkoop en gemakkelijk vervoeren. De keerzijde van deze ontwikkelingen is dat ze gepaard gingen met een grote toename in de verontreiniging van onze leefomgeving, en met klimaatverandering. Daardoor dreigt nu de kwaliteit van leven achteruit te gaan. Door

Kostenontwikkeling voor zon-PV, Concentrating Solar Power (CSP), onshore wind en offshore wind ^[17]



over te schakelen van een fossiel naar een duurzaam energiesysteem is het mogelijk de kwaliteit van leven te behouden op een manier die geen, of in ieder geval veel minder, schade toebrengt aan onze leefomgeving. De vraag is of dit mogelijk is zonder extra kosten. Uit bovenstaande berekening blijkt dat het in principe kan. Elektriciteit uit zon en wind is in de afgelopen 5 tot 10 jaar snel goedkoper geworden. Op goede locaties is deze elektriciteit zelfs goedkoper dan elektriciteit geproduceerd in kern-, gas- of kolencentrales. Goedkope elektriciteit uit zon en wind kun je echter alleen produceren op plekken waar veel zonnestraling, respectievelijk hoge windsnelheden en veel goedkope ruimte beschikbaar is. Deze plekken liggen vaak op grote afstand van de locaties met een grote vraag naar energie. Om de duurzame elektriciteit kosteneffectief op te slaan en te vervoeren over grote afstanden, kun je deze eerst omzetten

in waterstof. Dat is een extra kostenpost. Maar als zich een grootschalige waterstofmarkt ontwikkelt, kun je op goede locaties waterstof produceren voor € 1,00-1,50 per kg. Deze waterstofprijs ligt op hetzelfde niveau als een aardgasprijs van € 0,25-0,38/m³, oftewel € 0,03-0,04/kWh ^{[18], [19], [20], [21], [22]}.

Waterstof opslaan en transporteren is vele malen goedkoper dan elektriciteit opslaan en transporteren. Zo kun je waterstof voor € 0,40-0,50/kg enkele duizenden kilometers transporteren via pijpleidingen. Opgeteld bij de productieprijs van € 1,00-1,50/kg bedragen de totale kosten voor de productie, opslag en transport van waterstof € 1,40-2,00/kg. Dit komt overeen met een aardgasprijs van € 0,35-0,50/m³ oftewel € 0,035-0,05/kWh. Deze waterstof is niet alleen betaalbaar, maar ook dag en nacht beschikbaar, in zomer én winter. De prijs ervan is concurrerend met de prijs voor fossiele energie plus een CO₂-heffing.

Geïmporteerde waterstof zal in veel landen gaan concurreren met lokaal geproduceerde waterstof en zelfs elektriciteit uit zon en wind, bijvoorbeeld in de sectoren mobiliteit en industrie (o.a. voor de productie van hogetemperatuurwarmte). Daarnaast zal geïmporteerde groene waterstof (geproduceerd zonder CO₂-uitstoot) die grootschalig en goedkoop is op te slaan, worden gebruikt om elektriciteit te maken als er lokaal onvoldoende duurzame elektriciteit kan worden geproduceerd. Ook bij ruimteverwarming is zo'n scenario denkbaar: elektrische warmtepompen voorzien in de basislast warmte, waterstof neemt de winterse piek in de warmtevraag voor zijn rekening.

Uit het bovenstaande mag je concluderen dat een duurzaam energiesysteem in de toekomst betaalbaar wordt. De productiekosten van duurzame energie zijn daarbij op termijn mogelijk lager, maar de kosten voor transport en opslag zijn hoger dan die van fossiele energie. Ook al kun je via waterstof in plaats van elektriciteit de kosten van transport en opslag van duurzame energie sterk verlagen.

Betrouwbaar

Een energiesysteem is betrouwbaar als het te allen tijde de gevraagde hoeveelheid energie kan leveren aan eindgebruikers, en met de juiste kwaliteit. Deze betrouwbaarheid gaat over: (1) levering van de gevraagde hoeveelheid energie met de juiste kwaliteit uit productie of opslag en (2) transport en distributie ervan naar eindgebruikers. Beide hebben een faalkans en daarom is een 100% betrouwbaar energiesysteem in principe niet mogelijk.

voor verwarming en 's zomers groter dan 's winters. Ook de energievraag voor verlichting kent een duidelijk seizoenspatroon: het kleinst in de zomer, het grootst in de winter. De energievraag varieert niet alleen met de seizoenen, maar ook met werk- en productietijden. In de basismetalen en basischemie, waar continu wordt geproduceerd, is de energievraag ook continu. Zo'n continue vraag staat bekend als basislast. In kantoren is de energievraag tijdens werkuren (overdag, tijdens werkdagen) groter dan er buiten. Een betrouwbaar energiesysteem heeft voldoende capaciteit en is goed regelbaar, zodat het de productie, import en opslag van energie kan afstemmen op deze fluctuaties van de vraag.

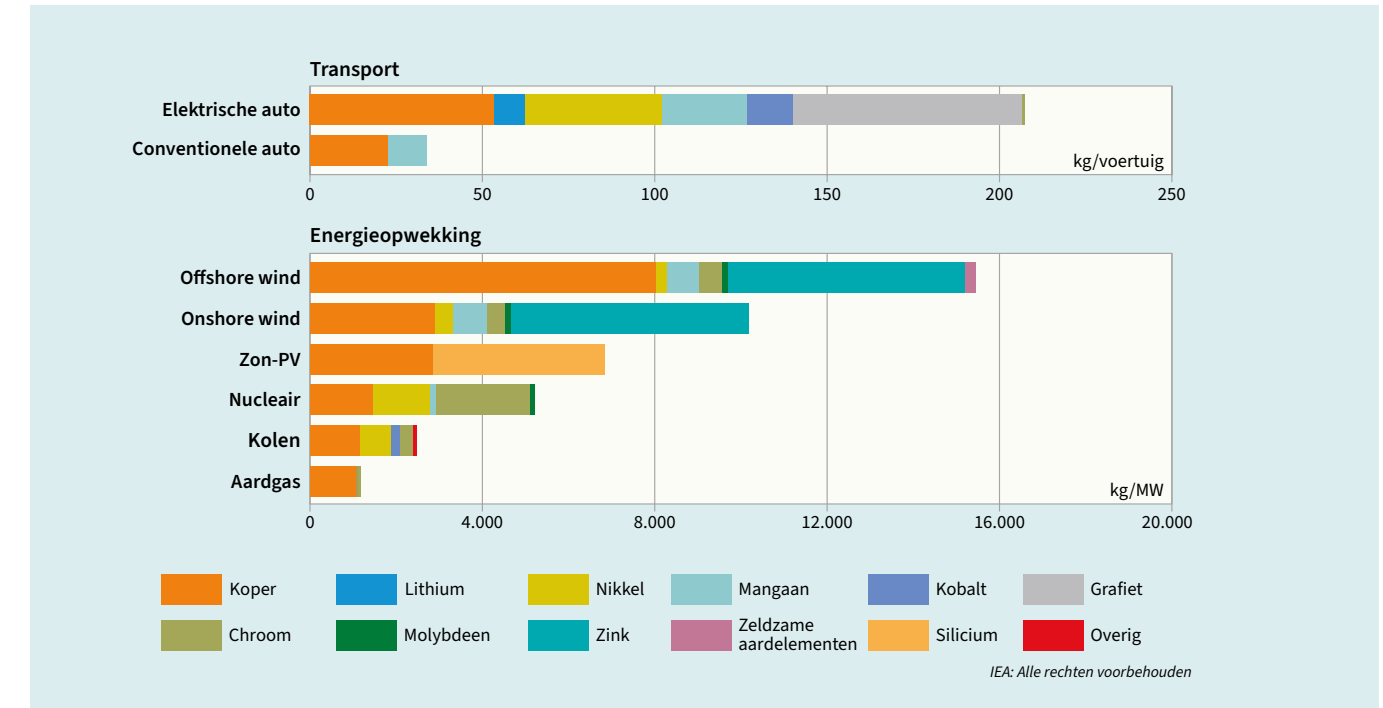
In een fossiel energiesysteem is opslag van energie eenvoudig en goedkoop: kolen in de open lucht, olie in tanks en gas in lege gasvelden en zoutkoepels. Daardoor is de betrouwbaarheid van productie en levering groot. Een fossiel elektriciteitsysteem moet wel een zekere overcapaciteit hebben, want elektriciteitscentrales kunnen uitvallen of tijdelijk uit productie zijn in verband met onderhoud.

Voor een betrouwbare duurzame energievoorziening is grootschalige opslag van waterstof of waterstofproducten nodig

In een duurzaam energiesysteem is opslag van energie minder eenvoudig, zeker als de productie van duurzame energie hoofdzakelijk gebeurt met zon en wind. Elektriciteit kun je namelijk niet zo gemakkelijk opslaan, en zeker niet grootschalig om seizoensfluctuaties op te vangen. Je hebt in zo'n systeem dus niet alleen te maken met fluctuaties van de energievraag, maar ook met fluctuaties van de energieproductie. Als er onvoldoende zon en wind is om genoeg elektriciteit te produceren, kun je de productie aanvullen door gebruik te maken van waterkracht, geothermie en waterstof. Voor een betrouwbare duurzame energievoorziening is dan ook grootschalige opslag van

De vraag naar energie varieert. Zo is de energievraag voor ruimteverwarming in Japan en in Noord- en Midden-Europa in de winter groter dan in de zomer. In zuidelijke landen zal de energievraag voor koeling groter zijn dan

Materialengebruik voor auto's en elektriciteitsproductie^[24] *



* Staal en aluminium zijn niet meegenomen.

waterstof of waterstofproducten nodig. Waterstof kunnen we daarbij op dezelfde manier opslaan als aardgas. Die waterstofopslag is nodig om behalve waterstof ook elektriciteit betrouwbaar aan gebruikers te kunnen leveren.

Aflevering van energie gebeurt via een infrastructuur. Dat kan een elektriciteits- of gasinfrastructuur zijn, maar ook een infrastructuur van energietransport over de weg of over het water. Deze infrastructuren kennen veel redundantie – ze zijn groter uitgevoerd dan strikt noodzakelijk, zodat ze ook blijven leveren als een deel uitvalt. Een goed voorbeeld hiervan zijn ringleidingen, waardoorheen energie via verschillende routes kan worden aangevoerd. Zo kan de betrouwbaarheid van energielevering worden gegarandeerd.

Uiteindelijk willen we dat de betrouwbaarheid van de infrastructuur én de levering in een duurzaam energiesysteem vergelijkbaar is met die in een fossiel energiesysteem.

Circulair

Een energiesysteem is circulair als het materialen gebruikt die op een schone manier zijn gewonnen en geproduceerd, als het deze materialen gebruikt op een efficiënte manier en als het deze materialen hergebruikt. Met materialen bedoelen we hier grondstoffen die uit de aarde worden gewonnen, waaronder metaalertsen (zoals koper en zink), minerale gesteenten (zoals silicium en grafiet) en een grote groep zeldzame aardelementen. De voorraden van deze materialen zijn eindig, net zoals de voorraden fossiele brandstoffen. Een duurzaam energiesysteem gebruikt veel

meer materialen dan een fossiel energiesysteem. De energietransitie is daarom niet alleen een transitie van fossiele energie naar hernieuwbare energie, maar ook een transitie van fossiele energie (aardolie, aardgas en kolen) naar materialen (metalen, mineralen en zeldzame aarden) ^[23].

De energietransitie is ook een transitie van fossiele energie naar materialen

Voor het produceren van zonnecellen, windturbines en batterijen heb je meer materialen nodig dan voor elektriciteitscentrales en opslagtanks. Voor een elektrische auto heb je zes keer zoveel mineralen nodig als voor een auto op benzine of diesel en voor een onshore windpark negen keer zoveel als voor een gasgestookte elektriciteitscentrale. Elke technologie maakt gebruik van andere materialen. Lithium, nikkel, kobalt, mangaan en grafiet zijn essentieel voor batterijen, alhoewel er gewerkt wordt aan batterijen zonder kobalt; zeldzame aardelementen zijn essentieel voor de permanente magneten in windturbines en in elektromotoren van elektrische auto's ^[25]. In de huidige zonnepanelen zit silicium, aluminium en zilver ^[23]; elektriciteitsnetwerken bevatten enorme hoeveelheden koper en aluminium. Daarnaast gebruiken transformatoren veel koper ^[25], bestaan alkaline-elektrolyselektroden vooral uit nikkel en aluminium en bestaan PEM-elektrolyselektroden uit koolstof, irridium en platinum ^[26].

De transitie naar een duurzaam energiesysteem zal leiden tot een enorme toename van het materiaalgebruik. Om te voldoen aan het Akkoord van Parijs, neemt het aandeel van schone energietechnologieën in het totale materiaalgebruik de komende decennia fors toe: voor koper en zeldzame aardelementen tot meer dan 40% van het totaal, voor nikkel en kobalt tot 60-70% en voor lithium tot bijna 90%. Met batterijen uitgevoerde elektrische voertuigen en batterijopslag zijn nu al de grootste gebruikers van lithium (tot voor kort was dat consumentenelektronica), en zijn

hard op weg om ook de grootste gebruikers van nikkel te worden (nu is dat nog de productie van roestvrij staal ^[24]).

De volgende principes kunnen het gebruik van materialen in het algemeen, en dat van zeldzame aardmetalen in het bijzonder, zoveel mogelijk terugdringen:

- **Refuse, Reduce:** verminderen van het gebruik, vergroten van de efficiëntie;
- **Replace:** vervangen van kritische materialen door minder kritische materialen;
- **Repair, Refurbish, Reuse:** repareren of hergebruiken van componenten of onderdelen waarin materialen zijn verwerkt;
- **Recycle:** terugwinnen van materialen bij het einde van de levensduur.

Op zich zijn deze principes allemaal noodzakelijk, maar recycling betekent vaak ook dat de kwaliteit van het gerecyclede materiaal minder is. Om met behoud van kwaliteit te kunnen recyclen, zijn andere productontwerpen en andersoortig materiaalgebruik nodig. Daarnaast is het van belang dat winning, extractie en/of productie van materialen op een schone manier gebeuren, zonder emissies van broeikasgassen en verontreinigende stoffen en zonder water te verspillen.

Elektrische voertuigen en batterijopslag zijn nu al de grootste gebruikers van lithium, binnenkort ook van nikkel

Zekerheid van energieaanbod

Een energiesysteem moet ervoor zorgen dat er voldoende zekerheid is qua toegang en aanbod van energie. Vooral in ontwikkelingslanden is toegang tot energie nu een groot probleem. Bij zekerheid over energieaanbod gaat het om twee belangrijke aspecten: (1) is het totale aanbod van energie op de wereld voldoende? en (2) is

het energieaanbod gelijkmatig en eerlijk verdeeld over de wereld? Natuurrampen en geopolitieke conflicten kunnen de zekerheid over het energieaanbod in bepaalde gebieden of landen verstoren.

Toegang tot energie en vooral toegang tot schone, veilige en betaalbare energie is voor veel mensen in ontwikkelingslanden een groot probleem. Anno 2019 hadden zo'n 2,6 miljard mensen in de wereld geen toegang tot schone en veilige brandstof om te koken. Ruim 750 miljoen mensen hebben geen toegang tot elektriciteit en zijn niet aangesloten op een elektriciteitsnetwerk ^[27]. En voor veel meer mensen is de levering van elektriciteit en brandstoffen zeer onzeker. De Verenigde Naties proberen dit met grootschalige programma's te veranderen. Moderne technologieën voor duurzame energieconversie, -opslag en -transport kunnen hieraan bijdragen, zodat iedereen toegang krijgt tot schone, veilige en betaalbare energie.

De hoeveelheid fossiele energie op aarde is eindig. Je zou dus verwachten dat vooral bij fossiele energiebronnen de omvang van het energieaanbod een probleem is. Maar het einde van deze voorraden is nog niet in zicht en fossiele energiebronnen kunnen voorlopig nog voorzien in onze energiebehoefte. Dat we overschakelen op duurzame energiebronnen is dan ook niet omdat de fossiele energiebronnen op zijn, maar omdat het fossiele energiesysteem een te grote belasting vormt voor klimaat en milieu. Duurzame energiebronnen zijn oneindig, maar niet direct bruikbaar. Voordat je ze kunt gebruiken, is er een conversie nodig naar een bruikbare energiedrager, zoals elektriciteit of waterstof. Om dit op wereldschaal voor elkaar te krijgen, is het nodig dat we de productie en plaatsing van zonnecellen, windturbines, batterijen en elektrolyzers op een gigantische manier uitbreiden. Wereldwijd is er overigens meer dan voldoende ruimte beschikbaar voor de productie van energie uit zon en wind.

Gebieden met hoge windsnelheden of veel zonnestraling zijn niet gelijk verdeeld over de wereld. En ook is er niet op elke plek op aarde voldoende ruimte beschikbaar

voor duurzame energieproductie. Woestijnen en oceanen zijn bij uitstek geschikt om op een goedkope manier veel duurzame energie te produceren: er is voldoende ruimte én voldoende zon en wind. Maar omdat er in deze gebieden niet veel vraag is naar energie, zul je de hier geproduceerde energie moeten opslaan en transporteren naar gebieden die wél een grote energievraag hebben.

In woestijnen en op oceanen is er voldoende ruimte én zon en wind om goedkoop veel elektriciteit en waterstof te produceren

Geopolitiek kan de in- en uitvoer van energie sterk beïnvloeden. Zo bepalen de olieproducerende landen, verenigd in de OPEC, gezamenlijk hoeveel olie er wordt geproduceerd. Daardoor hebben ze grote invloed op de olieprijs. In de jaren zeventig van de vorige eeuw heeft de OPEC een keer een olieboycot ingesteld voor westerse landen en is het aanbod van olie door de oorlog tussen Iran en Irak sterk beperkt geweest. In reactie hierop hebben de westerse landen, verenigd in het Internationale Energie Agentschap (IEA), in alle landen een strategische oliereserve aangelegd ter grootte van 90 dagen netto jaarlijkse olie-import. Deze oliereserves kunnen worden ingezet bij grote verstoringen van het olieaanbod. Ook in een duurzaam energiesysteem kan het energieaanbod verstoord raken. Niet alleen door geopolitieke handelingen, maar ook door natuurrampen of oorlogen. Om zulke situaties het hoofd te kunnen bieden, is het van groot belang om een strategische waterstofvoorraad aan te leggen, net zoals dat nu gebeurt met olie. Die voorraad zou ook net zo groot kunnen zijn, namelijk 90 dagen netto jaarlijkse waterstofimport.

Zekerheid van materialenaanbod

Voor een duurzaam energiesysteem is zekerheid van materialenaanbod misschien wel belangrijker dan zekerheid van energieaanbod. Zon en wind zijn namelijk oneindige

bronnen, terwijl de hoeveelheid materialen op aarde eindig is. Sommige materialen zijn nu zelfs al schaars. Winning en productie van veel materialen zijn geconcentreerd in een beperkt aantal landen, minder nog dan het aantal landen dat aardolie of aardgas produceert. Ruim driekwart van alle lithium, kobalt en zeldzame aardelementen komt uit slechts drie producerende landen. Voor sommige materialen geldt dat één land ongeveer de helft van de wereldwijde productie in handen heeft. Zo delven de Democratische Republiek Congo (DRC) en China in 2019 respectievelijk 70% en 60% van alle erts die kobalt en zeldzame aardmetalen bevatten. Nog extremer is de situatie voor de winning van materialen uit het erts: China produceert in zijn eentje bijna 90% van alle zeldzame aardmetalen ^[28].

Gezien het kleine aantal producerende landen, kan ook de zekerheid over het materialenaanbod sterk worden beïnvloed door geopolitiek. Om de zekerheid over het materialenaanbod veilig te stellen, is het voor landen die duurzame energietechnologie ontwikkelen verstandig om een of meer van de volgende maatregelen te overwegen:

- indien mogelijk: zelf delfstoffen winnen en produceren;
- oprichten van een delfstoffenbank, die delfstoffen bezit en 'uitleent' aan producenten van duurzame energietechnologie;
- aanleggen van strategische reserves van kritische delfstoffen, vergelijkbaar met strategische oliereserves nu.

Veilig

Een energiesysteem is veilig als zo min mogelijk mensen een ongeluk krijgen, gewond raken of gezondheidsschade oplopen bij het opwekken, vervoeren, opslaan en gebruiken van energie. Voor het fossiele energiesysteem bestaan er wetten, regels, normen en vergunningen om de veiligheid te waarborgen. Voor het duurzame energiesysteem is dat nog niet, of niet helemaal, het geval. Natuurlijk moeten ook nieuwe technologieën veilig zijn en dient veiligheid uiteindelijk op dezelfde manier te worden geregeld als nu voor bestaande technologieën. Maar als we eerst alle regels, wetten en normen gaan opstellen en dan

pas duurzame energie gaan implementeren, zijn we veel te lang bezig. In een eerste periode zou dan ook bijvoorbeeld meer ruimte om te experimenteren gewenst zijn, of zou meer een procesaanpak moeten worden gevolgd, waarbij bijvoorbeeld een commissie van wijzen een vergunning of toestemming verleent, er gemonitord wordt, en uiteindelijk de normen worden opgesteld op basis van praktijkervaring.

Rechtvaardig

Een energiesysteem is rechtvaardig als het de lusten en de lasten van energieproductie en -gebruik eerlijk verdeelt over verschillende groepen mensen en landen. Bij het beoordelen van de rechtvaardigheid spelen de volgende thema's een rol: toegang tot energie, energiarmede, verdeling van energiebelastingen en subsidies, invloed op de besluitvorming over energiebeleid en invloed op investeringsbeslissingen. De rechtvaardigheid kun je beoordelen op landelijk, regionaal en globaal niveau; hier bespreken we rechtvaardigheid op globaal niveau. In het huidige, fossiele energiesysteem zijn er grote import- en exportstromen van aardolie, kolen en aardgas.

Ruim driekwart van alle lithium, kobalt en zeldzame aardmetalen komt nu uit slechts drie landen

De geïndustrialiseerde landen importeren veel fossiele energie, terwijl een beperkt aantal landen grote hoeveelheden fossiele energie exporteert. De opbrengsten van de exploratie en export van fossiele energie zijn niet heel rechtvaardig over de wereld verdeeld: slechts een beperkt aantal energiebedrijven en landen verdient er veel geld aan. De uitgangssituatie voor de ontwikkeling van een duurzaam energiesysteem verschilt van regio tot regio. Europa, Japan, Zuid-Korea, delen van de Verenigde Staten en delen van China hebben onvoldoende ruimte en onvoldoende bronnen van duurzame energie om in eigen land genoeg betaalbare, duurzame energie te kunnen produceren.



Kobaltmijn in Congo

Andere delen van de wereld, zoals de woestijngebieden in Afrika, het Midden-Oosten, Australië, Nieuw-Zeeland en grote delen van Zuid-Amerika, beschikken over zoveel goede bronnen van duurzame energie en over zo veel ruimte, dat ze zelfs exporteur kunnen worden van duurzame energie – bijvoorbeeld in de vorm van waterstof of van waterstof afgeleide producten. Er zijn ook landen, zoals India en Indonesië, die wel beschikken over goede bronnen van duurzame energie, maar niet over genoeg ruimte om zelf voldoende duurzame energie te produceren. Dit komt door de hoge bevolkingsdichtheid. Naar verwachting gaan vele geïndustrialiseerde landen vooral duurzame energie importeren, terwijl vele ontwikkelingslanden vooral duurzame energie zouden kunnen gaan exporteren. Een rechtvaardig energiesysteem voor de wereld zal de lusten en lasten eerlijk verdelen tussen deze toekomstige duurzame-energie-exporteurs en -importeurs.

Laten we bijvoorbeeld kijken naar een duurzaam energiesysteem voor Europa en Afrika. Europa kan zelf niet genoeg duurzame energie produceren. Daarvoor heeft het te weinig goede bronnen en te weinig ruimte. Afrika

beschikt daar wél over en kan zelfs zo veel duurzame energie produceren dat er genoeg overblijft voor export naar Europa en andere delen van de wereld. Maar Afrika ontbreekt het daarvoor aan technologie en kapitaal en aan een goed opgeleide beroepsbevolking om zelfstandig een duurzaam energiesysteem te kunnen ontwikkelen. Samenwerking is in zo'n situatie voordelig voor beide continenten: het gezamenlijk ontwikkelen van een duurzaam energiesysteem voor eigen gebruik in Afrika én voor export zorgt in Afrika voor toekomstgerichte economische ontwikkeling, banen en welzijn. En Europa kan een schoon, betrouwbaar en betaalbaar duurzaam energiesysteem realiseren door enerzijds duurzame elektriciteit en waterstof te produceren in Europa en anderzijds waterstof te importeren uit Afrika via hergebruikte aardgaspijpleidingen en per schip. Bovendien kunnen Europa en Afrika gezamenlijk bouwen aan een duurzame circulaire industrie en voedselproductie, beide gebaseerd op elektriciteit en waterstof uit zon en wind. Een dergelijke samenwerking is rechtvaardig, zowel vanuit Europees als Afrikaans perspectief ^[28].

Energie-efficiëntie: geen doel, maar soms een middel

Energie-efficiëntie is geen energiesysteemdoel op zichzelf, maar kan soms een middel zijn om energiesysteemdoelen zoals schoon, betaalbaar, betrouwbaar of circulair te kunnen bereiken. Hierna laten we met twee voorbeelden zien waarom het vergroten van de energie-efficiëntie niet per definitie leidt tot goedkopere energie.

Op woonhuizen en in zonneparken geïnstalleerde zonnecellen op basis van silicium zetten zonlicht om in elektriciteit met een efficiëntie van zo'n 20%. Als alternatief zijn er GaAs-zonnecellen (dunne-film zonnecellen van galliumarsenide) op de markt met een efficiëntie van zo'n 30%. Toch leggen we deze efficiëntere zonnecellen niet op ons dak. De reden hiervoor is simpel: ze zijn vele malen duurder dan de nu gebruikte zonnecellen. Zou je deze efficiëntere, maar ook veel duurdere zonnecellen op je woonhuis installeren, dan gaan de kosten per kWh flink omhoog. GaAs-zonnecellen worden vooral in de ruimtevaart toegepast, omdat daar weinig oppervlak beschikbaar is. De opbrengst per eenheid van oppervlak – en dus de efficiëntie – geeft daar wél de doorslag.

Installeer je geen siliciumzonnecellen maar efficiëntere GaAs-zonnecellen op je woonhuis, dan zijn de productiekosten per kWh hoger

Installeer je zonnecellen in de Sahara, dan brengen die twee tot drie keer zoveel elektriciteit op als dezelfde zonnecellen in Noord-Europa. Transport van zonnestroom uit de Sahara naar Noord-Europa is mogelijk met een transport- en conversieverlies van 10-20%. Dan blijft er nog bijna twee keer zoveel elektriciteit over dan we met dezelfde zonnecellen hier produceren. Toch kiezen we niet voor deze 'efficiëntere' optie waarbij maar de helft van het aantal zonnepanelen nodig is en die dus bijna twee keer zo weinig materialen vergt. Het transport van elektriciteit is namelijk zo duur, dat in Noord-Europa geproduceerde zonne-elektriciteit uiteindelijk goedkoper is. En ook al schijnt de zon in de Sahara op andere tijden dan in Noord-Europa, het aanbod van elektriciteit is nog steeds niet in evenwicht met de vraag.

Maar door zonne-elektriciteit uit de Sahara om te zetten in waterstof kun je deze duurzame energie, ondanks de conversiekosten en -verliezen, veel goedkoper transporteren en opslaan. Transporteer je deze waterstof naar Noord-Europa, dan kun je daarmee op elk gewenst moment elektriciteit leveren. En eigenlijk is in deze route de 'efficiëntie' ook nog beter dan voor zonne-elektriciteit opgewekt in Noord-Europa. Want als zonnecellen in de Sahara tweeëneenhalf keer zoveel opleveren als die in Noord-Europa, dan is daar – na de conversie naar waterstof en rekening houdend met de verliezen door transport en door het weer terug omzetten van waterstof naar elektriciteit – nog één keer van over. Zonnestroom uit de Sahara versus zonnestroom uit Noord-Europa eindigt dus qua 'efficiëntie' in een gelijkspel: uiteindelijk zijn er in beide situaties evenveel zonnepanelen nodig. En omdat de zonnestroom uit de Sahara beschikbaar is gekomen in de vorm van waterstof, kun je er dag en nacht, zomer én winter, zonne-elektriciteit mee leveren in Noord-Europa. De betrouwbaarheid van zonnestroom uit de Sahara, via de waterstofroute, is daarmee veel beter. En in de praktijk blijkt dit ook op te gaan voor de betaalbaarheid^[29]. Uiteindelijk gaat het dus niet om de efficiëntie van een energiesysteem, maar om het realiseren van de duurzame doelen ervan: schoon, betaalbaar, betrouwbaar, zekerheid van energieaanbod, circulair, zekerheid van materialenaanbod, veilig en rechtvaardig.

De voorbeelden die we hierboven hebben gegeven en waaruit blijkt dat energie-efficiëntie niet per definitie leidt tot een schonere, goedkopere en betrouwbaardere energievoorziening, gelden met name vanuit het oogpunt van energieconversie. Natuurlijk is en blijft zuinig en efficiënt omgaan met energie heel belangrijk voor het realiseren van een duurzaam energiesysteem. Maar als we het over energie-efficiëntie hebben, bedoelen we vooral energie-efficiënt (eind)gebruik van energie. Het gaat dan om het vermijden van onnodig energiegebruik zoals de verlichting aan laten als je er niet bent, plastic verpakkingen gebruiken wanneer dat niet nodig is of het sluipverbruik van apparaten die je niet gebruikt. Daarnaast is energie-efficiëntieverbetering van (eind)gebruik van belang, denk aan het beter isoleren van gebouwen en woningen of het vervangen van gloeilampen door LED-verlichting.

Vergelijking van een fossiel en een duurzaam energiesysteem

| Energiesysteemdoelen | Fossiel energiesysteem | Duurzaam energiesysteem |
|---------------------------------------|--|--|
| Schoon | <ul style="list-style-type: none"> End-of-pipe-technologie nodig voor vermindering uitstoot van broeikasgassen en andere vervuiling | <ul style="list-style-type: none"> Duurzame bronnen inherent schoon (geen uitstoot broeikasgassen) End-of-pipe-technologie nodig voor vermindering andere vervuiling |
| Betaalbaar | <ul style="list-style-type: none"> Fossiele energie is goedkoop CO₂-beprijzing verhoogt prijs Wereldwijd transport is goedkoop Opslag is goedkoop | <ul style="list-style-type: none"> Duurzame energie op goede locaties zeer goedkoop (goedkoper dan fossiel) Meer en hogere transportkosten Meer en hogere opslagkosten |
| Betrouwbaar | <ul style="list-style-type: none"> Continu aanbod van energie Opslag nodig i.v.m. fluctuaties van energiegebruik | <ul style="list-style-type: none"> Fluctuerend aanbod van energie Opslag nodig i.v.m. fluctuaties van energiegebruik én -aanbod |
| Circulair | <ul style="list-style-type: none"> Beperkt materiaalengebruik | <ul style="list-style-type: none"> Groot materiaalengebruik van eindige voorraad. Daarom circulair materiaalengebruik noodzakelijk voor realisatie duurzaam energiesysteem |
| Zekerheid van energieaanbod | <ul style="list-style-type: none"> Fossiele energievoorraden in beperkt aantal landen | <ul style="list-style-type: none"> Groot potentieel aan duurzame energie in veel landen aanwezig Goedkoop aanbod in landen met goede duurzame energiebronnen en voldoende ruimte |
| Zekerheid van materialenaanbod | <ul style="list-style-type: none"> Materiaalengebruik is beperkt en niet-kritisch | <ul style="list-style-type: none"> Groot materiaalengebruik, ook van kritische materialen Beperkt aantal landen met aanbod van enkele kritische materialen |
| Veilig | <ul style="list-style-type: none"> Veiligheid gewaarborgd met wetten, regels, normen en vergunningen | <ul style="list-style-type: none"> Veiligheid moet sneller worden geregeld, om vertraging energietransitie te voorkomen |
| Rechtvaardig | <ul style="list-style-type: none"> Verdiensten vooral voor grote bedrijven en beperkt aantal exporterende landen | <ul style="list-style-type: none"> Gezamenlijke ontwikkeling van geïndustrialiseerde landen en ontwikkelingslanden kan welvaart rechtvaardig verdelen |

Verschil tussen fossiel en duurzaam systeem

In dit hoofdstuk hebben we gezien dat een duurzaam energiesysteem andere karakteristieken heeft dan een fossiel energiesysteem. Dat maakt het moeilijk om ze met elkaar te vergelijken. Vergelijkingen van beide systemen nemen nu nog vaak de karakteristieken van het bestaande, fossiele energiesysteem als uitgangspunt. Daarbij kijk je bijvoorbeeld naar de energieproductievolumes per jaar, de kosten voor energieproductie, de energiegebruiksvolumes per jaar per sector en de daarbij behorende CO₂-emissies

per jaar. Dit geeft een beperkt beeld en kan leiden tot suboptimaal beleid voor de realisatie van een duurzaam energiesysteem. Een vergelijking die recht doet aan de karakteristieken van elk energiesysteem, of dat nu fossiel is of duurzaam, zou kunnen beoordelen of en in hoeverre een energiesysteem bijdraagt aan de in dit hoofdstuk behandelde doelen: schoon, betaalbaar, betrouwbaar, circulair, zekerheid van energieaanbod, zekerheid van materialenaanbod, veilig en rechtvaardig.

2

WELKE ROL SPELEN RUIMTE EN TIJD?

Kolen, aardolie en aardgas halen we uit de grond. De beschikbaarheid daarvan is niet onderhevig aan variaties in tijd en ruimte: het seizoen, het weer, of het dag is of nacht, de stand van de zon en de maan. Bij vrijwel alle duurzame energiebronnen is dat wél het geval en dat heeft grote invloed op de manier waarop je een duurzaam energiesysteem inricht.

Huidig energiesysteem

Voordat we ons buigen over het toekomstige, duurzame energiesysteem, vatten we hier samen hoe het huidige, fossiele energiesysteem in elkaar zit: hoeveel energie wordt waar gewonnen, hoeveel energie wordt waar gebruikt en welke wereldwijde energiestromen kunnen vraag en aanbod bij elkaar brengen? Een overzicht in cijfers en kaarten.

Van energiebron naar energiedienst

In het fossiele energiesysteem zorgt een productiesysteem ervoor dat grote hoeveelheden steenkool, aardolie en aardgas uit de grond worden gehaald. Dit gebeurt op een beperkt aantal locaties, waarna deze delfstoffen per schip of via pijpleidingen over de wereld worden getransporteerd. De olie wordt verwerkt in raffinaderijen tot benzine, kerosine en diesel. Op korte afstand van de vraag worden kolen, gas en olie geconverteerd naar elektriciteit. Tot slot worden transportbrandstoffen en elektriciteit vooral regionaal gedistribueerd.

Elektriciteit, benzine, kerosine, diesel en aardgas zijn allemaal energiedragers met een standaardkwaliteit. Na distributie worden ze gebruikt voor een scala aan energiediensten, denk aan verlichting, communicatie, een comfortabele woning en werkplek, vervoer van A naar B, het maken van producten en het leveren van kracht om een pomp aan te drijven. Daarnaast worden de fossiele energiebronnen, de zogenaamde koolwaterstofmoleculen, gebruikt als grondstoffen voor chemische producten, bijvoorbeeld plastic of kunstmest.

Primair energiegebruik

Fossiele energie is eigenlijk chemische energie, opgeslagen in moleculen: ketens van koolstof- en waterstofatomen, oftewel 'koolwaterstoffen'. Onder primaire energie verstaan

we bij fossiele energie en biomassa de energie die we in ruwe vorm winnen, voordat er een conversie naar een energiedrager heeft plaatsgevonden. Bij duurzame energie zoals die uit zon, wind en waterkracht, wordt in de energiestatistieken als primaire energie juist wel de energie, die na conversie is geproduceerd (meestal elektriciteit), vermeld. In feite vergelijk je zo op een niet-eerlijke manier fossiele energie met duurzame energie: het lijkt nu immers net alsof de bijdrage van fossiele energie groter is dan die van duurzame energie. Het totale wereldwijde primaire energiegebruik in 2019 was 606 EJ (1 exajoule is 10^{18} joule), oftewel 168.000 TWh (1 TWh is 1 miljard kWh), waarvan meer dan 80% afkomstig uit fossiele bronnen^[30].

In 2019 werd 64% van alle elektriciteit opgewekt met fossiele energie, 10% met kernenergie en 26% met duurzame energie

Primair energiegebruik van de wereld in 2019^[30]

| Energiebron | Aandeel (%) |
|-------------------|---|
| Aardolie | 30,9 |
| Kolen | 26,8 |
| Aardgas | 23,2 |
| Biomassa en afval | 9,4 |
| Kernenergie | 5,0 |
| Waterkracht | 2,5 |
| Anders | 2,2 |
| Totaal | 100% = 168.000 TWh (1 TWh = 1 miljard kWh) |

Finaal energiegebruik

Door primaire fossiele energie of biomassa om te zetten, ontstaan bruikbare energiedragers zoals transportbrandstoffen en elektriciteit, en grondstoffen zoals nafta. De energie die na conversie aan eindgebruikers wordt geleverd, noemen we het finale energiegebruik. Omdat er bij conversie (o.a. in elektriciteitscentrales en raffinaderijen) verliezen optreden, is het finale energiegebruik kleiner dan het primaire energiegebruik. In 2019 was het totale wereldwijde finale energiegebruik 418 EJ, oftewel 116.000 TWh. Dit komt overeen met 69% van het primaire energiegebruik.

Wereldwijde elektriciteitsproductie in 2019^[30]

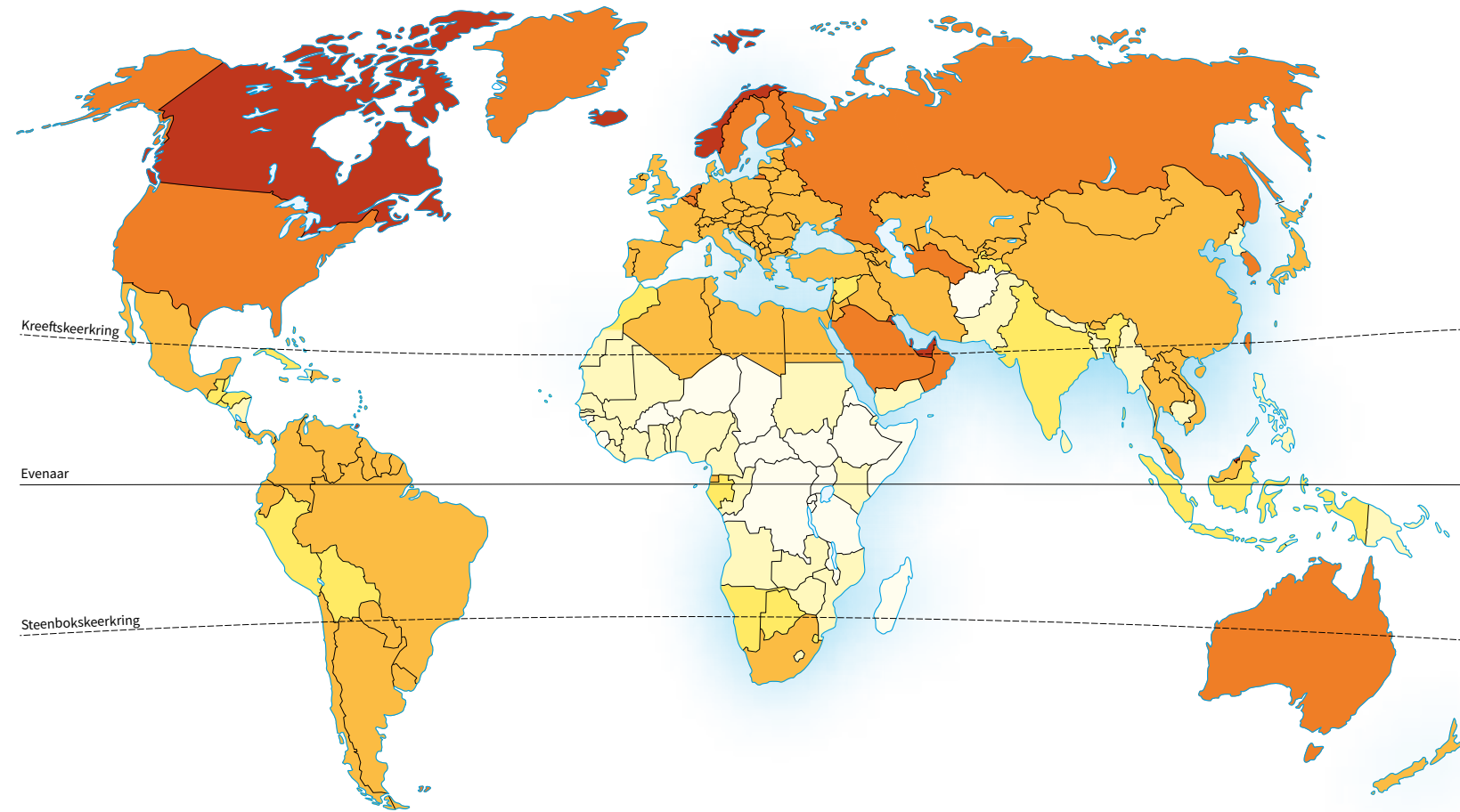
| Energiebron | Aandeel (%) |
|--|--------------------------|
| Kolen | 36,7 |
| Aardgas | 23,6 |
| Waterkracht | 15,7 |
| Duurzame bronnen (m.u.v. waterkracht en afval) | 10,8 |
| Kernenergie | 10,4 |
| Aardolie | 2,8 |
| Totaal | 100% = 27.000 TWh |

Elektriciteitsproductie

In 2019 was de wereldwijde elektriciteitsproductie een kleine 27.000 TWh, zo'n 23% van het finale energiegebruik. Zo'n 64% van alle elektriciteit is opgewekt met fossiele energie, 10% met kernenergie en 26% met duurzame energiebronnen.

Vraag en aanbod van elektriciteit moeten te allen tijde met elkaar in evenwicht zijn. In een fossiel energiesysteem gebruik je daarvoor goed regelbare, fossiel gestookte elektriciteitscentrales. Die zorgen voor flexibiliteit in het elektriciteitssysteem. Zo werd het fluctuerende aanbod van zon en wind in 2019 volledig opgevangen door fossiel gestookte elektriciteitscentrales en regelbare waterkrachtcentrales.

Primair energiegebruik per inwoner ^[31]



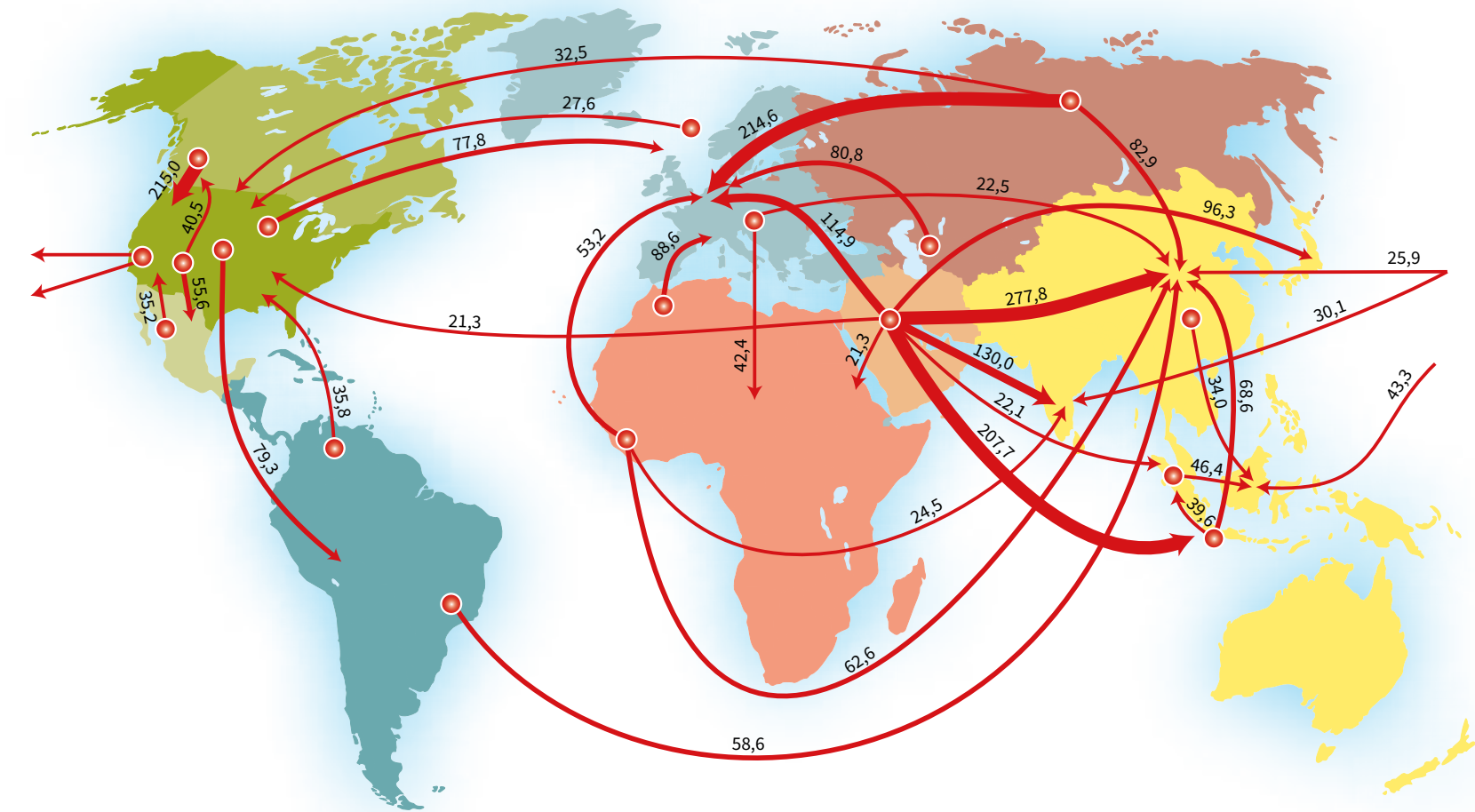
Primair energiegebruik per inwoner, 2019 (MWh/inwoner/jaar)



Energiegebruik per hoofd van de bevolking

Er zijn ook andere indelingen van energiegebruik mogelijk, bijvoorbeeld per hoofd van de bevolking of per Bruto Nationaal Product (BNP). Deze manier van indelen geeft vaak een goed beeld van de economische en welvaartsontwikkeling van een land.

Energiestromen aardolie over de wereld ^[32]



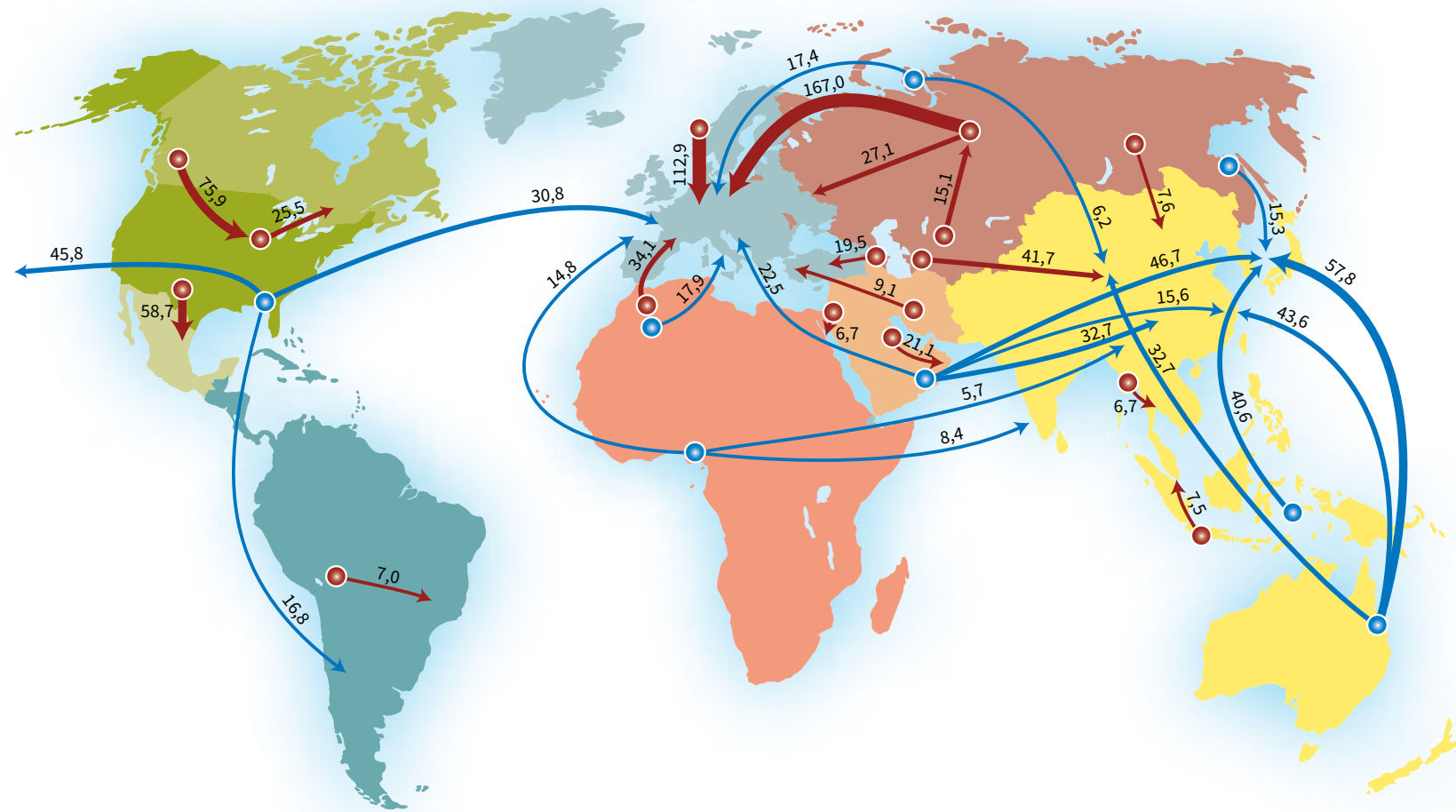
- Verenigde Staten
- Canada
- Mexico
- Zuid- en Midden-Amerika
- Europa
- GOS (Gemenebest van Onafhankelijke Staten)
- Midden-Oosten
- Afrika
- Azië-Pacific

Miljoen ton olie-equivalent (Mtoe), 2021
(1 Mtoe ≈ 11,6 TWh)

- < 50
- 50 - 100
- 100 - 200
- > 200

Energiestromen over de wereld

Ruim 80% van het totale primaire energiegebruik was in 2019 afkomstig van fossiele bronnen. Na winning van kolen, aardolie en aardgas in een beperkt aantal landen worden deze energiebronnen per schip of via pijpleidingen vervoerd naar gebieden met een energievraag. Het Midden-Oosten en Rusland zijn grote leveranciers van olie en gas; Europa, Japan en Azië zijn juist grote afnemers. De Verenigde Staten zijn zo goed als zelfvoorzienend.



- Verenigde Staten
- Canada
- Mexico
- Zuid- en Midden-Amerika
- Europa
- GOS (Gemenebest van Onafhankelijke Staten)
- Midden-Oosten
- Afrika
- Azië-Pacific

Miljard kubieke meter (bcm) gas, 2021
(1 bcm ≈ 10 TWh)

- < 10
- 10 - 25
- 25 - 50
- > 50

- Gaspipeline
- LNG

Het Midden-Oosten en Rusland zijn grote leveranciers van olie en gas; Europa, Japan en Azië zijn grote afnemers, de Verenigde Staten zijn zo goed als zelfvoorzienend

Variaties in ruimte en tijd

In de woestijnen is er meer zon dan op hogere breedten. En boven oceanen waait het harder dan boven land. Bovendien zijn er grote variaties in de tijd van het aanbod zon, wind en vrijwel alle andere duurzame energiebronnen. Wat betekenen deze variaties voor de inrichting van een duurzaam energiesysteem?

Sterke variaties

De opbrengst van veel duurzame energiebronnen is afhankelijk van de plek op aarde, dag/nacht-variaties, seizoensvariaties en het weer. In de Sahara wekt een zonnepaneel 2-3 keer zoveel energie op als in (Noordwest) Europa, maar 's nachts is de productie op beide plekken nihil. Windenergie is in grote mate afhankelijk van het weer. Waar hoge- en lagedrukgebieden liggen, is bepalend voor hoe hard het waait en uit welke richting. De energie van duurzame bronnen varieert dus sterk in tijd en ruimte. Daarin verschillen deze energiebronnen sterk van fossiele energiebronnen.

Twee duurzame bronnen zijn niet indirect afkomstig van de straling van de zon. Getijdenenergie is het gevolg van de aantrekkingskracht van de zon en de maan en is daardoor onderhevig aan goed gedefinieerde dagelijkse cycli en seizoenscycli. Geothermie of aardwarmte is, net als fossiele energiebronnen, afhankelijk van de geologische structuur van de aarde en kent in principe wel een continu aanbod.

Niet overal evenveel zon

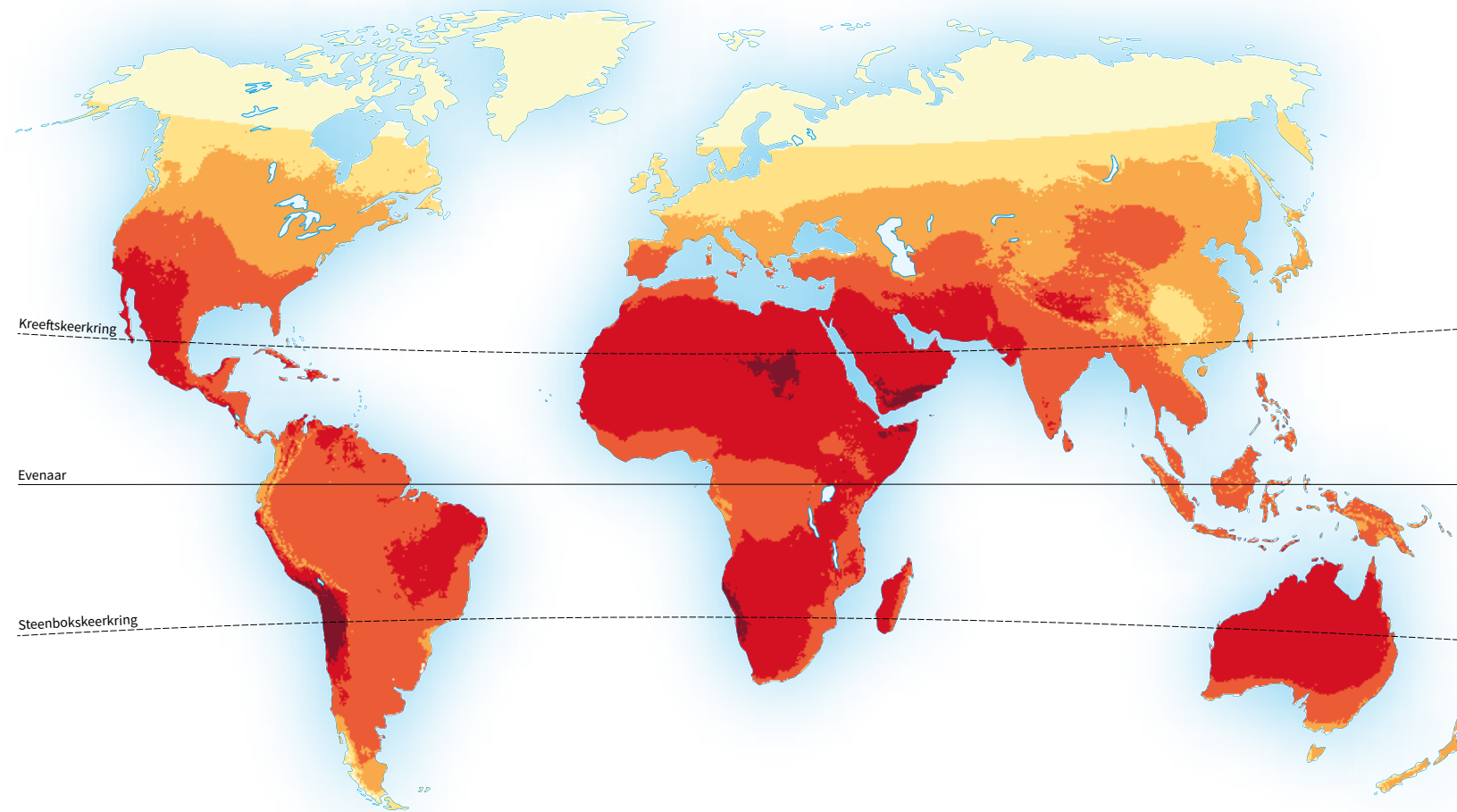
De opbrengst van zonnepanelen hangt af van de hoeveelheid zonnestraling, de atmosferische condities, zoals bewolking en luchtvervuiling, en factoren zoals beschaduwing en vervuiling van de panelen zelf. De hoeveelheid zonnestraling is het belangrijkste en hangt af van de breedtegraad op aarde, het uur van de dag en de seizoenen.

Op de evenaar zijn er geen seizoenen. Hier komt de zon elke dag om 6 uur 's ochtends op en gaat hij om 18 uur 's middags weer onder. Verder naar het noorden of zuiden zijn de seizoensvariaties groter en daarmee ook de variaties in het aantal zonne-uren per dag. Omdat het bij de evenaar als gevolg van het opstijgen van de warme lucht vaak bewolkt is en het er veel regent, is de hoeveelheid zonne-energie die het aardoppervlak bereikt, uiteindelijk het grootst bij de keerkringen. Hier daalt de lucht. Daardoor is er weinig tot geen bewolking en regent het vrijwel nooit. Op en rond de evenaar liggen tropische regenwouden; op en rond de keerkringen liggen woestijnen.

Robotwasser zonnepanelen



Gemiddelde jaarlijkse zonnestraling ^[33]



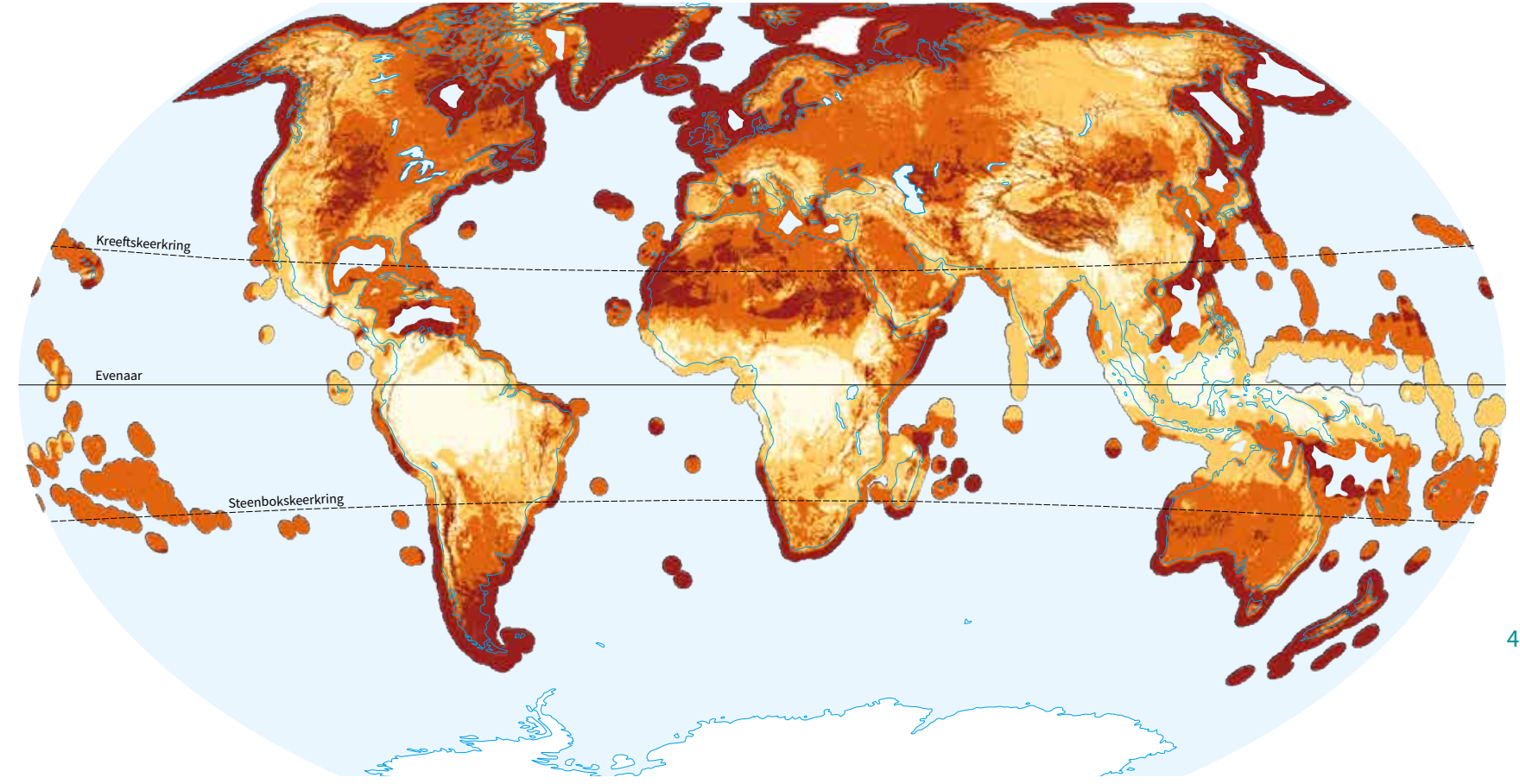
Gemiddelde jaarlijkse zonnestraling (globale instraling op horizontaal vlak) (MWh/km²/jaar)

| | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 8.000 | 12.000 | 16.000 | 20.000 | 24.000 |
|-------|--------|--------|--------|--------|

In woestijngebieden die zich rond de keerkringen bevinden, is de hoeveelheid zonne-energie op het aardoppervlak het grootst. Op het zuidelijk halfrond bevinden zich woestijngebieden in Chili, Namibië, Zuid-Afrika en Australië; op het noordelijk halfrond in het zuidwestelijke deel van de Verenigde Staten, in Mexico, de Sahara, het Midden-Oosten en de Gobi Woestijn in China. In het noorden van Europa, Japan en de noordoostelijke kant van de Verenigde Staten en van China is de hoeveelheid zonne-energie twee tot drie keer zo laag.

Woestijnen en oceanen zijn de geschiktste plekken voor grootschalige, goedkope productie van duurzame energie

Gemiddelde jaarlijkse windsnelheid op 100 m hoogte ^[34]



Gemiddelde jaarlijkse windsnelheid op 100 m hoogte (m/s)

| | | |
|---|---|---|
| 4 | 6 | 8 |
|---|---|---|

Niet overal evenveel wind

De opbrengst van windturbines is sterk afhankelijk van de windsnelheid. De hoeveelheid windenergie is evenredig met de derde macht van de windsnelheid. Wind, de snelheid waarmee lucht zich verplaatst, wordt veroorzaakt doordat de zon de atmosfeer ongelijk opwarmt. Op plaatsen waar de zon de lucht sterk opwarmt, stijgt deze warme lucht op en ontstaat er plaatselijk een lagedrukgebied. Op plaatsen waar de zon de lucht minder sterk opwarmt, is de lucht dus kouder, en daardoor zwaarder. Dan ontstaat daar een hogedrukgebied. Wind is de verplaatsing van lucht van gebieden met een hogere luchtdruk naar gebieden met een

lagere luchtdruk. En omdat de aarde om zijn as draait, kost het wegwerken van de drukverschillen even tijd. Hoge- en lagedrukgebieden blijven daardoor een tijdje bestaan. Op de evenaar wordt de lucht zo sterk verwarmd dat de lucht daar loodrecht opstijgt. Daardoor is er hier vrijwel geen wind. Omdat deze lucht weer neerdaalt bij de keerkringen, ontstaan daar sterke en regelmatige winden, de zogeheten passaatwinden. Tussen de keerkringen en de polen wordt de atmosfeer onregelmatig opgewarmd. Hier ontstaan tijdelijk hoge- of lagedrukgebieden, met als gevolg dat de windsnelheden in de tijd sterk kunnen wisselen.

Allerlei regionale omstandigheden zorgen ervoor dat windsnelheden flink kunnen afwijken van dit algemene beeld. In Californië ontstaat bijvoorbeeld zeewind doordat een koude zee grenst aan warm land. En in Frankrijk is de mistral het gevolg van koude lucht die van de bergen valt. Daarnaast wordt de windsnelheid bepaald door de wrijving van de lucht met het aardoppervlak, waarbij de windsnelheid op de grond nul is. Hoe meer bebouwing, obstakels en/of bebouwing, hoe groter de wrijving. En hoe meer wrijving, hoe meer de windsnelheid afneemt en hoe turbulenter de wind wordt. De windsnelheid op zee is dan ook het hoogst en in steden het laagst, met veel onregelmatige windvlagen.

Rond de evenaar is er vrijwel geen wind. In woestijnen is de windsnelheid op veel plaatsen juist hoog, net als in open gebieden in het Midden-Westen van de Verenigde Staten, op de steppen van Kazachstan en in Patagonia-Argentinië. Ook in veel kustgebieden is de gemiddelde windsnelheid hoog. Maar de hoogste windsnelheid wordt gemeten boven de oceanen, tot aan gemiddelde windsnelheden van 12 meter per seconde op 100 meter hoogte. Deze zijn niet op de kaart ingetekend.

Variaties in waterkracht

De energieopbrengst van een waterkrachtcentrale is recht evenredig met het volume water dat door de turbine stroomt en met het hoogteverschil. Waterkracht kun je dus alleen opwekken op plekken met een grote wateraanvoer (rivieren) en voldoende hoogteverschil. Rivierwater is afkomstig van regenval of sneeuwmelt. Waterdamp komt in de lucht terecht door verdamping van oppervlaktewater uit oceanen, zeeën en meren. Koelt vochtige lucht af, bijvoorbeeld doordat de lucht opstijgt in bergachtige gebieden, dan condenseert het water en ontstaat er neerslag in de vorm van regen of sneeuw. Koude lucht kan namelijk minder waterdamp bevatten dan warme lucht. Boven de evenaar speelt een vergelijkbaar fenomeen. Vochtige lucht stijgt hier niet op door de aanwezigheid van bergen of heuvels, maar omdat zonnestraling de lucht

heeft opgewarmd die opstijgt. Doordat de lucht opstijgt, koelt hij weer af en daardoor valt er rond de evenaar relatief veel neerslag. Dit heeft geleid tot het ontstaan van tropische regenwouden. Het water dat rivieren uit deze regenwouden afvoeren kan worden benut voor het opwekken van elektriciteit. De hoeveelheid en het tijdstip van aanvoer van regen of smeltwater zijn afhankelijk van de seizoenen, de temperatuur en het weer. Zo worden de waterbekkens in Spanje vooral in de herfst en winterperiode gevuld door regenwater, in de zomermaanden valt er weinig tot geen regen. Of er in de zomer voldoende elektriciteit uit waterkracht kan worden gewonnen, is dus afhankelijk van de hoeveelheid regen 's winters.

Variaties in biomassa

Biomassa is een term voor materiaal van plantaardige of dierlijke herkomst, zoals hout, mais, algen, mest, voedselresten en plantaardige olie. Biomassa groeit op het land en in het water onder invloed van zonne-energie en water. Omdat de zon rond de evenaar vaak schijnt en het er veel regent, is de biomassa-productie hier het hoogst. Ook in de woestijnen schijnt de zon vaak, maar het regent er weinig. Daarom groeit er in de woestijnen niet veel biomassa. In andere delen van de wereld ligt de biomassa-productie ergens tussen deze twee uitersten in. Los van wat de natuur heeft te bieden aan biomassa, kun je ook biomassa telen om in eigen behoeften te voorzien. Denk bijvoorbeeld aan landbouwgewassen en hout.

Biomassateelt voor energieproductie kan ruimte in beslag nemen die anders beschikbaar zou zijn voor natuur of voor biomassateelt voor voedsel en materialen. Als we het hier hebben over het benutten van biomassateelt op land als bron van energie, dan bedoelen we alleen biomassa-reststromen, zoals groente- en fruitafval, mest, zaagsel en slib. Deze reststromen zijn niet alleen bruikbaar als bron van duurzame energie, maar ook als bron van koolstof. In de vorm van CO₂, CO of C is koolstof een belangrijke grondstof voor chemische producten en transportbrandstoffen. Koolstof uit biomassa-reststromen gaat in de toekomst dienen

als alternatief voor koolstof uit de fossiele bronnen. Genoemde biomassa-reststromen komen vooral vrij op agrarisch land en bij industrieën die agrarische producten tot voedsel verwerken. De meeste akkerbouw- en veeteeltgebieden liggen redelijk dicht in de buurt van bevolkingscentra. Daardoor kan dus dichtbij het energiegebruik uit biomassa-reststromen energie worden gewonnen [35].

Waar is duurzame energieproductie mogelijk?

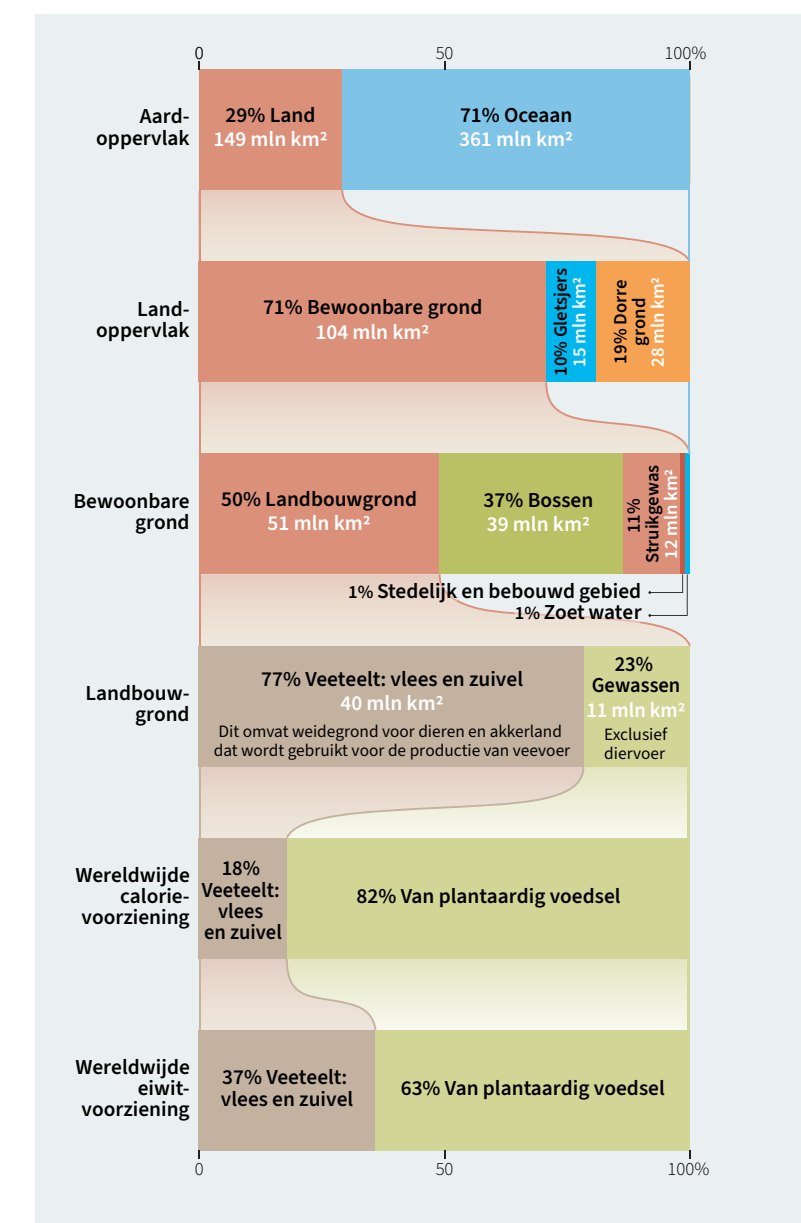
De hoeveelheid duurzame energie die je kunt produceren met zon, wind, waterkracht en biomassa-reststromen is groot genoeg om de gehele wereldbevolking van energie te voorzien. Zon en wind hebben verreweg het grootste potentieel. Waterkracht kan op specifieke locaties in de wereld een goede bijdrage leveren. En biomassa-reststromen zijn niet alleen interessant als bron van duurzame energie, maar vooral als bron van koolstof.

De oceanen nemen meer dan 70% van het aardoppervlak in beslag. Van het landoppervlak bestaat ongeveer 20% uit woestijnen en 10% uit gletsjers. De rest, zo'n 70% van het landoppervlak, is in principe bewoonbaar. Van dit bewoonbare deel is de helft in gebruik voor landbouw, 37% is bos, 11% is struikgewas en gras, 1% is water en 1% is bebouwd. Zonne- en windenergie kunnen we goedkoop opwekken in gebieden met veel zonnestraling en/of hoge windsnelheden. Op grote schaal energie opwekken kun je het best doen op de plaatsen waar voldoende ruimte is en de energieproductie niet concurreert met andere vormen van landgebruik, zoals landbouw en natuur. Omdat zonnepanelen een groot oppervlak innemen, is de productie van zonne-energie moeilijk te combineren met landbouw en natuur. Zonnepanelen kun je wel goed integreren in de gebouwde omgeving, bijvoorbeeld op daken. Onder meer vanwege overlast door slagschaduw en geluid zijn windturbines moeilijk te integreren in de gebouwde omgeving, maar je kunt ze wel goed combineren met landbouw.

Om bovenstaande redenen zijn woestijnen en oceanen de geschiktste plekken voor grootschalige productie van duurzame energie [37]. En wanneer je op een milieu-

technisch verantwoorde manier energie kunt produceren uit waterkracht en geothermie, zijn dit eveneens goede, duurzame energiebronnen. Biomassa-reststromen kun je in de buurt van het energiegebruik niet alleen gebruiken voor duurzame energieproductie, maar vooral als koolstofbron.

Landgebruik in de wereld [36]



Overschotten en tekorten duurzame energie

Waar de gebruikte energie vandaan komt (dimensie ruimte) en wanneer die wordt geproduceerd (dimensie tijd), speelt een ondergeschikte rol in analyses van het huidige, fossiele energiesysteem. Bij de analyse van een duurzaam energiesysteem zijn de dimensies ruimte en tijd juist wél van groot belang.

Het energiegebruik per km²

De geografie van het energiegebruik, het energiegebruik per km², is niet eerder geanalyseerd. Hier doen we een eerste poging om een wereldkaart te maken van het energiegebruik per km². Een eerste benadering van het energiegebruik per km² maken we door de bevolkingsdichtheid (het aantal personen per km²), te vermenigvuldigen met het energiegebruik per hoofd van de bevolking in een land. Het energiegebruik voor het verwarmen en koelen van gebouwen, mobiliteit, licht en kracht (stroom voor machines en apparaten) is namelijk voor een groot deel afhankelijk van de bevolkingsdichtheid, en daarnaast van het weer en het welvaartsniveau. Er zijn ook ruimtelijke variaties die bij deze manier van berekenen niet worden meegenomen. Zo is het industrieel energiegebruik geconcentreerd op plekken met veel industrie; en energiegebruik voor mijnbouw is geconcentreerd op plekken met veel delfstoffen. Verwerking van mijnbouwproducten, bijvoorbeeld staal maken van ijzererts, is energie-intensief en gebeurt op plekken waar energie goedkoop is. Dat geldt ook voor basischemie. Winning van fossiele energie, wat energie kost, gebeurt op plekken waar die energie in grote volumes aanwezig is en goedkoop kan gebeuren.

Op deze kaart is goed te zien dat het energiegebruik per km² (erg) hoog is aan de westkust van de Verenigde Staten, in Europa, in het Midden-Oosten, in India, in het westen

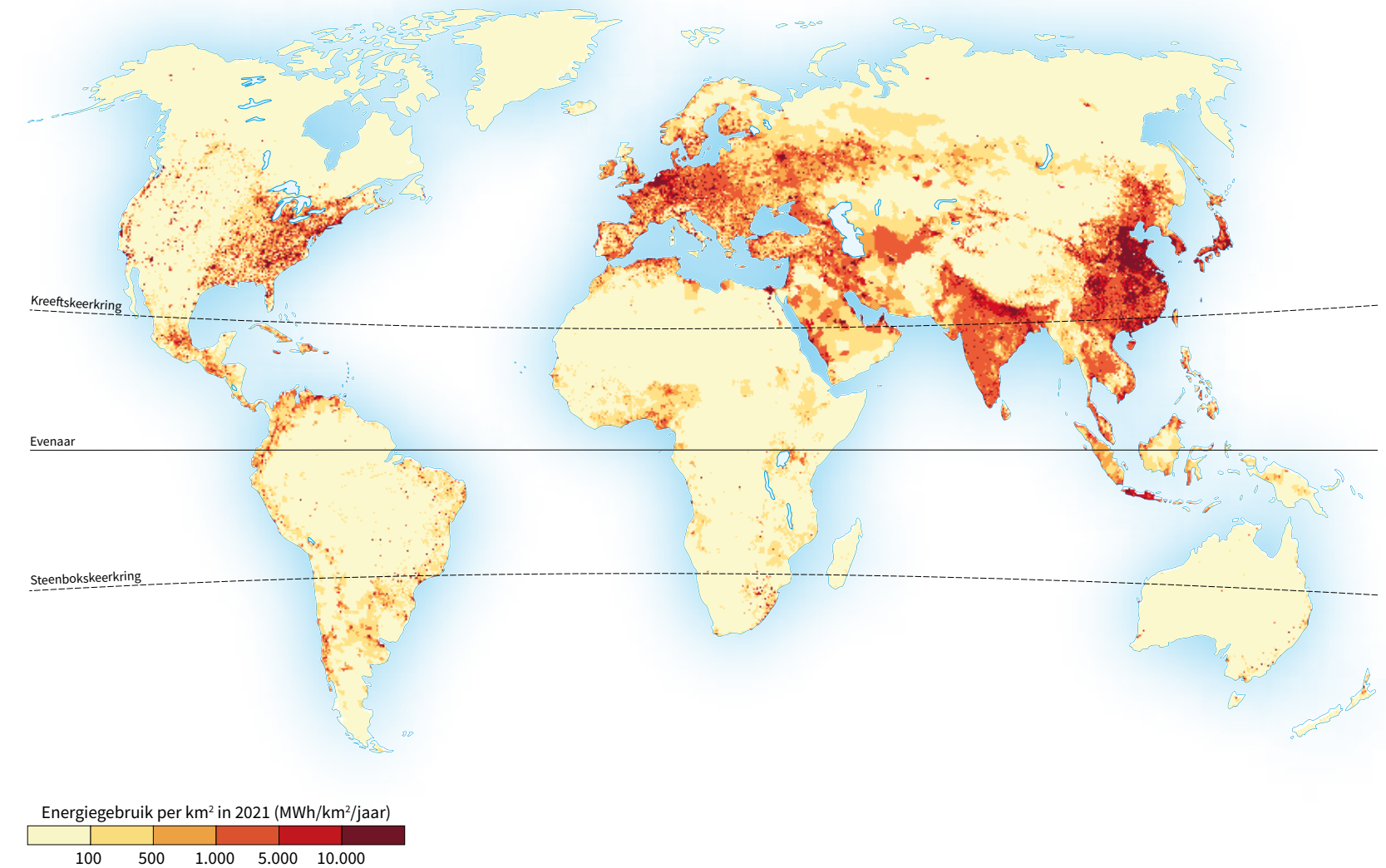
van China, in Japan en in Indonesië. In India en Indonesië komt dit vooral door de hoge bevolkingsdichtheid. In India is de gemiddelde bevolkingsdichtheid namelijk 477 personen per km² [39] en het energiegebruik per persoon per jaar 6.990 kWh [31]. In de VS is de gemiddelde bevolkingsdichtheid 37 personen per km² en het energiegebruik per persoon per jaar 76.635 kWh – ruim 10 keer zoveel als in India. Maar omdat er in India bijna 13 keer zoveel mensen op een km² wonen als in de VS, is het energiegebruik per km² per jaar in India toch groter dan in de VS: 2.990 MWh/km²/jaar tegenover 2.835 MWh/km²/jaar. Daarbij zijn er in de VS grote verschillen tussen stad en platteland; in India is de bevolkingsdichtheid ook hoog in de steden, maar is het verschil tussen stad en platteland kleiner.

De kaart laat daarnaast goed zien dat er bijna geen energie wordt gebruikt in woestijngebieden, in de Himalaya, in het Amazonegebied en in de noordelijke delen van Canada en Rusland. Wat deze kaart niet toont, is het energiegebruik op de oceanen. Daar wordt bijna geen energie gebruikt – alleen voor varen en vliegen, maar daarvoor is getankt op land.

Het zonne-energie aanbod per km²

Het aanbod van duurzame energie is in potentie zeer groot. Veel groter zelfs dan het energiegebruik van de wereld, ook bij een veel grotere wereldbevolking en veel groter energiegebruik per hoofd van de bevolking.

Energiegebruik per km² [31], [38]



Nu we beschikken over een wereldkaart van het energiegebruik per km², is de volgende vraag waar het aanbod van duurzame energie zich bevindt en welke factoren invloed hebben op dit aanbod. Naast de hoeveelheid zonnestraling, waarvan we eerder al een kaart presenteerden, zijn er namelijk ook andere factoren van belang. Allereerst zijn dit technische factoren, zoals het rendement waarmee je zonne-energie kunt omzetten in – bijvoorbeeld – elektriciteit. En omdat de ene rij zonnepanelen de volgende rij kan beschaduwen, zal tussen de rijen enige afstand moeten zitten. Daarnaast zijn er ruimtelijke

factoren. In bergachtig gebied is het bijvoorbeeld moeilijk om zonnepanelen te plaatsen; in natuurgebieden, bossen, moerassen en andere beschermde gebieden is het niet of bijna niet mogelijk. Ten derde is er sprake van competitie om schaarse ruimte. Zo kun je geen zonnepanelen plaatsen op landbouwgronden en vliegvelden. Je kunt ze tot op zekere hoogte wel integreren in de gebouwde omgeving, op industrie- en recreatieterreinen en bij transportinfrastructuur. In de gebouwde omgeving is het aantal zonnepanelen dat je kunt plaatsen afhankelijk van de bevolkingsdichtheid.

Door deze competitie om ruimte zal het plaatsen van zonnepanelen in dichtbevolkte gebieden duurder zijn dan in dunbevolkte gebieden. Op termijn kan dit zelfs betekenen dat de opwekking van duurzame energie in dichtbevolkte gebieden verdwijnt omdat de import van duurzame energie goedkoper is, of omdat andere vormen van ruimtegebruik de voorkeur krijgen. Een voorbeeld is de concurrentie in steden tussen enerzijds groen ter vermindering van hittestress en recreatie en anderzijds zonnepanelen voor de opwekking van duurzame energie.

Hoe we deze factoren hebben verwerkt bij het maken van een wereldkaart van het aanbod van zonne-energie per km², is te lezen op <https://www.kwrwater.nl/nl/green-energy-for-all/>. Bij het maken van de kaart is dus rekening gehouden met het daadwerkelijk beschikbare gebied, bijvoorbeeld door akkerland, vliegvelden, natuurgebieden en andere beschermde gebieden uit te sluiten.

World heat map: tekort en overschot aan zon

Door per km² van het zonne-energieaanbod de energievraag af te trekken, ontstaat een wereldkaart van gebieden met tekorten en overschotten aan zonne-energie. De wereldkaart van het verschil tussen vraag en aanbod noemen we een 'heat map', in dit geval dus een heat map voor zonne-energie.

Deze kaart toont grootschalige tekorten in dichtbevolkte gebieden met daaromheen akkerbouw, zoals in India, maar ook in West-Europa en het oosten van de VS. Op grotere afstand van bevolkingscentra is vaak wel sprake van een overschot. Niet alleen zijn er tekorten in geïndustrialiseerde landen met een hoog energiegebruik per hoofd van de bevolking, maar ook in landen met een hoge bevolkingsdichtheid, zoals India, Indonesië en de Filipijnen.

Neemt het energiegebruik per hoofd van de bevolking in deze landen verder toe, dan lopen de tekorten nog verder op. Ook al zijn de oceanen niet ingekleurd op deze kaart, toch is daar, vooral ver uit de kust, een aanzienlijk over-

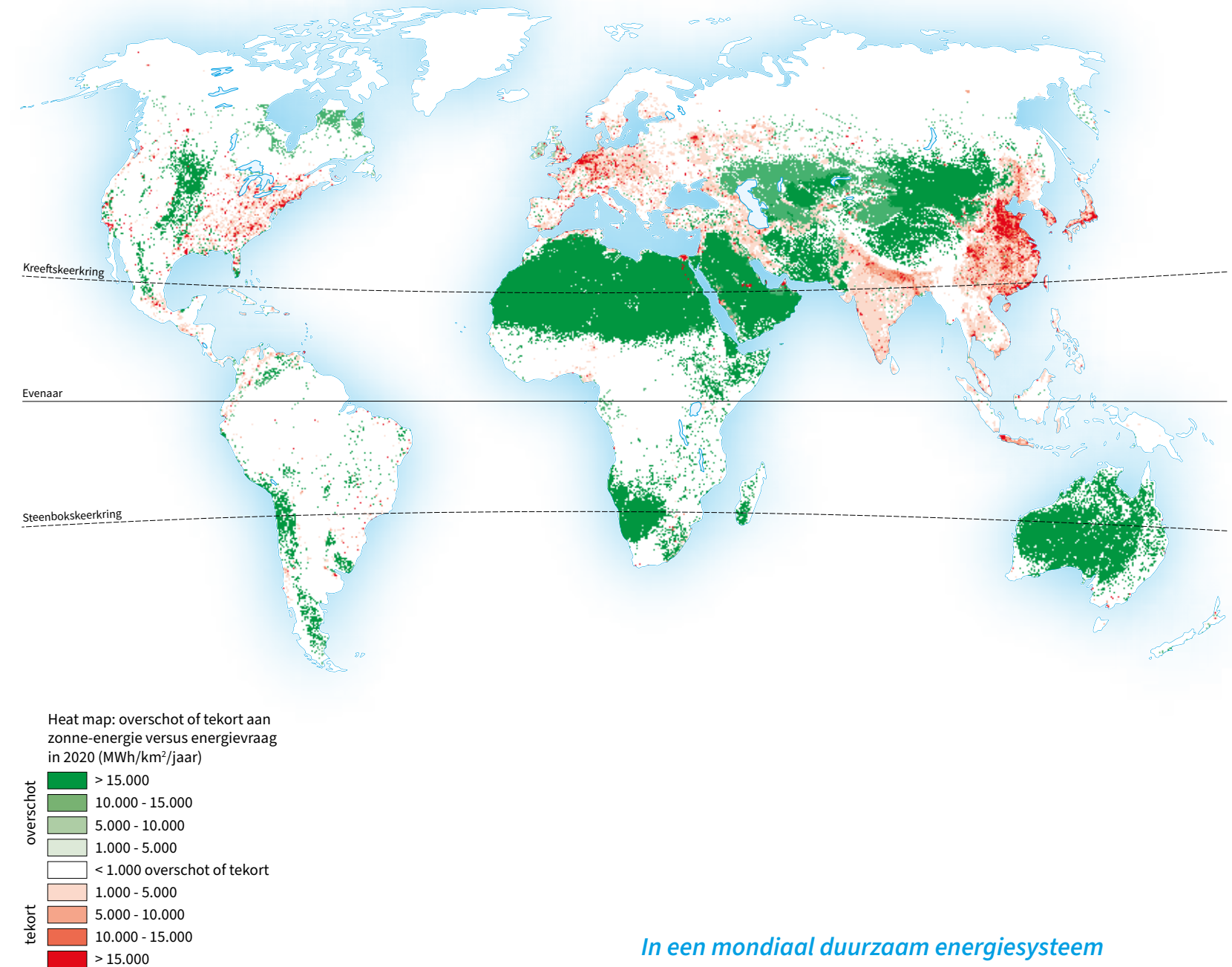
schot aan zonne-energie. Dichter bij de kust zijn er diverse factoren die het aanbod beperken, zoals het gebruik van wateren voor visserij, natuur en scheepvaart.

Naast de hoeveelheid zon zijn ook andere factoren van belang voor de productie van zonne-energie: technische factoren, beschikbare ruimte en competitie om schaarse ruimte

Ook op plekken met tekorten kan er lokaal duurzame energie worden opgewekt, bijvoorbeeld met zonnepanelen op daken van gebouwen. Maar de daarmee opgewekte hoeveelheid is onvoldoende om het gehele energiegebruik te dekken. En dus bestaat er in zo'n gebied een tekort. Ook is het denkbaar, en misschien wel noodzakelijk, dat we in de toekomst minder dierlijke eiwitten nuttigen, waardoor veeteeltgebieden beschikbaar komen. Een deel hiervan kan worden gebruikt om het aanbod van duurzame energie te vergroten. En misschien wordt in bepaalde landen of regio's de competitie om schaarse ruimte wel beslecht in het voordeel van duurzame energieproductie. Maar daar staat tegenover dat de wereldbevolking nog zal groeien en dat daarbovenop, weliswaar geremd door efficiënter gebruik, het energiegebruik verder zal toenemen door welvaartsgroei.

Onze conclusie is dan ook dat gebieden met een hoge bevolkingsdichtheid en/of een hoog energiegebruik per hoofd van de bevolking duurzame energie noodzakelijkerwijs gaan importeren. En gebieden met een lage bevolkingsdichtheid en goede duurzame energiebronnen zullen dan duurzame energie gaan exporteren. In een mondiaal duurzaam energiesysteem worden transport en opslag van duurzame energie daardoor belangrijk.

Heat map zonne-energie: overschotten en tekorten per km² [31], [38], [40], [41], [42], [43]



In een mondiaal duurzaam energiesysteem zullen transport en opslag van duurzame energie belangrijk worden

Hoe vervoeren we energie?

In een fossiel energiesysteem vervoer je vooral kolen, aardolie en aardgas, en vormen de transportkosten geen groot aandeel in de totale kosten. In een duurzaam energiesysteem ligt dat heel anders.

In het huidige, fossiele energiesysteem is er wereldwijd transport per schip van energie in de vorm van kolen (vaste stof), olie of LNG (vloeistof). Intercontinentaal lange-afstandstransport van energie, bijvoorbeeld in de vorm van olie (vloeistof) of aardgas (gas), kan ook via pijpleidingen. In het huidige fossiele energiesysteem bedragen de transportkosten hooguit 10% van de totale kosten^[44]. In een toekomstig, duurzaam energiesysteem zal het aandeel van de transportkosten groter zijn om twee redenen. Allereerst zal er zeer waarschijnlijk meer (duurzame) energie over grotere afstanden worden vervoerd dan bij een fossiel energiesysteem. Ten tweede produceren zonnepanelen en windturbines in eerste instantie elektriciteit, een energiedrager die veel duurder is om te transporteren dan kolen, olie of gas.

Eerder zagen we al dat het toekomstige, duurzame energiesysteem vooral gebruikmaakt van zon en wind als energiebronnen. Op goede locaties kan zonnestroom worden geproduceerd voor € 0,01/kWh^[45] en elektriciteit uit wind voor € 0,02/kWh^{[46], [47]}. Deze productiekosten zullen in de toekomst verder afnemen. De kostprijs van duurzame elektriciteitsproductie is daarmee lager dan die van fossiele elektriciteitsproductie. En ook lager dan de kostprijs van fossiele energiebronnen als aardgas, aardolie of kolen, zeker als er een CO₂-heffing in rekening wordt gebracht. Deze lage productiekosten voor zon en wind gelden echter alleen voor locaties met veel zonnestraling of hoge windsnelheden én veel goedkope beschikbare ruimte. Dat zijn niet dezelfde locaties als de locaties met een grote energievraag. De vraag is dan ook hoeveel duurzame energie kost als je het aflevert op de gewenste locatie en op het gewenste tijdstip. In die kostprijs zitten niet alleen de productiekosten, maar ook de kosten voor transport en opslag.

Transport per schip, pijpleiding of kabel

Energie in de vorm van een vloeistof of een vaste stof heeft een hoge energiedichtheid per volume-eenheid (in kWh/liter). Het is bovendien makkelijk te vervoeren per schip. Kolen en aardolie hoef je daarvoor niet naar een andere vorm om te zetten. Omdat de energiedichtheid (in kWh/l) van aardgas veel lager is, moet je dat wel omzetten naar een vloeistof (LNG, Liquefied Natural Gas) voordat je het goedkoop per schip kunt vervoeren. Ondanks de extra kosten voor deze conversie, kun je het gas toch tegen lagere kosten afleveren bij gebruikers, dan wanneer je het

als een gas per schip had vervoerd. Vijftig jaar geleden, toen het nog niet mogelijk was om van aardgas LNG te maken, werd aardgas omgezet in een andere vloeistof: methanol. Vandaar dat er veel methanolproductiecapaciteit is op plekken waar aardgas wordt gewonnen op grote afstand van de vraag, zoals in Trinidad en Tobago, Nieuw-Zeeland en Zuid-Chili.

Kun je elektriciteit ook per schip vervoeren? Niet zoals aardolie of aardgas, want elektronen kun je niet opslaan in een vat. Wel zou je elektriciteit kunnen opslaan in batterijen en die per schip vervoeren. De energiedichtheid van batterijen (in kWh/l en kWh/kg) is echter zo laag, dat

transport van elektriciteit per schip erg duur is. Elektronen kun je ook niet door een holle pijpleiding laten stromen, maar wel door een geleidende kabel. Door de weerstand die daarbij optreedt, verlies je onderweg elektronen. Dit verlies is evenredig met het kwadraat van de stroomsterkte. Door de elektriciteit onder hoge spanning (voltage) te transporteren, kun je met minder stroom evenveel vermogen overbrengen en zo het energieverlies beperken. De conversie naar een hogere spanning gebeurt met een transformator, die geld kost en zelf ook een verlies kent. Toch zijn de kosten voor transport van elektriciteit over grotere afstanden lager als dit gebeurt via hoogspanningsleidingen.

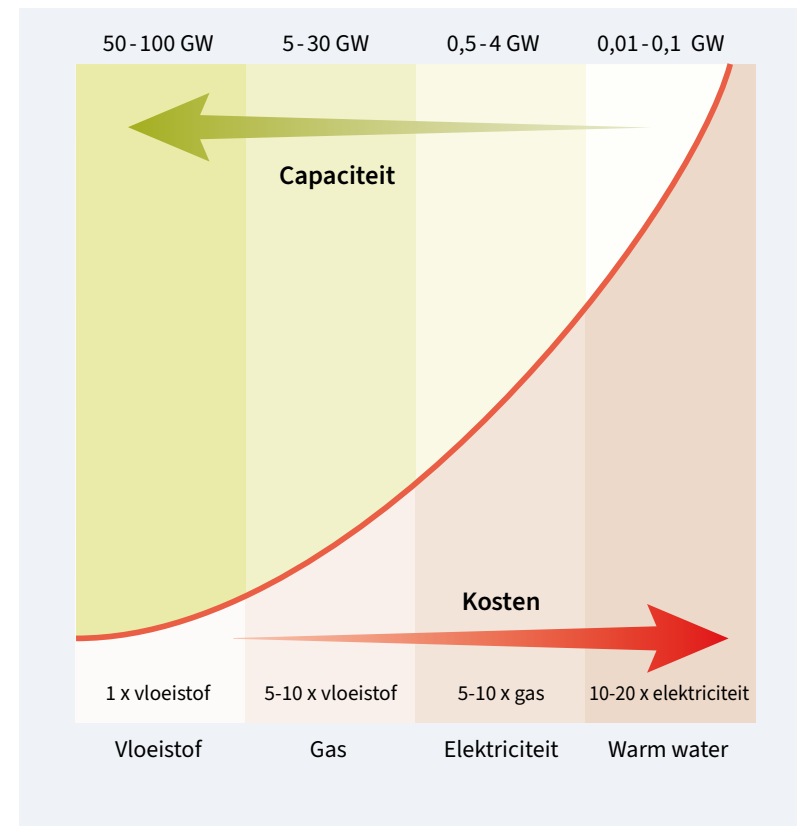
Energiedichtheid per volume en gewicht voor verschillende energiedragers^{[1], [48], [49], [50], [51], [52]}

| | Energiedichtheid per gewicht kWh/kg (HHV) | Energiedichtheid per volume kWh/liter (HHV) |
|---|--|--|
| Kolen (<i>Hard coal</i>) | 6,6-8,6 | 9,9-13,0 |
| Houtpellets | 4,9 | 3,1 |
| Aardolie (<i>Crude oil</i>) | 12,4-13,0 | 11,2-11,7 |
| Benzine | 13,2 | 9,7 |
| Diesel | 12,8 | 10,6 |
| Kerosine | 12,8 | 10,5 |
| Methaan (aardgas), gasvormig | 15,4 | 0,011 |
| Methaan (aardgas), vloeibaar -162 °C | 15,4 | 6,6 |
| Waterstof, gasvormig | 39,4 | 0,0035 |
| Waterstof, vloeibaar -253 °C | 39,4 | 2,8 |
| Ammoniak, vloeibaar -33 °C | 6,25 | 4,35 |
| Elektriciteit, batterij-opslag (range loodzuur-lithium) | 0,04-0,40 | 0,03-0,27 |
| Warm water, 90 °C | 0,1 | 0,1 |

Elektriciteitstransport via hoogspanningskabels



Transportkosten en transportcapaciteit voor verschillende energiedragers ^{[44], [53], [54]}



Naast elektronen (elektriciteit) en moleculen (vloeibare of gasvormige energie) kun je ook warmte of koude vervoeren, in de vorm van water. Zo kan warm of koud water via pijpleidingen worden getransporteerd, bijvoorbeeld om gebouwen mee te verwarmen of te koelen. Maar ook stoom – gasvormig water – kun je onder druk door een pijpleiding transporteren, bijvoorbeeld om proceswarmte te leveren in de industrie. De energiedichtheid (kWh/l en kWh/kg) van warm en koud water is laag in vergelijking met andere energiebronnen en -dragers. Bovendien zijn voor het transport van relatief kleine hoeveelheden energie grote, goed geïsoleerde warmtepijpleidingen nodig.

Energietransportkosten en -capaciteit

Hoeveel het transport van energie kost, is sterk afhankelijk van de energiedichtheid per volume (kWh/l) en in mindere mate van de energiedichtheid per gewicht (kWh/kg) van de energiedrager. Voor de transportkosten geldt: hoe hoger de energiedichtheid, hoe lager de kosten. Transport van een vloeistof door een pijpleiding is het goedkoopst. Daarna komt transport van een gas door een pijpleiding: dat is ongeveer 5 tot 10 keer zo duur. Transport van elektriciteit door een kabel is ruwweg weer 5 tot 10 keer zo duur als transport van gas door een pijpleiding. Het duurst is het transport van warm of koud water door een geïsoleerde buis: 10 tot 20 keer zo duur als transport van elektriciteit door een kabel ^{[44], [53], [54]}.

Gastransport is 5-10 keer duurder dan vloeistoftransport; elektriciteitstransport is 5-10 keer duurder dan gastransport; warm water transport is 10-20 keer duurder dan elektriciteitstransport

Voor de transportcapaciteit geldt: hoe hoger de energiedichtheid, hoe groter de capaciteit. Een pijpleiding om vloeistof te transporteren heeft een capaciteit van 50-100 GW. Een pijpleiding om gas te transporteren heeft

Bij het transport van vloeistof- of gasmoleculen door een holle buis gaan er (in principe) geen moleculen verloren. Maar om een grote hoeveelheid gasvormige energie door een buis te kunnen vervoeren, comprimeer je dat gas, zodat de energiedichtheid per volume omhooggaat. Voor deze compressie heb je energie nodig, meestal elektriciteit, dus indirect is er wel energieverlies. Bovendien vereisen de compressoren die daarvoor nodig zijn ook een investering. Daarnaast vindt er in de pijpleidingen door wrijving aan de wand een drukval plaats. Met compressoren kun je de druk regelmatig weer op het gewenste niveau brengen. Maar uiteindelijk leidt het comprimeren toch tot lagere kosten voor het transport van aardgas of waterstofgas over grotere afstanden.

een capaciteit van 5-30 GW. Zo had een ‘Nordstream’-pijpleiding – voor het transport van Russisch aardgas door de Baltische zee naar Duitsland – een capaciteit van 35 GW. Elektriciteitskabels hebben meestal een capaciteit van 0,5-4 GW, al is er in China een kabel gemaakt met een capaciteit van 12 GW. De kleinste capaciteit hebben warmtepijpleidingen voor het transport van warm of koud water: 10-100 MW, ofwel 0,01-0,1 GW.

Energietransport in een energiesysteem

De transportkosten bepalen sterk hoe de logistiek van een energiesysteem eruitziet. Het energietransportsysteem kan als volgt worden gekarakteriseerd.

- Wereldwijd transport gebeurt per schip. Energie wordt vervoerd in de vorm van een vloeistof of vaste stof. Om gas per schip te kunnen vervoeren, wordt het eerst omgezet tot een vloeistof.
- Tot zo’n 5.000 km wordt energie als vloeistof of gas vervoerd via pijpleidingen. Om elektriciteit kosteneffectief over duizenden kilometers te kunnen vervoeren, wordt deze eerst omgezet in een gas of vloeistof.
- Tot zo’n 1.000 km kun je elektriciteit tegen redelijke kosten per kabel transporteren.
- Tot zo’n 50 km kun je warmte en koude tegen redelijke kosten via warmtepijpleidingen vervoeren.

In het huidige, fossiele energiesysteem worden vooral koolwaterstofmoleculen (kolen, aardolie en aardgas) per schip en via pijpleiding vervoerd. Dit is eenvoudig. Met uitzondering van het comprimeren van aardgas tot LNG, zijn hier namelijk geen conversies voor nodig. De elektriciteitscentrales die draaien op aardolie, aardgas of kolen staan in dit systeem dan ook in de nabijheid van de elektriciteitsvraag. Dit is verreweg het goedkoopst, omdat transport van elektriciteit een stuk duurder is dan het transport van kolen, aardolie en aardgas. In een duurzaam energiesysteem kan wel heel erg goedkoop elektriciteit worden gemaakt, op plekken met veel zonnestraling en/of hoge windsnelheden en waar veel goedkope ruimte beschikbaar is. Deze gebieden liggen

vaak op grote afstanden van de energievraag. Om deze elektriciteit toch kosteneffectief te kunnen vervoeren, kun je het naar een gas converteren: waterstofgas. En om dit gas per schip over de hele wereld te kunnen vervoeren, moet je het omzetten in een vloeistof, bijvoorbeeld vloeibare waterstof. Een alternatief is om ammoniak te maken door waterstofgas te binden aan stikstof uit de lucht, bij -33 °C is ammoniak vloeibaar. Of om waterstof te binden aan een draagvloeistof, een zogeheten liquid organic hydrogen carrier (LOHC), een olieachtige vloeistof die met de huidige olietankers kan worden vervoerd. Bij gelijke energievolumes zijn de totale transportkosten in een duurzaam energiesysteem een stuk hoger dan in een fossiel energiesysteem. Dit komt door de extra kosten voor de noodzakelijke conversie van elektriciteit naar een gas en vloeistof waardoor je goedkopere transportkosten kunt realiseren. Het aandeel van de transportkosten in de totale kosten is dan ook niet meer te verwaarlozen, zoals in een fossiel energiesysteem. Vandaar dat je een fossiel en een duurzaam energiesysteem niet kunt vergelijken op basis van alleen de productiekosten. In zo’n vergelijking, bijvoorbeeld als onderdeel van een energiescenario-analyse, horen ook de transportkosten thuis. Wij schatten in dat de transport- en opslagkosten in een duurzaam energiesysteem samen wel zo’n 50% van de totale kosten kunnen zijn.

Energietransportwijze en afstandsrange



Hoe slaan we energie op?

Energieopslag is nodig om op elk tijdstip aan de vraag naar energie te kunnen voldoen. Het huidige, fossiele energiesysteem beschikt over energieopslag om variaties in de energievraag op te vangen. Een duurzaam energiesysteem krijgt te maken met variaties in zowel de energievraag als het energieaanbod. Daarom heeft het meer energieopslag nodig.

Energieopslag in een fossiel energiesysteem

De winning van fossiele energie levert een min of meer continue stroom van energie op. Elke dag worden vergelijkbare hoeveelheden kolen, aardolie en aardgas gewonnen. Zo'n continue stroom olie of gas kun je gemakkelijk via pijpleidingen transporteren. Voor transport per schip heb je opslagmogelijkheden nodig in de haven, zodat schepen snel kunnen worden geladen en gelost. Opslag van fossiele energie is makkelijk en goedkoop: kolen kun je opslaan in de open lucht, olie in olietanks en gas in lege gasvelden, zoutkoepels, geschikte aquifers en koepels in hard gesteente.

Opslag van energie is vooral nodig om vraag en aanbod bij elkaar te brengen. Voor aardgas is een behoorlijk groot opslagvolume nodig. De vraag naar aardgas kent in landen waar in de winter gebouwen moeten worden verwarmd, een seizoenspatroon: grote vraag in de winter (om gebouwen te verwarmen), kleine vraag in de zomer. Omdat het aanbod van aardgas continu is, wordt in de zomer gas opgeslagen voor de winter. Daarnaast gebruiken veel landen gasgestookte elektriciteitscentrales om vraag en aanbod van elektriciteit in evenwicht te houden. Kolen- en kerncentrales leveren continue stroom, de basislast. Gasgestookte centrales, gasturbines en gasmotoren vangen de pieken in de vraag op door flexibel te produceren. Gasgestookte centrales zijn namelijk goed regelbaar: je kunt

ze snel en makkelijk meer of minder laten produceren. Ze worden nu ook gebruikt om het onregelmatige aanbod van elektriciteit uit zon en wind op te vangen. Zo zorgen gasgestookte centrales voor flexibiliteit in het elektriciteits-systeem, waardoor vraag en aanbod altijd in evenwicht zijn. Op eilanden met een klein elektriciteitsysteem zijn het vooral dieselmotoren die voor de flexibiliteit in het elektriciteitsysteem zorgen.

Bolvormige tanks waarin vloeibare waterstof opgeslagen wordt



Gasgestookte centrales, gasturbines en gasmotoren zijn goed regelbaar; je kunt ze makkelijk meer of minder laten produceren, en zo zorgen ze nu voor flexibiliteit in het elektriciteitsysteem

In de Europese Unie als geheel wordt in de wintermaanden 2 tot 4 keer zoveel gas gebruikt als in de zomermaanden, maar in Noord-Europa is dat wel 5 tot 10 keer zoveel. Om in de winter aan de totale gasvraag te kunnen voldoen, moeten de gasopslagen voor de winter zijn gevuld. Daarvoor heeft de EU een opslagcapaciteit ter grootte van ongeveer 25% van het totale jaarlijkse aardgasgebruik ^{[18], [55]}. Ook voor de zogeheten strategische reserve is energieopslag nodig.

In een fossiel energiesysteem zijn de kosten voor energieopslag laag, slechts een gering percentage van de totale kosten. Dat komt doordat de investeringskosten in opslag van kolen, olie en gas laag zijn. Zo bedragen de investeringskosten voor gasopslag in lege zoutkoepels zo'n € 0,20-0,40 per kWh opslagcapaciteit ^[56]. De kosten voor gasopslag in lege gasvelden zijn nog enkele factoren lager. Investeringskosten voor olieopslag in tanks liggen in de orde van € 0,01 per kWh ^[57]. De kosten voor kolenopslag in de open lucht zijn nog veel lager.

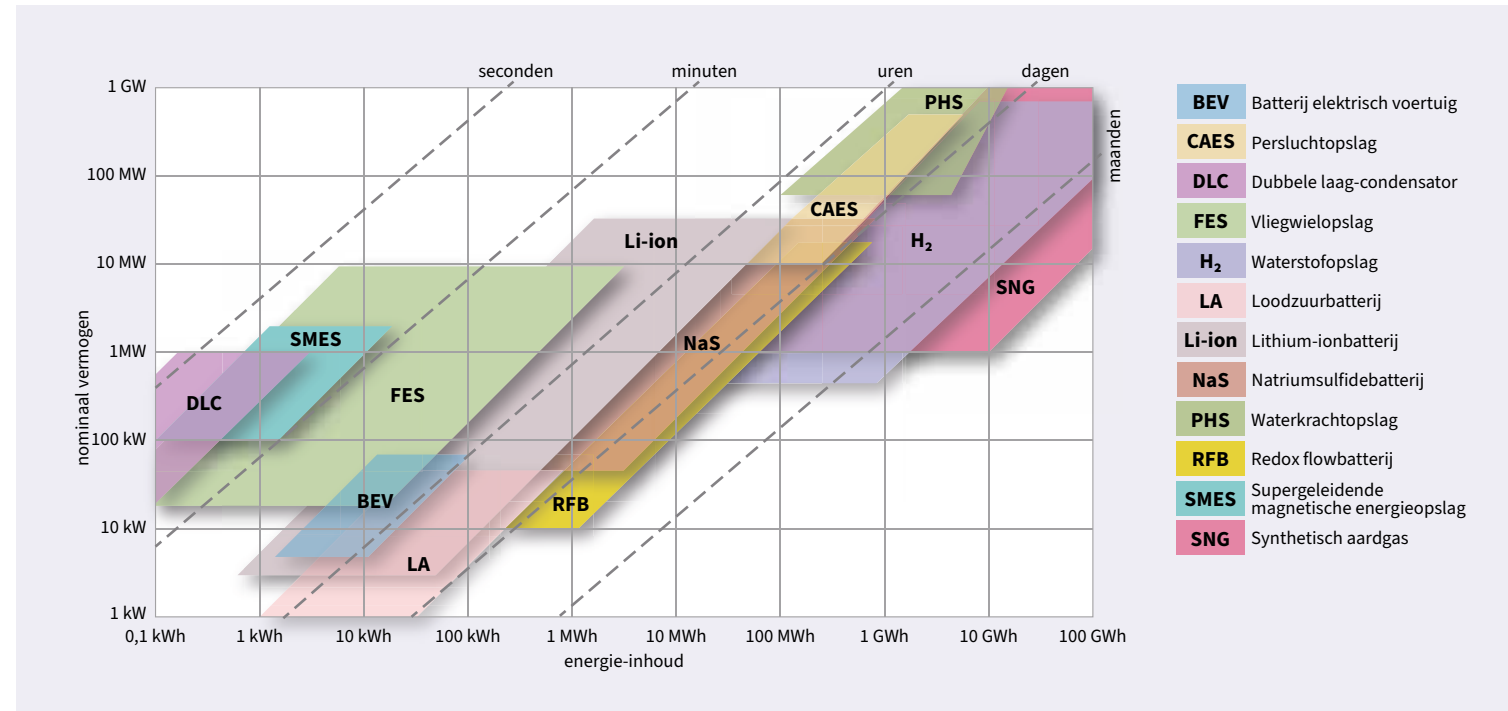
Vormen van energieopslag

Energie kan op verschillende manieren en met verschillende technologieën worden opgeslagen: in chemische energie (kolen, hout, olie, aardgas, waterstof, ammoniak, methanol, enz.), in elektrochemische energie (supercapacitor, batterijen), in mechanische energie (vliegwiel, pumped hydro power oftewel een waterkrachtcentrale met spaarbekken, gecompriëerde lucht), in warmte/koude (warm water, faseovergangsmateriaal ofwel phase-change material (PCM), thermochemische opslag) en in nog enkele andere vormen ^[58].

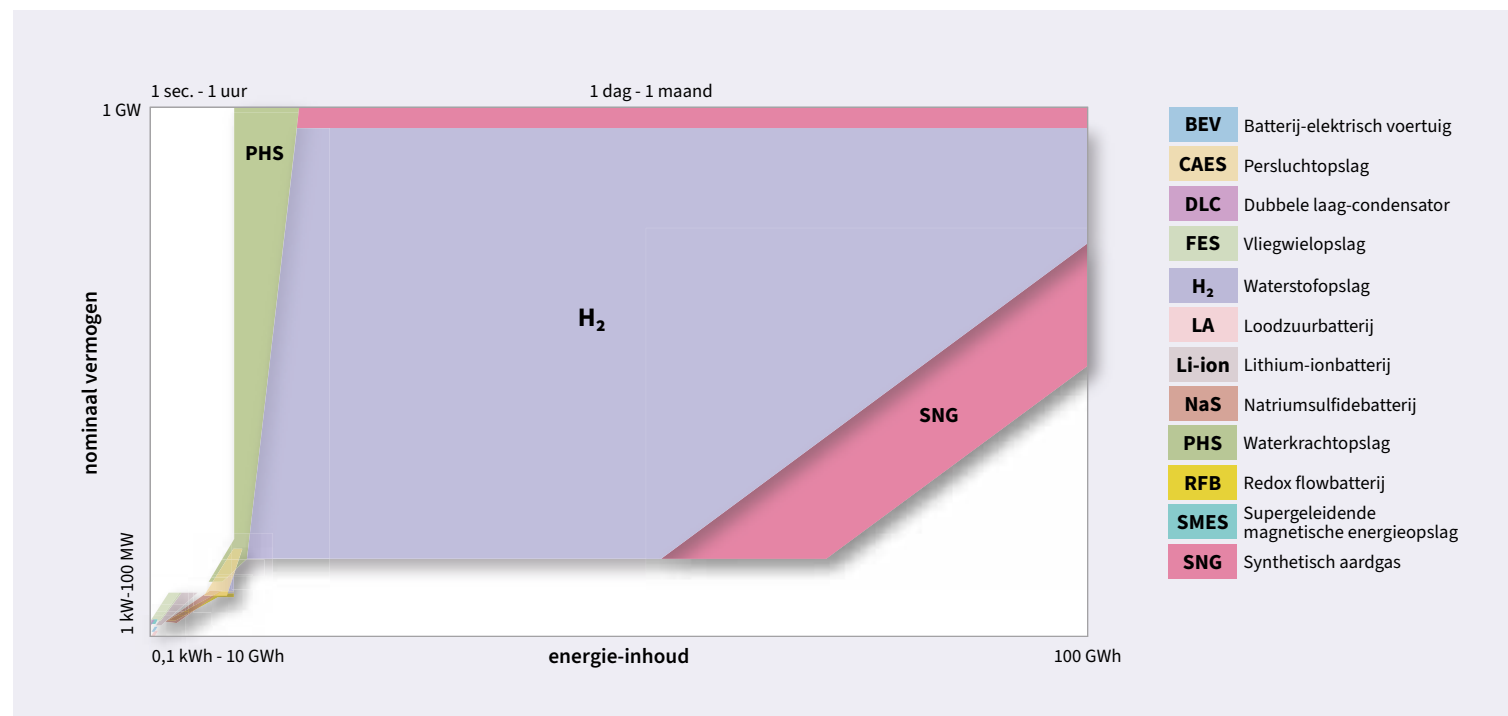
Energieopslag in een energiesysteem kan worden gekenmerkt door drie grootheden: energie-inhoud, vermogen en laad/ontlaad-tijdschaal.

- **Energie-inhoud in kWh.** Deze grootheid wordt in hoge mate bepaald door de energiedichtheid (kWh/l). De opslagmethode of -technologie bepaalt daarnaast hoeveel volume en gewicht je moet toevoegen voor de opslag zélf. Voor olie heb je genoeg aan een tank met een relatief dunne wand, voor gas onder druk heb je een tank nodig met een dikkere wand, die dus meer volume inneemt en zwaarder is.
- **Vermogen in kW.** Deze grootheid staat voor de hoeveelheid energie die je per tijdseenheid uit de opslag kunt halen. Bij een batterij wordt dit bepaald door de vermogenselektronica rond de batterij, bij een tank door de pompcapaciteit. De verhouding tussen opslagvolume en opslagvermogen geeft aan hoe lang de opslag energie kan leveren als je die op vol vermogen leeg trekt. Bij stationaire batterijen wordt hiervoor vaak een periode van vier uur (of een veelvoud van vier uur) aangehouden.
- **Laad-/ontlaad-tijdschaal.** Dit is de tijd dat je de energie kunt opslaan zonder grote verliezen. Vliegtuigen raken al na een uur enkele procenten van hun energie kwijt. Bij warmteopslag in tanks is het verlies afhankelijk van de isolatie, maar over het algemeen geldt een tijdschaal van dagen tot weken. Lithium-ionbatterijen verliezen ongeveer 1-5% van hun energie per maand ^[59]. Sla je moleculen op in een vat, dan treden over het algemeen geen verliezen op in de tijd. De opslag kan maanden tot zelfs jaren duren, zonder energieverlies. Wel zal bij de opslag van vloeibaar gas of waterstof, afhankelijk van de isolatie, een deel van de vloeistof verdampen en weer gasvormig worden. De verdampingssnelheid (boil-off-rate) van een opgeslagen vloeibaar gas, bijvoorbeeld vloeibare waterstof, ligt, afhankelijk van de isolatie, tussen de 0,1 en 2% per dag ^[60]. Omdat er geen moleculen verloren gaan, is dit strikt genomen geen energieverlies. Met heel weinig energie kun je van het verdampte gas, dat nog heel koud is (de 'boil-off'), weer een vloeistof maken.

Energie-inhoud, vermogen en laad/ontlaad-tijdschaal voor verschillende energieopslagsystemen (logaritmische weergave) [61]



Energie-inhoud, vermogen en laad/ontlaad-tijdschaal voor verschillende energieopslagsystemen (lineaire weergave) [61]



De verschillende energieopslagsystemen worden vaak weergegeven in een grafiek met zogeheten dubbellogaritmische assen. Dat geeft een vertekend beeld: het lijkt alsof de energie-inhoud en het vermogen van moleculenopslag maar een paar keer groter zijn dan die van batterijopslag, maar dat is dus niet zo. Gebruik je een grafiek met lineaire assen om dezelfde energieopslagsystemen te vergelijken, dan blijkt dat je alleen chemische energie (moleculen) grootschalig kunt opslaan gedurende langere perioden. In een duurzaam energiesysteem zijn dat dus energie in de vorm van waterstof of afgeleide moleculen en synthetische of bio-brandstoffen.

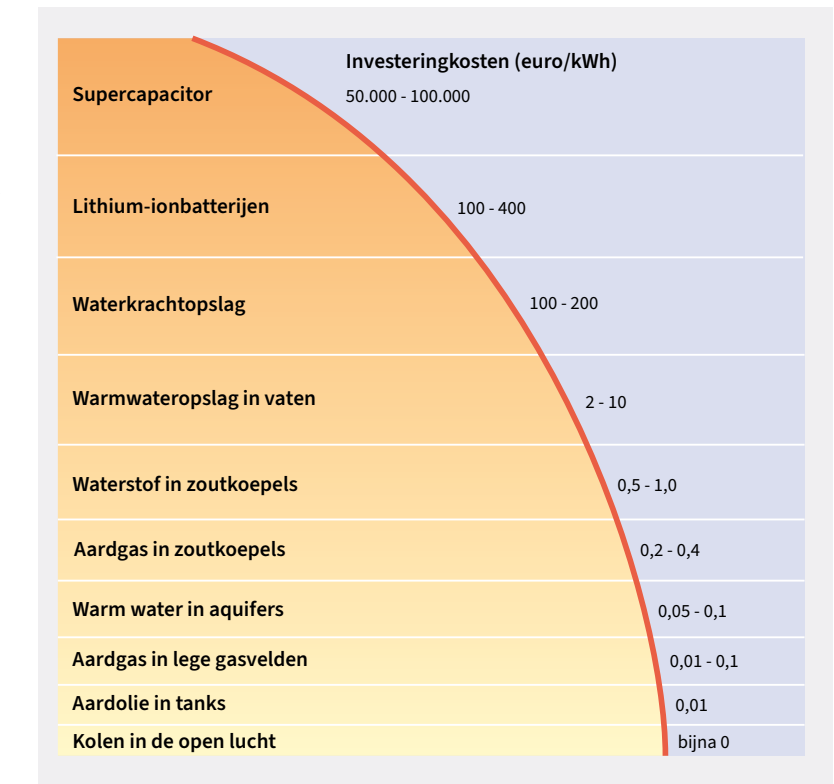
Kosten voor energieopslag

De investeringskosten voor een energieopslagsysteem worden net zoals voor transportkosten ook sterk bepaald door de energiedichtheid per volume (kWh/l). Voor energieopslag van een vloeistof, bijvoorbeeld olie, in een tank onder atmosferische druk zijn de investeringskosten heel laag. Waterstofopslag in zoutkoepels is een factor 50-100 duurder. Weer een factor 100-200 duurder is de opslag van elektriciteit in opgepompt water. Elektriciteit opslaan in batterijen is tot 4 keer zo duur als in opgepompt water. Extreem duur is de opslag van elektriciteit in supercapacitors. Dat doe je dan ook niet met als doel elektriciteit op te slaan, maar om heel snelle elektriciteitsfluctuaties te kunnen opvangen.

De investeringskosten voor de opslag van waterstof in zoutkoepels zijn zo'n 100-400 keer lager dan de investeringskosten voor de opslag van elektriciteit in batterijen

Gesorteerd op kosten blijkt het transport van opeenvolgende energiedragers steeds ongeveer een factor 10 duurder te zijn. Voor opslag zijn de verschillen veel groter: de opslag van opeenvolgende energiedragers is steeds ruwweg een factor 100 duurder: opslag van elektriciteit is 100 keer zo duur als opslag van gasmoleculen, opslag van gasmoleculen is 10-100 keer zo duur als die van vloeistofmoleculen. Er is ook een uitzondering: de opslag van warm water in watervoerende pakketten in de ondergrond (aquifers) is minder duur dan de opslag van elektriciteit in batterijen.

Investeringskosten per kWh energie-inhoud voor verschillende vormen van opslag; bronnen: [56], [57], [62], [63], [64], [65]



TECHNOLOGIE VOOR DE TOEKOMST

Waterstofopslag in ijskristallen

Op zoek naar de 'heilige graal'

Waterstof kunnen we langdurig, in grote hoeveelheden en tegen lage kosten opslaan in ondergrondse zoutkoepels en lege gasvelden. Zijn er op een plek geen ondergrondse structuren aanwezig, dan sla je waterstof daar bovengronds op. Dat kan in tanks, of door waterstof te binden aan materialen of vloeistoffen. Dat is niet alleen veel moeilijker, maar ook veel duurder. Om die reden wordt er veel onderzoek gedaan naar andere mogelijkheden om waterstof op te slaan – op zoek naar de 'heilige graal' van duurzame energieopslag.

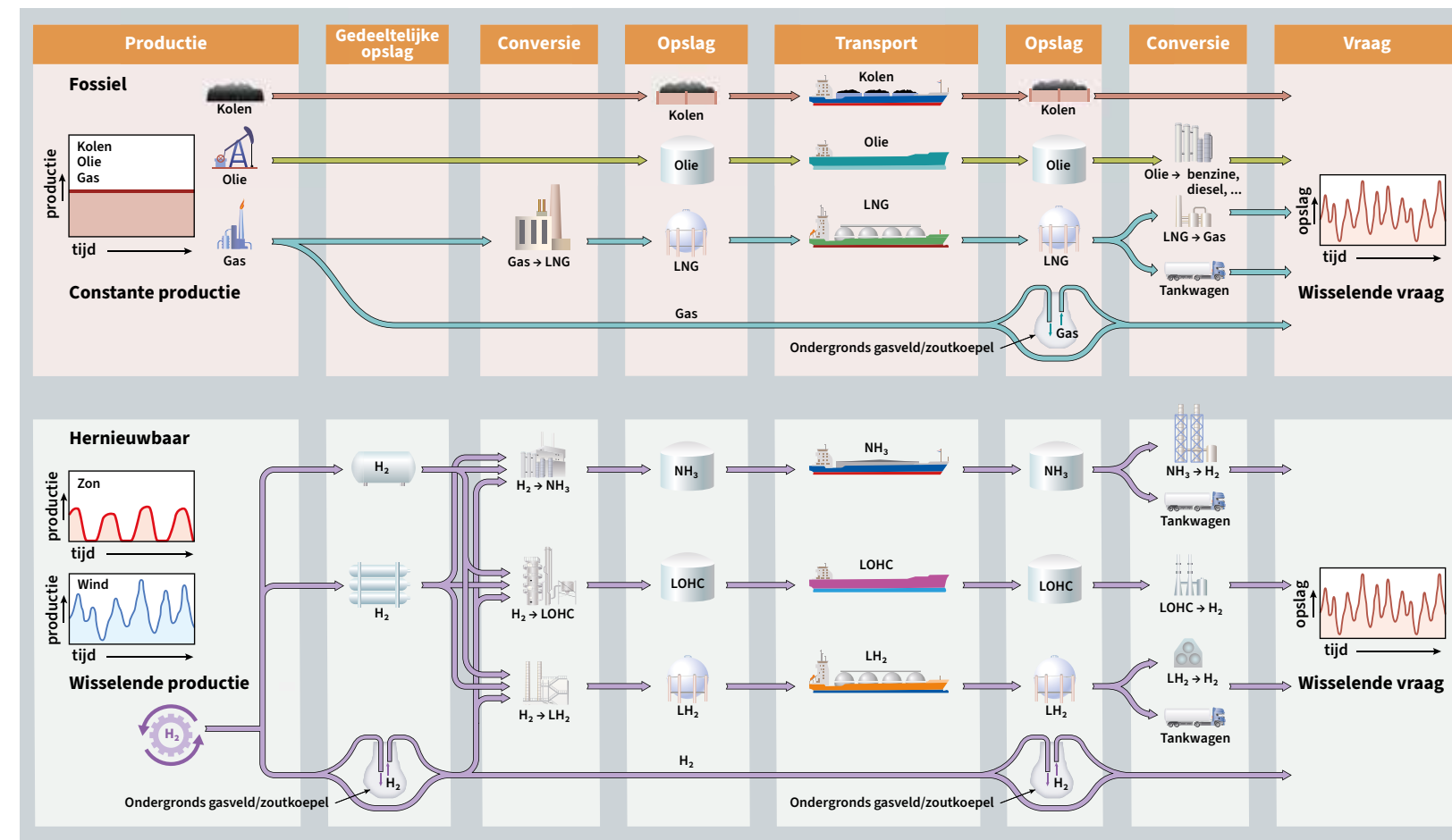
Vlaamse wetenschappers lieten zich inspireren door een natuurlijke manier van gasopslag^[66]. In permafrostgebieden (met een permanent bevroren ondergrond) en diep in de oceanen bestudeerden ze hoe methaan is opgeslagen in ijskristallen. In deze kristallen zit tot wel meer dan 10 gewichtsprocenten methaan opgesloten^[67]. Deze 'natuurlijke' opslag kwam tot stand in de loop van een miljoen jaar. Met succes zetten deze wetenschappers de eerste stappen op weg naar de opslag van waterstof in ijskristallen, gebruikmakend van hetzelfde 'natuurlijke' principe, maar wel een stuk sneller. Om dit in de praktijk te kunnen toepassen is nog veel onderzoek nodig, maar wie weet leidt het uiteindelijk tot een goedkope vorm van waterstofopslag? Met dank aan Moeder Natuur.



Een methaanclathraat: methaan opgeslagen in ijskristallen die zich op de bodem van de oceaan bevinden^[68]

Een fossiel en een duurzaam energiesysteem kun je niet vergelijken op basis van alleen de productiekosten, je moet ook de transport- en opslagkosten meenemen

Benodigde energieopslag in een fossiel en een duurzaam energiesysteem



Energieopslag in een duurzaam energiesysteem

Een duurzaam energiesysteem heeft meer energieopslag nodig dan een fossiel energiesysteem, omdat naast de energievraag ook het energieaanbod (zonn en wind) varieert en niet regelbaar is. Bovendien is een van de twee duurzame energiedragers, elektriciteit, niet zo eenvoudig en goedkoop op te slaan als kolen, aardolie en aardgas. De vraag is dus: hoe kun je een duurzaam energiesysteem inrichten zonder gebruik te maken van fossiele bronnen, die je gemakkelijk, goedkoop, flexibel en regelbaar kunt inzetten? Het simpele antwoord is dat je opslag nodig hebt op twee plekken in het systeem: bij het aanbod én bij de vraag. Bij of in de buurt van grootschalige productie heb je opslagmogelijkheden nodig om het fluctuerende aanbod

om te zetten in een continu aanbod. Daarvoor maak je van elektriciteit een gas, waterstofgas, dat je grootschalig en relatief goedkoop kunt opslaan. Het gas kun je in basislast via een pijpleiding transporteren. Of je zet het vervolgens weer om in een vloeistof, bijvoorbeeld in vloeibaar waterstof of ammoniak, zodat je het per schip kunt transporteren. Na transport richt je het energiesysteem op dezelfde manier in als het huidige, fossiele energiesysteem: waterstofgas, ammoniak, vloeibare waterstof of op een andere manier gebonden waterstof sla je op in de ondergrond of in tanks, zodat je het flexibel en regelbaar kunt inzetten om te allen tijde aan de energievraag te voldoen.

Hoeveel kost 1 kWh Marokkaanse zonne-energie in Duitsland?

Willen we grootschalige, duurzame energieproductiesystemen realiseren, dan kijken we niet alleen naar de productiekosten, maar naar alle kosten: voor productie, opslag, transport, distributie en eindconversie. We zullen groter moeten gaan denken en doen, zowel als het gaat om duurzame energieproductie als om energietransport over grote afstanden.

Hoe komt zonne-energie uit Marokko in Duitsland?

Een voorbeeld: eerst onderzoeken we wat de kosten zijn van basislast-waterstoflevering aan Duitsland, in Marokko geproduceerd uit zonne-energie. Het gaat daarbij om de totale kosten, dus de kosten van productie, opslag en transport van waterstof. We selecteren een gebied waar je goedkoop duurzame energie kunt opwekken met zon en wind én waar je waterstof goedkoop ondergronds kunt opslaan. Het lijkt mogelijk om zoutkoepels (voor opslag van waterstof) te maken in een strook met zoutstructuren voor de kust van Marokko, met een uitloper naar land in het Essaouira Bassin. Nader geologisch onderzoek moet uitwijzen of dat inderdaad kan. Een interessante locatie om zonne- en windenergie op te wekken ligt boven Agadir en loopt tot en met Essaouira. Het is dus een goed gebied om grootschalig opgewekte zonne-energie te gebruiken voor de productie van waterstof. Door waterstof op te slaan in een zoutkoepel, kunnen we het dag/nacht-patroon van de waterstofproductie uit zonne-energie omzetten in een continu aanbod van waterstof. Via de haven van Jorf Lasfar kan deze waterstof door een grote pijpleiding over zee naar Spanje worden getransporteerd, waar de pijpleiding aansluit op de backbone van de Europese waterstofinfrastructuur, die via Frankrijk naar Duitsland loopt. Die zorgt ervoor dat er basislast waterstof wordt geleverd aan Duitsland.

Levering basislast waterstof aan Duitsland

Stel we bouwen op deze plek in Marokko een 100 GW zonne-energiesysteem met een oppervlakte van 1.800 km², waarmee we per jaar 4 miljoen ton waterstof produceren (ca. 11.000 ton per dag). Dan is één zoutkoepel, om ongeveer 6.000 ton waterstof in op te slaan, voldoende voor een continu waterstofaanbod, omdat het vooral om dag-nachtvariaties in aanbod gaat. Via een 48 inch pijpleiding met een capaciteit van 20 GW (HHV) kan deze waterstof over een afstand van 750 km naar Spanje worden getransporteerd, waarna het via de backbone van de Europese waterstofinfrastructuur Duitsland bereikt. De totale transportafstand is dan zo'n 3.000 km.

Waterstof, elektriciteit en warmte uit Marokko

Waterstof die met zonne-energie is geproduceerd in Marokko en als basislast is afgeleverd in Duitsland, kost € 1,40-2,00 per kg. Dit komt overeen met 3,5-5,0 eurocent per kWh. We kunnen uit deze waterstof ook weer elektriciteit maken. We maken nu een inschatting van de kosten voor elektriciteit die in Duitsland wordt geproduceerd met waterstof uit Marokko. We vervoeren de waterstof via een distributienetwerk, om er met een stationaire brandstofcel (met een efficiëntie van 60%) in een woonwijk, weer elektriciteit van te maken. Rekenen we alle kosten door, dan komen we uit op 6,5-9 eurocent per kWh. Voor deze prijs is deze elektriciteit altijd leverbaar, dag en nacht, zomer én winter.

Kostprijs van waterstof uit Marokko die als basislast in Duitsland wordt afgeleverd

| Basislast zonne-waterstof van Marokko naar Duitsland | Kosten voor waterstof (Levelized Cost of Hydrogen) LCoH €/kg H ₂ |
|---|--|
| Aannames | |
| Zonne-waterstofproductie | Kosten zonne-elektriciteit = € 0,01 /kWh Vollast-uren = 2.000 uur/jaar Elektrolysefficiëntie = 50 kWh/kg H ₂ 100 GW Zonne-energie = 4 miljoen ton H ₂ Benodigd oppervlak = 1.800 km ² |
| Opslag in zoutkoepel | Van fluctuerende productie naar basislast; dagelijkse cyclus 1 zoutkoepel van 6.000 ton H ₂ nodig |
| Transport via pijpleiding | Pijpleidingcapaciteit = 20 GW Vollast-uren = 8.000 uur/jaar Pijpleiding naar Spanje = 750 km Totale transportafstand Spanje-Duitsland = 3.000 km |
| Waterstof in basislast afgeleverd in Duitsland | € 1,40-2,00 kg H ₂ = € 0,035-0,050 kWh H ₂ (HHV) |

Elektriciteit gemaakt uit waterstof die is geproduceerd met zonne-energie in Marokko, kost in Duitsland 7,5-10,0 eurocent per kWh met daarbij een halve kWh gratis warmte

We kunnen ook de waterstof tot in woningen en gebouwen brengen en er dáár met een brandstofcel elektriciteit en warmte van maken. In Japan zijn dergelijke brandstofcel-systemen al te koop^[71]. Natuurlijk laten we de brandstofcel alleen elektriciteit leveren wanneer zonnepanelen niet voldoende leveren, dus vooral 's nachts en in de winter ook overdag. De warmte (60-80 °C) die de brandstofcel tegelijkertijd levert, kan 's nachts worden gebruikt om een boiler te vullen met warm tapwater en in de winter ook om de woning te verwarmen. Omdat de brandstofcel in dit scenario niet continu elektriciteit en warmte levert, is in Duitsland ook waterstofopslag nodig om te kunnen voldoen aan de wisselende vraag. Ook is een kleinschalig brandstofcelsysteem met boiler vat duurder dan een stationaire, grotere brandstofcel voor een hele wijk.

Dan kom je uit op een geschatte elektriciteitsprijs van 7,5-10,0 eurocent per kWh, en bovendien heb je dan ook nog ruim een halve kWh gratis warmte. Er zijn meer voordelen. Je hoeft geen kosten te betalen voor het transport van elektriciteit, want je hebt de waterstoftransportkosten al betaald. Je hoeft de elektriciteitsaansluiting in je woning niet te verzwaren voor verwarming. Ook kun je de brandstofcel flexibel inzetten om, wanneer er een tekort is, elektriciteit te produceren voor de wijk. De brandstofcellen zouden zelfs elektriciteit kunnen produceren om de batterijen van elektrische auto's op te laden als er geen andere elektriciteit beschikbaar is. Kijken we nog wat verder in de toekomst, dan mag je omkeerbare brandstofcellen verwachten die werken als brandstofcel én elektrolyser. Prototypes daarvan zijn al beschikbaar^[9]. Is er een overschot aan zonnestroom, dan kun je dit met zo'n omkeerbare brandstofcel omzetten in waterstof en terugleveren aan het waterstofnet. Pieken in de elektriciteitsproductie kun je zo opvangen, zonder het elektriciteitsnet te verzwaren of de zonnepanelen uit te schakelen als ze op een zonnige dag te veel elektriciteit leveren.

A person wearing a blue protective suit and a black hood is sitting on a sand dune in a desert landscape. The person is looking towards the horizon. The background shows rolling sand dunes under a clear blue sky, with some palm trees visible in the distance. The overall scene is bright and sunny.

3

SCHONE ENERGIE, MATERIALEN EN VOEDSEL UIT DE WOESTIJNEN

Woestijnen zijn niet alleen gezegend met een groot aanbod zon en wind, ze bieden ook veel ruimte. Daardoor kun je er goedkoop groene waterstof produceren. Gebruik je daarvoor zuiver water uit zeewater, dan kun je óók drinkwater en irrigatiewater produceren. En uit het restproduct ('brine') kun je allerlei chemische producten en elementen terugwinnen. Met zoet water, zonlicht en kunstmest kun je in de woestijn zelfs landbouw bedrijven. The sky is the limit!

Zonne- en windenergie uit de woestijnen

Woestijnen hebben niet alleen de meeste zonnestraling ter wereld, het waait in veel woestijnen ook nog eens bijzonder hard. Bovendien beslaan woestijnen een groot landoppervlak waar niet veel mensen wonen.

In potentie zijn ze dan ook dé leverancier van duurzame energie voor de wereld, in de vorm van groene elektriciteit en waterstof.

Onuitputtelijke bronnen van zon en wind

Woestijngebieden zoals die in het Midden-Oosten (Saudi-Arabië, de Verenigde Arabische Emiraten, Koeweit, Qatar, Oman, Iran en Irak) en Noord-Afrika (Libië, Algerije en andere) voorzien de wereld nu van olie en gas en hebben nog steeds enorme olie- en gasvoorraden. Als je kijkt naar de enorme en onuitputtelijke bronnen van zonne- en windenergie in deze regio, ligt een overgang van olie en gas naar hernieuwbare energie echter voor de hand ^[37]. Het totale primaire energiegebruik van de wereld bedroeg in 2019 168.000 TWh, oftewel 606 EJ ^[30]. Met zonnepanelen op minder dan 10% van het oppervlak van de Sahara-woestijn zou je evenveel kunnen produceren. Bovendien zijn de windsnelheden op veel plaatsen in de woestijnen hoog, zodat je er ook goedkoop windenergie kunt opwekken.

Op zo'n 10% van het oppervlak van de Sahara kun je voldoende zonne-energie produceren voor de hele wereld

De woestijnen kunnen de wereld dus ook in de toekomst ruimschoots voorzien van goedkope en betrouwbare duurzame energie. De kosten voor zonne-elektriciteit, en wellicht ook die voor windelektriciteit, kunnen binnen

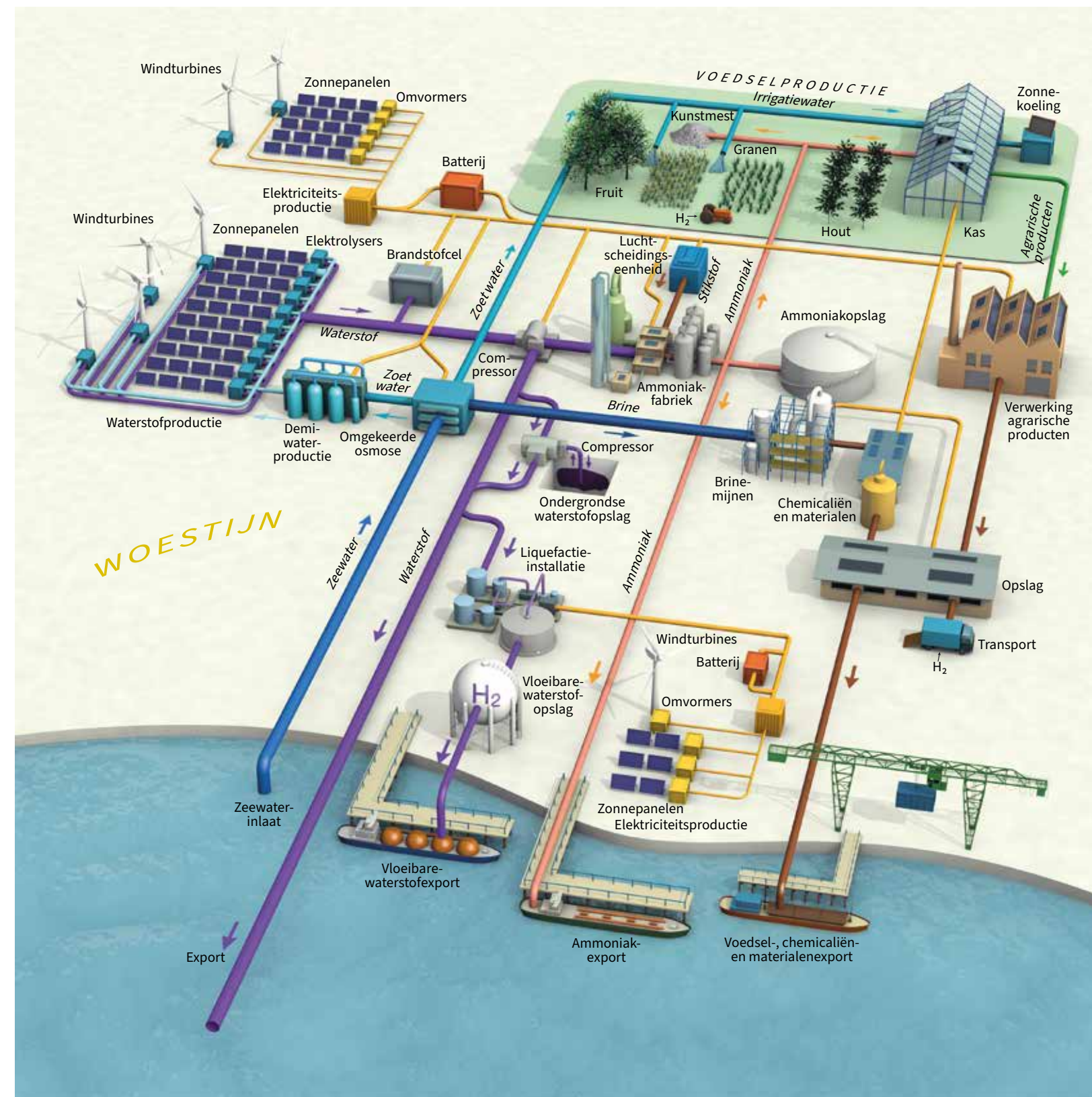
afzienbare tijd dalen tot onder de 1 dollarcent per kWh ^[45], ^[46], ^[47]. De uitdaging is om deze goedkope hernieuwbare energie te transporteren naar lokale gemeenschappen, dorpen en steden, maar ook te kunnen exporteren naar landen die verder weg liggen.

Elektriciteit uit de woestijn kun je natuurlijk gebruiken in de regio zelf. Maar door elektriciteit om te zetten in waterstof, kun je deze zonne- en windenergie ook kosteneffectief en grootschalig opslaan en over grote afstanden transporteren. Waterstof produceer je door elektrolyse van water, gebruikmakend van met zon en wind opgewekte elektriciteit. Maar hoe kom je in de woestijn aan water? En wat hebben de lokale gemeenschappen, dorpen en steden aan waterstof?

Impuls voor lokale gemeenschappen

Als we de ontwikkeling van duurzame energie in woestijnen slim aanpakken, snijdt het mes aan twee kanten: de productie van groene elektriciteit en waterstof wordt dan enerzijds ingezet ten behoeve van de lokale gemeenschappen, dorpen en steden, en dient anderzijds voor export in de vorm van waterstof of afgeleide waterstofproducten naar andere delen van de wereld. Groene elektriciteit en waterstof in woestijngebieden zijn namelijk niet alleen goedkope, schone energiedragers voor industrie, transport, kracht, licht en verwarming/koeling. Ze kunnen

Woestijnen als bron voor schone energie, materialen en voedsel



daarnaast ook zorgen voor een goede, betrouwbare watervoorziening én het mogelijk maken een scala aan landbouwproducten, biochemische producten, brandstoffen en materialen te produceren.

Productie van zonnestroom

De productie van zonnestroom heeft de laatste jaren een enorme vlucht genomen, onder meer door de aanleg van grootschalige zonneparken in woestijngebieden. De grootste parken zijn tientallen vierkante kilometers groot en hebben een capaciteit in de orde van enkele gigawatts. Zonnepanelen produceren elektriciteit doordat de invallende zonnestraling elektronen losmaakt uit een materiaal,

meestal silicium. Deze zonnepanelen leveren gelijkstroom en worden in serie geschakeld om tot een hoger voltage te komen. Een omvormer in het zonnepark zet de gelijkstroom van een aantal rijen, 'strings', van zonnepanelen om in wisselstroom met een nog hoger voltage. De wisselstroom van de omvormers op een zonnepark wordt vervolgens met 'infield' kabels naar een centraal transformatorstation getransporteerd, waar het voltage zo ver wordt verhoogd dat de zonnestroom over grotere afstanden, zonder veel verlies, naar steden en industrie kan worden getransporteerd. De bedrijfstijd, uitgedrukt in vollast-uren per jaar (een eenheid voor de effectieve jaaropbrengst), bedraagt voor zonneparken in

Het Mohammed Bin Rashid Al Maktoum-zonnepark in Dubai, met 3 GW aan zonnepanelen en CSP zonne-energiesystemen ^[72]



Windpark bij Golmud, provincie Qinghai, China ^[73]

woestijngebieden tussen de 2.000 en 2.300 uur – ruim twee keer zoveel als in Duitsland. Een zonnepark van 1 GW brengt dus jaarlijks tussen de 2 en 2,3 TWh aan elektriciteit op.

Een zonnepaneel in de Sahara levert 2 tot 2,5 keer zoveel elektriciteit als een zonnepaneel in Duitsland

Naast zonnepanelen zijn er ook zonnecentrales die invallende zonnestralen bundelen met spiegels. Deze zogeheten 'Concentrating Solar Power' (CSP)-zonnecentrales richten het gebundelde zonlicht op een pijpleiding of een centraal vat. Hierdoor wordt een vloeistof tot hoge temperaturen verhit. Met een thermische cyclus, zoals je die ook aantreft in traditionele elektriciteitscentrales, kun je hieruit elektriciteit maken. De productie van elektriciteit is met deze systemen duurder dan met zonnepanelen. Maar het voordeel is dat je de hete vloeistof kunt opslaan in een vat, waardoor je er ook 's nachts elektriciteit mee kunt produceren.

Naar verwachting worden batterijen echter zo goedkoop dat je er overdag met zonnepanelen opgewekte elektriciteit mee kunt opslaan, om die 's nachts te gebruiken. De vraag is of het gebruik van batterijen in de woestijnen goedkoper wordt dan CSP voor het oplossen van het dag/nacht-opslagprobleem.

Productie van elektriciteit uit wind

In verschillende woestijngebieden waait het hard, zowel in woestijnen zélf als in woestijngebieden aan de kust, door sterke zeewinden. Sterke zeewinden treden bijvoorbeeld op in California en rond de Rode Zee. Zeewind kan voor hoge windsnelheden zorgen als boven de woestijn warme lucht opstijgt en daar dus een lagedrukgebied ontstaat. Koude lucht van boven zee stroomt dan naar dit lagedrukgebied toe. De hoogste windsnelheden treden daarbij op in de namiddag. Omdat je derhalve in de namiddag, avond en nacht de meeste elektriciteit kunt produceren, vullen wind- en zonne-energie elkaar in de tijd goed aan: overdag de meeste zonne-energie, in de namiddag, avond en nacht de meeste windenergie.

Windturbines zijn de afgelopen jaren steeds groter geworden. Tegenwoordig zijn capaciteiten mogelijk tot wel 15 MW. Vanwege zog-effecten (achter windturbines ontstaat een luwte en gaat de lucht wervelen) staan grote windturbines al gauw 1 km uit elkaar. Een windpark van 1 GW of meer neemt daarom al gauw tientallen vierkante kilometers in beslag. Maar anders dan bij zonneparken zit er tussen de turbines nog veel ruimte die je voor andere doelen kunt gebruiken, bijvoorbeeld voor landbouw. De elektrische systeemconfiguratie van een windpark is vergelijkbaar met die van een zonnepark. Windturbines leveren 'onregelmatige' wisselstroom, waarvan de frequentie fluctueert met het toerental. Een omvormer in de windturbines zet de wisselstroom om in gelijkstroom met een laag voltage, en vervolgens naar 'uniforme' wisselstroom van 50 of 60 Hz met een hoger voltage. Een centraal transformatorstation verhoogt het voltage nog verder, wat transport van elektriciteit over grotere afstanden met minder verlies mogelijk maakt. Op een goede locatie bedraagt de bedrijfstijd van een windpark tussen de 4.500 tot 5.500 vollast-uren. Een windpark van 1 GW produceert dus tussen de 4,5 en 5,5 TWh elektriciteit per jaar.

Productie van waterstof uit zon en wind

Zonne- en windenergie kun je ook omzetten in waterstof, waardoor grootschalige opslag en transport over heel grote afstanden mogelijk worden op een kosteneffectieve manier. Nu heerst het idee dat je naast een groot zonne-

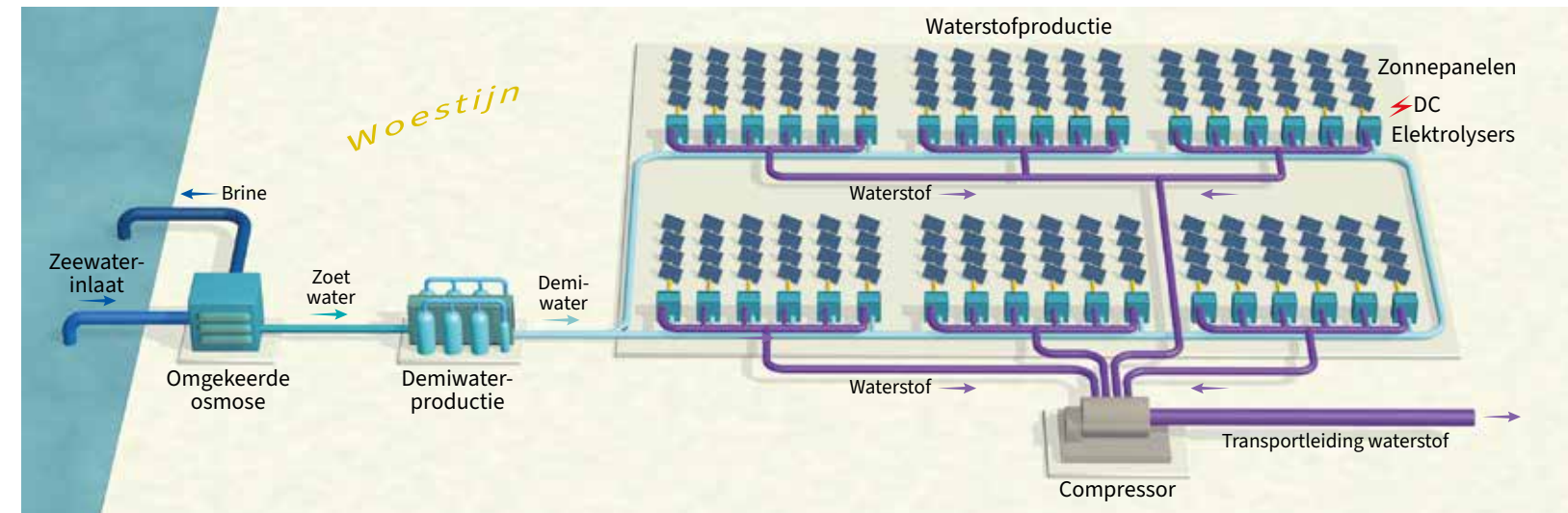
De kosten van waterstofproductie kunnen omlaag door integratie van een rij zonnepanelen of een windturbine met de elektrolyser

en/of windpark een grootschalige elektrolyse-installatie neerzet die waterstof produceert. Maar de kosteneffectiviteit kan worden verbeterd door de gelijkstroom elektriciteitsproductie uit zonnepanelen en windturbines direct te gebruiken in elektrolyzers voor de productie van waterstof. We 'integreren' dus de elektrolyser met elke windturbine of met een string zonnepanelen.

Elektrolyserinstallaties zijn opgebouwd uit modulaire eenheden: 'stacks' met een vermogen tussen 1 en 10 MW, die werken op gelijkstroom. Zonnepanelen produceren gelijkstroom en na de eerste conversiestap doen windturbines dat ook. Integreer je nu de elektrolyserstacks in plaats van de DC/AC (gelijkstroom naar wisselstroom)-omvormers in een zonnepark of een windturbine, dan vermijd je meerdere elektriciteitsconversiestappen. Bovendien kun je dan standaard zonne- en windwaterstofproducten toepassen en ontwikkel je zonne- en windwaterstofparken. Door deze geïntegreerde aanpak zullen de kosten van waterstofproductie aanzienlijk dalen.

Voor waterstofproductie is water nodig. Daarom moet je in het zonne- of windpark een infield netwerk van pijpleidingen aanleggen om gedemineraliseerd water naar de elektrolyzers aan te voeren. Daarnaast is een infield netwerk van waterstofpijpleidingen nodig om de waterstof van de elektrolyzers af te voeren. Daar staat tegenover dat er geen infield elektriciteitsnetwerk meer nodig is. Bij de elektrolyserstacks heb je daarnaast wel een kleine elektriciteitsvoorziening nodig, bijvoorbeeld in de vorm van een batterij. Wat wel nog centraal moet gebeuren, zijn gascleaning en compressie (om waterstof met de juiste specificaties en de juiste druk te kunnen voeden aan het waterstoftransportnet) en de productie van gedemineraliseerd water.

Waterstofproductiepark, modulaair opgebouwd uit rijen zonnepanelen met geïntegreerde elektrolyserstacks



TECHNOLOGIE VOOR DE TOEKOMST

Fotolyse

Direct waterstof produceren uit zonlicht en water

Een nieuwe ontwikkeling is het direct gebruik van zonlicht, fotonen, voor het splitsen van een watermolecuul in waterstof en zuurstof. Daarmee sla je één tussenstap over, namelijk de elektriciteitsproductie. Dit proces staat bekend als fotolyse, of foto-elektrochemische conversie. Verschillende universiteiten in de wereld onderzoeken en verbeteren dit proces, waardoor steeds hogere efficiënties mogelijk blijken^[74]. Deze ontwikkeling is vergelijkbaar met de snelle verbeteringen van fotovoltaïsche zonnepanelen in de jaren tachtig en negentig van de vorige eeuw. Tegenwoordig ligt de efficiëntie van fotolyse al in de buurt van die van zonnepanelen gecombineerd met elektrolyzers. Maar er zijn ook nog problemen te overwinnen. Zo maken de panelen gebruik van zeldzame en dure katalysatormaterialen en neemt de efficiëntie van het proces af in de loop van de tijd. Enkele start-ups brengen deze foto-elektrochemische panelen al op de markt.

Zonnepaneel van SOLHYD, dat direct uit zonlicht waterstof produceert^[75]



Water in de woestijnen

Om waterstof te produceren is schoon, gedemineraliseerd water nodig. Maar omdat dit in woestijngebieden meestal niet voorhanden is, kunnen we zeewater aanvoeren en daar gedemineraliseerd water van maken. De kosten hiervoor blijken maar enkele procenten te bedragen van de totale waterstofproductiekosten.

Onuitputtelijke bronnen van zon en wind

In veel landen met grote woestijngebieden is er sprake van waterschaarste. In woestijnen regent het weinig en valt de regen bovendien vaak geconcentreerd, in bepaalde periodes. In sommige woestijngebieden zijn er ondergrondse waterreservoirs in de vorm van watervoerende bodemlagen, maar lang niet overal. De reservoirs die er wel zijn, wil je zo veel mogelijk ongemoeid laten.

Water kan via pijpleidingen over grote afstanden worden getransporteerd. Zelfs transport over honderden tot duizenden kilometers is technisch goed mogelijk en relatief goedkoop: 100 km watertransport kost ruwweg € 0,05 per kubieke meter (= 1.000 liter) ^[76].

In de relatieve nabijheid van woestijngebieden ligt vaak een zee, die kan dienen als bron van water. Net als zoet water kun je ook zeewater goedkoop transporteren over grote afstanden. Met omgekeerde osmose kun je uit dit zeewater zoet water bereiden. In veel landen met waterschaarste wordt dit procedé al toegepast voor het produceren van drinkwater.

Zoet water maken via omgekeerde osmose

Van zeewater zoet drinkwater maken kan door middel van omgekeerde osmose. Bij deze behandeling scheid je zouten en andere verontreinigingen van zeewater of afvalwater. Dat gebeurt met behulp van druk en een membraan waar bijna alleen watermoleculen doorheen

worden geperst. Naast zoet water blijft dan een zoutere reststroom over: de brine.

Zoals de naam al zegt, is omgekeerde osmose de omgekeerde vorm van osmose. Osmose is de natuurlijke neiging van water met opgeloste zouten om door een membraan te stromen van een lagere naar een hogere zoutconcentratie. Dit proces komt op veel plekken in de natuur voor. Planten gebruiken osmose om water en voedingsstoffen uit de bodem op te nemen. De nieren van mensen en andere dieren gebruiken osmose om water uit het bloed op te nemen. En je kunt osmose ook gebruiken om elektriciteit op te wekken, door zoet water via een membraan in zout water te laten stromen.

Om via omgekeerde osmose drinkwater te maken van zeewater, heb je ongeveer 2,5-3,5 kWh/m³ elektriciteit nodig. De totale kosten – energiekosten, investeringskosten en onderhoudskosten – om op deze manier 1 m³ drinkwater te maken liggen tussen de € 1,00-1,50 /m³ ^{[77], [78]}.

Gedemineraliseerd water

Voor de productie van waterstof via elektrolyse is heel schoon water nodig: gedemineraliseerd water. Gewoon drinkwater is daarvoor nog niet schoon genoeg. Om gedemineraliseerd water te maken vindt na de omgekeerde osmose nog een ander proces plaats, namelijk 'continuous electro de-ionization'. Daardoor zijn het energiegebruik en de kosten ervan hoger dan die voor



Interieur ontziltingsinstallatie

het maken van drinkwater. Om gedemineraliseerd water te maken uit zeewater heb je zo'n 3-4 kWh/m³ nodig. De kosten van de productie van gedemineraliseerd water uit zeewater liggen rond de € 2,00/m³. Het transport van 1 m³ zeewater over een afstand van 1.000 km kost € 0,50/m³. Om 1 m³ gedemineraliseerd water te maken, heb je ruwweg 2 m³ zeewater nodig. De reststroom, de brine, is ook 1 m³ groot en zal weer worden afgevoerd naar zee. Alles bij elkaar kost het transport van zeewater en brine over 1.000 km € 1,50 per m³ gedemineraliseerd water. Tel je daar € 0,50/m³ voor pomp-

De kosten van gedemineraliseerd water voor waterstofproductie in de woestijn, waarvoor zeewater wordt gebruikt dat over 1.000 km is aangevoerd, bedraagt maar enkele procenten van de totale waterstofproductiekosten.

energie bij op, dan zijn de totale kosten voor de bereiding en levering van gedemineraliseerd water aan de elektrolyser zo'n € 4,00/m³ (€ 2,00/m³ productiekosten plus € 2,00/m³ transportkosten).

De vraag is hoe deze kosten doorwerken in de productiekosten van waterstof. Ook dat kunnen we uitrekenen. Voor de productie van 1 kg waterstof is theoretisch 9 liter gedemineraliseerd water nodig. Houden we rekening met een verlies van 1 liter, dan is er uiteindelijk 10 liter gedemineraliseerd water nodig voor elke kg waterstof die je produceert. Uit 1 m³ (of 1.000 liter) gedemineraliseerd water kun je dus 100 kg waterstof maken. De kosten voor gedemineraliseerd water bedragen dan € 0,04/kg H₂. Bij een productieprijs van € 1,00/kg waterstof, is het aandeel voor gedemineraliseerd water (geproduceerd uit zeewater en getransporteerd over 1.000 km) slechts 4%.

Specificatie van de kosten van gedemineraliseerd water uit zeewater als bron, voor de productie van waterstof via elektrolyse

| | Afstand vanaf zee (km) | Kosten (€/m ³ gedemineraliseerd) |
|---|------------------------|---|
| Transportkosten zeewater (2 m ³ zeewater per m ³ gedemineraliseerd water) | 1.000 | 1,0 |
| Productiekosten gedemineraliseerd water | | 2,0 |
| Transportkosten brine (1 m ³ brine per m ³ gedemineraliseerd water) | 1.000 | 0,5 |
| Overige kosten (pompenergie) | | 0,5 |
| Totaal (€/m³ gedemineraliseerd water) | | 4,0 |
| Kosten van gedemineraliseerd water voor productie van 1 kg waterstof (€/kg waterstof) | | 0,04 |

Chemische producten en materialen uit zeewater

Zeewater bestaat voor het grootste deel uit water, maar bevat daarnaast veel andere elementen die je kunt benutten, zoals kalium voor de werking van elektrolyzers en batterijen. Daarnaast bevat zeewater onder andere silicium (als grondstof voor zonnecellen), lithium (als grondstof voor moderne batterijen), magnesium (als opslagmedium voor waterstof) en uranium (als bron voor kernenergie).

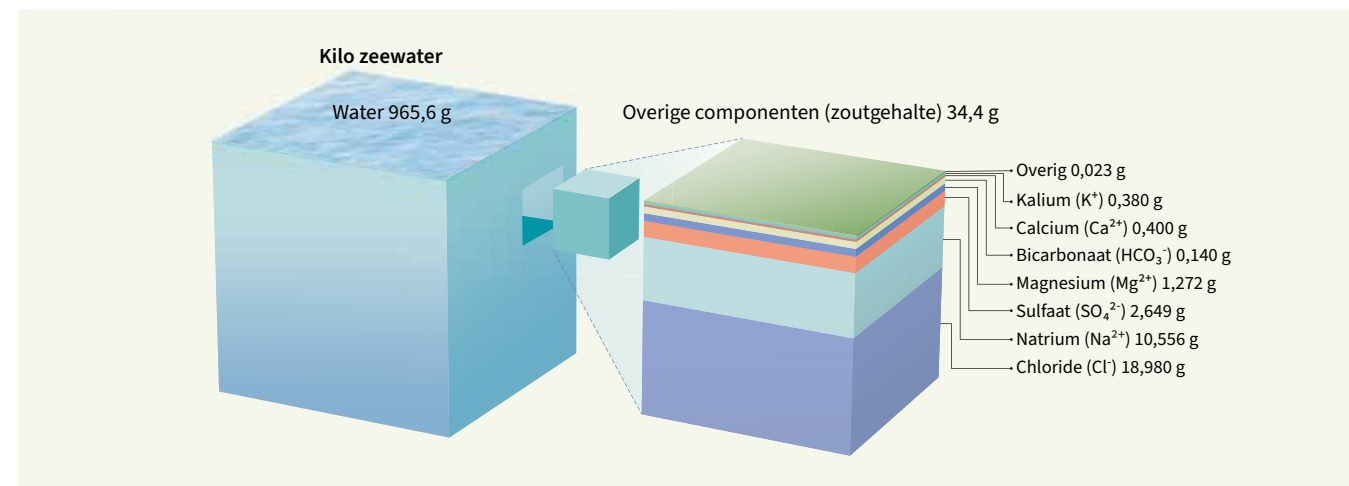
Het figuur toont de afzonderlijke elementen, zoals natrium (Na), kalium (K) en magnesium (Mg), die aanwezig zijn in zeewater in de vorm van zouten, zoals natriumchloride oftewel keukenzout (NaCl), magnesiumchloride (MgCl) en kaliumchloride (KCl). Eeuwen geleden werden deze zouten al gewonnen door het zeewater in grote zoutpannen te laten stromen en te laten indampen door de zon. Tegenwoordig kun je via elektrochemische processen de afzon-

derlijke elementen (Na, K) maar ook natriumhydroxide (NaOH) en kaliumhydroxide (KOH) maken uit deze zouten.

Elektrolyzers voor chloorproductie uit zout

De productie van chloor uit natriumchloride vindt plaats via elektrolyse. Chloorfabrieken zijn dus elektrolyzers die in water (H₂O) opgelost zout (NaCl) ontleden in chloor (Cl₂) en natriumhydroxide (NaOH). Tegelijkertijd wordt ook

Samenstelling van 1 kilo zeewater ^[79]



Een elektrolyser voor de productie van waterstof uit water is in essentie hetzelfde als een elektrolyser voor de productie van chloor uit zout

water (H₂O) ontleed in waterstof (H₂) en zuurstof (O₂) – de bijproducten van chloorproductie. Een elektrolyser voor de productie van waterstof is in essentie hetzelfde als een elektrolyser voor de productie van chloor. Het verschil is dat je voor de productie van waterstof water gebruikt zónder opgeloste zouten.

Het meest gebruikte type elektrolyser voor de productie van chloor en waterstof is de alkaline-elektrolyser. Dit type elektrolyser gebruikt een elektrolyt die bestaat uit water en kaliumhydroxide. Ook alkalinebatterijen gebruiken deze elektrolyt, die af en toe moet worden verversd. Het is daarom interessant dat je uit zeewater kaliumhydroxide kunt produceren, een chemische stof die essentieel is voor alkaline-elektrolyzers én alkalinebatterijen.

Waardevolle elementen in zeewater

Zeewater bestaat voor een klein deel uit elementen anders dan water. Voor veel van deze elementen bestaan nuttige toepassingen. Zo zijn voor energietechnologieën de volgende elementen van groot belang: silicium (grondstof voor zonnecellen), lithium (grondstof voor moderne batterijen), borium (kandidaat voor waterstofopslag), rubidium (grondstof voor ultradunne batterijen) en uranium (bron voor kernenergie) ^[80].

De concentraties van deze elementen liggen in de orde van microgrammen tot milligrammen per liter zeewater. De concentratie lithium in zeewater is bijvoorbeeld ruwweg 0,1 mg per liter. Voor 1 kg lithium is dus 1 miljoen liter zeewater nodig. En omdat lithium niet in een vrije vorm in zeewater zit, heb je ook een chemisch proces nodig om lithium uit zeewater te kunnen winnen.

Zero liquid discharge

Nu lozen veel omgekeerde-osmose-installaties de brine via een pijpleiding in zee, waar deze snel mengt met zeewater. Worden grote hoeveelheden geloosd of vindt de lozing plaats in kwetsbare natuurgebieden, zoals koraalriffen,

Brine mining

De brine die na omgekeerde osmose overblijft (een halve liter per liter zeewater), kun je verder indikken door er nog meer water uit te halen, bijvoorbeeld door verdamping. Via opeenvolgende processen en technieken kun je daarna uit de ingedikte brine diverse zouten, chemische stoffen en waardevolle elementen terugwinnen. Wat uiteindelijk overblijft, is een waterstroom met hoge concentraties van elementen die er nog niet uit zijn gehaald. Er zijn verschillende studies gedaan naar deze zogeheten 'brine mining'. Daaruit blijkt dat de kosten relatief hoog zijn ten opzichte van de opbrengsten. Mogelijk ontstaat er wel een positieve businesscase als er grotere waterstromen worden behandeld of als de prijzen van de te winnen stoffen verder stijgen ^[81].

dan kunnen negatieve effecten optreden, waaronder het verbleken van koraal. Daarom wordt nu nagedacht over en gewerkt aan 'zero liquid discharge' – helemaal geen lozing van brine in zee. Dit uitgangspunt wordt bijvoorbeeld gehanteerd bij de bouw van NEOM, een nieuwe stad in Saudi-Arabië ^[82].

Uit zeewater kun je kaliumhydroxide produceren, een essentiële stof voor de werking van alkaline-elektrolyzers en -batterijen

Om dit voor elkaar te krijgen, moet al het water uit de geconcentreerde stroom worden verwijderd. Dit kan bijvoorbeeld door de brine in te dampen onder invloed van de zon, wat in de woestijn geen probleem is. De resterende vaste stof kan worden opgeslagen om er in later stadium waardevolle elementen uit te halen. Loos je geen brine in zee, dan hoeft je ook geen kosten te maken voor een retourleiding, pompen en een lozingsstation.

Landbouw in de woestijnen

Om voedsel te telen heb je zonlicht, water en voedingsstoffen, zoals ammoniak, nodig. Zelfs in een woestijn kun je daar in ruime mate over beschikken. Landbouwmachines kun je aandrijven met waterstof of ammoniak, kassen kun je koelen met zonnewarmte. Een impuls voor zowel de lokale economie als de verduurzaming van woestijngebieden.

Alles wat nodig is om voedsel te telen, kun je in woestijngebieden beschikbaar maken. Voor het telen van bomen en gewassen zijn zonlicht, water en voedingsstoffen (stikstof, fosfor en kalium) nodig. Zonlicht is er in woestijnen in overvloed, maar water en voedingsstoffen niet. Maak je de pijpleiding voor het transport van zeewater voor de elektrolyzers een stuk groter, dan kun je niet alleen gedemineraliseerd water maken, maar ook drinkwater en irrigatiewater. Het enige dat nu nog ontbreekt, zijn voedingsstoffen, bijvoorbeeld in de vorm van kunstmest. Het hoofdbestanddeel daarvan is echter ammoniak en dat kun je maken uit waterstof en stikstof uit de lucht.

Productie van ammoniak in woestijnen

Ammoniak wordt gemaakt via het Haber-Boschproces. Bij hoge temperaturen en drukken ontstaat in dit proces ammoniak (NH_3) uit waterstof (H_2) en stikstof (N_2). Een deel van de in woestijngebieden geproduceerde waterstof kan hiervoor worden gebruikt. De benodigde stikstof kun je uit de lucht halen; die bestaat immers voor 80% uit stikstof. Dit gebeurt met een luchtscheidingsunit die werkt op goedkope, met zon en wind opgewekte elektriciteit. Ammoniakproductie in de woestijn kan zo niet alleen tegen lage kosten, maar ook zonder CO_2 -emissies.

Ammoniak voor energieopslag, brandstof en export

Van ammoniak kun je kunstmest maken, maar het is ook een energiedrager en een chemisch product. Doordat vloeibare ammoniak een hoge energiedichtheid heeft en het al vloeibaar is bij een temperatuur van $-33\text{ }^\circ\text{C}$ of een druk van 8 bar, is ammoniak zeer geschikt om energie mee op te slaan in tanks. Daarnaast is ammoniak een bruikbare brandstof voor dieselmotoren en gasturbines. Bij de verbranding komt dan geen CO_2 vrij, maar wel stikstofoxiden (NO_x). Met een katalysator kun je deze NO_x weer afvangen. Vloeibare ammoniak kun je ook goed en goedkoop vervoeren per schip of via pijpleidingen^[83]. Vervoer per schip gebeurt nu al over de hele wereld. Zo kun je dus groene waterstof in de vorm van groene ammoniak over de wereld verschepen. Per pijpleiding gebeurt het ook al. In de Verenigde Staten ligt een netwerk van ammoniakpijpleidingen dat loopt van het zuiden (New Orleans) door het Midden-Westen naar het noorden, over een afstand van zo'n 3.200 km. Omdat deze pijpleiding de 'corn belt' van de Verenigde Staten doorkruist, kunnen de boeren de ammoniak bij wijze van spreken rechtstreeks aftappen^[84].

Landbouwproducten uit de woestijn

We hebben laten zien dat je, naast zonlicht, in de woestijn ook kunt beschikken over water en voedingsstoffen. Welke landbouwgewassen kun je daar nu mee telen? Het verrassende antwoord luidt: vrijwel alles. Op woestijnzand kun je bomen telen voor houtproductie, maar ook fruitbomen, olijfbomen en granen. En in kassen kun je groenten, bloemen en planten verbouwen, die je vanwege de grote hitte wel moet koelen. Daarnaast is het interessant om snelgroeiende gewassen zoals olifantsgras te telen. Die kunnen dienstdoen als grondstof voor tal van biochemische producten en synthetische brandstoffen.

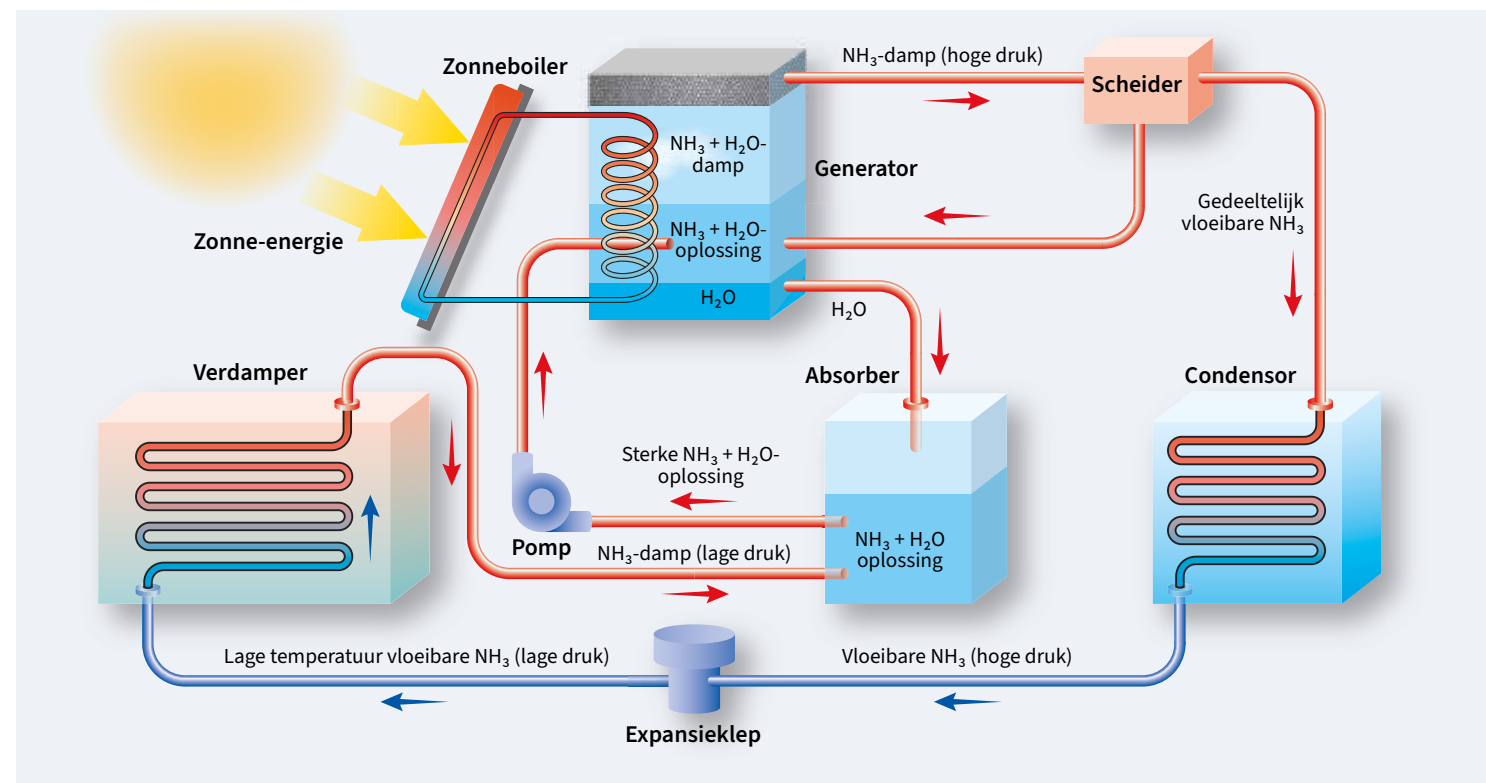
Bewerking van land- en landbouwproducten

Om landbouw te bedrijven moet je het land kunnen bewerken en de gewassen kunnen oogsten, verwerken,

bewaren en uiteindelijk vervoeren. Hier heb je landbouwwerktuigen voor nodig, zoals tractoren, combines en oogstmachines. Daarna ga je de landbouwproducten bewerken: planken maken van bomen, meel van graan en jus d'orange van sinaasappels. Deze eindproducten moeten worden opgeslagen (fruit en groente in gekoelde vorm) en uiteindelijk vervoerd naar hun bestemming, bijvoorbeeld met trucks. Al deze machinale handelingen kun je aandrijven met zonne- en windenergie. Zo kunnen mobiele landbouwmachines, zoals tractoren, combines en trucks, rijden op waterstof – of in een eerste fase op ammoniak. Stationaire bewerkingsmachines, voor bijvoorbeeld zagen, malen en sorteren, werken op elektriciteit. En koelen kan met zonnewarmte, aangedreven door een absorptiekoelmachine.

Oase in de woestijn





Een door zonnewarmte aangedreven koelmachine ^[85]

Zonne-energie voor absorptiekoeling

Het klinkt misschien een beetje tegenstrijdig, maar in de woestijn kun je kassen, koelhuisen, hallen en grote gebouwen koelen met zonnewarmte-absorptiekoeling. Absorptiekoelmachines zijn er in vele varianten, maar dampabsorptiekoelmachines zijn in de woestijn het interessantst, omdat ze gebruikmaken van zonnewarmte en maar één pomp nodig hebben. Een dampabsorptiekoelmachine bestaat uit vier basiscomponenten: een verdamper die werkt op zonne-energie, een absorber, een generator en een condensor. Een koelmiddel stroomt van de condensor naar de verdamper, via de absorber naar de generator en dan weer terug naar de condensor. De koeling van het koelhuis of het gebouw vindt plaats bij de verdamper. Verdamping kost namelijk energie en deze energie wordt onttrokken aan het koelhuis of het gebouw. Deze manier van koelen is vergelijkbaar met die in een koelkast, alleen gebruikt een koelkast een ander koelmiddel en

elektriciteit in plaats van zonnewarmte. Een veelgebruikt koelmiddel is in water opgeloste ammoniak. En ammoniak is een van die producten die we toch al op grote schaal in de woestijn produceren uit groene waterstof en stikstof.

Impuls voor lokale economie en export

De beschikbaarheid van goedkope duurzame energie (in de vorm van groene elektriciteit en groene waterstof) en van voldoende betrouwbaar zoet water, kan een flinke impuls geven aan een lokale duurzame economie. En omdat daar ook volop beschikbare ruimte is, kun je ook gaan produceren voor de export: niet alleen duurzame energie (in de vorm van waterstof), maar ook ammoniak en synthetische brandstoffen zoals kerosine of methanol. Ook de export van duurzame landbouwproducten, groene chemische producten en materialen afkomstig uit brine behoort tot de mogelijkheden.

*Maak je de zee-water-
pijpleiding groter,
dan maak je zowel
gedemineraliseerd
water voor waterstof/
kunstmestproductie
als irrigatiewater voor
landbouw*





4

SCHONE ENERGIE, MATERIALEN EN VOEDSEL UIT DE OCEANEN

70% van het aardoppervlak bestaat uit oceanen. Boven en in dit reusachtige waterreservoir bevinden zich meer goede duurzame energiebronnen dan op land. Niet alleen zijn de oceanen de bron van water, ze zijn ook een bron van leven, voedsel en energie.

Daarom kunnen de oceanen, net zoals de woestijnen, in potentie voorzien in onze behoeften aan duurzame energie, drinkwater, voedsel, chemische producten en materialen.

Groot potentieel duurzame energie

De oceanen hebben niet alleen een reusachtig oppervlak, je kunt er ook grote hoeveelheden duurzame energie opwekken. Bovendien hebben ze een groot potentieel voor de productie van synthetische brandstoffen, chemische producten, materialen, water en voedsel.

Naar een schone, betaalbare energieproductie

Niet alleen op land, maar ook op zee wordt over de hele wereld al veel aardolie en aardgas gewonnen. De top 10 van offshore olie en gas producerende landen waren in 2017: Saudi-Arabië, Noorwegen, Qatar, Iran, Brazilië, Verenigde Staten, Mexico, Verenigde Arabische Emiraten, Verenigd Koninkrijk en Angola [86]. Veel van deze winningen vinden nu plaats in relatief ondiep water. In diepere wateren is nog veel olie en gas aanwezig, maar hoe dieper het reservoir, hoe moeilijker en duurder de winning is.

het aardoppervlak bestrijken, is dat maar een bescheiden deel. Zo kun je op minder dan 2% van het oppervlak van de Stille Oceaan het totale primaire energiegebruik van de wereld produceren (in 2019 was dat 168.000 TWh, oftewel 606 EJ [30]), als je om de kilometer een grote drijvende windturbine gebruikt [29].

In de toekomst kunnen de oceanen de wereld met gemak van duurzame energie voorzien. Maar het winnen van duurzame energie is op zee niet zo eenvoudig als op land. En op de oceanen is het transport van hernieuwbare energie naar gebieden met een energievraag nog moeilijker dan in de woestijnen. Maar de oceanen hebben ook grote pluspunten. Zo zijn daar veel duurzame energiebronnen met een groot potentieel, is er ruimte in overvloed en zijn menselijke activiteiten er beperkt.

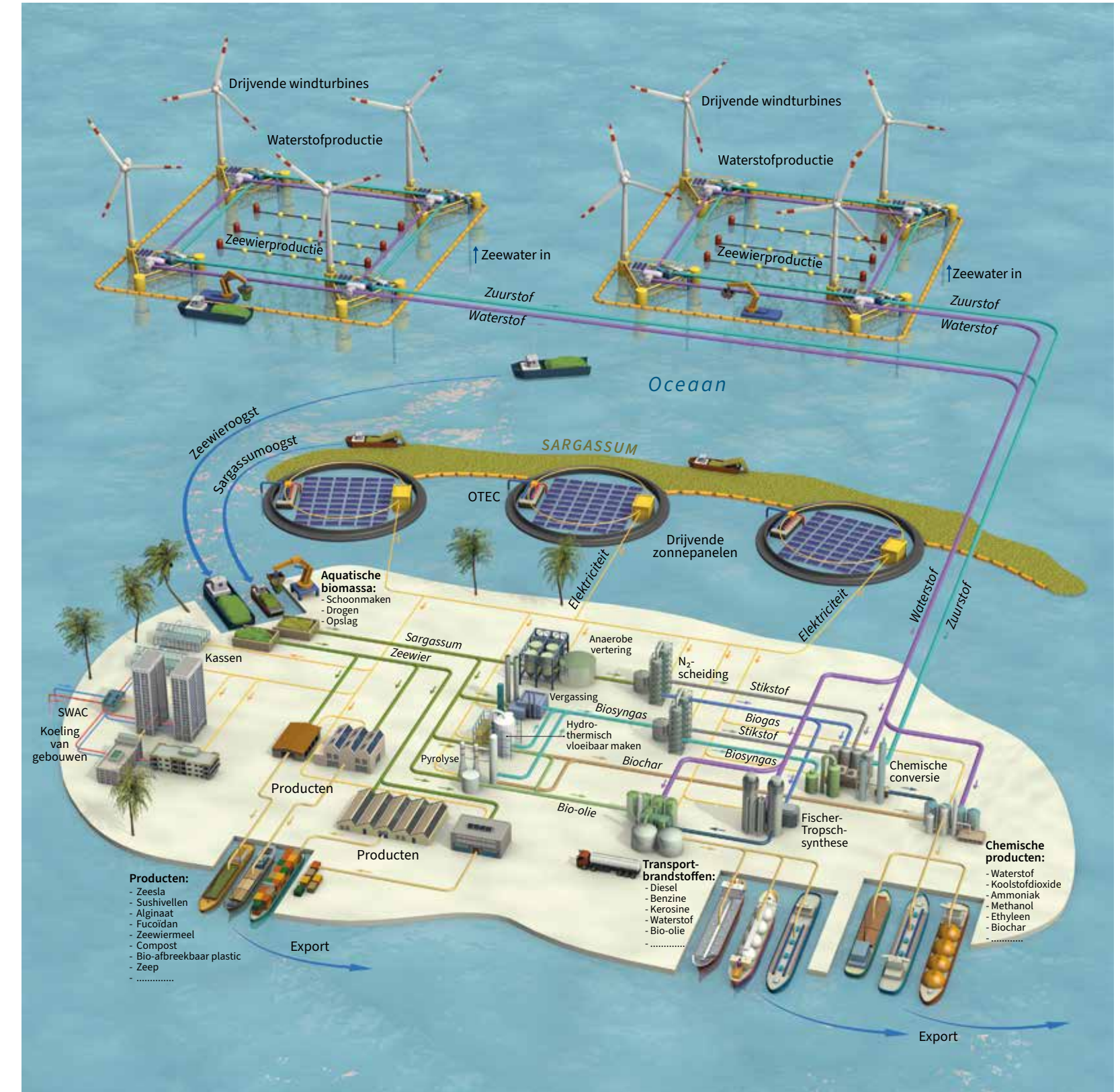
Pakken we de ontwikkeling van duurzame energie op de oceanen slim aan, dan kunnen we er groene elektriciteit en waterstof produceren. Bovendien kunnen we de oceanen ook gebruiken voor koeling en de productie van synthetische brandstoffen, chemische producten, materialen, water en voedsel. De vraag is hoe we dit allemaal schoon en betaalbaar kunnen doen.

Goed moment voor benutting energiepotentieel

Op land zijn we in staat op de juiste locaties zeer goedkoop zonne- en windenergie te produceren. En dankzij de exploratie van fossiele energie op zee, zelfs in de diepzee,

Op minder dan 2% van de Stille Oceaan kun je met windturbines het totale primaire energiegebruik van de wereld produceren

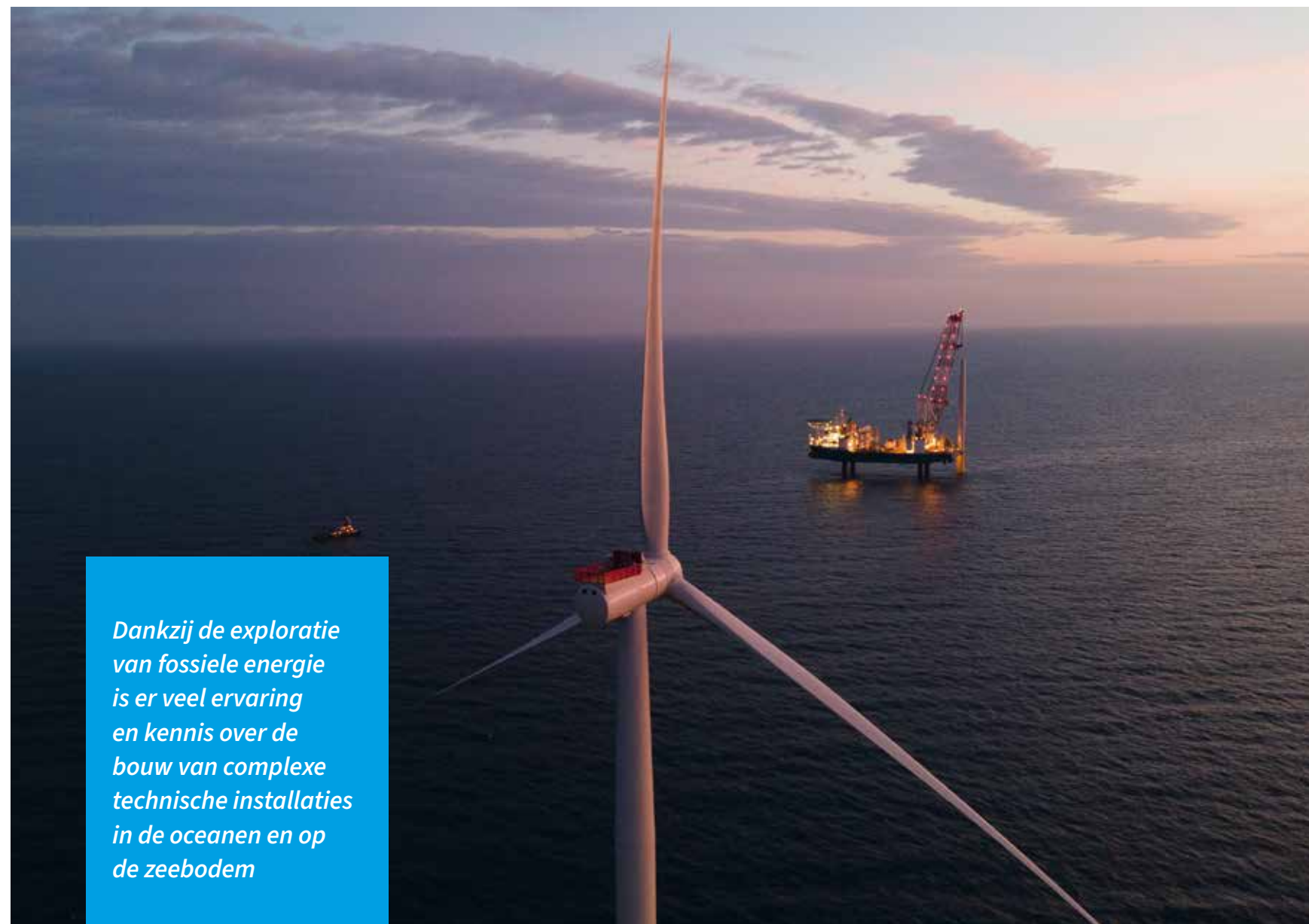
Duurzame energiebronnen op zee zijn veel beter bereikbaar. Windenergie kun je direct boven het wateroppervlak winnen, golf- en stromingsenergie in de bovenste waterlaag, en zonne-energie met drijvende panelen op het water. Biomassa, in de vorm van zeewier, drijft ook aan het oppervlak. Om zeewater te gebruiken voor koeling en voor Oceaan Thermische Energie Conversie (OTEC) moet je honderden meters diep de zee in, maar niet helemaal naar de bodem. Voor bijna al deze vormen van duurzame energie heb je wel een aanzienlijk zee-oppervlak nodig. Maar van het totale oppervlak van de oceanen, die meer dan 70% van



is er veel ervaring en kennis over de bouw van complexe technische installaties in oceanen en op de zeebodem. Met offshore windparken dicht bij de kust zijn dan ook al de eerste stappen gezet. Tegenwoordig bouwen we de eerste drijvende windparken en ontwikkelen we drijvende zonneparken. Diverse andere duurzame energietechnieken zijn in ontwikkeling, in de testfase of worden al opgeschaald. Tegen deze achtergrond is het nu een geschikt moment om

het geweldig duurzame energiepotentieel van de oceanen te gaan benutten. Niet door elke duurzame energiebron apart te bekijken, maar door verschillende duurzame energiebronnen integraal te ontwikkelen, tegelijk met conversies naar bruikbare energiedragers, chemische producten en materialen. Gelijktijdig moet ook de benodigde infrastructuur worden ontwikkeld en moeten er opslagfaciliteiten worden aangelegd.

Windturbines bouwen op zee



Dankzij de exploratie van fossiele energie is er veel ervaring en kennis over de bouw van complexe technische installaties in de oceanen en op de zeebodem

Offshore windenergie

Maak je gebruik van drijvende windturbines, dan is er in diep water een enorm potentieel voor offshore windparken. De vraag is hoe we de opgewekte energie naar land kunnen transporteren en hoe we het zee-oppervlak tussende windturbines het best kunnen benutten.

Boven de oceanen zijn de windsnelheden het hoogst. De wind wordt hier namelijk niet afgeremd door begroeiing of bebouwing, maar waait over een glad oppervlak. Waait het hard, dan ontstaan er golven. Een deel van de windenergie wordt zo dus omgezet in golfenergie. In Denemarken is in 2002 het eerste grootschalige offshore windpark gebouwd: Horns Rev 1, met een capaciteit van 160 MW. De windturbines in dit park hebben elk een capaciteit van 2 MW en zijn geplaatst in zeedeelten met een maximale waterdiepte van 14 meter. Twintig jaar later hebben de grootste offshore windturbines een capaciteit van 15 MW en rotordiameters van meer dan 200 meter. Hoe ziet een windpark met deze turbines eruit? En hoe breng je de energie aan land?

Drijvende windturbines

De huidige offshore windturbines worden geplaatst op een fundering in de zeebodem. De kosten van dergelijke funderingen nemen toe met de diepte. Bij een waterdiepte van meer dan 50 meter is het aantrekkelijker om de windturbine neer te zetten op een drijvende draagconstructie die is verankerd aan de zeebodem^[87]. Windturbines installeren in gebieden met diep water en verder uit de kust, heeft een aantal voordelen. De wind is daar vaak krachtiger en stabiel, waardoor de turbines meer energie kunnen produceren^[88]. En daarnaast kunnen de installatiekosten worden verlaagd^[89].

Er bestaan verschillende onderstellen voor drijvende windturbines. Het belangrijkste verschil betreft de verdeling van het gewicht onder water dat de turbine overeind houdt. Een van de grote voordelen van de types 'Semi-submersible' en 'Tension Leg Platform' is dat je ze in een haven in zijn geheel kunt bouwen om ze daarna te verslepen naar de plek van bestemming^[87]. Dit bespaart flink op de installatiekosten.

Drie verschillende typen drijvende windturbines^[87]





Windturbine in aanbouw ^[90]

Offshore windturbines zijn de laatste decennia snel groter geworden. Verschillende fabrikanten leveren windturbines met vermogens tot 15 MW. De rotordiameter van zo'n windturbine is meer dan 220 meter; de totale hoogte is 260 meter. Het oppervlak dat de bladen bestrijken, bedraagt een kleine 40.000 m², bijna dezelfde omvang als zes voetbalvelden. Zo'n windturbine levert tot wel 75 miljoen kWh elektriciteit per jaar. De capaciteitsfactor (het aantal vollasturen gedeeld door het aantal uren in een jaar [8.760]) is op goede locaties 65%, oftewel meer dan 5.500 vollast-uren. Het aantal vollast-uren is de jaaropbrengst gedeeld door het vermogen van de windturbine. Draait een windturbine het hele jaar door op vol vermogen, dan is het aantal vollast-uren 8.760 – het aantal uren dat een jaar telt.

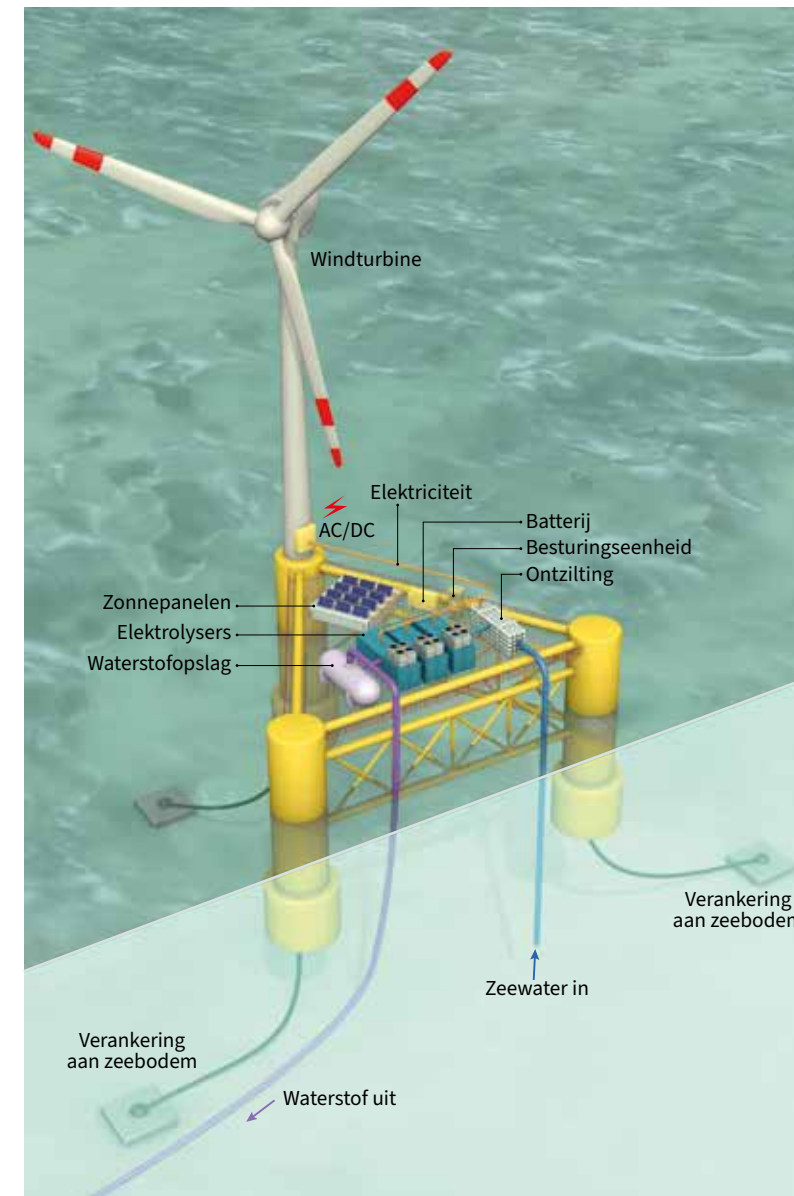
Drijvende windturbines voor waterstofproductie

Drijvende windturbines zijn bedoeld om in diepere zeeën windenergie op te wekken. Maar omdat diepere zeeën vaak ver uit de kust liggen, is de vraag hoe je de opgewekte energie eenvoudig en goedkoop naar land kunt brengen. Eerder hebben we al opgemerkt dat transport van waterstof door pijpleidingen ruwweg een factor 10 goedkoper is dan transport van elektriciteit door kabels. Bovendien is de transportcapaciteit van pijpleidingen ook ruwweg een factor 10 groter dan die van elektriciteitskabels; zo is de capaciteit van een waterstoftransportleiding wel zo'n 20 GW terwijl een elektriciteitstransportkabel zo'n 2 GW capaciteit heeft.

Om op zee waterstof te produceren, kunnen we in of bij een drijvende windturbine een elektrolyser plaatsen, en een installatie die uit zeewater gedemineraliseerd water maakt. Ruimte is er genoeg: in of aan de mast van de windturbine, die een diameter van 10 meter heeft, of op een klein platform dat aan een drijvende windturbine zit. Zet je de door de windturbine geproduceerde wisselstroom om in gelijkstroom, dan kun je de elektrolyser daarmee direct voeden. En omdat ook de zonnecellen en batterijen gelijkstroom leveren, werkt het hele systeem van zo'n windturbine die waterstof produceert, op gelijkstroom. In feite maak je een nieuw product, een drijvende windwaterstof turbine, die in een haven kan worden gemaakt.

In gebieden met diep water ver uit de kust is de wind vaak krachtiger en stabiel, waardoor windturbines meer energie kunnen produceren

De output van deze windturbine bestaat uit waterstof op een druk van 30-50 bar. Een flexibele pijpleiding die langs meerdere windturbines loopt, vervoert de waterstof naar een compressor. Die compressor verhoogt de druk tot zo'n



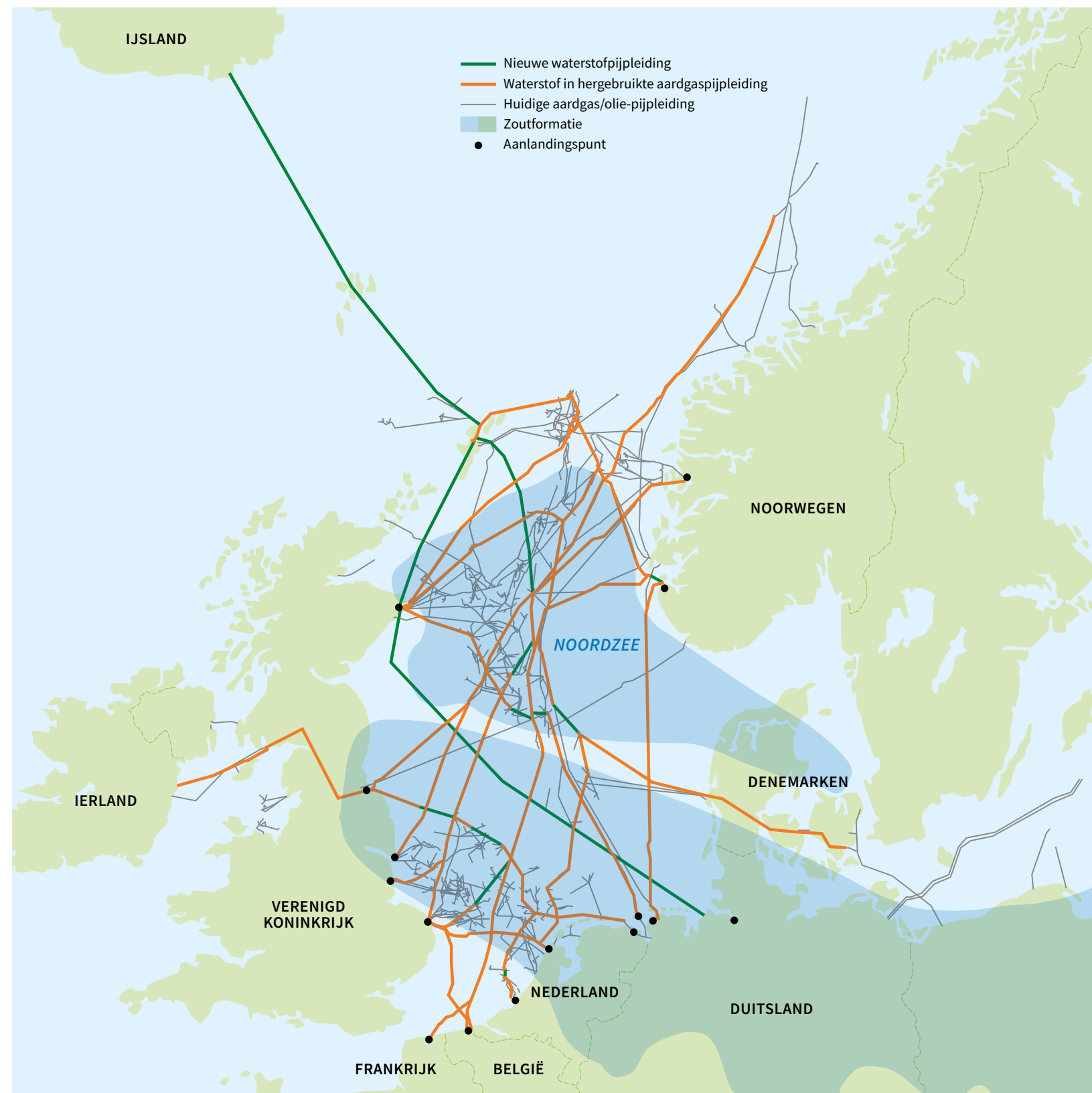
Drijvende windturbine met elektrolyser om waterstof te produceren (gebaseerd op ontwerp van ERM ^[91])

80-100 bar en pompt de waterstof in een grote transportpijpleiding die de waterstof naar land vervoert. Als het hard waait, produceren de windturbines meer waterstof en heeft de compressor meer elektriciteit nodig. Daarom is het verstandig om de compressor te 'integreren' met een (drijvende) windturbine, die eveneens meer elektriciteit produceert als het harder waait. Daarnaast is een back-up elektriciteitsvoorziening nodig. Die kan bestaan uit batterijen en een brandstofcel. Ook dien je de compressor te stabiliseren, wat goed mogelijk is met bewegingsstabilisatoren ^[92].

Offshore windenergie geproduceerd op meer dan 100 km vanaf de kust kun je goedkoper aan land afleveren als waterstof dan als elektriciteit

Een drijvend offshore windpark van 1 GW met 5.500 vollasturen, gekoppeld aan 1 GW elektrolyservermogen, levert zo'n 110.000 ton waterstof per jaar. Een kleine 10 GW offshore wind-waterstofvermogen levert dan 1 miljoen ton waterstof per jaar.

Vergelijken we nu de kostprijs van offshore wind die je in de vorm van elektriciteit met kabels naar land brengt met de kostprijs van offshore wind die je in de vorm van waterstof met pijpleidingen naar land brengt, dan is bij ruwweg meer dan 100 km van de kust de aan de kust afgeleverde waterstof goedkoper dan aan de kust afgeleverde elektriciteit ^[13]. Voor de waterstofroute moet je weliswaar investeren in een elektrolyser en is er een conversieverlies (omzetting elektriciteit in waterstof), maar dat wordt gecompenseerd doordat er minder conversies nodig zijn (tussen wissel- en gelijkstroom en naar hogere en lagere voltages) en de transportkosten van waterstof lager zijn dan die van elektriciteit.



Offshore wind-waterstofproductie op de Noordzee

De afgelopen decennia is er op de Noordzee veel gas en olie gewonnen. De gaswinning gaat nog door, maar veel velden naderen het eind van hun productie. Wat daarna achterblijft is een groot pijpleidingennetwerk voor het transport van aardgas. De afgelopen decennia zijn op de Noordzee ook offshore windparken gerealiseerd, allemaal in ondiep water en dicht bij de kust. Meer en meer wordt nu gekeken naar de ontwikkeling van windparken verder uit de kust en in dieper water. Zo is in Schotland in 2021 8.600 km² zeebodem geveild voor de realisatie van offshore windparken – de zogeheten ‘ScotWind seabed tender’. In maart 2022 zijn 17 offshore windprojecten gehonoreerd met een totale capaciteit van bijna 25 GW, waarvan 15 GW aan drijvende offshore windparken. Alhoewel het anno 2023 alleen nog gaat om elektriciteitsproductie, worden de mogelijkheden onderzocht van de offshore productie van windenergie in de vorm van waterstof. Het huidige netwerk van aardgaspijpleidingen kan worden ingezet om waterstof te transporteren: pijpleidingen van diverse bedrijven op de Noordzee zijn daarvoor geschikt. Uitgaande van het huidige netwerk en de huidige ontwikkelingen van offshore wind, met name drijvend, hebben we onderzocht hoe een pijpleidingennetwerk voor waterstof op de Noordzee eruit kan zien.

Via bestaande aardgaspijpleidingen kan waterstof van de Noordzee eenvoudig worden vervoerd naar alle delen van Europa

Voor een waterstoftransportnetwerk op de Noordzee kunnen we ruim 15.000 km bestaande aardgaspijpleidingen hergebruiken. Daarnaast is een kleine 3.000 km aan nieuwe waterstofpijpleidingen nodig. Op de kaart met het pijpleidingennetwerk op de Noordzee staat daarnaast ook een verbinding met IJsland. Via deze pijpleiding kan

goedkope waterstof uit waterkracht en geothermie vanuit IJsland worden geëxporteerd naar Europa. De bestaande verbindingen naar de kust kunnen eenvoudig op de ‘Europese Waterstof Backbone’ worden aangesloten^[70]. Hierdoor kan waterstof van de Noordzee eenvoudig worden vervoerd naar alle delen van Europa.

Minstens zo belangrijk is de mogelijkheid om waterstof op te slaan op de Noordzee. De geschiktheid daarvoor van sommige lege gasvelden wordt onderzocht. Die gasvelden zijn uiteraard al aangesloten op bestaande aardgaspijpleidingen. Zijn de gasvelden geschikt voor waterstofopslag, dan kunnen ook bestaande platforms worden hergebruikt om waterstof in en uit de lege gasvelden te pompen. Afhankelijk van de grootte kun je 50.000-500.000 ton (2-20 miljard kWh [HHV]) waterstof opslaan in een leeg gasveld, voornamelijk voor seizoensopslag^{[13], [93]}. Een alternatief is om waterstof op te slaan in zoutkoepels. Op vele plekken onder de Noordzee hebben de zoutformaties de geschikte dikte om zoutkoepels aan te leggen. In zo’n zoutkoepel kun je zo’n 3.000 tot 6.000 ton (120-240 miljoen kWh) waterstof opslaan – dat is 10 tot 100 keer zo weinig als in lege gasvelden. Zoutkoepels hebben het voordeel dat je ze sneller kunt laden en ontladen dan een gasveld. Daarom kun je ze goed gebruiken voor opslag gedurende dagen tot weken.

Het is mogelijk om op de Noordzee waterstof te maken met behulp van offshore wind. Omdat seizoensopslag van waterstof kan plaatsvinden in lege gasvelden, en dag- en weekopslag in zoutkoepels, is een continue stroom (basislast) van waterstof naar het land mogelijk. Veel industrieën, zoals staal en chemie, hebben basislast waterstof nodig. Het hiervoor beschreven waterstofnetwerk kan tussen de 300 en 400 GW waterstof aan land brengen. Gebeurt dit in basislast, dan is dat zo’n 60 tot 80 miljoen ton waterstof (2.400-3.200 miljard kWh [HHV]) – ruwweg een kwart van het totale energiegebruik van de Europese Unie^[94]. Om dit in zijn geheel met offshore windparken te produceren, is tussen de 550 en 750 GW offshore windvermogen nodig.

TECHNOLOGIE VOOR DE TOEKOMST

Kiteschepen

Flexibel energietransport over grote afstanden

Met drijvende windturbines kun je windenergie opwekken bij grotere waterdiepten, vaak op grotere afstand van de kust. Om deze energie aan land te brengen is een waterstofpijpleiding naar de kust nodig. Maar omdat het soms gaat over afstanden van duizenden kilometers aan pijpleidingen, rijst de vraag of er geen andere oplossingen zijn voor dit energietransport.

Eén oplossing is om gebruik te maken van een kite (vlieger) die elektriciteit kan opwekken op grote hoogte, hoger dan een windturbine. Daar waait het nóg harder. Geplaatst op een schip kan de kite altijd op een plek zijn

waar het hard waait. De capaciteitsfactor is dan zo'n 80-90%, wat overeenkomt met 7.000 tot 7.800 vollast-uren. De met de kite opgewekte elektriciteit wordt omgezet in waterstof en onder druk opgeslagen in tanks. Zijn de tanks vol, dan vaart het kiteschip naar een haven om de waterstof te lossen. Het kite-schip is flexibel en kan naar de haven varen waar de hoogste prijs wordt betaald voor de waterstof. Dat is een voordeel ten opzichte van windturbines met pijpleidingen. Deze techniek heeft zeker potentie, maar er is nog veel ontwikkeling nodig om dit rendabel te kunnen exploiteren. Een start-up en diverse technische universiteiten werken hieraan^[95].



Artist impression van waterstof producerende kite-schepen

De open ruimtes tussen windturbines kun je op een economisch interessante manier benutten met zeewierteelt



Artist impression van zeewierteelt in windpark^[97]

En om dit windvermogen op te stellen is tussen de 75.000 en 100.000 km² ruimte nodig, oftewel 13-17% van het oppervlak van de Noordzee. Van de benodigde oppervlakte wordt overigens maar 1.500-2.000 km² ingenomen door de windturbines zélf. Dat is minder dan 1% van het oppervlak van de Noordzee^[4].

Zeewier telen in offshore windparken

In offshore windparken is er tussen de windturbines veel ruimte. Grote windturbines van 15 MW, met rotordiameters van meer dan 200 meter, plaats je al gauw meer dan een kilometer uit elkaar. In de ruimte tussen de turbines kun je andere activiteiten ondernemen, bijvoorbeeld vis kweken, drijvende zonneparken plaatsen of gewassen zoals zeewier telen^[97]. Zeewier is een voedselbron voor mens en dier en een grondstof voor chemicaliën en farmaceutische producten. Zeewier bevat ook koolstof. Daarmee kun je, samen met waterstof, diverse synthetische brandstoffen

produceren. En natuurlijk kan zeewier een bron van energie zijn: je zet het om naar bruikbare energiedragers.

Zeewier wordt meestal geteeld aan lange touwen die in zee hangen. Windturbines zijn ideale constructies om touwen aan te bevestigen en te verankeren. Door zeewier te telen in windparken, kun je de open ruimte tussen de windturbines nuttig en op een economisch interessante manier gebruiken. Zeewier heeft meer voordelen. Het gaat verzuring en eutrofiëring tegen, omdat het stikstof en fosfor uit de oceanen opneemt. En het neemt koolstofdioxide op uit de atmosfeer tijdens de groei. Bovendien zijn de teeltgebieden een kraamkamer voor vissen.

In een offshore windpark ver uit de kust kun je waterstof produceren met zowel windenergie als zeewier. Gebruik je zeewier, dan kun je dat eerst bijvoorbeeld vergisten. Daarna pas je steam methane reforming of autothermal

| | Aannames | Productie |
|--|---|--|
| Windturbines | | |
| – Vollaast-uren | 5.500 hr/yr [98] | |
| – Efficiëntie van de elektrolyser | 81% _{HHV} = 68% _{LHV} | |
| – Opgesteld windvermogen | 8 MW/km ² [4] | |
| Waterstofproductie uit wind | | 900 ton H₂/km² |
| Zeewierteelt | | |
| – Opbrengst, droge stof | 2.000 ton/km ² [99] | |
| – Methaanproductie | 2.500 kWh/ton [100] | |
| – Efficiëntie van de steam methane reforming met CO ₂ -afvang | 80% _{HHV} =73% _{LHV} [101] | |
| – Afvang CO ₂ uit SMR (CO ₂ uit vergisting is niet meegenomen) | 8 kg CO ₂ /kg H ₂ [101] | |
| – Voor zeewierteelt beschikbare oppervlakte van het windpark | 90% | |
| Waterstofproductie uit zeewier | | 100 ton H₂/km² |
| CO₂-productie uit zeewier | | 800 ton CO₂/km² |

reforming toe, waarbij je ongeveer 80-90% van de vrijkomende CO₂ kunt afvangen. Per kilo waterstof levert zeewier zo ook 8 kg CO₂ op. De CO₂ uit het vergistingsproces is hier niet meegenomen. Nu kunnen we uitrekenen hoeveel waterstof en CO₂ dit wind- en zeewierpark levert per km², namelijk 1.000 ton waterstof (900 ton van wind en 100 ton van zeewier) en 800 ton CO₂. Met waterstof, CO₂ plus stikstof en zuurstof (uit de lucht) kunnen we alle synthetische brandstoffen (kerosine, diesel, benzine) en basischemische producten (methanol, ammoniak, benzeen, propyleen, etc.) maken die we willen. Bij duurzaam, circulair gebruik van de chemische producten komt de CO₂ niet meer vrij in de lucht en kun je zelfs spreken van negatieve CO₂-emissies. Vanzelfsprekend is dat ook het geval als je de CO₂ zou opslaan in een leeg gasveld of aquifer.

Om met offshore wind-zeewier-waterstofproductieparken het equivalent van alle energie voor de hele wereld (168.000 TWh/jaar) te produceren in de vorm van waterstof, is op de oceanen een gebied nodig van 4,3 miljoen km². Dat is slechts 1,2% van de 362 miljoen km² die de oceanen groot zijn [102]. Daarnaast haal je zo 3.440 miljoen ton CO₂ uit de lucht. Als we al deze CO₂ opslaan of vastleggen in producten, dan verminderen we de wereldwijde netto CO₂-uitstoot met ca. 10% (in 2021 werd 34,9 miljard ton CO₂ uitgestoten [103]). Je kunt zeewierteelt en -verwerking dus beschouwen als een vorm van 'Direct Air Capture': het uit de lucht halen van CO₂. En waarschijnlijk is dit veel gemakkelijker en goedkoper te realiseren dan met een technische installatie!

Offshore zonne-energie

Vanwege ruimtegebrek op het land worden ook zonneparken aangelegd op het water. Bijkomend voordeel: het water koelt de panelen, waardoor die een hogere opbrengst hebben. De vraag is: kun je ook zonnepanelen toepassen op zee, in een zoute omgeving en met hoge golven?

Drijvende zonnepanelen op zee

Veel bedrijven onderzoeken de mogelijkheden voor drijvende zonnepanelen op zee; producenten van zonnecellen en -panelen kondigen aan te gaan samenwerken met offshore technologiebedrijven [104], [105]. Ook zijn er diverse start-ups en nieuwe ontwikkelingen. Dit zijn allemaal signalen die erop wijzen dat drijvende zonnepanelen en zonneparken op zee een serieuze optie worden [106], [107].

Het bedrijf Ocean Sun heeft hiervoor een innovatieve oplossing bedacht, afgeleid van viskweekvijvers in fjorden en op zee: zonnepanelen worden bij elkaar gehouden door een hydro-elastisch membraan, dat voor verankering is omgeven door een stijf, cirkelvormig frame [107]. Omdat het membraan in contact staat met het onderliggende water, is de koeling beter dan bij bovengenoemde configuraties. Bovendien zorgt het membraan ervoor dat de zonnepanelen kunnen meebewegen met de golven, waardoor de luchtweerstand wordt geminimaliseerd. Deze configuratie is bestand tegen windsnelheden tot 275 km per uur, vergelijkbaar met de windkracht van een orkaan.

Veel wijst erop dat drijvende zonneparken een serieuze optie worden om op zee elektriciteit en waterstof te produceren

Er zijn verschillende manieren om drijvende zonnepanelen te laten meebewegen met het water. De eerste drijvende systemen waren afgeleid van op land gebaseerde systemen: zonne-PV-modules werden op een drijvend platform geplaatst; meerdere drijvende platforms werden vervolgens aan elkaar gekoppeld. Een tweede ontwerp bestond uit drijvers met dwarsbalken. Hierop werden zonnepanelen geïnstalleerd, met dezelfde ondersteuningsconstructies als op het land. Deze aanpak werkt goed op kalme wateren, zoals meren, maar niet als er hoge golven zijn, zoals op zee.

Vergeleken met systemen op land zijn de Balance-of-System (BOS)-kosten (voor de draagconstructie, de verankering en de bescherming tegen zout) en de onderhoudskosten van drijvende zonneparken hoger. Maar wek je per oppervlakte-eenheid meer energie op, dan verlaag je daarmee het aandeel van de BOS-kosten. Voor drijvende zonne-energiesystemen op zee kan het daarom verstandig zijn te kiezen voor zonnepanelen met een grotere efficiëntie, ook al zijn die relatief duur. De uiteindelijke keuze is onderdeel van een economische afweging; grotere efficiëntie staat niet altijd gelijk aan lagere kosten. Drijvende zonneparken moeten op zee wel met beleid worden geplaatst. Ze belemmeren namelijk de lichtinval in het water, wat gevolgen kan hebben voor het zeeleven.

Drijvende zonnepanelen voor waterstofproductie

Net zoals windturbines willen we ook zonneparken op grotere afstand van de kust kunnen toepassen. Omdat de transportkosten van waterstof lager zijn dan die van elektriciteit, kan het interessant zijn om elektriciteit om te zetten in waterstof. En omdat zonnepanelen gelijkstroom leveren, kun je er vrijwel direct de elektrolyser mee voeden.

Ook al is er op zee niet meer zonnestraling dan op land, toch kan de opbrengst er enkele procenten hoger zijn. Dit komt door de betere (water)koeling van de panelen. Het

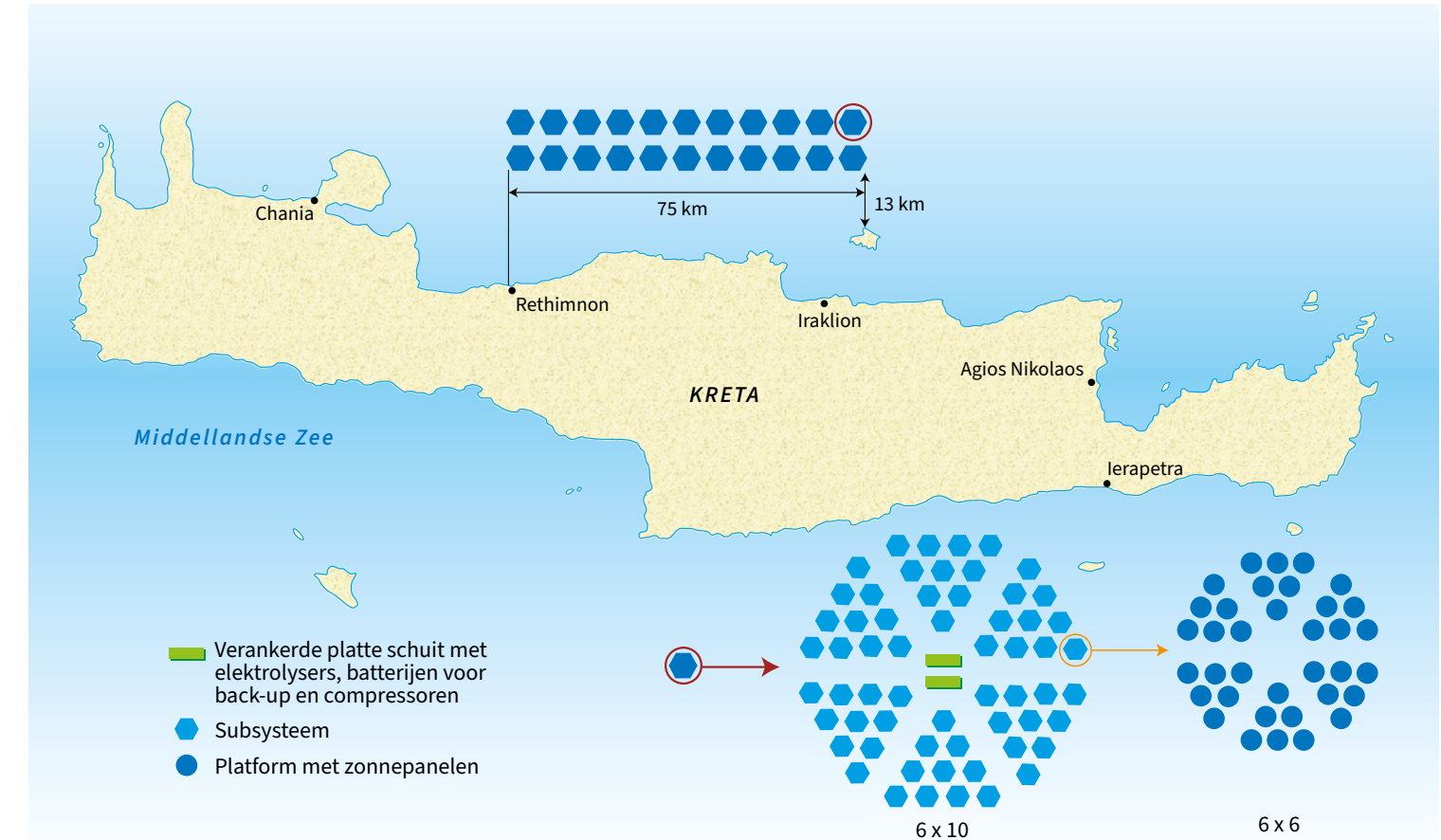
aantal vollast-uren op zee verschilt niet veel van het aantal vollast-uren op land, op dezelfde breedtegraad. Op goede locaties bedraagt het aantal vollast-uren voor zonnepanelen ca. 2.000 uur. Koppelen we aan de zonnepanelen een elektrolyser met hetzelfde vermogen, dan heeft die ook maar 2.000 vollast-uren. In de praktijk blijkt het economischer om het vermogen van de elektrolyzers te dimensioneren op zo'n 70% van het vermogen van het zonnecelsysteem, zodat het aantal vollast-uren toeneemt. Zo bespaar je aanzienlijk op de investeringskosten voor elektrolyzers, terwijl je maar enkele procenten van de opbrengst van de zonnepanelen kwijtraakt.

Drijvende zonnepanelen op een hydro-elastisch membraan, geschikt voor toepassing bij hoge golven^[107]



Ook al is er op zee niet meer zonnestraling, door de betere (water)koeling kan de opbrengst hier toch enkele procenten hoger zijn dan op land

Drijvend zonne-waterstofproductiepark ten noorden van Kreta, dat 1 miljoen ton waterstof kan produceren^[108]



Op de Middellandse zee kunnen we drijvende zonnepanelen plaatsen, met zo'n 1.800 vollast-uren. Om 1 miljoen ton waterstof te produceren, is er 30 GW aan zonnepanelen nodig, met 21 GW (70% van 30 GW) aan elektrolyzers. Een studie is uitgevoerd naar een drijvend zonnepark voor de kust van Kreta. In deze studie is uitgegaan van de drijfconstructie van het bedrijf Ocean Sun, waarop de zonnepanelen zijn geplaatst. De elektrolyzers, batterijen voor back-up en compressoren zijn op verankerde platte schuiten geplaatst. Dit zonne-waterstofsysteem produceert 1 miljoen ton waterstof per jaar.

Zo'n drijvend offshore zonne-waterstofpark heeft veel meer zon- en elektrolyservermogen nodig dan een drijvend offshore wind-waterstofproductiepark. Toch kunnen de kosten voor de productie van waterstof in dezelfde orde van grootte liggen. Per kW zijn de investeringskosten voor deze zonneparken namelijk enkele malen lager dan die voor windparken. Daar staat tegenover dat het ruimtebeslag van een drijvend offshore zonnepark vele malen groter is dan van een offshore windpark.

Energie uit temperatuurverschillen

Oceanwater is een bron van energie. Je kunt koud water naar boven halen om er gebouwen mee te koelen ('Sea Water Air Conditioning' [SWAC] of zee-waterkoeling). En uit het temperatuurverschil tussen oppervlaktewater en dieper gelegen water kun je elektriciteit opwekken ('Ocean Thermal Energy Conversion' [OTEC]).

Zeewaterkoeling

In veel tropische gebieden moeten gebouwen het hele jaar door gekoeld worden. Op eilanden en in steden aan de kust hoeft dit niet met een airconditioner op elektriciteit, maar kun je ook diep zeewater gebruiken. Zeewaterkoeling is bijvoorbeeld mogelijk in het Caribisch gebied, met al zijn eilanden, en in tal van steden aan de kust in Afrika, Azië, Australië en Zuid-Amerika.

Zeewaterkoeling werkt heel simpel. Eerst haal je van zo'n 800 meter diepte koud water (ca. 6 °C) naar boven. Via een warmtewisselaar breng je de koude over op een koelingscircuit voor gebouwen, vergelijkbaar met de koelingscircuits die nu al in gebruik zijn. Als het zeewater de warmtewisselaar weer verlaat, is het opgewarmd tot zo'n 12 °C. Dit water pomp je terug naar een diepte met dezelfde zeewatertemperatuur.

Met koud zeewater kun je niet alleen gebouwen koelen, maar ook zoet water uit lucht halen

Deze vorm van zeekoeling is toepasbaar in gebieden die veel koeling vragen en aan een zee liggen die op korte afstand van de kustlijn al snel diep wordt. Zijn de condities minder ideaal, dan kun je ook varianten van dit systeem toepassen. Zeewater met een hogere temperatuur dan 6 °C kun je met een warmtepomp verder afkoelen naar de

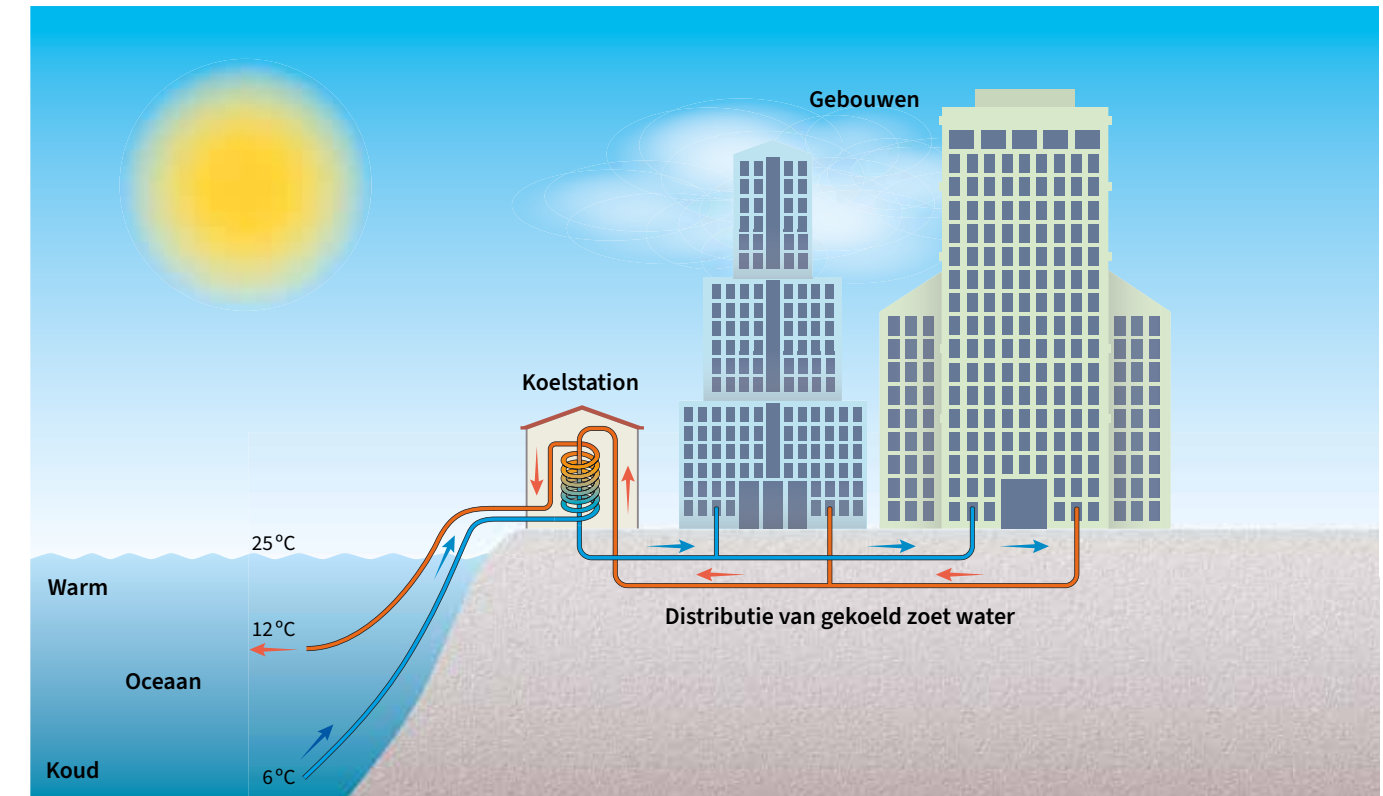
gewenste temperatuur. Je kunt zeewater overigens ook gebruiken als bron van warmte voor gebouwen. Daartoe kun je de temperatuur van ondiep zeewater met een warmtepomp verder verhogen.

Zoetwaterproductie met koud zeewater

Koud zeewater kun je niet alleen gebruiken om gebouwen te koelen, maar ook om zoet water uit lucht te halen. Ook dit principe is simpel. In warme gebieden met een hoge luchtvochtigheid slaat waterdamp uit de lucht neer op koude oppervlakken. Dat zie je bijvoorbeeld als je een koud glas water uit de koelkast haalt. Deze condensatie vindt plaats doordat koude lucht minder waterdamp kan bevatten dan warme lucht. Het koude water in het glas koelt de lucht rond het glas, waardoor het water uit de lucht condenseert: er vormen zich druppels op de buitenkant van het glas.

Laat je koud water via leidingen vlak onder of op de grond lopen, dan koelt de lucht rond de leiding af. Daardoor ontstaat condens, waarmee je gewassen kunt irrigeren. Op deze manier kun je bomen, gras, planten en groente van water voorzien. Je kunt hiervoor zeewater gebruiken van 5 tot zelfs 12 °C, maar ook zoet water dat je met koud zeewater en een warmtewisselaar hebt afgekoeld. Zo'n irrigatiesysteem is eenvoudig te combineren met een SWAC-systeem, dat meestal in gebieden met hoge luchtvochtigheid wordt toegepast, dus aan de kust.

Zeewaterkoelingsysteem voor gebouwen ^[109]



Ocean Thermal Energy Conversion

Van alle zonnestraling die de aarde bereikt schijnt 70% op de oceanen. Het grootste deel daarvan verwarmt de bovenste lagen van de oceanen – de grootste zonnecollectoren op aarde. Dieper in de oceaan is het water kouder. Het temperatuurverschil tussen water aan het oppervlak en dieper in de oceanen kun je gebruiken om elektriciteit te produceren. Aan het oppervlak is de watertemperatuur 25-30 °C; op 600 tot 1.000 meter diepte is dat maar 3-7 °C. Temperatuurverschillen die groot genoeg zijn om energie mee op te wekken, vind je vooral rond de evenaar, tussen de beide keerkringen.

Een OTEC-systeem bestaat uit verschillende componenten, zoals een verdamper, condensor, turbine, generator en pomp. Elektriciteit wordt als volgt opgewekt. Door warmteoverdracht van het warme oppervlaktewater in de verdamper, verdampt een werkvloeistof met een laag

kookpunt. Deze damp drijft de turbine aan, die op zijn beurt een generator aandrijft om elektriciteit te produceren. Vervolgens wordt de damp door de (met koud diepzeewater gekoelde) condensor geleid, zodat de damp weer vloeibaar wordt ^[110].

Een groot voordeel van OTEC is dat het basislast- (een continue stroom) elektriciteit kan produceren. Wereldwijd lopen er dan ook verschillende pilotprojecten. Maar het probleem is dat een OTEC-installatie relatief weinig elektriciteit opwekt, als gevolg van het geringe temperatuurverschil. Wat daarnaast kostenverhogend werkt, is dat ze op zee, en dus in een corrosieve omgeving, drijven, veelal een flink eind uit de kust. OTEC-installaties leveren daarvoor nogal dure elektriciteit. Een mogelijke oplossing is misschien om OTEC-installaties te combineren met drijvende wind- en/of zonneparken.

Energie uit getijden, golven en osmose

Naast wind, zon en verschillen in watertemperatuur, bieden de oceanen nog meer bronnen van duurzame energie: de getijden, de golven en de overgangen van zoet naar zout water.

Getijdenenergie

Getijde wordt veroorzaakt door de zwaartekracht en door het draaien van de maan om de aarde en van de aarde om de zon. Getijden zorgen voor waterstroming en aan de kust voor waterhoogteverschillen (eb en vloed) waaruit je energie kunt winnen. Als een van de weinige, is deze duurzame energiebron niet direct of indirect afgeleid van zonne-energie.

Er zijn verschillende manieren om getijdenenergie te winnen. Met door eb en vloed veroorzaakte stroming van het water kun je onderwaterturbines aandrijven. Een andere optie is om bij vloed een bekken vol te laten lopen en bij eb weer leeg. Met door de waterstroming aangedreven turbines kun je dan elektriciteit produceren. Het voordeel van getijdenenergie is dat het goed voorspelbaar is. Het nadeel is dat er maar weinig locaties zijn met getijdenverschillen of stroomsnelheden die groot genoeg zijn. Ook is het aantal vollast-uren klein, waardoor getijdencentrales relatief dure elektriciteit produceren.

Golfenergie

Ook golven zijn een bron van duurzame energie. Golven ontstaan onder invloed van wind boven het zeeoppervlak. Zolang de golven zich langzamer voortplanten dan de windsnelheid erboven, wordt er energie overgedragen van de wind naar de golven. Golfenergie is dus een indirecte vorm van windenergie.

Er bestaan verschillende principes en technologieën om golfenergie te winnen, waaronder absorbers, dempers, overslag, oscillerende waterkolommen en golving. Allemaal vereisen ze complexe, mechanische installaties in of onder water. Ook kunnen deze technologieën het zeemilieu onder water beïnvloeden. Toch heeft golfenergie een redelijk potentieel. In combinatie met offshore wind- en/of zonneparken, kan golfenergie mogelijk een economische bijdrage leveren aan de opwekking van duurzame energie.

Osmose-energie

Uit de overgang van zoet water dat in zout water stroomt, kun je osmose-energie winnen. Dit is energie die beschikbaar komt door een verschil in zoutconcentratie tussen zoet en zout water. Plaats je in een bak een membraan met aan de ene kant zoet en aan de andere kant zout water, dan stroomt het zoete water door het membraan naar het zoute water, totdat het zoutgehalte aan beide kanten hetzelfde is. Uit dit concentratie- of potentiaalverschil kun je energie winnen.

De Noordzee heeft een zoutgehalte van ongeveer 35 gram per liter. Bij een verschil in zoutconcentratie tussen zoet en zout water van 35 gram per liter, ontstaat in theorie een drukverschil van 29 bar, oftewel een hoogteverschil van 290 meter. Anders gezegd: laat je 1 kubieke meter zoet water de Noordzee in stromen, dan levert dit theoretisch evenveel energie op als wanneer je 1 kubieke meter water 290 meter naar beneden laat vallen^[111]. In theorie is het

dan ook mogelijk om een osmosepomp te ontwikkelen die zoet water van onder zeeniveau de zee in pompt om het waterpeil te regelen en geen elektriciteit gebruikt, maar netto elektriciteit oplevert. Dit zou een interessante mogelijkheid kunnen zijn bij dammen en zeeweringen in

Bangladesh, Nederland en andere laaggelegen landen aan de kust. Toch is de winning van osmose-energie nog niet helemaal uitontwikkeld, met name omdat er veel membraanoppervlak voor nodig is en omdat het membraan niet mag dichtslibben met vuil.

Golfenergiegenerator



Kansen voor eilanden en kustgebieden

Rond eilanden en in kustgebieden, waar een groot potentieel is voor duurzame energieproductie, kunnen samenhangende systemen tot ontwikkeling komen. Hier kun je ook chemische producten, synthetische brandstoffen, materialen en voedsel produceren met duurzame energie, zeewier, lucht en zout water.

Dicht bij het land geproduceerde duurzame energie wordt als elektriciteit naar het land getransporteerd en daar gebruikt voor aandrijving van apparaten, licht, communicatie, datacenters, transport en zoetwaterproductie. Verder weg geproduceerde duurzame energie kun je als waterstof naar het land brengen via pijpleidingen. Op land kan waterstof vloeibaar worden gemaakt, waterstof worden omgezet in ammoniak of waterstof worden gebonden aan een ander molecuul (bekend als 'liquid organic hydrogen carrier' of LOHC), zodat het per schip over de wereld kan worden vervoerd. Eenmaal aan land gebracht, kan waterstof ook worden gebruikt als grondstof voor chemische producten en synthetische brandstoffen en worden ingezet voor transport.

Daarnaast kan tussen de windturbines gekweekt zeewier worden geoogst en verscheept. Dit gewas kan dienen als vee- en visvoer, als grondstof voor farmaceutische en chemische producten, als energiebron en als koolstofbron voor chemische producten en synthetische brandstoffen. Van zout water kan zoet water worden gemaakt en uit de brine kunnen allerlei chemische producten en materialen worden gewonnen.

Aan de kust tenslotte, kun je met diepzeewater gebouwen en kassen koelen (SWAC). Met hetzelfde koude zeewater kun je zoet water uit de lucht laten condenseren, zodat je er bomen en planten mee kunt irrigeren.

Realiseer je al deze mogelijkheden op één eiland, dan kan zo'n eiland duurzaam voorzien in zijn eigen energie- en waterbehoefte én een keur aan energiedragers, chemische producten en materialen exporteren per schip of pijpleiding. Er zijn vele eilanden en kustgebieden die de potentie hebben om uit te groeien tot zo'n locatie voor de export van duurzame energie en duurzame producten. Daarbij kun je denken aan eilanden in het Caribisch gebied en de Stille Oceaan, rond de Filipijnen, Madagaskar, Sri Lanka en Hawaï en ook aan eilanden zoals de Orkney-eilanden of IJsland. Er zijn ongetwijfeld nog veel meer geschikte locaties. Ook is het voorstelbaar dat op geschikte locaties kunstmatige (drijvende) eilanden worden aangelegd, speciaal voor het produceren en exporteren van duurzame energie, chemische producten, synthetische brandstoffen en materialen.

Veel eilanden en kustgebieden kunnen duurzame energie, chemische producten, synthetische brandstoffen, materialen én voedsel gaan exporteren

Eilanden kunnen met zon, wind, zeewier en zeewater een keur van duurzame energiedragers, chemische producten, synthetische brandstoffen, materialen en voedsel produceren



5

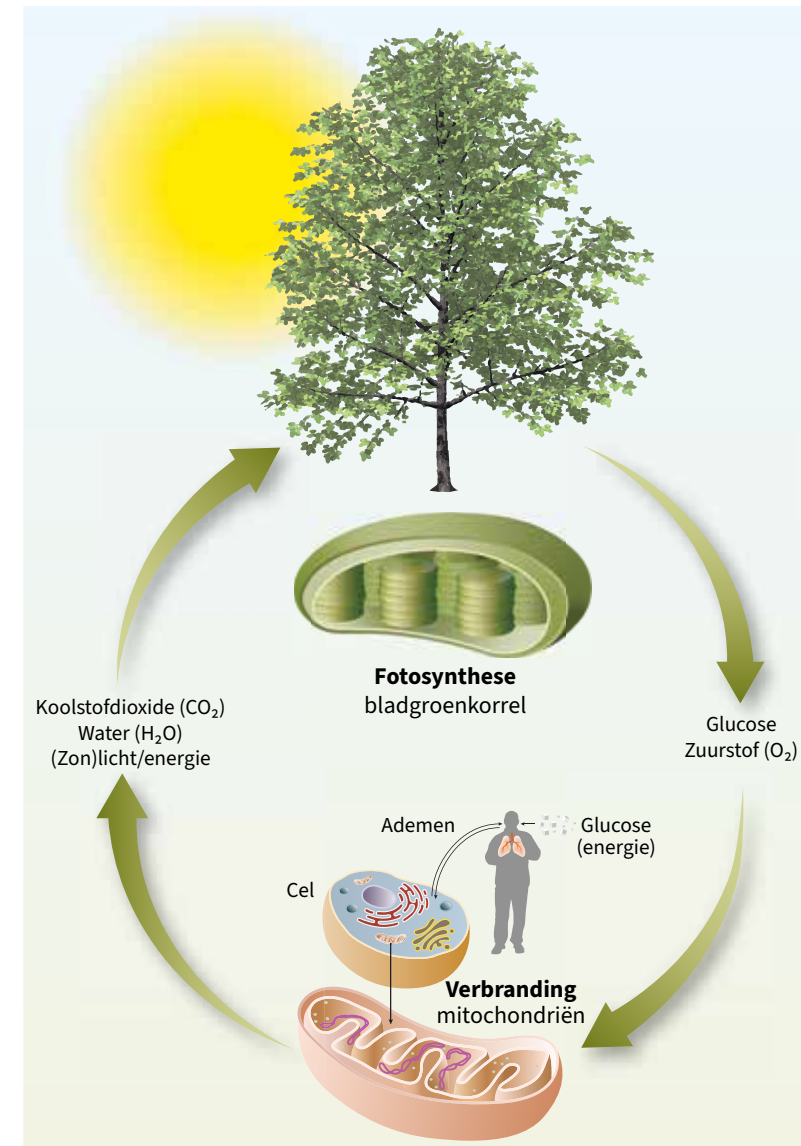
SCHONE ENERGIE EN MATERIALEN UIT BIOMASSA- RESTSTROMEN

Biomassareststromen kunnen fungeren als een kosteneffectieve bron van groene energie en groene koolstof. Zo worden rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi's) in de toekomst bronnen van groene energie, koolstof, grondstoffen en schoon water. En dankzij zeewierteelt worden de oceanen bronnen van voedsel, grondstoffen, materialen en energie. Bovendien kan de 'sargassumplaag', overmatige groei van zeewier, in ons voordeel worden gebruikt.

Indirecte bron van zonne-energie

Zonnecellen presteren beter dan fotosynthese bij het omzetten van zonne-energie in een nuttige energiedrager. Biomassa telen voor energieproductie is daarom niet verstandig. Tenminste op land, want biomassa telen op zee kan wél efficiënt. Sargassum (zeewier) is daardoor niet langer een plaag, maar een zegen.

De kringloop van het leven: fotosynthese en verbranding ^[112]



Energierijke biomassa

Naast zon en wind is ook biomassa een indirecte vorm van zonne-energie. Planten, bomen en zeewier groeien namelijk door fotosynthese. Met behulp van zonne-energie worden kooldioxide (CO₂ uit de lucht) en water (H₂O) daarbij omgezet in zuurstof (O₂) en glucose (C₆H₁₂O₆). Als dieren en mensen deze energierijke biomassa eten en 'verbranden', wordt de glucose met behulp van zuurstof afgebroken. De vastgelegde energie komt vrij, samen met water en koolstofdioxide – de ingrediënten voor plantengroei. Het leven op aarde is een kringloop, zo mag je concluderen, die wordt aangedreven door de zon.

Voedselproductie versus energieproductie

Als biomassa energie bevat, zou je die biomassa dus kunnen gebruiken als energiebron. Toch is dat niet verstandig. Zonnepanelen kunnen zonlicht namelijk veel efficiënter omzetten in bruikbare energie dan gewassen ^[113]. Tegenwoordig hebben zonnepanelen een efficiëntie van 20-25%, terwijl de efficiëntie van C₃-fotosynthese (de basisvorm) maximaal 4.6% is en die van C₄-fotosynthese (tijdens een tussenstap wordt een verbinding gemaakt met 4 C-atomen) maximaal 6% ^[113]. De maximale efficiëntie, die geldt voor mais, suikerriet, sorghum (verschillende graansoorten) en olifantsgras, is bovendien alleen mogelijk bij voldoende water en nutriënten (o.a. stikstof en fosfaat, afkomstig van mest en kunstmest). Zonnepanelen hebben dat allemaal niet nodig. Biomassa kun je om deze redenen,



Houtproductie met zaagsel als biomassareststroom

zeker op land, beter telen voor voedselproductie dan voor energieproductie. Wel is het zinvol en verstandig om voor energieproductie de reststromen van biomassa te gebruiken. Het gaat dan bijvoorbeeld om (dierlijke) mest, onbruikbare delen van gewassen, oogstafval of reststromen die overblijven na verwerking (bijvoorbeeld houtsnippers en zuiveringsslib). Ook in oceanen is biomassa te vinden in de vorm van zeewier, op sommige plekken vormt dit zelfs een plaag. Zulke reststromen zijn niet alleen bruikbaar als bron van energie, maar vooral ook als bron van koolstof.

Overmatige zeewiergroei in de oceanen

Door wegspoelende kunstmest komen er veel nutriënten in de oceanen terecht. Op veel plekken veroorzaakt dit eutrofiëring. Daardoor treedt overmatige groei op van zeewier. Vooral sargassum, een bruinwier, is een groot

probleem in het Caribisch gebied en in Midden- en Zuid-Amerika. Overmatige groei daarvan zorgt er voor veel gezondheids-, milieu- en economische schade.

Op land kun je biomassa beter telen voor voedselproductie dan voor energieproductie

Maar zeewier is ook een goede grondstof. In combinatie met de productie van zonne- en windenergie kun je er volledig duurzame raffinaderijen en chemische complexen mee van de juiste energie en grondstoffen voorzien. Zo sla je twee vliegen in een klap: de eutrofiëring en verzuring van de Atlantische Oceaan (de 'sargassumplaag') bestrijden én een duurzaam grondstoffen- en materialensysteem ontwikkelen.

Bron van waterstof en koolstofdioxide

Biomassa kun je beter omzetten in biowaterstof en bio-CO₂ dan verbranden of vergisten. Waterstof kun je gebruiken als grondstof en energiedrager, koolstofdioxide kun je gebruiken voor CO₂-dosering in kassen en als grondstof voor de industrie. Voor veel chemische producten en synthetische brandstoffen is namelijk koolstof nodig.

Groene energie en koolstof

Reststromen van droge biomassa (zoals stro, zaagsel en houtafval) en die van natte biomassa (zoals mest, slib en groente- en fruitafval) spelen momenteel een belangrijke, vaak lokale, rol bij de opwekking van duurzame energie. Droge biomassa kun je verbranden. Met de daarbij vrijkomende warmte kun je koken of verwarmen. Ook kun je er pellets van maken, waarmee je elektriciteitscentrales kunt (bij)stoken. Natte biomassa wordt meestal vergist tot biogas, waarna je het kunt verbranden en met de vrijkomende warmte kunt koken of verwarmen. Ook kun je biogas gebruiken in een gasturbine of gasmotor, waarmee je elektriciteit en warmte produceert. De laatste jaren wordt biogas ook wel opgewaardeerd naar aardgaskwaliteit, waarna het via het gasnet kan worden gedistribueerd. Of er wordt dan bio-CNG (compressed natural gas) of bio-LNG (liquefied natural gas) van gemaakt, voor gebruik in voer- en vaartuigen.

In een duurzaam energiesysteem kunnen biomassa-reststromen óók dienen als bron van groene koolstof. Voor chemische producten (zoals methanol, plastics en verf) en brandstoffen met een hoge energiedichtheid (zoals diesel, kerosine en benzine) is namelijk koolstof nodig. Nu halen we die koolstof uit aardolie, kolen en aardgas – allemaal ‘koolwaterstoffen’, verbindingen van koolstof en waterstof. In een duurzaam energiesysteem zal de koolstof uit andere bronnen moeten komen, bijvoorbeeld uit biomassa-rest-

stromen. Of we winnen het terug uit chemische materialen aan het eind van hun levenscyclus. Naar alle waarschijnlijkheid is het (terug)winnen van koolstof uit deze twee bronnen goedkoper en eenvoudiger dan het winnen van koolstof (in de vorm van CO₂) uit de lucht (Direct Air Capture) ^[114].

Om dit voor elkaar te krijgen, kun je biomassa-reststromen in de toekomst omzetten naar biowaterstof en biokoolstofdioxide. Waterstof is bruikbaar als grondstof en energiedrager; koolstofdioxide is bruikbaar als grondstof voor producten waarvoor we nu nog fossiele koolstof gebruiken, en voor CO₂-dosering in kassen, om de plantengroei te bevorderen.

In een duurzaam energiesysteem zijn biomassa-reststromen een bron van groene energie én – vooral – van groene koolstof

Waterstoftransport via aardgasinfrastructuur

Nu wordt naar aardgaskwaliteit opgewerkt biogas vaak gedistribueerd via het aardgasnet. Zou je helemaal stoppen met aardgas, dan zou je de aardgasinfrastructuur uitsluitend in stand moeten houden voor het transport van biogas, waarvan veel minder beschikbaar is. Terwijl diezelfde aardgasinfrastructuur ook geschikt is voor het transport van

waterstof. Zet je biogas om in waterstof en CO₂, dan los je dit probleem op: je kunt de bestaande aardgasinfrastructuur helemaal gebruiken voor het transport van waterstof. Zo vermijd je een aardgas lock-in en versnel je tegelijkertijd de overgang naar een duurzaam energiesysteem. Uiteindelijk gebruiken we de aardgasinfrastructuur uitsluitend voor het transport van waterstof, uit elektrolyse, uit biomassa-reststromen, en in een overgangperiode, ook nog uit fossiele energiebronnen. Eventueel kun je biogas uit biomassa-reststromen via een lokaal net blijven distribueren, mocht dit beter aansluiten bij de lokale omstandigheden.

Kort samengevat zijn dit de redenen om biomassa-reststromen in de toekomst om te zetten naar waterstof en CO₂:

- Waterstof is bruikbaar als energiedrager en grondstof, CO₂ als grondstof.
- Zowel het gebruik van biowaterstof als bio-CO₂ voorkomt fossiele CO₂-emissies.
- Opslag en/of langdurige vastlegging in producten van bio-CO₂ geeft negatieve CO₂-emissies.
- Een aardgas lock-in wordt vermeden en de bestaande aardgasinfrastructuur kan volledig worden gebruikt voor transport van waterstof.

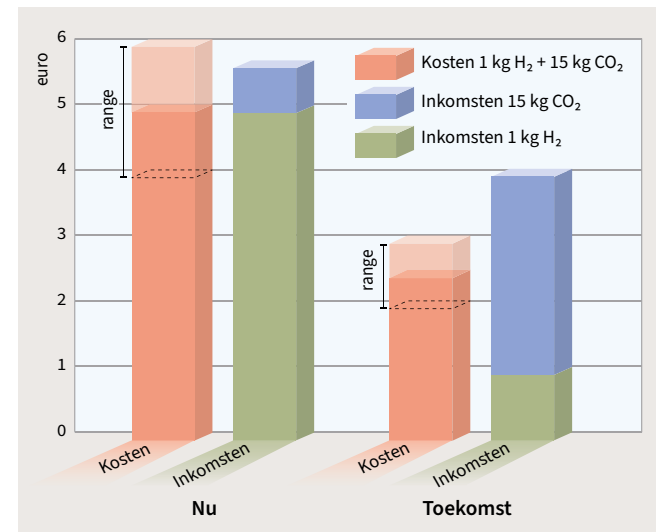
Anaerobe vergisters bij een afvalwaterzuiveringsinstallatie



Positieve businesscase, nu en in de toekomst

Biogas opwerken naar aardgaskwaliteit en vervolgens omzetten in waterstof en CO₂: dat zijn twee conversiestappen, elk met een energieverlies en extra investeringskosten. Waarom is dit toch economisch aantrekkelijk, nu en in de toekomst? Omdat je niet één, maar twee producten maakt, namelijk waterstof én koolstofdioxide. En de prijs van die twee ontwikkelt zich op een verschillende manier. Eerst maar even naar de techniek. Nadat biogas is opgewerkt naar aardgaskwaliteit zetten we het om in H₂ en CO₂. Dit gebeurt met een kleinschalige steam methane reformer of met een autothermal reformer. Gebruik je mest en ander plantaardig afval als biomassa-reststroom, dan produceer je naast 1 kilo waterstof ook zo'n 15 kilo CO₂ ^[115]. Via een pijpleiding gaat de waterstof naar het energiesysteem, waar het in prijs moet concurreren met waterstof uit andere bronnen. De CO₂ maken we vloeibaar en transporteren we over de weg naar de afnemers, bijvoorbeeld een chemische fabriek, een biobrandstoffenfabriek of een tuinbouwkassengebied.

Productiekosten en opbrengsten van 1 kg waterstof plus 15 kg koolstofdioxide uit biogas, nu en in de toekomst ^[115]



Deze omzetting van biogas in H₂ en CO₂ is economisch interessant. De prijs van groene waterstof gaat in de toekomst omlaag doordat elektrolyse van water met duurzame energie goedkoper wordt. De prijs van groene CO₂ gaat juist omhoog, doordat CO₂ schaarser wordt. Door deze twee prijsontwikkelingen is altijd een positieve businesscase mogelijk, nu en in de toekomst. We kunnen dit illustreren met een scenario voor de prijsontwikkeling van waterstof en CO₂. Nu kost de productie van 1 kg waterstof plus 15 kg CO₂ uit biogas 4-6 euro. Door technologie- en efficiency-verbeteringen gaan deze kosten in de toekomst omlaag, tot 2-3 euro. De inkomsten worden bepaald door de waterstofkosten (laten we aannemen nu zo'n 5 euro per kilo, in de toekomst 1 euro per kilo) en de CO₂-prijs (laten we aannemen nu 50 euro per ton, in de toekomst 200 euro per ton). Het blijkt dat de productie van waterstof en CO₂ uit biomassa-reststromen zowel nu als in de toekomst een positieve business case kan opleveren. Nu vooral door de verkoop van waterstof, maar in de toekomst vooral door de verkoop van CO₂.

Geïntegreerde rioolwaterzuivering

Rioolwaterzuiveringsinstallaties verwerken een grote biomassa-reststroom: het afvalwater van burgers en bedrijven. Voorheen werd dit alleen gezuiverd, tegenwoordig worden er ook energie en grondstoffen uit teruggewonnen. In de toekomst komt er nóg een stap bij: er schoon water uit terugwinnen en groene koolstof mee produceren.

Hoe maak je afvalwater schoon?

De eerste zuiveringsstap (primary treatment) in een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi) bestaat uit het verwijderen van grote deeltjes uit het afvalwater. Dit gebeurt door filtratie en bezinking. Vervolgens breken bacteriën de afvalstoffen af (secondary treatment), een proces dat wordt versneld door het afvalwater te beluchten. Na een tot enkele dagen is het afvalwater 'schoon-gegeten'. Het gezuiverde water wordt gescheiden van het 'actief slib', een mengsel van vuil water en volgegeten bacteriën. Dan wordt het nabehandeld (desinfectie, filtratie en soms ook nutriëntenterugwinning – tertiary treatment) en op het oppervlaktewater geloosd. Een deel van het actief slib wordt hergebruikt om nieuw afvalwater te zuiveren, een groot deel blijft over. Uit dit surplus-slib kun je biogas produceren, maar het kan ook worden verbrand of gestort. Na de productie van biogas wordt het uitgegiste slib verbrand of als meststof gebruikt in de landbouw.

Nieuwe technologieën slagen er steeds beter in om met behulp van licht of lucht de slibopbrengst – en daarmee de biogas-productie – te vergroten. Maar het is onzeker of deze technologieën verder tot ontwikkeling komen en op grote schaal zullen worden ingezet.

Energiegebruik van rioolwaterzuiveringen

Rioolwaterzuiveringsinstallaties gebruiken de meeste energie in de vorm van elektriciteit, onder meer voor beluchting, pompen en slibontwatering. Daarnaast is er in de rwzi energie nodig om gebouwen te verwarmen, de vergister op temperatuur te houden en het overgebleven slib met vrachtwagens af te voeren. Het gemiddelde elektriciteitsgebruik is ongeveer 0,5 kWh/m³ afvalwater, met een range van 0,2 tot 0,9 kWh/m³ ^{[116],[117]}. Het gemiddelde watergebruik in de EU is 150 liter water per persoon per dag ^[118]. Vrijwel al dit water, zo'n 55 m³ per persoon per jaar, stroomt via het riool naar een rwzi. Dat is exclusief hemelwater, dat ook vaak via het riool wordt afgevoerd. Om al dit afvalwater te zuiveren, is per persoon per jaar dus ongeveer 28 kWh elektriciteit nodig. Dat is 1-2% van het huishoudelijk elektriciteitsgebruik per persoon, dat gelijk is aan ongeveer 1.600 kWh per persoon per jaar ^[119]. Meer dan de helft (55-70%) van het elektriciteitsgebruik van een rwzi is nodig voor het beluchten; zo'n 15% is nodig voor het verpompen van afvalwaterstromen en zo'n 7% voor het ontwateren van slib ^[120].

Hoe maak je waterstof en koolstofdioxide van biomassa-reststromen?

Via vergassing kun je droge biomassa-reststromen en plastics omzetten in een synthesegas, dat bestaat uit methaan (CH₄), waterstof (H₂), koolstofmonoxide (CO), koolstofdioxide (CO₂) en stikstof (N₂). Dit synthesegas kun je vervolgens verder omzetten en scheiden in H₂, CO₂ en N₂.

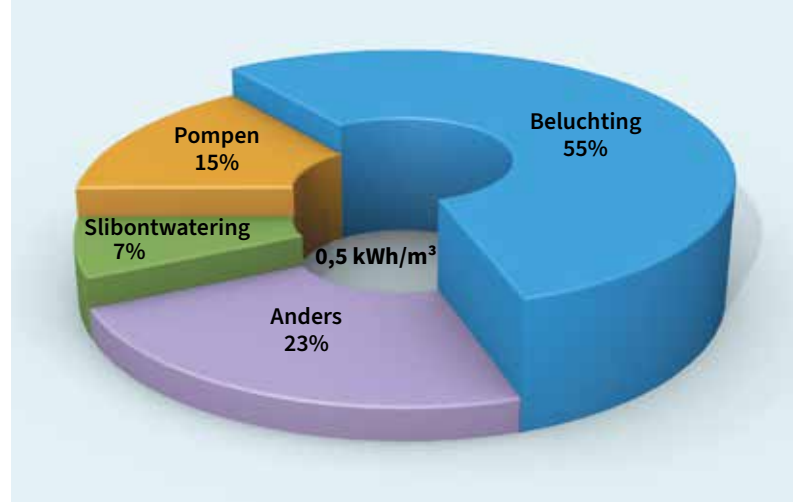
Natte biomassa kun je eerst vergisten en levert biogas dat voornamelijk bestaat uit CH₄ en CO₂, of vergassen en levert een biosynthesegas dat bestaat uit H₂, CH₄, CO en CO₂. Daarna kun je dit biogas of biosyngas omzetten in H₂ en CO₂. Er zijn diverse vergassings- en vergistingstechnologieën om een biosyngas of biogas te produceren. De technologieën die nodig zijn om er daarna waterstof en koolstofdioxide van te maken, zijn dezelfde technologieën om van fossiele brandstoffen (kolen, olie of aardgas), waterstof en CO₂ te maken.

Lachgasemissie door rioolwaterzuivering

In afvalwater wordt lachgas (N₂O) gevormd, een broeikasgas dat 265 keer zo sterk is als CO₂. Na CO₂ en methaan levert lachgas de grootste bijdrage aan de uitstoot van broeikasgassen. In rioolwater zit gemiddeld zo'n 0,05 kg/m³ stikstof, in de vorm van ammoniak, afkomstig van urine en fecaliën ^[121]. Per kg stikstof produceert een rwzi zo'n 0,03 kg lachgas ^[122]. Per 1.000 m³ rioolwater is dat 1,5 kg lachgas. Dat staat gelijk aan een broeikasgasequivalent van bijna 400 kg CO₂. Jaarlijks stoten rwzi's in Nederland en Europa respectievelijk 310.000 en 15.500.000 ton CO₂-equivalenten aan lachgas uit.

Nuttig gebruik van zuurstof en warmte

Om het energiegebruik en de CO₂-emissies van rioolwaterzuiveringen te verminderen wordt vooral ingezet op energiebesparing, het verhogen van de biogasopbrengst en het gebruik van duurzame elektriciteit. Met een bredere systeembenadering kan het nog beter. Zo'n benadering begint met de productie van waterstof. Waterstof maak je dan door elektrolyse van water in een elektrolyser die wordt gevoed met een deel van de (zelf opgewekte en ingekochte) duurzame elektriciteit. Maar bij het produceren van waterstof via elektrolyse komt ook zuurstof vrij. En als je deze zuurstof in plaats van lucht gebruikt voor de beluchting, dan hoef je maar éénvijfde van het volume aan



Elektriciteitsgebruik van rioolwaterzuiveringsinstallaties

lucht door het water te pompen, omdat de bacteriën alleen zuurstof nodig hebben. Zo bespaar je dus aanzienlijk op het gebruik van elektriciteit voor beluchting. En omdat je zuurstof in plaats van lucht gebruikt, zijn er bovendien minder lachgasemissies ^[124]. De restwarmte uit de elektrolyser kun je ten slotte gebruiken om de vergister op temperatuur te houden. Daardoor houd je meer biogas over – het biogas dat je anders zou gebruiken voor deze verwarming.

Bij rioolwaterzuiveringsinstallaties kan niet alleen waterstof, maar ook de zuurstof en restwarmte van een elektrolyser nuttig gebruikt worden

Lachgasproductie en -emissie van rioolwaterzuiveringsinstallaties in Nederland en Europa

| | Nederland | Europa |
|--|--------------------------------|--------------------------------|
| Lachgasproductie per 1.000 m ³ afvalwater | 1,5 kg | 1,5 kg |
| Watergebruik per persoon | 120 liter/dag ^[123] | 150 liter/dag ^[118] |
| Aantal inwoners | 17,7 miljoen | 710 miljoen |
| Lachgasemissie | 1.200 ton/jaar | 58.300 ton/jaar |
| CO ₂ -equivalenten | 310.000 ton/jaar | 15.500.000 ton/jaar |

Hoeveel nuttige warmte produceert een elektrolyser?

De hoeveelheid warmte die een elektrolyser produceert, komt overeen met het energieverlies dat optreedt bij de omzetting van elektriciteit naar waterstof. Een elektrolyser met een HHV-efficiëntie van 80% produceert uit 100 kWh elektriciteit 80 kWh waterstof. De resterende 20 kWh bestaat uit warmte (op 60-80 °C). Omdat deze warmte op verschillende plekken in het systeem aanwezig is, in de elektrolyser zelf, de waterstofstroom en de zuurstofstroom, kun je niet alle warmte benutten – waarschijnlijk 10-15 kWh ^[125].

Voor beluchting heb je een elektrolyser nodig die continu dezelfde hoeveelheid zuurstof en warmte levert. Zou je de elektrolyser aansluiten op wind- en/of zonvermogen, dan lukt dit niet. Er is dus ook een aansluiting op het elektriciteitsnet nodig. Dit kan op een slimme manier, namelijk door de helft van het zon- en windvermogen op het elektriciteitsnet aan te sluiten en de andere helft op de elektrolyser. Bij dezelfde capaciteit van het elektriciteitsnet kun je nu twee keer zoveel zon- en windvermogen plaatsen en nuttig gebruiken. Bovendien kun je de elektrolyser continu op vol vermogen laten draaien; de aansluitcapaciteit op het elektriciteitsnet is immers even groot als de capaciteit van de elektrolyser. Een deel van de benodigde elektriciteit komt direct van het zon- en windvermogen en een deel koop je in als groene stroom en komt van het elektriciteitsnet.

Biogas omzetten in H₂ en CO₂

Biogas verbranden in een gasmotor, zoals nu vaak nog gebeurt, is inefficiënt omdat je de meeste warmte niet nuttig kunt gebruiken. Daarom wordt biogas meer en meer opgewerkt naar aardgaskwaliteit, zodat het in het aardgasnet kan worden ingevoerd. Als je waterstof gaat produceren, zou je daarvoor een nieuwe pijpleiding moeten aanleggen. Deze investering is niet nodig als je het biogas omzet naar waterstof en CO₂: de aardgaspijpleiding kun je dan immers hergebruiken als waterstofpijpleiding voor zowel de waterstof van de elektrolyser als die uit het biogas.

TECHNOLOGIE VOOR DE TOEKOMST

Biopolymeren

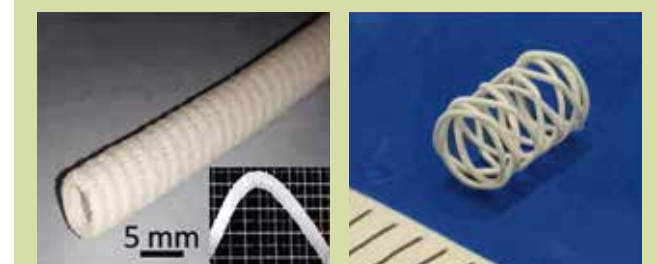
Bacteriën maken grondstof voor bioplastics uit zuiveringsslib

Bacteriën breken biomassa-reststromen af tot kleine brokstukken, zoals CO₂ en H₂. Van die brokstukken maken we met chemische technologie allerlei organische stoffen, zogeheten synthetische polymeren. Onder bepaalde kweekcondities kunnen bacteriën ook zélf polymeren maken. Die noemen we biopolymeren. Na jarenlang onderzoek is het gelukt om bacteriën uit zuiveringsslib biopolymeren te laten maken ^[126]. Die hoef je alleen nog maar uit de bacteriën te extraheren en je hebt een grondstof voor bioplastics.

Een bijkomend voordeel is dat deze bioplastics biologisch afbreekbaar zijn.

Door bacteriële fermentatie (gisting) kun je bijvoorbeeld polyhydroxyalkanoaten (PHA) maken, een zeer veelzijdige grondstof. Zo kun je er afbreekbare verpakkingen en kweekpotten voor de tuinbouw van maken, en er medische bio-implantaten mee printen in 3D. Een voorbeeld van zo'n implantaat is een stent, waarmee je bloedvaten open kunt houden. Toepassingen van PHA maken het ook mogelijk om medicijnen heel precies te doseren en op de juiste plek in het lichaam af te leveren ^[127].

Medische toepassing van PHA: een 3D-geprinte stent (1 mm doorsnee) om bloedvaten open te houden ^[128]



De vrijkomende CO₂ kun je bovendien nuttig gebruiken, bijvoorbeeld in tuinbouwkassen. Ligt er een kassengebied in de buurt, dan kun je de CO₂ daar met een pijpleiding naartoe brengen. Als alternatief kun je de CO₂ ook vloeibaar maken en dan met een tankauto (op waterstof) naar een chemisch bedrijf of synthetische brandstofproducent vervoeren. Daar wordt het als grondstof gebruikt. CO₂ is vloeibaar bij verschillende combinaties van druk en temperatuur. In tankauto's wordt CO₂ vervoerd onder een druk van zo'n 20 bar en bij een temperatuur van -30 °C.

Ammoniak terugwinnen uit afvalwater

Afvalwater bevat veel stikstof in de vorm van ammoniak. Het is onwenselijk ammoniak te lozen op het oppervlaktewater, want dat leidt tot algenbloei en eutrofiëring. Daarom wordt het in de rwzi omgezet in stikstofgas. Dit proces kost niet alleen veel energie, het verlies van de ammoniak is bovendien zonde. Dat kan namelijk ook dienstdoen als meststof en energiedrager.

Kunstmest produceren kost veel energie. Het Haber-Bosch-proces, dat ammoniak (kunstmest) produceert uit stikstof uit de lucht en waterstof, is verantwoordelijk voor 1-2% van het wereldwijde energiegebruik ^[129]. Die kunstmest brengen we op het land om plantaardige eiwitten te produceren. Een deel daarvan gebruiken we als veevoer. Het vee maakt er vervolgens dierlijke eiwitten van. Vanwege allerlei verliezen in de productieketen wordt slechts 17% van de geproduceerde stikstof vastgelegd in eiwitten voor menselijke consumptie ^[129]. Bij de omzetting van eiwitten ontstaat in ons lichaam ammoniak, die via onze urine in het riool belandt. Energetisch en economisch kan het gunstig zijn om deze ammoniak niet in een rwzi te vernietigen, maar direct uit het afvalwater terug te winnen als meststof. Of in de toekomst wellicht als eiwit. Voor de omzetting van ammoniak in stikstof is namelijk dezelfde hoeveelheid energie nodig als voor de productie van ammoniak uit stikstof en waterstof via het Haber-Bosch proces, te weten 12,5 kWh/kg stikstof ^[129].

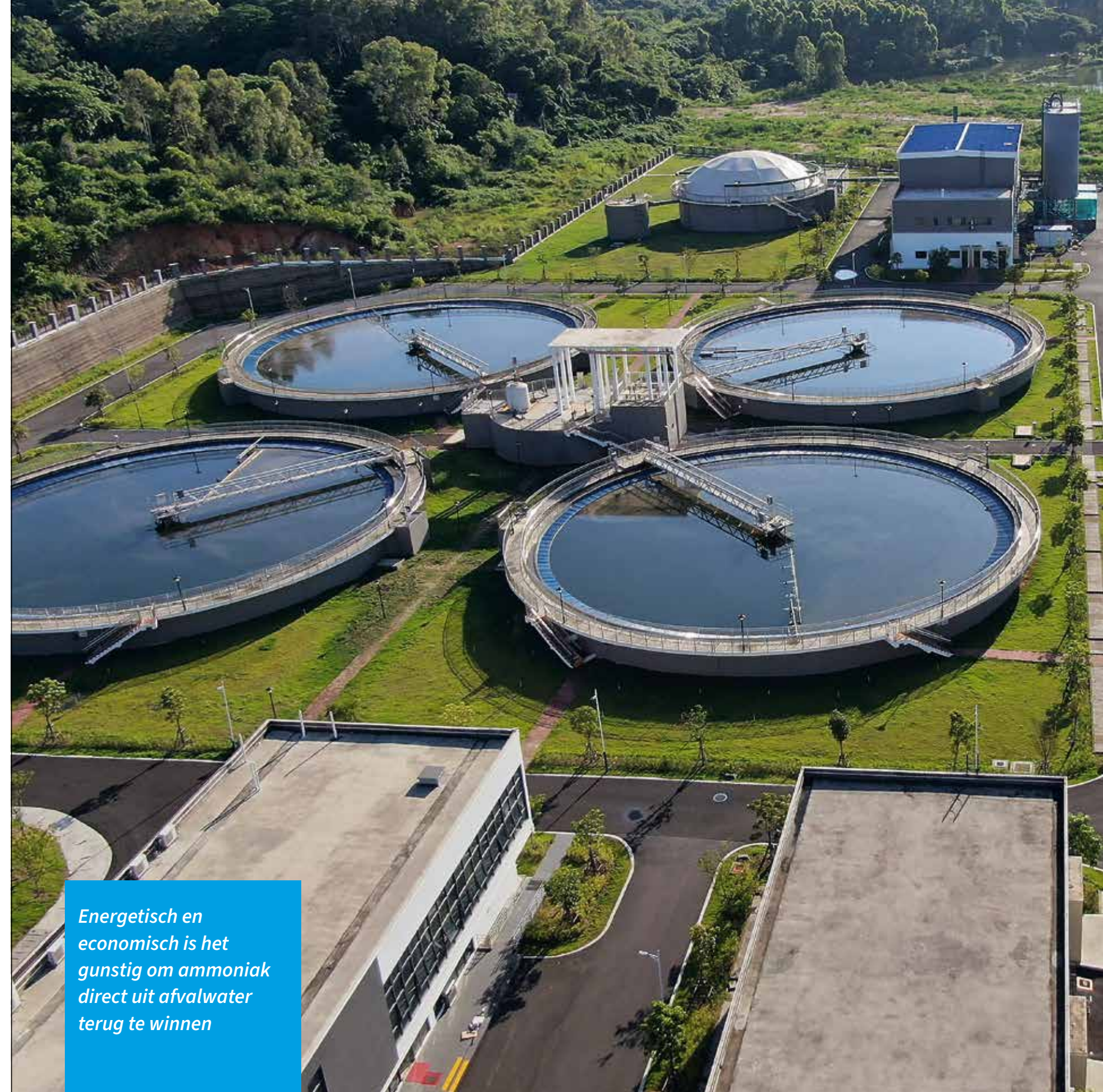
Ammoniak kun je op dit moment (nog) het best terugwinnen uit de waterige reststroom die de vergister verlaat. Deze stroom bevat namelijk hoge gehalten ammoniak. Met verschillende technieken kun je die ammoniak vastleggen, bijvoorbeeld als ammoniumsulfaat. Dit product is bruikbaar als meststof.

In de toekomst kun je ammoniumsulfaat met behulp van aerobe waterstofoxiderende bacteriën ook direct omzetten in eiwitten. Dit doe je door de bacteriën te voeden met ammoniak, waterstof en CO₂ ^[130]. Door direct eiwitten te produceren, heb je niet meer het heel inefficiënte proces nodig van planten kweken met kunstmest, water en zonne-energie, om daar vervolgens weer eiwitten uit te halen. Die inefficiëntie wordt alleen nog maar groter als je mais of soja aan dieren voert, en daar dan weer dierlijke eiwitten uithaalt.

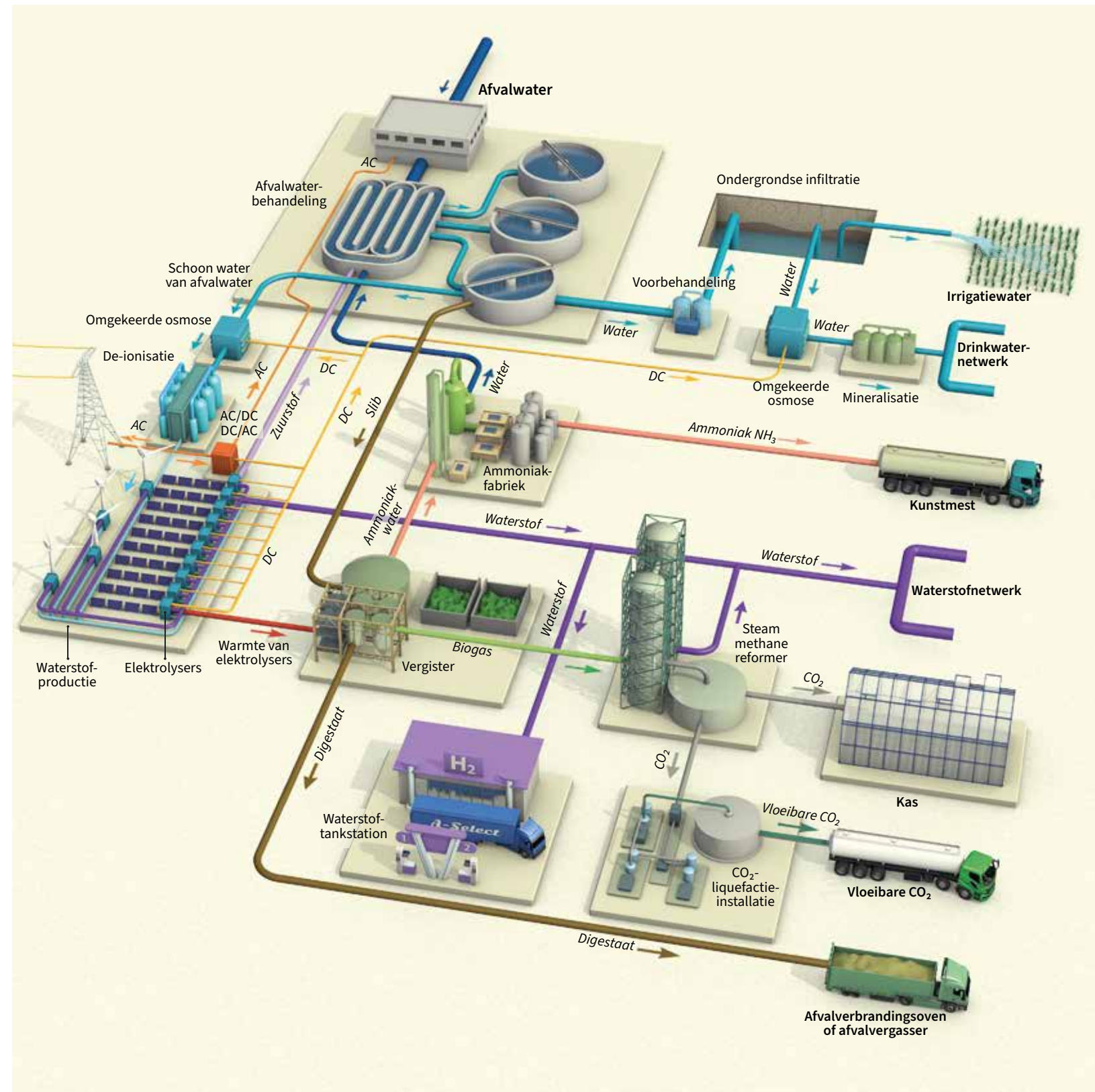
De potentie voor het terugwinnen van ammoniak is groot. Per jaar gaat het om ongeveer 1,5 kg 'terugwinbare' ammoniak per persoon, uitgaande van de gemiddelde hoeveelheid afvalwater ^[131]. Als we al deze ammoniak terugwinnen en hergebruiken als kunstmest, besparen we wereldwijd 110 miljard kWh aan energie. Mocht direct gebruik van teruggewonnen ammoniak stuiten op bezwaren, bijvoorbeeld juridische belemmeringen of gebrek aan sociale acceptatie, dan kan het eventueel ook weer worden omgezet in waterstof.

Hergebruik van gezuiverd afvalwater

Overal ter wereld wordt gezuiverd afvalwater geloosd op het oppervlaktewater of in zee. Dit gezuiverde water is ook bruikbaar voor irrigatie en je kunt er gedemineraliseerd water of drinkwater van maken. Het is zonde om dit water weg te laten lopen, des te meer omdat er op veel plaatsen in de wereld een tekort aan zoet water is.



Energetisch en economisch is het gunstig om ammoniak direct uit afvalwater terug te winnen



Voor de productie van waterstof en zuurstof via elektrolyse is zeer zuiver, gedemineraliseerd water nodig. Om dit te maken uit gezuiverd afvalwater, moet je dat eerst voorbehandelen en daarna demineraliseren met een installatie voor omgekeerde osmose (RO, reversed osmosis). Het resultaat is water van hoge kwaliteit, waaruit je met een eenvoudige nabehandeling drinkwater kunt maken. Om het geschikt te maken voor de elektrolyser, moet het water nóg zuiverder worden gemaakt. Dat gebeurt via een de-ionisatieproces.

Om water voor waterstof te produceren heb je maar een kleine RO-installatie nodig. Gebruik je een groter exemplaar, dan kun je ook drinkwater maken. Het gezuiverde afvalwater zou je eerst kunnen opslaan in de ondergrond. Door de bodempassage wordt het water nog verder gezuiverd. Na omgekeerde osmose en remineralisatie kan daarna drinkwater worden geleverd. Voordat je dit kunt terugleveren aan een drinkwaternet, is er uiteraard nog wel een kwaliteitscontrole vereist. Zo kun je gezondheidsrisico's vermijden.

Geïntegreerde rioolwaterzuivering

Door rioolwaterzuivering te combineren met duurzame energieproductie, ontstaat een geïntegreerd systeem dat groene waterstof, groene CO₂, ammoniak, irrigatiewater en drinkwater produceert. In de toekomst kan zo'n systeem zelfs bioplastics en eiwitten produceren, zonder CO₂-emissies en met minder tot helemaal geen emissies van methaan en lachgas. De belangrijkste voordelen van zo'n geïntegreerd systeem zijn:

- 1 productie van groene stroom uit zon en wind;
- 2 productie van groene waterstof door de elektrolyse van water met groene stroom;
- 3 mogelijkheid om twee keer zoveel zon- en windvermogen in energiesysteem in te passen door een slimme combinatie van elektrolysercapaciteit en netaansluiting elektriciteit;
- 4 productie van groene waterstof én groene CO₂ uit omvorming (reforming) van biogas;

- 5 nuttig gebruik van zuurstof uit elektrolyser, met daardoor 50-75% besparing op het elektriciteitsgebruik voor belichting ^[124];
- 6 verwarming van de vergister met restwarmte van de elektrolyser;
- 7 minder emissies van methaan en lachgas;
- 8 terugwinnen van ammoniak uit rioolwater, waardoor elektriciteit en waterstof voor de productie van nieuwe ammoniak worden uitgespaard;
- 9 naast productie van gedemineraliseerd water voor de elektrolyser ook productie van irrigatiewater én mogelijk van drinkwater door het vergroten van de omgekeerde-osmose-installatie;
- 10 tijdelijke opslag in de ondergrond van gezuiverd rioolwater voor gebruik in droge periodes en als extra zuiveringsstap.

Sargassum: van plaag naar nuttige grondstof

Door overmatige groei is het zeewier *sargassum* in veel gebieden een ‘plaag’. Het spoelt in grote hoeveelheden aan op de kust en richt daar gezondheids-, milieu- en economische schade aan. Hier laten we zien hoe je deze problemen kunt oplossen en tegelijkertijd de potentie van het zeewier (als bron van voedsel, materialen en energie) benut.

Overmatige zeewiergroei in de oceanen

Door wegspoelende kunstmest komen er veel nutriënten in de oceanen terecht. Op veel plekken veroorzaakt dit eutrofiëring. Daardoor treedt overmatige groei op van zeewier. Vooral sargassum, een bruinwier, is een groot probleem in het Caribisch gebied en in Midden- en Zuid-Amerika.

Overmatige groei daarvan zorgt er voor veel gezondheids-, milieu- en economische schade. Maar zeewier is ook een goede grondstof. In combinatie met de productie van zonne- en windenergie kun je er volledig duurzame raffinaderijen en chemische complexen mee van de juiste energie en grondstoffen voorzien. Zo sla je twee vliegen in een klap:

Voedselproductie uit zeewier wordt gezien als een belangrijk deel van de oplossing voor het voedseltekort op de wereld



Teelt en oogst van zeewier

de eutrofiëring en verzuring van de Atlantische Oceaan (de ‘sargassumplaag’) bestrijden én een duurzaam grondstoffen- en materialensysteem ontwikkelen.

Zeewier als voedsel

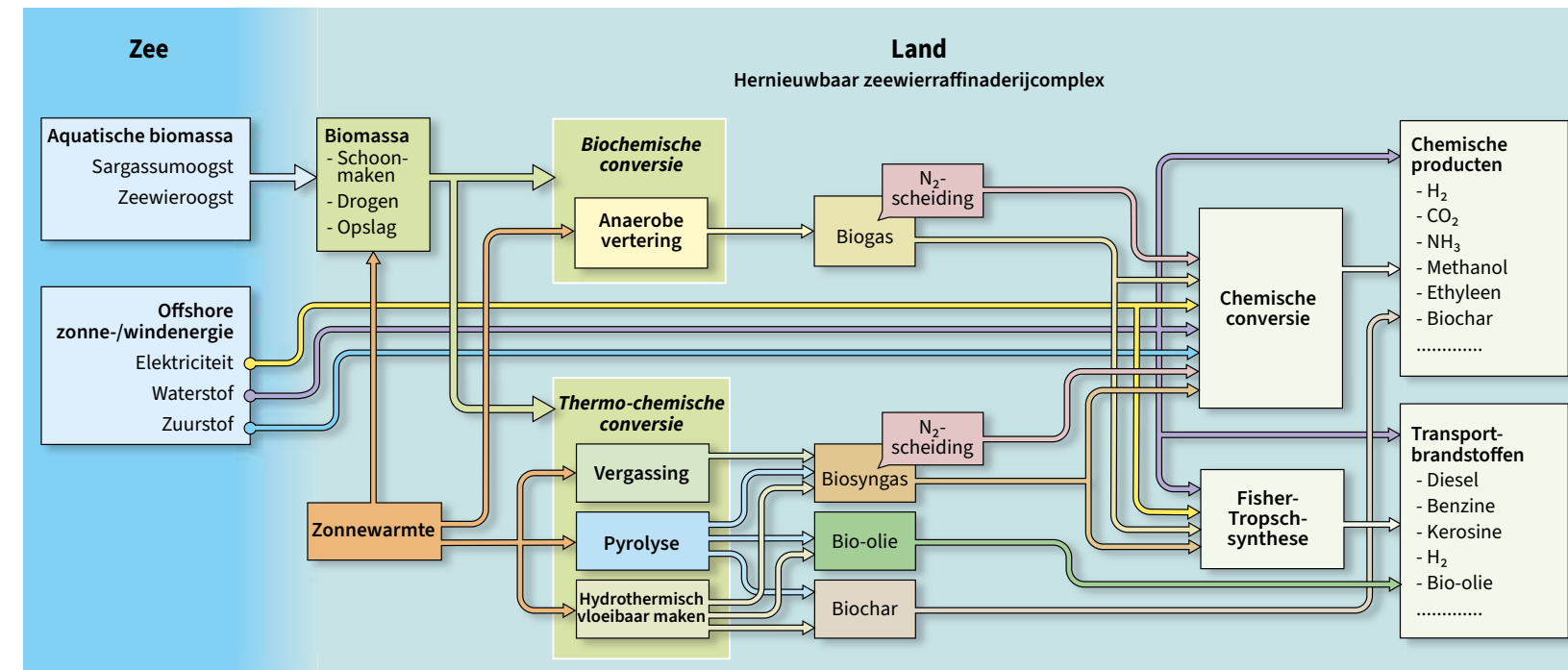
Vers zeewier is een waardevol materiaal, waaruit je voedings- en andere producten kunt maken en energie kunt winnen. Zeewier is onder te verdelen in drie categorieën: groene, bruine en rode zeewier. De drie categorieën zeewier hebben elk een specifieke toepassing als voedsel. Het wordt gebruikt in diverse voedselproducten (o.a. soep, sushi, wraps, salades), voor de productie van hydrocolloïden (alginaat, agar en carrageen) die worden gebruikt als bindmiddel, en als diervoer en mosselvoer. Daarnaast is zeewier een bron van eiwitten en oliën, waarmee je vele gezonde en geneeskrachtige producten kunt maken. Zeewier telen is eenvoudig. Het groeit aan touwen in het water en kan diverse keren per jaar worden geoogst. Zeewier heeft een hogere opbrengst per hectare dan op

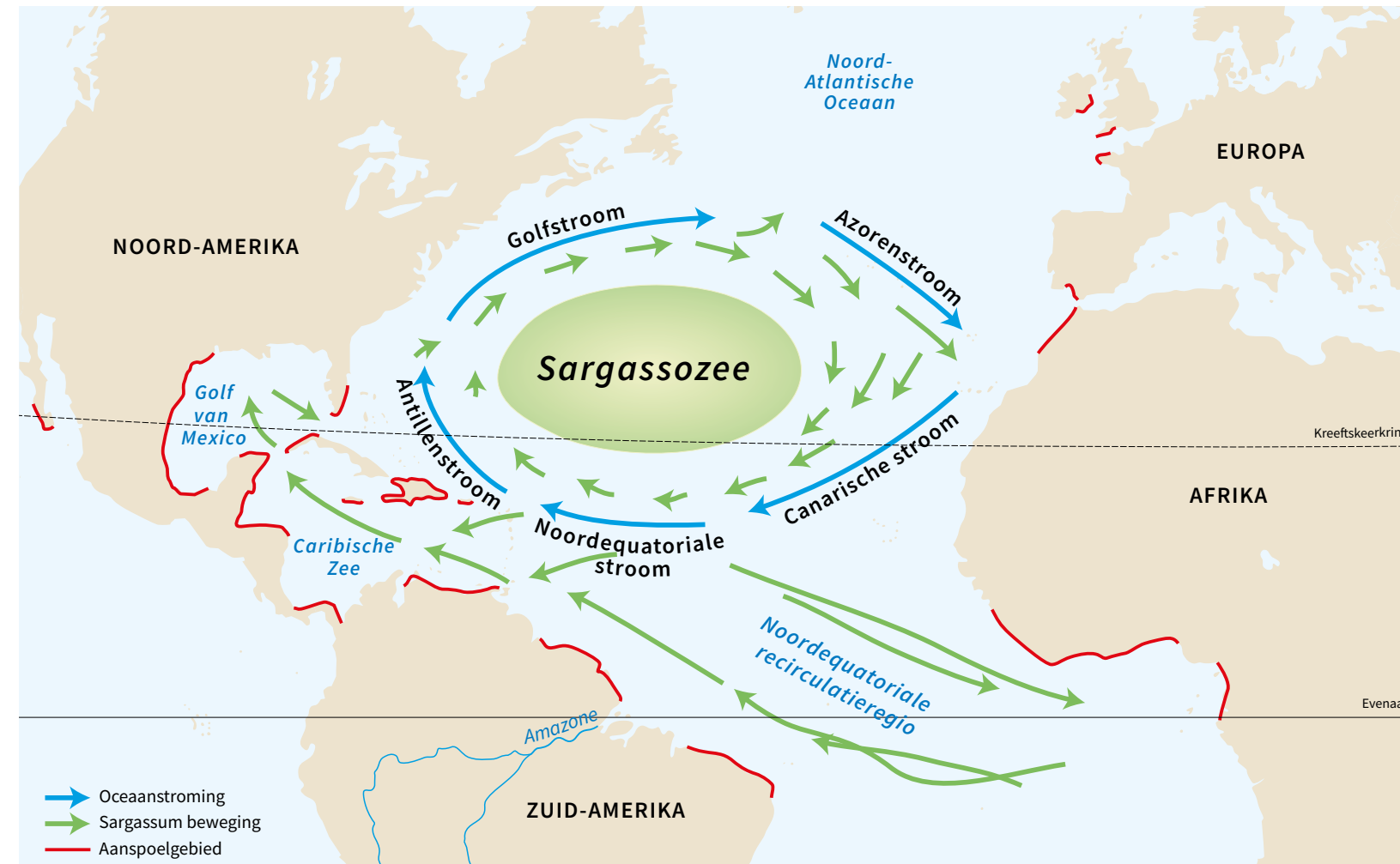
land geteelde gewassen. Het bestaat namelijk volledig uit biomassa die via fotosynthese organische stof opbouwt. Dat geldt niet voor bomen en planten op het land: daarvan doen de stammen en wortels niet mee aan het fotosyntheseproces. Daarnaast kan zeewier snel groeien, omdat er nooit problemen zijn met de aanvoer van water.

Zeewierproductie tot 2050

Voedselproductie uit zeewier wordt gezien als een belangrijk deel van de oplossing voor het voedseltekort op de wereld^[100]. De teelt van zeewier in de wereld neemt snel toe. Werd er in 2000 zo'n 12 miljoen ton zeewier geoogst, in 2019 was dat drie keer zoveel: bijna 36 miljoen ton. Het overgrote deel is geteeld zeewier. Azië vertegenwoordigt 97% van de markt, maar ook in andere delen van de wereld groeit de consumptie van zeewier sterk. In 2019 had de totale wereldmarkt voor zeewier een omvang van zo'n 8,4 miljard dollar^[135].

Duurzame raffinaderij en chemisch complex, met zeewier en water als grondstoffen en zon en wind als bronnen van energie^[132]





De productie van grote volumes zeewier voor menselijk en dierlijk voedsel kan de voedselzekerheid ingrijpend veranderen. Volgens een scenario van de Wereldbank neemt de groei van zeewierteelt tot 2050 toe met 9-14% per jaar. Dat betekent dat in 2050 zo'n 500 miljoen ton droog gewicht aan zeewier wordt geproduceerd. Dat is ongeveer 10% van de huidige wereldvoedselvoorziening. Zeewierproductie genereert daarnaast inkomsten voor veel mensen, waaronder vissers.

Voor dit scenario hanteert de Wereldbank een gemiddelde productiviteit van ongeveer 1.000 ton droog gewicht

zeewier per km² (10 ton per hectare ofwel 1 kg per m²) – naar eigen zeggen is dat een conservatieve schatting die nu geldt voor de best werkende, moderne 'zeeboerderijen'. Voor de totale oogst van 500 miljoen ton in 2050 is dan een zeeoppervlak nodig van ongeveer 500.000 vierkante kilometer, wat overeenkomt met 0,14% van de oppervlakte van alle oceanen ^[100].

Minder eutrofiëring en verzuring

Voor een grote voedselproductie per hectare gebruikt de huidige landbouw veel kunstmest. Naar schatting komt ongeveer 15-30% van deze kunstmest uiteindelijk terecht

in kustwateren, die daardoor veranderen in 'dode' gebieden ^[136]. Dat komt doordat de kunstmest extra voeding (nutriënten, met name nitraten en fosfaten) is en in bepaalde stukken zee een massale zeewiergroei veroorzaakt. Wanneer dat zeewier afsterft, gebruiken de bacteriën die de algen afbreken zoveel zuurstof, dat er voor andere levensvormen, zoals vissen, niets overblijft. Met zeewierteelt kan zo'n overschot aan nutriënten wel worden geabsorbeerd. Als je het zeewier dan oogst en niet laat afsterven, kun je deze 'dode' gebieden weer tot leven wekken.

Bij de productie van de 500 miljoen ton droog zeewier uit het Wereldbank-scenario wordt zo'n 10 miljoen ton stikstof geabsorbeerd. Dit is ongeveer 30% van de hoeveelheid stikstof die nu elk jaar in zee terechtkomt. Naast ammoniak of nitraat komt er ook fosfaat in zee terecht. Omdat de fosfaatreerves in de wereld beperkt zijn en snel afnemen, kan zeewier worden gebruikt als alternatieve bron van fosfaat.

De toenemende CO₂-concentratie in de atmosfeer draagt bij aan de verzuring van de oceanen, wat effect heeft op het zeeleven. De productie van de 500 miljoen ton droog zeewier uit het Wereldbank-scenario kan 135 miljoen ton CO₂ absorberen. Dat is maar een klein deel van de 34,9 miljard ton CO₂ die wereldwijd in 2021 werd uitgestoten ^[103]. Zeewier kan lokaal wel verzuring tegengaan, doordat het de pH (de zuurgraad) van het water verhoogt (een hogere pH waarde betekent minder zuur) ^[137].

Sargassum als plaag

Sargassum is een geslacht van bruine zeewieren, bestaande uit meer dan 300 verschillende soorten, met elk een specifieke samenstelling. In het Caribisch gebied, in de golf van Mexico en in het gebied waar de Amazone uitstroomt, zien we een overmatige groei van dit bruinwier. Ook in andere delen van de wereld komt overmatige zeewiergroei voor, en niet alleen van sargassum. Hierdoor spoelen grote hoeveelheden sargassum aan op de kusten van de eilanden in het Caribisch gebied, de Mexicaanse golf, Brazilië en Afrika

en Europa, met gezondheids-, milieu- en economische problemen als gevolg.

De hoeveelheid sargassum die op de kust aanspoelt, varieert per jaar, seizoen en locatie. Ook is het afhankelijk van de zeestromingen, de weersomstandigheden (met name de windrichting) en de kustmorfologie (reliëf van zeebodem, kustlijn en duinen). In sommige maanden spoelt er helemaal geen sargassum aan, maar in piekmaanden soms miljoenen tonnen. Op stranden, in havens en in riviermondingen aangespoeld zeewier sterft af, gaat rotten en veroorzaakt stankoverlast. Dat heeft een grote negatieve impact op de gezondheid, leefomstandigheden, ecosystemen aan de kust en het zeeleven bij de kust. Ook is het nadelig voor economische activiteiten, zoals visserij, toerisme en scheepvaart ^[138].

Sargassum als energie- en koolstofbron

Vers zeewier is een waardevol materiaal, waaruit je voedings- en andere producten kunt maken en energie kunt winnen.

Wie zelf zeewier teelt, kan heel gericht kiezen voor een specifieke soort of een mix van soorten

Niet alle soorten zeewier zijn even geschikt voor alle toepassingen en producten. Aangespoeld zeewier bestaat altijd uit een wisselende mix van verschillende soorten. Het is bovendien vaak vervuild met zand en andere verontreinigingen en is al aan het vergaan. Dit maakt het moeilijk om er nog voedsel en materialen uit te winnen. Op veel plekken wordt aangespoeld zeewier daarom wel verzameld, maar daarna verbrand. Wie zelf zeewier teelt, heeft geen last van deze problemen en kan heel gericht kiezen voor een specifieke soort of een mix van soorten, afhankelijk van het beoogde gebruik.

Producten die je zou kunnen maken uit 1 ton nat gewicht sargassum ^[139]

| 1 ton verse sargassum | |
|-----------------------|---|
| 22 kg | Alginaat |
| 80 kg | Actieve kool |
| 811 kWh | Energie |
| 841 L | Kunstmest |
| 2.220 | Paar schoenen |
| 4 ton | Compost (meecomposteren) |
| 500 | Notitieboekjes |
| 44.444 | Stukken zeep |
| 5.000 | Onderzetters of visitekaartjes |
| 114 kg | Paddenstoelen |
| 4.926 | Composteerbare wegwerpborden |
| 108 | Sargablokken |
| 11 | Zeeballen |
| 99 | Schape die voor een week zeewier-supplement in hun voer krijgen |
| 10 kg | Fucoïdan |
| < 5 kg | Bioactieve secundaire metabole stoffen |

Om het aanspoelen van sargassum te voorkomen, moet het op zee worden opgevangen. Dit kan bijvoorbeeld door in zee een barrière aan te leggen. In zee opgevangen zeewier is vers en niet verontreinigd met zand. Wel is het nog steeds een mix van verschillende soorten en is het soms verontreinigd met zware metalen of andere stoffen. Zo'n mix is niet geschikt voor voedselproductie, maar wel voor het maken van producten én voor energiewinning.



Het opruimen van aangespoeld sargassum is een arbeidsintensief en vies werk ^[139]

Sargassumbarrières bij zonne- en windparken

Om op zee opgehoopt sargassum te kunnen gebruiken, moet je het bij een barrière opzuigen en daarna vervoeren. Op een aantal plekken in het Caribisch gebied, vooral bij toeristische streken, zijn zulke barrières aanwezig. Een goed voorbeeld is de 4,2 km lange, drijvende barrière die in de Dominicaanse Republiek, sinds 2018, voor Punta Cana ligt. Gespecialiseerde schepen kunnen bij zulke barrières tussen de 50 en 500 ton sargassum per dag opzuigen. Zoals eerder besproken, kan zeewierteelt in het Caribisch gebied goed gecombineerd worden met drijvende windparken. Maar teel je in een windpark gericht specifieke soorten zeewier, dan wil je niet dat dat 'vervuild' wordt met andere soorten. En er mag in de drijvende zonne- en windparken dus ook geen sargassum aan kabels of pijpleidingen gaan zitten. Door sargassumbarrières aan te leggen rondom en tussen verschillende drijvende wind- en zonneparken, zou je in het wild groeiende sargassum kunnen tegenhouden. Dat sargassum kan dan het geteelde zeewier niet vervuilen en ook niet aanspoelen op de kust. Mogelijk is het oogsten van geteelde zeewier ook nog te combineren met het opzuigen van door de barrière opgevangen zeewier. Op deze manier kan sargassum

dienen als bron voor voedsel, grondstoffen, materialen én energie. En kan de 'sargassumplaag' veranderen in een 'sargassumzegen'.

Raffinaderij met chemisch complex

Combineer je de productie van duurzame elektriciteit, waterstof en zuurstof uit drijvende zonne- en windparken met het telen van zeewier in windparken en het opvangen van sargassum met barrières rondom en tussen drijvende zonne- en windparken, dan beschik je over alle grondstoffen voor een volledig duurzame raffinaderij met chemisch complex.

Opgevangen en geteelde zeewier moet voor gebruik worden schoongemaakt, gedroogd en opgeslagen. Via een zonnecollector kun je warme lucht maken met een hogere temperatuur. Pomp je deze lucht door het zeewier, dan kun je grotere hoeveelheden tegelijk drogen. Dat gaat sneller dan in de openlucht. Zonnewarmte kan ook gebruikt worden om de vergister, waarmee we biogas produceren uit zeewier, op temperatuur te houden en om het zeewier nog verder te drogen, zodat je het kunt vergassen of pyrolyseren.

Combineer je het opvangen en telen van sargassum, dan heb je meer controle over de kwaliteit van de uiteindelijke grondstof. Het is overigens niet noodzakelijk om ook geteelde zeewier te gebruiken. Maar omdat het aanbod van sargassum in de tijd sterk kan variëren, heb je dan wel een groter opslagsysteem nodig. Gebruik je opgevangen zeewier, dan zul je het zeewier beter moeten reinigen en de processen robuuster moeten ontwerpen.

De op olie en gas gebaseerde raffinaderijen in het Caribisch gebied en Zuid- en Midden-Amerika – maar ook op vele andere plaatsen in de wereld – kun je uiteindelijk vervangen door een volledig duurzame raffinaderij en chemisch complex, waarvan de grondstoffen worden geleverd door zeewier en water, en de energie door zon, wind en zeewier.

Wat je in een chemisch complex allemaal kunt maken met zeewier

Via een Fischer-Tropschproces kun je duurzame brandstoffen maken, zoals benzine, diesel en kerosine. Daar is biogas (CH₄, CO₂) of een biosynthesegas (een combinatie-gas van H₂, CH₄, CO en CO₂ waar ook stikstof (N₂) inzit) voor nodig, en waterstof (H₂) uit duurzame energie. Via steam methane reforming of autothermal reforming kan biogas of biosynthesegas volledig worden omgezet in waterstof (H₂) en koolstofdioxide (CO₂). Voor autothermal reforming is zuivere zuurstof (O₂) nodig, die geproduceerd wordt via elektrolyse van water.

In sargassum zit ook veel stikstof. Samen met waterstof kan dit via het Haber-Boschproces worden omgezet in ammoniak, een hoofdbestanddeel van kunstmest. Uit het biosynthesegas, of uit H₂ en CO₂, kan methanol gemaakt worden. En ethyleen (C₂H₄), de basisstof om polyethyleen ofwel een plastic te maken, kunnen we produceren uit biogas of uit nafta (een bijproduct van het Fischer-Tropschproces), of zelfs uit CO₂ en waterstof. En met de grondstoffen biogas, biosynthesegas, waterstof, zuurstof en stikstof zijn nog veel meer chemische producten te maken.

Biogas kunnen we produceren uit zeewier via een biochemische conversieroute: anaeroob vergisten. Dit is een technologie die we al sinds jaar en dag toepassen. Biosynthesegas produceren we uit zeewier via een thermochemische route, zoals vergassing, pyrolyse of hydrothermische liquefactie. De laatste twee processen produceren daarbij ook biochar (dit is voornamelijk koolstof) en bio-olie.

Op olie en gas gebaseerde raffinaderijen kun je uiteindelijk vervangen door een duurzame raffinaderij en chemisch complex met grondstoffen en energie van zon, wind, zeewier en water



6

NAAR EEN DUURZAAM ENERGIESYSTEEM IN 2100

Energieproductie uit zon en wind is in korte tijd erg goedkoop geworden. Voor een volledig duurzaam energiesysteem is echter een nieuw ontwerp nodig, gebaseerd op de specifieke kenmerken van duurzame energiebronnen en koolstofvrije energiedragers. Maar hoe komen we van het huidige fossiele energiesysteem naar een duurzaam energiesysteem? En hoe ziet een energiesysteem met ‘Sustainable Energy System Goals’ eruit?

Van fossiel naar duurzaam

Met zonnecellen en windturbines kunnen we tegenwoordig al groene elektriciteit produceren voor 1 à 2 eurocent per kWh. Maar dit lukt alleen op grote afstand van de energievraag. Hoe krijgen we deze goedkope duurzame energie nu in een goede vorm, op de gewenste tijd, op de juiste locatie? En hoe komen we zo snel mogelijk van een fossiel naar een duurzaam energiesysteem?

Emissievrij eindgebruik

Belangrijk is dat bij het eindgebruik van energie geen broeikasgasemissies meer plaatsvinden, met name geen CO₂-emissies. Dat is nu al het geval bij het gebruik van elektriciteit voor licht of apparatuur. Maar bij het gebruik van aardgas, bijvoorbeeld om stoom te maken in een stoomketel voor gebruik in de industrie, of warm water te maken in een verwarmingsboiler in huis, is dat niet zo. En ook de diesel of benzine in de verbrandingsmotoren in je auto produceren CO₂-emissies.

Bij het gebruik van aardgas, benzine en diesel produceer je kleine hoeveelheden CO₂ op heel veel plaatsen. Het is moeilijk en duur om die CO₂ bij het eindgebruik af te vangen en op te slaan. Veel makkelijker en verstandiger is het om een energiedrager aan te bieden die bij het eindgebruik geen CO₂ produceert, ook als er bij de productie van zo'n schone energiedrager wél CO₂ vrijkomt. CO₂ afvangen bij een grootschalige productiefabriek is namelijk veel makkelijker dan bij heel veel kleine bronnen, zoals de uitlaten van auto's.

Er zijn twee belangrijke energiedragers die bij het eindgebruik geen CO₂ produceren: elektriciteit en waterstof. Bij het gebruik van elektriciteit komt als afvalproduct een klein beetje warmte vrij. Bij het gebruik van waterstof produceer je elektriciteit en/of warmte en bestaat het 'afvalproduct' uit schoon water. En dat kun je nuttig hergebruiken, zeker in gebieden met een watertekort.

Er is nóg een energiedrager die bij het eindgebruik geen CO₂ produceert, namelijk warm water of stoom. Deze energiedrager wordt echter alleen lokaal toegepast.

Er zijn twee belangrijke energiedragers die bij gebruik geen CO₂ produceren: elektriciteit en waterstof

Elektriciteit gebruiken we nu vooral voor kracht en licht. Daarnaast kunnen we elektriciteit inzetten voor vervoer (o.a. batterij-elektrische voer-, vaar- en vliegtuigen) en voor warmte (met een warmtepomp). Waterstof gebruiken we nu als grondstof in de chemische industrie en in raffinaderijen. Daarnaast kunnen we waterstof inzetten als grondstof voor het maken van synthetische brandstoffen en om uit ijzererts ijzer te maken. Maar waterstof is ook bruikbaar voor mobiliteit (brandstofcel-elektrische voer-, vaar- en vliegtuigen), voor het produceren van warmte met ketels en/of brandstofcellen, of voor de productie van elektriciteit met brandstofcellen als er een tekort aan duurzame elektriciteit is.

Een gebieds- en systeemgerichte energietransitie is makkelijker en sneller dan een sector- en technologiegerichte energietransitie

Infrastructuur versterken en hergebruiken

Emissievrij eindgebruik vereist een omvangrijke infrastructuur voor het transport en de distributie van elektriciteit en waterstof. Meer gebruik van elektriciteit – voor mobiliteit en verwarming – brengt een uitbreiding van de bestaande elektriciteitsinfrastructuur met zich mee. En voor het transport en de distributie van waterstof moeten we behalve een nieuwe waterstofinfrastructuur aanleggen ook de bestaande aardgasinfrastructuur zo snel mogelijk gaan hergebruiken voor waterstof.

Omschakelen van aardgas naar waterstof hoeft niet in één keer voor de gehele aardgasinfrastructuur. Dat kan ook gefaseerd, waarbij je uiteraard begint met grootschalige waterstofproductielocaties aan te sluiten. Daarna ga je gebied voor gebied de aardgasinfrastructuur hergebruiken voor het transport en distributie van waterstof naar eindgebruikers. Als eerste sluit je gebieden aan met grootgebruikers, bijvoorbeeld industriële clusters. Daarna laat je in zowel landelijke als stedelijke gebieden alle gebruikers overschakelen van aardgas op waterstof. Door de aardgasinfrastructuur die naar tankstations, logistieke centra, baksteen- en glasfabrieken, melk- en suikerbietenfabrieken, bakkerijen, autowasstraten, kledingwasserijen, crematoria, ziekenhuizen, scholen, woningen enz. gaat, stroomt dan dus waterstof. En dan kun je ook de kleinschalige waterstofproductielocaties in deze gebieden aansluiten op de waterstofinfrastructuur.

Voor Europa hebben de aardgastransportbedrijven op basis van de bestaande aardgasinfrastructuur een waterstofinfrastructuurplan ontwikkeld. Dit plan omvat 70% hergebruik van bestaande aardgaspijpleidingen en 30% nieuw aan te leggen waterstofpijpleidingen^[70]. In gebieden met een minder ontwikkelde aardgasinfrastructuur zal het percentage nieuwe leidingen hoger zijn.

Gebiedsgerichte transitie

Verduurzamingsvoorstellen gaan vaak uit van een aanpak per sector, zoals de industrie, mobiliteit of woningen en gebouwen. De aanpak bestaat dan uit het zoeken naar de voor zo'n sector meest geschikte eindconversietechnologie. Zo wordt nu voorgesteld om over te schakelen op waterstof in de industrie (als grondstof en voor zeer hoge-temperatuurverwarming) en voor zware mobiliteit (schepen, vliegtuigen, trucks). Voor lichtere mobiliteit, verwarming van gebouwen en woningen en middelhoge temperatuur voor de industrie is het voorstel om over te schakelen op elektriciteit.

We moeten snel de elektriciteitsinfrastructuur versterken en de aardgasinfrastructuur hergebruiken voor waterstof

Deze sectorgerichte energietransitie gaat voorbij aan het feit dat het energiesysteem niet is georganiseerd per sector. In een energiesysteem is de energie-infrastructuur (die zorgt voor transport, opslag en distributie) de verbindende schakel tussen productielocaties van energie en eindgebruikers. Zo'n infrastructuur is georganiseerd per gebied of regio. En omdat de energiedragers in de toekomst voor alle sectoren grotendeels gelijk worden, namelijk elektriciteit en waterstof, raken de verschillende sectoren in zo'n gebied nog verder met elkaar verweven. Een gebiedsgerichte aanpak, volgens het ruimtelijk patroon van de energie-infrastructuur, is dan ook de makkelijkste en snelste manier om het energiegebruik te verduurzamen.

Verskil tussen landen

Afhankelijk van de beginsituatie kan een gebiedsgerichte aanpak er in het ene land anders uitzien dan in het andere. Hier vergelijken we Noorwegen, waar een sterke elektriciteitsinfrastructuur aanwezig is, met Nederland, dat beschikt over een wijdvertakte aardgasinfrastructuur.



De aanleg van een laagtemperatuurverwarming

We doen dit ter illustratie en op hoofdlijnen, vooral om aan te geven hoe de context van een land kan worden meegenomen in het maken van keuzes in het energiesysteem.

Verduurzamen in Noorwegen, met een sterke elektriciteitsinfrastructuur, gebeurt anders dan in Nederland, dat beschikt over een wijdvertakte aardgasinfrastructuur

In Noorwegen is de elektriciteitsproductie voor meer dan 95% gebaseerd op goed regelbare waterkracht. De bestaande elektriciteitsinfrastructuur zorgt niet alleen voor kracht en licht, maar ook voor ruimteverwarming. De capaciteit van het elektriciteitsnet en de aansluitcapaciteit bij woningen zijn hoog. Daardoor is het makkelijk om over

te schakelen van elektrische weerstandsverwarming (die nu veel wordt gebruikt) naar warmtepompen. Voor een warmtepomp heeft het elektriciteitsnet namelijk minder capaciteit nodig dan voor weerstandsverwarming. Ook het elektrificeren van andere functies, zoals mobiliteit, is in Noorwegen makkelijk. Het aandeel batterij-elektrische auto's is er hoog en de laadinfrastructuur goed. Bij woningen kan redelijk snel worden geladen, omdat deze vaak beschikken over een aansluiting met een grote capaciteit. Ook zware graafmachines of hei-installaties kun je eenvoudig met een kabel aansluiten op dit sterke elektriciteitsnet.

In Nederland is de situatie anders. Hier is de elektriciteitsproductie gebaseerd op gas- en kolengestookte centrales en wordt deze verduurzaamd met elektriciteit die is opgewekt met zon en wind. De elektriciteitsinfrastructuur wordt gebruikt voor kracht en licht en niet voor ruimte-

verwarming. Verwarmen gebeurt voor meer dan 95% met gas. De gemiddelde capaciteit van de daarvoor gebruikte gasaansluitingen is 10 keer zo groot als die van elektriciteit. Bestaande woningen zijn bovendien vaak slecht geïsoleerd. In Nederland is het daarom niet zo eenvoudig om bestaande woningen volledig te verduurzamen met elektrische warmtepompen. De elektriciteitsinfrastructuur heeft daarvoor nog onvoldoende capaciteit. Voor verwarming gaat het overschakelen van aardgas op waterstof in principe makkelijker en sneller. De waterstof hoeft niet in Nederland zelf geproduceerd te worden, maar kan worden geïmporteerd uit gebieden met veel zon en wind. De gasinfrastructuur ligt er immers al en lastig te isoleren woningen kunnen zo toch vrij gemakkelijk overschakelen naar duurzame bronnen. Nog slimmer is een hybride verwarming: een kleine warmtepomp voor de basislast warmte, waarvoor je het elektriciteitsnet niet hoeft te verzwaren, en voor de pieklast (winterkou en warmwaterproductie) een ketel op waterstof^[142].

In Nederland is hybride verwarming met elektriciteit en waterstof een slimme en snelle manier om te verduurzamen, waar je het elektriciteitsnet niet voor hoeft te verzwaren

In de wat verdere toekomst kun je in gebouwen en woningen met een kleine brandstofcel elektriciteit produceren wanneer de zonnepanelen dat niet doen – 's nachts en in de winter. De door de brandstofcel geproduceerde warmte kun je dan gebruiken voor verwarming en warmwaterproductie.

Bovendien kun je op deze manier ook de mobiliteit verduurzamen. Nu rijden er in Nederland auto's en trucks op aardgas. Daarvoor hebben tankstations een aansluiting op het aardgasnet. Dat aardgas wordt gecomprimeerd en zo kun je CNG, compressed natural gas, tanken. In de toekomst kan door dit gasnet waterstof worden getransporteerd naar tankstations. Bij tankstations in Nederland kun

je dus relatief makkelijk en goedkoop waterstof tanken. En dat betekent dat je in Nederland bouwwerkzaamheden makkelijker kunt verduurzamen door trucks, aggregaten, zware graafmachines en hei-installaties te voorzien van een brandstofcel. Die kunnen dan eenvoudig waterstof tanken bij een tankstation.

Noorwegen en Nederland zijn twee uitersten, veel andere landen in Europa zitten daar ergens tussenin. Per gebied kun je bekijken welke verduurzamingsaanpak snel en betaalbaar is te realiseren. Ook buiten Europa, met weer andere klimatologische omstandigheden, sociaal-maatschappelijke factoren en meestal een beperktere energieinfrastructuur, zul je steeds opnieuw moeten bekijken hoe je het best kunt verduurzamen. Maar het zal duidelijk zijn dat een gebieds- en systeemgerichte aanpak makkelijker en sneller is dan een aanpak per sector en technologie.

Flexibiliteit dankzij waterstofopslag

Het aardgassysteem is enkele orden groter dan het elektriciteitsstelsel. Op dit moment 'voedt' het aardgassysteem samen met kolen en olie het elektriciteitsstelsel. Aardgas wordt per pijpleiding van een aardgasveld vervoerd naar een gasgestookte centrale die het gas omzet in elektriciteit. Dankzij de opslag van aardgas in lege gasvelden, zoutkoepels en poreus gesteente is het aardgassysteem, en daardoor ook het elektriciteitsstelsel, flexibel – het aanbod kan snel worden aangepast aan een veranderende vraag. Grootschalige aardgasopslag op uur-, dag-, week- en seizoensbasis is goedkoop en kan vraag en aanbod op alle tijdschalen met elkaar in balans brengen, voor zowel aardgas als elektriciteit.

Omdat je waterstof op dezelfde manier grootschalig en goedkoop kunt opslaan, zal het de week- en seizoensflexibiliteit in het elektriciteitsstelsel voor zijn rekening gaan nemen. Supercapacitors, batterijen, elektrische ketels en andere vormen van flexibilisering van de vraag zijn nodig voor flexibiliteit op kleinere tijdschalen: seconden, uren en dagen.

Kenmerken van het huidige aardgas- en elektriciteitssysteem ^[4]

| | Gassysteem | Elektriciteitssysteem |
|--|---|--|
| Productievolume per locatie | Gasveld 10-1.000 TWh/jaar | Elektriciteitscentrale 1-30 TWh/jaar |
| Afstand tussen productielocatie en gebruik | Pijpleiding tot 5.000 km Wereldwijd transport van vloeibaar aardgas per schip | Kabel tot 1.000 km |
| Transportcapaciteit | Pijpleiding 10-35 GW | Kabel 1 (HVAC) - 4 GW (HVDC) |
| Opslagcapaciteit | Zoutkoepel 200-500 GWh Leeg gasveld, met 10-100 keer meer opslagcapaciteit dan in zoutkoepels | Opgepompte waterkrachtopslag 5-25 GWh Grootste batterijopslagsysteem (2023) < 1 GWh |

Volledige omschakeling van aardgas naar waterstof betekent dat gasgestookte elektriciteitscentrales voortaan op waterstof draaien. Daardoor zullen die centrales geen CO₂ meer uitstoten. Nog verder in de toekomst komen er meer brandstofcellen in het systeem: stationaire brandstofcellen in woningen, scholen, ziekenhuizen, boerderijen, kassen en bedrijven, en mobiele brandstofcellen in schepen, treinen, trucks, bussen, kranen, tractoren, taxi's, busjes en auto's. Al deze brandstofcellen samen geven het elektriciteitssysteem zoveel flexibiliteit dat er uiteindelijk geen grootschalige, waterstofgestookte elektriciteitscentrales meer nodig zijn.

Prij concurrentie waterstof en elektriciteit

Natuurlijk is het belangrijk om snel en veel duurzame energie te produceren uit alle beschikbare bronnen. Maar vanuit een systeem perspectief is duurzame elektriciteitsproductie economisch als je dat relatief 'dicht in de buurt' van de eindgebruikers doet, omdat de transport- en opslagkosten van elektriciteit in verhouding tot de productiekosten hoog zijn. Bij waterstof is dat

anders. Duurzame waterstofproductie is economisch als het op grote schaal gebeurt, op plaatsen met goede duurzame energiebronnen, voornamelijk zon en wind, én met veel goedkope ruimte. Vaak is dat juist 'ver weg' van de eindgebruikers, in woestijnen of op zee. Bij waterstof zijn namelijk de transport- en opslagkosten in verhouding tot de productiekosten laag. Voor waterstof zijn daarom lagere productiekosten veel bepalender voor de prijs dan lagere transport- en opslagkosten.

Stationaire en mobiele brandstofcellen geven het elektriciteitssysteem zoveel flexibiliteit dat er uiteindelijk geen waterstofgestookte elektriciteitscentrales meer nodig zijn

Met 'dicht in de buurt' bedoelen we enkele honderden tot op zijn hoogst duizend kilometer van de vraag, waar je in de orde van kW's tot enkele GW's duurzame elektriciteit

kunt produceren. De transportafstand wordt gelimiteerd door de transportkosten; de omvang van de elektriciteitsproductie door de capaciteit van de kabels. Bij alle vormen van duurzame elektriciteitsproductie zul je gaan afwegen of de kosten van elektriciteitsproductie en elektriciteitstransport wel kunnen concurreren met de kosten van productie van elektriciteit uit geïmporteerde waterstof. Met 'ver weg' bedoelen we afstanden van honderden tot duizenden kilometers van de vraag. Tot zo'n 5.000 kilometer kan waterstoftransport per pijpleiding economisch aantrekkelijk zijn. Transport per schip is tot enkele duizenden kilometers afstand duurder dan per pijpleiding, vooral omdat nog een extra conversie van gas naar vloeistof nodig is. Belangrijk is dat het waterstoftransport zoveel mogelijk continu, in basislast, plaatsvindt. Dit betekent dat er in de buurt (tot een afstand van enkele honderden kilometers) van de waterstofproductie ook een opslagmogelijkheid nodig is, bijvoorbeeld in de ondergrond, in zoutkoepels, lege gasvelden, rotsformaties of aquifers. Een alternatief is om waterstof bovengronds op te slaan in tanks, in vloeibare of gecomprimeerde vorm of als ammoniak.

Een grote gastransportpijpleiding door de woestijn



Bovengrondse opslag is wel aanzienlijk duurder dan opslag in de ondergrond. Bij grootschalig waterstoftransport per pijpleiding hebben we het over enkele miljoenen tonnen waterstof per jaar. Om pijpleidingen met een transportcapaciteit van 10-30 GW te vullen, zijn enkele tientallen GW wind tot honderden GW zon nodig. Het gaat hierbij om export van waterstof vanuit gebieden waar goedkoop waterstof kan worden geproduceerd. En om import van waterstof in gebieden waar veel energievraag is, en die in dat gebied niet of niet tegen concurrerende kosten kan worden geproduceerd.

Voor waterstof zal een wereldmarkt ontstaan; voor elektriciteit regionale markten

Het voordeel van waterstof vervoeren over grote afstanden per schip is dat het zorgt voor flexibiliteit in aanbod. Zo zullen we bijvoorbeeld gaan zien dat bij waterstofproductie met drijvende wind- en zonneparken ver weg op de oceaan, de waterstof (eventueel in andere vormen zoals ammoniak) met schepen zal worden vervoerd. Deze schepen varen naar de locaties waar de beste prijs voor waterstof wordt betaald. Dit is vergelijkbaar met hoe bijvoorbeeld de huidige LNG-markt werkt. Er zal dus, net zoals nu voor olie of gas, een wereldmarkt voor waterstof gaan ontstaan, met regionale markten voor elektriciteit. Prijsconcurrentie gaat bepalen welke energiedragers in welke verhoudingen in een bepaald gebied en sector zullen worden gebruikt.

Ook kleinschalige waterstofproductie 'dicht in de buurt' kan nuttig zijn. Zit het elektriciteitsnet vol, dan kun je toch meer duurzame energie realiseren, door waterstof te produceren en die aan de waterstofinfrastructuur te leveren.

Waterstof kun je op deze manier goedkoop transporteren en opslaan voor gebruik wanneer er vraag is. Ook kun je op bepaalde plekken, zoals afvalwaterzuiveringsinstallaties, naast de waterstof ook de vrijkomende zuurstof en restwarmte nuttig gebruiken. En in bepaalde situaties is waterstofproductie dicht bij de vraag economisch aantrekkelijk, omdat je hiermee bespaart op waterstoftransportkosten per tubetrailer, bijvoorbeeld voor waterstoftankstations die niet aangesloten zijn op een waterstofpijpleiding. In al deze situaties is de waterstofproductie direct gekoppeld aan de duurzame energiebron en heeft de waterstofproductie een omvang van tientallen kW's tot tientallen MW's.

Conversie bij de bron: van aardgas naar waterstof

Snel omschakelen van de aardgasinfrastructuur naar een waterstofinfrastructuur brengt twee uitdagingen met zich mee, namelijk hoe we snel aan voldoende waterstof komen en wat we gaan doen met het aardgas. Beide kun je op dezelfde manier oplossen: door het aardgas bij de bron te converteren naar waterstof.

Aardgas naar waterstof converteren kan met verschillende technologieën. Het overgrote deel van de waterstof wordt nu geproduceerd door steam methane reforming. Daarbij komt CO₂ vrij, waarvan je 50-80% kunt afvangen en opslaan. Met de nieuwere techniek autothermal reforming kun je 90 tot bijna 100% van de CO₂ afvangen en opslaan. Maar er is ook een techniek waar helemaal geen CO₂ bij vrijkomt: methaanpyrolyse. Hierbij wordt methaan verhit en gesplitst in waterstof (H₂) en vast koolstof (C) ^[143]. Koolstof is bovendien een grondstof waar grote behoefte aan is. Deze wordt gebruikt voor de productie van inkt, verf, grafeen en autobanden en is een grondverbeteraar. Bovendien kun je het eenvoudig en goedkoop opslaan.

Prij concurrentie gaat bepalen hoe, waar, wanneer en hoeveel waterstof en elektriciteit wordt gebruikt

Aardgas bij de bron naar waterstof converteren heeft enkele voordelen. Zo kan vrijkomende CO₂ direct worden afgevangen en opgeslagen in het gasveld, zonder dat daar een uitgebreide CO₂-infrastructuur voor nodig is. Beter nog is het om via methaanpyrolyse helemaal geen CO₂ te produceren. En omdat bij gasvelden al uitgebreide technisch-chemische installaties staan, onder andere om het gas te reinigen, met stikstof te mengen en op druk te brengen, kun je er ook makkelijk waterstof produceren. Bovendien kun je een grote installatie bouwen die door schaalvoordelen goedkoper is dan kleine installaties. Daarnaast voorkom je op deze manier methaanemissies in de keten van transport, opslag, distributie en gebruik.

Koolstofpoeder



TECHNOLOGIE VOOR DE TOEKOMST

Methaanpyrolyse

Waterstofproductie zonder CO₂-emissies

Waterstof maken we nu uit aardgas of biogas (methaan), waarbij veel CO₂ vrijkomt. Maar er is ook een proces om waterstof te maken zonder dat er CO₂ vrijkomt: methaanpyrolyse. Hierbij wordt methaan sterk verhit zonder er lucht (zuurstof) bij te laten. Bij een temperatuur van meer dan 1200 °C splitst het methaan dan in waterstof (H₂) en vaste koolstof (C) ^[143]. Deze twee zijn makkelijk van elkaar te scheiden, want waterstof is een gas en koolstof een vaste stof. Gebruiken we voor de verhitting groene elektriciteit of een deel van de geproduceerde waterstof, dan komt er helemaal geen CO₂ vrij bij de productie van waterstof met methaanpyrolyse. Voor het splitsen van methaan is in theorie zeven keer zo weinig energie nodig als voor het splitsen van water. Echter, methaan heeft al een bepaalde energetische waarde, waardoor de totale energiebalans van waterstof uit methaan minder gunstig is dan die van waterstof uit water.

Monolith, methaanpyrolysefabriek in Nebraska, USA ^[145]



Diverse bedrijven, onderzoeksinstituten en universiteiten in de wereld ontwikkelen methaanpyrolysetechnologieën. Zo kan de splitsingstemperatuur omlaag worden gebracht door toepassing van katalysatoren. Maar dit gaat vaak ten koste van de zuiverheid van de koolstof ^[144], terwijl er juist behoefte is aan zuivere koolstof als grondstof voor inkt, verf, grafeen, nanotubes, sterke koolstofvezels, supercapacitors en autobanden. Daarnaast is zuivere koolstof een goede grondverbeteraar, die water en nutriënten beter vasthoudt in de bodem.

Via methaanpyrolyse van aardgas ontstaan waterstof en vaste koolstof; er komt dus geen koolstofdioxide vrij

Het bedrijf Monolith heeft een werkende methaanpyrolysefabriek in Nebraska USA. In een plasmaboog wordt bij een temperatuur van 2.000 °C het methaan gesplitst in waterstof en koolstof. Eigenlijk is deze fabriek gebouwd voor de productie van zuivere koolstof voor autobanden. Daardoor is de energie-efficiëntie van dit proces om waterstof te produceren nog vrij laag.

Aardgas converteren naar waterstof heet ook wel precombustion CCS (carbon capture and storage). Dit proces vindt plaats vóórdat het aardgas verbrandt. Door aardgas met stoom om te vormen in waterstof en CO₂, krijg je een zuivere CO₂-stroom, die goed is af te vangen. Bij CCS wordt vaak gedacht aan het afvangen van CO₂ uit de rookgassen

cryogene tankwagens (vrachtwagens die vloeibare waterstof vervoeren). Ook CO₂ kun je vloeibaar maken en met tankwagens over de weg vervoeren. Zowel waterstof als CO₂ zijn verhandelbare producten. Door concurrentie met waterstof uit zon en wind zal de prijs van deze waterstof waarschijnlijk gaan dalen, maar de prijs van CO₂ zal naar verwachting juist stijgen. Per saldo houd je dan voor biogas toch een positieve businesscase over. Bovendien voorkom je door biogasconversie naar waterstof en CO₂ een gas lock-in, een situatie waarin je voor een beperkt volume en voor langere tijd een gasinfrastructuur in stand houdt.

Overheidsregie voor snelle omschakeling

Omdat energie een van de eerste levensbehoeften is, hebben overheden altijd veel invloed uitgeoefend op de energievoorziening. In veel westerse landen veranderde dit eind vorige eeuw, toen de energiemarkten in meer of mindere mate werden geliberaliseerd. Sindsdien komen energieprijzen tot stand op markten, die vraag en aanbod bij elkaar brengen. Kan een snelle overgang van een fossiel naar een duurzaam energiesysteem worden gerealiseerd door marktmechanismen aan te passen, bijvoorbeeld door een markt voor CO₂-emissies te creëren? Misschien is dat mogelijk maar het zal naar verwachting niet snel genoeg gaan. Er is namelijk meer nodig dan een stapsgewijze incrementele aanpassing van het energiesysteem, het gaat om een fundamentele verandering. Voor de omschakeling naar een duurzaam energiesysteem moeten het aanbod, de vraag, de infrastructuur en de opslag van energie allemaal tegelijk en in samenhang worden ontwikkeld, vanaf bijna nul. Daar is overheidsregie voor nodig.

Door biogasconversie naar H₂ en CO₂ voorkom je een aardgasinfrastructuur-lock-in

Ook bij de ontwikkeling van het elektriciteits- en het gasstelsel in het verleden namen overheden het voortouw. Hetzelfde geldt voor de omschakeling van kolen naar gas en van stadsgas naar aardgas. Volwassen markten voor

Pre-combustion CCS bij de bron, waarbij waterstof wordt geproduceerd, heeft de voorkeur boven post-combustion CCS

van elektriciteitscentrales, grote stoomketels, hoogovens of chemische installaties. Dit heet post-combustion CCS: het proces vindt plaats ná de 'verbranding' van aardgas, aardolie of kolen. Uit de afvalgassen – een mengsel van CO₂, stikstofoxiden en andere gassen – moet je eerst CO₂ afscheiden, waarna je dat kunt afvoeren en opslaan. Het gaat daarbij vaak om kleinere installaties en je hebt voor afvoer en opslag een grote CO₂-infrastructuur nodig. Pre-combustion CO₂ bij de bron heeft dan ook de voorkeur boven post-combustion CCS.

Conversie van biogas naar H₂ en CO₂

Energie uit biomassa-reststromen kan in bepaalde gebieden een belangrijke bron zijn van duurzame energie. Zo kan biogas direct worden gebruikt voor de productie van warmte en elektriciteit in ketels of gasmotoren. Steeds vaker wordt biogas opgewerkt tot aardgaskwaliteit of tot biomethaan, waarna het wordt ingevoerd in de aardgasinfrastructuur of vervoerd als bio-LNG voor gebruik in verbrandingsmotoren. Net zoals we aardgas bij de bron converteren naar waterstof en CO₂, kun je dit ook doen met biogas. Daar zit bovendien al een percentage CO₂ in. Het resultaat daarvan is groene waterstof en groene CO₂. Waterstof en CO₂ kun je beide gebruiken als grondstof; waterstof daarnaast ook als energiedrager. Waterstof kun je invoeden op een waterstofinfrastructuur of over de weg vervoeren met tube trailers (vrachtwagens die hoge-drukcilinders gevuld met waterstof vervoeren) danwel



Zelfrijdende waterstofvrachtauto van Hyundai

duurzame energie kunnen zich pas ontwikkelen nadat er in het systeem voldoende infrastructuur en opslagcapaciteit is gerealiseerd en er voldoende aanbod en vraag is. Een snelle overgang van een fossiel naar een duurzaam energiesysteem hoeft de maatschappij niet meer te kosten dan wanneer langzaam wordt omgeschakeld. Het leidt bovendien tot veel minder broeikasgasemissies. Bij een grootschalige snelle omschakeling zullen de kosten van duurzame energieproductie, transport, opslag en eindconversietechnologie sneller dalen. Kostendaling van eindconversietechnologie wordt namelijk beschreven door leercurves, die aangeven hoeveel procent de kostprijs daalt bij elke verdubbeling van het totaal aantal verkochte apparaten (voor energie gaat het over de in totaal geïnstalleerde capaciteit, bijvoorbeeld van zonnepanelen,

elektrolyzers of warmtepompen). Hoe sneller je omschakelt, des te sneller de kosten dalen. En omdat je minder broeikasgassen uitstoot, betaal je in totaal minder koolstofheffingen^[146].

De overgang van een fossiel naar een duurzaam energiesysteem is een fundamentele en urgente verandering. Een verandering die niet vanzelf tot stand komt. Daarom is het nodig dat overheden deze transitie gaan regisseren en waar nodig zelf organiseren, uiteraard in samenspraak met bedrijven en burgers.

Groene energie voor iedereen

Op basis van de huidige sociaal-economische en technologische ontwikkelingen (het *Middle of the Road-scenario* van het IPCC) schetsen we hier een globaal beeld van een duurzaam energiesysteem in 2100, rekening houdend met de dimensies tijd en ruimte. Ook schetsen we hoe het totale duurzame systeem voor energie, materialen, water en voedsel eruit kan gaan zien.

Sociaal-economische scenario's voor 2100

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) hanteert voor zijn klimaatmodellen enkele toekomst-scenario's of 'Shared Socioeconomic Pathways' (SSP's). Elk scenario gebruikt andere aannames over de groei van de wereldbevolking, toegang tot onderwijs, verstedelijking,

economische groei, beschikbaarheid van hulpbronnen, technologische ontwikkelingen en aanjagers van de vraag naar producten en diensten, zoals veranderingen in levensstijl^[147]. Afhankelijk van welke SSP je gebruikt, varieert de gemodelleerde opwarming van de aarde in 2100 van 3,0 °C (SSP1) tot 5,1 °C (SSP5) boven het pre-industriële niveau.

Op basis van deze SSP's zijn door het IPCC scenario's ontwikkeld met maatregelen om te voldoen aan de doelstellingen van het klimaatakkoord van Parijs. Daar is in 2015 afgesproken dat de stijging van de gemiddelde temperatuur op aarde ruim onder de 2 °C blijft ten opzichte van het pre-industriële niveau^[155].

Energiegebruik per km² in 2100

Allereerst hebben we het energiegebruik per km² in kaart gebracht voor het jaar 2100, met SSP2 als uitgangspunt (dus zonder extra klimaatbeleid). Uit cijfers over bevolkingsgroei, verstedelijking en het primaire en finale energiegebruik hebben we voor elk werelddeel berekend hoe groot het energiegebruik is per hoofd van de bevolking.

Koolstofbehoefte in 2100

Fossiele brandstoffen worden niet alleen gebruikt als energiebron, maar ook als grondstof voor chemische producten en synthetische brandstoffen. De fossiele brand-

stoffen aardolie, aardgas en kolen bestaan uit koolstof- en waterstofatomen. Met deze atomen kun je, samen met zuurstof en stikstof uit de lucht, alle chemische producten maken. Wel moet je nog diverse andere elementen toevoegen, in veel kleinere hoeveelheden.

In chemische producten vastgelegde koolstof komt, aan het eind van de levensduur, grotendeels vrij als CO₂. Bij synthetische brandstoffen gebeurt dat direct bij de verbranding. Dat is natuurlijk niet wenselijk. Maar als we met zon, wind en waterkracht energie gaan opwekken, ontstaat er een ander probleem: een tekort aan koolstof. Daarom moeten we in de toekomst op zoek naar andere, hernieuwbare en duurzame bronnen van koolstof, bijvoorbeeld uit recycling, biomassa of biomassa-reststromen en misschien wel uit de lucht.

In ons dagelijks leven gebruiken we veel producten uit de chemische en daarvan afgeleide industrieën.

Belangrijkste kenmerken van Shared Socioeconomic Pathways (SSP's) in 2100^[148]

| | SSP 1 Sustainability | SSP 2 Middle of the Road | SSP 3 Regional Rivalry | SSP 4 Inequality | SSP 5 Fossil Fuel Development |
|---|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| Wereldbevolking (miljard) ^[149] | 7,0 | 9,0 | 12,6 | 9,3 | 7,4 |
| Wereld BBP Bruto Binnenlands Product (miljard US\$2005/jaar) ^{[150], [151], [152]} | 565.390 | 539.332 | 270.265 | 352.091 | 1.031.000 |
| Verstedelijking (%) ^[153] | 92,60% | 79,70% | 58,40% | 91,70% | 93,00% |
| Primair energiegebruik (EJ/jaar) ^[154] | 701 | 1304 | 1215 | 903 | 1824 |
| Broeikasgas-emissies (Mt CO ₂ /jaar) | 24.613 | 85.684 | 85.215 | 44.785 | 126.098 |
| Temperatuurstijging (°C) | 3,0 | 3,8 | 4,1 | 3,8 | 5,1 |

Energiegebruik per hoofd van de bevolking in 2100 volgens SSP2^[156]

| | Wereld | Azië (zonder Japan en het Midden-Oosten) | Latijns-Amerika en het Caribisch gebied | Midden-Oosten en Afrika | Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO) | Oost-Europa en Rusland |
|---|--------|--|---|----------------------------|---|---------------------------|
| Bevolking (miljard) | 9,0 | 3,76 | 0,67 | 3,09 | 1,27 | 0,24 |
| Verstedelijking (%) | 79,70% | 75,80% | 93,20% | 75,20% | 93,90% | 87,30% |
| Primair energie- gebruik (EJ/jaar) | 1.293 | 474 | 118 | 359 | 283 | 59 |
| Finaal energie- gebruik (EJ/jaar) | 962 | 361 | 76 | 279 | 209 | 37 |
| Primair energie- gebruik (MWh per persoon per jaar) | 39,7 | 35,0 | 49,0 | 32,3 | 61,8 | 67,4 |

Producten uit de chemische industrie ^[157]

| Huis | Voedsel en drank |
|----------------------|---------------------------|
| Apparaten | Gewasbeschermingsmiddelen |
| Parfum | Flessen |
| Zepen en wasmiddelen | Voedseladditieven |
| Textiel | Voedselverpakkingen |
| Toiletartikelen | |
| Werk en mobiliteit | Infrastructuur en energie |
| Auto-interieurs | Bouwmaterialen |
| Elektronica | Isolatiematerialen |
| Koffers | Zonnepanelen |
| Banden | Windturbines |

koolstof. De koolstof voor synthetische brandstoffen kun je niet uit recycling halen en zal dus afkomstig zijn uit biomassa-reststromen of zeewier, zogeheten kortcyclische koolstof. De CO₂ die vrijkomt bij verbranding van deze brandstoffen aan boord, kun je namelijk niet ter plekke afvangen en opslaan.

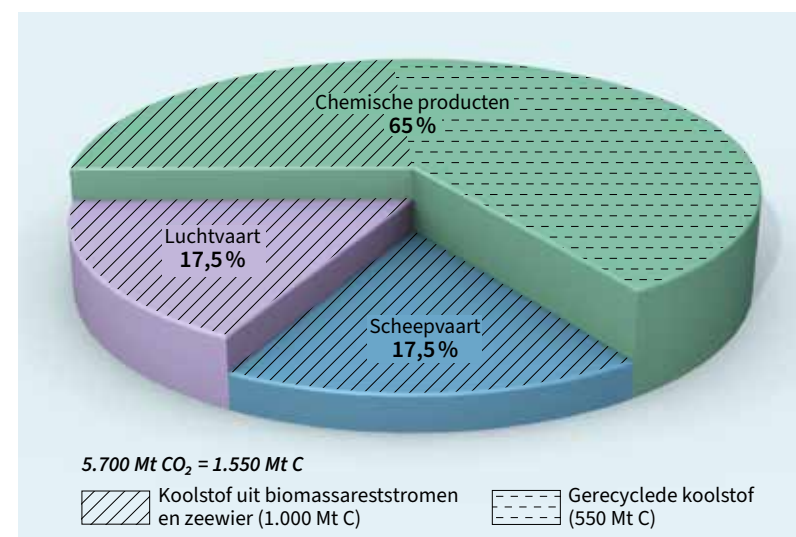
Voor wind en zon geldt hetzelfde: tekorten in dichtbevolkte gebieden, overschotten in dunbevolkte gebieden, weinig tot geen energieproductie in agrarische, natuur-, berg- en bosgebieden

In 2020 was de vraag naar koolstof voor chemische producten zo'n 450 miljoen ton. Ca. 85% van deze koolstof was afkomstig uit fossiele brandstoffen, 10% uit biomassa en slechts 5% uit recycling ^[15]. Het Nova Institute schat de wereldwijde vraag naar koolstof in 2050 op 1.000 miljoen ton, waarvan 55% uit recycling, 20% uit biomassa en 25% uit CO₂ die is afgevangen uit industriële processen en de lucht ^[157]. In het scenario dat wij hier gebruiken voor het jaar 2100, gaan we ook uit van 1.000 miljoen ton koolstof. Daarvan komt 55% uit recycling en 45% uit biomassa-reststromen en zeewier. 1.000 miljoen ton koolstof komt overeen met 3.700 miljoen ton koolstofdioxide.

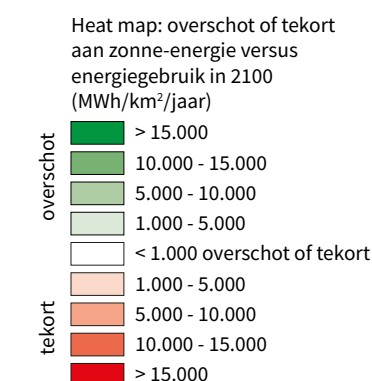
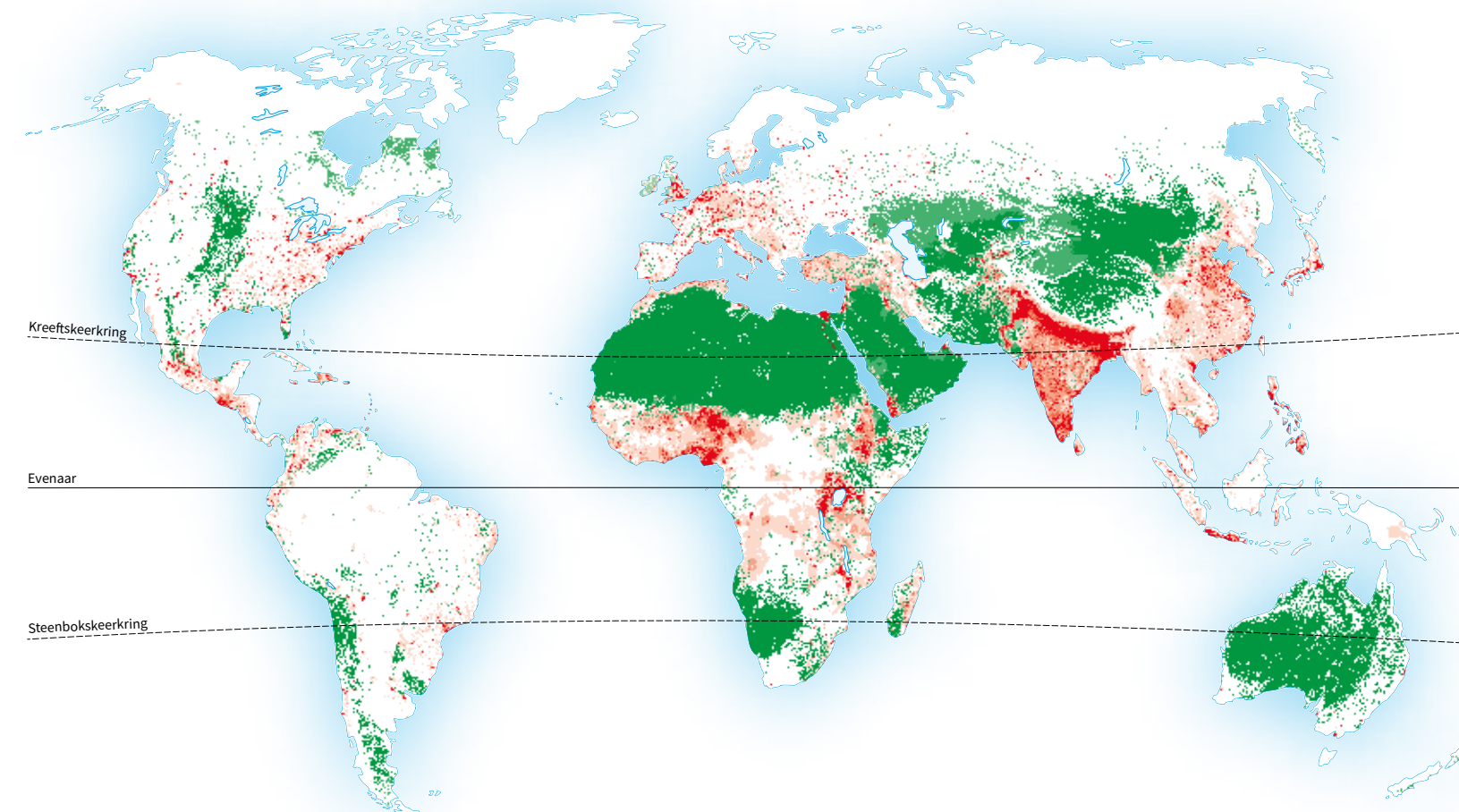
Daarnaast is koolstof nodig om synthetische brandstoffen te maken voor de luchtvaart en scheepvaart. Kleine vlieg- en vaartuigen krijgen mogelijk een elektrische aandrijving en middelgrote tot grote gaan op vloeibare waterstof vliegen en varen. Grote vlieg- en vaartuigen die lange afstanden afleggen, kunnen echter niet voldoende energie meenemen in de vorm van vloeibare waterstof. Daar is in de luchtvaart synthetische kerosine voor nodig, ook wel bekend als Sustainable Aviation Fuel (SAF), en in de scheepvaart synthetische diesel of misschien methanol. Om deze brandstoffen te maken, is in 2100 zo'n 2.000 miljoen ton koolstofdioxide nodig, oftewel 550 miljoen ton

Eerder betoogden we al dat het economisch aantrekkelijk is om biomassa-reststromen en zeewier volledig te converteren naar waterstof (H₂) en koolstof (C) of koolstofdioxide (CO₂). Zeewier telen en omzetten naar waterstof en CO₂ is waarschijnlijk goedkoper dan CO₂ uit de lucht halen (direct air capture).

Vraag en aanbod van koolstof voor chemische producten en synthetische brandstoffen voor lucht- en scheepvaart in 2100 ^[157]



Heat map zonne-energie: overschotten en tekorten per km² in 2100 ^{[156], [40], [41], [42], [43], [158]}



De heat map laat zien waar er tekorten en overschotten zijn, maar zegt niets over de hoogte van de productiekosten. Ook al zijn er overschotten aan zonne-energie in landen als Canada en Rusland, is het niet waarschijnlijk dat die grootschalige zonneparken aanleggen. De intensiteit van de zonnestraling in deze landen is immers laag, waardoor de productiekosten per kWh hoog zijn. Voor windenergie hebben we geen heat map opgesteld, maar die zal er vergelijkbaar uit zien. Voor windenergie geldt nog sterker dan voor zonne-energie dat in dichtbevolkte gebieden geen, of heel weinig, windenergie kan worden opgewekt. Wel kun je windenergie tot op zekere hoogte combineren met agrarische productie, wat niet het geval is voor zonne-energie. Maar over het algemeen geldt voor

wind en zon hetzelfde: tekorten in dichtbevolkte gebieden, overschotten in dunbevolkte gebieden, weinig tot geen productie in agrarische, natuur-, berg- en bosgebieden. De oceanen staan niet op de World solar heat map van 2100, maar zijn wel degelijk van belang voor de productie van zonne- en windenergie. Ook op de oceanen zijn niet alle gebieden beschikbaar voor energieproductie. Denk bijvoorbeeld aan natuurgebieden, zoals de Sargassozee, visserijgebieden, vaarroutes en ankerplaatsen bij de kust. Maar al met al zal een 'world renewable energy heat map' een overschot laten zien op de oceanen. Net als op land, geldt ook op de oceanen dat de productiekosten van zonne- en windenergie niet overal hetzelfde zijn. De laagste kosten mag je verwachten in gebieden met hoge windsnelheden en/of veel zonnestraling, binnen enkele duizenden kilometers van de kust. Het overschot is hier groot en de productie- plus transportkosten zijn economisch aantrekkelijk.

Elektriciteit en waterstof als energiedragers

Wat we leren van deze heat map, is dat er niet voldoende duurzame energieproductie kan en zal plaatsvinden in dichtbevolkte gebieden, dus in steden. Om steden toch van energie te voorzien, moet er duurzame energie naartoe worden getransporteerd. Waarschijnlijk is duurzame energieproductie, in de vorm van elektriciteit, in een straal van honderden kilometers rond steden niet toereikend of niet goedkoop genoeg. Dat is de afstand die je met een elektriciteitskabel economisch kunt overbruggen. Op grotere afstanden, in de woestijnen en op de oceanen, is er wél voldoende duurzame energie beschikbaar, maar die zul je in de vorm van waterstof of afgeleide waterstofproducten naar stedelijke gebieden moeten vervoeren. Hoe een duurzaam energiesysteem er in de toekomst ook uit komt te zien, er zal veel energie getransporteerd gaan worden, zowel regionaal, continentaal als mondiaal. En ook als het finale energiegebruik grotendeels bestaat uit

Finaal energie- en koolstofgebruik in 2100

| Jaar 2100 | Wereld | Elektriciteit | Waterstof voor energie en grondstof | Warmte |
|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Finaal energiegebruik | 100% | 50% | 40% | 10% |
| | 974 EJ | 487 EJ | 390 EJ | 97 EJ |
| | = 270.500 TWh | = 135.250 TWh | = 108.200 TWh | = 27.050 TWh |
| Jaar 2100 | Wereld | Chemische producten | Synthetische kerosine luchtvaart | Synthetische brandstoffen scheepvaart |
| Koolstofgebruik | 100% | 65% | 17,5% | 17,5% |
| | 1.550 Mton C | 1.000 Mton C | 275 Mton C | 275 Mton C |
| | = 5.700 Mton CO ₂ | = 3.700 Mton CO ₂ | = 1.000 Mton CO ₂ | = 1.000 Mton CO ₂ |

elektriciteit, en steden volledig zijn geëlektrificeerd, zullen transport en opslag van energie waarschijnlijk voor een groot deel plaatsvinden in de vorm van waterstof. Transport en opslag van waterstof én elektriciteit zijn goedkoper, betrouwbaarder en (leverings)zekerder dan transport en opslag van maar één energiedrager: elektriciteit.

Energie-, koolstof- en drinkwaterbalans

We hebben een wereldwijde balans opgesteld voor energie en koolstof in 2100, rekening houdend met de ruimtelijke verdeling van energietekorten en -overschotten (uit de World solar heat map) en met variaties van vraag en aanbod door het jaar heen. Uiteraard kan deze eerste grove schatting verder worden verbeterd en gedetailleerd. Hier gebruiken we hem alleen om te illustreren wat de invloed is van de dimensies ruimte (transport van energie) en tijd (opslag van energie) in een duurzaam energie- en koolstofsysteem.

Volgens het *Middle of the Road-scenario* (SSP2) bedraagt het wereldwijde finale energiegebruik in 2100 270.500 TWh.

Deze hoeveelheid hebben we zelf verdeeld over de duurzame energiedragers elektriciteit (50%), waterstof (40%) en warmte (10%). In aanvulling op het door het Nova Institute geschatte koolstofgebruik voor chemische producten (1.000 Mton), hebben we zelf een schatting gemaakt van het koolstofgebruik voor synthetische brandstoffen voor de luchtvaart (275 Mton) en de scheepvaart (275 Mton). Bij elkaar opgeteld is het wereldwijde koolstofgebruik in 2100 dan 1.550 Mton.

Invloed van de dimensie ruimte

Uit de World solar heat map blijkt dat duurzame energie over kortere en langere afstanden vervoerd moet worden, van gebieden met een overschot naar gebieden met een tekort. Elke energiedrager heeft andere transportkosten. Omdat warmtetransport in de vorm van water het duurst is, zul je warmte lokaal willen opwekken en gebruiken. Transport van elektriciteit is minder duur, die kun je dus regionaal opwekken en gebruiken. Vervoer gaat dan via elektriciteitskabels. Nog minder duur is waterstoftransport in de vorm van gas via pijpleidingen, zodat het rendabel

Grootschalig windpark op zee



is om het over duizenden kilometers (dus ook mondiaal) te vervoeren. Als van waterstofgas een vloeistof wordt gemaakt, kan het wereldwijd per schip worden vervoerd. Behalve vloeibare waterstof kun je zo ook afgeleide vloeibare of vaste waterstofproducten transporteren, zoals synthetische brandstoffen, ammoniak of sponsijzer (hot briquetted iron).

Zeewier en biomassa-reststromen dragen niet alleen bij aan de energiebalans, maar ook aan de koolstofbalans. In een duurzaam energiesysteem komt koolstof niet meer uit fossiele bronnen, maar uit biomassa of recycling. Daarom willen we de beschikbare biomassa omvormen naar waterstof en CO₂. Op zee geteelde zeewier brengen we aan land om er daar waterstof en CO₂ en/of syngas (een gasmengsel van koolstofmonoxide en waterstofgas) van te maken. Vervolgens verwerken we dit in chemische producten en brandstoffen voor schepen en vliegtuigen. Natte en droge biomassa-reststromen zetten we regionaal in voor de productie van waterstof en CO₂ of C (koolstof). Van droge biomassa-reststromen kunnen we ook lokaal warmte maken door ze te verbranden in kachels, ovens of haarden. Warmte met een lage en middelhoge temperatuur kun je produceren met elektriciteit en/of waterstof. Maar je kunt deze warmte ook direct winnen uit geothermische bronnen, zonne-energie en biomassa. En je kunt ook restwarmte benutten. In de toekomst is een van de belangrijke lokale restwarmtestromen afkomstig van brandstofcellen. Samen met batterijen zorgen brandstofcellen in woningen en gebouwen voor flexibiliteit in het elektriciteitssysteem. Tegelijkertijd produceren ze warmte die je kunt gebruiken voor ruimteverwarming en tapwater of – op middelhoge temperatuur – voor kledingwasserijen, autowasstraten, enz.

Invloed van de dimensie tijd

Energieopslag in een mondiaal duurzaam energiesysteem heeft enkele algemene kenmerken. Allereerst moet de opslag zo dicht mogelijk bij de grootschalige productie-locaties van duurzame waterstof gebeuren. Zo kun je van het variabele waterstofaanbod een continu aanbod maken, dat je vervolgens kunt bewerken en per schip of pijpleiding

kunt transporteren. Ten tweede is er waterstofopslag nodig bij de energievraag, waarmee je kunt voorzien in de wisselende energievraag door dag-nachtvariaties, seizoensvariaties en variaties door weer-, leef- en werkpatronen. Met waterstofopslag zul je vooral de grootschalige seizoens-, maand- en weekvariaties opvangen. Ten derde is er opslag nodig om het regionale elektriciteitssysteem te balanceren. Het in de tijd variërende, regionaal opgewekte elektriciteitsaanbod kan daarmee worden afgestemd op de elektriciteitsvraag. Daarvoor is opslag nodig op alle tijdschalen. Voor variaties van seconden tot een week kan dat met batterijen en supercapacitors – capacitors die snel kunnen opladen en ontladen en 10 tot 100 keer zoveel energie kunnen opslaan als elektrolytische capacitors. Voor week- tot seizoensvariaties is grootschalige opslag nodig, zoals opgepompte waterkracht en waterstof. Tenslotte is er op lokale schaal opslag nodig van warmte en diverse brandstoffen. Opslag van warmte voor ruimteverwarming is nodig op diverse tijdschalen, waaronder opslag op seizoensbasis in aquifers.

Er zijn veel studies naar opslag gedaan, maar alle gefragmenteerd en gericht op slechts een deel van het energiesysteem. Naar opslag in een mondiaal, volledig duurzaam energiesysteem, is nog geen onderzoek gedaan. Daarom schatten we hier de mondiaal benodigde opslagvolumes op basis van enkele gefragmenteerde studies: over hoe je het variabele aanbod van zon en wind met waterstof kunt omzetten in een continu aanbod ^{[69], [159]}, over de huidige fossiele opslagcapaciteit, onder meer voor aardgas ^[160], en over grootschalige seizoensopslag in volledige duurzame elektriciteitssystemen ^{[161], [162]}. In de tabel vatten we samen hoeveel van de geproduceerde waterstof en elektriciteit er moet worden geleverd door, of via, een opslagsysteem. Het zijn zeer grove schattingen.

Energie- en koolstofbalans in 2100

De dimensies ruimte (i.v.m. transport) en tijd (i.v.m. opslag) spelen in een volledig duurzaam energiesysteem een grotere rol dan in een fossiel energiesysteem. In een fossiel energiesysteem gaat het vooral om de energieproductie,

Benodigde hoeveelheid energie die uit opslag wordt gehaald in een mondiaal duurzaam energiesysteem om op elk moment te kunnen voldoen aan de energievraag

| Doel van de opslag | Technologie | % van productie/finale vraag via opslag |
|---|--|---|
| Waterstofproductie: van variabel naar continu of basislast aanbod | Waterstofopslag, ondergronds en bovengronds, in nabijheid van de waterstofproductie om transport van basislast mogelijk te maken | 35% |
| Waterstofvraag: van basislastaanbod naar variabele vraag | Waterstofopslag, ondergronds en bovengronds, in nabijheid van de waterstofvraag | 25% |
| Elektriciteitsbalancering (uur, dag, week) | Elektriciteitsopslag in supercapacitors en batterijen | 10% |
| Elektriciteitsbalancering (week, maand, seizoen) | Elektriciteits- en warmteproductie met brandstofcellen op waterstof | 25% |

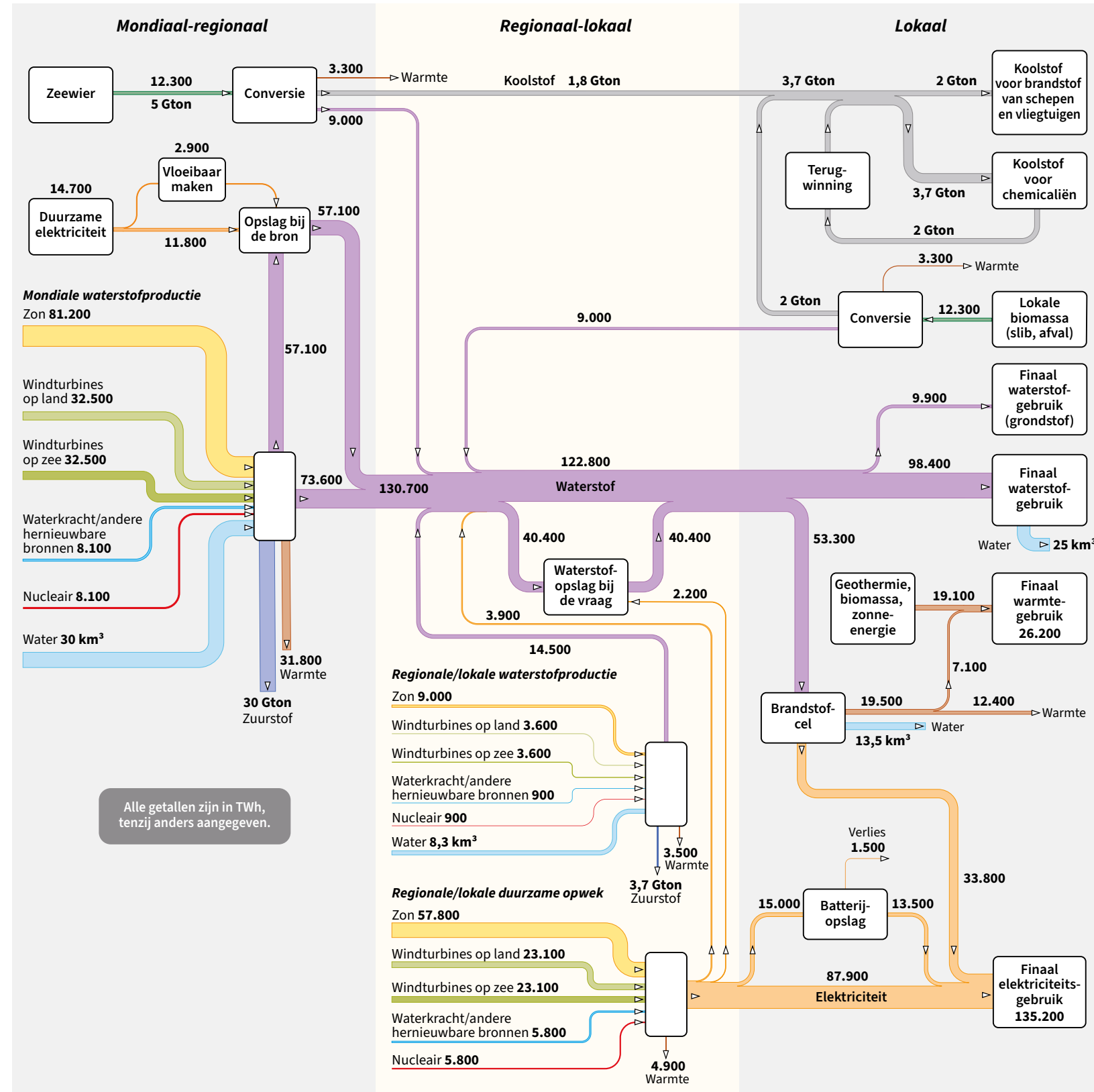
opgedeeld in de verschillende bronnen, en de energievraag, opgedeeld in diverse sectoren. In een volledig duurzaam energiesysteem gaat het daarnaast om de dimensie ruimte, die je kunt indelen in de categorieën mondiaal, regionaal en lokaal, en om de dimensie tijd, die je kunt indelen zoals in bovenstaande tabel. Uitgaande van het SSP2-scenario (*Middle of the Road*) en rekening houdend met de dimensies tijd en ruimte, berekenden we een mondiale duurzame energie- en koolstofbalans voor het jaar 2100.

Laten we allereerst eens kijken naar de koolstofbalans in 2100. We veronderstellen dat 55% van de in chemische producten vastgelegde koolstof kan worden gerecycled. De overige 45% moet uit nieuwe, groene koolstof worden geproduceerd. Ook voor de productie van synthetische brandstoffen is nieuwe koolstof nodig, want bij verbranding ervan in schepen en vliegtuigen verdwijnt de koolstof in de lucht. In totaal hebben we zo'n 1 miljard ton koolstof, dat equivalent is aan 3,7 miljard ton CO₂, nodig uit zeewier en biomassa-reststromen. We nemen aan dat op zee geproduceerd zeewier de helft van deze koolstof levert. De andere helft komt uit een divers aanbod van lokale biomassa-reststromen, zoals slib, agrarisch afval of houtafval. Samen met

gerecyclede koolstof wordt dit verwerkt tot chemische producten en synthetische brandstoffen.

De energiebalans in 2100 is wat ingewikkelder. We bekijken deze op drie ruimtelijke schalen:

- Mondiaal.** In woestijnen en op de oceanen vindt grootschalige waterstofproductie (tientallen tot honderden GW's per locatie) plaats, voornamelijk met duurzame energiebronnen en eventueel nucleaire energie. Waterstofproductie gebeurt met elektrolyse, fotolyse of thermolyse. Ook de productie van waterstof en koolstof uit zeewier vindt mondiaal plaats, waarna deze stoffen worden omgezet in chemische producten en synthetische brandstoffen. Via opslag wordt een continu aanbod van waterstof gemaakt. Per pijpleiding of schip wordt dit getransporteerd naar gebieden met een energievraag, zoals steden, dorpen en industriële locaties. Bij de grootschalige waterstofproductie-locaties wordt duurzame elektriciteit onder meer gebruikt voor compressie en om waterstof en koolstof om te zetten in andere producten.
- Regionaal.** Op regionale schaal wordt voornamelijk elektriciteit opgewekt. Transport en distributie gebeurt



via een elektriciteitsnetwerk. Het balanceren van het elektriciteitsnet gebeurt met batterijen (korte termijn) en met brandstofcellen (maand- en seizoensvariaties). Regionaal opgeslagen waterstof wordt samen met de op dat moment geproduceerde waterstof gebruikt om te allen tijde aan de waterstofvraag te kunnen voldoen. Voor een deel is dit de vraag van stationaire brandstofcellen die het elektriciteitsnet balanceren. Ook op kleinere schaal wordt waterstof geproduceerd, onder meer uit biomassa-reststromen (die daarbij ook koolstof produceren), bij waterzuiveringen (in combinatie met zuurstof- en warmteproductie) en bij de waterstofvraag (als de waterstof niet kan worden geleverd via een waterstofinfrastructuur).

3 **Lokaal.** Op deze schaal vindt productie van elektriciteit, warmte en waterstof plaats. Elektriciteitsproductie gebeurt met zonnecellen of brandstofcellen. Waterstofproductie gebeurt met omkeerbare brandstofcellen of fotolysecellen, die water splitsen met zonlicht in waterstof en zuurstof. Lokale productie betreft maar een klein deel van het totale waterstofaanbod. Warmte wordt voornamelijk lokaal opgewekt, omdat transport over lange afstanden niet mogelijk is zonder grote verliezen. Warmteproductie gebeurt uit bronnen als zonne-energie, geothermie en biomassa. Ook brandstofcellen die werken op waterstof produceren warmte.

Het finale elektriciteitsgebruik, 60% van het totale finale energiegebruik, is bedoeld voor de werking van apparaten, licht, koeling, verwarming met warmtepompen en batterij-elektrische mobiliteit. Het finale waterstofgebruik, 40% van het totaal, is bedoeld als grondstof voor chemische producten en synthetische brandstoffen, voor hoge- en middelhogetemperatuurwarmte in de industrie en voor brandstofcel-elektrische mobiliteit. Een deel van de finale warmtevraag in woningen, gebouwen, kassen en industrie wordt direct geleverd door warmtebronnen of door de warmte uit stationaire brandstofcellen. Stationaire brandstofcellen op waterstof krijgen een cruciale rol bij het balanceren van het elektriciteitssysteem en bij het leveren van warmte. Slimme combinaties van waterstof en

elektriciteit, en soms ook warmte, leiden tot een betaalbare, betrouwbare en schone energievoorziening met een grote leveringszekerheid.

Transport van water en energie

In 2100 wordt een groot deel van de waterstof gemaakt uit water via elektrolyse, fotolyse of thermolyse. Zet je deze waterstof in een brandstofcel chemisch om in elektriciteit en warmte, dan komt er weer gedemineraliseerd water vrij. Door dit water op te vangen en er zouten en mineralen aan toe te voegen, produceer je schoon drinkwater, zonder een enkele vorm van verontreiniging. Stationaire brandstofcellen staan altijd lokaal, dicht bij de vraag naar elektriciteit en warmte. Drinkwater kun je dus ook lokaal produceren. Op een vrachtschip kun je op deze manier voor de bemanning voldoende water produceren voor consumptie (drinkwater) en sanitatie (toiletspoeling). Ook een waterstofauto kan substantiële waterhoeveelheden produceren: uit 1 kg waterstof (genoeg om 100 km te rijden) komt namelijk 9 liter zeer schoon water (3 dagen drinkwater voor 1 persoon). Met waterstof transporteer je niet alleen energie, maar ook schoon water!

Waterstofauto's produceren uit 1 kg waterstof (100 km rijden) 9 liter zeer schoon water – 3 dagen drinkwater voor 1 persoon

Hoeveel drinkwater is er mondiaal nodig en welk deel daarvan kan stationaire brandstofcellen produceren? Gaan we uit van een gemiddeld consumptief gebruik (voor koken en drinken) van 3 liter water per dag en 9 miljard mensen in 2100, dan is per jaar een kleine 10 miljard m³ drinkwater nodig. Volgens onze energiebalans is dat drinkwatergebruik minder dan wat de lokaal opgestelde, stationaire brandstofcellen produceren: zo'n 13,5 miljard m³ water. Vooral in gebieden met waterschaarste kunnen brandstofcellen in de toekomst een welkome bron zijn van drinkwater voor consumptief gebruik.

Voor de beoordeling van een duurzaam energiesysteem is een balans van materiaal én energie nodig, met als input het primair materiaalgebruik en als output het finale energiegebruik

Consumptie van drinkwater vertegenwoordigt maar een fractie van het totale watergebruik. In Europa gebruiken we zo'n 150 liter water per persoon per dag voor douchen, toiletspoeling en wassen ^[118]. Dit gebruik zou kunnen dalen door waterbesparende apparaten (douche, toilet, wasmachine enz.). En uit douchewater kan veel energie worden teruggewonnen, ruim 60% ^[163]. Ook zijn er lokaal mogelijkheden om drinkwater te hergebruiken en kunnen we – naast water uit de kraan – regenwater gebruiken als bron ^[164]. Ook over grote afstanden aangevoerd zeewater is mogelijk een bron van zoet water. Verreweg het meeste zoet water, wel 70%, wordt gebruikt voor de irrigatie van landbouwgewassen ^[165]. Maar, zoals ook de Wereldbank betoogt, we zullen veel meer voedsel op zee moeten gaan telen. Voor voedsel uit zee is namelijk geen irrigatiewater nodig.

Duurzame-energiesysteemdelen in 2100

In onze schets van een duurzaam energiesysteem in 2100 hebben we aandacht besteed aan enkele duurzame-energiesysteemdelen: schoon (geen broeikasgasemissies), betaalbaar (laagste systeemkosten voor productie, transport en opslag) en betrouwbaar (opslag, systeemflexibiliteit en redundantie). Bij deze eerste poging hebben we de dimensies ruimte en tijd zo goed mogelijk meegenomen. Maar het toekomstige energiesysteem moet natuurlijk voldoen aan alle duurzame-energiesysteemdelen. Het dient dus ook circulair en rechtvaardig te zijn, mét leveringszekerheid van het aanbod van energie en materialen. Over deze thema's wordt wel al nagedacht ^[166], maar voor een goede beoordeling zijn nog betere en gedetailleerdere methodieken en instrumenten nodig.

Duidelijk is in elk geval dat het toekomstige duurzame energiesysteem niet zozeer afhankelijk is van de beschikbaarheid van energiebronnen. Zon en wind zijn er namelijk in overvloed. Wel is het afhankelijk van de beschikbaarheid van materialen die nodig zijn om de duurzame energie om te zetten in energiedragers, voor transport en opslag, en uiteindelijk voor conversie van energiedragers naar energiediensten. Die materialen zijn schaars. Dit heeft invloed op twee doelen: circulariteit en zekerheid van het materialenaanbod. Hierna stellen we op hoofdlijnen een methodiek voor om die twee doelen te kunnen beoordelen.

Op dit moment beoordelen we energiesystemen meestal op basis van een energiebalans. Hierboven hebben we dat gedaan voor een duurzaam energiesysteem in 2100, waarbij we ook de dimensies ruimte en tijd hebben meegenomen. Maar voor een duurzaam energiesysteem zet zo'n energiebalans ons eigenlijk op het verkeerde been. In een energiebalans vergelijken we de energie die we erin stoppen (het primaire energiegebruik) met de energie die we gebruiken (het finale energiegebruik). Deel je het finale energiegebruik door het primaire energiegebruik, dan heb je een maat voor de energie-efficiëntie. Door velen wordt deze gezien als een belangrijke maat: hoe hoger de efficiëntie, hoe beter het energiesysteem. Het is de vraag of die ook van toepassing is voor een duurzaam energiesysteem, want hoe bepaal je eigenlijk hoeveel energie je daarin stopt?

Bij een fossiel energiesysteem is duidelijk hoeveel energie we erin stoppen: dat is de energie-inhoud van de fossiele brandstof, oftewel de hoeveelheid gebruikte energie in de vorm van olie, kolen en gas. Na gebruik is deze vorm van energie er niet meer. Bij duurzame energiebronnen als zon en wind ligt dit anders. Is de hoeveelheid energie die we in het systeem stoppen gelijk aan een hoeveelheid gebruikte zonne-energie? Dat klinkt logisch, maar de zonne-energie raakt door dit gebruik niet op. Je kunt ook uitgaan van de hoeveelheid elektriciteit die zonnecellen

Groene energie voor iedereen is geen utopie, dankzij waterstof en elektriciteit als schone energiedragers!



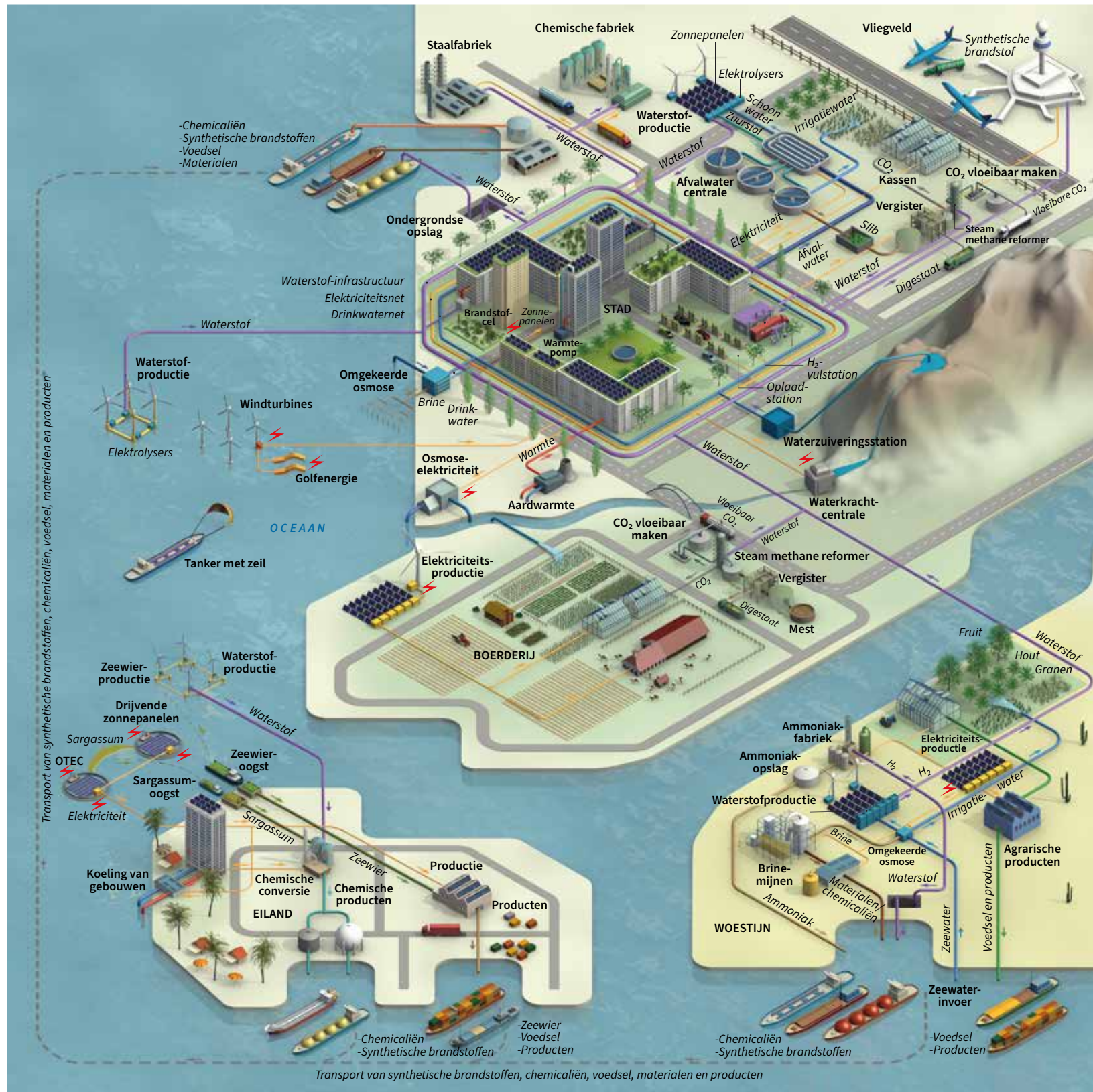
De Airbus ZEROe gaat vliegen op waterstof

produceren. Maar zonnecellen in de woestijn produceren meer elektriciteit dan die op een dak in Duitsland. Dit is dus geen eenduidige hoeveelheid. Bovendien produceren fotolysecellen waterstof en geen elektriciteit. En er zijn verschillen in het rendement van zonnecellen, waardoor je voor dezelfde hoeveelheid energie soms meer en soms minder zonnecellen nodig hebt.

Systeemkosten en materiaal-efficiëntie, en niet energie-efficiëntie, zijn de maatstaf in de beoordeling van een duurzaam energiesysteem

Om deze redenen kun je het primair energiegebruik van een duurzaam energiesysteem eigenlijk niet eenduidig vaststellen. Maar wat dan wel? Eerder hebben we betoogd dat omschakelen van een fossiel naar een duurzaam energiesysteem met zich meebrengt dat we omschakelen

van fossiele energie naar materialen. Zouden we primair energiegebruik bij de beoordeling daarom niet moeten vervangen door primair materiaalgebruik? Een eerste, simpele aanpassing van de energiebalans betekent dan dat we het primaire energiegebruik vervangen door opgesteld vermogen en fossiel energiegebruik – dat is immers een maat voor het materiaal en energiegebruik. Bij een duurzaam energiesysteem gaat het om opgesteld vermogen voor zon, wind, waterkracht en biomassa-conversie; bij een fossiel energiesysteem om opgesteld vermogen voor olie- en gaswinning, steenkoolmijnen, raffinaderijen en elektriciteitscentrales plus het fossiele energiegebruik. De energiebalans wordt dan een balans van materiaal én energie, met als input het primair materiaalgebruik plus fossiel energiegebruik en als output het finale energiegebruik. Daarmee zijn we wél in staat om te beoordelen of een duurzaam energiesysteem circulair is, of het betaalbaar is en in welke mate we zekerheid hebben van materialenaanbod.



Groene energie voor iedereen

We hebben een duurzaam energiesysteem voor 2100 geschetst, rekening houdend met de dimensies ruimte en tijd. Uit de world heat maps hebben we geconcludeerd dat we veel goedkope zon en windenergie, in de vorm van waterstof, moeten importeren uit de woestijnen en de oceanen. En omdat het aanbod van duurzame energie fluctueert, is in een duurzaam energiesysteem meer opslag nodig dan in een fossiel energiesysteem. De ondergrond biedt mogelijkheden voor goedkope, grootschalige langetermijnopslag. Daarnaast is kleinschalige kortetermijnopslag van essentieel belang voor een betrouwbaar duurzaam energiesysteem. De twee belangrijke duurzame energiedragers, die bij gebruik geen CO₂ produceren, zijn waterstof en elektriciteit. Beide energiedragers kunnen bovendien op een betaalbare manier naar alle eindgebruikers worden gedistribueerd: waterstof via grootschalig, langeafstandstransport, elektriciteit via regionaal transport. Het beeld is helder: groene energie voor iedereen is geen utopie, dankzij de schone energiedragers waterstof en elektriciteit!

- [155] IPCC, *Climate Change 2022, Mitigation of Climate Change Summary for Policy-makers (SPM)*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2022 [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- [156] O. Fricko *et al.*, “The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century,” *Glob. Environ. Chang.*, vol. 42, pp. 251–267, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004.
- [157] C. Berg and F. Kähler, “Turning off the Tap for Fossil Carbon Future Prospects for a Global Chemical and Derived Authors,” no. April, 2021 [Online]. Available: <https://renewable-carbon.eu/publications/product/turning-off-the-tap-for-fossil-carbon-future-prospects-for-a-global-chemical-and-derived-material-sector-based-on-renewable-carbon/>
- [158] J. Gao, “Global 1-km Downscaled Population Base Year and Projection Grids Based on the Shared Socioeconomic Pathways, Revision 01.” NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Palisades, New York, 2020 [Online]. Available: <https://doi.org/10.7927/q7z9-9r69>
- [159] D. Eradus, “The Techno-Economic Feasibility of Green Hydrogen Storage in Salt Caverns in the Dutch North Sea [MSc. Thesis],” Delft University of Technology, 2022 [Online]. Available: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:8eb96cf8-2c91-4553-b0cb-a41458f61b5d>
- [160] S. Timmerberg and M. Kaltschmitt, “Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central Europe as blend in existing pipelines – Potentials and costs,” *Appl. Energy*, vol. 237, no. July 2018, pp. 795–809, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.030. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.030>
- [161] Hydrogen Council, “How hydrogen empowers the energy transition,” 2017 [Online]. Available: <http://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>
- [162] V. D. W. M. Oldenbroek, “Integrated transport and energy systems based on hydrogen and fuel cell electric vehicles,” Delft University of Technology, 2021 [Online]. Available: <https://doi.org/10.4233/uuid:f8f6566e-e50a-47e2-b1f9-67503ca1d021>
- [163] Z. Deng, S. Mol, and J. P. Van Der Hoek, “Shower heat exchanger: Reuse of energy from heated drinking water for CO₂ reduction,” *Drink. Water Eng. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2016, doi: 10.5194/dwes-9-1-2016.
- [164] D. Bouziotas, D. van Duuren, H. J. van Alphen, J. Frijns, D. Nikolopoulos, and C. Makropoulos, “Towards circular water neighborhoods: Simulation-based decision support for integrated decentralized urban water systems,” *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 6, 2019, doi: 10.3390/w11061227.
- [165] World Bank, “Water in agriculture,” 2022. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture#1>
- [166] L. Rayner and M. Fessler, “Fair Energy Transition For All - How to get there? EU Wide Recommendations,” 2022 [Online]. Available: https://epc.eu/content/PDF/2022/FETA_final_report.pdf

Fotoreferenties

- p. 22: Sunfire GmbH
- p. 35: Junior Kannah / AFP / ANP
- p. 45: SolarCleanso
- p. 62: Wikimedia Commons
- p. 70: DEWA
- p. 73: Solhyd
- p. 82: NASA
- p. 86: Lyfted Media for Dominion Energy
- p. 87: Joshua Bauer / NREL
- p. 88: Lyfted Media for Dominion Energy
- p. 92: David Wingate / Oceanergy
- p. 93: Stefan Payne-Wardenaar / Smartland landscape architecture
- p. 96: Børge Bjørneklett / Ocean Sun
- p. 101: Colin Keldie / EMEC
- p. 113: MDPI
- p. 119: Robert F. Bukaty / AP Photo / ANP
- p. 133: Monolith
- p. 135: Hyundai
- p. 147: Airbus
- Alle overige foto's: iStockphoto / Getty Images

Biografie



Ad van Wijk

Ad van Wijk (1956) is Emeritus Professor Future Energy Systems aan de Technische Universiteit Delft en gastprofessor bij KWR Water Research Institute. Daarnaast bekleedt hij diverse adviesfuncties bij bedrijven en organisaties.



Els van der Roest

Els van der Roest (1991) heeft zich als onderzoeker bij KWR Water Research Institute gespecialiseerd in duurzame concepten rondom Water & Energie. Daarnaast promoveert zij aan de Technische Universiteit Delft op geïntegreerde duurzame energie- en watersystemen voor woonwijken.



Jos Boere

Jos Boere (1959) is directeur van Allied Waters, dat zich richt op implementatie van innovatieve en duurzame concepten in een circulaire economie. Jos is medeoprichter van Hysolar, producent en leverancier van groene waterstof.

Dankwoord

In november 2017 publiceerden we *Solar Power to the People*. Dat boek heeft ertoe bijgedragen dat waterstof als schone energiedrager op de agenda kwam van het bedrijfsleven en de politiek. Inmiddels zijn we zes jaar verder. Diverse landen, inclusief de Europese Unie, hebben inmiddels een waterstofstrategie geformuleerd. En veel bedrijven, organisaties en onderzoeks- en onderwijsinstellingen zijn actief geworden op het gebied van waterstof. Toch is er nog veel onbekend over productie, transport, opslag en gebruik van waterstof. En ook over de technologie, marktontwikkeling, veiligheid, milieu-impact, enz. Maar vooral is er nog onbekendheid en onwetendheid over de systeemfunctie die waterstof in een duurzaam energiesysteem gaat spelen.

De vraag naar een boek dat beschrijft hoe we een duurzaam energiesysteem kunnen ontwikkelen, aan welke doelen dat moet voldoen en welke rol waterstof daarin krijgt, kwam dan ook van vele kanten. Wij hebben die handschoen graag opgepakt, maar dit hadden we niet gekund zonder de steun van diverse organisaties, bedrijven, onderzoeksinstellingen en vooral personen.

Allereerst willen we **KWR Water Research Institute** bedanken voor de support, zowel financieel als met menskracht. Met name willen we noemen: **Diederik van Hasselt** [†] voor het uitzoekwerk, **Frank Oosterholt** voor zijn inhoudelijke bijdrage, en **Steven Ros** en **Bernard Raterman** voor het maken van de kaarten in GIS. En natuurlijk dank aan de mede-initiatiefnemers **Hysolar**, **Hydrogen Europe** and **DII** voor hun support.

Belangrijke inhoudelijke bijdragen zijn geleverd door MSc-studenten van de TU Delft, die hun afstudeeronderzoek onder begeleiding van Ad van Wijk hebben verricht. Expliciet zijn de resultaten van een zestal afstudeeronderzoeken en die van een studentenonderzoeksgroep in dit

boek terechtgekomen. Het betreft **Martijn van der Star** (materiaalgebruik elektrolyzers), **Christos Zervas** (offshore zon-waterstofproductie), **Diaz Knöbel** (biomassarest-stromenconversie naar H₂ en CO₂), **Aike Stroo** (waterstofproductie door methaanpyrolyse), **Pedro Quintela de Saldanha** (waterstofopslag bij zon-waterstofproductie), **Deirdre Eradus** (waterstofopslag bij offshore wind-waterstofproductie) en de studentengroep **Matthijs van Baarlen**, **Rosemary Bolt**, **Arturo Cerdá Bermejo**, **Tim Fennis**, **Thomas van Foeken**, **Jeannine Frijns** en **Meet Somaiya** (brine mining).

Door het boek te laten reviewen is de inhoudelijke kwaliteit verbeterd. We danken daarvoor de reviewers **Prof. Dr. Kornelis Blok** (Energy System Analysis TU Delft, Lead author IPCC 3rd, 4th and 6th Assessment Report.), **Dr. Noé van Hulst** (Vice Chair IPHE, Special Advisor Hydrogen IEA, Senior Fellow Clingendael International Energy Programme), **Drs. Kees van der Leun** (Director Common Futures), **Prof. Dr. Ir. Zofia Lukszo** (Smart Energy Systems TU Delft), **Prof. Dr. Ir. Peter Luscuere** (Building Physics & Services TU Delft, Guest Professor Tianjin University China), **Ir. Paul van Son** (President Dii Desert Energy, Honorary President European Federation of Energy Traders [EFET]) en **Ir. Frank Wouters** (Senior Vice President New Energy at Reliance Industries, Chairman MENA Hydrogen Alliance, Co-President Long Duration Energy Storage Council, Fellow Payne Institute – Colorado School of Mines).

Als laatste veel dank aan alle briljante, moedige en lieve mensen die hun steentje bijdragen aan de realisatie van een duurzaam energiesysteem voor iedereen.

Ad van Wijk, Els van der Roest, Jos Boere

Colofon

Dit boek is gecreëerd en geproduceerd door Five Fountains B.V.
in opdracht van de initiatiefnemers (KWR Water Research
Institute, Hysolar, Hydrogen Europe en Dii Desert Energy).

© Ad van Wijk, Els van der Roest, Jos Boere
Oktober 2023

Auteurs: Ad van Wijk, Els van der Roest, Jos Boere
Uitgever: Allied Waters B.V.
Projectmanagement: Henk Leenaers, Lijn43, Utrecht
Vormgeving: Ontwerpstudio Spanjaard, Maartensdijk
Infographics: Michel van Elk, Tiel
Cartografie: Annemieke Altena, Buitenpost
Tekstredactie: Lijn43, Utrecht
Beeldredactie: Rolf Rosing, Amsterdam

ISBN: 9789082763720
NUR: 950
DOI: 10.5281/zenodo.8207551

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag
worden veeveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd
gegevensbestand of openbaar gemaakt door middel van
druk, fotokopie, microfilm, elektronisch databestand of op
welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke
toestemming van de uitgever.

Dit boek is met de grootst mogelijke zorgvuldigheid samen-
gesteld. Noch de maker, noch de uitgever stelt zich echter
aansprakelijk voor eventuele schade als gevolg van eventuele
onjuistheden en/of onvolledigheden in deze uitgave.

www.greenenergyforall.nl
www.greenenergyforall.eu



Overschakelen op duurzame energie vergt veel meer dan windturbines en zonnepanelen bijbouwen. Het hele energiesysteem moet op de schop. Vraag en aanbod van duurzame energie liggen namelijk te ver uit elkaar. In steden en industriegebieden, waar duurzame energie het hardst nodig is, is er een groot gebrek aan ruimte. En de woestijnen en oceanen, met een overvloed aan zon en wind, liggen ver weg. Dit boek laat zien hoe je deze opslag- en transportproblemen slim kunt oplossen met waterstof en elektriciteit. Daarnaast pleiten we voor een bredere kijk op energiesystemen, als onderdeel van een geïntegreerd, wereldwijd systeem voor levering van energie, materialen, water en voedsel. Op weg naar groene energie voor iedereen!

www.greenenergyforall.eu

Initiatiefnemers:

KWR



Deze uitgave is mede mogelijk gemaakt door:
Lijn43 • Five Fountains

