

Chemische Feitelijkheden

#361

Editie 91

april

2020

Marga van Zundert

Windmolens

Sterke wieken voor schone stroom

Een land van wind en molens is Nederland altijd geweest. Molens creëerden zelfs een groot deel van het land. Maar bij een windmolen denk je tegenwoordig eerder aan een hoge, ranke windturbine dan aan de klassieke met riet bedekte poldermolen. Moderne windmolens zijn de grootse draaiende machines op aarde. Ze zorgen voor schone, duurzame energie die inmiddels qua kostprijs kan concurreren met kolen en gas. Toch zijn de hoge torens lang niet bij iedereen even geliefd.

De meeste mensen zien ze het liefst ver weg, in zee. De windenergie oogsten lukt dankzij de enorme windmolenwieken van lichte en sterke composietmaterialen. De draaibeweging omzetten in stroom gebeurt met magneten. Het principe erachter is niet anders dan dat van de ouderwetse fietsdynamo. Het geheel krijgt een beschermend 'plastic' jasje: een coating tegen wind en regen, roest en zout, ijzel en pek. Zonder chemie is er geen windenergie.

Sterke wieken voor schone stroom

Dankzij supersterke lichtgewichtkunststoffen voor de wieken zijn windmolens steeds groter en kunnen ze concurreren met fossiele energie. Veel moderne molens produceren stroom dankzij een slordige 100 kg van het magnetische element neodymium.

Land van windmolens, dat was Nederland eeuwenlang. Molens op de dijken om polders droog te malen en te houden, en bij dorpen en steden om het graan te malen. Er bestaat geen Hollandser plaatje dan de Kinderdijk of de Zaanse Schans. Anno 2020 denken steeds meer Nederlanders bij het woord windmolen echter vooral aan een hoge stalen mast met bovenaan

drie witte kunststofwieken. Die moderne windmolens zijn de grootste draaiende machines op aarde. Ze zijn onmisbaar in de strijd tegen klimaatverandering, maar niet zo alom geliefd als de klassieke poldermolen. Ze kunnen geluidsoverlast en slagschaduwen veroorzaken voor omwonenden, er zijn klachten over horizonvervuiling, verder zouden ze vogels vermalen en draaien op subsidie.

Groter, grootst

De eerste moderne windmolens, door kenners liever windturbines genoemd, zijn gebouwd in de jaren zeventig toen wetenschappers door de oliecrisis driftig zochten naar alternatieve energiebronnen. De eerste exemplaren waren amper groter dan de klassieke windmolen en leverden circa 100 kW aan vermogen, goed voor de stroomvoorziening van zo'n tachtig huishoudens.



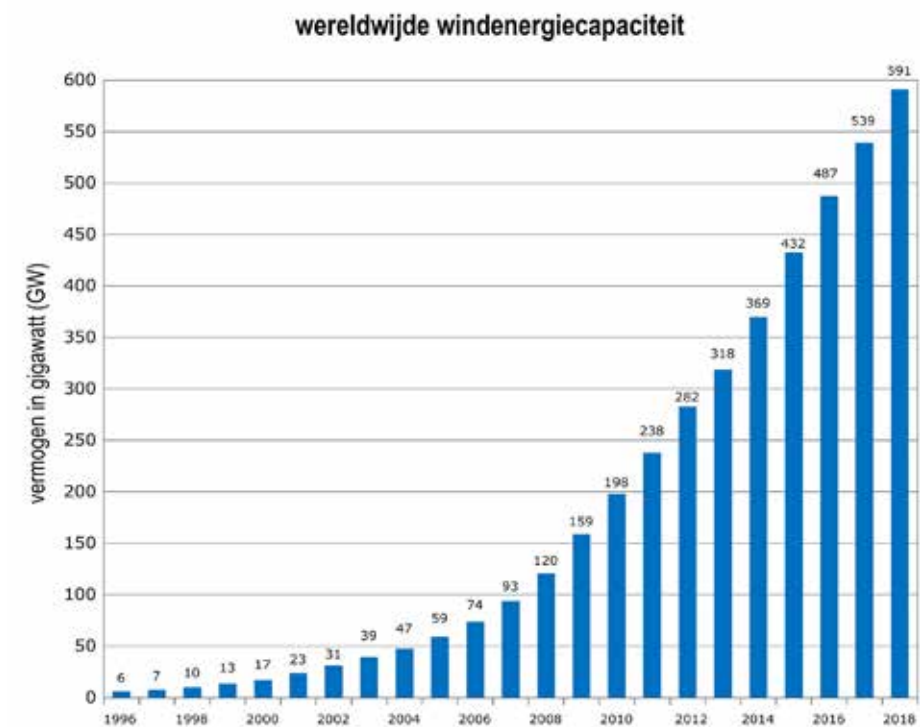
De klassieke poldermolen staat hier broederlijk naast een aantal van de 2.300 moderne windmolens, of beter gezegd windturbines, die Nederland rijk is.

In 1985 begon in de Wieringermeerpolder de bouw van de eerste windmolen van 1 MW. Die had een ashoogte van 60 m en een wikkeldiameter van 45 m. In 1990 waren er in Nederland 323 windturbines met een totaal vermogen van 50 MW. De afgelopen jaren gaat de ontwikkeling hard. Op de Maasvlakte staat sinds eind 2019 een prototype van de nu grootste windturbine ter wereld: de Haliade-X van GE Renewable Energy. Die is met zijn ashoogte van 260 m bijna net zo hoog als de Eiffeltoren en heeft wieken van meer dan 100 m lang. Die ene molen heeft een vermogen van 12 MW, goed voor de elektriciteitsvraag van 16.000 huishoudens. Honderden kilometers buiten de kust van Engeland, ter hoogte van York, komen in zee drie windparken met die molens. Ze moeten in 2023 klaar zijn en dan 3,6 GW opleveren, genoeg voor 4,5 miljoen huishoudens.

Volgens Gerard van Bussel, hoogleraar windenergie aan de TU Delft, is het geen toeval dat windmolens steeds groter worden. 'Een tienmaal grotere molen levert niet tienmaal zoveel energie, maar zo'n 150 keer.' Dat komt omdat het oppervlak van de wieken dat de wind 'vangt' kwadratisch toeneemt met de lengte én omdat het in hogere luchtlagen harder waait.

Een andere duidelijke trend is molens op zee. Daar waait het harder, is er meer ruimte en zijn geen omwonenden. Windmolens op zee zijn wel duurder. Er is meer materiaal nodig voor een voetstuk, bouwen in zee is complexer en er moeten hoogspanningsleidingen naar de vaste wal komen. Bovendien is onderhoud op zee een ingewikkelde en dure klus.

Overigens vragen windmolens veel minder oppervlak dan zonnepanelen om energie op te wekken. Om dezelfde opbrengst te geven als één moderne windmolen heb je zeker



BRON: GWEC

10 ha (twintig voetbalvelden) aan zonnepanelen nodig.

2.300 molens

Nederland telt tegenwoordig zo'n 2.300 windmolens. Tot 2008 groeide het aantal molens hard, daarna vlakke de groei af, omdat veel oude molens plaatsmaakten voor modernere, grotere exemplaren. Begin 2019 stond er in Nederland voor ongeveer 1 GW aan windvermogen op zee en ruim 3 GW op land. Internationaal gezien is dat heel bescheiden. Wereldwijd is er 565 GW aan windmolens gebouwd, in Europa 182 GW. Koplopers in windenergie zijn China (221 GW) en de VS (97 GW) en binnen Europa Duitsland (60 GW) en Spanje (23 GW).

Om de klimaatdoelen van Parijs te halen, wil Nederland de komende jaren flink groeien in windenergie en neemt het aantal molens toe. Provincies moeten in 2020 voldoende molens plannen om samen 6 GW aan windvermogen op land te realiseren, een verdubbeling van het huidige vermogen. In 2023 moet er volgens het *Energieakkoord* ook voor minimaal 4,5 GW vermogen aan windmolens op zee klaar zijn. In 2030 dient er 11 GW aan windvermogen te zijn (4.250 MW op land en 6.750 MW op zee). Windmolens leveren dan 8,5 % van alle energie in Nederland en 40 % van ons huidige elektriciteitsverbruik.

Wageningen UR rekende uit hoeveel windvermogen Nederland maximaal kan plaatsen: circa 17 GW op land en 36 tot 54 GW op zee. Daarmee zou je de jaarlijkse elektriciteitsvraag, nu zo'n 120 miljard kWh, kunnen dekken, maar de vraag zal naar verwachting nog flink groeien door elektrisch verkeer.

Duurzaam en goedkoper

Een windmolen maken, vervoeren, installeren en onderhouden kost ook energie. Uit levenscyclusanalyses blijkt echter dat moderne grote molens allemaal binnen een half jaar meer energie opleveren dan het kostte om ze te maken, meestal al binnen drie maanden. Met een gemiddelde levens-

► Energie en vermogen

De begrippen energie en vermogen worden vaak door elkaar gebruikt, zeker in de context van windenergie. Windenergie is elektrische energie en die druk je uit in joules (J); vermogen is energie per tijdseenheid en druk je uit in watt (W). $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$. Als je het hebt over het vermogen van een windmolen, bedoel je de maximale elektrische energie die de turbine per tijdseenheid kan leveren; voor een gegeven molen is dit alleen afhankelijk van de wind. De totale elektrische energie die een turbine bijvoorbeeld in een jaar kan leveren, druk je uit in kilowattuur (kWh). $1 \text{ kWh} = 1.000 \text{ W gedurende 1 uur}$.

Een grote, moderne windmolen op land heeft anno 2020 een vermogen van circa 5 MW en levert jaarlijks zo'n 12 miljoen kWh. In Nederland halen molens zo'n 2.000 à 2.500 vollast-uren, wat inhoudt dat de energieopbrengst te vergelijken is met 2.000 à 2.500 uren maximale belasting. Dat is ongeveer 25 % van de opbrengst bij continu vol vermogen. Op zee kan dat oplopen tot 4.200 vollast-uren.

duur van zo'n twintig jaar, levert een windmolen dus zeker 19,5 jaar stroom zonder CO₂-uitstoot. Elektriciteit uit wind is daarmee veel schoner dan uit fossiele brandstoffen. Een windmolen levert 8 à 34 g CO₂-equivalent per kWh, een gascentrale 490 g en een kolencentrale 900 g. Windenergie kan inmiddels ook goedkoper zijn dan fossiel. De prijs van windenergie daalt al jaren hard; wereldwijd gezien 35 % tussen 2010 en 2018. De kostprijs per kWh hangt ook af van de locatie. Een molen op zee is duurder, maar de elektriciteitsproductie is groter omdat het er meer waait. Nederland is overigens een goed windland. De regio rondom de Noordzee is een van 's werelds meest winderige gebieden. De kostprijs is te vergelijken met andere bronnen via de zogeheten *levelized cost of energy* (LCOE). Dat is een gestandaardiseerde berekening van de prijs per kWh (zonder subsidie). Die bereken je door de afschrijving op de investering plus de onderhoudskosten per jaar te delen door de jaarlijkse opbrengst. Met een gemiddelde in 2018 van € 0,05 per kWh op land is de prijs concurrerend met kolencentrales. De verwachting is dat de prijs van windmolens en windenergie voorlopig nog blijft dalen, windtechnologie ontwikkelt zich nog steeds.

Pieken en dalen

Er is een belangrijke 'maar' bij windenergie: wind is variabel. De ene dag is het

windstil, de andere stormt het. Windenergie regel je niet met een knop naar de energiebehoefte van dat moment, zoals een kolen- of gascentrale. Door stroomgebruik via variabele beprijzing te stimuleren of remmen, afhankelijk van het aanbod, kun je pieken en dalen opvangen. De vele batterijen van elektrische auto's kunnen als opslag dienen en zo bufferend werken. Ook de combinatie wind- en zonne-energie kan dempend werken: in de zomer waait het minder, 's nachts is er geen zon, maar wel vaak wind. En hoogspanningsnetwerken worden steeds uitgebreider door onderlinge koppeling. Ook dat zorgt voor demping; het waait altijd wel ergens in een internationaal gekoppeld netwerk.

Toch zal dat waarschijnlijk niet genoeg zijn bij een groot percentage windenergie. Er zal extra energieopslag nodig zijn. De eerste megabatterijen zijn al geïnstalleerd, bijvoorbeeld een 10 MWh-opslag bij het windmolenpark in de Rotterdamse haven en een 48 MWh-opslag in Noord-Duitsland, bestaande uit 10.000 lithiumionbatterijen. Ook kun je een teveel aan windenergie opslaan door water omhoog te pompen en weer via een waterkrachtcentrale terug te winnen. Dat kan bij een aantal voorraadbekken in Europa.

Maar wetenschappers zoeken vooral naar efficiënte methodes om 'overschotten' aan windenergie om te zetten in een synthetische brandstof. Behalve als opslag kan die



Met zijn ashoogte van 260 m, wieken van 100 m en een vermogen

ook dienen als brandstof voor het verkeer. Dat is momenteel zelfs een 'heilige graal' in de chemie. In het Wieringermeer wordt een bestaande windmolen omgebouwd tot een

► Uit Perzië?

De eerste windmolens stonden in China of Perzië, daar zijn de geschiedschrijvers nog niet uit. Ze dateren naar schatting al vanaf 1.000 jaar voor Christus. Het gaat om molens van het type 'panemoon', dat doet denken aan een gekanteld waterrad. Op de buitenkant van een groot rad staan kleine verticale rieten zeilen. Waait het, dan laat de wind de centrale verticale as ronddraaien. Het doel van de molens was het land irrigeren of mais malen. In Iran en Afghanistan vind je dit type molens nog in oude dorpen, vaak hebben ze een slimme ombouw die ervoor zorgt dat de wind de molen optimaal aandrijft. De eerste molens in Nederland dateren pas uit de twaalfde eeuw en werden gebruikt om graan te malen. Twee eeuwen later hielpen ze ook om de eerste polders aan te leggen. In de zeventiende eeuw zorgden windmolens voor een eerste 'industrialisatie'-golf. Zeker drieduizend windmolens zaagden het hout voor de scheepsbouw, maakten verf, persten olie, en hielpen tabak, chocolade, leer et cetera te produceren. Met de komst van de stoommachine verloren windmolens in de negentiende eeuw langzaam maar zeker terrein. Het Haarlemmermeer werd in 1850 al met stoom drooggemalen. In de loop van de twintigste eeuw stopten veel windmolens voorgoed met draaien.

Na 1935 zijn er geen nieuwe klassieke molens bijgekomen. Nederland telt nu nog ruim duizend klassieke molens die met hulp van veel vrijwilligers worden onderhouden.





van 12 MW is de Haliade-X de grootste windturbine ter wereld.

eerste ‘waterstofmolen’, een project onder leiding van Hygro. De molen moet in 2021 gereed zijn voor waterstofproductie. Onder in de molen komt een elektrolyse-apparaat dat water omzet in waterstof (en zuurstof). Productie ter plekke heeft voordelen, omdat een windmolen gelijkstroom levert en een elektrolyse-apparaat gelijkstroom gebruikt. Er ontstaat zo dus geen energieverlies door omvorming naar wisselstroom en terug. Bovendien stijgen de verliezen in stroomtransport snel wanneer er veel energie door leidingen moet, wat juist in tijden van overvloedige wind het geval is.

Krachtige magneten

Een windmolen zet de draaiing van de as (bewegingsenergie) om in elektriciteit. Dat gebeurt met een generator. Het principe daarachter is in essentie niet anders dan de ouderwetse fietsdynamo, waarbij het draaiende wiel een magneet rond laat gaan in een koperen spoel. Wanneer een geleidend materiaal zich in een wisselend magnetisch veld bevindt, zorgt dat voor inductiespanning (inductiewet van Faraday) die de fietslampjes laat branden. Het principe mag identiek zijn, een moderne windmo-

len is een complexe machine. Er zijn windturbines met en zonder ‘versnellingsbak’ (*direct drive*) en er is een remsysteem voor stormcondities en noodsituaties. De gondel (de ‘kop’ van de molen) met daarin de generator en versnellingsbak wordt automatisch in de wind gedraaid, er is een koelsysteem om oververhitting te voorkomen en een transformator zorgt ervoor dat de elektriciteit altijd in het juiste voltage het net op gaat.

Hoewel een windmolen een natuurkundig apparaat is, komt er veel chemie bij kijken. Dat zit vooral in de gebruikte materialen, zoals de magneten. Die moeten licht en krachtig zijn. Veel windmolens gebruiken elektromagneten: koperspoelen om een ijzerkern. Die zijn robuust en betrouwbaar, maar vragen zelf stroom en zijn vrij zwaar. Een alternatief zijn permanente magneten. De sterkste en daarom meest gebruikte zijn magneten op basis van neodymium, een element uit de reeks lanthaniden (‘zeldzame aarden’). Deze magneten bestaan uit een legering van neodymium, ijzer en boor ($Nd_2Fe_{14}B$). Een stelregel bij windmolens met permanente magneten is dat er per MW 1.000 kg aan magneet-

Top 10 van landen in windenergie (geïnstalleerd vermogen in GW)

1	China	211
2	VS	97
3	Duitsland	59
4	India	35
5	Spanje	23
6	Verenigd Koninkrijk	21
7	Frankrijk	15
8	Brazilië	15
9	Canada	13
10	Italië	10

Nederland staat met 4 GW op de 18de plek. De Europese Unie heeft in totaal 197 GW geïnstalleerd vermogen.

BRON: GLOBAL WIND REPORT 2018, GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL

materiaal in zit, waarvan circa 30 % neodymium.

Het Amerikaanse General Motors en het Japanse Sumitomo Special Metals ontdekten de magnetische kracht van neodymium onafhankelijk van elkaar begin jaren tacht-

► Magnetisch neodymium

Element nummer 60, neodymium, is een van de lanthaniden, de rij elementen in het periodiek systeem van nummer 57 (lanthaan) tot en met nummer 71 (lutetium) die er onderaan een beetje bijhangen. De elementen zijn beter bekend als de zeldzame aarden, maar dat is een naam die de internationale chemievereniging IUPAC liever niet meer hoort. Lanthaniden zijn namelijk helemaal niet zo zeldzaam. De betiteling 'zeldzaam' komt vooral doordat de lanthaniden lange tijd nauwelijks werden gebruikt omdat ze heel lastig te isoleren zijn.

Een materiaal is magnetisch wanneer de spins van de ongepaarde elektronen dezelfde kant op wijzen. Neodymium heeft vier ongepaarde elektronen, wat zorgt voor een groot magnetisch potentieel. Ze zitten echter in een binnenschil (4f-schil). Dat maakt de interactie tussen de spins van neodymiumatomen zwak; ze zitten te ver van elkaar af, terwijl interactie juist nodig is voor magnetisatie. Zuiver neodymium maakt daarom geen goede magneet, maar de legering $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ wél. IJzer heeft ongepaarde elektronen in de buitenste schil die de ongepaarde elektronen in naastliggende neodymiumatomen goed 'zien'.

Ze zochten allebei naar nog sterkere permanente magneten dan eerder met samarium – ook een lanthanide – waren gemaakt. Sindsdien is er geen materiaal meer ontdekt dat een sterker magnetisch veld levert per kilogram.

Neodymiumwinning vindt vooral plaats in China, uit monazietzand, een mengsel

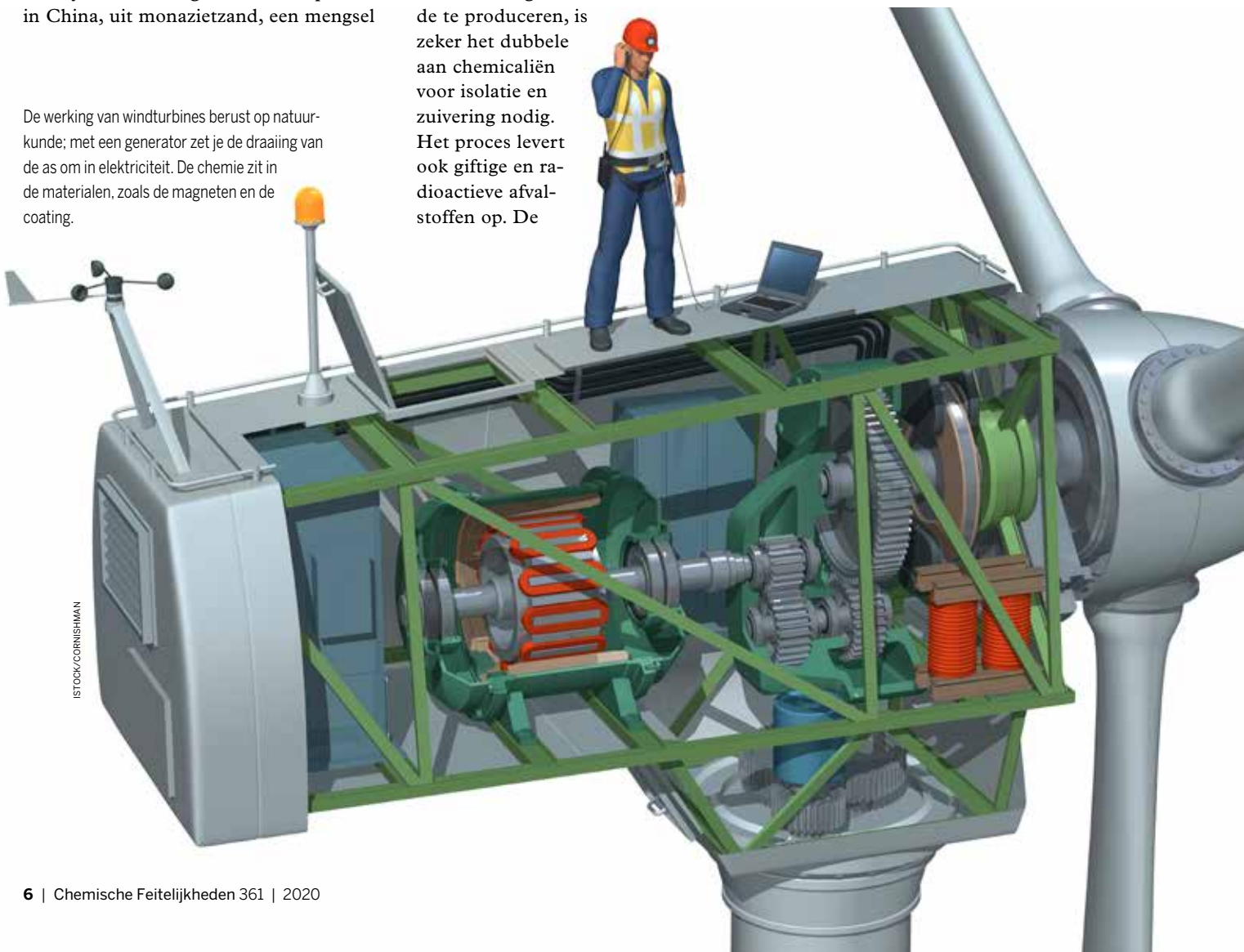
van lanthanidefosfaat-zouten ($(\text{CeLaThNdY})\text{PO}_4$). Dat bevat zo'n 15 % neodymium. De winning gebeurt met combinaties van extractiemethodes, ionuitwisseling en elektrolyse, want de lanthaniden zijn lastig van elkaar te scheiden. Om 1 kg lanthanide te produceren, is zeker het dubbele aan chemicaliën voor isolatie en zuivering nodig. Het proces levert ook giftige en radioactieve afvalstoffen op. De

De werking van windturbines berust op natuurkunde; met een generator zet je de draaiing van de as om in elektriciteit. De chemie zit in de materialen, zoals de magneten en de coating.

streek Bayan Obo in China, waar veel neodymium wordt geproduceerd, is bevuurd vanwege milieuvuiling. Er ligt een kilometers groot gifmeer.

Kunststofcomposieten

Windmolens op land hebben een stalen mast die in een betonnen fundering rust. Op zee staat de mast meestal op een monopaal: een stalen pijler die je meters diep de zeebodem in heit. Een flinke molen bevat tot 2 miljoen kg staal. Dat staal komt uit hoogovens waar ijzererts (ijzer-oxides) reageren met koolstof (*coke*) tot ruwijzer dat nog veel koolstof bevat. Door zuurstof door ruwijzer te blazen, vermindert het gehalte koolstof tot 0,5 à 2 % en krijg je staal. Puur ijzer is een zacht en vervormbaar materiaal, maar het koolstof verhardt het geheel. Staal is er in veel varianten. Chroom toevoegen maakt staal bijvoorbeeld roestvast en niobium maakt het sterker. De meeste windmolens zijn van constructiestaal, een sterke variant die

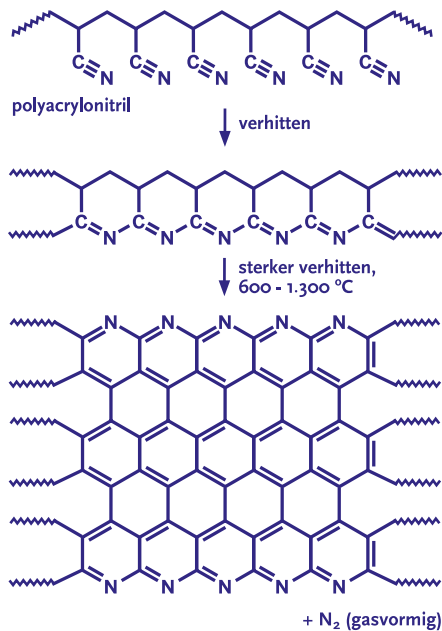


je bijvoorbeeld ook voor een reuzenrad gebruikt. Het kan wisselende belastingen goed opvangen.

De enorm wieden van een moderne windmolen moeten licht zijn, maar tegelijkertijd extreem sterk. Daarvoor zorgt vooral een centrale balk midden in de wiek. Die is gemaakt van composiet: een supersterke vezel ingegoten in een matrix van lichtgewicht kunststof. Het samengestelde materiaal combineert de eigenschappen sterk en licht. Momenteel kiest de wiedenbouwer vaak voor ultralichte koolstofvezel, gemaakt van polyacrylvezels, $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{CN})]_n$ (zie figuur). Bij temperaturen van 700 tot 950 °C verkoken de vezels: alle waterstof verdwijnt. Bij nog hogere temperaturen (boven 2.000 °C) wordt ook stikstof uitgestoten en ontstaan grafietachtige, lange koolstofkristallen die supersterke vezels vormen.

Ook de andere delen van de wieden zijn gemaakt van composiet, vaak het wat goedkopere glasvezel in een epoxy- of polyesterhars. De vezels vlecht je meestal in matten die je in een mal legt, waarna je de harscomponenten erop en ertussen giet en het materiaal uithardt. De vezels zorgen voor sterkte; de kunststof – de ‘hars’ – zorgt voor flexibiliteit en houdt de vezels bijeen en in vorm. Het composietmateriaal is slijtvast en zeker tweemaal zo sterk als bijvoorbeeld beton.

Composiet heeft één belangrijk nadeel: het materiaal is slecht recyclebaar. Je kunt vezels en hars niet ontwarren, bij verhitting smelt de hars



Omzetting van polyacrylonitril in koolstofvezels.

niet. De meeste afgedankte kunststofcomposieten verbrand je, wat warmte oplevert. Soms vermaal je composiet en gebruik je het als vulstof. Onderzoekers en ontwikkelaars zijn driftig op zoek naar hoogwaardiger hergebruik. In een proefproject van Hogeschool Windesheim zijn rotorbladen bijvoorbeeld verkleind tot ‘vlokken’ en succesvol gebruikt om damwanden en dekplanken te produceren voor onder meer de Dinzerbrug in Friesland. De Duitse scale-up CFK Recycling ontwikkelde een proces voor hergebruik van koolstofvezels. Het verbrandt de hars in een oven, maar de vezels blijven intact

en die kun je opnieuw gebruiken. Ook vindt onderzoek plaats naar nieuwe polymeren die bij hoge temperaturen smelten (thermoplasten), waardoor je vezels en hars weer kunt scheiden. Het zijn allemaal eerste aanzetten tot volwaardige recycling van windmolenwieden in de toekomst.

Bescherming

Een windmolen heeft een versnellingsbak die zo’n zeventig keer groter is dan die van een auto. Daar gaat al snel 1.000 l smeerolie in. Ook alle bewegende delen van de molen hebben smering nodig.

Denk aan de centrale as, maar ook aan het verstelsysteem dat de kop van de molen in de optimale stand zet voor iedere windsnelheid.

Een windmolen kan niet zonder speciale coating. De installatie moet hitte, kou, zonlicht, storm, ijzel en regen doorstaan, en op zee ook nog golven en zeezout. De wieden, de lange mast, de gondel en de fundering hebben bescherming nodig tegen roest, krassen en andere schade. Een duurzame coating, omdat je een windmolen liefst maar één keer in de lak zet, en wel vóóordat hij rechtop staat. Windmolens staan immers vaak op afgelegen plekken en kunnen inmiddels 250 m hoog zijn. De basis van de coatings bestaat uit polyurethaan, epoxy of alkyd, allemaal slijtvaste kunststoffen. Voor de veiligheid zijn windmolens overigens altijd wit (of grijs), zodat ze goed afsteken tegen de achtergrond. Het wit helpt ook uv-licht te weerkaatsen dat materialen verouderd. ●

► Onthoofd

Vogels en ook vleermuizen kunnen in aanvaring komen met een windmolen. Een vogel vliegt ongeveer 40 km/h, terwijl de wiektoppen met wel 200 km/h rondgaan. Onder aan windmolens vind je dan ook regelmatig onthoofde of ‘ontvleugelde’ vogels. Uit recente tellingen blijkt dat de 38 windmolens van Windpark Noordoostpolder jaarlijks ruim duizend vogels uit de lucht slaan. Vleermuis-slachtoffers zijn zeldzaam: zo’n vijf stuks. Het windmolenpark in de Eemshaven (22 molens) zorgt per jaar voor 1.700 slachtoffers. Die molens liggen op een populaire vogel-trekroute. Daarom staan ze de komende jaren als proef stil in het trekseizoen. Duizenden verongelukte vogels is veel, maar het verkeer, huiskatten, hoogspanningslijnen en gebouwen maken stuk voor stuk veel meer slachtoffers. De verwachting is dat de steeds hogere molens voor minder dode vogels zorgen, omdat ze vaker onder de wieden doorvliegen. Ook is er een detectiesysteem in ontwikkeling dat grote zwermen ziet aankomen en de molen op tijd stilzet.



ADOBE/PONGBOB



Een van de veelgehoorde kritiekpunten op windmolens is dat ze zo lelijk zijn. Er zijn al diverse kunstprojecten geweest om ze aantrekkelijker te maken. Kunstenaar Anna Blom had met haar project Windmolenkunst Trilogie Schouwen-Duurzaamland in 2016-2017 nog een doel: inwoners, toeristen en bezoekers van het eiland Schouwen-Duiveland op een verrassend positieve en speelse manier kennis laten maken met duurzame energie. Ze voorzag de masten van de drie windturbines van Windpark Zierikzee elk van een kunstwerk met een eigen thema: Zon, Wind en Water. Ze zijn geïnspireerd door de Griekse mythologie (op de foto Neptunus – Water). Ze maakte het originele werk – gemengde techniek op paneel – op schaal, digitaliseerde het en printte het op pvc-doek. De geprinte doeken van 12 x 3 m zijn met elastiek koord rondom de masten van de windmolens vast geregen. In 2018 is Neptunus het boegbeeld geworden van Bloms awareness project. En het doek siert de gevel van het informatiecentrum van het Staatsbosbeheer op Goeree Overflakkee. Kijk voor meer informatie op www.facebook.com/annablomart.

Voor op school

- 1 Wat kun je doen met een teveel aan windenergie?
- 2 Nederland levert in totaal zo'n 4 GW aan windenergie per jaar. Hoeveel kWh is dat?
- 3 Voor hoeveel gram CO₂-uitstoot per jaar zijn Nederlandse windmolens dan maximaal verantwoordelijk?
- 4 Om hoeveel mol CO₂ gaat het hier?
- 5 Noem twee manieren hoe je de pieken en dalen van windenergiewinning kunt 'dempen'.
- 6 Een toepassing van windmolens is waterstof produceren voor biobrandstof. Dat gebeurt met elektrolyse in een brandstofcel. Is dit een zuur-basereactie of een redoxreactie? Licht je antwoord toe.
- 7 Geef de reactievergelijking van de elektrolyse van water en de twee halfreacties.
- 8 De stelregel bij windmolens is: per MW heb je 1.000 kg magneetmateriaal nodig, waarvan circa 30 % neodymium. Hoeveel mol neodymium zit er in een landwindmolen met een vermogen van 5 MW?
- 9 Hoe zet je polyacrylonitril om in koolstofvezels?
- 10 Wat is het belangrijkste nadeel van composiet?
- 11 Waaraan moet de coating van windturbines voldoen?
- 12 Waaruit bestaat de coating?

Meer weten?

- Kunststof composieten, *Chemische Feitelijkheden* nr. 266, Corry van Driel (augustus 2010)
- NWEA.nl, website van de Nederlandse WindEnergie Associatie (de branchevereniging voor windenergie)
- GWEC.net, website van de Global Wind Energy Council
- www.anderetijden.nl/aflevering/33/Op-zoek-naar-wind, aflevering van *Andere tijden* (2016) over de beginjaren van windenergie in Nederland

Editie

Windmolens

editie 91 | nummer 361 | april 2020
www.chemischefeitelijkheden.nl

Coverbeeld: Het onderhoud van de windturbines heeft, zeker op zee, nogal wat voeten in de aarde. (credit: iStock/Ozturk)

Met dank aan: prof. dr. Gerard J.W. van Bussel, hoogleraar windenergie TU Delft, G.J.W.vanBussel@TUDelft.nl

Colofon

Over Chemische Feitelijkheden

KNCV

Chemische Feitelijkheden is een actuele encyclopedie over moleculen, mensen, materialen en milieu. Het is een losbladige uitgave van de KNCV en verschijnt driemaal per jaar met in totaal tien onderwerpen.

Redactie

dr. Erwin Boutsma (hoofdredacteur), drs. Franny Scholte (eindredacteur),
Daniël Linzel MSc (eindredacteur), Marga van Zundert (tekst)

Vormgeving & Opmaak

Content Innovators

Uitgever

Rik Stuivenberg, Vakbladen.com
Postbus 19949, 2500 CX Den Haag

Abonnementen

088-2266 680

abbonementen@vakbladen.com

Wij hanteren de opzegregels uit het verbintenissenrecht. Wij gaan ervan uit dat Chemische Feitelijkheden altijd wordt ontvangen uit hoofde van het beroep. Hierdoor wordt het abonnement automatisch met een jaar verlengd, tenzij twee maanden vóór de einddatum een opzegging is ontvangen. Een abonnement op Chemische Feitelijkheden geeft via de website toegang tot tien nieuwe edities per jaar en het totale onlinearchief. Daarnaast ontvangen abonnees in drie zendingen per jaar de losbladige edities.

Tarieven (2020)

Voor particulieren: onlinetoegang met inlogcode en papieren editie (inclusief verzamelmap) kost € 100*; leden van de KNCV, KVCV en NVON krijgen € 10 korting.
Voor bedrijven en (onderwijs)instellingen: onbeperkt toegang tot de digitale edities op basis van IP-adres en papieren editie in drievoud (inclusief verzamelmappen) kost € 280*.
Losse nummers kosten € 9,95* per stuk en zijn te bestellen bij Mijntijdschrift.com.
*Bij betaling per factuur wordt € 2,95 administratiekosten in rekening gebracht.