



## TECHNISCHE FICHES

Dit document maakt deel uit van 4 fiches

# Microwindturbines

---

- 1. Het gebruik van windenergie: een veelheid aan mogelijkheden**
2. De elektrische installatie
3. Netkoppeling, eilandbedrijf en operationele aspecten
4. Wetgevende aspecten, problemen en defecten

Deze technische fiches werden gemaakt voor het project TechnologieWacht

In samenwerking met KHBO en Power-Link

# DEEL 1 - Het gebruik van windenergie: een veelheid aan mogelijkheden

---

## 1: Inleiding

Hoewel windenergie al duizenden jaren door de mensheid gebruikt wordt, zorgden de oliecrisis van de jaren 70 voor een nieuwe opmars. De opmars van windenergie levert een belangrijke bijdrage in de elektriciteitsproductie op wereldschaal, binnen de Europese Unie en ook binnen ons eigen land. Volgens de European Wind Energy Association (<http://www.ewea.org>) was eind 2010 binnen de Europese Unie een capaciteit van 84,3 GW (1 GW = 1000 MW) elektrisch vermogen geïnstalleerd waarvan er ongeveer 9,3 GW (dus ongeveer 11%) in 2010 geïnstalleerd is (in 2011 is ongeveer 9,6 GW geïnstalleerd). Er is dan ook sprake van een significante toename in het geïnstalleerd vermogen in 1 jaar tijd. Eenzelfde evolutie is waar te nemen in België. Van de 0,9 GW  $\cong$  911 MW die eind 2010 beschikbaar was, is er 0,35 GW = 350 MW in 2010 geïnstalleerd. Hier is dus wel even sprake van een toename van ongeveer 38% in 1 jaar tijd. Hoewel de groei na het topjaar 2010 beperkter is, werd in 2011 in België nog ongeveer 192 MW extra geïnstalleerd.

Ter vergelijking, binnen de Europese Unie werd in 2010 ongeveer 13,2 GW aan nieuwe fotovoltaïsche installaties geïnstalleerd waarvan 0,4 GW in België (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century: <http://www.ren21.net>). Hoewel de in België in 2010 geïnstalleerde vermogens aan fotovoltaïsche panelen en windturbines ongeveer gelijk zijn, is er naar de aard van de installaties een significant verschil. Er werden niet alleen grote fotovoltaïsche parken in gebruik genomen, er werden ook veel kleine fotovoltaïsche installaties bij particuliere personen geïnstalleerd. Het geïnstalleerd vermogen in windturbines bestaat echter bijna volledig uit grote windturbines. Daar waar fotovoltaïsche panelen een vertrouwd beeld geworden zijn in veel straten, is dit voor microwindturbines vooralsnog niet het geval.

Het is dan ook duidelijk dat het gebruik van microwindturbines een belangrijk potentieel heeft. Deze tekst geeft dan ook een overzicht van de belangrijkste technische aspecten verbonden met het gebruik van windturbines om elektriciteit op te wekken. Hierbij wordt dieper ingegaan op de aspecten die specifiek zijn voor microwindturbines, zowel de mogelijkheden als de optredende problemen komen aan bod.

## 2: Krachtontwikkeling bij windturbines

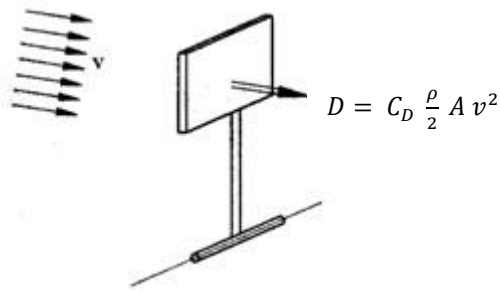
Zowel bij klassieke windmolens (die gebruikt worden om graan te malen) als bij windturbines (die gebruikt worden om elektriciteit te produceren) komt het er steeds op neer met een zo hoog mogelijk rendement de kinetische energie in de luchtstroming te benutten. Hiertoe moet op basis van de windstroming een kracht ontwikkeld worden op de bewegende wieken en wordt er een vermogen geleverd. Het is hier belangrijk een onderscheid te maken tussen stootkrachten en liftkrachten.

### 2.1: Stootkrachten

Beschouw een wiek met een oppervlakte  $A$  waar de wind met een snelheid  $v$  tegenaan waait. De zo ontwikkelde stootkracht  $D$  (drag-kracht) is te schrijven als

$$D = C_D \frac{\rho}{2} A v^2.$$

Deze kracht is evenredig met de oppervlakte  $A$ , de luchtdichtheid  $\rho$  en het kwadraat van de windsnelheid  $v$ . Belangrijk is de stootcoëfficiënt  $C_D$  (drag-coëfficiënt) die de aerodynamische kwaliteit van de wiek beschrijft. Bij een vlak rechthoekig oppervlak is  $C_D = 1,10$ .  $C_D$  kan bijvoorbeeld in een windtunnel experimenteel bepaald worden.



Figuur 1: Stootkracht

Deze stootcoëfficiënt  $C_D$  is afhankelijk van de vorm van het lichaam waar de wind op invalt. Bij een vlakke cirkelvormige plaat is  $C_D = 1,11$  wat weinig afwijkt van een rechthoekige plaat. Bij een open halve bolvorm, is  $C_D = 0,34$  wanneer de wind invalt op de bolvormige kant en is  $C_D = 1,33$  wanneer de wind invalt op de holle kant. Inderdaad, wanneer de wind invalt op een holle kant is de ontwikkelde stootkracht (en het hieruit voortvloeiende koppel) groter.

De klassieke Perzische windmolens, maar bijvoorbeeld ook de cup anemometers (zie Figuur 24), maken gebruik van een dergelijk stootprincipe. Kenmerkend aan dit stootprincipe is echter het lage rendement. Bovendien is de snelheid van een wijk steeds kleiner dan de windsnelheid. Wanneer liftkrachten ontwikkeld worden, kan een hoger rendement bekomen worden

## 2.2: Liftkrachten

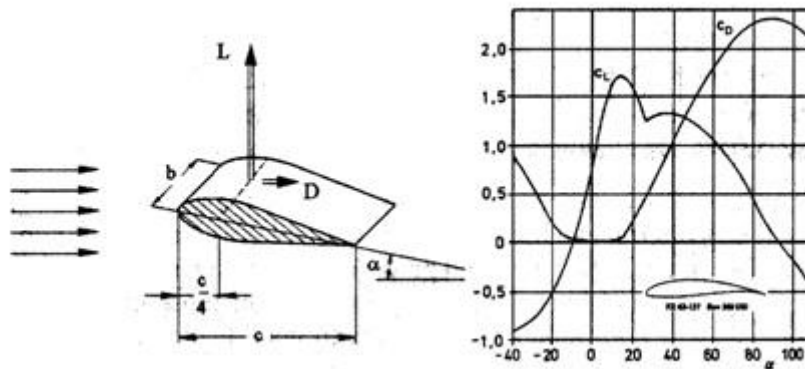
Wanneer gebruik gemaakt wordt van een airfoil, zoals weergegeven in Figuur 2, zorgt de windstroming niet enkel voor een stootkracht  $D$ , maar ook voor een liftkracht  $L$ . Zoals de stootkracht dezelfde richting heeft als de luchtstroming, zo staat de liftkracht loodrecht op de luchtstroming. De windstroming heeft (in Figuur 2) onder de airfoil een lagere snelheid dan boven de airfoil wat tot gevolg heeft dat onder de airfoil de druk groter is. Er treedt dan ook een opwaartse liftkracht op. De liftkracht heeft de grootte

$$L = C_L \frac{\rho}{2} A v^2.$$

Bij de situatie weergegeven in Figuur 2, is de oppervlakte  $A = cb$ . De liftkracht is (net zoals de stootkracht) evenredig met de luchtdichtheid  $\rho$  en de windsnelheid  $v$  in het kwadraat. Belangrijk is de liftcoëfficiënt  $C_L$ . Deze coëfficiënt is niet enkel afhankelijk van de vorm van de airfoil, maar ook van de invalshoek  $\alpha$ . Er wordt dan ook een liftkracht

$$L = C_L(\alpha) \frac{\rho}{2} A v^2$$

bekomen. Het verloop van  $C_L$  in functie van de invalshoek  $\alpha$  is weergegeven in Figuur 2. Het verloop van de drag-coëfficiënt  $C_D$  in functie van  $\alpha$  is trouwens ook opgenomen in dezelfde figuur.



Figuur 2: Liftkracht  $L$  en stootkracht  $D$  bij een airfoil

Bij de ontwikkeling van de stootkracht en de liftkracht is het niet de absolute windsnelheid die bepalend is, maar wel de relatieve windsnelheid ten opzichte van de wijk of airfoil die meestal zelf in beweging is.

### 3: Een grote verscheidenheid aan windturbines

Het basisprincipe van een windturbine is erg eenvoudig: de wind wordt gebruikt om wieken aan te drijven die op hun beurt een elektrische generator aandrijven. Windenergie is dan ook een hernieuwbare energiebron die toelaat elektriciteit op te wekken zonder CO<sub>2</sub>-uitstoot. Toch is het allemaal niet zo eenvoudig als het lijkt want wind is een grillig natuurproduct. Zowel de windsnelheid als de windrichting kan erg veranderlijk zijn en de windstroming kan turbulenties bevatten. Juist daarom zijn er in de loop der jaren diverse types windturbines ontwikkeld, met bijhorende apparatuur, die proberen zoveel mogelijk de kinetische energie uit de windstroming te halen.

Er is een heel breed gamma aan windturbines op de markt met vermogens die variëren van ongeveer 100 W tot 6 MW en meer. De laatste decennia is door tal van grote bedrijven fors geïnvesteerd in researchprogramma's die de grote windturbines kwalitatief flink verbeterd hebben. Kleine windturbines worden echter vaak door kleinere bedrijven op de markt gebracht die minder mogelijkheden hebben naar research toe. Eigenlijk kampt de sector met een vicieuze cirkel: omdat er weinig kleine turbines verkocht en geïnstalleerd worden, is er weinig geld voor research zodat de kleine turbines technologisch soms tekort schieten, mede als gevolg hiervan worden er weinig turbines verkocht en geïnstalleerd, ...

De laatste jaren is echter ook vanuit de academische wereld de interesse in microwindturbines gegroeid. Zo werden er ondermeer veldlabs ontwikkeld die toelaten microwindturbines te testen en verder te ontwikkelen (zie bijvoorbeeld het testveld in Schoondijke-Sluis te Zeeland en Power-Link <http://www.power-link.ugent.be>).

We richten ons hier vooral op de zogenaamde microwindturbines. Dit zijn windturbines van beperkt vermogen (de bovengrens wordt soms op 3,5 kW gelegd) die vooral door particuliere personen aangekocht worden met (bij voorkeur) de bedoeling de gegenereerde elektriciteit zelf te gebruiken. Wanneer vermogen geïnjecteerd wordt in het publieke net, gebeurt dit op laagspanningsniveau. Dit in tegenstelling tot grote windturbines, en grootschalige windturbineparken, die het opgewekte vermogen volledig in het publieke net injecteren. Dit laatste gebeurt dan op middenspanningsniveau en zelfs op hoogspanningsniveau.

We beperken ons hier ook tot windturbines die een elektrische generator aandrijven met de bedoeling elektrische energie te produceren. Windmolens die rechtstreeks een mechanische belasting aandrijven, bijvoorbeeld met de bedoeling akkers en velden te irrigeren, worden hier niet beschouwd.

#### 3.1: Windturbines met verticale as

Er worden zowel windturbines met verticale als met horizontale rotatie as gebouwd. Bij de VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) zijn vooral het Savonius-type, het Darrieus-type en het Turby-type vermeldenswaardig.

##### 3.1.1: De Savonius turbine



Figuur 3: Savonius VAWT

Het basisidee van een Savonius turbine is eenvoudig. Meestal zijn twee, drie of vier halve schalen bevestigd aan een verticale as. De invallende wind zorgt aan de holle kant voor een grotere stootkracht dan aan de bolle kant zodat een resulterend koppel beschikbaar is dat de turbine doet roteren. Het feit dat aan de bolle kant een tegenwerkend koppel ontwikkeld wordt doet echter het rendement dalen. Voordeel is wel dat de Savonius

turbine reeds bij kleine windsnelheden een koppel ontwikkelt en dat er ook bij stilstand een koppel ontwikkeld wordt. De Savonius turbine is dan ook zelfstartend.

De elektrische generator wordt meestal onderaan de verticale as gemonteerd. Een Savonius turbine heeft, wanneer gebruikt om elektriciteit op te wekken, wel het nadeel een laag toerental te hebben. De snelheid van de halve schalen is namelijk lager dan de windsnelheid. Via een tandwielkast kan de generator wel een hoger toerental dan de centrale as en de halve schalen meegegeven worden.

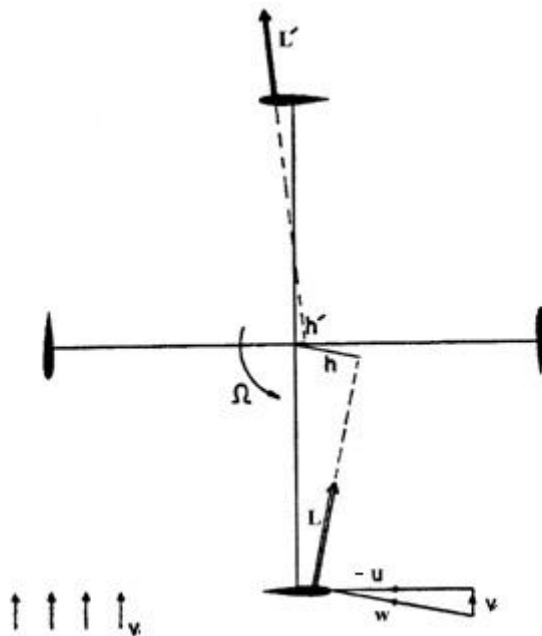
### 3.1.2: De Darrieus turbine



Figuur 4: Darrieus VAWT

Een Darrieus VAWT bevat meestal twee, drie of vier wieken. Figuur 4 toont een Darrieus turbine van het "eggbeater" type maar er bestaan ook Darrieus turbines van het H-type. Een Darrieus turbine heeft een hoger rendement dan een Savonius turbine. Er wordt met liftkrachten (en niet met stootkrachten) gewerkt wat het voordeel geeft dat een hoger toerental bekomen wordt.

De Darrieus turbine van Figuur 5 draait in tegenuurwijzerzin rond een verticale as. De relatieve windsnelheid  $w$  is de vectoriële som van de absolute windsnelheid  $v$  en de snelheid  $-u$  ( $u$  is de snelheid van de wiek).



Figuur 5: De Darrieus turbine

De liftkrachten staan loodrecht op de relatieve windsnelheid  $w$ . Het zijn de tangentiële componenten van de liftkrachten die de turbine verder in tegenuurwijzerzin aandrijven. Het grote voordeel van een aandrijving op basis van liftkrachten is het feit dat de tip speed ratio  $\lambda = u/v$  flink groter dan de eenheid kan zijn. Bij de Savonius turbine is  $\lambda$  steeds kleiner dan de eenheid.

Bemerk inderdaad in Figuur 5 dat  $w$  groter is dan de snelheid  $v$  van de invallende wind zodat de liftkracht, die evenredig is met de grootte van de snelheid  $w$  in het kwadraat, flink groter is.

Darrieus turbines produceren echter veel geluid en ze hebben het nadeel niet zelfstartend te zijn. Inderdaad, bij stilstand produceert een Darrieus turbine nauwelijks een koppel. Het aanlopen kan dan ook gebeuren door de generator tijdelijk als motor te laten werken. Een alternatief bestaat er hier in een kleine Savonius turbine bij te voegen zodat een startkoppel bekomen wordt.

### 3.1.3: De Turby turbine



Figuur 6: Turby VAWT

Figuur 6 toont een Turby VAWT met drie verticale aerodynamische vleugels. Net zoals bij een Darrieus turbine wordt op basis van het lift principe een koppel ontwikkeld en is er nauwelijks een startkoppel. Turby turbines treft men nogal eens aan op de daken van hoge gebouwen want een Turby turbine is in staat om een opwaartse luchtstroom nuttig te gebruiken.

Een belangrijke eigenschap van de meeste windturbines met verticale as is het feit dat de wind uit alle richtingen mag stromen. Er is geen kruisysteem nodig die de turbine naar de wind toe richt. Een dergelijk kruisysteem is bij windturbines met horizontale as wel nodig (HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine). Windturbines met verticale as treft men dan ook vaak aan bovenop hoge gebouwen in een stedelijke omgeving omdat de windrichting daar nogal variabel is.

## 3.2: Windturbines met horizontale as

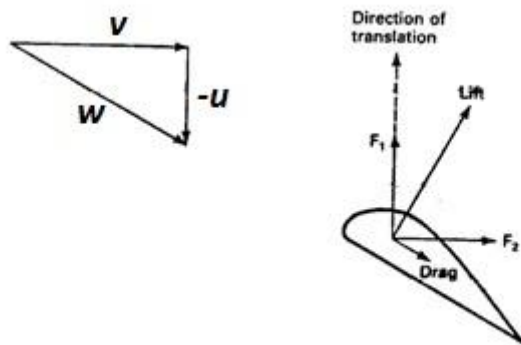


Figuur 7: Gondel van een HAWT

Zowel bij grote als bij kleine windturbines worden de uitvoeringen met horizontale as het meest gebruikt. Bij deze turbines is een gondel bovenop een mast gemonteerd. Deze gondel bevat ondermeer een generator die aangedreven is door een horizontale as waarop de wieken (via de naaf) bevestigd zijn. Bij sommige windturbines is de generator aangedreven via een tandwielkast wat toelaat de generator een groter toerental mee te geven dan de wieken. Bij andere fabrikanten wordt gebruikt gemaakt van het 'direct drive'-principe en ontbreekt de tandwielkast, de generator is dan even traag draaiend als de wieken.

Iedere rotorwiek genereert gedurende de volledige omtrek vermogen wat niet alleen het rendement verhoogt maar ook het ontwikkelde koppel beter constant maakt. Bovendien is de geluidsemissie van de wieken over het algemeen lager dan bij een VAWT.

Nadelig is ondermeer de vereiste om de turbine van een voldoende grote ashoogte te voorzien om optimaal van de grotere windsnelheden in de hogere luchtlagen te kunnen genieten. Dit vereist de montage van de zware gondel (met generator) bovenop een voldoende hoge mast. Een roterende gondel brengt ook problemen met zich mee wat betreft de elektrische bekabeling van de generator. De gondel kan roteren zodat de wind steeds loodrecht invalt op het rotatievlak van de wieken terwijl de mast en de rest van de elektrische installatie niet mee roteren.



Figuur 8: Krachtontwikkeling bij een HAWT

Figuur 8 toont een bovenaanzicht van een wiek die roteert in het rotatievlak waar de ongestoorde windsnelheid  $v$  loodrecht op invalt. Ten gevolge van de beweging van de wiek wordt een relatieve windsnelheid  $w$  bekomen die zowel voor een stootkracht (dragkracht) als een liftkracht zorgt. Beide krachten vectorieel optellen geeft de totaal ontwikkelde kracht op de wiek. De kracht bevat een component  $F_2$  naar de mast toe die via de wet van actie en reactie tegengewerkt moet worden maar ze bevat ook een nuttige aandrijvende kracht  $F_1$ .

### 3.2.1: Het kruisysteem

Zoals al vermeld, heeft een windturbine met een horizontale as een kruisysteem nodig. Bij grote windturbines wordt meestal een actief kruisysteem gebruikt. Via elektrische of hydraulische kruimotoren wordt de gondel zo verdraaid dat de wind loodrecht invalt op het rotatievlak van de wieken. Omwille van de eenvoud, en dus om de prijs te drukken, worden microwindturbines meestal passief gekruid. Het kruien gebeurt met windkracht dankzij de aanwezigheid van een vaan (zie Figuur 9) of via een speciale vormgeving van de wieken (zie down-wind rotor). Een dergelijk kruisysteem functioneert goed indien de windsnelheid geleidelijk van richting varieert. Indien deze richtingsveranderingen echter een grillig snelvariërend gedrag vertonen (met turbulenties van de wind) schommelt de windturbine teveel en daalt de energieopbrengst.

### 3.2.2: Het aantal rotorbladen

Figuur 9 toont een meerbladige microwindturbine. Zoals bij grotere windturbines het geval is, zijn er ook driebladige en tweebladige microwindturbines op de markt beschikbaar.

Het toerental bepaalt de tip speed ratio  $\lambda = u/v$  die best de optimale  $\lambda_{opt}$ , waar het rendement maximaal is, zoveel mogelijk benadert. Naarmate het aantal rotorbladen toeneemt, daalt de optimale tip speed ratio  $\lambda_{opt}$ . Met een zelfde rotordiameter en een zelfde absolute windsnelheid  $v$ , wordt het maximum rendement dan ook bekomen bij een lager toerental. Met een bepaald aantal vooropgestelde rotorbladen en dus een vaste optimale tip speed ratio, zal bij een kleinere rotordiameter een hoger toerental vereist zijn om  $u$  de gewenste waarde te geven. Teneinde bij microwindturbines het toerental te beperken, kiest men dan ook vaker voor een groter aantal wieken dan bij een grotere windturbine.

Turbines (zeker microwindturbines) met een beperkt aantal rotorbladen hebben een hoog toerental. Dit verhoogt de geluidsproductie en de nervositeit van het uitzicht.





Figuur 9: Micro-windturbine met horizontale as

### 3.2.3: De rotorbladen

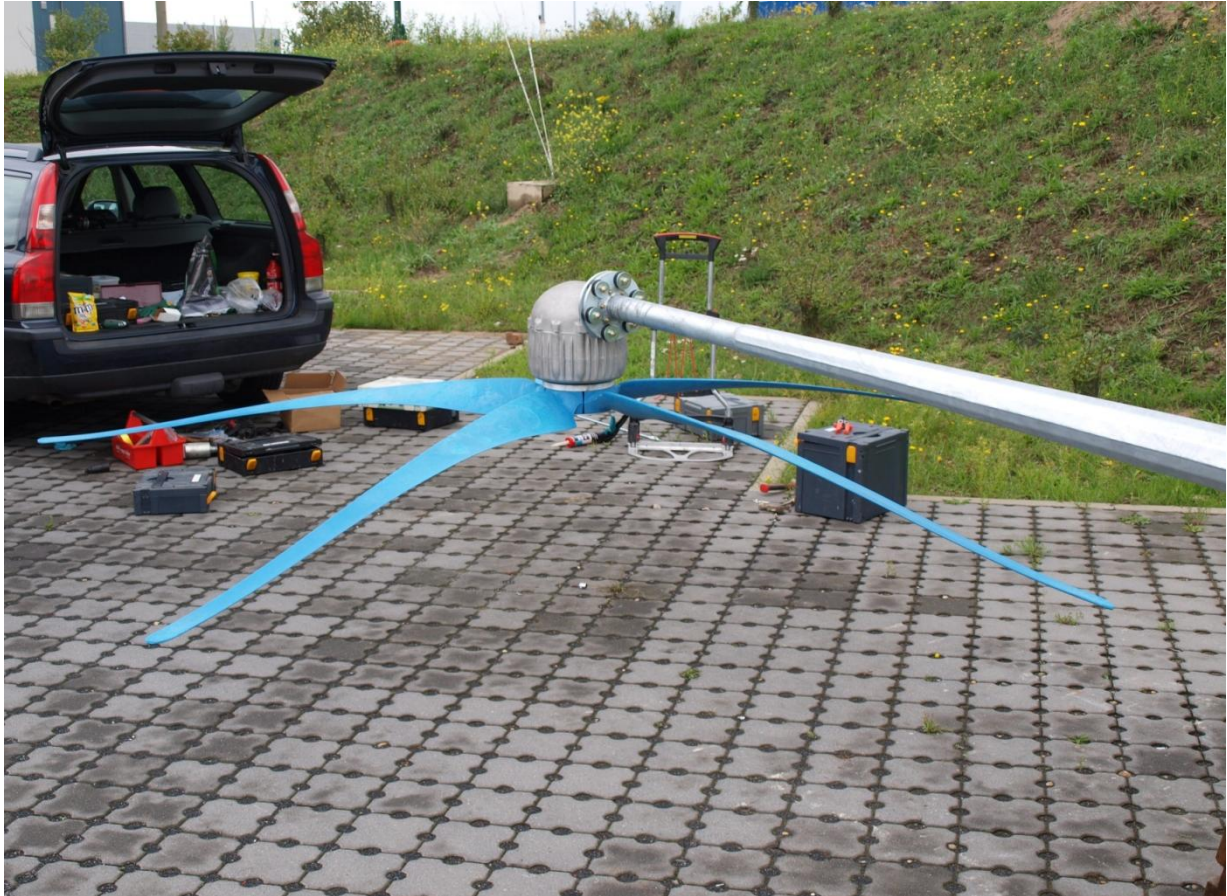


Figuur 10: Wieken grote windturbine met torsie

Rotorbladen komen in diverse materialen voor. Het gebruik van hout, ijzer en aluminium is klassiek, maar tegenwoordig worden rotorbladen steeds vaker uit kunststof vervaardigd. Kunststof kan gemakkelijk in de gepaste vorm gebracht worden, het is behoorlijk licht en het is uitermate sterk. Vaak is de kunststof extra versterkt met behulp van glasvezels of koolstofvezels.

De vorm van de rotorbladen is eveneens belangrijk. De wieken van windturbines met horizontale as hebben gewoonlijk een asymmetrisch bladprofiel. Bovendien krijgen de wieken een torsie naar de as toe zoals weergegeven in Figuur 10 (voor een grote turbine). Men houdt er namelijk rekening mee dat de omtreksnelheid van de wiek groter is aan de uiteinden wat de vorm van de snelheidsdriehoek beïnvloedt.



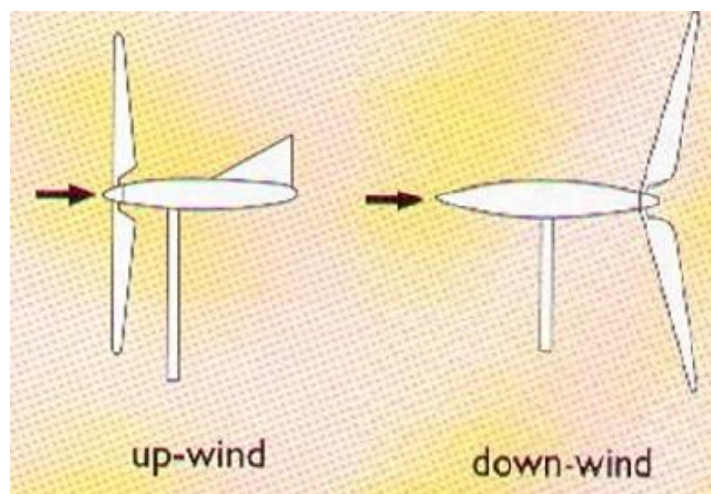


Figuur 11: Montage van een vijfbladige down-wind turbine van 3,5kW

Voor microwindturbines – kleiner dan 400 W – is het profiel van de wieken eerder vlak. De wiek wordt meestal dunner naar de uiteinden toe en heeft mogelijks een zekere verdraaiing naar de as toe.

Zeker bij grotere windturbines kunnen de rotorbladen meestal draaien over hun lengteas. Daardoor kunnen ze bij elke windsnelheid een stand innemen die het rendement maximaliseert. Men noemt dit pitch-controle. Omwille van de kostprijs en de eenvoud is een dergelijke pitch-controle bij microwindturbines meestal niet aanwezig.

#### 3.2.4: Up-wind en down-wind rotor



Figuur 12: Up-wind en down-wind rotor

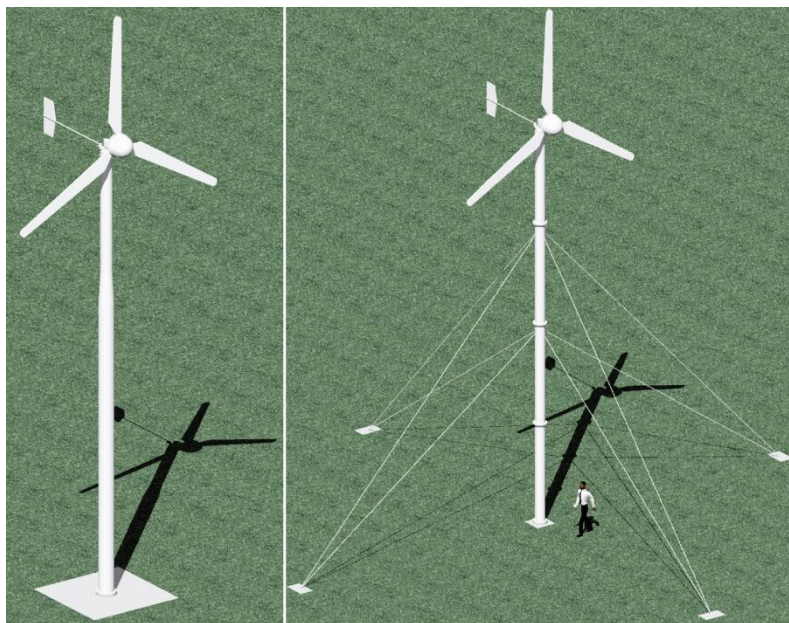
Figuur 12 illustreert het onderscheid tussen een up-wind en een down-wind rotor. Bij een up-wind rotor moet men opletten dat de doorbuiging van de onderste wijk (in de richting van de mast) er niet toe leidt dat de wijk stoot tegen de mast. Een dergelijk probleem doet zich bij de down-wind rotor (theoretisch) niet voor.

Bij een up-wind rotor is het ontwikkelde koppel echter constanter want de ogenblikken dat een wijk de mast passeert ondervindt die daar nauwelijks hinder van. Bij een down-rotor bevindt een wijk zich in de schaduw van de mast wanneer deze de mast passeert zodat het ontwikkelde koppel van die wijk even bijna nul wordt. Dit pulserende koppel kan naast een vermogensdaling ook een hinderlijke geluidsproductie met zich meebrengen. Het is dan ook zo dat zowel bij kleine als bij grote windturbines een up-wind rotor veel meer voorkomt.

### 3.2.5: De mast

Een windturbine met horizontale as wordt stevast bovenop een mast gemonteerd. Deze mast is best voldoende hoog teneinde een grotere windsnelheid te bekomen (een te hoge mast betekent een te hoge investering ook al leert de ervaring dat een mast eigenlijk zelden als te hoog ervaren wordt). De 9/150-vuistregel adviseert dat de onderkant van wieken van de turbine minstens 9 m boven het hoogste obstakel binnen een straal van 150 m uitkomt. Stel dat op 100 m afstand een boom van 20 m hoogte staat, dan moet de onderkant van de wieken een hoogte van 29 halen. Wanneer de wieken een straal van 3 m hebben, betekent dit dat de mast 32 m hoog moet zijn. Op die manier worden ondermeer al te veel turbulenties in de luchtstroming vermeden. Hier moeten uiteraard ook reglementeringen afkomstig van de overheid gerespecteerd worden. Bijvoorbeeld omwille van de ruimtelijke ordening kan de maximaal toegelaten masthoogte beperkt zijn tot 15 m.

Niet enkel de hoogte van de mast moet bepaald worden, het type mast moet eveneens gekozen worden. Figuur 13 toont links een niet-getuide mast en rechts een getuide mast. In het algemeen zijn getuide masten goedkoper omdat minder eisen gesteld worden aan de fundering van de mast (zeker indien de ondergrond niet stevig is, kunnen uitgebreide en dure funderingen voorkomen worden). De aanwezigheid van tuikabels wordt vaak als lelijk ervaren en het neemt plaats in. De tuikabels mogen bovendien niet beschadigd worden door bijvoorbeeld vallende bomen.



Figuur 13: Niet-getuide en getuide mast

De meeste masten zijn tegenwoordig kantelbaar opgesteld via een scharnier aan de bodem. Dit laat toe de gondel van de turbine op grondhoogte te bevestigen met de mast terwijl deze plat ligt. Het naar beneden kantelen van de mast, gondel en wieken is ook handig bij onderhoudswerken en om de installatie te beschermen tegen (zware) storm. Het kantelen van de mast gebeurt meestal door middel van een kraan. Er bestaan echter ook hefboomsystemen of de mast kan door middel van een (terrein)wagen rechtgetrokken worden. Deze laatste



methodes zijn echter ingewikkelder dan het lijkt aangezien het ook vereist dat de mast tijdens het kantelen voorbij haar ‘dode punt’ moet worden afgeremd.



Figuur 14: Montage van een turbine met kantelbare buismast

De masten in Figuur 13 zijn buisvormig, maar vaak worden ook vakwerken (zoals bij de Eiffeltoren) gebruikt. Bij Figuur 14 is trouwens op de achtergrond een turbine met vakwerkmast zichtbaar. Diverse types masten zijn in de handel verkrijgbaar, maar sommigen produceren zelf de mast waarop de turbine gemonteerd wordt. Zelf een mast construeren vereist echter de nodige mechanische kennis (bijvoorbeeld op het vlak van sterkteberekening). De veiligheidsaspecten mogen hier zeker niet uit het oog verloren worden.

## 4: De windsnelheden en de vermogencurve

### 4.1: De energie aanwezig in de wind en de Betz-limiet

Een massa  $m$  met een snelheid  $v_1$  bezit een kinetische energie  $E = \frac{1}{2} m v_1^2$ . Wanneer een windstroming doorheen een oppervlakte  $A$  (de rotoroppervlakte) heen waait met een snelheid  $v_1$ , dan is de beschikbare kinetische energie per tijdseenheid gelijk aan het vermogen

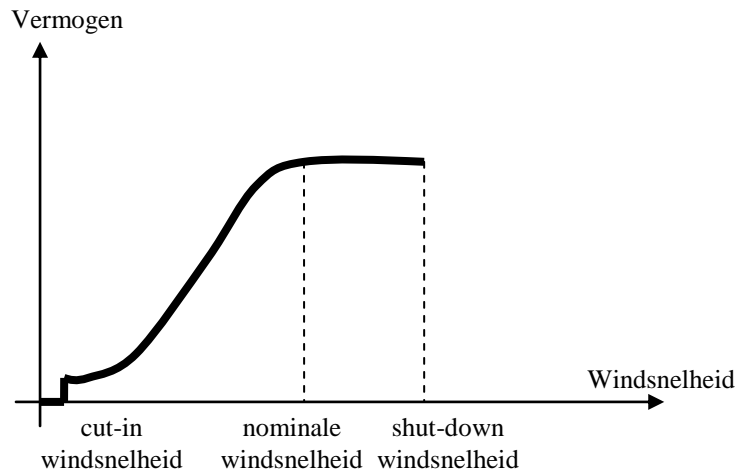
$$P = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 .$$

Dit betekent dat een verdubbeling van de windsnelheid het beschikbare vermogen met een factor acht verhoogt. Dit betekent uiteraard ook dat een halvering van de windsnelheid het beschikbare vermogen met een factor acht verlaagt. Het is dan ook erg belangrijk de windturbine te monteren op een plaats waar de windsnelheid  $v_1$  zo hoog mogelijk is. Deze windsnelheid is afhankelijk van de site maar de windturbine moet hoe dan ook een

voldoende hoge mast hebben wetende dat de windsnelheid  $v_1$  groter is in de hoger gelegen luchtlagen waar de obstakels aan het aardoppervlak minder effect hebben.

Helaas leert de Betz-limiet dat het niet haalbaar is om al de kinetische energie uit de wind te halen. Het maximale vermogen wordt uit de luchtstroming gehaald indien na de windturbine een resterende snelheid  $v_2 = v_1/3$  over blijft. In dit geval is 59,3% van het vermogen aanwezig in de luchtstroming opgenomen door de turbine. Een windturbine heeft dan ook nooit een rendement hoger dan 59,3%. Het is dus kwestie een windturbine zo te ontwerpen en bouwen dat deze Betz-limiet van 59,3% zo dicht mogelijk benaderd wordt.

## 4.2: De vermogencurve



Figuur 15: Vermogencurve windturbine

Het is duidelijk dat de windturbine meer vermogen kan leveren naarmate de windsnelheid groter is. De kinetische energie aanwezig in de windstroom, die invalt op het rotatievlak van de schoepen, is evenredig met de windsnelheid tot de derde macht. De vermogencurve van een windturbine geeft de relatie weer tussen het gegenereerde vermogen en de windsnelheid.

Bemerk dat de turbine pas vermogen begint te leveren vanaf de cut-in windsnelheid. Hoe lager de cut-in windsnelheid, hoe beter. Zeker als de windturbine geplaatst wordt op een site met veel lage windsnelheden is het belangrijk een windturbine te kiezen met een zo laag mogelijke cut-in windsnelheid.

Bij toenemende windsnelheid, neemt het gegenereerde vermogen toe totdat het nominale vermogen bereikt is bij de nominale windsnelheid. Wanneer de windsnelheid hoger wordt dan de nominale windsnelheid zou de turbine van nature uit meer vermogen leveren. Omdat de turbine (zowel elektrisch als mechanisch) daar niet op berekend is, moet een verdere stijging van het vermogen echter vermeden worden.

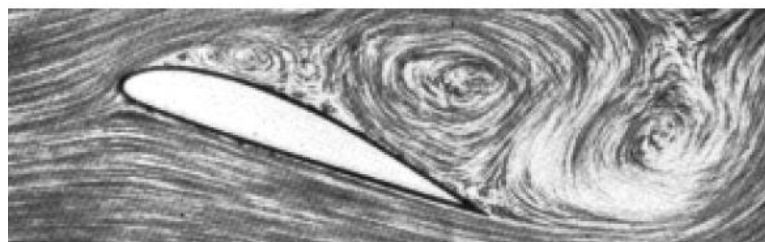
Bij grotere windturbines gebeurt dit meestal via pitch-controle; de rotorbladen worden lichtjes uit de wind gedraaid wat het gegenereerde vermogen beperkt. Bij microwindturbines wordt gewoonlijk geopteerd voor de goedkopere passieve stall-regeling waarbij het niet nodig is de wieken uit de wind te draaien. Bij iets grotere turbines bestaan er een aantal actieve stall regelingen waarbij de wieken wel verdraaid worden. Hierbij wordt het rotoroppervlak door de windvaan uit de windstroming weggedraaid of wordt de horizontale hoek van het rotoroppervlak door middel van een verend scharnier groter gemaakt (zie Incline systeem). Dit wordt ook 'furlen' genoemd.



μ

Figuur 16: 'Furlende' windturbine (bemerkt 45° horizontale hoek)

Figuur 17 toont onderaan het stromingsprofiel van de lucht rondom de wieken bij een grote invallende windsnelheid. De turbulenties (die er, zoals Figuur 17 bovenaan weergeeft, niet zijn wanneer de invallende windsnelheid lager is) zorgen er voor dat de ontwikkelde kracht afneemt en het gegenereerde vermogen niet verder toeneemt en zelfs afneemt.



Figuur 17: Luchtstroming bij lage (bovenaan) en hoge (onderaan) invallende windsnelheid

Sommige kleine windturbines worden ook elektronisch geremd. Hierbij zal de vermogenelektronische omvormer de turbine extra elektrisch belasten en deze energie dissiperen via remweerstand.

Vanaf de zogenaamde shut-down windsnelheid levert de turbine geen vermogen meer omdat de wieken zo verdraaid worden dat de invallende wind niet langer een koppel genereert. Dit beschermt de windturbine tegen al te grote windsnelheden (bijvoorbeeld bij stormweer). Deze shutdown kan elektrisch gebeuren door de fasen van de generator kort te sluiten (maximaal tegenwerkend koppel) en/of door een mechanische stormrem in de gondel te activeren.

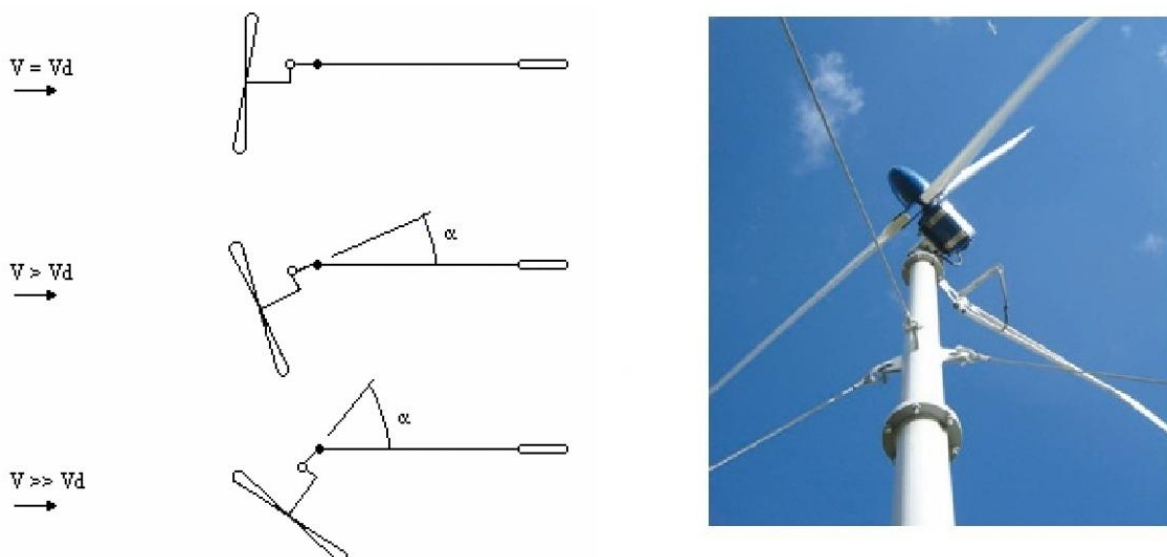
#### 4.2.1: Bescherming windturbine tegen stormweer

Bij hoge windsnelheden, dus bij stormweer, worden de windkrachten op de turbine erg groot. De iets grotere microwindturbines worden via een kruimechanisme beveiligd. Er bestaan flink wat systemen die afhankelijk zijn van de fabrikant en het type windturbine zodat we ons beperken tot een paar voorbeelden die een idee geven.

Figuur 18 toont een up-wind Passaat turbine van Fortis met een gondel (waar de wieken aan bevestigd zijn en waarin de generator gemonteerd is) die draaibaar opgesteld is rond een verticale as. Deze verticale as valt samen met de mast (doorzichtig bolletje in de linker deelfiguur). De turbine bevat ook een windvaan die rond een hellend opgestelde as draaibaar is (zwart bolletje in de linker deelfiguur).

Bij een normale windsnelheid ( $V_d$  in Figuur 18) valt de wind loodrecht in op het rotatievlak van de wieken want de windvaan zorgt er voor dat de wieken zo georiënteerd zijn. Wanneer de windsnelheid teveel toeneemt, zorgt dit voor een koppel in tegenuurwijzerzin ten opzichte van de verticale rotatieas. Dit doet de wieken, de gondel en ook de hellend opgestelde as (zwart bolletje) samen verdraaien. De windvaan blijft echter volgens de windrichting georiënteerd zodat de windvaan onder een hoek  $\alpha$  staat ten opzichte van de hellend opgestelde as. Dit kan, omwille van de helling van de as, maar als de windvaan (die voldoende zwaar is) een opwaartse beweging maakt. De zwaartekracht beperkt die opwaartse beweging en zodoende ook de hoekverdraaiing  $\alpha$  van de wieken en de gondel.

Naarmate de windsnelheid verder toeneemt, is het ontwikkelde koppel in tegenuurwijzerzin groter en is de verdraaiing van de wieken en de gondel groter. De wind valt dus in op een kleiner rotoroppervlak. De hoek  $\alpha$  neemt toe en de windvaan moet meer naar boven toe bewegen. Indien de windsnelheid terug afneemt, zorgt het gewicht van de windvaan er voor dat de rotor en de gondel terug zo verdraaien dat de wind terug loodrecht invalt op het rotatievlak van de wieken.



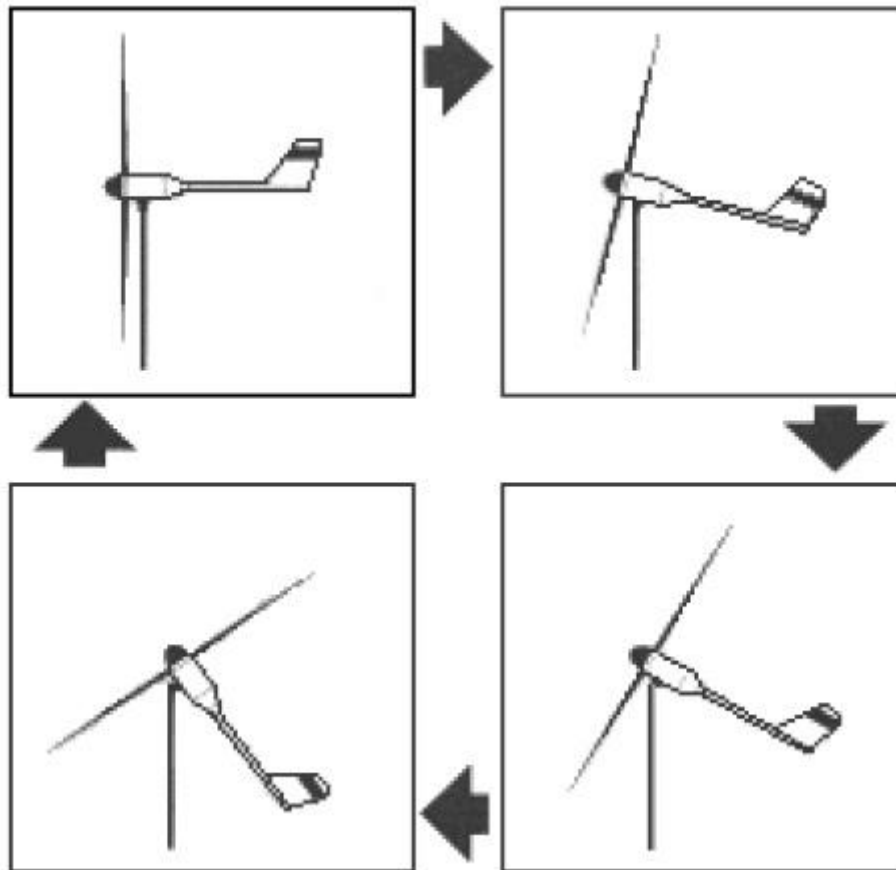
Figuur 18: De Passaat 1400 turbine (1,4 kW nominaal vermogen)

Een variant op het hierboven geschetste principe is het Incline Automatic Braking System die ondermeer toegepast wordt op de windturbines van het type INCLIN van Heyde Windtechnik. Dit keer gebeurt het kruien



(de wieken uit de wind draaien) niet via de windvaan want deze is vast bevestigd met de gondel. De gondel (en dus ook de generator) kan om een horizontale as naar achteren draaien zoals weergegeven in Figuur 19.

De hoge windsnelheid zorgt in Figuur 19 voor een koppel in uurwijzerzin die de gondel (en de wieken en de windvaan) doet verdraaien. Bij dit verdraaien wordt een veer vervormd die voor een tegenwerkend koppel zorgt. Deze veer zorgt er ook voor dat wanneer de windsnelheid afneemt de turbine terug zijn normale positie inneemt.



Figuur 19: Incline Automatic Braking System

Bij de 350 W windturbine van Superwind van Figuur 26 zijn het de individuele wieken (de rotorbladen) die door de windkracht rond hun eigen as verdraaid worden. Door deze vorm van pitch controle komen de wieken in vaanstand te staan bij al te hoge windsnelheden zodat de ontwikkelde krachten afnemen en de windturbine beschermd wordt. Bij grote windturbines komen de wieken in vaanstand via een hydraulisch of elektrisch mechanisme, maar hier gebeurt dit omwille van de eenvoud door de wind zelf.

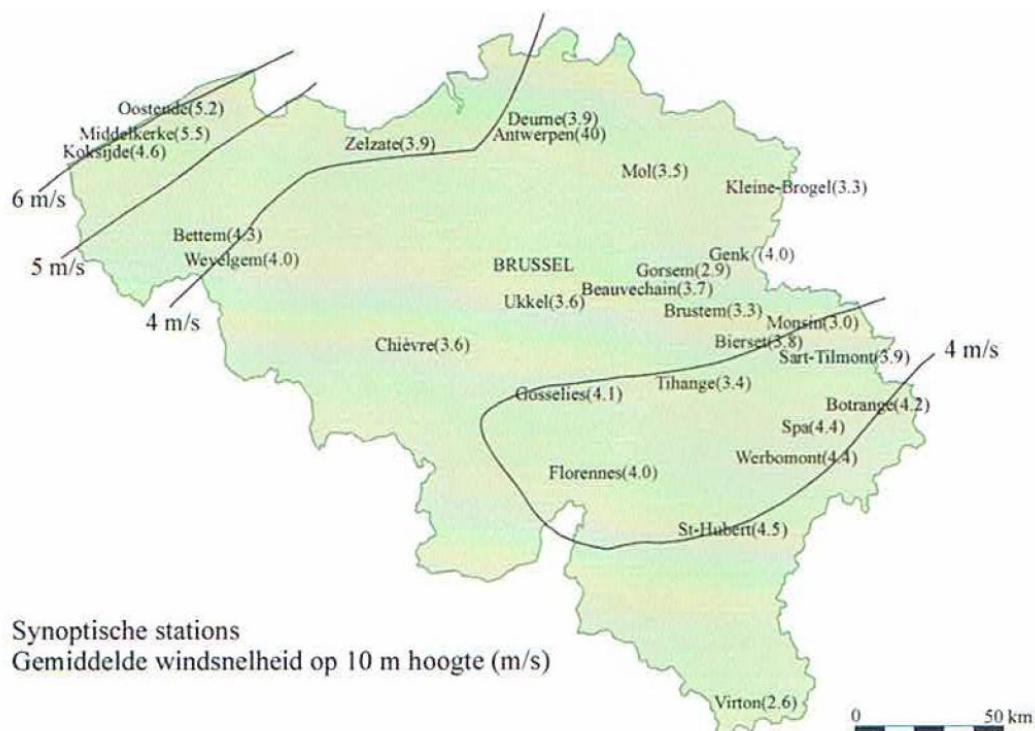
Bij kleinere types microwindturbines – grootte orde 100 W – is vaak geen beveiliging tegen te hoge windsnelheden aanwezig. De turbine is zo ontworpen dat ze bestand is tegen een bepaalde overlevingssnelheid die bijvoorbeeld ergens rond de 55 m/s schommelt. De turbine blijft net zolang in de wind draaien totdat ze er letterlijk bij neervalt.

### 4.3: Het bepalen van de windsnelheid op een site

Vooraleer een windturbine te plaatsen, is het belangrijk te weten hoe groot de optredende windsnelheden op de betreffende site zijn teneinde een idee te hebben van de te verwachten energieopbrengst.

#### 4.3.1: Algemene meteorologische gegevens

Er zijn meteorologische gegevens beschikbaar zoals ondermeer weergegeven in Figuur 20. Deze figuur toont dat naarmate men de kust nadert de gemiddelde windsnelheid meestal hoger is. Toch kan men op basis van een dergelijke kaart moeilijk (en ook op basis van een meer gedetailleerde kaart) verregaande conclusies trekken. Zeker bij microwindturbines is de masthoogte veeleer beperkt zodat lokale obstakels in het landschap veel impact hebben. Het is dan ook aangeraden om op de site zelf windsnelheidsmetingen, en mogelijks andere meteorologische metingen, uit te voeren. Installateurs van kleine windturbines bieden deze metingen vaak aan.

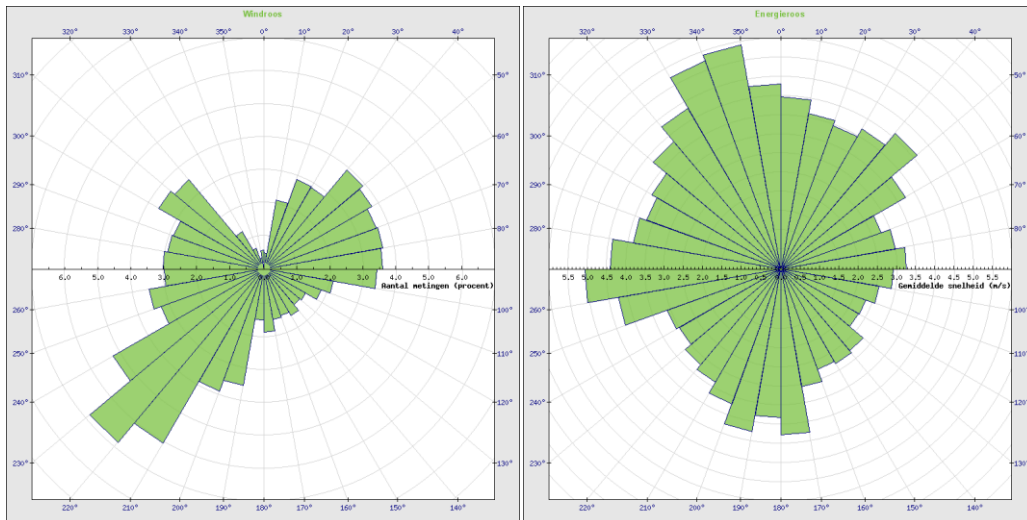


Figuur 20: Gemiddelde windsnelheid

Een extra aandachtspunt is de overheersende windrichting op een bepaalde site. Dit kan uitgezet worden op een zogenaamde radargrafiek of 'spider plot'. Deze grafiek toont de tweedimensionale verdeling van de windrichtingen aan. De grafiek toont hoeveel wind er uit iedere richting komt.

Hierbij is het belangrijk op te merken dat de overheersende windrichting niet noodzakelijk de belangrijkste richting is. De overheersende windrichting, dus de richting waaruit de wind het meest waait, kan een lagere gemiddelde windsnelheid hebben dan een richting waaruit het minder vaak waait. In die minder voorkomende windrichting kunnen namelijk hogere windsnelheden optreden.

Figuur 21 illustreert dit. De windroos links toont de verdeling van de windsnelheden waarbij de zuidwestelijke richting duidelijk de overheersende windrichting is. De energieroos rechts toont de gemiddelde windsnelheid per windrichting waarbij de noordelijke windrichting duidelijk hogere windsnelheden kent.



Figuur 21: Windroos tegenover energieroos, gemeten in Oostende

#### 4.3.2: De windsnelheid en de bijhorende energieopbrengst

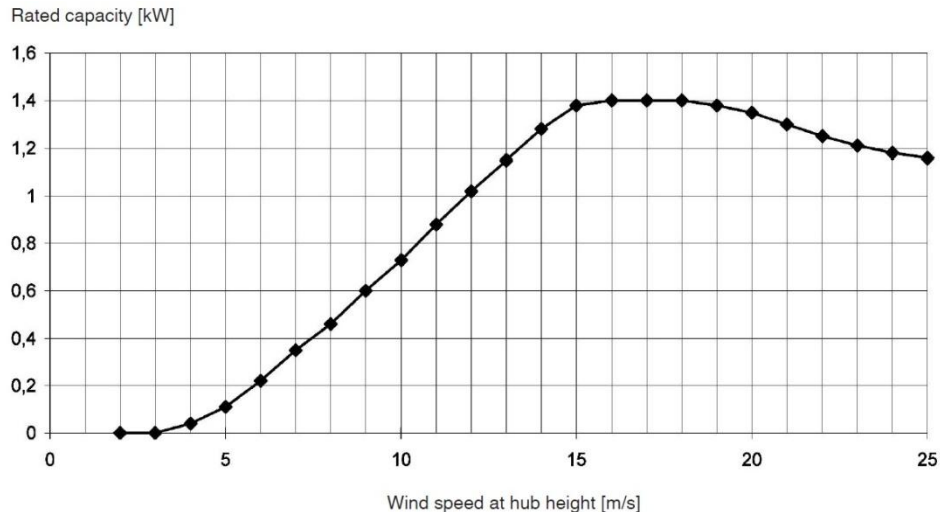
Een windturbine zet de kinetische energie van de invallende wind, zoveel mogelijk, om in elektrische energie. Deze kinetische energie (per tijdseenheid) van de invallende wind is

- evenredig met de dichtheid  $\rho$  van de lucht,
- evenredig met het rotatieoppervlak  $A$  beschreven door de wieken,
- evenredig met de windsnelheid tot de derde macht.

Temperatuur	Luchtdichtheid droge lucht	Temperatuur	Luchtdichtheid droge lucht
-25 °C	1,423 kg/m <sup>3</sup>	+5 °C	1,269 kg/m <sup>3</sup>
-15 °C	1,368 kg/m <sup>3</sup>	+15 °C	1,225 kg/m <sup>3</sup>
-5 °C	1,317 kg/m <sup>3</sup>	+25 °C	1,184 kg/m <sup>3</sup>

Zoals bijgevoegde tabel weergeeft, is de dichtheid  $\rho$  temperatuursafhankelijk. Hoe lager de temperatuur, hoe groter de luchtdichtheid en hoe hoger de invallende hoeveelheid kinetische energie bij een zelfde windsnelheid. Een windturbine zal dan ook maximaal elektriciteit produceren bij een koude winderige dag. Het bijhouden van het temperatuursverloop op de site waar men de windturbine wenst te plaatsen, is dan ook wenselijk. De fabrikant van de windturbine neemt gewoonlijk de luchtdichtheid  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  bij 15°C als referentie.

Naast de luchtdichtheid heeft uiteraard de windsnelheid erg veel impact op de energieproductie van de windturbine. Een verdubbeling van de windsnelheid verhoogt de kinetische energie in de wind met een factor acht. Op basis van een meetcampagne, die bijvoorbeeld gedurende een jaar elk kwartier de gemiddelde windsnelheid bijhoudt, is het mogelijk te voorspellen hoeveel energie de windturbine jaarlijks produceert. De vermogencurve van de fabrikant laat toe bij elke windsnelheid de vermogenproductie te kennen (zie Figuur 22). Dit laat toe de kWh-productie per kwartier te bepalen. Door deze allemaal op te tellen, is de jaarlijkse energieproductie beschikbaar.



Figuur 22: Vermogencurve van de Passaat 1400

Door vermogencurven van diverse types turbines te gebruiken, kan men voor elk van deze turbines:

- de jaarlijkse energieopbrengst in kWh vergelijken,
- de financiële waarde van deze energieopbrengst bepalen (hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen dag- en nachttarief),

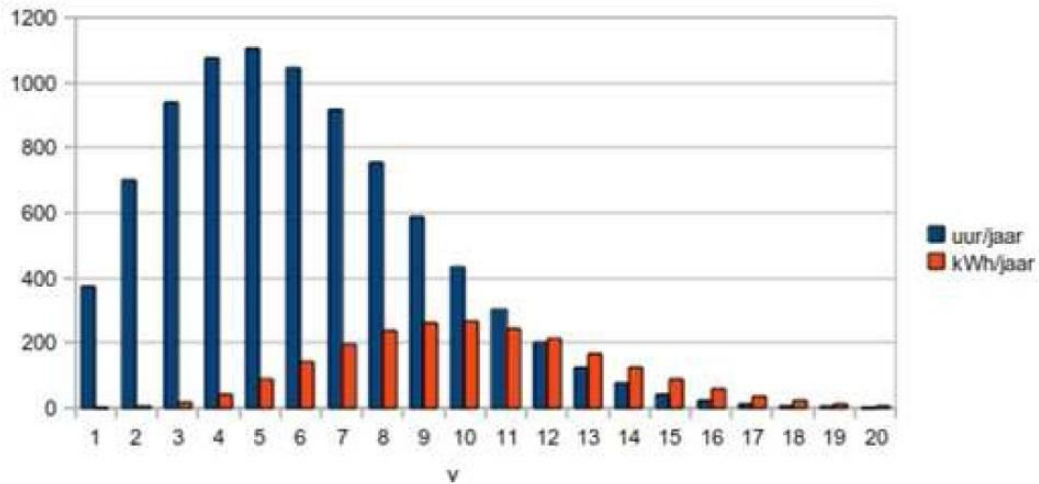
Indien men op de hoogte is van het eigen elektrisch verbruikspatroon, kan men nagaan tot in welke mate men de geproduceerde kWh zelf verbruikt dan wel injecteert in het publieke elektriciteitsnet. Dit laat toe om

- te verifiëren of er nooit meer vermogen in het net geïnjecteerd wordt dan technisch mogelijk is (dit kan een bovengrens op het nominaal turbinevermogen tot gevolg hebben),
- de financiële waarde van de energieopbrengst te bepalen (hierbij rekening houdende met het verschil in kWh-prijs tussen aankoop en verkoop).

Bij dit alles mag men uiteraard niet vergeten dat de energieproductie van jaar tot jaar zal verschillen. Zowel het temperatuursverloop als de evolutie van de windsnelheid variëren van jaar tot jaar. Het is realistisch aan te nemen dat de jaarlijkse energieproductie tussen ruwweg +15% en -15% van de gemiddelde productie kan variëren. Het kan dan ook nuttig zijn te weten of de uitgevoerde meetcampagne uitgevoerd is in een eerder “windrijk” of “windarm” jaar. Deze laatste informatie kan mogelijks via het KMI bekomen worden.

Figuur 23 toont een typisch meetresultaat van een bepaalde site. De resultaten van de windsnelheidsmetingen zijn uitgezet in een histogram die de vorm van een Rayleighverdeling aanneemt. In het blauw is van elke windsnelheid weergegeven hoeveel uur per jaar deze windsnelheid voorkomt. Lage windsnelheden komen dan ook meer voor dan hoge windsnelheden.

Door de vermogencurve van de windturbine te vermenigvuldigen met het windhistogram wordt bij elke windsnelheid de energieproductie bekomen (in het oranje weergegeven in Figuur 23). Door al de oranje balkjes op te tellen, wordt de totale energieproductie in een jaar tijd bekomen.



Figuur 23: De Rayleighdistributie van de windsnelheid met bijhorende energieproductie

Het is belangrijk te beseffen dat de energieproductie op de hierboven beschreven manier berekend moet worden. Het is fout de gemiddelde windsnelheid te berekenen en te denken dat op basis van die gemiddelde windsnelheid het gemiddeld vermogen gekend is. De vermogencurve van de windturbine (mee beïnvloed door het feit dat de kinetische energie in de invallende wind evenredig is met de derde macht van de windsnelheid) moet in rekening gebracht worden.

#### 4.3.3: Anemometers

Om de windsnelheid op te meten, gebruikt men een anemometer. Er zijn diverse types anemometers op de markt verkrijgbaar. De cup anemometer is momenteel het standaardinstrument wat betreft het opmeten van gemiddelde windsnelheden. De cup anemometer is een ronddraaiend molentje met verticale as en beschikt over drie of vier holle, halve bollen die de wind vangen. De holle kant vangt meer wind dan de bolle kant waardoor het molentje ronddraait. Hoe hoger de windsnelheid, hoe sneller de cup anemometer draait. De draaibeweging wordt via een kleine generator omgezet in een elektrisch signaal (frequentie of grootte van de opgewekte spanning) dat een maat is voor de windsnelheid (zie bijvoorbeeld <http://www.aprsworld.com/sensors/anemometer/>).



Figuur 24: Cup anemometer

Turbinemeters maken gebruik van het feit dat een hogere windsnelheid een miniwindturbine sneller doet roteren. De generator in deze miniwindturbine genereert een elektrisch signaal dat een maat is voor de windsnelheid. Dergelijke meettoestellen zijn meestal van het draagbare, handheld type en worden vooral gebruikt om de luchtsnelheid in ventilatiekokers te bepalen (zie bijvoorbeeld <http://www.anaheimscientific.com> of <http://www.peaktech.de>).



Figuur 25: Turbinemeter

Naast cup anemometers en turbinemeters, zijn ook ultrasonische anemometers verkrijgbaar. Ultrasonische snelheidsmeters meten het tijdsverschil tussen het versturen en het ontvangen van een ultrasonische geluidsgolf tussen twee punten. Bij tegenwind zal de geluidsgolf een langere reistijd afleggen dan bij meewind. Het gemeten tijdsverschil is een maat voor de luchtsnelheid. Dergelijke ultrasonische anemometers zijn beter geschikt om turbulente stromingen te meten. De laatste jaren is hun aankoop prijs gedaald.

De hetedraadmeter (thermische anemometer) meet de windsnelheid door het bepalen van de weerstand van een verhitte metaaldraad. Hoe hoger de windsnelheid (of snelheid van een luchtstroming in het algemeen), hoe meer luchtmassa voorbij de draad passeert die deze doet afkoelen. Hierdoor wijzigt de weerstandswaarde (zie bijvoorbeeld <http://www.tsi.com>).

Bij Laser Doppler anemometers zendt een laser een infrarode lichtstraal uit die door deeltjes in de lucht teruggekaatst wordt naar een ontvanger. De beweging van deze luchtdeeltjes doet de frequentie van de teruggekaatste lichtstraal variëren. Op basis van deze frequentievariatie kent men de snelheid van deze deeltjes in de lucht en dus de windsnelheid (zie bijvoorbeeld <http://www.naturalpower.com>).

#### 4.3.4: Invloed van de hoogte op de windsnelheid

De windsnelheid is afhankelijk van de hoogte: hoe groter de hoogte, hoe hoger de windsnelheid. Wanneer de windsnelheid op een hoogte  $h_1$  gekend is (dus  $v(h_1)$ ), kan deze bij benadering omgerekend worden naar een hoogte  $h_2$  (dus  $v(h_2)$ ). Er geldt dat

$$v(h_2) = v(h_1) \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha$$

De windturbine zal bijvoorbeeld een ashoogte  $h_2 = 30$  m hebben. Wanneer de windlogger op deze 30 m hoogte geplaatst wordt, is omrekening niet nodig. Wanneer men omwille van de eenvoud de anemometer (met windlogger) tijdens de meetcampagne op een hoogte  $h_1 = 15$  m plaatst, is omrekening wel nodig via de bovenstaande formule. Hoe ruwer de bodemoppervlakte, hoe hoger de  $\alpha$ -waarde en hoe groter het verschil tussen  $v(h_1)$  en  $v(h_2)$ .

De hierboven gebruikte  $\alpha$ -waarde is inderdaad afhankelijk van de ruwheid van de bodem. Er geldt meer specifiek dat



Kenmerken van het terrein	Coëfficiënt $\alpha$
Effen gladde bodem, kalm water	0,10
Hoog gegroeid gras op de bodem	0,15
Hoge gewassen, hagen en heesters	0,20
Bebost landschap, veel bomen	0,25
Kleine stad met bomen en heesters	0,30
Grote stad met hoge gebouwen	0,40

Bemerk inderdaad dat de vermogencurve van Figuur 22 expliciet vermeldt dat de windsnelheid ter hoogte van de wieken (rotatie as van de wieken) gebruikt moet worden. De Passaat 1400 voorziet standaard een mast waarbij de turbine zich op een hoogte tussen 12m en 24m bevindt.

#### 4.3.5: Het loggen van windsnelheid, windrichting en temperatuur

De meetapparatuur (en eventueel ook de apparatuur nodig om de gegevens te loggen) moet geschikt zijn om in de open lucht te functioneren. Het is mogelijks de bedoeling de windsnelheid te meten met een nauwkeurigheid die toelaat economische conclusies te trekken; een “academische” nauwkeurigheid is dan niet vereist.

Fabrikanten verkopen niet enkel anemometers, maar ook apparatuur die toelaat de windrichting (zie bijvoorbeeld <http://www.youngusa.com>) en de temperatuur te bepalen. Vaak wordt de windrichting mee opgemeten ook al zal de windturbine zich meestal kruien naar de invallende wind.

De ruwheid van het landschap kan echter verschillend zijn bij verschillende windrichtingen. De coëfficiënt  $\alpha$  kan verschillend zijn voor verschillende windrichtingen. Het is eventueel nuttig om voor verschillende windrichtingen de gepaste  $\alpha$  te bepalen en met die gepaste  $\alpha$  om te rekenen naar de vereiste ashoogte van de turbine. Het is mogelijk de windsnelheid te meten bij twee verschillende hoogtes en op basis hiervan  $\alpha$  te bepalen. Dit laat toe de windsnelheid om te rekenen naar de vereiste ashoogte van bijvoorbeeld 30 m.

Dataloggers laten toe de meetgegevens gedurende langere tijd op te slaan zodat deze (statistisch) verwerkt kunnen worden. Op de markt zijn flink wat fabrikanten actief zodat een keuze gemaakt moet worden binnen dit ruime aanbod (zie bijvoorbeeld <http://www.aprsworld.com>, <http://www.ekopower.nl>, <http://www.logic-energy.com>, <http://www.windlogger.co.uk>, <http://www.nrgsystems.com>). Het aangeboden pakket verschilt van fabrikant tot fabrikant en ook bij eenzelfde fabrikant is vaak flexibiliteit mogelijk.

Een pakket kan bestaan uit:

- een anemometer (al dan niet aangevuld met een tweede of derde anemometer, een windvaan of een temperatuursensor),
- een data logger module,
- een communicatiekabel tussen de anemometer en de data module,
- een behuizing voor de data logger module,
- een 230V, 50 Hz voeding voor de data logger module (of een batterijvoeding met heroplaadbare batterijen),
- een Secure Digital Card of een MMC-card (multimedia card) om de data op te slaan,
- een USB lezer die toelaat de informatie vanuit de datakaart te transporteren naar een PC waar verdere verwerking van de informatie mogelijk is.

Bij sommige fabrikanten wordt de mogelijkheid geboden om de informatie te visualiseren via een website. Dit laatste kan handig zijn voor de eigenaar zelf, maar ook vanuit PR standpunt kan dit een pluspunt zijn. De communicatie met het internet kan draadloos (via GPRS) of via ethernet (dus bedraad) gebeuren.

Er zijn ook volledige weerstations beschikbaar op de markt waar naast windsnelheid ook windrichting, temperatuur, luchtvochtigheid, neerslaghoeveelheid, luchtdruk... gemeten, bijgehouden en gevisualiseerd worden (zie bijvoorbeeld <http://www.hisound.be/electronics/>, <http://www.ambientweather.com/>).



Figuur 26: De 350 W Superwind microturbine

## 5: Besluit

Diverse aspecten eigen aan windturbines, en microwindturbines, zijn besproken. De krachtontwikkeling bij windturbines met verticale en horizontale as is uitgewerkt waarbij een onderscheid gemaakt is tussen stootkrachten en liftkrachten. De voordelen en de nadelen van de diverse types windturbines zijn met elkaar vergeleken.

Het belang van een voldoende hoge windsnelheid en de bijhorende vermogencurve zijn besproken. Er is uitleg verstrekt over het opzetten van een meetcampagne die toelaat de windsnelheden op een bepaalde site te bepalen. Het gebruik van de belangrijkste types anemometers met bijhorende dataloggers is hierbij kort aangehaald.

## 6: Bijkomende informatie

Er zijn veel websites waarop informatie verstrekt wordt in verband met microwindturbines. Zo vermelden we hier:

VAWT: <http://www.aes-energie.de>,  
<http://www.ecowindenergy.com>,  
<http://www.ette.no>,  
<http://www.windharvest.com>,  
<http://www.windside.com>

HAWT: <http://www.ampair.com>,  
<http://www.bergey.com>,  
<http://www.bornay.com>,  
<http://www.heyde-windtechnik.de>,  
<http://www.fortiswindenergy.com>,  
<http://www.kienergie.nl>,  
<http://www.landmark-web.com>,  
<http://www.microwind.de>,  
<http://www.windpower.de>

Auteurs: Joan Peuteman – KHBO / Joannes Laveyne – Power-Link

Heeft u nog verdere vragen of opmerkingen?

Aarzel niet om ons te contacteren!



Vlaams Elektro Innovatiecentrum  
Kleinhoefstraat 6  
2440 Geel  
tel: 014/57.96.10  
[info@vei.be](mailto:info@vei.be)  
[www.vei.be](http://www.vei.be)