

Inhoud

Inhoud	1
Voorwoord	2
Hoe haalt een windmolen zijn energie uit de wind	3
Bij welke invalshoek van de wind is de energieopbrengst maximaal?	5
Wat is de invloed van het toerental op de energieopbrengst?	8
Conclusie	10
Nawoord	12
Bronnenlijst	13

Voorwoord

Impuls, dat was het onderwerp dat ik heb gekozen voor mijn profielwerkstuk. Na lang denken over een geschikt experiment bij dit onderwerp, heb ik op internet een verhaal over het maximale vermogen van een windmolen gevonden. Het leek mij zeer interessant om mij hier eens verder in te gaan verdiepen. Professor Bierbooms van de Technische Universiteit Delft had een onderzoek gedaan naar het verband tussen de afname van de windsnelheid achter een molen en het vermogen van de windmolen. De conclusie van zijn onderzoek was dat het vermogen van een windmolen maximaal zou zijn bij een windsnelheidsafname van 70%. Dit vroeg natuurlijk om een nader onderzoek van mijzelf, het lijkt me ook erg leuk om me verder te gaan verdiepen in de technologie van de windmolen. Natuurlijk is het ook een uitdaging om het onderzoek van een echte professor (!) op schaal na te doen.

Mijn onderzoeksvraag is:

-Bij welk verlies van windsnelheid (verandering van impuls) is het vermogen van de windmolen maximaal?

De hypothese is de uitkomst van het onderzoek van professor Bierbooms:

-Bij 70 % windsnelheidsafname is het vermogen van een windmolen maximaal.

Om gericht te werk te gaan heb ik drie deelvragen geformuleerd:

-Hoe haalt een windmolen zijn energie uit de wind?

-Bij welke invalshoek van de wind is de energieopbrengst maximaal?

-Wat is de invloed van het toerental op de energieopbrengst?

Hierna volgt de uitwerking van de deelvragen met aan het einde een conclusie op basis van de drie deelvragen en toetsing van de hypothese.

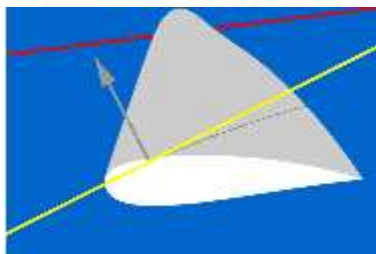
Hoe haalt een windmolen zijn energie uit de wind?

Windmolens gebruiken tegenwoordig dezelfde technologie om energie uit wind te halen als vliegtuigen. Maar wel met een paar technische snufjes erbij omdat ze moeten werken op een andere hoogte met telkens wisselende windrichtingen



Figuur 1: windstromen langs een vleugel

en snelheden. De vleugels van een vliegtuig en de wieken van een windmolen hebben een speciale vorm. Er is een bolle kant en een platte kant. Omdat de wind aan de bolle kant van de vleugel een grotere afstand moet afleggen ontstaat hier een onderdruk en aan de platte kant een bovendruk. Dit zorgt voor de liftkracht die een vliegtuig in de lucht kan krijgen (zie figuur 1). Als men de vleugel te schuin zou kantelen zou er boven aan de vleugel een 'windraaikolk' ontstaan (turbulentie). De liftkracht verdwijnt dan. Bij windmolens kan dit verschijnsel optreden als de wieken niet glad zijn. De toppen van de wieken draaien sneller rond als de delen dicht bij de rotor. Om te begrijpen hoe dit de windsnelheid beïnvloedt kan men zich voorstellen dat er rode linten aan de top worden vastgemaakt en op een kwart van de wiek gele linten. De gele linten worden meer naar achter geblazen omdat de snelheid van de molen hier veel lager is dan de windsnelheid. De rode linten lijken bijna een verlengde van de bladen omdat de snelheid hier tot wel 8 keer zo hoog kan zijn als de windsnelheid (figuur 2).



Figuur 3 nettokracht op een windmolen

In figuur drie is één van de rotorbladen doorgezaagd vlak na de gele lijn. Het blad draait richting de linkerkant van het plaatje. We zien dat door de vorm van de vleugel en de stroomrichting van de wind de wiek al naar links maar ook naar voren wordt getrokken (grijze pijl in figuur 3). Zo zal een windmolen als hij eenmaal draait makkelijk doorgaan. Het kan gebeuren dat, bij windsnelheden boven de 15 m/s, de molen te hard gaat draaien. Er zit een regelmechanisme in de molen dat er voor zorgt dat de rotorbladen bijgesteld kunnen worden zodat de molen sneller/langzamer gaat draaien (grijze pijl in figuur 4). De energie die de windmolen levert moet natuurlijk ergens vandaan komen. Alles wat een massa en een snelheid heeft, heeft ook een impuls. Aangezien de aankomende wind een massa (zij het een kleine) en een snelheid heeft bevat deze ook een impuls. De molen beweegt niet en heeft dus een snelheid van 0 m/s en derhalve geen impuls. Wanneer de molen 'in de wind' wordt gedraaid zal de molen (bij een voldoende grote windsnelheid) gaan draaien.



Figuur 2: de stroomrichting van de wind

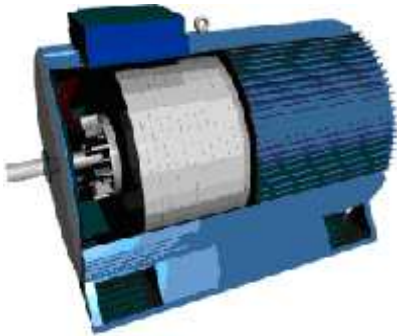


Figuur 4 draaibare wieken

De snelheid van de molen is nu ongelijk aan 0 en dus heeft de molen nu wel een impuls gekregen! Er heeft dus een impulsverandering plaats gevonden.

Als er bij de molen impuls is bijgekomen is die bij de wind eraf gegaan.

Aangezien de massa van de wind (of de molen) niet opeens kan afnemen moet er dus wel een snelheidsverandering optreden. De windsnelheid zal kleiner worden en de snelheid van de molen groter. Door de vorm van de windmolen zal een luchtstroom langs de molen ontstaan zoals hierboven beschreven. De molen zal daarom een nettokracht in de richting van de draairichting krijgen. De windmolen bespoedigt zijn eigen beweging. De draaiing van de as wordt



Figuur 5: de generator van een windmolen

omgezet in energie in de generator (figuur 5).

Windturbinegeneratoren zijn anders dan normale generatoren omdat ze te maken hebben met een wisselende energietoevoer. De generator werkt met een stator waar een even aantal magneten op zit. De stator is verbonden met de as van de windmolen zodat de magneten ronddraaien. Om de stator zitten een aantal elektromagneten. Door het ronddraaien van de magneten wordt er in de elektromagneten een stroom opgewekt. Door verschillende aantallen

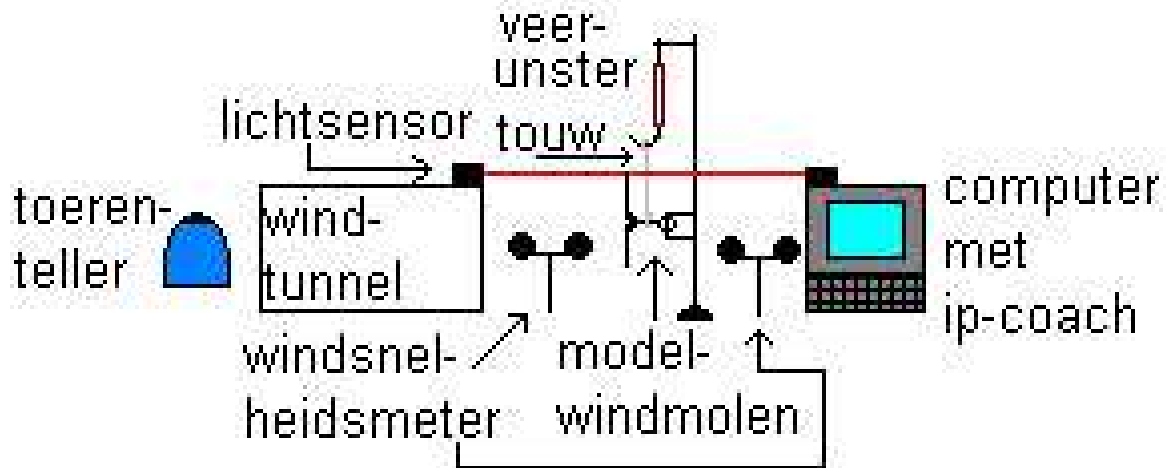
magneten op de stator te plaatsen kan bij een toerental van 50 Hz verschillende snelheden bereikt worden. Des te meer magneten des te langzamer draait de rotor rond (zie tabel 1).

Aantal magneten	Ronden per minuut
2	3000
4	1500
6	1000
8	750
10	600
12	500

Tabel 1: verband tussen magneten op de stator en de rondes per minuut.

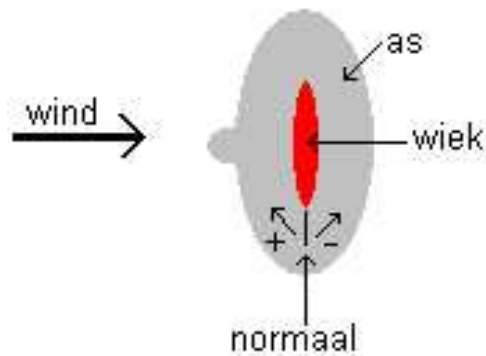
Bij welke invalshoek van de wind is de energieopbrengst maximaal?

Op donderdag 3 februari heb ik onderzocht bij welke invalshoek het vermogen van de windmolen maximaal was. Daartoe hebben we een meetopstelling gebouwd. De opstelling was als volgt (figuur 6):



Figuur 6: de proefopstelling

De opstelling bestond uit een windtunnel die aan een toerenteller gekoppeld was, zo konden we de windsnelheid regelen. Verder was er na de windtunnel een windsnelheidsmeter geplaatst die de windsnelheid voor de molen moest meten. Omdat we in deze meetserie het aantal toeren constant hebben gehouden blijft de windsnelheid voor de molen ook gelijk. De windsnelheidsmeter voor is dan ook tijdens de meting weggehaald (zodat hij de wind niet zou afremmen). Toen kwam de molen zelf, gemaakt van een oude modelvliegtuigpropellers. De bladen konden om hun as draaien. Naast de windmolen stond een lichtsensor die ieder keer dat één van de wieken passeerde op de computer een dal lieten zien in een grafiek. Door de tijd tussen drie opeenvolgende pieken op te meten kan de tijd berekend worden die de molen over één omwenteling doet. Als we de diameter van de molen weten kunnen we de afgelegde afstand berekenen. Om de as van de molen zat een touwtje met daaraan een veerunster. De veerunster meet de kracht waarmee de molen aan het touwtje trekt. Door de kracht (in Newton) maal de afgelegde afstand (per seconde) te doen kunnen we het vermogen uitrekenen. In formulevorm: $P = W/t = (F*s)/t$. Met P (het vermogen) in Watt, F (de kracht) in Newton, s (de afstand) in m en t (de tijd) in seconden. Uit de verschillende waarden van de vermogens en de gegevens over de draaihoek kunnen we een diagram maken waaruit we de ideale draaihoek kunnen extrapoleren.



Figuur 7: definitie van draaihoek

De draaihoek is gedefinieerd als de hoek ten opzichte van de normaal die op de molen is afgetekend. De draaihoek is positief wanneer de wiek van de normaal naar de wind toegedraaid wordt. De draaihoek is negatief wanneer de wiek van de normaal en de wind afgedraaid wordt (zie figuur 7). Bij iedere meting wordt de kracht op de veerunster afgelezen en met de computer via een meting de tijd bepaald die de molen over een omwenteling doet. De diameter van het asje

was 5 mm, dat is 0,005 meter, de omtrek was dus $0,005\pi$ meter $\approx 0,0157$ meter. We hebben de volgende metingen verricht (zie tabel 2):

Draaihoek (°)	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0
V_{wind} achter (m/s)	4,0	3,9	3,7	3,4	3,1	3,0	2,0	2,5	3,2	3,0
V_{afname} (%)*	42,9	44,3	47,1	51,4	55,7	57	71,4	64,3	58,6	57,1
Kracht (N)	0,280	0,340	0,430	0,450	0,440	0,380	0,150	0,220	0,410	0,410
1 omwent. duurt (s)	0,460	0,205	0,074	0,054	0,04	0,032	Geen omw.	Geen omw.	0,69	0,10
Afstand (m)**	0,034	0,077	0,212	0,291	0,393	0,491	-	-	0,023	0,157

Draaihoek (°)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
V_{wind} achter (m/s)	3,2	3,1	3,2	3,3	3,3	3,4	3,5	3,7	4,0
V_{afname} (%)*	54,3	55,7	54,3	52,9	52,9	51,4	50	47,1	42,9
Kracht (N)	0,400	0,410	0,490	0,440	0,420	0,410	0,420	0,340	0
1 omwent. duurt (s)	0,115	0,120	0,140	0,150	0,173	0,190	0,240	0,300	Geen omw.
Afstand (m)**	0,137	0,131	0,112	0,105	0,091	0,083	0,065	0,052	-

Tabel 2: meetgegevens

Uit de bovenstaande gegevens heb ik de volgende waarden voor het vermogen gevonden (zie tabel 3):

Draaihoek (°)	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0
Vermogen***	0,136	0,300	0,784	0,989	1,218	1,473			0,073	0,471

Draaihoek (°)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Vermogen***	0,438	0,406	0,358	0,346	0,300	0,282	0,227	0,192	

Tabel 3: vermogen per draaihoek

Omdat de molen niet draaide bij -30, -20 en 90 graden zijn er bij deze hoeken geen waarden ingevoerd in de grafiek. Maar is de lijn doorgetrokken om zo een goed beeld te krijgen van de grafiek. Uit de grafiek (diagram 1) kunnen we de draaihoek die bij het hoogste vermogen hoort het hoogste vermogen extrapoleren: die is ongeveer - 42 graden.

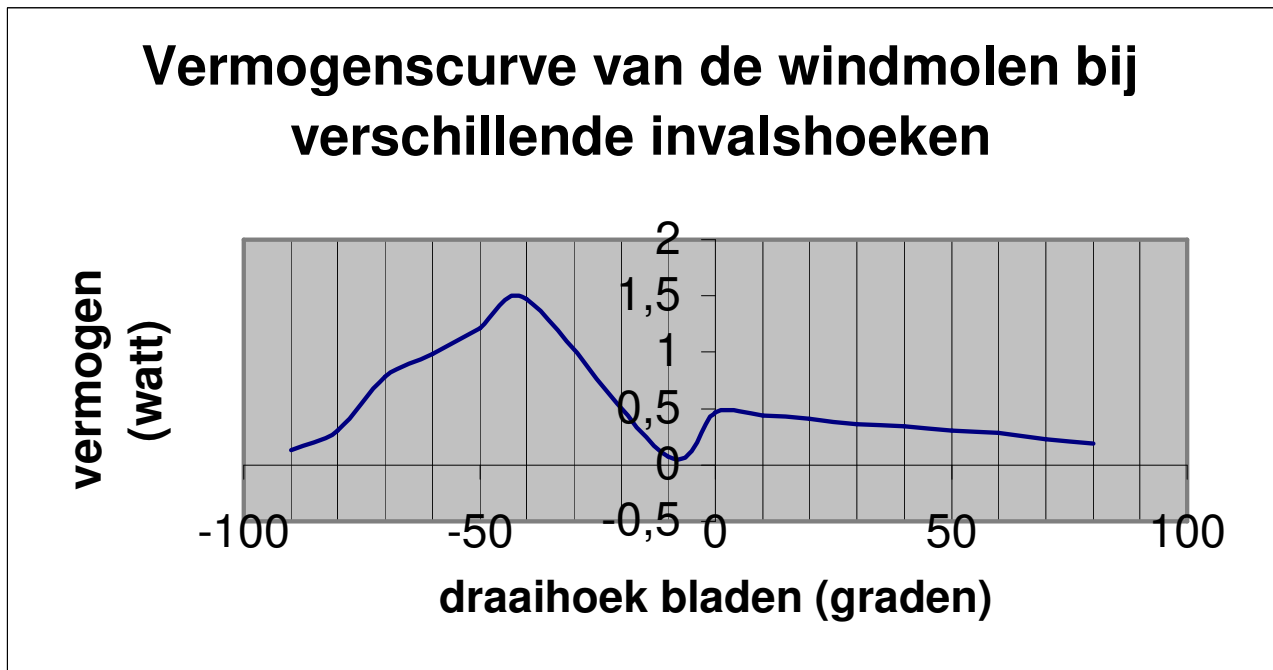


diagram 1: de vermogenscurve van de windmolen.

*) De snelheidsafname is hier gedefinieerd als: $V_{afname} = \left(1 - \left(\frac{V_{achter}}{V_{voor}}\right)\right) \cdot 100$ met V_{achter} en V_{voor} in meters per seconde en V_{afname} in procenten.

**) De afstand is gedefinieerd als: $s = \left(\frac{1}{t_{1omwenteling}}\right) \cdot 0,005\pi$ met t in seconden en s in meters.

***) Het vermogen is hier gedefinieerd als $P = F \cdot s$ omdat t hier 1 seconde bedraagt. P is in Watt, F in Newton en s in meters.

Wat is de invloed van het toerental op de energieopbrengst?

Deze deelvraag kunnen we beantwoorden met dezelfde proefopstelling als in het vorige hoofdstuk is beschreven. De draaihoek van de bladen van de windmolen worden ingesteld op een draaihoek van -42° , om een zo hoog mogelijk vermogen te bereiken. Door het toerental van de windtunnel te variëren zal ook het toerental van de windmolen veranderen. We verrichten weer eenzelfde serie metingen als in het vorige hoofdstuk. Uit de duur van één omwenteling valt nu heel eenvoudig het toerental te berekenen (zie tabel 4).

Toerental Windtunnel (toeren/min)	35	40	45	50	55	60	65	70	75
$V_{\text{wind voor}}$ (m/s)	2,0	3,0	3,5	4,2	7,0	8,5	10,0	10,8	11,2
$V_{\text{wind achter}}$ (m/s)	0,0	1,0	1,5	2,5	3,2	4,2	5	5,2	5,5
$V_{\text{afname}} (\%)^*$	100	66,7	57,1	40,5	54,3	50,6	50	51,9	50,9
1 omwent. duurt (s)	2,50	0,620	0,290	0,180	0,120	0,0950	0,0800	0,0780	0,0750
Toerental windmolen [^] (omw./s)	0,400	1,61	3,44	5,56	8,33	10,52	12,50	12,82	13,33

Tabel 4: omrekengegevens van toerental windtunnel naar toerental windmolen

Nu de toerentalen voor de windmolen bekend zijn kunnen we de bijbehorende afstanden uitrekenen en de bijbehorende krachten aflezen. Door deze met elkaar te vermenigvuldigen kunnen we het vermogen uitrekenen (zie tabel 5). Hierna kunnen we een diagram (diagram 2) maken waarin het vermogen uitgezet is tegen het toerental van de molen:

Toerental molen (omw./s) [^]	0,400	1,61	3,44	5,56	8,33	10,52	12,50	12,82	13,33
Afstand (m) ^{**}	0,0063	0,0253	0,0540	0,0873	0,131	0,165	0,196	0,201	0,210
Kracht (N)	0,310	0,390	0,440	0,520	0,520	0,540	0,610	0,670	0,720
Vermogen (W) ^{***}	0,0019	0,0098	0,0237	0,0453	0,0681	0,0891	0,1196	0,1347	0,1512

Tabel 5: Het vermogen per toerental

[^]) Het toerental van de molen is gedefinieerd als: $\frac{1}{t_{\text{omwenteling}}}$ met t in seconden en het toerental in omwentelingen per seconde.

In het diagram (diagram 2) is geen piek waarneembaar, het is dus onmogelijk om het toerental waarbij het vermogen maximaal is te extrapoleren. Wel kan worden opgemerkt dat des te hoger het toerental komt te liggen, des te hoger het vermogen van de windmolen is. Ook stijgt het vermogen sneller naarmate het toerental toeneemt. Het vermogen lijkt recht evenredig te zijn met het toerental van de windmolen. Een piek zal dus waarschijnlijk niet te vinden zijn.

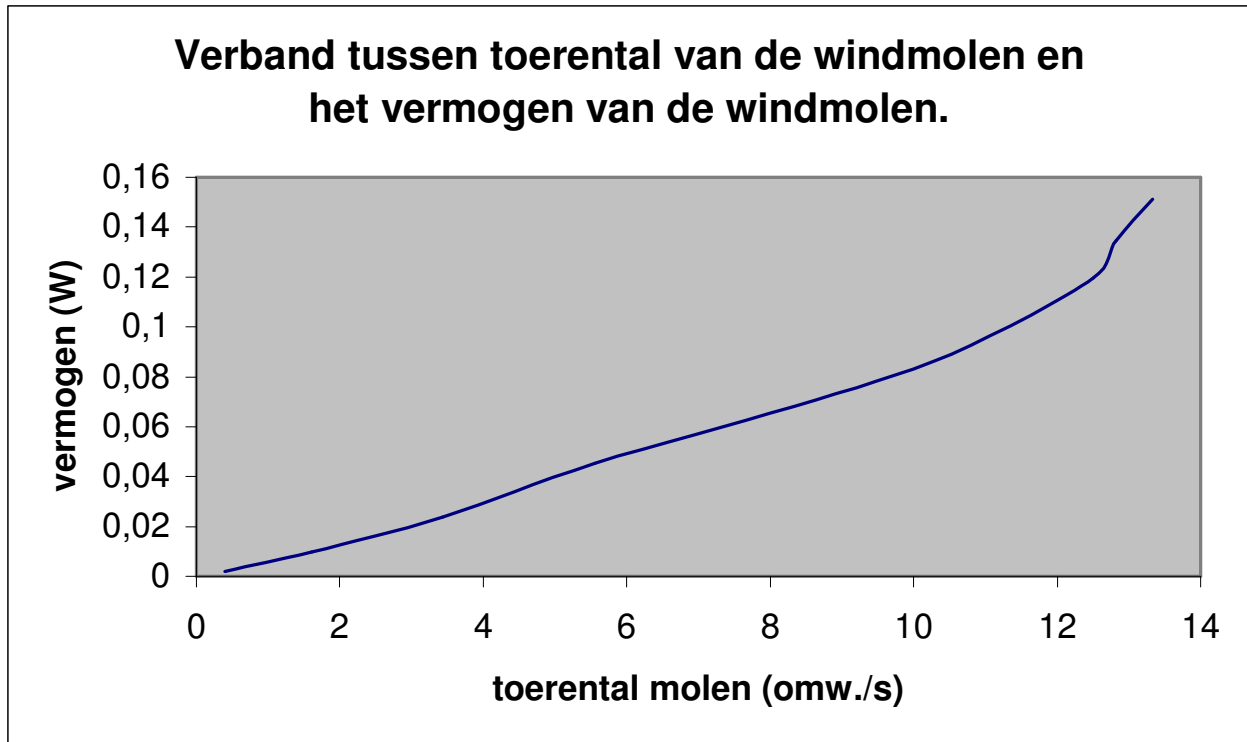


Diagram 2: vermogenscurve bij verschillende toerentallen.

Conclusie

Het maximale vermogen lag bij een draaihoek van -42° . Om de hypothese te toetsen moeten we erachter komen hoe groot de afname van de windsnelheid bij deze afstelling is. In de vorige deelvraag konden we geen top in de grafiek vinden omdat het toerental recht evenredig bleek te zijn met het vermogen. De gegevens over windsnelheidsafname komen daarom uit de tweede deelvraag (zie tabel 6 en diagram 3):

Draaihoek ($^\circ$)	-50	-40	-30	-20
V_{afname} (%) [*]	55,7	57	71,4	64,3

Tabel 6: Draaihoek en bijbehorende snelheidsafname

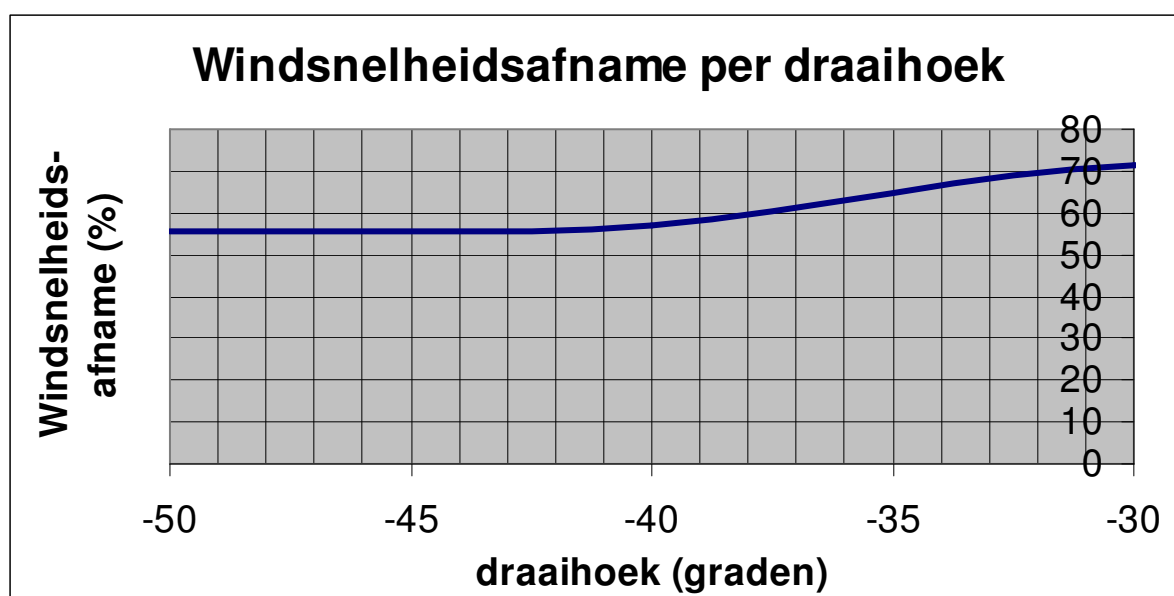
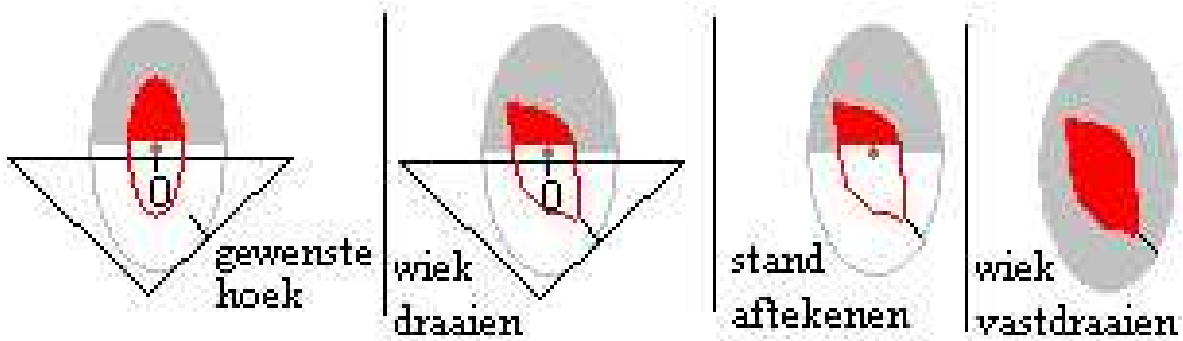


Diagram 3: windsnelheidsafname per draaihoek

Uit het diagram valt op te maken dat bij een draaihoek van -42 graden de afname van de windsnelheid ongeveer 57 procent is. Dit komt niet overeen met de hypothese dat de top van het vermogen bij een windsnelheidsafname 70 % zou liggen. De hypothese is afkomstig uit een onderzoek van professor Bierbooms verbonden aan de TU Delft. Uit diagram 3 valt af te lezen dat het hoogste verlies aan windsnelheid (ongeveer 72%) optreedt bij een draaihoek van -32 graden het vermogen is hier ongeveer 1,1 Watt (extrapoleren uit diagram 1). Dit is 0,4 Watt minder dan het maximale vermogen van de windmolen levert bij deze proef. Bij de bevindingen moet worden opgemerkt dat er in de manier van het vaststellen van de draaihoek een nogal grote meetonzekerheid zit. De draaihoek is vastgesteld door de bladen omhoog te draaien en een geodriehoek tegen de as aan te leggen. Vervolgens wordt de wijk in de goede stand gedraaid waarbij op de as van de molen de goede stand wordt afgetekend, hierna wordt de wijk weer omlaag gedraaid en d.m.v het streepje op de as in de goede stand gezet (zie figuur 8).



Figuur 8: procedure hoek wiek afmeten

Als de hoek op de geodriehoek fout is afgetekend of als de wiek te ver gedraaid is, klopt de meting al niet meer. Bovendien zijn de kracht op het touwtje en de windsnelheid beide waarden die afgelezen moeten worden. Ook is de hoek die de bladen maken niet constant de spoed verloopt.

Als er bladen met een andere spoed gebruikt zijn in het experiment van dhr. Bierbooms kan dit het verschil verklaren tussen de uitkomsten van de experimenten. Ook kan de professor de bladen op een andere hoek hebben ingesteld. Voor de metingen bij deze proef maakt het niets uit omdat er gemeten is met dezelfde bladen. De afwijking veroorzaakt door de spoed is dus bij iedere draaihoek hetzelfde verder is de draaihoek helder gedefinieerd.

Als laatste zou het nog kunnen dat in het experiment van de TU Delft een windmolen met drie wieken is gebruikt. Windmolens met drie wieken zijn stabiel en er komen dus andere cijfers uit de metingen dan bij een molen met twee wieken.

De conclusie van dit experiment is dus: de hypothese (het hoogste vermogen van een windmolen ligt bij 70% windsnelheidsafname) was onjuist. Het maximale vermogen ligt bij een windsnelheidsafname van 56 %. Des te hoger het toerental van de windmolen des te hoger het vermogen van de windmolen.

Nawoord

Ik heb met veel plezier aan dit profielwerkstuk gewerkt. Het bezig zijn met het voorbereiden en uitvoeren van het experiment was een leuke en leerzame bezigheid. Het gidsexperiment, de verbeteringen en daarna het echte experiment met soms de (schijnbaar onontkoombare) tegenvallers. Het was erg leuk om je in één onderwerp wat meer te verdiepen dan er normaal in de les gebeurt. Ik weet nu precies hoe een windmolen werkt. Het was iets waarvan ik voorheen altijd dacht dat het zo simpel in elkaar zat (en daarvoor dacht ik nog dat windmolens met stroom wedren aangedreven). Nu ben ik erachter dat het héél anders werkte dan ik in gedachte had. Ik heb het gevoel dat ik ook nauwkeuriger heb gewerkt tijdens dit profielwerkstuk dan voorheen omdat er zoveel van af hangt en ik de hypothese met de grootst mogelijke nauwkeurigheid wilde toetsen. Dat later bleek dat de hypothese fout was, was enigszins toch wel vreemd. Een professor (van dé TU Delft nog wel) zou natuurlijk geen fout maken in zijn metingen en berekeningen. Bij het nazoeken op het internet bleek dat er vele oorzaken konden voor het afwijken van de resultaten.

Één ding is zeker: ik zal vanaf nu windmolens met heel andere ogen gaan bekijken dan voorheen!

Bronvermelding

www.howstuffworks.com

Een website waarop uitgelegd wordt hoe dingen in elkaar zitten. Over windmolens was er weinig te vinden wel over de impulswet en vliegtuigvleugels.

www.windpower.org

De website van de Deense Windindustrie vereniging (DWIA). Hierop staat uitgelegd wat windenergie is, hoe windmolens werken en hoe ze in de toekomst verbeterd kunnen worden.

www.scholierenlab.tudelft.nl/forum

Op deze website stond het idee om het vermogen van windmolens uit te gaan zetten tegen het percentage windsnelheidsafname. Ook heb ik via deze website het rapport van professor Bierbooms en hulp bij de verwerking gekregen.

Hoe de wind waait, Gerard van Bussel, 1984 ODE

Over de aerodynamica van windmolens en het gedrag van wind bij verschillende typen windmolens. Professor Bierbooms heeft zijn onderzoek op dit rapport gebaseerd.

Windenergie winstgevend, Vrije Universiteit Brussel vakgroep stromingsmechanica

Folder over de werking en (economische) voordelen van een windmolen.