

Karel de Grote-Hogeschool
Katholieke Hogeschool Antwerpen
Departement industriële wetenschappen en technologie

Ontwerp van een windmolen

Jonas Mylemans

ir.W. Janssens, Campus Hoboken

Proefschrift tot het behalen van graad
van Industrieel Ingenieur in de Elektromechanica
Hoboken, mei-2005

Karel de Grote-Hogeschool
Katholieke Hogeschool Antwerpen
Departement industriële wetenschappen en technologie

Ontwerp van een windmolen

Jonas Mylemans

ir.W. Janssens, Campus Hoboken

Proefschrift tot het behalen van graad
van Industrieel Ingenieur in de Elektromechanica
Hoboken, mei-2005

Voorwoord

Dit eindwerk, het ontwerpen van een windmolen, is gekozen omdat hierin mechanica, sterkteleer en fysica, 3 wetenschappen die me erg boeien, duidelijk aanbod komen.

Bij de realisatie van dit eindwerk hebben vele personen me geholpen. Deze personen wens ik hier te vermelden. In de eerste plaats gaat mijn dankbaarheid uit naar mijn promotor Ir. Willy Janssens die me ten gepaste tijden met zijn raadgevingen op de juiste weg heeft gezet. Mr Lucien De Roy en Mr Eddy Janssen verdienen eveneens mijn dankbaarheid omwille van hun hulp bij het ontwerp van het remsysteem. Luc Janssens dank ik om me op weg te zetten met de technische tekeningen. Robert Achten ben ik dankbaar voor zijn hulp bij de overbrenging van de rotoras naar de pompas. Voorts gaat mijn dank uit naar mijn ouders die me de mogelijkheid gaven deze studies te doen en dus ook dit eindwerk te maken. Zij zijn me steeds door dik en dun blijven steunen.

Ook van mijn vrienden heb ik hulp gekregen. Kris De Backer heeft mijn eindwerk aan een grondige taalkundige inspectie onderworpen, Roel Heremans heeft me geholpen bij het in scannen van de figuren en Bart De Caluwé verdient mijn dankbaarheid omdat hij me een aantal boeken over windenergie heeft uitgeleend.

Tot slot worden ook de medestudenten en de personen die ik telefonisch gecontacteerd heb bedankt voor hun bijdrage aan dit eindwerk.

Opdrachtomschrijving

Studie en ontwerp van een kleine windturbine voor de aandrijving van een waterpomp.

Na een grondige literatuurstudie over windturbines dient een gefundeerde keuze van windturbintype gemaakt te worden. Het betreft een windturbine die moet dienen om een waterpomp aan te drijven. De pomp (membraantype of equivalent) moet oppervlaktewater dat zich tijdens periodes van hevige of langdurige regen verzameld heeft in een niet afwaterende gracht, naar een hoger niveau pompen, van waaruit het op natuurlijke wijze via waterlopen kan afgevoerd worden.

Zowel de keuze en ontwerpberekeningen van de windturbine, de stormbeveiliging, de kinematische keten tussen turbine en pomp, de pomp, het afvoersysteem, de draagconstructie en de fundamenteen dienen uitgevoerd. Bovendien dient een kostenraming te worden gemaakt.

Er kan eventueel overwogen worden om de windturbine te monteren en te bouwen.

De hogeschoolpromotor:

ir. Willy Janssens

De student:

Jonas Mylemans

Samenvatting

Het eindwerk heeft als doel een windmolen te ontwerpen die een pomp moet kunnen aandrijven. Deze pomp dient om regenwater, dat zich ophoopt achter in een tuin, te verpompen naar een afwaterende beek die zich een meter hoger bevindt.

Om te beginnen is er een literatuurstudie gemaakt over windenergie. Vervolgens zijn enkele types van windmolens besproken. Uiteindelijk is er gekozen om een Savoniusrotor te ontwerpen, dit omdat hij goedkoop en eenvoudig te construeren is.

Na een type windmolen te hebben gekozen, moest er een pomp gekozen worden. Deze keuze was niet eenvoudig aangezien de pomp aan vele eisen moet voldoen. Eens de pompkeuze vast lag, kon er begonnen worden met het eigenlijke ontwerp. De grote van de rotor, een wijze van remmen, een manier van energieoverbrenging, de bouw van de toren e.d. Tot slot zijn er uitgebreid technische tekeningen gemaakt van geheel de constructie.

Inhoudstafel

VOORWOORD

OPDRACHTOMSCHRIJVING

SAMENVATTING

INHOUDSTAFEL

SYMBOLENLIJST

FIGUREN

WINDENERGIE IN HET ALGEMEEN	1
Energie in de wind	1
Energie uit de wind	2
Beschrijving van een werkelijk profiel	6
De snellopendheid	6
De schijnbare of resulterende windrichting	6
Enkele hoeken	10
Bespreking van de krachten op wieken	11
VERSCHILLENDE WINDMOLENS	14
Mogelijke verschillen tussen de rotoren	14
De asrichting	14
Het aandrijfprincipe	14
Bespreking van enkele soorten windmolens	15
Savoniusrotor	15
De Darrius-rotor	16
Amerikaanse windmolen	17
Langzaamlopende molen met wieken	18
Snelloper	19
Bespreking van de windmolen	20

HET THEORETISCHE ONTWERP	24
De pomp	24
De rotor	27
Afmetingen van de rotor	27
Remmen van de rotor	29
Berekening van de krachten werkzaam op de rotor	38
De assen	40
De dikte van de assen	40
Overbrenging van de verticale rotoras naar de horizontale pompas	41
De lagers	42
De rotor	42
De pomp	46
De fundering	47
De toren	50
De bouten	54
Kostprijs	55
BOUWWIJZE	56
De pomp	56
De toren	58
De Savoniusrotor	59
De gehele constructie	60
BESLUIT	62
BIBLIOGRAFIE	63

Symbolenlijst

a	=	de ruwheidfactor
d'	=	de ontwerpdiameter in mm
f_L	=	de levensduurfactor
f_n	=	de toerentalfactor
m'	=	het massadebiet in kg/s
m	=	de massa in kg
n_r	=	de omwentelingssnelheid van de rotor in omw/s
p	=	de druk in Pa
v	=	de windsnelheid in m/s
v_H	=	de snelheid op een hoogte van 10 m
v_L	=	de snelheid op hoogte kleiner dan 10 m

A	=	het rotoroppervlak in m ² .
C_{eis}	=	het vereiste dynamische draaggetal in kN
C_p	=	de vermogenscoëfficiënt
D_r	=	de diameter van de rotor in m.
F	=	de kracht in N
F_a	=	de axiale belasting in N
F_c	=	de centrifugaal kracht in N.
F_r	=	de radiale belasting in N
F_t	=	de kettingtrekkracht in N
F_D	=	de driftkracht in N
F_L	=	de liftkracht in N
F_v	=	eigengewicht van de rotor in N
K_A	=	de bedrijfsfactor
L_{10}	=	de nominale levensduur in 10 ⁶ omw
L_{10h}	=	de vereiste levensduur in uren
M_m	=	het moment van de molen in Nm
P	=	de dynamische lagerbelasting in N.
P_w	=	het vermogen in de wind in W
P_R	=	het vermogen in de rotor in W
$P_{P\eta}$	=	het nuttige pompvermogen in W
Q	=	het debiet in L/min
Y_0	=	de axiale factor
W_x	=	het weerstandsmoment tegen buiging in m ³

α	=	de aanstroomhoek
λ	=	de snellopendheid.
η	=	het rendement
ρ_L	=	de soortelijke massa van lucht in kg/m ³
ρ_w	=	de soortelijke massa van water in kg/m ³
σ_{bD}	=	de genormaliseerde spanning in N/mm ²
σ_{maxb}	=	de maximale spanning op de pen
ω	=	de hoeksnelheid in rad/s.
φ	=	de instelhoek
ψ	=	de hellingshoek

Figuren

- Figuur 1 : het verloop van de luchtstromingsbuis*
- Figuur 2 : verschillende wiekprofielen*
- Figuur 3 : de snellopendheid*
- Figuur 4 : de weergave van de schijnbare windrichting*
- Figuur 5 : de schijnbare wind*
- Figuur 6 : de schijnbare wind*
- Figuur 7 : weergave van de hoekverdraaiing over de lengte van de wiek*
- Figuur 8 : enkele hoeken grafisch voorgesteld*
- Figuur 9 : de lift- en weerstandskracht*
- Figuur 10 : de aanstroomhoek, de lift- en driftkracht*
- Figuur 11 : de Savoniusrotor*
- Figuur 12 : een driebladige Darriusrotor*
- Figuur 13 : Amerikaans typen windmolen*
- Figuur 14 : de langzaamlopende molen*
- Figuur 15 : de snellopende windmolen*
- Figuur 16 : de doorsnede van de Savoniusrotor*
- Figuur 17 : weergave van de krachten van het Magnus-effect op een draaiende rotor*
- Figuur 18 : voorstelling van het rotor proefschip "Buckau"*
- Figuur 19 : invloed van het Magnus-effect op een Savoniusrotor*
- Figuur 20 : de vermogenscoëfficiënt van een Savoniusrotor*
- Figuur 21 : de touwpomp*
- Figuur 22 : de windkaart*
- Figuur 23 : de terreingesteldheid; ruwheidfactor van een landschap*
- Figuur 24 : de waterrem*
- Figuur 25 : weergave van de krachten op de remplaat*
- Figuur 26 : weerstandscoefficiënten*
- Figuur 27 : weergave van de bepalende elementen bij de centrifugaal rem*
- Figuur 28 : de krachten op de rotor*
- Figuur 29 : eigenschappen van enkele lagers*
- Figuur 30 : schematische weergave voor de berekening van de fundering*
- Figuur 31 : afmetingen van de pen*

Windenergie in het algemeen

In dit hoofdstuk wordt bepaald hoeveel energie er in de wind aanwezig is en hoeveel van deze energie door een windmolen kan opgenomen worden. Verder worden enkele theoretische aspecten over windmolens besproken nl. de schijnbare wind, verschillende hoeken en de krachten werkzaam op een wiek.

Energie in de wind

De energie die in de wind zit kan men berekenen m.b.v de formule van de kinetische energie.

$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

Hierin is :

- E = de energie in de wind aanwezig uitgedrukt in J
- m = de massa in kg
- v = de windsnelheid in m/s

Deze energie moet omgezet worden naar vermogen, daarom moet er gedeeld worden door de tijd. De energie uitgedrukt per seconde geeft het vermogen.

$$P_w = \frac{1}{2} \times m' \times v^2$$

Hierin is:

- P_w = het in de wind aanwezige vermogen uitgedrukt in W
- m' = het massadebiet in kg/s
- v = de windsnelheid in m/s

Het massadebiet is de massa lucht die per seconde door de rotor gaat. Deze kan berekend worden door de dichtheid van de lucht te vermenigvuldigen met het volumedebiet.

$$m' = \rho_L \times Q$$

$$m' = \rho_L \times A \times v$$

Hierin is:

- ρ_L = de soortelijke massa van lucht in kg/m³
- v = de windsnelheid in m/s
- A = het rotoroppervlak in m²
- m' = het massadebiet in kg/s
- Q = het volumedebiet in m³/s

Het vermogen van de wind kan als volgt neergeschreven worden.

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho_L \times A \times v \times v^2$$

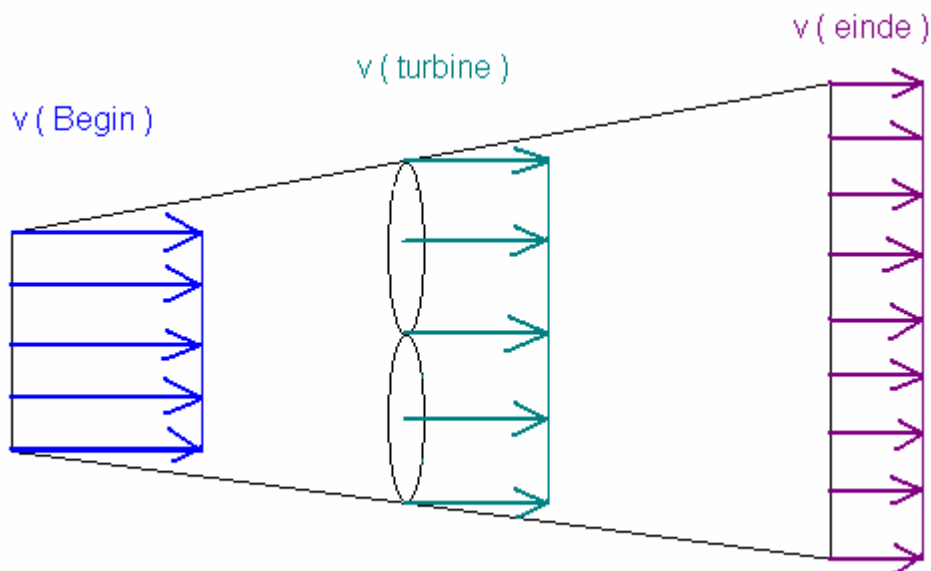
$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho_L \times A \times v^3$$

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho_L \times \pi \times R^2 \times v^3$$

De windsnelheid is de term die het vermogen van de wind het zwaarst beïnvloedt. Een kleine toename van de windsnelheid heeft een sterke stijging van het vermogen tot gevolg.

Bovenstaande formule geeft het vermogen van de wind weer, geen windmolen op aarde is in staat al dit vermogen aan de wind te onttrekken. Moest dit wel het geval zijn, zou het achter de windmolen windstil moeten zijn. Dit wil zeggen dat alle deeltjes voor de wieken tot stilstand zouden moeten komen, zich daar ophopen en een grote overdruk veroorzaken.

Energie uit de wind



Figuur 1: het verloop van de luchtstromingbuis

Hoeveel van de windenergie kan een windmolen dan wel opnemen? Bezie hiervoor de stroombuis uit figuur 1.

De wind heeft een bepaalde snelheid voor de molen, een windmolen doet de windsnelheid afnemen. Achter de windmolen heerst een windsnelheid die kleiner is dan ervoor. Deze afname is lineair verondersteld, dit om de berekening te vereenvoudigen. Het lineair afnemen van de snelheid heeft volgens de continuïteitswet tot gevolg dat de stromingsbuis, ook venturi genaamd, lineair divergeert. De graad van divergeren wordt weergegeven door de divergentiecoëfficiënt a . De stromingsbuis wordt groter omdat de massa die ergens binnen stroomt er ook moet uitstromen. Als de snelheid daalt dient de buis te verbreden om de massa af te voeren.

In formulevorm gegoten geeft dit,

$$A_b \times v_b \times \rho_L = A_e \times v_e \times \rho_L$$

Hierin is:

- A_b = de begindoorsnede van de venturi in m^2
- A_e = de einddoorsnede van de venturi in m^2
- v_b = de luchtsnelheid in het begin van de stromingsbuis in m/s
- v_e = de luchtsnelheid in het einde van de stromingsbuis in m/s
- ρ_L = de luchtdichtheid in kg/m^3

Het vermogen dat een molen onttrekt aan de wind wordt berekend door het verschil te nemen van het vermogen voor en achter de turbine. Het vermogen moet uitgedrukt worden in functie van één enkele snelheid en een divergentiecoëfficiënt a (zie figuur 1).

$$v_b = v$$

$$v_t = v \times (1 - a)$$

$$v_e = v \times (1 - 2a)$$

Hierin is :

- v_b = de snelheid voor de turbine in m/s
- v_t = snelheid ter hoogte van de turbine in m/s
- v_e = de snelheid achter de turbine in m/s
- a = de divergentiecoëfficiënt

Het vermogen op het einde en het begin van de stroombuis worden berekend met volgende formules.

$$P_b = \frac{1}{2} \times m' \times v_b^2$$

$$P_e = \frac{1}{2} \times m' \times v_e^2$$

$$P_b = \frac{1}{2} \times m' \times v^2$$

$$P_e = \frac{1}{2} \times m' \times v^2 \times (1 - 2a)^2$$

$$P_R = P_b - P_e$$

$$P_R = \frac{1}{2} \times m' \times v^2 \times [1 - (1 - 2a)^2]$$

$$P_R = \frac{1}{2} \times m' \times v^2 [1 - (1 - 4a + 4a^2)]$$

$$P_R = \frac{1}{2} \times m' \times v^2 (4a - 4a^2)$$

$$P_R = 2 \times m' \times v^2 \times a \times (1 - a)$$

De formule die het massadebiet weergeeft is reeds in het begin van dit hoofdstuk opgesteld.

$$m' = \rho_L \times A \times v$$

De windsnelheid en het oppervlak moeten op één en dezelfde doorsnede aanschouwd worden. Het eenvoudigste is de doorsnede van de rotor te beschouwen, A stelt dan namelijk de oppervlakte van de rotor voor. De snelheid v stelt de snelheid ter hoogte van de turbine voor.

$$m' = \rho_L \times A \times v_t$$

$$m' = \rho_L \times A \times v \times (1 - a)$$

$$P_R = 2 \times m' \times v^2 \times a \times (1 - a)$$

$$P_R = 2 \times \rho_L \times A \times v \times (1 - a) \times v^2 \times a \times (1 - a)$$

$$P_R = 2 \times \rho_L \times A \times v^3 \times a \times (1 - a)^2$$

Dit is steeds een positief getal, de omgeving levert energie aan het stelsel, niet omgekeerd. Dit is het maximale theoretische vermogen van een windmolen. Als dit vermogen gedeeld wordt door het vermogen in de wind, is het maximale rendement van een theoretische windmolen gevonden.

$$\eta = \frac{P_R}{P_W}$$

$$\eta = 4a (1 - a)^2$$

$$\eta = 4a (1 - 2a + a^2)$$

$$\eta = 4a - 8a^2 + 4a^3$$

Deze functie van a gaat naar een extremum als de afgeleide ($\frac{d\eta}{da}$) nul wordt.

$$\frac{d\eta}{da} = 4 - 16a + 12a^2 = 0$$

Deze eenvoudige tweedegraads vergelijking wordt opgelost door de discriminant te bepalen.

$$D = 16^2 - 4 \times 4 \times 12$$

$$D = 64$$

$$a_1 = \frac{16 + 8}{24} = 1$$

$$a_2 = \frac{16 - 8}{24} = \frac{1}{3}$$

Als a ingevuld wordt in de formule van het rendement, wordt het rendement van de windmolen gevonden.

$$\eta = 4 \times 1 - 8 \times 1^2 + 4 \times 1^3$$

$$\eta = 0$$

$$\eta = 4 \times \frac{1}{3} - 8 \times \left(\frac{1}{3}\right)^2 + 4 \times \left(\frac{1}{3}\right)^3$$

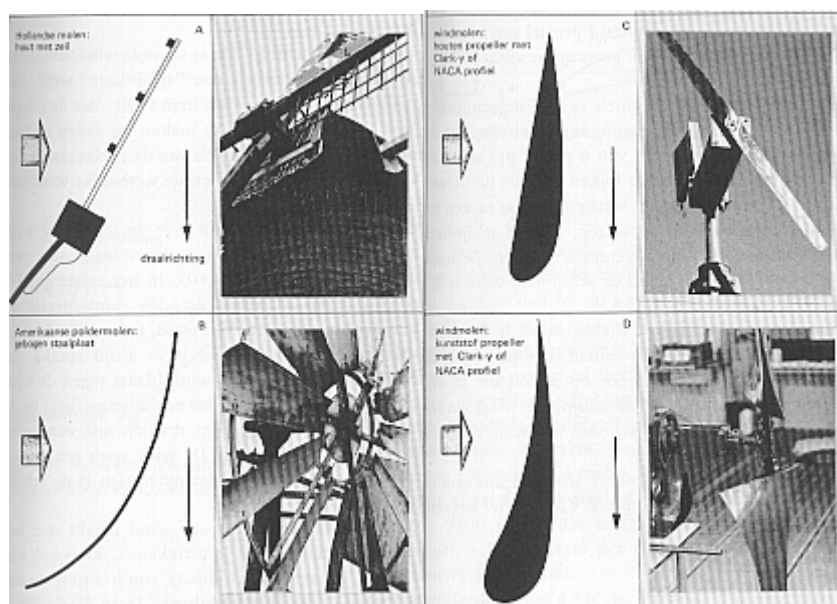
$$\eta = \frac{16}{27}$$

Het maximale theoretische rendement van een windmolen bedraagt $\frac{16}{27}$ en wordt de Betz-limiet genoemd.

Uit de praktijk blijkt dat geen enkele rotor dit rendement haalt, alle rotoren hebben een lager rendement. Daarom wordt er een nieuwe factor ingevoerd die bepaalt welk percentage van het in de wind aanwezige vermogen, ook effectief door de rotor kan worden opgenomen. Deze factor noemt de vermogensfactor en wordt met C_p aangeduid.

$$P_R = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_p \times v^3 \times A \quad (\text{vergelijking 1})$$

Windmolens onderscheiden zich door een verschillend wiekprofiel. Met een wiekprofiel wordt de vorm van de doorsnede van een wiek bedoeld. Het profiel bepaalt de aërodynamische eigenschappen van een wiek. In windtunnels meet men de krachten die op een wiek werken. Dankzij deze proefnemingen zijn er profielen ontwikkeld met zeer goede aërodynamische eigenschappen. In figuur 2 zijn dat de twee rechtse.

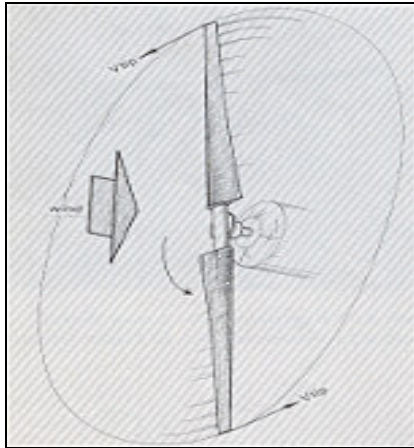


Figuur 2: verschillende wiekprofielen

Beschrijving van een werkelijk profiel

De snellopendheid

De snellopendheid is de verhouding van de maximale wieksnelheid op de windsnelheid. De maximale wieksnelheid is de snelheid ter hoogte van het uiteinde van de wiek, de tip genaamd, dit is dan ook de tipsnelheid genaamd.



Figuur 3: de snellopendheid

$$\lambda = \frac{V_{\text{tip}}}{v}$$

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{v}$$

$$\lambda = \frac{\omega \times D_r}{2 \times v}$$

Hierin is:

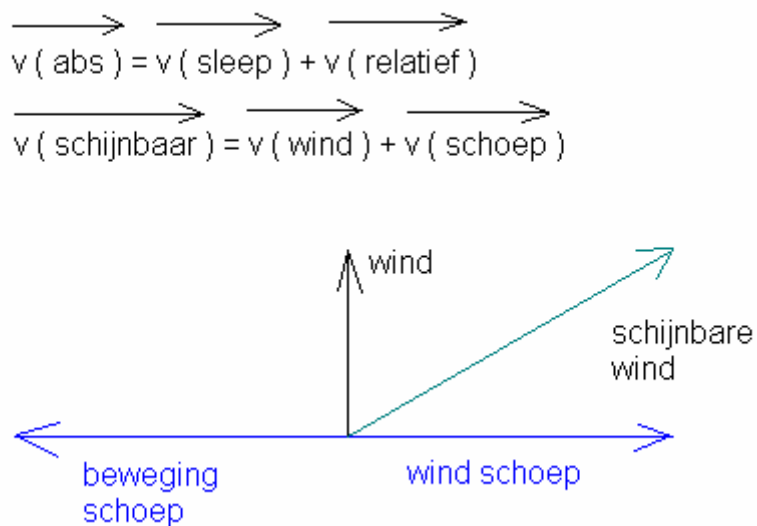
- λ = de snellopendheid
- D_r = de diameter van de rotor in m
- v = de windsnelheid in m/s, deze is in figuur 3 weergegeven door de grootte dikke pijl
- ω = de hoeksnelheid in rad/s

De schijnbare of resulterende windrichting

De grootte en richting van de snelheid van de lucht zoals een willekeurig punt dit ervaart hangt niet enkel af van de windsnelheid, maar ook van de beweging van de wieken. Een punt op een wiek ervaart een samengestelde wind, deze is de resultante van de eigenlijke windsnelheid en de snelheid van de wieken. Het is belangrijk te weten dat een punt op de wieken een beweging naar links voelt als komt de wind van rechts. Dit verklaart waarom in volgende figuren de draairichting van de wiek naar links getekend is, maar de zin van de wind naar rechts is gericht.

Er is een samengestelde beweging die bestaat uit een sleep, een absolute en een relatieve beweging. Welke beweging van onze molen overeenkomt met welke van voorgaande bewegingen wordt beredeneerd, door een vergelijking te maken met een eenvoudiger geval. Als een schipper stilstaat op een varend schip, dan ziet een stilstaande waarnemer van op de oever de schipper nog bewegen. Dit is de type-uitleg om te duiden dat het schip een sleepbeweging maakt. In ons geval kan dit zo niet duidelijk gemaakt worden aangezien er niet twee bewegingen werkzaam zijn, maar wel met een beweging en wind. Daarom wordt ook het typevoorbeeld herleid naar een beweging en wind, om zo een goede analogie te vinden met onze windmolen. Stel: het is windstil en onze schipper staat stil op een schip, dan voelt hij nog steeds de wind afkomstig van de beweging van het schip (de schipper beweegt niet, maar voelt nog wel wind). Als de wiek van onze rotor niet beweegt, dan voelt hij de wind nog wel. De windsnelheid kan analoog beschouwd worden met de snelheid van het schip, het zijn dus beiden sleepsnelheden. Als de schipper nu met zijn schip meewandelt, dan zal hij een sterkere wind voelen. Een gelijke situatie doet zich voor bij de wieken, als deze bewegen ervaren ze ook een sterkere wind. De beweging van de schoepen t.o.v. de wind is een relatieve beweging.

Een absolute snelheid is te beschouwen is als een vectoriële som van de sleep en de relatieve snelheid. Schematisch weergegeven geeft dat volgende figuur:



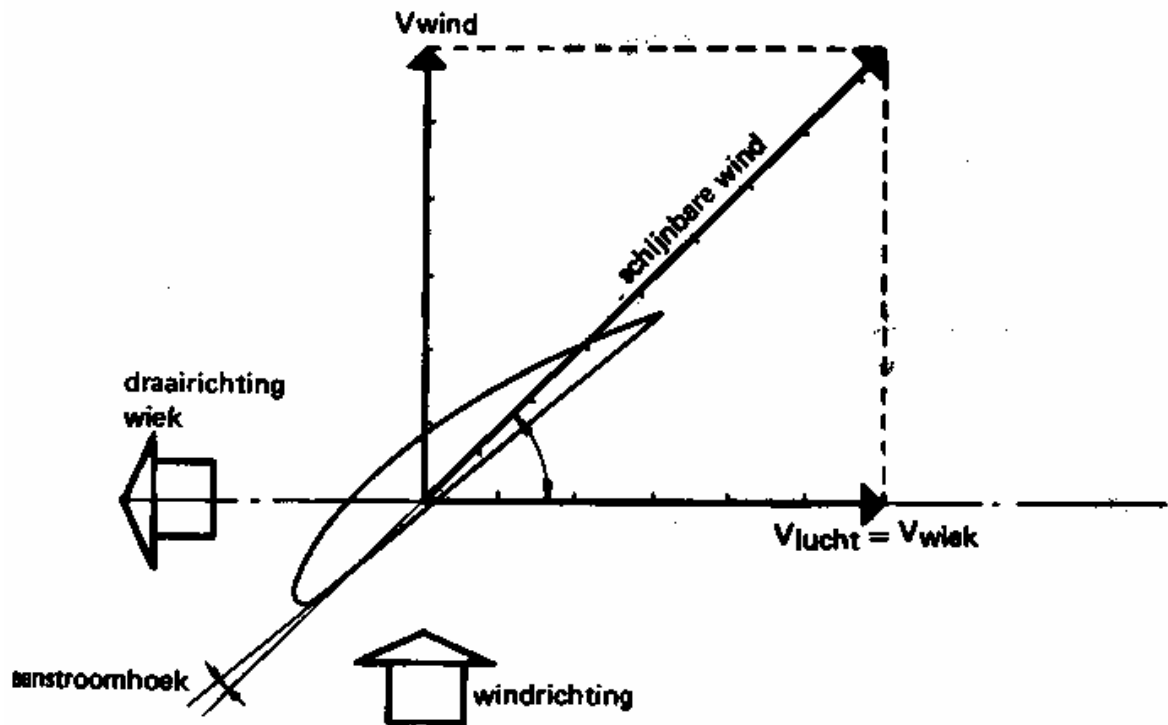
Figuur 4: de weergave van de schijnbare windrichting

Stel dat de wiek een snelheid heeft van 6 m/s en de wind ook. Dan is het vanzelfsprekend dat de hoek tussen de schijnbare windrichting en de draairichting van de wieken gelijk is aan

$$\text{Bgtg} \left(\frac{6}{6} \right) = 45^\circ$$

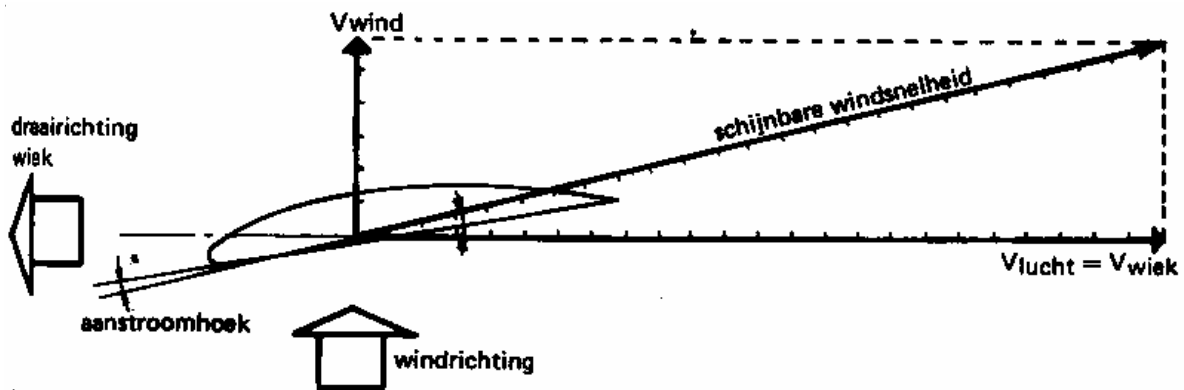
en de snelheid van de schijnbare- of resulterende wind is

$$\sqrt{6^2 + 6^2} = 8,5 \text{ m/s.}$$



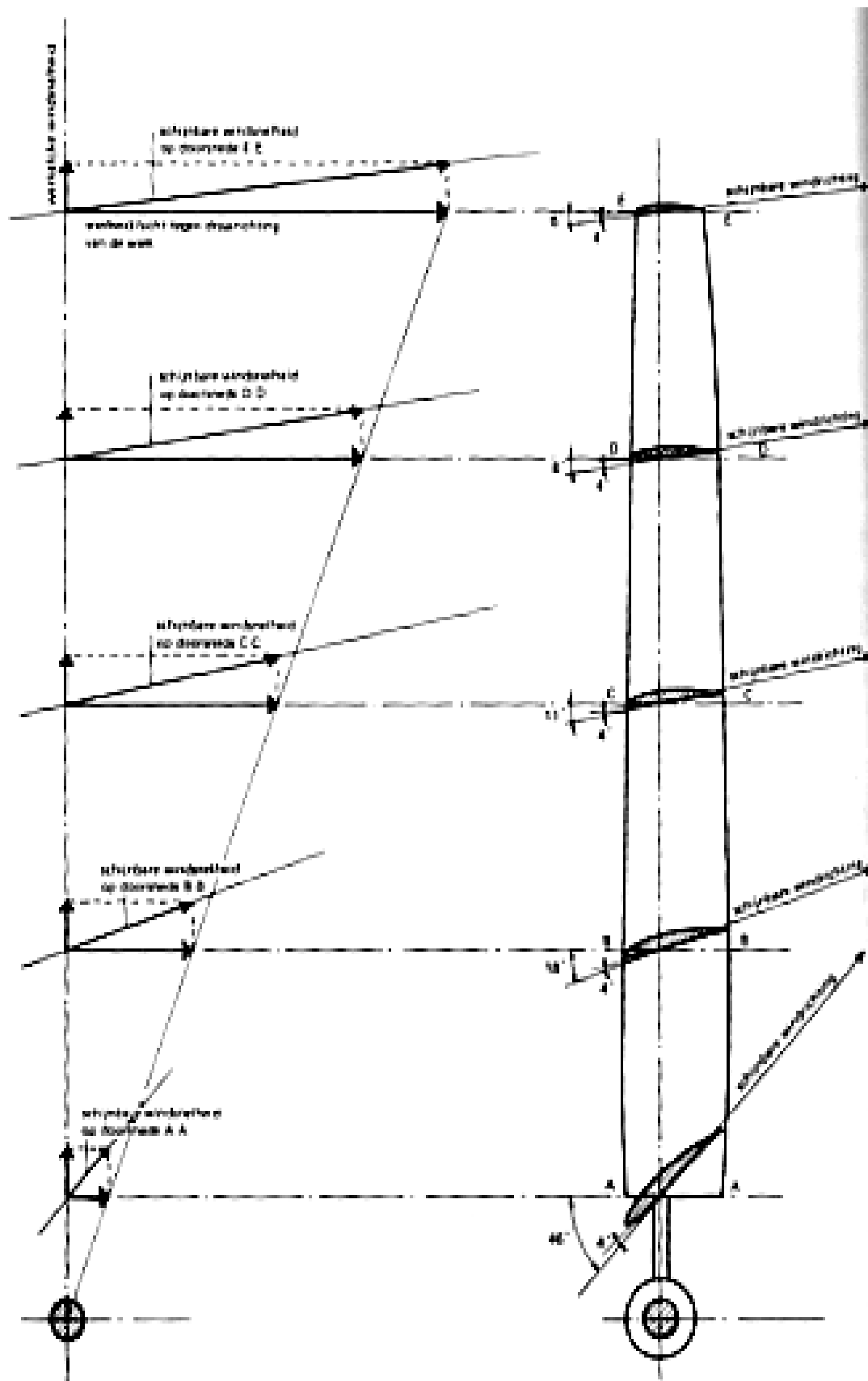
Figuur 5: de schijnbare wind

Als de wiel snelheid 24m/s bedraagt, en de windsnelheid is 6m/s, dan bedraagt de schijnbare wind bijna 25m/s en de hoek komt overeen met 14° .



Figuur 6: de schijnbare wind

De snelheid van de schijnbare wind is niet op elke doorsnede van de wiel gelijk. Doordat de wiel snelheid naar de tip toe steeds groter wordt, zal de snelheid van de schijnbare wind naar de tip toe ook groter worden en de hoek met het vlak van de draaiing kleiner. De hoek tussen de schijnbare wind en de koorde wenst men op elke doorsnede constant te houden. Dit kunnen we bereiken door de wiel te torsen, als het ware te draaien zoals een wenteltrap. Op de figuur 7 is te zien dat men erin slaagt de zogenaamde aanstromingshoek constant op 4° te houden. De figuur is niet zo zuiver weergegeven, maar de figuur bereikt zijn doel wel, nl. het torsen van de vleugel weergegeven. Bij dit profiel is een aanstromingshoek van 4° het gunstigst gebleken, dit om een maximaal aërodynamisch rendement te bekomen. De andere hoek die wel varieert, is de instelhoek φ . Het verschil tussen beide is de hoek β , $\varphi = \alpha + \beta$. Ter informatie de instelhoek gaat van 46° aan de wiel wortel tot 6° aan de tip.

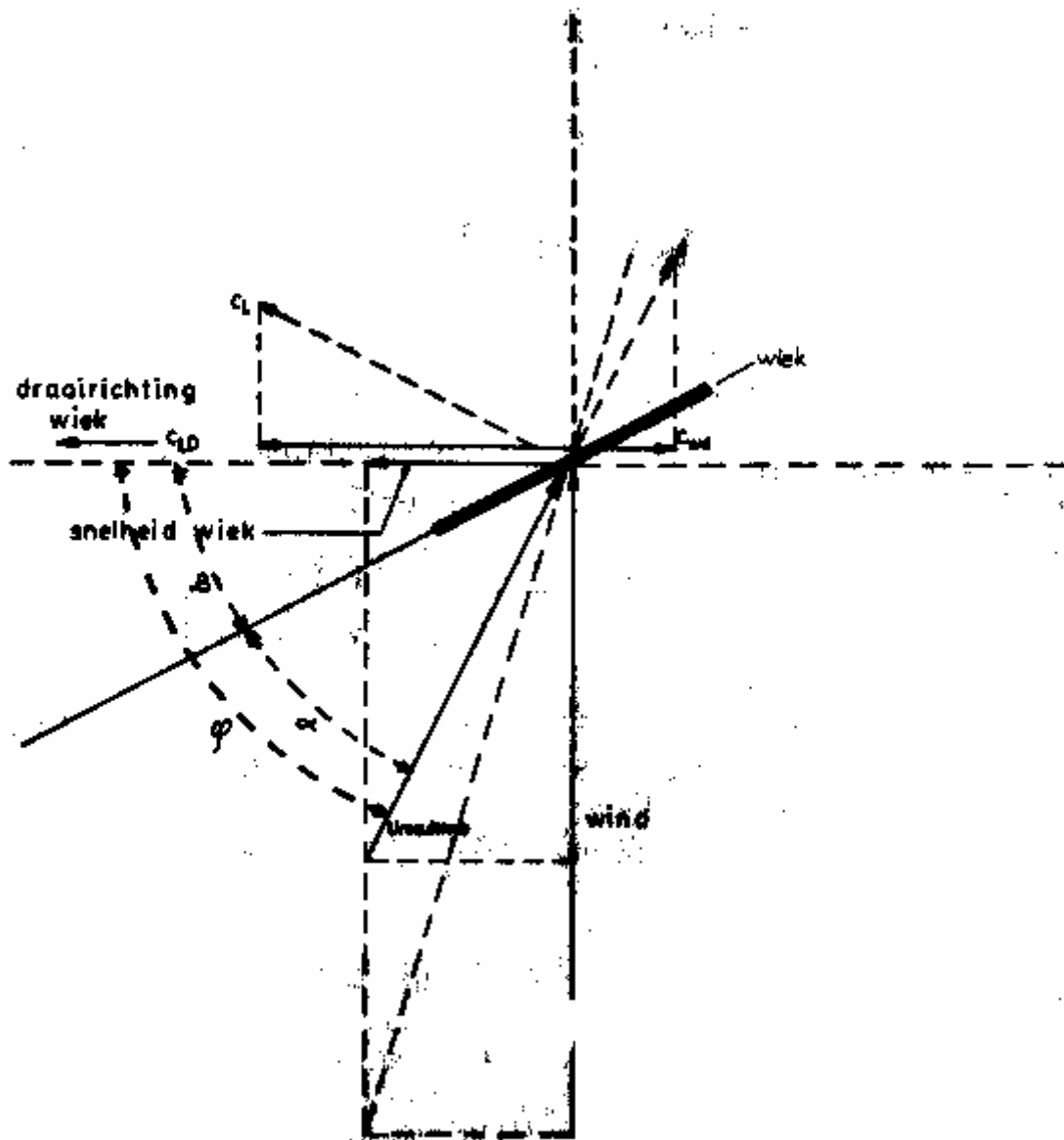


Figuur 7: weergave van de hoekverdraaiing over de lengte van de wiek

Enkele hoeken

- De aanstroomhoek of invalshoek α , dit is de hoek tussen de wiek en de resulterende windsnelheid.
- De instelhoek φ , dit is de hoek tussen het draaivlak van de wieken en de resulterende windsnelheid.
- De hoek β , dit is de hoek tussen de wiek en het draaivlak van de wieken.

Ter verduidelijking figuur 8, hier is men vergeten dat een beweging naar links een wind naar rechts veroorzaakt.



Figuur 8: enkele hoeken grafisch voorgesteld.

Bespreking van de krachten op wieken

De kracht op een wiek wordt veroorzaakt door luchtdrukverschillen aan de boven en onderzijde van het profiel. Als de rechtse twee profielen van figuur 3 beschouwd worden, valt dadelijk op dat de bovenzijde van het profiel langer is dan de onderzijde; de lucht moet er een langere weg afleggen. De windsnelheid zal aan de bovenzijde groter zijn dan aan de onderzijde. Het is door dit snelheidsverschil dat volgens de wet van Bernouilli er een drukverschil ontstaat tussen boven en onderzijde van het profiel.

$$p + \frac{1}{2} \times \rho_L \times v^2 + h \times \rho_L \times g = \text{constant}, \quad (= \text{Wet van Bernouilli})$$

De laatste term die de potentiële energie weergeeft mag weggelaten worden, aangezien de dichtheid constant is en er geen hoogte overwonnen wordt.

of,

$$p_o + \frac{1}{2} \times \rho_L \times v_o^2 = p_b + \frac{1}{2} \times \rho_L \times v_b^2$$

Hierin is:

- p_o = de druk aan de onderzijde in Pa
- v_o = de lichtsnelheid aan de onderzijde in m/s
- p_b = de druk aan de bovenzijde in Pa
- v_b = de lichtsnelheid aan de bovenzijde in m/s
- ρ_L = de dichtheid van de lucht in kg/m³

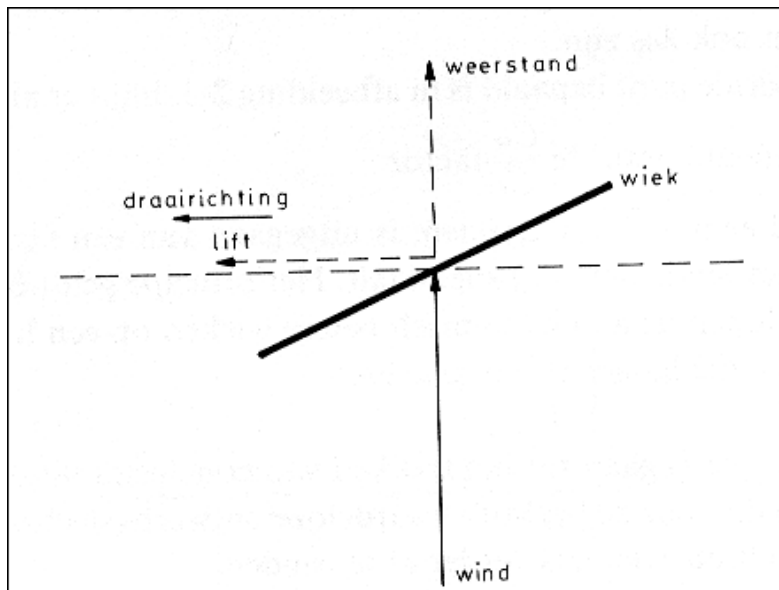
Hieruit blijkt dat als de lichtsnelheid aan de bovenzijde groter is dan die aan de onderzijde, de druk aan de bovenzijde kleiner zal zijn dan die aan de onderzijde. Er ontstaat een onderdruk aan de bovenzijde en een overdruk aan de onderzijde. Een drukverschil Δp en een bepaald vleugeloppervlak A resulteert in een kracht F .

$$F = \Delta p \times A$$

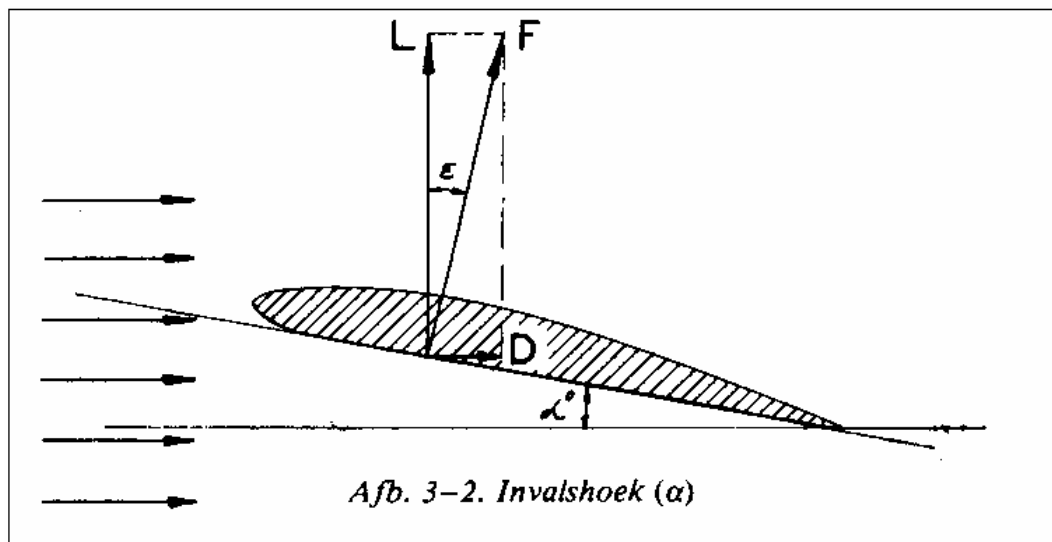
Hierin is:

- Δp = het drukverschil in Pa
- A = het vleugeloppervlak in m²
- F = de kracht in N

Hoe groter het luchtdrukverschil tussen de onder en bovenzijde, hoe groter is de kracht. Deze kracht is de resultante van twee loodrecht op elkaar staande krachten. Er is een liftkracht L en een weerstand - of driftkracht D . De liftkracht staat steeds loodrecht op de stromingsrichting van de schijnbare wind, de weerstandskracht daarentegen staat steeds in de richting van de resulterende wind. Dit is weergegeven in figuur 9 men heeft het hier foutief over wind i.p.v. resulterende wind.



Figuur 9: de lift en weerstandskracht



Figuur 10: de aanstroomhoek, de lift en driftkracht

Op een goed aërodynamisch profiel werken grote liftkrachten, die de vleugel dan doen draaien, en kleine weerstandskrachten. Deze weerstandskracht houdt men best zo laag mogelijk omdat ze door gans de constructie opgevangen moet worden.

Er is al afgeleid dat,

$$P_R = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_p \times v^3 \times A$$

Dit vermogen kan omgezet worden naar een kracht m.b.v. volgende formule $P = F \cdot v$
 Vermogen is kracht vermenigvuldigd met snelheid, of kracht is vermogen gedeeld door snelheid. Dit geeft dan volgende formule:

$$F_R = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_p \times v^2 \times A \quad (\text{vergelijking 2})$$

Evenals de kracht F_R is ook deze factor C_p te ontbinden in een factor C_L evenredig met de liftkracht en een factor C_D evenredig met de driftkracht.

$$C_L = \frac{L}{F}$$

$$C_D = \frac{D}{F}$$

$$F_L = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_L \times v^2 \times A$$

$$F_D = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_D \times v^2 \times A$$

(vergelijking 3)

Verskillende windmolens

In dit hoofdstuk worden enkele windmolens kort besproken. De keuze van de windmolen wordt voornamelijk geïnspireerd door de eenvoud van de constructie. In een verder hoofdstuk moet gans de vervaardiging van de windmolen uit de doeken gedaan worden. Het is vanzelfsprekend dat in functie van de praktische realisatie van dit ontwerp een eenvoudig model gekozen wordt. Nadat een type van windmolen is gekozen wordt deze windmolen verder uitgediept.

Mogelijke verschillen tussen de rotoren

De rotoren kunnen op verschillende manieren ingedeeld worden.

De asrichting

- horizontaal
- verticaal

Windmolens met een verticale as werken bij alle windrichtingen, waarbij alle wieken of bladen een constante breedte hebben. Het “energieomzettingssysteem” kan eenvoudig op de grond gemonteerd worden, dit in het verlengde van de rotoras, wat een groot voordeel is.

De windmolens met een horizontale as daarentegen moeten in de wind gedraaid worden, de wieken kunnen zowel een constante als een variabele dikte hebben, en het systeem voor de energieomzetting moet boven in de mast geplaatst worden, of via een speciale overbrenging naar beneden gebracht worden. Er wordt gekozen voor een molen met een verticale as.

Het aandrijfprincipe

- weerstandstype
- liftkrachttype

Voor het weerstandstype is kenmerkend, dat de wieken als platen werken, die vrijwel loodrecht op de resulterende windrichting staan, zodat de luchtstroomweerstand de molen aandrijft. Dit alles omdat de wind als het ware de wieken tracht weg te duwen.

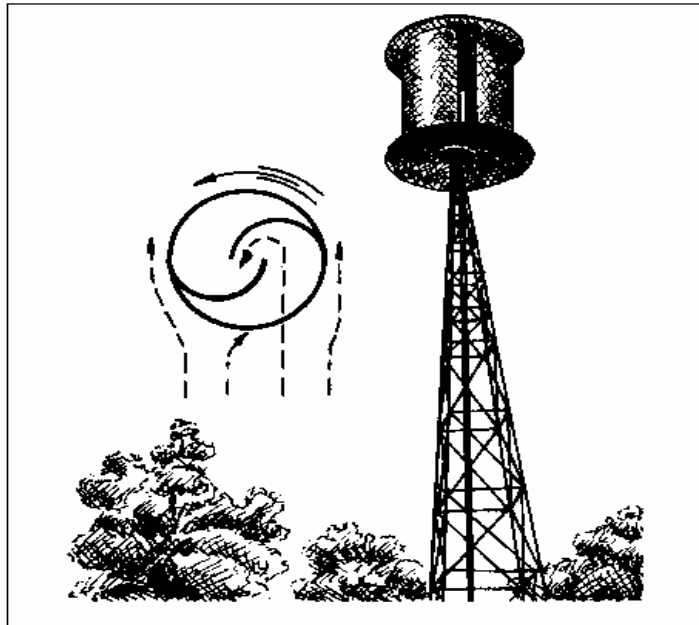
Bij molens van het liftkrachttype werken de bladen als vliegtuigvleugels met een geringe weerstand en een grote liftkracht. Dit soort van wieken vereist een veel hogere nauwkeurigheid en afwerkingsgraad dan de weerstandstype. Er wordt gekozen voor een windmolen werkzaam volgens het weerstandstype.

Bespreking van enkele soorten windmolens

Savoniusrotor

Weerstandsmolen

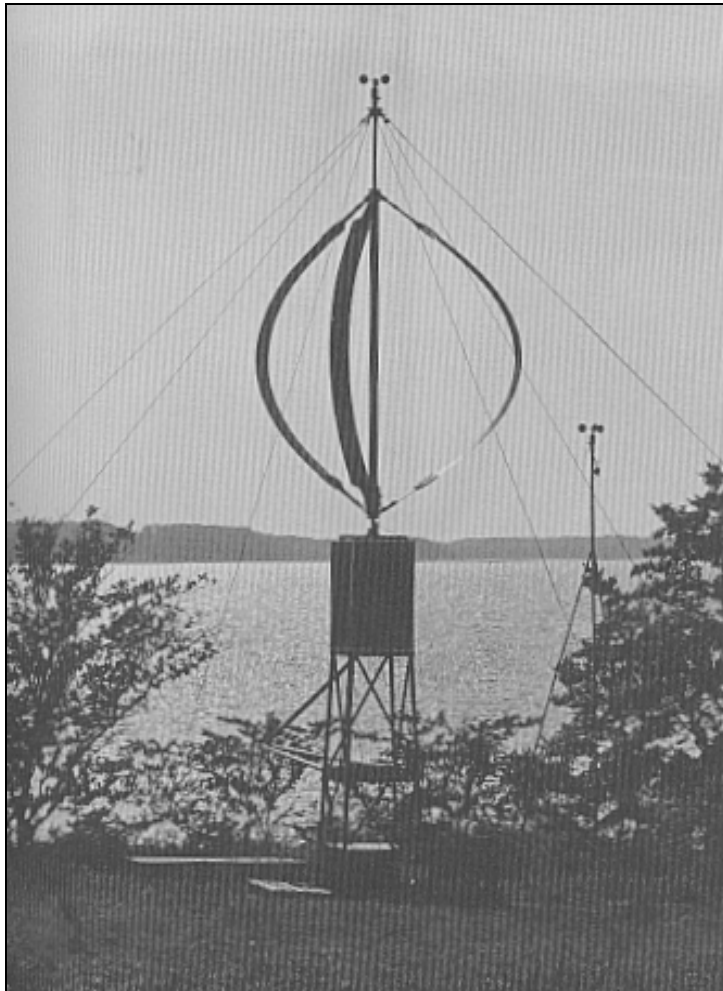
Verticale as



Figuur 11: de Savoniusrotor.

De Darriusrotor

Liftkracht molentype
Verticale as



Figuur12: een driebladige Darriusrotor

Amerikaanse windmolen

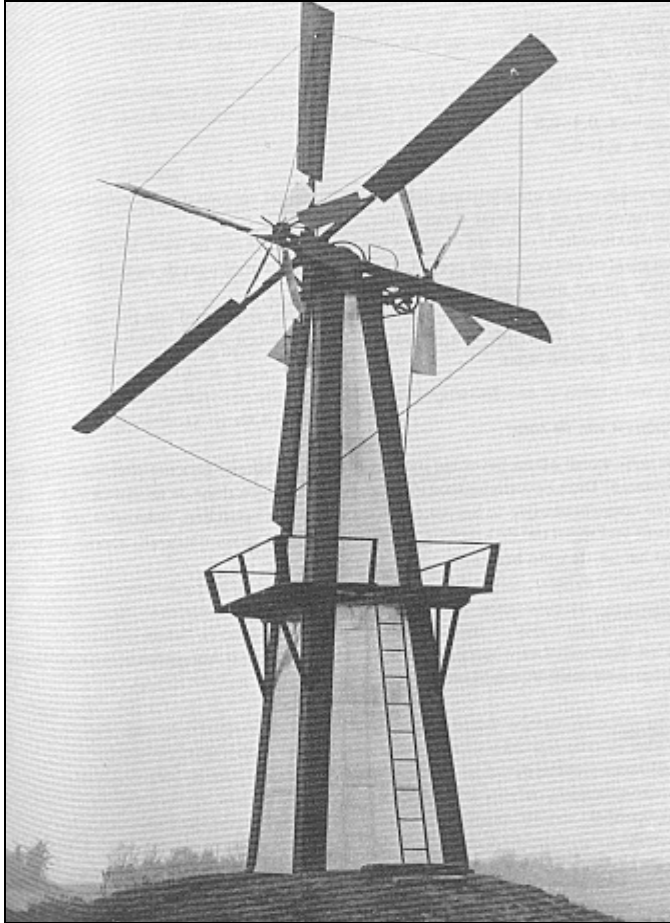
Liftkrachtmolen
Horizontale as



Figuur 13: Amerikaans type windmolen

Langzaamlopende molen met wieken

Liftkracht molentype
Horizontale as



Figuur14: de langzaamlopende molen.

Snelloper

Liftkracht molentype
Horizontale as



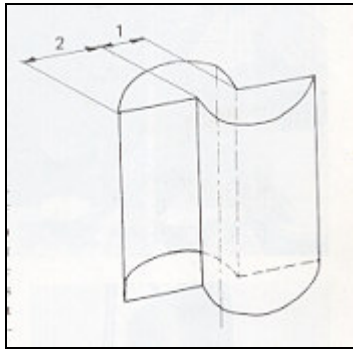
Figuur 15: de snellopende windmolen.

Bespreking van de windmolen

Er was reeds in het begin van dit hoofdstuk gesteld dat de windmolen een verticale as moest hebben en dat hij van het weerstandstype moest zijn. Enkel de Savoniusrotor voldoet aan deze eisen, daarom wordt deze gebruikt. Om te beginnen wordt de Savoniusrotor uitgebreider besproken.

Deze rotor kent enkele toepassingen. Zo staat hij bijvoorbeeld op gesloten vrachtwagens, als ventilator voor het laadruim, op huizen als ontluchting en op schepen. Bij voertuigen worden de rotoren aangedreven door de rijwind. De rotoren zelf drijven op hun beurt ventilatoren aan, die op dezelfde as gemonteerd zijn.

De Savoniusrotor ziet er zeer eenvoudig uit, maar is doorspekt met meer aërodynamische perfectie dan de uitvinder van de rotor (Savonius) wist. De rotor ziet er als volgt uit. De bladen bestaan uit twee halve cilinders, die symmetrisch om een as zijn geplaatst. Het is belangrijk dat de twee halve cilinders $\frac{2}{3}$ van diameter ten opzichte van elkaar verschoven worden zie figuur 16.



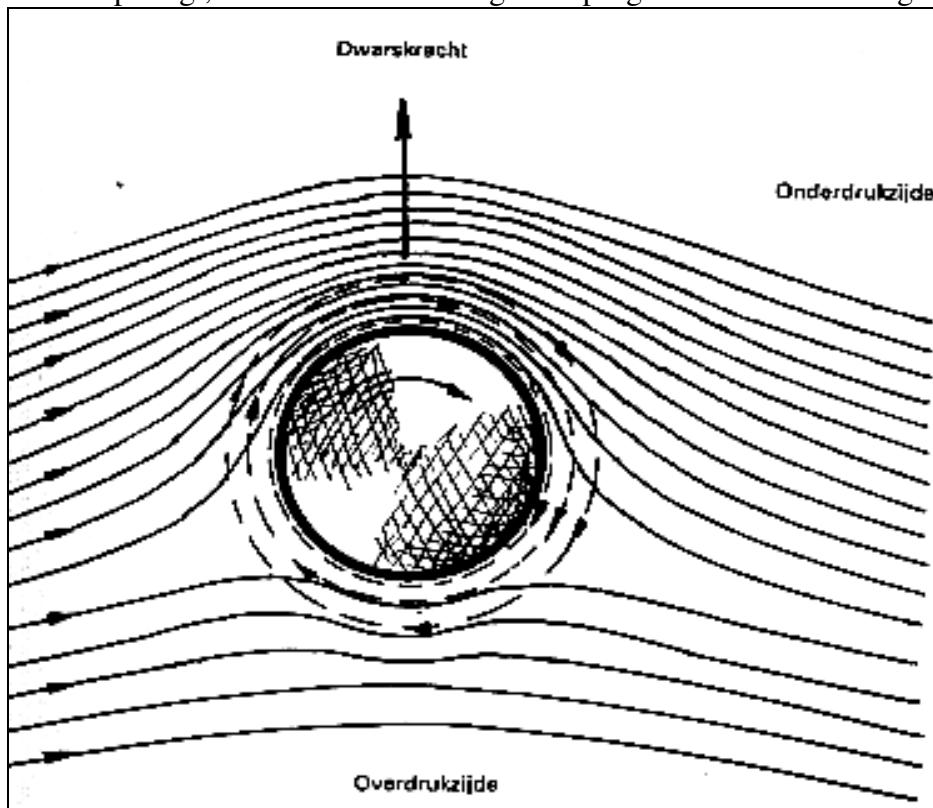
Figuur 16: de doorsnede van de Savoniusrotor

Dergelijke platen hebben de grootste weerstand wanneer de holle zijde naar de wind toe is gekeerd. Deze halve cilinders hebben de minste weerstand als de bolle zijde naar de wind toe is gekeerd. Dit verschil in weerstand drijft de molen aan. De wind blaast als het ware in de holle zijde en drijft zo de rotor aan. De Savoniusrotor is volledig onafhankelijk van de windrichting, al kan het soms gebeuren dat de rotor moeilijk start als de bladen elkaar overlappen. Dit euvel kan verholpen worden door enkele tweebladige rotoren te gebruiken. De bladen moeten ten opzichte van elkaar verdraaid zijn. De kracht op de rotoras zal in dat geval ook constanter zijn, zodat er ook een constantere snelheid verkregen wordt.

De Savoniusrotor werkte beter dan de uitvinder had berekend. Een verklaring hiervoor kwam er pas in de jaren 20, het bleek om het Magnus-effect te gaan.

Het Magnus-effect.

In 1852 had de natuurkundige Gustav Magnus (1802 – 1870) de invloed van wentelingen van afgeschoten projectielen op hun baan onderzocht. Hij stelde vast dat door de wentelingen een sterke zijdelingse kracht werd uitgeoefend op het projectiel. Dit Magnus-effect kon toen echter nog niet worden verklaard. In 1923 werden de onderzoeken in Göttingen herhaald en nu lukte het met behulp van de grenslaagtheorie van professor Prandtl een verklaring te vinden. De grenslaagtheorie zegt dat de luchtlaag in de buurt van een bewegend voorwerp dit voorwerp volgt, het kleef er a.h.w. tegen. Op figuur 17 wordt het Magnus-effect geïllustreerd.



Figuur 17: Weergave van de krachten van het Magnus-effect op een draaiende rotor

We hebben een roterende cilinder, deze zal de luchtlaag die tegen de cilinder aanligt meenemen. Aan de ene zijde van de cilinder werkt deze luchtlaag mee met de heersende windrichting, aan de andere zijde werkt ze de wind tegen. Het gevolg hiervan is dat er een verschil in windsnelheid ontstaat en bijgevolg een verschil in druk.

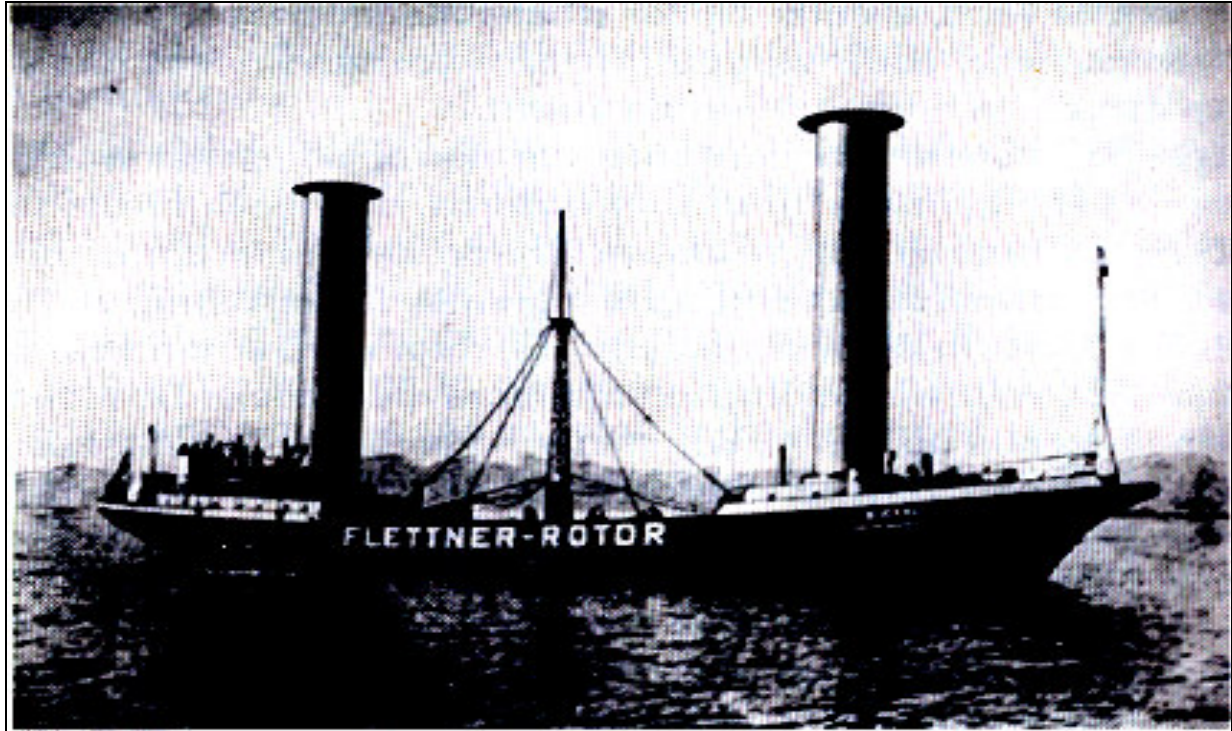
$$p_o + \frac{1}{2} \times \rho_L \times v_o^2 = p_b + \frac{1}{2} \times \rho_L \times v_b^2$$

Hierin is:

- p_o = de druk aan de onderzijde in Pa
- v_o^2 = de lichtsnelheid aan de onderzijde in m/s
- p_b = de druk aan de bovenzijde in Pa
- v_b^2 = de lichtsnelheid aan de bovenzijde in m/s
- ρ_L = de dichtheid van de lucht in kg/m³

Door dit drukverschil ontstaat er ook een kracht.

Toen men deze nieuwe kracht had ontdekt, was de ingenieur Anton Flettner zo verrast door de sterkte van deze kracht dat hij probeerde op deze wijze een schip aan te drijven. Hij rustte het schip uit met roterende cilinders in plaats van met zeilen. Er was namelijk gebleken in de windtunnel dat de projectievlakken, van zo'n naar Flettner genoemde rotor, de tienvoudige voortstuwkracht levert dan die van een overeenkomstig zeiloppervlak.



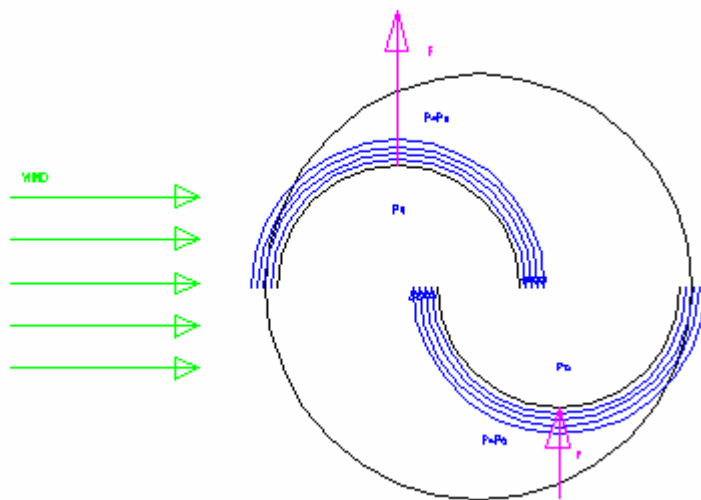
Figuur 18: Voorstelling van het rotor proefschip "Buckau"

Het grote experiment met het schip "Buckau" heeft de resultaten van de windtunnel bevestigd. Dat was een sensationeel succes, daarbij kwam dat de staande rotoren nauwelijks een grotere luchtweerstand hadden dan de touwen, masten en dergelijke meer van de klassieke zeilschepen. Bovendien lag het zwaartepunt van het rotorschip lager.

De rotorhoogte bedroeg 16,6 m en de diameter was 2,8m. De rotoren hadden voor hun draaiing een aandrijfvermogen van 5 kW nodig, maar leverden bij windkracht 6 hetzelfde vermogen als de meegevoerde dieselmotor van 89 kW. Windkracht 6 komt op zee echter zo vaak voor dat de dieselmotor haast nooit gebruikt diende te worden.

Het ontstijgt ons voorstellingsvermogen dat door het meenemen van een luchtlaag door middel van een gladde buis, zulke grote luchtdrukverschillen ontstaan die in staat zijn grote schepen aan te drijven. Men zou kunnen denken dat dit een voorbeeld is van een perpetuum mobile, een geringe aandrijving die een veel groter vermogen opwekt. Dit is niet het geval aangezien het vermogen niet aan de draaiende luchtlaag wordt onttrokken, maar wel aan het aanstromende windpotentieel.

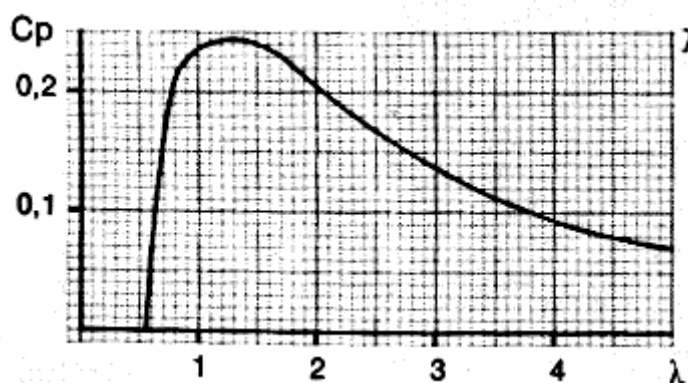
Concreet toegepast op een Savoniusrotor heeft het Magnus-effect volgende invloed.



Figuur 19: invloed van het Magnus-effect op een Savoniusrotor.

De grenslaagtheorie zegt dat de lucht een draaiend voorwerp zal volgen, de lucht kleeft ertegen. Ook hier zal dat het geval zijn, zoals op de figuur getekend, botst de wind aan de ene zijde met de grenslaag, aan de andere zijde werkt de wind mee met de grenslaag. De luchtsnelheid zal daardoor groter zijn dan de overheersende windsnelheid aan de bovenzijde. Hierdoor ontstaat er een onderdruk aan de bovenzijde, de atmosferische druk duwt het bovenste vat a.h.w. weg. Aan de onderzijde gebeurt het omgekeerde, daar heerst buiten de rotor een overdruk. Dit doet weer een drukverschil ontstaan, maar de vorm van het vat zorgt ervoor dat dit niet in een grote kracht resulteert.

In het begin van dit hoofdstuk is er gesproken over de vermogenscoëfficiënt die weergeeft welk percentage van de windenergie een molen kan onttrekken. Dit wordt weergegeven in een grafiek, de vermogenscoëfficiënt staat daar i.f.v. de snellopendheid.



Figuur 20: De vermogenscoëfficiënt van een Savoniusrotor.

Op de grafiek staat dat de windmolen een maximale vermogenscoëfficiënt van 2,4 heeft. In praktijk is een coëfficiënt van 0,18 realistischer.

Het theoretische ontwerp

Alvorens aan de berekening en realisatie van de windmolen te kunnen beginnen moet er eerst een pomp gekozen worden. De pomp keuze is bepalend voor de rest van de constructie. De grote van de rotor is afhankelijk van het vereiste vermogen, de constructie van de toren is afhankelijk van het soort pomp en het toerental van de pomp bepaalt of er een versnellingssysteem moet voorzien worden.

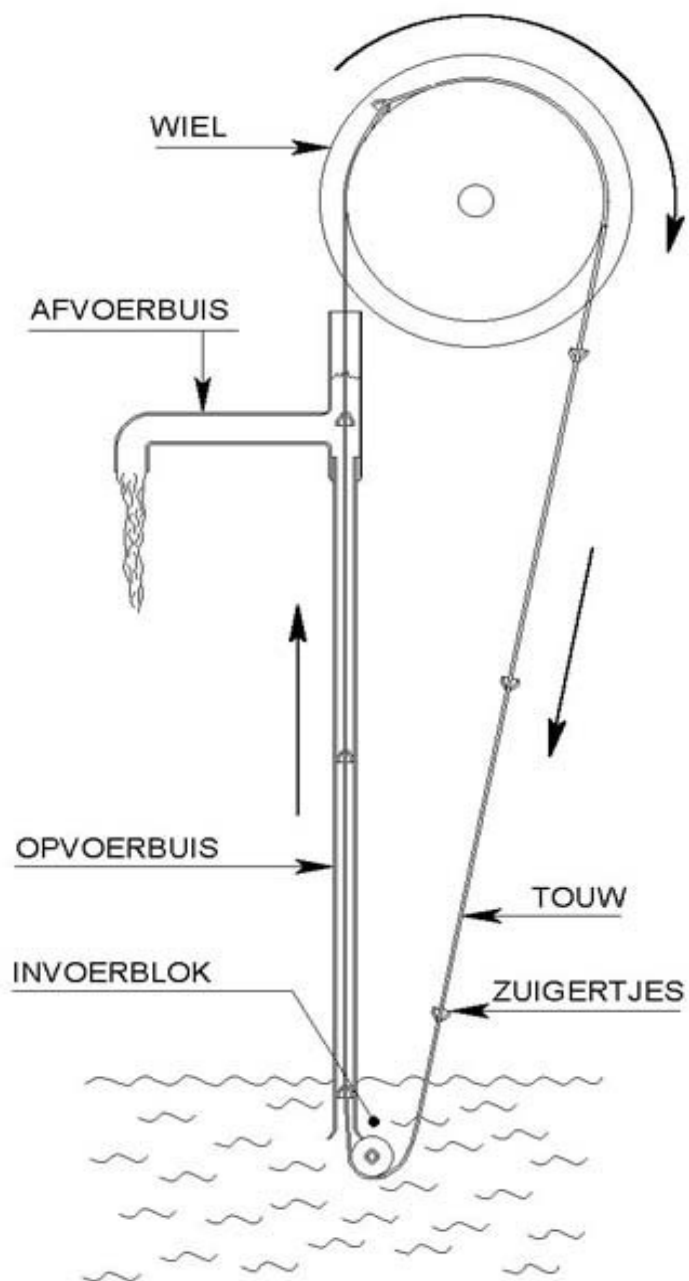
De pomp

Voor de pomp gelden dezelfde eisen als voor de windmolen, ze moet eenvoudig en goedkoop geïnstalleerd en onderhouden kunnen worden. De pomp moet ook enkele specifieke eigenschappen bezitten. Ze moet kunnen drooglopen, zelfaanzuigend zijn, aangezien de pomp boven het wateroppervlak komt te staan. De pomp moet natuurlijk in staat zijn om water te verpompen, sommige pompen zijn slechts in staat een zeer viskeuze vloeistof te verplaatsen, andere pompen eisen dat de verpompte vloeistof smerende eigenschappen bezit. Aangezien de windmolen een variabel toerental heeft, afhankelijk van de windsnelheid, moet de pomp ook aan verschillende snelheden kunnen werken. Een touwpomp voldoet het best aan al deze eigenschappen.

De touwpomp is een erg eenvoudig en goedkoop te bouwen pomp die voor een groot deel uit afval materiaal gebouwd kan worden. Juist door zijn eenvoud kan de touwpomp gebouwd en onderhouden worden door niet technisch onderlegde personen.

In figuur 21 is de principe opbouw van een touwpomp te zien. Een touwpomp bestaat uit een opvoerbuis waardoor een touw loopt waaraan zuigertjes zijn bevestigd. De buis reikt aan de onderkant in het water en aan de bovenkant steekt hij een eind boven de grond uit. De zuigertjes die aan het touw zijn bevestigd passen met een kleine speling (0,2...0,5mm) in de buis. Door het touw door de buis te trekken zal doordat de zuigertjes de buis min of meer afsluiten een onderdruk worden gecreëerd waardoor water mee omhoog wordt genomen. Een waterfilmpje tussen de zuiger en de buiswand zorgt voor de smering en draagt ook bij aan de afsluiting tussen de zuigertjes en de buis. Aan de bovenkant loopt het touw over een wiel waarmee het touw door de buis wordt getrokken. Aan de onderkant van de buis bevindt zich een constructie die er voor zorgt dat het touw soepel in de buis glijdt.

De touwpomp kan met eenvoudige materialen worden toegepast tot een diepte van zo'n 40 meter. Hoe dieper het water zich bevindt des te kleiner de diameter van de opvoerbuis moet zijn. Dit omdat er anders een te groot gewicht aan water aan het touw hangt en dit niet meer omhoog gepompt kan worden. Vooral bij kleine buisdiameters en de daarbij horende grote pompdieptes is het belangrijk dat de zuigertjes nauwkeurig op maat gemaakt worden. Dit is in onze toepassing niet het geval. Het water zal slechts 2m opgepompt moeten worden.



Figuur 21: de touwpomp

Hier volgt een tabel die aangeeft welke buisdiameter gebruikt moet worden bij een bepaalde pomphoogte en bij de twee meest gebruikte wielmaten.

Tabel 1 Verhouding van de pomphoogte tot de te gebruiken **inwendige** buisdiameter bij gebruik van een **wieldiameter van 0,36** meter.

Opvoerhoogte(meter)	0...6	6...9	9...20	20...35	35...40
Buis diameter(") Buisdiameter(mm)	1½ 44,5	1¼ 38,1	1 25,4	¾ 19,1	½ 12,7
Opbrengst (liter / omwenteling)	1,4	1,0	0,5	0,3	0,1

Tabel 2 Verhouding van de pomphoogte tot de te gebruiken **inwendige** buisdiameter bij gebruik van een **wieldiameter van 0,54** meter.

Opvoerhoogte(meter)	0...4,5	4,5...6	6...13	13...25	25...40
Buis diameter(") Buisdiameter(mm)	1½ 44,5	1¼ 38,1	1 25,4	¾ 19,1	½ 12,7
Opbrengst (liter / omwenteling)	2,1	1,5	0,7	0,4	0,2

Zoals reeds vermeld volstaat een opvoerhoogte van 3m. Het debiet moet 10 l/min bedragen. Het vermogen van de pomp kan berekend worden.

$$P = h \times \rho \times g \times Q$$

$$Q = 10\text{L/min} = 1,666 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P = h \times \rho \times g \times Q$$

$$P = 2,0 \times 1000 \times 9,81 \times 1,666 \times 10^{-4}$$

$$P = 3,27\text{W}$$

Het rendement in rekening gebracht, moet de molen slechts een vermogen van 6,25 W kunnen leveren. Er is dan gerekend met een rendement van ongeveer 80%.

De rotor

Afmetingen van de rotor

De Savoniusrotor is gekozen omdat deze eenvoudig en goedkoop te bouwen is. De rotor wordt geconstrueerd met enkele lege olievaten. Een olievat van 200 liter heeft een diameter van 57 cm en een hoogte van 84 cm. De vaten worden open geslepen, verschoven over $\frac{2}{3}$ van de diameter en terug vast gelast. Zo bekomt men een rotor met een doorsnede van,

$$D_r = d + \frac{2}{3} \times d$$

$$D_r = 57 + \frac{2}{3} \times 57$$

$$D_r = 95,0 \text{ cm}$$

$$R = 47,5 \text{ cm}$$

Eén rotorvat heeft een oppervlakte van,

$$A = D_r \times H$$

$$A = 0,95 \times 0,84$$

$$A = 0,798 \text{ m}^2$$

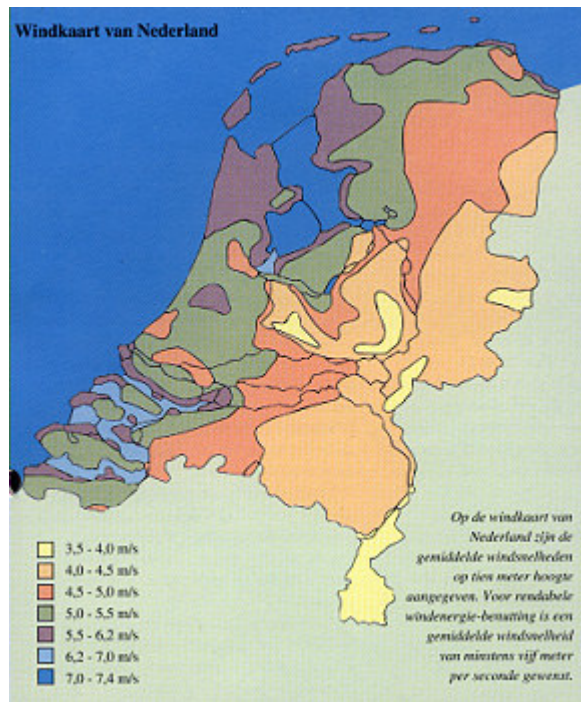
$$A \approx 0,8 \text{ m}^2$$

Reeds in de theoretische uiteenzetting is vermeld dat twee rotoren boven elkaar interessanter zijn. Deze rotoren zijn 90° t.o.v. elkaar verdraaid, zo verkrijgt je een snelheid die constanter is in de tijd. Er zijn 4 krachtstoten per omwenteling i.p.v. 2 als er slechts één rotorvat gebruikt wordt. Met twee vaten kan men een oppervlakte van $1,6 \text{ m}^2$ bekomen. De eis dat de verhouding van de lengte op de straal van onze rotor groter moet zijn dan 2 is ook voldaan: $L = 168 \text{ cm}$ en $R = 47,5 \text{ cm}$.

Het vermogen van een molen wordt berekend met volgende formule,

$$P_R = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_p \times v^3 \times A \quad (\text{vergelijking 1})$$

Een degelijke windkaart van België vinden is moeilijk, maar aangezien Schilde relatief dicht bij de Nederlandse grens ligt kan een Nederlandse windkaart dienst doen. Op deze kaart staat de windsnelheid op 10m hoogte, er dient een omrekening te gebeuren naar de snelheid van de wind ter hoogte van het zwaartepunt van de rotor. Deze omrekening is afhankelijk van de omgeving. Bomen, huizen en andere obstakels beïnvloeden de windsnelheid. Om deze invloed in rekening te nemen wordt er rekening gehouden met een ruwheidfactor. In figuur 22 staat een ruwheidfactor bij enkele beschreven landschappen.



Figuur 22: de windkaart

Er geldt dat

$$v_H = v_L \times \left(\frac{Z_H}{Z_L} \right)^a$$

of

$$v_L = v_H \times \left(\frac{Z_L}{Z_H} \right)^a$$

Hierin is:

- v_H = de snelheid op 10,0 m hoogte.
- v_L = de snelheid ter hoogte van het zwaartepunt van de rotor.
- a = de ruwheidfactor, zie figuur 22.
- Z_H = 10m hoogte
- Z_L = hoogte van de rotor.

Terreingesteldheid	$Z_o(m)$	a
Vlak kustgebied met overwegend aanlandige wind	0,001	0,12
Vlak of licht glooiend open land met enkele windsingels en vrijstaande bomen	0,01	0,15
Heuvelachtig gebied met windsingels, bosjes en verspreide bebouwing	0,1	0,19
Landschap met dichtere bebouwing of kleinere bossen	0,5	0,26
Zware bossen, sterk heuvelachtig terrein of centrum van grote stad met hoogbouw	1,5	0,35

Figuur 23: de terreingesteldheid; ruwheidfactor van een landschap.

Er wordt gerekend met een ruwheidfactor van 0,26 deze beschrijving komt het best overeen met de reële situatie, in de bijlage staan foto's van de plek waar de windmolen zou moeten komen te staan. (Bijlage; Foto's op locatie)

Schilde ligt het dichtst bij de oranje zone, hier heerst een gemiddelde windsnelheid van 4,5 à 5,0m/s. Er wordt gerekend met een windsnelheid van 4,5m/s.

$$v_L = v_H \times \left(\frac{z_L}{z_H} \right)^a$$

$$v_L = 4,5 \times \left(\frac{3,0}{10,0} \right)^{0,26}$$

$$v_L = 3,29 \text{ m/s}$$

$$P_R = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_p \times v^3 \times A \quad (\text{vergelijking 1})$$

Hier wordt niet meer de index L (laag) bij gezet, aangezien het vermogen of de kracht van de windmolen altijd berekend wordt met de windsnelheid ter hoogte van het zwaartepunt van de rotor.

$$P_R = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_p \times v^3 \times A$$

$$P_R = \frac{1}{2} \times 1,23 \times 0,18 \times 3,29^3 \times 1,6$$

$$P_R = 6,3 \text{ W}$$

Het vermogen van de rotor is toereikend om de pomp te doen draaien in gemiddelde omstandigheden. Onder gemiddelde omstandigheden bedraagt het toerental van de rotor,

$$n_r = \frac{\lambda \times v}{\pi \times D_r}$$

$$n_r = \frac{1,3 \times 3,29}{\pi \times 0,95}$$

$$n_r = 1,43 \text{ omw/s}$$

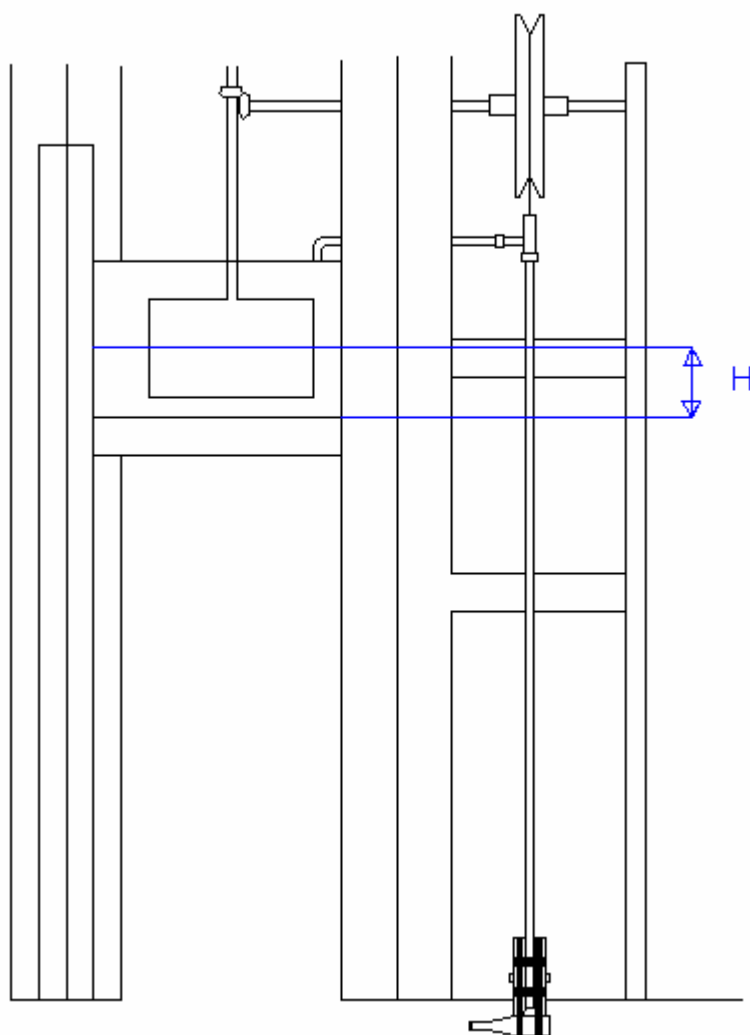
$$n_r = 85 \text{ omw/min}$$

De turbine van de windmolen heeft een omwentelingssnelheid van 85omw/min, een debiet van 10L/min wordt beoogd, de pomp moet een opbrengst van 0,116L/omw hebben. Er kan gewerkt worden met een buisdiameter van 12,7mm.

Remmen van de rotor

De waterrem

Het debiet van de pomp is bepaald bij een windsnelheid van 4,5m/s op 10m hoogte. Indien het harder waait zal de windmolen een veel groter vermogen leveren ($P = C^{te} \times v^3$) en het toerental van de turbine en de pomp zal hoger komen te liggen. Een te hoog toerental is nefast voor de touwpomp, daarom is er systeem ontwikkeld dat de Savoniusrotor gaat afremmen op het ogenblik dat het te hard waait. Dit remsysteem maakt gebruik van de verpompte hoeveelheid water. De opbrengst van de pomp bedraagt 0,1L/omw, in normale omstandigheden bekom je zo een debiet van 10L/min. Indien het harder waait, maakt de pomp meer omwentelingen per tijdseenheid en bekom je een hoger debiet. Van deze eigenschap wordt gebruik gemaakt om te remmen. Aanschouw volgende tekening.



Figuur 24: de waterrem

De touwpomp pompt het water in een reservoir. In dit vat zit in de bodem een opening die het water naar de afwaterende beek laat stromen. Aangezien de doorsnede van de afvoer constant is zal het water evenwichtshoogtes bereiken afhankelijk van het debiet van de pomp. Indien bij een debiet van 10L/min de evenwichtshoogte net onder de remplaat blijft, zal de plaat in het water draaien als er een hoger debiet bereikt wordt. De plaat staat in rechtstreekse verbinding met de turbine van de Savoniusmolen. De rotor zal afgeremd worden als de plaat in het water draait, hierdoor vertraagt de pomp waardoor het debiet daalt evenals de evenwichtshoogte.

Stel dat de evenwichtshoogte bij gemiddelde wind 20cm bedraagt, de uitstroomopening A_{uit} kan berekend worden m.b.v. de wet van Bernouilli. Er wordt een stationaire stroming in het vat verondersteld. Bij een stationaire stroming blijft het beeld van de stroming steeds dezelfde hoewel er andere vloeistof in de ruimte bevindt. Deze veronderstelling is niet geheel correct, maar zolang de plaat het wateroppervlak niet raakt zal de berekende uitstroomsnelheid en uitstroomoppervlak niet veel verschillen van de werkelijke. De grootte van de uitstroomopening kan geregeld worden met een kraan, op deze wijze kan het uitstroomdebiet gewijzigd worden en ook het evenwichtsniveau. Hoe groot moet de uitstroomopening zijn om een evenwichtshoogte van 20cm te bekomen bij een debiet van

10L/min? Zoals eerder vermeldt wordt dit berekend met de wet van Bernoulli. Links van het gelijkheidsteken staan de omstandigheden in het vat, rechts de omstandigheden buiten het vat. De omstandigheden buiten het vat stelt men gelijk aan de atmosferische omstandigheden. Dit kan enkel als de leiding achter de uitstroomopening voldoende breed is, dan ondervindt het water geen weerstand.

$$p_0 + (h \times \rho_w \times g) + (\rho_w \times v^2 \times \frac{1}{2}) = p_0$$

$$(h \times \rho_w \times g) + (\rho_w \times v^2 \times \frac{1}{2}) = 0$$

$$v = \sqrt{\frac{h \times \rho_w \times g \times 2}{\rho_w}}$$

$$v = \sqrt{h \times g \times 2}$$

$$v = \sqrt{0,20 \times 9,81 \times 2}$$

$$v = \sqrt{3,924}$$

$$v = 1,98 \text{ m/s}$$

$$v = 198 \text{ cm/s}$$

$$Q = A \times v$$

$$A = \frac{Q}{v}$$

$$Q = 10\text{L/min}$$

$$Q = 166,6\text{cm}^3/\text{s}$$

$$A = \frac{166,6}{198}$$

$$A = 0,841 \text{ cm}^2$$

$$A = 84,1 \text{ mm}^2$$

Bij een uitstroomopening van 84,1 mm², zal bij een stationaire stroming en een debiet groter dan 10L/min het water tegen de plaat komen en de rotor doen afremmen. Indien onder invloed van de niet-stationaire stroming het uitstroomdebiet groter is dan berekend, zal de evenwichtshoogte lager liggen. De rotor remt niet af bij een debiet van 10L/min, de kraan moet dichtgedraaid worden. De invloed van het niet-stationair zijn van de stroming kan ook anders zijn, de kraan moet opengedraaid worden, anders bereikt de pomp nooit haar optimale debiet.

Is de weerstand van het water op de plaat groot genoeg om de rotor te remmen? De kracht die een laminair stromend fluïdum uitoefent op een voorwerp kan m.b.v. de drag of weerstandsformule berekend worden. Deze kracht is reeds eerder gebruikt om de kracht van de wind op een molen te bepalen. Dat werd toen de weerstand of driftkracht genoemd. De molen moet afgeremd kunnen worden, daarom wordt de sterkte van de plaat gecontroleerd. De plaat moet voldoen tot een toerental van 2,5 omw/s, dan treedt er een centrifugale rem in werking. Een toerental van 2,5 omw/s komt overeen met een windsnelheid van,

$$v = \frac{n_r \times \pi \times D_r}{\lambda}$$

$$v = \frac{2,5 \times \pi \times 0,95}{1,3}$$

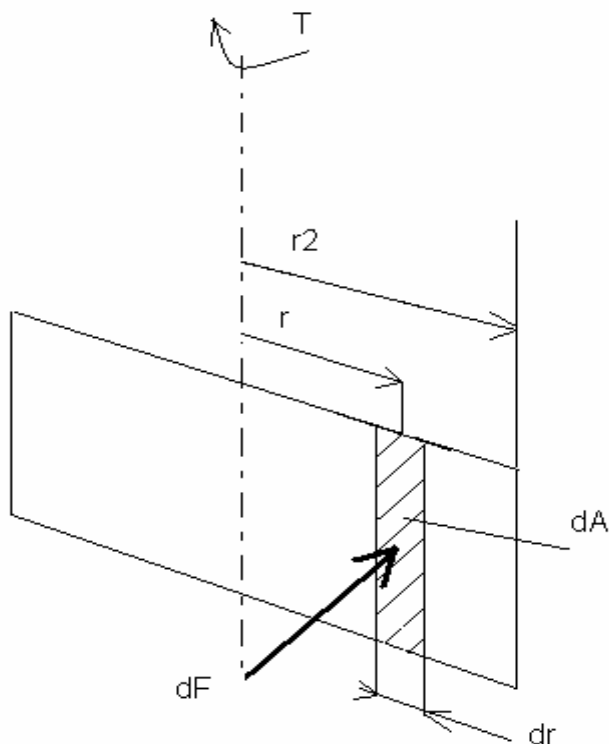
$$v = 5,74 \text{ m/s}$$

De molen levert op dat ogenblik een vermogen van,

$$P_R = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_p \times v^3 \times A$$

$$P_R = \frac{1}{2} \times 1,23 \times 0,18 \times 5,74^3 \times 1,6$$

$$P_R = 33,48 \text{ W}$$



Figuur 25: weergave van de krachten op de remplaat

De windmolen oefent een bepaald koppel T uit op de plaat. Het water remt de plaat met een kracht F af, deze kracht is afhankelijk van de snelheid van de plaat. Om de weerstandskracht te berekenen is er een deeloppervlakte dA aangeduid, op dit kleine oppervlak wordt er een kracht dF uitgeoefend vanwege het water. De plaat draait rond met een omwentelingssnelheid ω .

$$\omega = 2 \times \pi \times n$$

$$\omega = 2 \times \pi \times 2,5$$

$$\omega = 15,7 \text{ rad/s}$$

$$dM_w = dF_D \times r$$

$$M_w = \int_{r_1}^{r_2} dF_D \times r$$

$$dF_D = \frac{1}{2} \times C_D \times \rho_w \times v^2 \times dA$$

$$dF_D = \frac{1}{2} \times C_D \times \rho_w \times (\omega \times r)^2 \times dA$$

$$M_w = \frac{1}{2} \times C_D \times \rho_w \times \omega^2 \times \int_{r_1}^{r_2} r^3 \times dA$$

$$M_w = \frac{1}{2} \times C_D \times \rho_w \times \omega^2 \times \int_{r_1}^{r_2} r^3 \times h \times dr$$

$$M_w = \frac{1}{2} \times C_D \times \rho_w \times \omega^2 \times h \times \int_{r_1}^{r_2} r^3 \times dr$$

$$M_w = \frac{1}{2} \times C_D \times \rho_w \times \omega^2 \times h \times \left[\frac{r^4}{4} \right]_{r_1}^{r_2}$$

$$M_w = \frac{1}{8} \times C_D \times \rho_w \times \omega^2 \times h \times (r_2^4 - r_1^4)$$

r_1 = de afstand van het rotatiecentrum tot het begin van de as, aangezien de plaat door de rotatie as loopt is $r_1 = 0$; de plaat is 15 cm hoog en 40 cm breed. De dragcoëfficiënt van een plaat bedraagt 1,1. Dat wordt gevonden uit figuur 25.

$$M_w = \frac{1}{8} \times C_D \times \rho_w \times \omega^2 \times h \times (r_2^4 - r_1^4)$$

$$M_w = \frac{1}{8} \times 1,1 \times 1000 \times 15,7^2 \times 0,15 \times (0,2^4 - 0,0^4)$$

$$M_w = 8,134 \text{ Nm}$$

Dit is de weerstand van het water op een halve plaat, op de gehele plaat werkt een moment van 16,268 Nm. Is dit moment groot genoeg om de windmolen af te remmen?

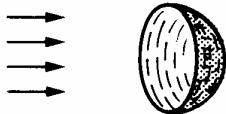
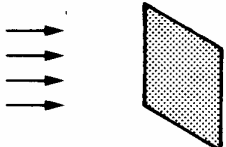
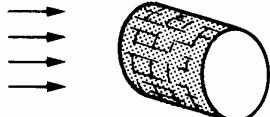
halve holle bol	1,4	
vlakke plaat	1,1	
cilinder	0,5	
wagen	0,15 ... 0,25	
bol	0,11	
aërodynamicische vorm	0,08	

Fig. 5.27. Tabel: c_w-waarden

Figuur 26: weerstandscoefficiënten

Het vermogen van de windmolen tot waar de waterrem dienst moet doen is reeds gekend,

$$P_R = 33,48 \text{ W}$$

Het moment dat de molen op de plaat uitoefent kan berekend worden uit het vermogen en het toerental.

$$M_r = 9550 \times \frac{P_R}{n_r}$$

$$M_r = 9550 \times \frac{0,0335}{2,5 \times 60}$$

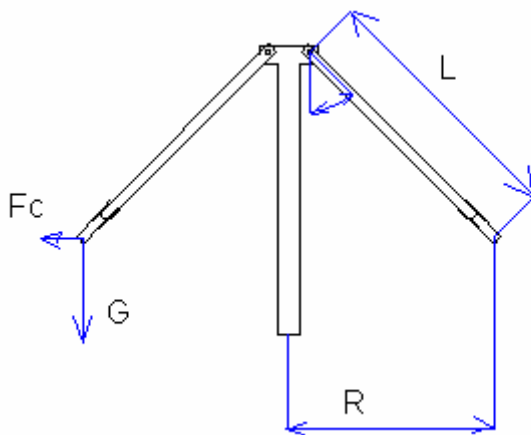
$$M_r = 2,15 \text{ Nm}$$

Het remmende moment van de plaat is groter dan het moment dat de windmolen levert, de turbine kan afgeremd worden door de plaat in het water. Er zijn twee extreme situaties, waar dit remsysteem in de problemen kan komen, nl. extreme droogte en vrieskoude. In deze gevallen moet er niets verpompt worden en kan de windmolen eigenlijk uitgeschakeld worden. Er is nu een rem ontwikkeld die in dienst gaat treden bij een omwentelingssnelheid van 2,5 omw/s. Het remsysteem dat hiervoor besproken is begint te werken vanaf het ogenblik dat de pomp meer als 10L/min verpompt ($n = 1,43 \text{ omw/min}$). Volgende

centrifugaal rem schakelt de windmolen volledig uit. Vandaar dat er enige marge genomen wordt, indien de centrifugaal rem in dienst treedt bij 2,0 omw/min kan het zijn dat de windmolen constant uitgeschakeld staat. Bij uitschakelsnelheid van 2,5 omw/min krijgt de waterrem meer tijd om de windmolen af te remmen. Een centrifugaal rem gaat dienst doen.

De centrifugaal rem

De rem maakt gebruik van de centrifugale kracht op een gewicht, de centrifugale ring. Hoe hoger de omwentelingssnelheid van dat gewichtje, hoe meer het naar buiten wordt geslingerd door een stijgende centrifugale kracht, het gewicht zal naar boven komen. Met dit stijgen zal de ring op een bepaald ogenblik de ontgrendelaar van de rem wegslagen en treedt deze in werking. Er wordt berekend hoe hoog de ontgrendelaar moet hangen, tevens wordt het remmende moment bepaald.



Figuur 27: weergave van de bepalende elementen bij de centrifugaal rem

$$\frac{F_c}{R} = \frac{G}{\sqrt{L^2 - R^2}}$$

$$\frac{m \times \omega^2 \times R}{R} = \frac{m \times g}{\sqrt{L^2 - R^2}}$$

$$\frac{g}{\omega^2} = \sqrt{L^2 - R^2}$$

$$\frac{g^2}{\omega^4} = L^2 - R^2$$

$$R^2 = L^2 - \frac{g^2}{\omega^4}$$

$$R = L \times \sin \alpha$$

$$L^2 \times \sin^2 \alpha = L^2 - \frac{g^2}{\omega^4}$$

$$\sin^2 \alpha = 1 - \frac{g^2}{L^2 \times \omega^4}$$

$$\alpha = \arcsin \sqrt{1 - \frac{g^2}{L^2 \times \omega^4}}$$

Hierin is:

- α = de hoek die de staaf met het gewichtje maakt t.o.v. een verticale.
- n = het toerental waarbij er wordt geremd in omw/s.
- L = de lengte van de staaf in m
- R = de afstand tussen het rotatiecentrum van de rotoras en de massa in m
- m = de massa van het gewichtje in kg
- G = het gewicht van de massa in N
- ω = de hoeksnelheid in rad/s

$$\alpha = \arcsin \sqrt{1 - \frac{g^2}{L^2 \times \omega^4}}$$

$$\alpha = \arcsin \sqrt{1 - \frac{9,81^2}{0,365^2 \times 15,7^4}}$$

$$\alpha = 82,4^\circ$$

Het mechanisme dat de rem ervan weerhoudt in werking te treden, de ontgrendelaar, moet 4,8cm lager hangen dan het aanknopingspunt van de staaf. De afstand van dit aanknopingspunt tot het zwaartepunt van de centrifugale ring bedraagt 365mm.

Ook als er een orkaan waait moet de windmolen stil gehouden kunnen worden door de centrifugaal rem. Vanaf 32 m/s spreekt men van een orkaan, veiligheidshalve wordt deze windsnelheid op 10m hoogte niet verrekend naar een wind op lagere hoogte. De molen levert een vermogen van,

$$P_R = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_p \times v^3 \times A$$

$$P_R = \frac{1}{2} \times 1,23 \times 0,18 \times 32^3 \times 1,6$$

$$P_R = 5803 \text{ W}$$

$$n = \frac{\lambda \times v}{\pi \times D_r}$$

$$n = \frac{1,3 \times 32}{\pi \times 0,95}$$

$$n = 12,58 \text{ omw/s}$$

Het moment van de molen bedraagt op dat ogenblik,

$$M_r = 9550 \times \frac{P}{n}$$

$$M_r = 9550 \times \frac{5,803}{12,58 \times 60}$$

$$M_r = 73 \text{ Nm}$$

De bovenste eindplaat heeft een kracht van

$$Fr = \frac{Mr}{r}$$
$$Fr = \frac{73}{0,5}$$
$$Fr = 146 \text{ N}$$

De wrijving moet met deze waarde overeen komen. Er wordt een wrijvingscoëfficiënt van 0,1 verondersteld, de normaalkracht bedraagt dan,

$$F_N = \frac{Fr}{\mu}$$
$$F_N = \frac{146}{0,1}$$
$$F_N = 1460 \text{ N}$$

Het moment,

$$M = F_N \times s$$
$$M = 1460 \times 11$$
$$M = 16060 \text{ Ncm}$$

Als onze massa dan 20 kg weegt, bedraagt de lengte van de momentarm,

$$L = \frac{M}{m \times g}$$
$$L = \frac{16060}{20 \times 9,81}$$
$$L = 81,85 \text{ cm}$$

Er is gerekend met een wrijvingscoëfficiënt van 0,1 wat zeker niet te veel is. In de bijlage staat er een tabel van riemen bijgevoegd (Bijlage; Tabellen en grafieken; Berekening van de centrifugaal rem) hier staat eveneens een wrijvingscoëfficiënt weergegeven. De coëfficiënt kan verhoogd worden door om de schijf een rubberen band te lijmen. Dan is er een rubber op rubber contact en remt de rotor ten alle tijden.

De molen moet ook terug ingeschakeld kunnen worden op een eenvoudige manier. Het gewicht van de rem wordt grotendeels bekomen door het eigengewicht van een balk die verticaal hangt.

$$m = V \times \rho_H$$
$$m = A \times h \times \rho_H$$
$$m = 0,1^2 \times 3,0 \times 450$$
$$m = 13,5 \text{ kg}$$

Door deze balk omhoog te heffen kan de molen terug draaien. Aan de ontgrendelaar hangt een touw, dit loopt over de verticaal hangende “gewichtsbalk”. Door aan dit touw te trekken kan de stop teruggetrokken worden. Er is een blokje geslagen op de gewichtsmomentbalk om ervoor te zorgen dat de ontgrendelaar niet te ver getrokken kan worden. Samenvattend moet de gewichtsbalk om hoog geduwd worden, aan het touw getrokken en de rem is uitgeschakeld, de molen kan terug draaien.

Berekening van de krachten werkzaam op de rotor

Er werken op de rotor vier krachten die allemaal opgevangen moeten worden door de lagers, de toren en / of de fundering. De krachten zijn het eigen gewicht van de rotoren, de windkracht opgevangen door de rotoren, de centrifugaal kracht en de kracht uitgeoefend door de rem. De laatste kracht wordt grotendeels in stilstand uitgeoefend, maar op het ogenblik dat de rem in werking treedt, werkt deze kracht op een draaiende binnenring van het lager.

De verticale kracht

$$G = m_{\text{rotor}} \times g$$

Hierin is:

- m_{rotor} = de massa van de rotoren in kg
- g = de valversnelling in m/s^2 .
- G = eigengewicht van de rotor in N.

De massa van de rotor is de som van de massa's van twee lege vaten, twee staven en de eindplaten.

$$m_{\text{rotor}} = m_{\text{vaten}} + m_{\text{schijven}} + m_{\text{staven}} + m_{\text{tandwiel}}$$

$$m_{\text{rotor}} = 2 * 7,5 \text{ kg} + 3 * 10,0 \text{ kg} + 2 * 2,5 \text{ kg} + 5,0 \text{ kg} + \text{veiligheidsmarge}$$

$$m_{\text{rotor}} = 55 \text{ kg}$$

$$G = m_{\text{rotor}} \times g$$

$$G = 55 \times 9,81$$

$$G \approx 550 \text{ N}$$

Dit is de verticale kracht afkomstig van het gewicht van de rotoren.

De windkracht

De kracht van de wind opgevangen in de rotor wordt gevonden door het vermogen, opgenomen door de rotor, te delen door de snelheid. Deze kracht is bepalend voor de keuze van het lager, er wordt gerekend met een windsnelheid van 5,74 m/s. Als het harder waait, zal de molen geremd worden. De rotor zal op dat ogenblik niet meer ronddraaien en het lager wordt niet meer belast.

$$F_w = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_p \times v^2 \times A$$

$$F_w = \frac{1}{2} \times 1,23 \times 0,18 \times 5,74^2 \times 1,6$$

$$F_w = 5,83 \text{ N}$$

De horizontale kracht moet ook opgevangen worden door de toren, hier moet er echter niet gerekend worden met een beperkte windsnelheid, maar met een orkaan.

$$F_H = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_p \times v^2 \times A$$

$$F_H = \frac{1}{2} \times 1,23 \times 0,18 \times 32^2 \times 1,6$$

$$F_H = 181 \text{ N}$$

De centrifugale kracht

De rotoren hebben een bepaalde massa, deze massa wordt rondgeslingerd en veroorzaakt een centrifugaal kracht. Deze centrifugale kracht moet opgevangen worden door de bouten in de eindplaten, maar hebben geen invloed op de berekening van de lagers.

$$F_c = m \times \omega^2 \times R$$

Hierin is:

- m = de massa van een vat in kg.
- ω = de omtrekssnelheid van de rotor in rad/s.
- R = de straal van het zwaartepunt van de rotor in m.
- F_c = de centrifugaal kracht in N.

De afstand R is de afstand tussen de rotatieas en de roterende massa. Deze afstand bedraagt minimaal 9,5cm, maximaal 47,5cm. De kracht wordt uitgerekend in de veronderstelling dat de massa over heel de lengte, op de maximale afstand van 47,5cm van het rotatiecentrum gelegen is. De berekende centrifugaal kracht zal groter zijn dan de werkelijke kracht.

$$R = 47,5\text{cm}$$

$$R = 0,475\text{m}$$

$$n_r = 2,5\text{omw/s}$$

$$\omega = 15,7\text{rad/s}$$

$$F_c = m_{\text{vat}} \times \omega^2 \times R$$

$$F_c = 15 \times 15,7^2 \times 0,475$$

$$F_c = 1758 \text{ N}$$

De remkracht

Deze kracht is reeds berekend in het gedeelte van de centrifugale rem. Het is de grootte van de normaalkracht die op de eindplaat werkt en bedraagt 1460N

De assen

De dikte van de assen

Er wordt getracht de diameter van de pompas te bepalen. Op de as wordt een torsiekoppel uitgeoefend vanwege een kegelvormig tandwiel. Dit tandwiel is nodig om over te gaan van de verticale rotoras naar de horizontale pompas. De assen worden berekend bij een molenvermogen van 33,48W, de pomp draait dan met een omwentelingssnelheid van 2,50mw/s en de molen levert een moment $M = 2,15\text{Nm}$. Deze as wordt door zowel het kegelvormig tandwiel als de pomp op torsie belast. Het torsiemoment van de pomp wordt bekomen door het gewicht van de verpompte vloeistof in de opvoerbuis te vermenigvuldigen met de straal van het pompwiel.

De lengte van de opvoerbuis van de pomp bedraagt 2,0m. Het gewicht van een volle buis water wordt berekend.

$$G = m \times g$$

$$G = V \times \rho \times g$$

$$G = h \times A \times \rho \times g$$

$$G = h \times \frac{\pi \times D^2}{4} \times \rho \times g$$

$$G = 2,0 \times \frac{\pi \times 0,0127^2}{4} \times 1000 \times 9,81$$

$$G = 4,97\text{N}$$

Het moment dat door deze kracht wordt bekomen is te verwaarlozen t.o.v. het moment van het kegelvormig tandwiel. De doorsnede van de as wordt berekend enkel rekening houdend met het torsie moment afkomstig van het kegelvormig tandwiel. Dit moment is hetzelfde als het moment van de molen en bedraagt maximaal 2,15Nm. Het gevolgde pad in de bijlage is aandrijfjas $\rightarrow$ moment $\neq 0$ en gekend $\rightarrow$ geen holle as.

$$d' = 3,4 \times \sqrt[3]{\frac{M}{\sigma_{bd}}}$$

Hierin is:

- d' = de minimale diameter van een massieve aandrijfjas in mm
- M = het moment in Nmm
- σ_{bd} = de toelaatbare spanning in N/mm

$$d' = 3,4 \times \sqrt[3]{\frac{M}{\sigma_{bd}}}$$

$$d' = 3,4 \times \sqrt[3]{\frac{2150}{215}}$$

$$d' = 7,3\text{mm}$$

Veiligheidshalve wordt er gewerkt met een as van 20 of 25mm, de as verloopt, dit om de lagers te kunnen klemmen.

Overbrenging van de verticale rotoras naar de horizontale pompas

De rotor heeft een verticale as, de pomp daarentegen wordt door een horizontale as aangedreven. Er moet een overbrenging komen, hiervoor wordt zoals reeds eerder vermeldt een kegelvormig tandwiel gebruikt.

Voor de ontwerpberekeningen wordt er verwezen naar figuur 11-21 in de bijlage; Tabellen en grafieken; berekening kegelvormig tandwiel, uit het rolaf / matek theorie boek. Het te volgen pad, in de bijlage is: aandrijf-as → $M = 0$ (er is geen buigend moment) → geen holle as → vgl. 11.13a

$$d' = 600 \times \sqrt[3]{\frac{K_A \times P_R}{n \times \tau_{td}}}$$

Hierin is:

- d' = de ontwerpdiameter in mm
- K_A = de bedrijfsfactor (uit tabel 3-5)
- P_R = het vermogen in kW
- n = het toerental in omw/min
- τ_{td} = de nominale afschuiving in N/mm² (uit tabel 1-1)

$$K_A = 1,35$$

$$P_R = 0,03348 \text{ kW}$$

$$n_r = 2,5 \times 60 \text{ omw/min}$$

$$\tau_{td} = 125 \text{ N/mm}^2 \text{ (aandrijfassen)}$$

$$d' = 600 \times \sqrt[3]{\frac{K_A \times P_R}{n \times \tau_{td}}}$$

$$d' = 600 \times \sqrt[3]{\frac{1,35 \times 0,03348}{2,5 \times 60 \times 125}}$$

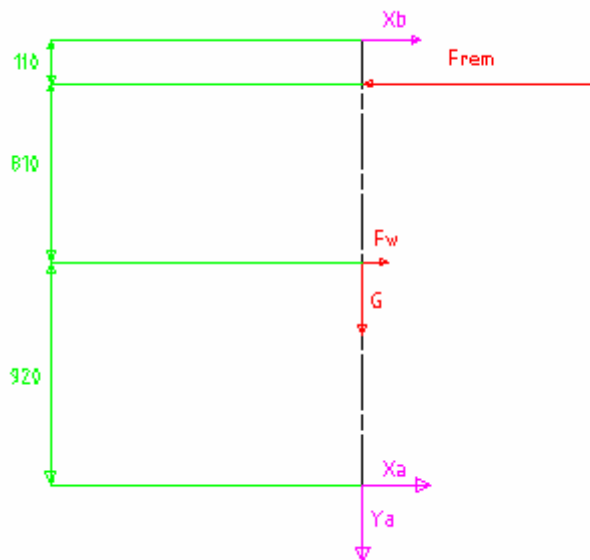
$$d' = 8,04 \text{ mm}$$

Dit is de diameter van het tandwiel, aangezien er assen van 25 mm gebruikt worden is deze richtwaarde te klein. Er kan haast willekeurig een conisch gefreesd tandwiel gekozen worden. Aangezien er gewerkt wordt met een as van 25 mm, wordt er gekozen voor een tandwiel met een binnendiameter van 25 mm. Er is zo een exemplaar aanwezig in de tabel, het tandwiel met als modulus $m = 4$, en 30 tanden. Dit tandwiel kost echter veel daarom is het beter een kegelvormig tandwiel te kiezen met $m = 2$, en 30 tanden. Het eerste tandwiel is dubbel zo duur als het tweede, vandaar de keuze voor het conische tandwiel met modulus 2. (Zie bijlage; Tabellen en grafieken; berekening kegelvormig tandwiel).

De lagers

De rotor

Op de rotor werken enkele krachten, deze krachten zullen samen met het eigengewicht van de rotor opgevangen moeten worden door de lagers. Alvorens de lagers te berekenen moeten de reactiekrachten van de lagers berekend worden.



Figuur 28: De krachten op de rotor.

Het gewicht G heeft steeds dezelfde verticale richting en zin, de windkracht net als de remkracht blijven in één richting werken. Op bovenstaande figuur hebben de windkracht en de remkracht een andere zin, dat kan in realiteit. De reactiekracht wordt echter berekend voor het zwaarst belaste geval, dat is wanneer beide een zelfde richting en zin hebben.

Het gewicht G van de rotor wordt door slechts één lager (A) opgevangen, de reactiekracht bedraagt,

$$Y_A = G = 550\text{N}$$

De reactiekracht X_A wordt berekend m.b.v. het momentenevenwicht rond B .

$$1840 \times X_A - 110 \times F_{rem} - 920 \times F_w = 0$$

$$X_A = \frac{110 \times 1460 + 920 \times 5,83}{1840}$$

$$X_A = 178\text{N}$$

De reactiekracht X_B kan berekend worden door krachten in evenwicht te brengen.

$$X_B = F_{rem} + F_w - X_A$$

$$X_B = 1460 + 181 - 178$$

$$X_B = 1463\text{N}$$

Lager A

Dit lager moet een radiale kracht van 178N opnemen en een axiale kracht van 550N.

Er wordt geregeld verwezen naar waarde uit tabellen deze staan allemaal in de bijlage; Tabellen en grafieken; Berekening van de lagers.

In de FAG Wälzlager catalogus staan enkele eigenschappen van verschillende lagers, met voor elk lager een quoterings van 0 tot 4. (zeer goed = 4, goed = 3, normaal = 2, met beperkingen = 1, 0 = niet mogelijk) De voornaamste eis is dat het lager een axiale kracht kan opvangen, alsook een grote radiale kracht. Na deze vereiste te hebben toegepast op al de lagers blijven er nog enkele over die met elkaar vergeleken worden.

De lagers die overblijven zijn:

- 1) het vierpuntslager
- 2) het tweerijige tonlager
- 3) het axiale hoekcontactlager
- 4) het axiale tweerijige tonlager

Eigenschappen waarmee rekening gehouden moet worden	1)	2)	3)	4)
Radiale kracht opnemen	1	4	1	1
Axiale kracht opnemen	3	3	3	4
Uitneembaarheid	2	0	0	4
Compenseren van uitlijn fouten	0	4	1	4
Geruisarm	1	1	1	0
Kleine wrijving	2	2	2	1
	$\Sigma = 9$	$\Sigma = 14$	$\Sigma = 8$	$\Sigma = 14$
Eigenschappen waarmee geen rekening moet gehouden worden				
Lengtecompensatie	0	1	0	0
Geschikt voor hoge toerentallen	1	2	3	1
Afdichting aanwezig in één of beide zijden	0	2	0	0
Grote stijfheid	2	3	3	3
Kegelvormige boring	0	4	0	0
Vast lager	3	3	4	3
Los lager	0	2	0	0

Figuur 29: Eigenschappen van enkele lagers.

Er wordt gerekend met een gewoon tweerijig tonlager, omdat dit lager een kleinere wrijving heeft en zonder beperkingen een radiale kracht kan opnemen. Op pagina 334 van de FAG Wälzlager catalogus staan er vele soorten tonlagers.

Er wordt begonnen met een kleine voorberekening.

$$C_{eis} = P \times \left(\frac{F_L}{F_n} \right)$$

Hierin is:

- P = de dynamische lagerbelasting in kN.
- f_L = de levensduurfactor die dimensieloos is.
- f_n = de toerentalfactor die dimensieloos is.
- C_{eis} = het vereiste dynamische draaggetal in kN

Er is hier sprake van een statische belasting aangezien de kracht steeds dezelfde zin en richting heeft. Men spreekt van een statische belasting bij een belasting in stilstand, een kleine zwenkbeweging of bij een zeer laag toerental.

$Y_0 = 1,93$ de axiale factor uit de FAG Wälzlager catalogus.

$$P = F_r + Y_0 \times F_a$$

$$P = 178 + 2,2 \times 550$$

$$P = 1388N$$

De levensduur- en de toerentalfactor worden gevonden uit de grafieken 14-4 en 14-5 uit de Roloff/ Matek tabellen boek. Er wordt gerekend met een toerental van 2,50mw/s dit zijn 1500mw/min.

$$f_n = 0,6$$

$$f_L = 0,67$$

$$C_{eis} = P \times \left(\frac{F_L}{F_n} \right)$$

$$C_{eis} = 1,388 \times \left(\frac{0,67}{0,6} \right)$$

$$C_{eis} = 1,550kN$$

Er kan gecontroleerd worden of het gewoon tweerijige tonlager 21304E.TVPB voldoende tijd meegaat.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Hierin is:

- C = het dynamische draaggetal in kN
- L_{10} = de nominale levensduur in 10^6 omw.
- P = de dynamische lagerbelasting in kN
- p = de levensduurexponent: $p = 3$ voor kogellagers
 $p = 10/3$ voor rollenlagers

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

$$L_{10} = \left(\frac{33,5}{1,388} \right)^{\frac{10}{3}}$$

$$L_{10} = 40630 \times 10^6 \text{ omw}$$

De nominale levensduur wordt gedefinieerd als het aantal omwentelingen bij een constant toerental, dat 90 % van een grote partij duidelijk gelijke lagers bereikt of overschrijdt. Dit kan ook uitgedrukt worden in uren met behulp van volgende formule:

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{60 \times n}$$

Hierin is: n = het toerental in omw/min.

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{60 \times n}$$

$$L_{10h} = \frac{40630 \times 10^6}{60 \times 150}$$

$$L_{10h} = 4,514 \times 10^6 \text{ uur}$$

De vereiste levensduur staat in tabel 14-7 uit het Roloff / Matek tabellenboek, geen enkel werktuig heeft een hogere vereiste levensduur dan deze nominale levensduur bedraagt.

Lager B

Dit lager moet alleen een radiale kracht van 1463N opnemen. Het gewoon tweerijig tonlager kan zeer goed radiale krachten opnemen, daarenboven is het zeer goed in staat om uitlijnfouten te compenseren. Daarom wordt dit lager ook gebruikt voor lager B.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

$$L_{10} = \left(\frac{33,5}{1,463} \right)^{\frac{10}{3}}$$

$$L_{10} = 34093 \times 10^6 \text{ omw}$$

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{60 \times n}$$

$$L_{10h} = \frac{34093 \times 10^6}{60 \times 150}$$

$$L_{10h} = 3,788 \times 10^6 \text{ uur}$$

Beide lagers voldoen aan de vereiste levensduur. Eigenlijk zijn ze veel te veilig gekozen, maar aangezien van elk soort de zwakste gekozen is, blijft deze lagerkeuze.

Buiten de lagers die de rotor moeten kunnen doen draaien zijn er nog lagers nodig. Lagers waar de pompas in kan draaien, lagers voor de centrifugale rem, ook deze worden gecontroleerd.

De pomp

Op de pompas werkt een torsiekoppel vanwege het conische tandwiel en een kracht afkomstig van de pomp. Het moment van de molen en het torsiekoppel van de conische tandwielen zijn even groot.

$$T = M_r = 2,15 \text{ Nm}$$

$$F = \frac{T}{r_m}$$

$$F = \frac{2,15}{0,030}$$

$$F = 71,66 \text{ N}$$

Deze kracht kan ontbonden worden in twee krachten één in de richting van de as, één loodrecht erop. Aangezien het tandwiel een hoek heeft van 45° zijn de twee krachten even groot. Ze grijpen aan in het midden van het tandwieloppervlak.

$$Y_k = F \times \sin(45^\circ)$$

$$Y_k = 71,66 \times \sin(45^\circ)$$

$$Y_k = X_k = 50,67 \text{ N}$$

De lengte van de opvoerbuiss van de pomp bedraagt 2,0m. Het gewicht van een volle buis water is reeds eerder berekend en bedraagt 4,97N.

Deze kracht grijpt aan op een afstand van de as, de buitenzijde van het pompwiel met name. De kracht kan verplaatst worden naar het rotatiecentrum van de as mits toevoeging van een vervangend koppel. Dit koppel moet niet opgevangen worden door de lagers. Er wordt gerekend met de bovenstaande krachten, afkomstig van het gewicht van het water in de pomp en van de krachten werkzaam op het kegelvormige tandwiel. De berekening van het lager wordt gestart. Er is weer één lager nodig dat een axiale kracht kan opnemen, afkomstig van het conische tandwiel.

Het gewoon tweerijige tonlager gaat hier weer dienst doen. De pompas heeft terhoogte van de pompbalk dezelfde diameter als de rotoras. De lagers die gebruikt gaan worden om de rotor te doen draaien waren de zwakste die gekozen konden worden. Op de rotor werken veel grotere krachten dan deze op de pompas. Aangezien de lagers voldoen voor de rotor as zullen ze ook voldoen voor de pompas. Er kan daar gewerkt worden met een lager 21304E.TVPB. Het tweede lager dat in de lagerpompsteun zal komen te hangen heeft een diameter van 25, er wordt daar een gewoon tweerijige tonlager 22205ES gebruikt. Dit is het zwakste type lager met een doorsnede van 25mm.

De centrifugale rem

De ontgrendelaar moet vlot kunnen draaien om zijn as, anders zal deze de rembalk niet in werking kunnen laten treden. Op de ontgrendelaar werken twee krachten; het eigengewicht en het gewicht van de rembalk. Het eigengewicht van de ontgrendelaar is te verwaarlozen, de tweede kracht is dat zeker niet. De rembalk oefent een moment uit van $M = 23360\text{Ncm}$.

$$F = \frac{M}{r}$$
$$F = \frac{23360\text{Ncm}}{20\text{cm}}$$
$$F = 1168\text{N}$$

Aangezien het gewoon tweerijige tonlager 21304E.TVPB in beide zinnen een axiale kracht kan opnemen wordt dit lager weer gekozen. Gezien de gigantische veiligheidsmarge die de lagers hadden bij de roteren wordt ook dit lager niet berekend.

Op de centrifugale rem zijn er nog lagers nodig, namelijk om de rembalk vlot te doen kantelen. Deze lagers nemen gezamenlijk een radiale kracht op van 400N, dit is ruimschoots de som van het gewicht van de gewichtsbalk en de horizontale balk waar de ontgrendelaar op werkt. Ook hier dezelfde redenering, de krachten werkzaam op rotor zijn veel groter als die van de rembalk, ook hier wordt gewerkt met een gewoon tweerijige tonlager 21304E.TVPB. De as waar de rembalk om draait moet dan ook wel 20mm bedragen.

Er wordt hoofdzakelijk één soort lager gebruikt over geheel de constructie, dat is het gewoon tweerijige tonlager 21304E.TVPB. Dit lager wordt 6 × gebruikt en één keer het lager 22205ES.

De fundering

De molen moet ook bij een hevige storm blijven staan, daarom moet de fundering goed berekend worden. Het moment dat de fundering moet opvangen wordt berekenen. De grootste horizontale kracht treedt op als de molen vaststaat. De kracht wordt daarom berekend met de weerstandsformule. De windsterkte bedraagt bij deze berekening 32 m/s.

$$F_H = \frac{1}{2} \times \rho_L \times C_D \times v^2 \times A$$
$$F_H = \frac{1}{2} \times 1,23 \times 2,0 \times 32^2 \times 1,6$$
$$F_H = 2015\text{N}$$

Er zijn weerstandscoefficienten C_D weergegeven in de bijlage.

De weerstandscoefficiënt C_D van een halve, holle bol, benadert het best de realiteit. Er wordt echter niet met deze waarde van 1,4 gerekend, maar wel met een weerstandscoefficiënt van 2,0. Op deze manier is de situatie zeker niet onderschat.

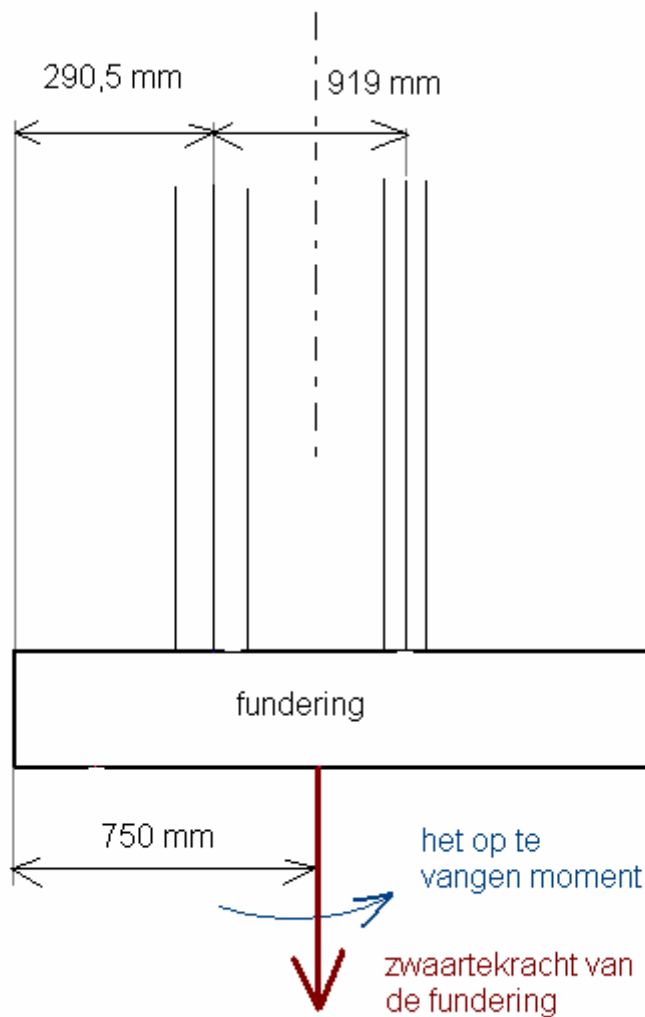
De afstand van de fundering tot het zwaartepunt van de twee roteren bedraagt 3,420m.

$$M_F = L \times F_H$$

$$M_F = 3,420 \times 2015$$

$$M_F = 6891,3\text{Nm}$$

Hoe groot moet de fundering zijn om dit moment op te vangen? Dit wordt berekend door het momentenevenwicht toe te passen. De fundering gaat 1,5m op 2,0m bedragen. De diepte van de fundering wordt berekend aan de hand van de kleinste zijde. Op volgende figuur is de situatie weergegeven.



Figuur 30: schematische weergave voor de berekening van de fundering.

Er wordt van uitgegaan dat er een gewone plaat gegoten wordt als fundering, dat deze op de grond staat, zelfs de palen steken niet in de grond. Zo wordt de situatie zeker niet onderschat. Om de grootte van de funderingsplaat te bepalen wordt een momentenevenwicht toegepast.

$$G_H = \frac{M_F}{L}$$

$$G_H = \frac{6891,3}{0,75}$$

$$G_H = 9188\text{N}$$

Het soortelijk gewicht γ van beton bedraagt 25kN/m^3 . Er is een fundering nodig met een volume van,

$$V = \frac{G_H}{\gamma}$$

$$V = \frac{9,188}{25}$$

$$V = 0,367\text{m}^3$$

De dikte van de fundering bedraagt,

$$D = \frac{V}{A}$$

$$D = \frac{V}{l \times b}$$

$$D = \frac{0,367}{1,5 \times 2,0}$$

$$D = 0,122$$

Dikte $D = 0,122\text{m} = 12,2\text{cm}$. Aangezien dit een zeer essentieel onderdeel is voor de duurzaamheid van de molen, wordt er een veel dikkere plaat gegoten dan berekend. Veiligheidshalve wordt er een plaat gegoten met een volume van $1,0\text{m}^3$. De plaat zal dan een dikte hebben van:

$$D = \frac{V}{A - A_{\text{pomp}}}$$

$$D = \frac{V}{A - \frac{\pi \times d^2}{4}}$$

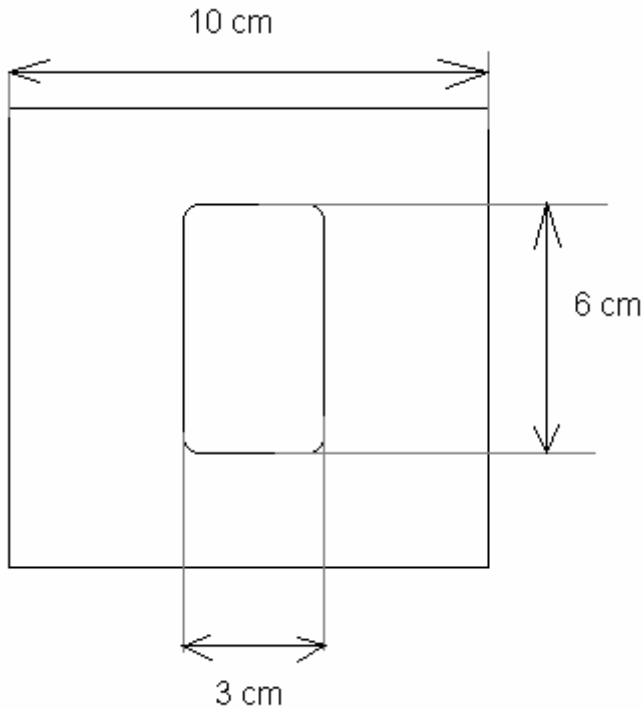
$$D = \frac{1,0}{3,0 - \frac{\pi \times 0,4^2}{4}}$$

$$D = 0,3479\text{m}$$

A_{pomp} is een uitsparing in de fundering waar de pomp in komt. De veiligheidscoëfficiënt ligt hoog genoeg, er is een te grote weerstandcoëfficiënt gebruikt, veronderstelt dat de betonplaat op de grondstaat en het gevonden volume wordt met 263% overschreden.

De toren

De toren wordt vervaardigd uit hout omdat dit materiaal het eenvoudigst te bewerken valt. Op een hoogte van 1,5 m moet onze toren in staat zijn een vat water te kunnen dragen. De ondersteuning van dit vat wordt geconstrueerd met een penverbinding. De sterkte van deze pen wordt berekend.



Figuur 31: afmetingen van de pen

$$\sigma_{\max p} = \frac{M_w}{W_x}$$

Hierin is:

- $\sigma_{\max p}$ = de maximale spanning op de pen in N/m²
- M_w = het moment afkomstig van het water in Nm
- W_x = het weerstandsmoment tegen buiging in m³

$$W_x = \frac{b \times h^2}{6}$$

$$W_x = \frac{0,03 \times 0,06^2}{6}$$

$$W_x = 1,8 \times 10^{-5}$$

$$M_w = G_w \times R \times \frac{1}{4}$$

$$M_w = \rho_w \times V \times g \times R \times \frac{1}{4}$$

$$M_w = \rho_w \times z^2 \times h \times g \times R \times \frac{1}{4}$$

Hierin is:

- ρ_w = de massadichtheid van water in kg/m^3
- z = de zijde van het vat in m
- h = de hoogte van het vat in m
- R = de afstand tussen de kracht F en de pen.
- M_w = het buigingsmoment afkomstig van het water in Nm
- $\frac{1}{4}$ = omdat het gewicht door 4 pennen wordt opgevangen.

De pen wordt zwaarder belast door te veronderstellen dat het volledige gewicht van het vat aangrijpt op het zwaartepunt van het vat en door ervan uit te gaan dat het vat volledig gevuld is met water. Dit kan echter nooit, aangezien de waterrem de rotor dan al heeft afgeremd of de centrifugale rem in werking is getreden.

$$M_w = \rho_w \times z^2 \times h \times g \times R \times \frac{1}{4}$$

$$M_w = 1000 \times 1,0^2 \times 0,4 \times 9,81 \times 0,55 \times \frac{1}{4}$$

$$M_w = 674 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\text{maxp}} = \frac{M_w}{W_x}$$

$$\sigma_{\text{maxp}} = \frac{674}{1,8 \times 10^{-5}}$$

$$\sigma_{\text{maxp}} = 3,7 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

De maximaal toegelaten spanning van hout (eik) bedraagt $4,5 \times 10^7 \text{ N/m}^2$. De constructie voldoet bijgevolg aan de sterkte-eisen. Dit lijkt een kleine veiligheidsmarge, maar het vat zal nooit volledig met water gevuld zijn. De veronderstelling dat het volledige gewicht op het zwaartepunt van de constructie rust verhoogt de spanning ook.

Een ander kritisch punt in de toren is de sterkte van de kruisverbinding die gemaakt wordt om het vat te ondersteunen.

$$\sigma = \frac{G_w}{A}$$

$$G_w = \rho \times V \times g$$

$$G_w = 1000 \times 0,4 \times 9,81$$

$$G_w = 3924 \text{ N}$$

$$A = b \times h$$

$$A = 0,05 \times 0,025$$

$$A = 125 \times 10^{-5}$$

$$\sigma = \frac{G_w}{A}$$

$$\sigma = \frac{3924}{125 \times 10^{-5}}$$

$$\sigma = 3,129 \times 10^6$$

Dit is kleiner dan de toelaatbare spanning. Om de kruisverbinding te construeren worden de twee houten balken half uitgefreesd en aan elkaar gelijmd. Als doorsnede is in bovenstaande berekening het oppervlak van één uitgefreesde balk gekozen. De berekende spanning is groter dan de werkelijk optredende spanning in de kruisverbinding.

Op de plaats waar de palen in de fundering gaan moet het hout ook een grote spanning kunnen opvangen. De maximale spanning is hier een som van de spanning afkomstig van het moment vanwege de rotoren en het eigen gewicht van heel de molen.

$$\sigma_{\max M} = \frac{M}{W_x}$$

$$W_x = \frac{b \times h^2}{6}$$

$$W_x = \frac{0,20 \times 0,20^2}{6}$$

$$W_x = 1,333 \times 10^{-3}$$

$$M_b = \frac{M_F}{2}$$

In de veronderstelling dat slechts twee van de vier palen een moment opnemen, en dat beide een even groot moment opvangen.

$$M_b = \frac{M_F}{2}$$

$$M_b = \frac{7153}{2}$$

$$M_b = 3576,5 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\max M} = \frac{M}{W_x}$$

$$\sigma_{\max M} = \frac{3576,5}{1,333 \times 10^{-3}}$$

$$\sigma_{\max M} = 2,689 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

De massa van de molen omvat het geraamte, de rotor en het vat water. De balken zijn ongeveer 5m, en een zijde van 20cm, het massadebiet van eik bedraagt 450 kg / m³.

$$G_H = \rho \times V \times g$$

$$G_H = \rho \times A \times h \times g$$

$$G_H = 450 \times 0,2^2 \times 5 \times 9,81$$

$$G_H = 883\text{N}$$

$$G_W = 3924\text{N}$$

Dit gewicht van een vol vat water wordt door de vier balken opgevangen. Elke balk heeft een maximaal een gewicht van ongeveer 1000 N extra last te dragen.

$$G_R = 550 \text{ N}$$

Er wordt verondersteld dat dit gewicht door twee palen wordt opgevangen.

$$G_{\text{paal}} = G_H + G_R + G_W$$

$$G_{\text{paal}} = 883 + 275 + 1000$$

$$G_{\text{paal}} = 2158\text{N}$$

$$\sigma = \frac{G_{\text{paal}}}{A}$$

$$\sigma = \frac{2158}{0,2^2}$$

$$\sigma = 53950\text{N/m}^2$$

De totale spanning bedraagt dan:

$$\sigma_{\text{tot}} = 2,69 \times 10^6 \text{N/m}^2$$

Dit is ruim voldoende, aangezien de toelaatbare spanning van eik $7,0 \times 10^7 \text{N/m}^2$ bedraagt. De balk kan 35 keer zo hard belast worden dan berekend. Aangezien dit een essentieel onderdeel is van de constructie, is het nodig een ruime marge te nemen. Indien de twee balken van 6 m ook een doorsnede van 10 op 10 cm zouden hebben, kan er gevreesd worden dat die balken gaan doorbreken in dat midden van de constructie. Met deze balken gaat dat zeker niet gebeuren.

De gewichtsbalk wordt met een pen aan de gewichtsmomentbalk gekoppeld. Deze verbinding wordt tot slot ook nog even gecontroleerd.

$$\sigma = \frac{G_G}{A}$$

$$\sigma = \frac{300}{18 \times 10^{-4}}$$

$$\sigma = 1,66 \times 10^5 \text{N/m}^2$$

Ook deze verbinding is net als elke andere pen verbinding sterk genoeg.

De bouten

De constructie is zoveel mogelijk met een pen verbinding opgebouwd, op enkele plaatsen wordt er echter ook een bout gebruikt. Deze bouten worden berekend op afschuiving.

Om de twee rotorhelften samen te houden wordt er in de eindplaat per schoep 5 bouten geplaatst. Die bouten moeten de centrifugaal kracht opvangen, deze is reeds berekend in het hoofdstuk “krachten op de rotor” en bedraagt 1758N. Deze centrifugale kracht wordt opgevangen door 30 bouten. In de veronderstelling dat deze kracht gelijk opgevangen wordt door deze 30 bouten, is er een afschuifkracht van 60N per bout.

$$\tau = \frac{F}{A}$$
$$\tau = \frac{60}{36}$$
$$\tau = 1,666\text{N/mm}^2$$

Als oppervlakte is het kernoppervlak van een M8 genomen (zie bijlage; tabellen en grafieken; berekening van de rotor krachten). Deze afschuifspanning is zo gering dat ze zeker door de bouten opgevangen kunnen worden, bovendien is er geen rekening gehouden met de lasnaad die ook een groot deel van de kracht zal opnemen.

De centrifugaal regelaar bevat ook enkele bouten. De bout die de centrifugale staaf een de bovenste rotoras koppelt wordt berekend. De centrifugaal ringen hebben een massa van 0,5kg, en een maximale omwentelingssnelheid van 2,5omw/s (= 15,7rad/s). Maximaal bedraagt de straal 365mm.

$$F_c = m_{\text{ring}} \times \omega^2 \times R$$
$$F_c = 0,5 \times 15,7^2 \times 0,365$$
$$F_c = 44,98 \text{ N}$$

Deze kracht moet opgevangen worden door een bout M8.

$$\tau = \frac{F}{A}$$
$$\tau = \frac{44}{36}$$
$$\tau = 1,22\text{N/mm}^2$$

Ook deze kracht is zeker op te vangen door de bouten.

Kostprijs

Er is niet over alles geweten hoeveel het kost. Hoeveel de assen kosten ben ik bijvoorbeeld niet te weten gekomen. De nodige documenten zijn opgestuurd naar een leverancier van assen en dergelijke. Deze man zei dat hij er zijn tijd ging in steken, maar aangezien het voor een eindwerk is en de windmolen niet effectief geconstrueerd wordt, is dat voor hem een nutteloze tijdsbesteding. Vandaar deze gedeeltelijke prijsberekening.

Object		hoeveelheid	prijs per eenheid in €	totaal / object in €
Lagers	rotoras	2	10	20
	pompas	2	10	20
	Rem	4	10	40
afdekplaat	As loopt door	9	?	?
	As stopt	5	?	?
Conisch tandwiel		1	42,28 * 0,8	33,82
Rotor	Vaten	2	/	/
	flenzen	2	?	?
Hout	balk 6 m	2	24,40 / m	292,8
	balk 3,5 m	4	7,05 / m	98,70
	balk 1,45 m	4	7,05 / m	40,89
Pomp		1	/	/
fundering		1,00m ³	93,78	93,78
				546,21

Bij “ Mak & Coeurderoi ” geven ze 20 % korting voor particulieren, vandaar dat er bij de prijsberekening van het conische tandwiel $\times 0,8$.

Met de assen, het afdekplaatje en de flenzen zal de windmolen ongeveer 800 euro kosten. Dit is een aanzienlijke som, rendeert deze investering wel? Om dit na te gaan wordt er uitgerekend hoeveel elektriciteit men kan kopen met zo'n som. De pomp is in ons geval gratis, ze wordt zelfgebouwd, een elektrisch aangedreven exemplaar moet nog aangeschaft worden. Er wordt gerekend met aankoop van een eenvoudige dompelpomp, je betaalt voor deze pomp ongeveer 100€. Voor 700€ kan men 4666,66 kWh aan elektriciteit kopen. (1 kWh = 0,15 €).

De pomp verbruikt 220 W, 4666 kWh komt overeen met $1,68 \times 10^{10}$ Ws . De pomp kan dus 76 363 636 seconde water verpompen voor de prijs van de windmolen. Dit komt overeen met 2,42 jaar. De dompelpomp moet 2,42 jaar non-stop werken, om de investering eruit te hebben. Aangezien de pomp niet continu moet pompen zal de investering pas na vele jaren renderen. Economisch gezien is dit niet zo'n goede investering, maar het voordeel is dat je de pomp niet van stal moet halen telkens het geregend heeft. Tevens geniet je het privilège om 's werelds meest waanzinnige windmolen in je tuin te hebben staan, deze molen oogt als een kunstwerk en werkt naar behoren.

Bouwwijze

De pomp

Een touwpomp kan gemakkelijk zelf geconstrueerd worden met een autoband, een leeg flesje bier, hout, draad, kurk en wat buisjes.



Om het grote pompwiel te construeren wordt een autoband met een diameter van 360mm gebruikt. Deze band moet aan beide zijden rondom worden losgesneden op ca. 5 à 6 cm vanaf de binnenkant (waar de band in velg heeft gelegen). Dit kan gemakkelijk worden gedaan met een (brood)mes. Maak en hou hierbij de band en het mes goed nat met water, zodat het mes gemakkelijker door de band glijdt. De twee uitgesneden stukken band worden met de binnenzijde tegen elkaar gelegd zodat er een V-vorm ontstaat. Op de plaats waar de banddelen elkaar raken worden met 8 spijkers de banddelen aan elkaar bevestigd. Slaag de 8 spijkers op ca. 1cm van de binnenrand helemaal door de twee banddelen.

Nu moet een mooi rond wiel zijn ontstaan met een goede V-vorm. De V-vorm moet ook voldoende open zijn zodat het touw met de zuigertjes mooi in de V kunnen liggen.

Een band met een binnendiameter van 360mm wordt gebruikt. De spaken waar het wiel omheen wordt geklemd moeten iets groter zijn dan de binnendiameter van de band. De spaken bestaan uit 2 planken van 100X370mm met een dikte van 20mm. Deze planken worden vast gegeven op twee houten bevestigingsblokjes van 100X50mm links en rechts van de as. De as heeft ter hoogte van het pompwiel een vierkante doorsnede, zo zitten de spaken vast aan de as. Het wiel kan om de planken gelegd worden. Schuif aan elke kant van de spaken een blokje tussen de planken en het wiel zodat deze goed klem zit. De blokjes hoeven niet te worden vast gespijkerd omdat ze al voldoende geklemd zitten door de band.

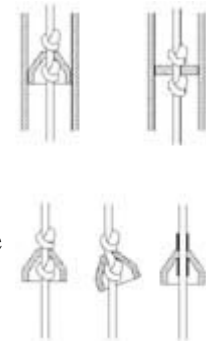
De fundering komt op het laagste punt van de tuin, in de fundering komt een brede buis met een diameter van 40cm en een lengte van eveneens 40 cm. Zodanig dat al het water hierheen stroomt. In deze buis komt de onderzijde van de pomp, op deze wijze kan de tuin steeds droog gepompt worden. De opvoerbuis, die in de brede buis uitmondt, mag aan de onderkant de bodem niet raken, maar moet minimaal zo'n 15cm boven de bodem hangen. Aan de bovenzijde komt nog een verwijding met een lengte van zo'n 10cm welke vlak onder het wiel hangt maar deze niet mag raken. Met deze gegevens kan de lengte van de opvoerbuis worden uitgerekend, in onze situatie bedraagt deze 2,0m. Aan de hand van tabel 1 kan de buisdiameter worden bepaald, deze bedraagt 12,7mm. Aan de onderzijde moet een trechtersvorm worden gemaakt. Dit kan gedaan worden door de buis op deze plaats voorzichtig te verwarmen zodat deze plastisch wordt, en er dan een flesje of iets dergelijks met de gewenste vorm in te drukken. Let er hierbij op dat het een mooie trechtersvorm wordt; bij eventuele deuken aan de binnenzijde kunnen de zuigertjes niet goed naar binnen.

Voor het invoerblok is nodig: een bierflesje van 33cl en een blok hout van ongeveer de dikte van het flesje en een hoogte en lengte van 10X20cm. Het flesje dient verzwaard te worden met nat zand en met een kurk te worden afgesloten. Over de lengte van het blok hout wordt een gleuf gemaakt waar de opvoerbuis iets invalt (ongeveer ¼ deel van de buis diameter). Aan de onderkant komt ook een gleuf maar deze moet zo zijn gemaakt dat hier het flesje mooi in valt. Ook hier geldt dat het flesje er voor ¼ deel in valt. Als het flesje en het eind van de

opvoerbuis (met het trechtertje tegen het flesje aan) op hun plaats worden gelegd in het blok hout, dan is te zien dat de buis, op de plaats van het trechtertje, niet mooi in de gleuf ligt. Haal van het blok hout op de plaats waar het trechtertje in moet vallen wat extra materiaal weg, zodanig dat de buis met trechter mooi in het blok valt en goed tegen het flesje aan ligt. Het flesje en de opvoerbuis kunnen met 2cm brede repen fietsbinnenband worden vastgebonden aan het blok hout. Vooraf moeten er nog een aantal inkepingen in het blok hout worden gemaakt waar de band in komt te liggen. Ook dit wordt weer gedaan om te voorkomen dat het touw straks tegen de repen band schuurt. Om ervoor te zorgen dat het touw daadwerkelijk over het flesje glijdt en er niet vanaf loopt, moeten er nog twee geleidende latjes aan het invoerblok worden bevestigd waar het touw tussendoor komt te lopen. Het touw met de zuigertjes mag niet achter de latjes blijven haken, er worden daarom cilindertjes over de geleidende latjes geschoven.

Zoals al eerder gezegd moet de bovenkant van de buis wat wijder zijn dan de opvoerbuis zelf. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een stuk buis met een grotere diameter, die met een verloopring aan de opvoerbuis wordt gelijmd. Dicht bij deze verlijmplaats moet in de bredere buis een T-stuk worden gelijmd waar de afvoerbuis aan gelijmd kan worden. Bij het verlijmen van het T-stuk op de opvoerbuis moet er op gelet worden dat straks het invoerblok in de goede positie staat.

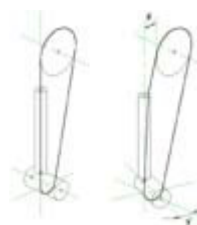
Voordat de touwpomp afgewerkt kan worden, zal eerst het touw met de zuigertjes gemaakt moeten worden. De zuigertjes kunnen met een ponsje uit een stuk leer of rubber geslagen worden. Het overgebleven stuk autoband is hier zeer geschikt voor. Gebruik hiervoor het overgebleven stuk zijkant aangezien er onder zich het loopvlak staaldraad bevindt waar niet doorheen te slaan is. Een ponsje is zelf te maken van een stukje stalen pijp met een binnendiameter die gelijk is aan die van de opvoerbuis. Door de stalen pijp aan één uiteinde aan de buitenzijde schuin af te vijlen ontstaat er een scherpe rand waarmee gemakkelijk de zuigertjes uit het materiaal kunnen worden geslagen. Een goede maat voor de zuigertjes is als ze zo'n 0,2mm speling hebben in de opvoerbuis. De zuigertjes mogen in geen geval klemmen in de buis. In het midden van het zuigertje moet een gat gemaakt worden met een zodanige diameter dat het touw hier net doorheen gaat. Dit gat kan eenvoudig met een boortje van de juiste afmeting gemaakt worden.



Voor het touw kan het beste geslagen touw worden gebruikt met een diameter van zo'n 4 à 5mm. Het soort touw maakt niet zo veel uit als het maar enigszins ruw is. Nylon is een goede en goedkope soort. De zuigertjes moeten op zo'n 1 à 1,5 meter van elkaar op het touw geplaatst worden. Leg aan beide zijden van elk zuigertje een knoop zodat deze goed gefixeerd is. Deze fixatie voorkomt dat het zuigertje zich over het touw kan bewegen wat extra slijtage met zich mee zou brengen. Voor de touw lengte moet rekening gehouden worden met het feit dat er zo'n 7cm opgeteld moet worden voor elke knoop die in het touw gelegd wordt.

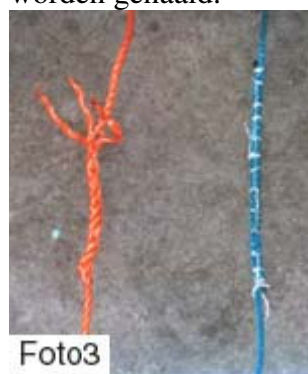
Als het touw zoals hier beschreven voorbereid is, kan het touw door de opvoerbuis worden getrokken. Dit gaat het eenvoudigst door eerst een dun touwtje met een gewichtje door de buis te halen. Aan dit dunne touwtje kan het touw met de zuigertjes worden vastgeknoopt en er doorheen worden getrokken. Maak provisorisch met een eenvoudige knoop de 2 uiteinden aan de bovenkant aan elkaar. Laat hierbij het touw in een grote lus lopen omdat deze straks om het wiel moet komen te liggen.

De opvoerbuisk wordt op twee plaatsen aan het frame opgehangen waarbij de onderkant vrij in de put hangt. Er zijn afstandsblokjes nodig tussen de staanders en de dwarsbalk. Men dient in de gaten te houden dat de dwarsbalk zodanig wordt geplaatst dat het touw, als dat over het wiel ligt, de opvoerbuis recht omhoog verlaat. Het touw mag niet langs de rand van de buis schuren.



Leg het touw over het wiel, met stroken fietsband kan de opvoerbuis aan de balk worden gebonden. Dit moet zodanig gebeuren dat tussen de bovenkant van de buis en het wiel nog een ruimte zit van minimaal 5cm en het touw moet recht omhoog uit de buis komen. De twee uiteinden van het touw kunnen aan elkaar bevestigd worden zodat een eindloos stuk touw ontstaat. Het is hierbij de bedoeling dat de plaats waar de twee uiteinden aan elkaar worden gemaakt zo dun mogelijk blijft, zodat deze nog gemakkelijk in de buis past. Als gebruik is gemaakt van geslagen touw met 3 strengen, kunnen deze als volgt aan elkaar worden gemaakt. Trek het touw lichtjes strak waarbij je de twee uiteinden langs elkaar laat lopen. Het overige stuk touw kan worden afgeknipt zodanig dat de twee uiteinden elkaar zo'n 20cm overlappen. Elk uiteinde wordt tot de helft van de overlapping ontward. De uiteinden kunnen met elkaar worden verweven door de aparte strengen tussen nog in elkaar zittende strengen van het andere uiteinde te steken. Doe dit net zolang totdat alle strengen helemaal in elkaar verweven zitten. Let er hierbij op dat het touw niet te strak komt te staan of dat het te los komt te hangen.

Als gebruik is gemaakt van gevlochten touw kunnen de twee einden aan elkaar worden genaaid. Kort het touw in zoals hierboven is aangegeven en zorg er ook hier voor dat de twee uiteinden elkaar zo'n 20cm overlappen. Met naald en draad kunnen de twee einden aan elkaar worden genaaid.



De toren

Eerst en vooral moeten de juiste balken besteld en geleverd worden. Deze balken kunnen geprepareerd worden, door op de juiste plekken pennen te zagen, en gaten te boren. Doe dit volgens de technische tekeningen in de bijlage. Het hout moet behandeld zijn, om het te beschermen tegen weer en wind. Indien deze voorbereidingen getroffen zijn kan begonnen worden met de eigenlijke assemblage. Hoofdbalk 1 wordt aan hoofdbalk 2 gekoppeld door middel van de horizontale balken die ertussen moeten komen te liggen. De pennen van de twee Savoniusbalken, en één waterbalk worden in de gaten van de hoofdbalken gelijmd. In de veronderstelling dat de put voor de fundering reeds gegraven is, kan deze constructie rechtgezet worden. Ze wordt in evenwicht gehouden door tegen elke hoofdbalk telkens 2

planken in elkaar verlengde te vijzen en deze planken aan de grond te verankeren. Dit verankeren kan best gebeuren door paaltjes in de grond te slagen waar de planken dan ook tegen gevezen kunnen worden.

De grote en kleine steunbalken kunnen ook geplaatst worden, deze worden met elkaar verbonden d.m.v. de tweede waterbalk. Het is belangrijk er aan te denken dat je het vat van de waterrem eerst tussen de vier rechtopstaande balken plaatst alvorens de tweede waterbalk in de twee steunbalken te verlijmen. De waterbalken worden onderling ook vast gelijmd. De steunbalken moeten niet in evenwicht gehouden worden door planken aangezien die via de waterbalken met de hoofdbalken verbonden zijn en deze in evenwicht gehouden worden.

De pompsteunen kunnen op de tweede hoofdbalk en de grote steunbalk gevezen worden. Na het afstandsblokje op de pompbalk te hebben gevezen, kan die pompbalk via de dwarsbalk en de pompsteun met de rest van de constructie verbonden worden. De pompbalk kan best op zijn plaats gehouden worden door een plank en een paaltje, net zoals de hoofdbalken in evenwicht gehouden worden.

De fundering kan gegoten worden. Daar waar het flesje van de pomp komt mag er geen beton zijn. Op die plek wordt er eerst een brede buis ($D = 40\text{cm}$) geplaatst, op de buis wordt er best een balk gelegd met een gewicht, dit om deze te verzwaren. De buis blijft zo zeker liggen en de vereiste uitsparing wordt verkregen. De fundering kan best enkele dagen drogen. Ondertussen kan begonnen worden met de bouw van de Savoniusrotor.

De Savoniusrotor

Het vat doorslijpen kan vergemakkelijkt worden door eerst de slijpsnede te tekenen met krijt. Op de bovenzijde van het vat wordt een diagonaal getekend, in het verlengde van deze diagonaal een lijn op de omtrek van het vat. Het lijkt me het eenvoudigst een schietlood te gebruiken. Zet het vat recht, leg het touw op de getekende diagonaal, het lood naar beneden hangen laten hangen en de lijn aftekenen. Doe hetzelfde aan het andere eind van de diagonaal. Op de onderzijde van het vat kunnen de twee eindpunten verbonden worden, zodat de tweede diagonaal getekend is. Het is belangrijk te controleren of de onderste diagonaal wel effectief een diagonaal is en geen koorde. Dit kan gedaan worden door het middelpunt van het vat te bepalen met een passer, of een nagel. Het middelpunt van een cilinder is ook het zwaartepunt van een cilinder. Als het vat in evenwicht gehouden kan worden op een nagel, dan is het middelpunt gevonden. Als al de lijnen getekend en gecontroleerd zijn, kan het slijpen beginnen. Dit alles moet twee maal gedaan worden, aangezien er twee vaten boven elkaar gebruikt worden.

Er zijn drie eindplaten nodig, deze moeten cirkelvormig zijn met een diameter van 1,00m. Op deze eindplaten wordt een middellijn getekend, hierop kan het rotatiepunt, en de middelpunten van de 2 halve vaten gemarkeerd worden. De halve cirkels, het grondvlak van een half vat, wordt uitgetekend met een grote passer of met een touwtje en krijt. De benen van de passer moeten 28,5 cm uit elkaar staan. De onderst en bovenste eindplaten moeten slechts op één zijde afgetekend worden, de middelste op onder en bovenzijde. De diagonalen van de twee zijden moeten een hoek van 90° maken. Op de eindplaten worden ook de plaatsen waar de bouten moet komen aangeduid, en de gaten worden reeds geboord.

Alles is in gereedheid gebracht om te beginnen assembleren. Neem één rotor helft en plaats hierop de onderste eindplaat, zoals afgetekend op de eindplaat. De plaatsen waar de bouten moeten komen worden afgetekend met een nagel. Boor de gaten in het vat en bevestigen de rotorhelft met de eindplaat. Op identieke wijze wordt ook de tweede rotorhelft op de eindplaat gemonteerd. Draai dit geheel om, plaatsen de volgende eindplaat op de rotor en tekenen weer af. Voor de eindplaat hierop gemonteerd wordt, moeten de gaten van de volgende rotor al afgetekend zijn. Na de gaten geboord te hebben, kan de tweede eindplaat, en de tweede rotor, op de eerste rotor geplaatst worden. Tot slot wordt ook de laatste eindplaat gemonteerd. De rotor kan verstevigd worden door de halve vaten aan de boven en onderzijde tegen elkaar te lassen. Op de twee uiterste eindplaten kunnen twee flenzen geplaatst worden. Zowel voor de flenzen als voor de eindplaten gebruiken we een bout M8, om alles goed te verankeren. De flenzen zijn binnenin conisch uitgedraaid, dit is nodig om er zeker van te zijn dat de rotoras loodrecht op de eindplaat staat. Op deze manier moeten de rotoras niet vast gelast worden aan de flens. Een kolomboormachine gebruikt deze methode ook om de boren vast te zetten.

De gehele constructie

Als de fundering voldoende gedroogd is, kan de rotor in de toren geplaatst worden. De onderste en bovenste as wordt klaargemaakt. Voor de onderste as wil dit zeggen dat het conische tandwiel op de as bevestigd wordt, net als de remplaat. Het lager en het onderste afdekplaatje moeten ook al over de as geschoven zijn net als de veerring. Neem nu de rotor, en plaats deze tussen de twee savoniusbalken, denk hierbij al na over de draaizin van de rotor dit is van belang voor de werking van de centrifugale rem. Steek de onderste as door de onderste savoniusbalk, schuif er het tweede afdekplaatje over, en klem de as in de conisch gefreesde flens. Plaats de veerring op de juiste plek op de as, leg het lager erop. Het onderste en bovenste afdekplaatje kan vast gegeven worden, het lager is zo verankerd. Op deze wijze hangt de rotor in de onderste savoniusbalk. Op een gelijkaardige manier wordt de bovenste as door de bovenste savoniusbalk geschoven, en wordt het lager bevestigd. Het lager zit vast tussen twee afdekplaatjes, een veerring en de verdikking van de as.

Nu de rotor in de toren hangt kan het remsysteem gemonteerd worden. De twee centrifugaal ringen worden via de beugel aan de centrifugaal staaf gekoppeld m.b.v. een bout M7. Deze centrifugaal staven kunnen op hun beurt verbonden worden met de bovenste rotatieas. Hier voor kan eveneens een bout M7 gebruikt worden. De rotatiesteun kan in het gat van hoofdbalk 1 geschoven worden. Om te vermijden dat deze steun in en uit het gat kan schuiven wordt deze vastgelijmd en onderaan komt een hoekprofiel dat de rotatiesteun aan hoofdbalk 1 bevestigt. Neem de ontgrendelaar en plaats deze op de bovenste savoniusbalk, de as kan door de ontgrendelaar en de savoniusbalk gestoken worden. De lagers worden op gelijke wijze als bij de rotor geklemd, door een verdikking van de as, door een afdekplaatje en door een veerring. De gewichtsmomentbalk kan genomen worden en de rotatie as mag erdoor gestoken worden. Ook hier weer dezelfde methode om de lagers te klemmen. De gewichtsbalk kan vastgelijmd worden over de gewichtsmomentbalk. Zet de ontgrendelaar niet over de gewichtsmomentbalk zodat de rotor niet kan roteren. Indien de gewichtsbalk het vereiste gewicht niet bereikt kan er een extra gewicht aan deze balk gehangen worden. Er is hier een oog voor voorzien. Bevestig tot slot de ontgrendelaarsstop op de gewichtsmomentbalk en knoop de vergrendelkoord aan de ontgrendelaar en laat deze over de gewichtsbalk lopen.

Tot slot mag de pomp met rotor gekoppeld worden. Neem de pompas en klem deze op de gekende wijze in de pompbalk. Via het andere einde kan het pompwiel op de vierkante doorsnede van de as gemonteerd worden. Schuif nu achter een volgens een afdekplaatje, een veerring, de lagerpompsteun, nog een veerring en afdekplaatje en ten slotte het tweede conische tandwiel over. De lagerpompsteun kan vastgevezen worden in hoofdbalk 2 en in de grote steunbalk. Het lager mag geklemd worden in deze lagerpompsteun en het conische tandwiel op zijn plaats geschoven. De pomp mag geïnstalleerd worden, en de centrifugaal rem uitgeschakeld.

Besluit

Het eindwerk bestaat erin een windmolen te ontwerpen die een pomp moet kunnen aandrijven. Deze pomp moet regenwater, dat zich ophoopt achter in een tuin, wegpompen naar een afwaterende beek. Een degelijke pomp vinden was een hele opdracht. De pomp had namelijk vele eisen waaraan voldaan moest worden, ze moest een klein en debiet en vermogen hebben, zelfaanzuigend zijn en droog kunnen lopen. Een touwpomp is de gebruikte pompsoort.

Als molen is er een eenvoudige, goedkoop en charmant exemplaar gekozen, een Savoniusrotor. Het grootste nadeel aan dit type windmolen is dat deze niet uit de wind gedraaid kan worden, zodat er een andere methode van remmen ontwikkeld moest worden. Geen enkele informatiebron (boeken, internet, specialisten,...) kon mij een remsysteem aanreiken dat toepasbaar was. Hier is dan ook aardig wat denkwerk in gekropen, met een bevredigend resultaat. Al blijft het wel een theoretisch ontwerp dat nog niet aan de werkelijkheid is getoetst.

Bibliografie

1. Muhs D. e.a. Wittel H. e.a. Becker M. e.a. Jannesch D., *Rolof / matek machine-onderdelen Theorieboek*, 3^e verbeterde druk, s.l., Academic Service, 2002
2. Muhs D. e.a. Wittel H. e.a. Becker M. e.a. Jannesch D., *Rolof / matek machine-onderdelen Tabellenboek*, 3^e verbeterde druk, s.l., Academic Service, 2002
3. Wartena R., *Windgeneratoren*, 5^e druk, s.l., Deventer-Antwerpen, 1982
4. Westra C. en Tossijn H., *Windwerkboek*, s.l., Ekologische Uitgeverij, 1980
5. Bugge J., *Windmolenboek*, s.l., Deventer-Antwerpen, 1981
6. Von König F., *Wind en energie*, Deventer-Antwerpen, 1980
7. Hofman H., *Windenergie commerciële toepassingen*, s.l., Deventer, 1983
8. Wa. Janssens, *Vorm- en plaatstoleranties*, Campus Hoboken, 2003
9. Mak & Coeurderoi, *Alle industriële aandrijvingen*, Wilrijk, s.a.
10. <http://www.deloule.com/Productos.htm>
11. <http://www.flowshop.be/assets/s2dmain.html?http://www.flowshop.be/0000009530143d901/00000095301440e04/index.html>
12. <http://www.bestvacuumpumps.com/products.html>
13. <http://www.biral.ch/products02-nl.php>
14. <http://www.blackhawkco.com/>
15. <http://www.cleaner-vacuum-cleaners.com/search/stokes-vacuum-pump.html>
16. <http://www.pumpservice.be/commerciepompen.htm>
17. <http://www.lenntech.com/conversie-calculator/volumedebiet.htm>
18. <http://www.usvacuumpumps.com/KDKDHDDataSheet.pdf>
19. <http://www.vme.be/ned/index.html>
20. <http://www.atholland.nl/index.htm>
21. http://www.bba-group.net/~nederlands/home_distrimex.htm
22. http://www.endepompen.nl/de_producten.htm
23. <http://www.johnson-pump.com/frameset.asp?page=OTHER/downloads.htm&navigation=OTHER/localnavigation.asp?CompanyId=OTHER&adress=OTHER/adress.asp>
24. <http://www.joza.nl/teksten/7200.htm>
25. <http://www.maag.com/>
26. <http://pomp.nl/>
27. <http://www.pompen.eigenstart.nl/>
28. <http://www.proquip.be/>
29. <http://www.unionpump.com/>
30. <http://www.wilo.be/w3a/EntryPages/be/index.asp>
31. <http://www.wijkboerma.nl/producten/blackmer/pub/algemeen.html>
32. <http://www.wijkboerma.nl/producten/blackmer/pub/ML.html>
33. <http://pompen.pagina.nl/>
34. <http://www.wijkboerma.nl/>
35. http://www.haakreparaties.nl/index.html?target=p_823.html&lang=nl
36. <http://www.zelfbouw-groenestroom.nl/onderhoud.php>
37. http://users.skynet.be/Windmolens/enkele_molen_types.htm
38. <http://www.kockie.nl/download/windbouwwerk1.pdf>
39. <http://members.home.nl/i.j.m.aneke/temp/800050.html>
40. http://www.student.utwente.nl/~wot/documents/publications/2003_cde/windenergie.pdf
41. <http://www.denhaag.nl/DOCS/DSB/milieu/Rapport.pdf>