

afb 8.30 Vele molentypen zijn ontwikkeld. Onderscheid wordt gemaakt in horizontale of verticale molens, het aantal bladen, de vorm van de bladen en het doel waarvoor ze gebruikt worden.

DE ROTOR

Inleiding

De uitvoering van de rotor bepaalt tot welk type een windmolen behoort. De molens die we in het landschap tegenkomen hebben meestal een horizontale as. Ook de meeste molens voor het opwekken van elektriciteit zijn op die manier gebouwd, zoals de grote Tvindmolen in Denemarken. Tot de vertikaal draaiende molens behoren de panemoon, Darrieus-rotor en Savonius-rotor. Ook komen combinaties van deze soorten voor. Een voordeel van de meeste verticale molens is dat ze niet op de wind gericht hoeven te worden. Vanuit alle richtingen kan de rotor worden aangeblazen. Dit spaart een dure krui-inrichting uit.

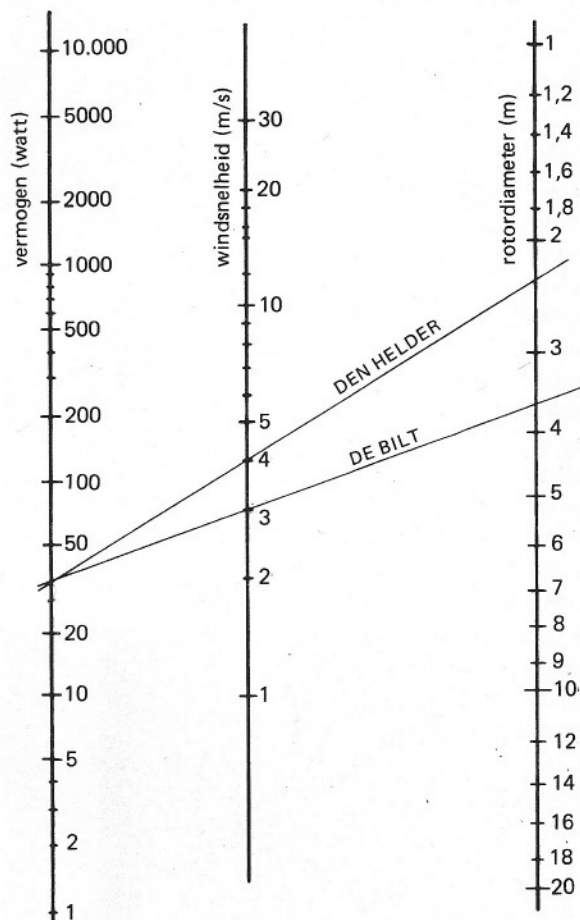
Om elektriciteit op te wekken moet de rotor aan hoge eisen voldoen. Het rendement van de rotor dient zo hoog mogelijk te zijn. Dat betekent dat de rotor snel en met weinig weerstand moet draaien. Veel oude wieksystemen komen daarom niet in aanmerking, zoals de grote houten wieken van de Hollandse molens en de vele metalen bladen van de poldermolentjes. Moderne windmolens hebben slechts twee tot vier zorgvuldig berekende wieken.

De diameter van de rotor

Om de wiekdiameter te bepalen heb je de beginwindsnelheid en het veldvermogen van de dynamo nodig.

De dynamo moet bij de beginwindsnelheid (V_{begin}) starten met stroom leveren. Dat is het uitgangspunt voor het bepalen van de rotordiameter. Bij de beginwindsnelheid moet de rotor dus zoveel vermogen leveren dat in de dynamo het magneetveld opgebouwd wordt: het veldvermogen (P_{veld}). Hoe het verband tussen windsnelheid, vermogen en rotordiameter in elkaar zit, zien we in het nomogram (afb 8.31). Het is een eenvoudig hulpmiddel om de rotordiameter vast te stellen. De formule $P = 0,1 \times V^3 \times D^2$ is hier op een grafische manier weergegeven.

Voor de molens in Den Helder en De Bilt bepalen we de rotordiameter die nodig is om bij de beginwindsnelheid het veldvermogen te leveren.



afb 8.31 Met dit nomogram kan de diameter van de rotor vastgesteld worden.

Voor Den Helder weten we:
 begin-windsnelheid (V_{begin}) = 4 meter per seconde
 veldvermogen (P_{veld}) = 35 watt.

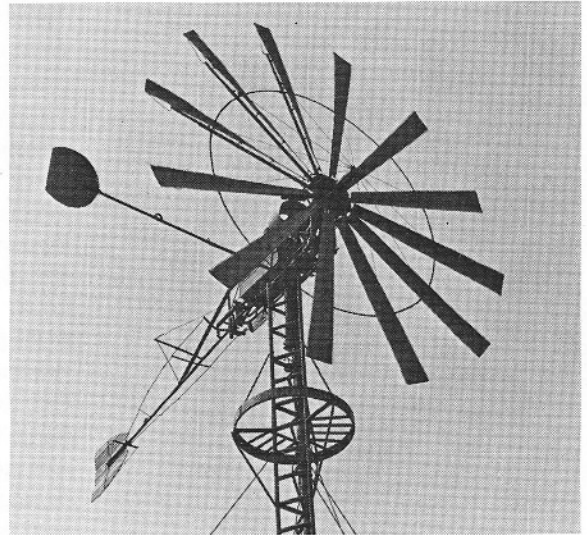
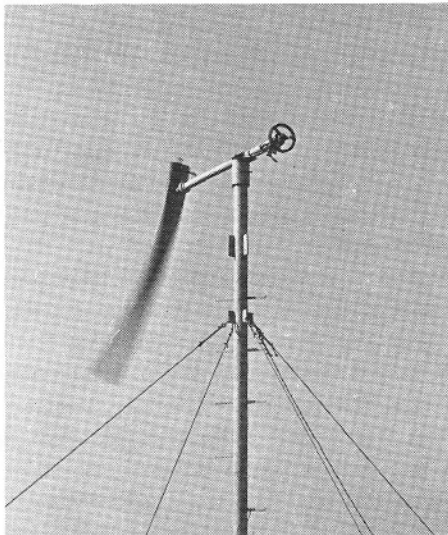
In het nomogram vinden we een wiekdiameter van 2,40 meter. Het kan zijn, dat je dat te groot vindt. Je gaat dan andersom te werk. Een rotor van 2 meter zou je kunnen maken. Het gevolg daarvan is, dat de dynamo geen stroom begint te leveren bij een windsnelheid van 4 meter per seconde, maar bij bijna 4,5 meter per seconde. Dat heeft uiteraard ook consequenties voor de opbrengst.

Voor De Bilt:
 begin-windsnelheid (V_{begin}) = 3 meter per seconde
 veldvermogen (P_{veld}) = 35 watt.

We vinden een wiekdiameter van 3,60 meter. Ook hier geldt weer: vind je dit te groot, maak dan een kleinere, maar houd rekening met de gevolgen voor de begin-windsnelheid en de opbrengst.

Het aantal bladen

Samen met het wiekprofiel is het aantal bladen bepalend voor de snelheid waarmee een rotor draait. Sommige poldermolens hebben wel vijftig bladen, terwijl er experimentele windmolens zijn met maar één wiek. De snelheid waarmee een wiek draait is afhankelijk van de verhouding tussen het oppervlak van de bladen en het oppervlak dat door de wieken bestreken wordt (het doorstroomde oppervlak). We noemen deze verhouding de bestrijkingsgraad of solidity, de engelse term. Hoe kleiner de bestrijkingsgraad, hoe hoger toerental. Voor de hoeveelheid energie die uit de wind gehaald wordt maakt het in principe niets uit of dit met één of meerdere bladen gebeurt. Eén blad rent zich rot om alle energie uit een bepaald oppervlak te halen terwijl meerdere bladen het wat rustiger aan kunnen doen, omdat ze toch met zo vele zijn.



Op basis van de snelheid waarmee de wieken draaien, ten opzichte van de wind, is een indeling gemaakt in snel- en langzaamlopers. Beide typen zijn in principe geschikt voor het opwekken van elektriciteit. Alleen zal de snelloper vaker gekozen worden dan de langzaamloper, omdat de meeste generatoren die nu voorhanden zijn hoge toerentallen vereisen.

afb 8.32 Experiment met 1 wiek (links).

afb 8.33 Windmolen met 12 bladen (rechts).

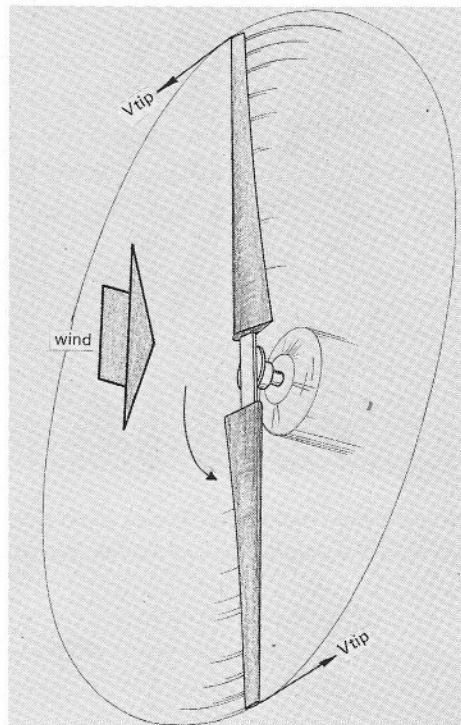
afb 8.34 Verschillen tussen langzaamlopers en snellopers.

VOORDELEN	NADELEN
LANGZAAMLOPERS λ van 1 tot 5	
<ul style="list-style-type: none"> - groot aanloopkoppel - wiekprofiel hoeft niet zo nauwkeurig te zijn - weinig lawaai - weinig trillingen door onbalans 	<ul style="list-style-type: none"> - grote overbrenging nodig - veel materiaalgebruik - de installatie is zwaar
SNELLOPERS λ groter dan 5	
<ul style="list-style-type: none"> - hoog rendement - geen of kleine overbrenging nodig - weinig materiaalgebruik - lichte installatie 	<ul style="list-style-type: none"> - laag aanloopkoppel - wiekprofiel moet nauwkeurig zijn - meer lawaai - kans op trillingen - goede beveiliging nodig

Snellopendheid

De verdeling tussen snel- en langzaamlopers wordt gemaakt op basis van de snellopendheid λ (spreek uit labda). Dat is de verhouding tussen de snelheid, waarmee het uiteinde (de tip) van de wiek ronddraait en de windsnelheid (afb 8.35). Draait de tip viermaal zo snel als de windsnelheid dan is de snellopendheid 4 ($\lambda = 4$).

Het onderscheid tussen snellopers en langzaamlopers is niet zo duidelijk. De grens ligt bij een snellopendheid van circa 5. Erboven spreken we van een snelloper, anders is het een langzaamloper. Het rendement (vermogenscoëfficiënt) van een rotor is afhankelijk van de snellopendheid. Deze is niet steeds konstant. De λ waarmee wij rekenen is de maximale snellopendheid. In de grafiek van afb 8.36 is van verschillende rotortypen weergegeven bij welke snellopendheid ze het hoogste rendement hebben. Dat betekent dat elke rotor slechts bij één windsnelheid zijn hoogste rendement heeft. Is de windsnelheid hoger of lager dan wordt de snellopendheid respectievelijk hoger of lager en neemt het rendement af. Uit deze grafiek blijkt dat rotoren met minder dan vier bladen het meest geschikt zijn voor het opwekken van elektriciteit omdat de meeste generatoren hoge toerentallen vereisen. De keuze voor de snellopendheid hangt dus nauw samen met de keuze voor het aantal bladen.



afb 8.35 Snellopendheid $\lambda = \frac{V_{tip}}{V_{wind}}$

Om een indruk te hebben wat het toerental van de rotor - n_r - dan is, kan de volgende formule gebruikt worden:

$$n_r = \frac{\lambda \times V \times 60}{\pi \times D} \text{ omw/min.}$$

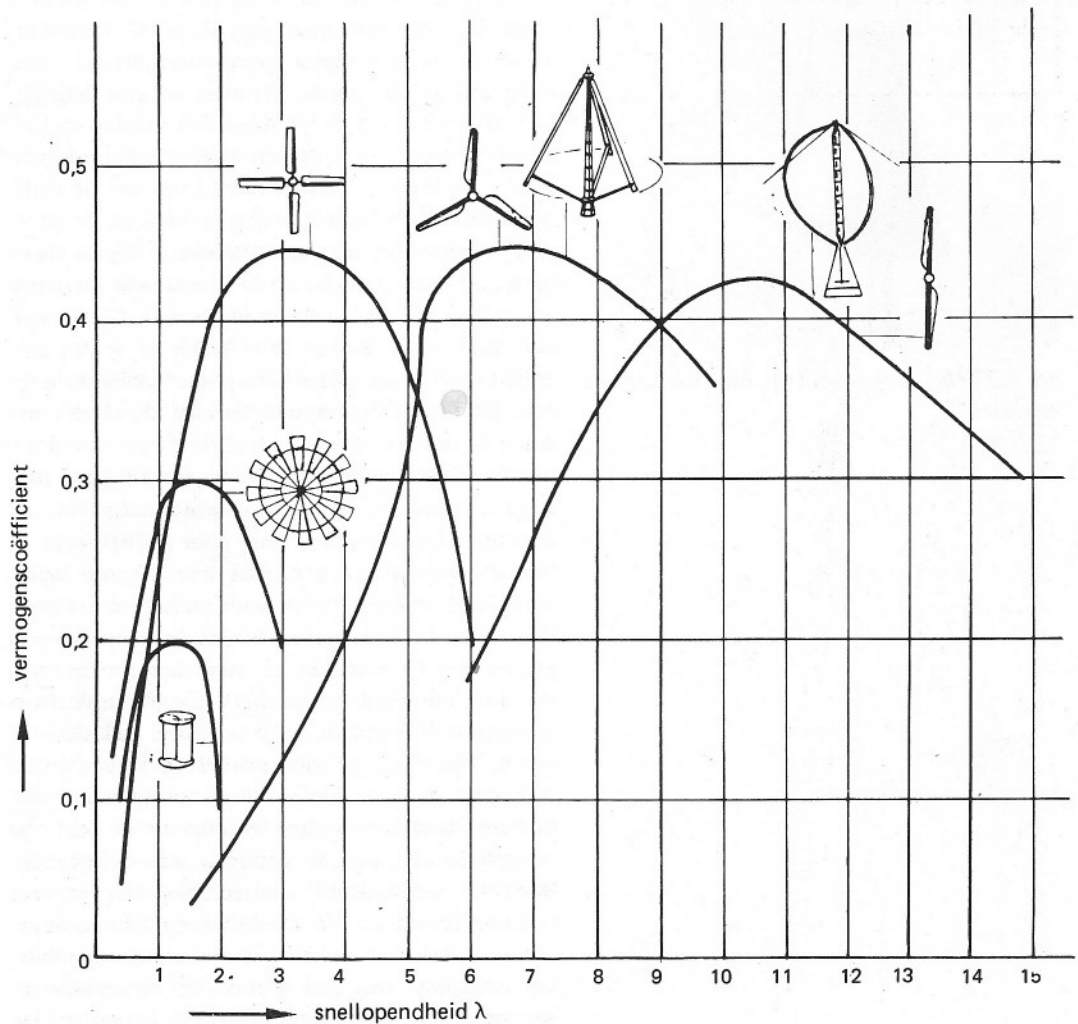
Bijvoorbeeld:

snellopendheid = 10

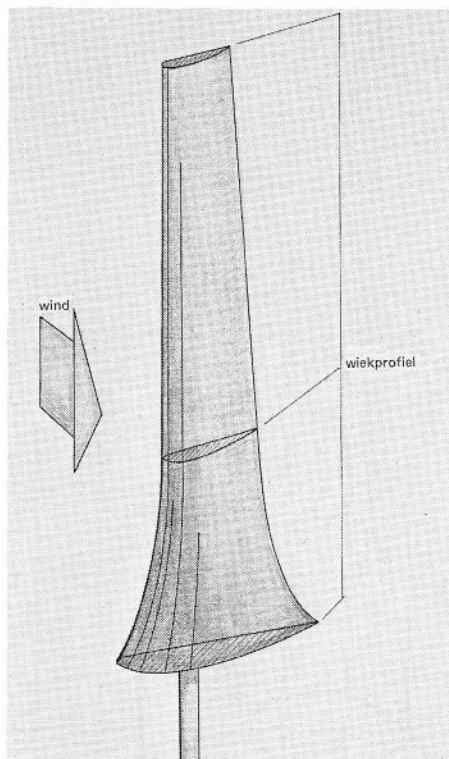
windsnelheid $V = 10$ meter per seconde

diameter van de rotor $D = 3$ meter

$$n_r = \frac{10 \times 10 \times 60}{3,14 \times 3} = 637 \text{ omw/min.}$$



afb 8.36 Verband tussen de snellopendheid en het rendement (vermogenscoëfficiënt) van verschillende rotortypen.



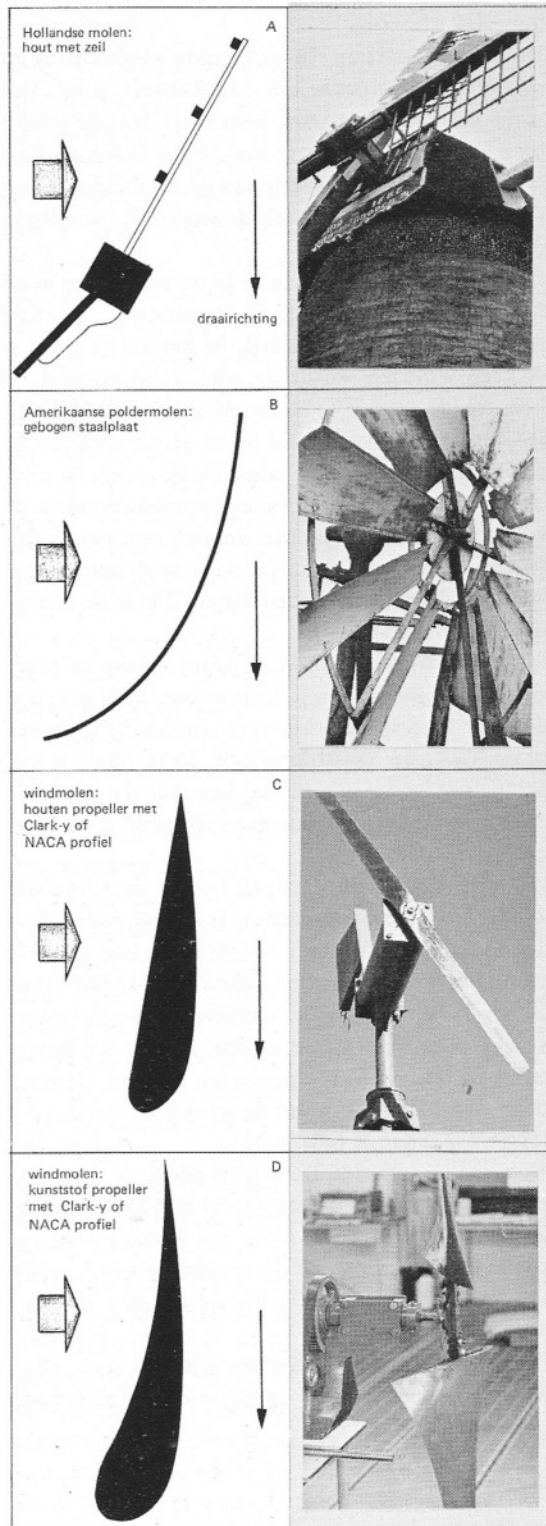
afb 8.37 Het wielprofiel op drie plaatsen van een wiel.

Het wielprofiel

Met het wielprofiel bedoelen we de vorm van de doorsnede van een wiel (afb 8.37). Het profiel bepaalt de aerodynamische eigenschappen van een wiel. In windtunnels meet men de krachten die op een wiel werken. Mede door deze proefnemingen zijn er profielen ontwikkeld met zeer goede aerodynamische eigenschappen. In afbeelding 8.38 zijn dat de onderste twee. De wieken van de Hollandse molens en in mindere mate de wieken van de Amerikaanse poldermolens hebben een minder goed aerodynamisch rendement.

Welke krachten werken er op een profiel en hoe komt het dat een wiel gaat draaien? Daarvoor bekijken we het meest eenvoudige profiel: een rechthoekige doorsnede. Wanneer we een dergelijke plank schuin in de wind houden worden op het profiel ervan twee krachten uitgeoefend: een liftkracht en een weerstandskracht (ook wel de drift genoemd). De liftkracht zorgt ervoor dat de wiel gaat draaien. De weerstandskracht is alleen maar lastig. Deze werkt door op de konstruktie en moet door de mast worden opgevangen. Als je wel eens gevliegerd hebt, ken je deze krachten al. Bij het oplaten wordt de vlieger schuin in de wind gehouden. De liftkracht zorgt ervoor dat de vlieger de lucht in gaat. De wind "duwt" de vlieger omhoog. Als de vlieger in de lucht staat, trekt hij aan het touw. Die trekkracht ontstaat grotendeels door de weerstand en in mindere mate door de liftkracht.

De liftkracht op een profiel wordt veroorzaakt door luchtdrukverschillen voor en achter het profiel. Wanneer een profiel in een luchtstroom geplaatst wordt, ontstaat er voor het profiel een overdruk en achter het profiel een onderdruk. Hoe groter dit drukverschil, des te groter zal de liftkracht zijn. Op een goed profiel werkt een grote liftkracht en een kleine weerstandskracht. Die lift/weerstands-verhouding is afhankelijk van de aanstroomhoek van de wind en het wielprofiel. Door bij verschillende aanstroomhoeken de verhouding tussen de lift- en de weerstandskracht te bepalen, ontstaat inzicht in de aerodynamische eigenschappen van een profiel. Op vleugelprofielen werkt een veel grotere liftkracht dan op vlakke of gebogen platen. Daarnaast is door hun gunstige vorm de weerstandskracht kleiner. De lift/weer-



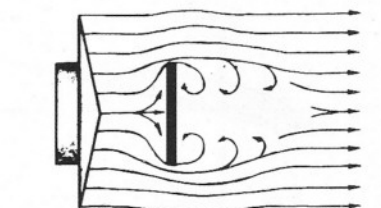
afb 8.38 Enkele wiekprojecties...

afb 8.39 a) niet gestroomlijnd profiel baaks in een luchtstroom

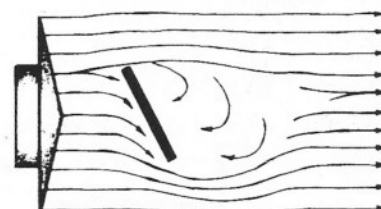
b) niet gestroomlijnd profiel schuin in een luchtstroom

c) voor het profiel ontstaat een hoge luchtdruk en achter het profiel een lage

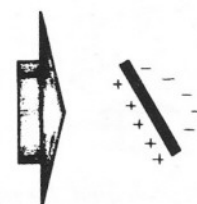
d) door de drukverschillen gaat er op het profiel een liftkracht L werken en door de luchtweerstand die het profiel ondervindt een weerstandskracht of drijfkracht D .



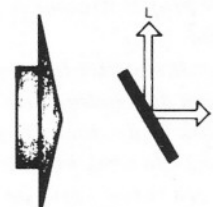
A



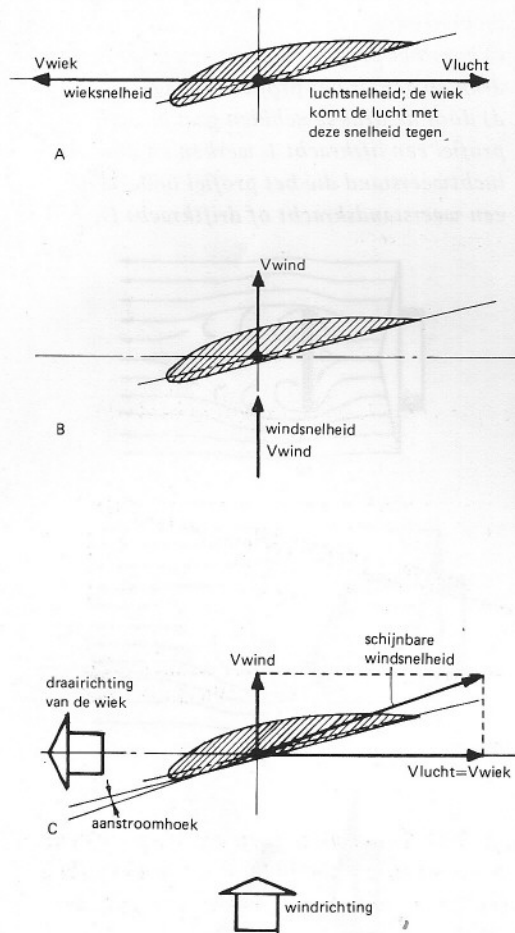
B



C



D



afb 8.40 a) Er is geen wind. De wiek wordt rondgedraaid. De wiek voelt de lucht aan de neus langstromen. De snelheid waarmee de lucht langs het profiel stroomt is gelijk aan de wieksnelheid.

b) De wiek wordt stilgezet in de wind. De wiek voelt alleen de windsnelheid.

c) De wiek draait in de wind. De wiek voelt de windsnelheid van opzij komen en de luchtsnelheid van voren. Door deze twee snelheden samen te stellen ontstaat de schijnbare wind.

standsverhouding is bij vleugelprofielen dus zeer hoog.

Uit de loodrecht op elkaar staande windrichting en draairichting ontstaat een "schijnbare" wind. Het is de wind zoals de wiek hem voelt. Met de schijnbare wind heb je ook te maken bij zeilen en fietsen. Het is een combinatie van de snelheidsrichting van de boot of de fiets en de werkelijke windrichting.

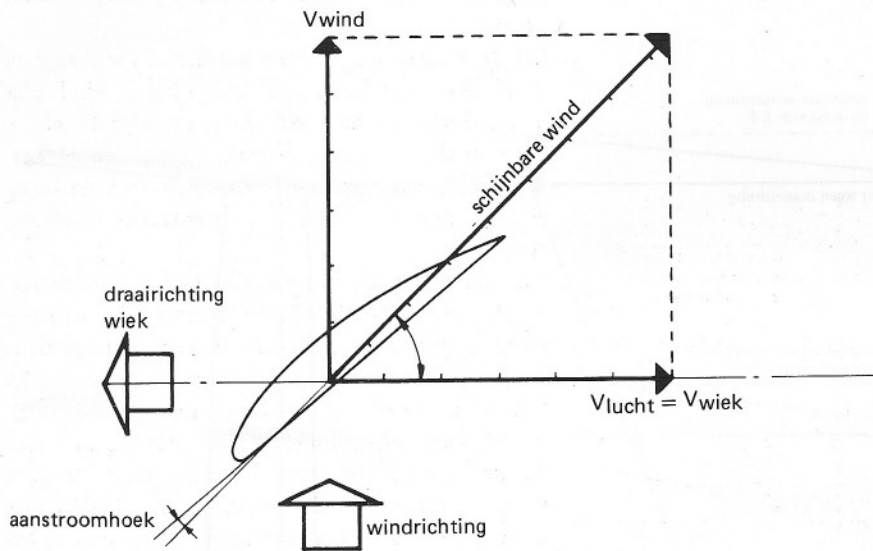
Om het te begrijpen kun je je de schijnbare wind het beste voorstellen als de combinatie van twee uiterste situaties (afb 8.40). In het eerste geval is er geen wind en wordt de wiek rondgedraaid. In het tweede geval is er wel wind, maar staat de wiek stil. In de werkelijkheid is er altijd sprake van deze twee uitersten: de wind blaast tegen de wiek en de wiek draait. Er is dus een windsnelheid en de wiek ondervindt door het draaien ook een luchtstroom recht van voren. De wiek voelt een samenstel van deze twee luchtstromen. Dit is de schijnbare wind.

De hoek die de schijnbare wind maakt met het vlak van draaiing kun je uitrekenen. Er is ook nog de hoek tussen de schijnbare windrichting en het profielvlak, de aanstroomhoek. Deze hoek is van belang omdat bij een bepaald profiel een bepaalde aanstroomhoek de meest gunstige resultaten oplevert.

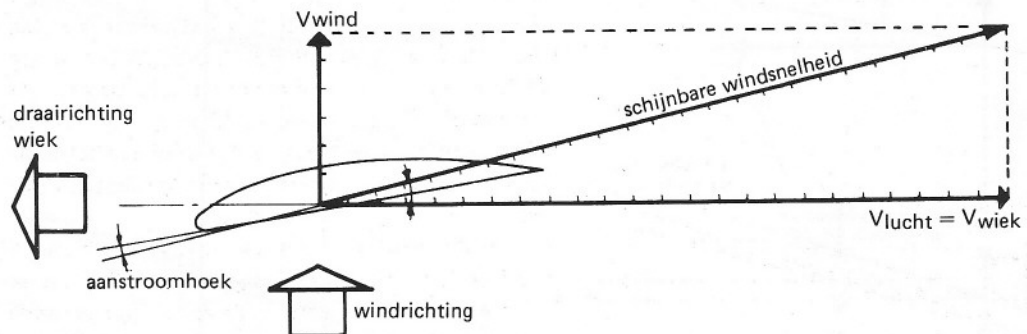
Het uitrekenen van de hoek tussen de schijnbare wind en het vlak van draaiing is simpel. Stel dat de wiek een snelheid heeft van 6 meter per seconde en de wind ook. Door te kijken naar de luchtsnelheden die op het profiel werken, en die in een tekening op schaal uit te zetten, kan de schijnbare wind en ook de hoek opgemeten worden. De hoek is 45° en de snelheid van de schijnbare wind is 8,5 meter per seconde (afb. 8.41).

Nog een voorbeeld: De wieksnelheid is 24 meter per seconde en de windsnelheid is 6 meter per seconde. We zetten dit weer op schaal uit in een snelheidsdiagram. Voor de schijnbare wind vinden we bijna 25 meter per seconde en voor de hoek 14° (afb 8.42).

De snelheid van de schijnbare wind en dus ook de aanstroomhoek is niet op elk wiekprofiel hetzelfde.

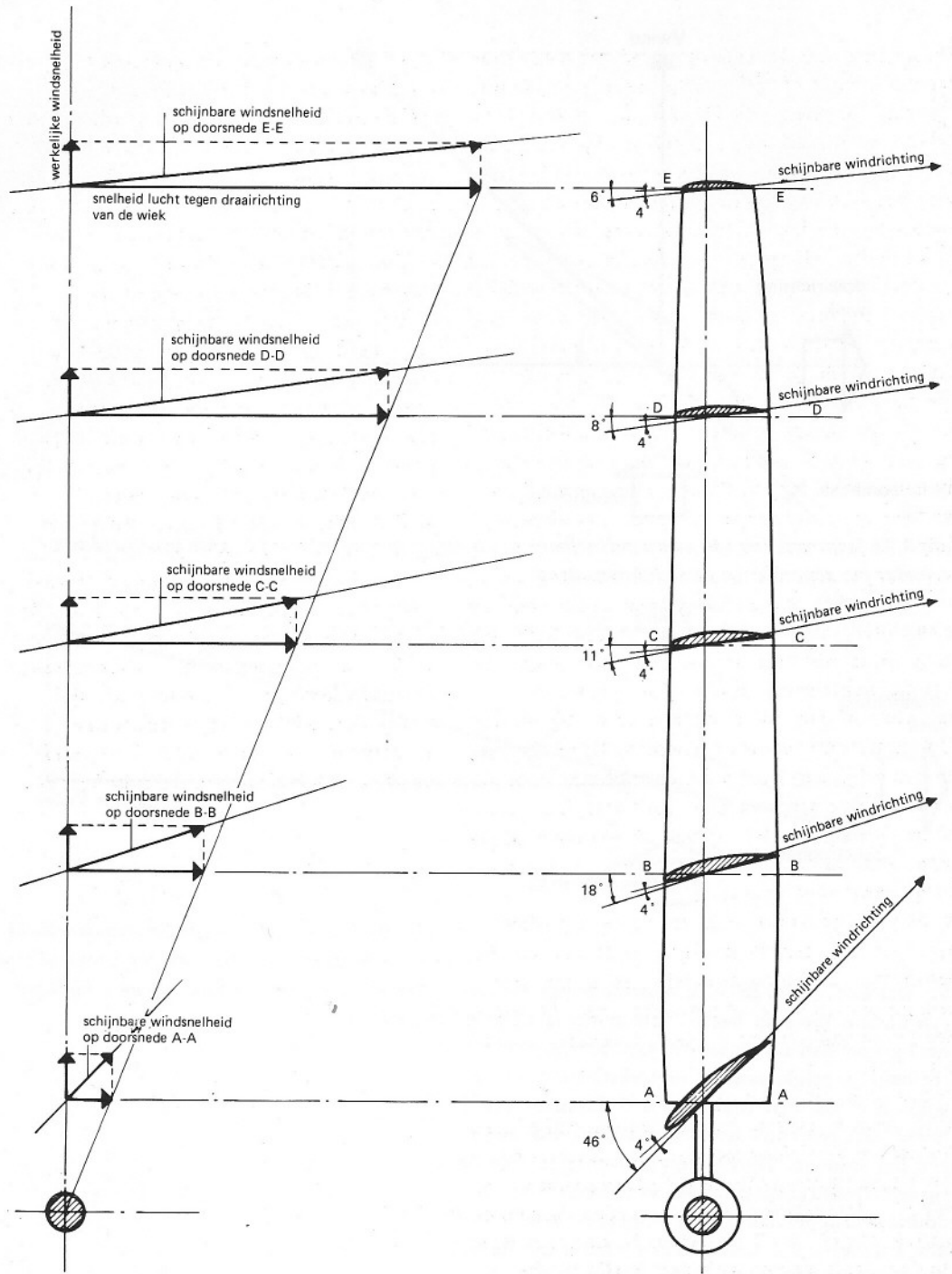


afb 8.41 Samenstellen van een windsnelheid van 6 meter per seconde en een wieldsnelheid van 6 meter per seconde tot de schijnbare wind.



afb 8.42 Samenstellen van een windsnelheid van 6 meter per seconde en een wieldsnelheid van 24 meter per seconde tot de schijnbare wind.

de. Dat komt doordat elke doorsnede van de wiel een andere snelheid heeft. Aan de tip is die snelheid groter dan bij de wortel van de wiel. De tipsnelheid is gelijk aan de omtreksnelheid van de wiel. Stel dat een wiel met een diameter van 3 meter een toerental heeft van 1000 omwentelingen per minuut. Tijdens één omwenteling legt de tip een afstand af die gelijk is aan de omtrek van het doorlopen oppervlak. Dat is π maal de diameter = $\pi \times 3$ meter = 9,4 meter. In één minuut legt de tip die afstand 1000 maal af. Dat is $1000 \times 9,4$ meter = 9400 meter. De snelheid waarmee de tip dat doet is 9400 meter per minuut of $\frac{9400}{60} = 156,7$ meter per seconde. Op de helft van de wiel is de afgelegde afstand kleiner, π maal $\frac{3}{2} = 4,7$ meter.



afb 8.43 Bepaling van de hoekverdraaiing over de lengte van de wijk.

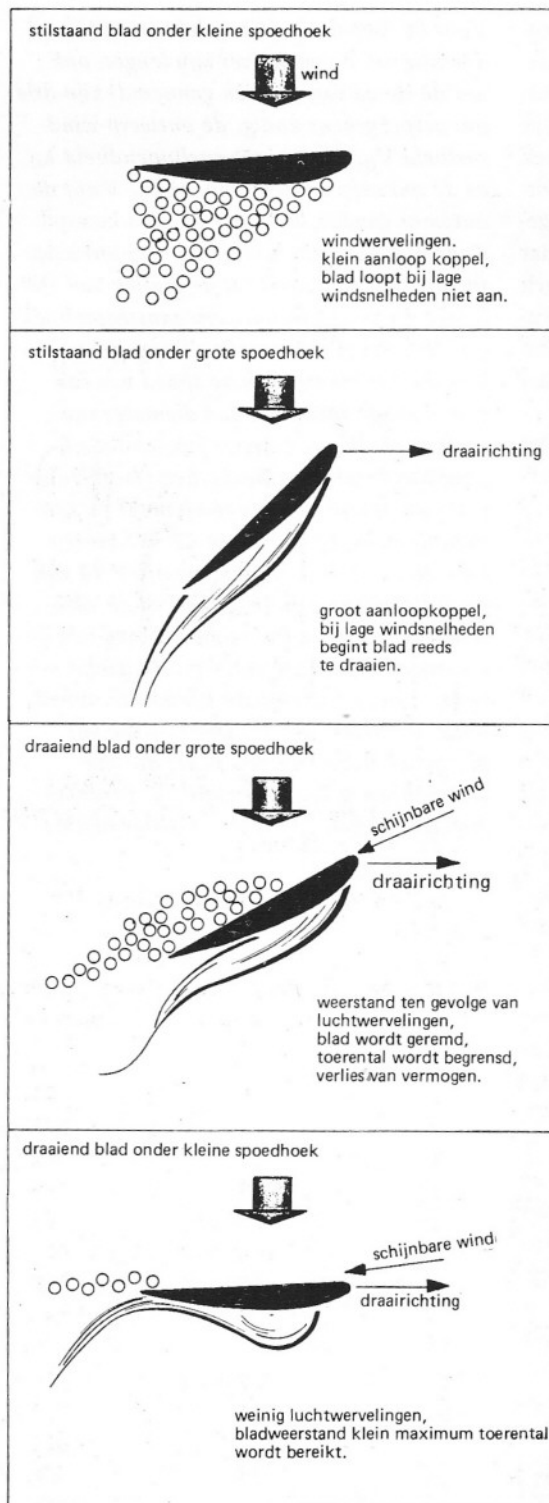
De snelheid van de wijk op die plaats is 4700 meter per minuut of $\frac{4700}{60} = 78,3$ meter per seconde. Doordat de wiksnelheid naar de tip toe steeds groter wordt, zal de snelheid van de schijnbare wind naar de tip toe ook groter worden en de hoek met het vlak van draaiing kleiner. Op elke doorsnede van de wijk willen we de aanstroomhoek gelijk houden. Uit proefnemingen is gebleken dat sommige vleugelprofielen bij een aanstroomhoek van 4° de meest gunstige aerodynamische eigenschappen bezitten. Om dat te bereiken moet er een verloop in de hoek van de wijk komen. Men spreekt wel van de spoed van de wijk.

Het bovenstaande maakt duidelijk hoe het model van een wijk tot stand komt. Op grond van aerodynamische metingen blijkt de profielvorm zoals we hem in de illustraties tekenen de beste verhouding liftkracht/weerstandskracht op te leveren. Op basis van de schijnbare windrichting en de gunstige aanstroomhoek van circa 4 graden wordt voor elk wijkprofiel van de as tot de tip de juiste stand bepaald. Het resultaat is een gedraaide wijk, een "stukje wenteltrap" (afb 8.43). Het is niet nodig het allemaal zelf uit te rekenen. In de bijlage zijn een aantal ontwerpen opgenomen. Deze zijn niet precies gelijk aan het model dat ontstaat door bovengenoemde berekeningen. Dit komt doordat bij de berekening met behulp van de computer uitgegaan is van andere ontwerpgegevens, zoals een gelineariseerde wijkbreedte.

In de praktijk wordt de keuze van een profiel bepaald door je fabrikagemogelijkheden en de toepassingen. Zo willen zweefvliegers uiterst nauwkeurige profielen die zorgvuldig zijn afgewerkt. Een beetje vuil op de veugels beïnvloedt al de werking.

Voor windmolens die dag en nacht en in weer en wind staan te draaien kunnen we dergelijke nauw luisterende profielen niet gebruiken. Daarvoor zoeken we degelijke profielen die gemakkelijk te maken zijn. Het meest toegepast worden daarom de Clark-y en NACA-12 profielen. In de tekeningen van de bijlagen nemen we steeds NACA-profielen. Ook in de vorm zijn veel variaties mogelijk, zoals afbeelding 8.38 laat zien. Wieken kunnen naar het uiteinde smal toelopen (D) of juist breder worden (B). Sommige molens hebben wieken waarvan het blad van de as tot de tip even breed blijft.

Voor het bepalen van de wijkvorm (de verdraaiing van de wijk over zijn lengte, ook wel de spoed van de wijk genoemd) zijn drie ontwerpgegevens nodig: de ontwerp-windsnelheid V_0 , de ontwerp-snellopendheid λ_0 en de ontwerp-aanstroomhoek α_0 . Voor de ontwerp-windsnelheid neemt men meestal de gemiddelde windsnelheid en de ontwerp-snellopendheid wordt uit de grafiek van afb 8.36 gehaald. Voor ontwerp-aanstroomhoek bij vleugelprofielen wordt 4° opgegeven. Voorbeeld: We bepalen de spoed van een twee-bladige rotor met een diameter van 3,60 meter. $V_0 = 6$ meter per seconde (= gemiddelde windsnelheid). Een tweebladige rotor heeft zijn hoogste rendement bij een snellopendheid tussen 9 en 12. We kiezen $\lambda_0 = 9$. In de linkerfiguur van afb 8.43 zijn op vijf plaatsen van de wijkstraal de wiksnelheid en de grootte en de richting van de schijnbare wind bepaald. Op elke wijkdoorsnede moet de schijnbare wind aanstromen onder een hoek van 4° . Door op die vijf plaatsen het wijkprofiel onder die aanstroomhoek te tekenen wordt de verdraaiing van de wijk zichtbaar. (rechtter figuur)



Het aanloopkoppel

Door de schuine stand van het rotorblad drukt de wind die ertegen blaast het blad steeds opzij. Op elk blad van de rotor werkt de liftkracht. Daardoor gaat de rotor draaien. Zo'n krachtenspel noemen we een koppel. Het koppel veroorzaakt dus de draaiing. Het koppel bij het aanlopen van de propeller wordt daarom aanloopkoppel genoemd. Afbeelding 8.44 laat zien wat de invloed is van de stand van het blad op het aanloopkoppel.

afb 8.44 Invloed van de spoedhoek tijdens aanlopen en het draaien.