**Basis aerodynamica**

We willen ook de basisaerodynamica uitleggen en steeds meer toepassen op de windmolens, dus zullen we met de beginselen van de aerodynamica beginnen en proberen verbanden te leggen met windmolens.

De meeste informatie die we nu geven hebben we teruggevonden in de aerodynamica cursus van Dhr. Catrysse, uit de cursus aspiranten van de Belgian Air Cadets of uit de cursus Fysica T5IW van Dhr. Van Moerkerke. Via ons gesprek met Dhr. Laveyne uit Green-Bridge kunnen we ook materiaal van hem en van Dhr. Peuteman van het KHBO raadplegen.

**Etymologie**

Het woord aërodynamica komt van de Griekse begrippen, AER = lucht en DUNAMIS = kracht.

**Definitie**

De aërodynamica is het gedeelte van de fysica die zich bezig houdt met het observeren en het beschrijven van de interacties tussen vaste stoffen en samendrukbare fluïda.

**De wetten van Newton** (Catrysse, 2010)

De Engelse fysicus Sir Isaac Newton gaf drie wetten in verband met beweging.

De eerste wet:

Elk deeltje in rust of in beweging wil in rust of in beweging blijven, of: een lichaam in rust of beweging blijft in rust of beweging tot er een uitwendige kracht op inwerkt.

Zo kunnen we wel afleiden dat er voor windmolens meer windkracht nodig zal zijn om de rotor te laten draaien dan om hem draaiende te houden.

De tweede wet:

De verandering van de beweging is recht evenredig met de resulterende kracht en volgt de lijn waarin de kracht werkt. Ook bekend in formulevorm: a =

a = Versnelling (m/s²)

F = Kracht (N)

m = massa (kg)

Maar de formule wordt het meest geschreven als: F = m . a

De derde wet:

Voor elke actiekracht is er een even grote maar tegengestelde reactiekracht, actie = reactie.

Vb: als een voorwerp op een tafel ligt, dan oefent dat voorwerp een kracht uit op de tafel en oefent de tafel een tegengestelde, even grote, kracht uit op dat voorwerp.

**De indeling naar snelheid**

Aërodynamica kan ingedeeld worden in verschillende klassen, deze klassen hangen af van de snelheid waarmee het voorwerp zich beweegt in het fluïdum. We onderscheiden:

* hypersonische aërodynamica : > Mach 5.0
* supersonische aërodynamica : Mach 1.1 – 5.0
* transsonische aërodynamica : Mach 0.6 – 1.1
* hoog subsonische aërodynamica : Mach 0.3 – 0.6
* laag subsonische aërodynamica : < Mach 0.3

Een windmolen wordt gesitueerd in de laag subsonische categorie zodat wij ons daarop zullen concentreren. Dit vereenvoudigd onze studie, bij de andere categorieen moet er rekening worden gehouden met verschillende bijkomende factoren waaronder de samendrukbaarheid van de lucht, schokgolven, …

**Het Mach getal**

****Ernst Mach (1838 – 1916) was de eerste onderzoeker die experimenten uitvoerde in supersonische domeinen. Mach 1 stellen we gelijk aan de geluidssnelheid. De geluidssnelheid is de snelheid de het geluid heeft in een bepaalde omgeving (vaste stof, vloeistof of gas). Die snelheid hangt af van de dichtheid en samenstelling van de omgeving waarin het geluid zich verplaatst, hoe minder dicht hoe lager de snelheid van het geluid. Het Machgetal (M) is de aanduiding van de snelheid van een voorwerp in functie van de geluidssnelheid en wordt uitgedrukt als een fractie van Mach 1. Vb. M.84 betekent dat het voorwerp een snelheid heeft van 84/100 van de geluidssnelheid, de geluidssnelheid in onze lucht is bij 20° C 343 m/s = 1234,8 km/h.

**Een fluïdum**

Een fluïdum, dat zowel in gas- als in vloeibare vorm bestaat, is een medium waar men bepaalde eigenschappen aan toekent:

* het is **vervormbaar en beweeglijk**
* het is **homogeen** (alle deeltjes hebben dezelfde fysische eigenschappen).
* het is **continu** (= samenhangend)
* het heeft een **dichtheid**
* het heeft een **viscositeit**

Het fluïdum waarin de aërodynamica evolueert heet de *“standaardatmosfeer”* waarin de volgende waarden op het gemiddelde zeeniveau, onveranderlijk vastgelegd zijn:

* de **temperatuur** (T) 15°C – afname 2°C/300m
* de **druk** (P) 1013,2 hPa afname 1 hPa/10m
* de **relatieve** **vochtigheid** (RV) 0%
* de **soortelijke massa of dichtheid** (ρ) 1,225 kg/m3

**Het Coanda effect**

De Roemeense geleerde Henri-Marie Coanda (1885-1972) beschreef voor het eerst het Coanda effect. Het Coanda effect is het effect dat we krijgen als we een druppel water over en lepel laten lopen, de druppel zal de kromming van de lepel volgen en niet loodrecht naar beneden vallen. Dit is zo bij elk fluïda, de reden hiervoor is de **viscositeit** van het fluïdum.

**De statische, dynamische en totale druk.**

In onze atmosfeer is alle lucht boven het aardoppervlak samengedrukt aan het aardoppervlak zelf door het gewicht van de luchtkolom erboven. Hierdoor ondervindt een voorwerp in rust en in een onbeweeglijk fluïdum een bepaalde druk, loodrecht over zijn gehele oppervlak, afhankelijk van de massa van het fluïdum rustend op dat voorwerp. Naarmate men hoger gaat in de atmosfeer, wordt deze luchtkolom kleiner en bijgevolg het gewicht ervan ook. Hierdoor zal een voorwerp op het aardoppervlak een grotere druk ervaren dan een voorwerp op grotere hoogte. Elk voorwerp in rust is dus ondergevig aan een bepaalde druk. Deze druk is beter gekend als de **atmosferische druk (Ps)**. Als we nu een bepaalde kracht uitoefenen op een voorwerp in rust waardoor deze in beweging komt bevat dit voorwerp een kinetische energie, deze kunnen we beschrijven met de volgende formule:

Het gevolg van die kinetische energie die we toevoegden aan het voorwerp is dat deze energie zich omzet als een druk. Deze noemt men de **dynamische** **druk** (Pd) waarvan de waarde, uitgedrukt in eenheden van druk, berekend kan worden door in de formule van de kinetische energie de massa m te vervangen door de dichtheid van de lucht ρ:

Als we nu beide drukken, de statische druk en de dynamische druk, optellen dan krijgen we de **totale druk** (Pt):



Hierbij is: ρ: massa / volume

v: snelheid

We moeten hier wel rekening blijven houden met het feit dat de statische druk een druk uitoefent in alle richtingen en daarentegen de dynamische druk dit slechts in één richting doet, de richting van de snelheid.

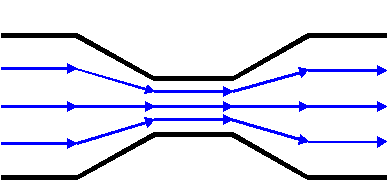
**Dynamica in fluïda**

Fluïdum is het verzamelwoorden voor vloeistoffen en gassen.

**Inleidende begrippen** (Van Moerkerke)

Stroomlijnen:

Stroomlijnen zijn de banen die deeltjes in stromende vloeistoffen of in stromende gassen beschrijven.



Stroomlijnen kunnen elkaar niet snijden, dit zou betekenen dat het deeltje op dat snijpunt twee snelheidsvectoren zou hebben, wat niet mogelijk is aangezien een deeltje maar in een richting tegelijk kan bewegen.

Er zijn verschillende soorten stromingen, namelijk: - Stationaire stromingen

* Turbulente Stromingen

Stationaire stromingen:

Stromingen waarbij het beeld van de stroming niet veranderd in functie van de tijd. De snelheid van de stroming kan wel veranderen in grootte en richting, maar in een bepaald punt zal elk fluïdumdeeltje steeds met dezelfde snelheid voorbijstromen.

Een fluïdum stroomt stationair als de snelheid niet te groot is en als er geen te plotse snelheidswijzigingen veroorzaakt worden door hindernissen.

Turbulente stromingen:

Boven bepaalde snelheden zullen turbulenties of wervelingen optreden, deze doen de stroomlijn van vorm veranderen. Dus turbulente stromingen zijn stromingen waarbij de snelheidsvector niet constant is en waar wervelingen optreden.

**De continuïteitsvergelijking** (Van Moerkerke)

De continuïteitsvergelijking drukt het fysisch principe uit dat massa niet gemaakt of vernietigd kan worden. Materie kan niet verdwijnen, dit is zeer belangrijk bij het voorspellen van het gedrag van stromingen.

Als een vloeistof door een buis stroomt, is de continuïteitsvergelijking van toepassing. Deze zegt dat de massa door de buis op elk punt van de buis het zelfde is.

Deze massa op verschillende punten is hetzelfde. De massadichtheid van de vloeistof is ρ, de doorsnede van de buis is A en de snelheid van de vloeistof is v, dan is m:

m = ρ . A . v

Als de massadichtheid niet verandert, en aangezien de massa op elk punt het zelfde is, kun je zeggen dat:

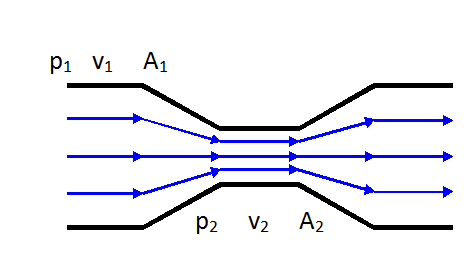
A . v = constant

Dus waar de doorsnede verkleint, vergroot de snelheid.

**Het Venturi-effect** (Van Moerkerke)

In een venturibuis, zoals op de figuur, geldt de continuïteitsvergelijking ook, daarom geldt:

ρ1 . A1 . v1 = ρ2 . A2 . v2



Beschouw de vloeistof onsamendrukbaar en zie dat doorsnede A1 duidelijk groter is dan doorsnede A2, dan moet volgens de continuïteitsvergelijking v1 kleiner zijn dan v2. Je kan dus zeggen dat naarmate de stroming door de venturibuis gaat, de stroomsnelheid toeneemt.

**De vergelijking van Bernoulli** (Catrysse, 2010)

De wet van het behoud van energie

EPOT + EKIN  + EWARMTE + EDRUK = constant

Dit is de eerste wet van de thermodynamica.

Energie kan niet gemaakt of vernietigd worden, ze kan alleen in andere vormen van energie omgezet worden. Zo wordt de chemische energie van benzine omgezet in mechanische energie en warmte-energie bij auto’s.

Soorten energie

* Potentiële energie is de energie die een lichaam bezit door zijn positie, zijn vervorming of door chemische reacties.

EPOT = m . g . h (de potentiële energie van een vloeistof is in functie van zijn massa en hoogte)

* Kinetische energie is de energie die met beweging in verband gebracht kan worden, m.a.w. de bewegingsenergie.

EKIN = m . . v²

* Warmte-energie is die energie die nodig is om een massa van 1kg met 1K temperatuur te doen stijgen in een tijdsduur Δt.

EWARMTE = cp . Δt (cp is de specifieke warmtecapaciteit)

* Drukenergie

EDRUK = p . V ( p = druk en V = volume)

Bernoulli’s vergelijking

Als we nu alle bovenstaande vergelijkingen combineren, bekomen we het volgende:

*m . g . h1 + m . . v1² + cp . Δt1 + p1 . V1 = m . g . h2 + m . . v2² + cp . Δt2 + p2 . V2*

Als de massa 1kg bedraagt, dan bekom je:

*g . h1 + . v1² + cp . Δt1 + p1 . V1 = g . h2 + . v2² + cp . Δt2 + p2 . V2*

En omdat cp . Δt1 = cp . Δt2 bekom je:

*g . h1 + . v1² + p1 . V1 = g . h2 + . v2² + p2 . V2*

Voeg nu de massadichtheid ρ toe aan de vergelijking en je bekomt de vergelijking van Bernoulli:

Dus langs elke stroomlijn is de som van de kinetische energie, de potentiële energie en de drukenergie constant.

Maar in de aerodynamica is de potentiële energie klein genoeg om te verwaarlozen, dus:

En is de dynamische druk.

Als we nu Bernoulli toepassen op een speciaal gevormd lichaam om een reactie met de lucht te veroorzaken (zogenaamd airfoil), een propeller of rotor van een windmolen dus, kunnen we zeggen dat de druk op een bepaald punt gelijk is aan de druk op een ander punt.

Namelijk:

**Massadichtheid** (Catrysse, 2010)

De massadichtheid van een stof is de hoeveelheid massa van die stof (kg) in een eenheid volume (m³) gaat. Om de massadichtheid te vinden is dus het volume en de massa van de stof noodzakelijk. De massadichtheid vind je met de volgende formule: ρ =

Op zeeniveau variëren de massadichtheden van de lucht tussen 1,20 en 1,55kg/m³. Hogere waarden zijn geassocieerd met koudere temperaturen of hogere hoogtes. Lagere waarden zijn dan weer typisch voor gebieden rond de evenaar. In dichtere lucht (dus hogere/koudere lucht) zit meer energie, waardoor windmolens optimaal geplaatst worden op bepaalde hoogtes.

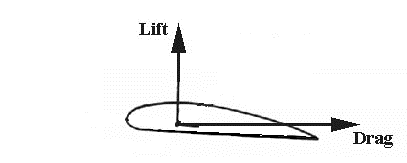
Er is nog een andere formule om de massadichtheid van de lucht te bepalen, deze bevat de gasconstante R, de temperatuur T evenals de druk p. Dan bekom je:

De vochtigheid speelt ook een rol bij de luchtdichtheid, namelijk hoe vochtiger de lucht, hoe lager de dichtheid.

**Lift en Drag** (Peuteman, 2007)

Als we een horizontale as windturbine bekijken kunnen we afleiden dat dankzij de bouw van de turbine de wind loodrecht op het vlak valt waarin de wieken roteren. Er spelen twee types krachten een rol: Dragkracht en Liftkracht.

Beschouw een wiek in doorsnede, een zogenaamde airfoil.

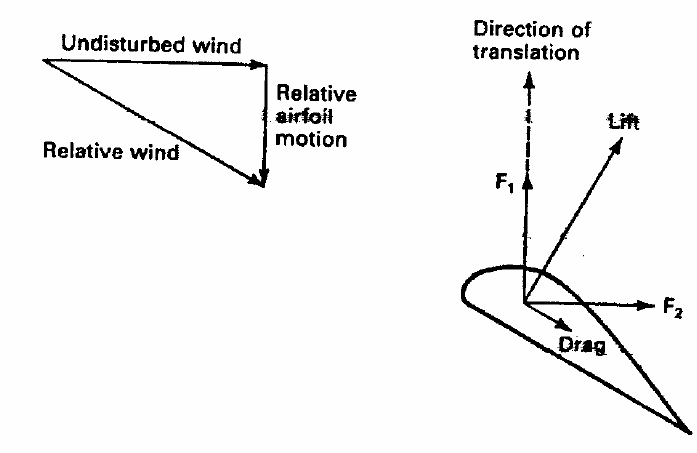


Als de wind om deze airfoil blaast, zal ze aan de onderkant een kortere weg moeten afleggen dan aan de bovenkant, als gevolg zal de snelheid vanboven groter zijn en de druk daar lager. Door dit drukverschil krijgt men een opwaartse kracht, de LIFT-kracht. Deze kracht is nuttig.

Er ontstaat ook nog een DRAG-kracht door de windrichting, dit is de wrijvingskracht die de airfoil ondervindt door de wind en die de airfoil probeert tegen te houden, deze is niet nuttig. Stroomlijning van de airfoil wordt dan ook toegepast om de DRAG-kracht te beperkten.

**Krachten op de rotor van een windturbine** (Peuteman, 2007)

Omdat er niet alleen de absolute windsnelheid is, maar de wiek ook beweegt is het niet zo simpel om de krachten op de wieken te bespreken.

****

De wiek beweegt naar boven en de wind valt loodrecht op het rotatievlak. Zoals op de figuur getoond is de relatieve windsnelheid de vectoriële som van de “ongestoorde windsnelheid” en de beweging van de airfoil. De DRAG-kracht heeft de zelfde richting als de relatieve windsnelheid terwijl de LIFT-kracht loodrecht op die relatieve windsnelheid is. F1 en F2 worden veroorzaakt door de DRAG- en LIFT-kracht.

F1 is een nuttige kracht die ervoor zorgt dat de wieken draaien en de generator van de windturbine aandrijven.

F2 is niet nuttig, het is een kracht waar de constructie van de windturbine tegen bestand moet zijn.

F1 en F2 zijn ook nog afhankelijk van andere factoren, namelijk:

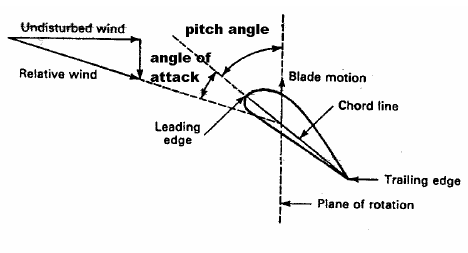
- De windsnelheid

- Rotatiesnelheid van de wieken

- Vorm van de doorsnede van de wieken

- De pitch angle

- De angle of attack



**Pitch angle en angle of attack** (Peuteman, 2007)

De hoek die de chord line (koorde) zoals de figuur boven maakt met het rotatievlak is de pitch hoek θ . De windsnelheid (ongestoord) is loodrecht op het rotatievlak van de wieken en dus ook evenwijdig met de as van de turbine.

De windsnelheid heeft dus een axiale richting, deze is onafhankelijk van de straal r. Bij een straal r afstand van de rotatie as beweegt de rotor met een snelheid met een grote van ωr. Als die twee snelheden vectorieel opgeteld worden bekom je de windsnelheid ten opzichte van de rotorwiek.

De hoek tussen de resulterende windsnelheid en de koorde van de wiek is de angle of attack α.

Als je de aanvalshoek α steeds hetzelfde wil houden moet je pitch hoek θ moeten dalen voor een stijgende straal r. Hieruit volgt dat de rotor in functie van de straal een bepaalde verdraaiing (twist) nodig heeft. Deze twist is vooral aanwezig bij grotere windmolens met grotere vermogens.

# Bibliografie

Catrysse, G. (2010). *Principles of flight.* Oostende.

Peuteman, J. (2007, februari). POWERPOINT PRESENTATIE SESSIE 1: STROMINGSLEER, VERMOGEN EN RENDEMENT. Oostende, West-Vlaanderen, België.

Van Moerkerke, E. (sd). *Fysica T5IW.* Oostende.