

BIJLAGE 1 – DE VERKLARING VAN DE LIFTKRACHT OP EEN ZEIL

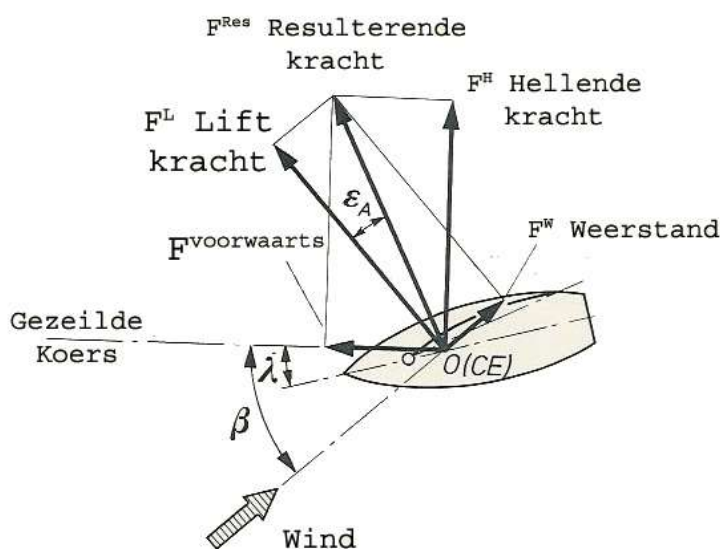
De belangrijkste kracht op een zeil is de liftkracht. Het is ook meteen de ingewikkeldste kracht. Des te meer reden om hem wat extra toe te lichten. Hoe ontstaat deze kracht precies, en waardoor? Er zijn in de loop der jaren verschillende theorieën opgesteld, waarom er liftkracht is. Er zijn maar twee theorieën die echt een goede verklaring voor de liftkracht kunnen geven. Dit zijn de Newtontheorie en de circulatietheorie. De circulatietheorie ondersteunt ook de in experimenten waargenomen details. We zullen nu allebei de theorieën behandelen.

Newtontheorie

De theorie van Newton is de oudste theorie en tevens de eenvoudigste, vandaar dat deze theorie veel bekender is dan de (veel complexere)

circulatietheorie. Je neemt namelijk een lichaam, bijvoorbeeld een zeil, en houdt dat onder een bepaalde invalshoek ten opzichte van de wind. Door de invalshoek valt er wind in het zeil. Deze wind heeft een bepaalde kinetische energie. Doordat

de wind tegen de zeilen botst, en daardoor afremt, raakt het kinetische energie kwijt. Dit resulteert volgens de derde wet van Newton (actie = reactie) in een kracht recht op het zeil, de resulterende kracht (F_{res}). Wanneer je deze kracht weet, is de liftkracht makkelijk te bepalen. De componenten van de F_{res} zijn, zoals gezegd, de liftkracht en de weerstandskracht. Bij dezen is de liftkracht dus verklaard.

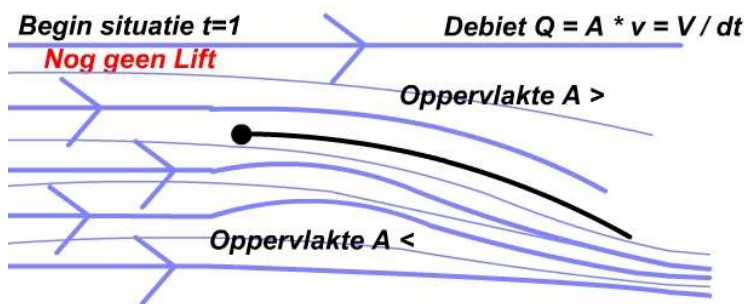


Maar verklaard is nog niet berekend. De theorie van Newton is prachtig, maar hoe kun je er mee rekenen? $F = m \cdot a$. Okay, maar hoe meet je de (negatieve) versnelling van de lucht?

Tevens verklaart deze theorie niet, waarom lucht zich gedraagt als in experimenten is bewezen. Newton geeft namelijk geen verklaring voor een bepaalde circulerende luchtstroom achter (de Karman vortex) en rondom het zeil (de 'upwash'). Om deze en rekenkundige redenen heeft Prandtl een theorie bedacht. De circulatietheorie. Deze wordt vaak in verband gebracht met Kutta en Joukowski, omdat zij de formules hebben bedacht voor deze theorie.

Circulatietheorie

Door de invalshoek van de wind ten opzichte van de zeilen, stroomt er, als de lucht er net aankomt (dus het was eerst windstil en dan komt er wind), meer lucht naar de loefzijde, dan naar de lijzijde. Dat is in figuur A getekend.



Figuur A

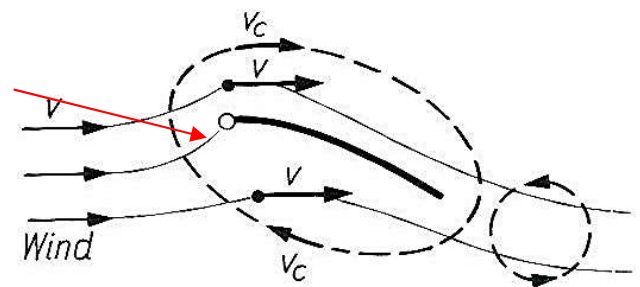
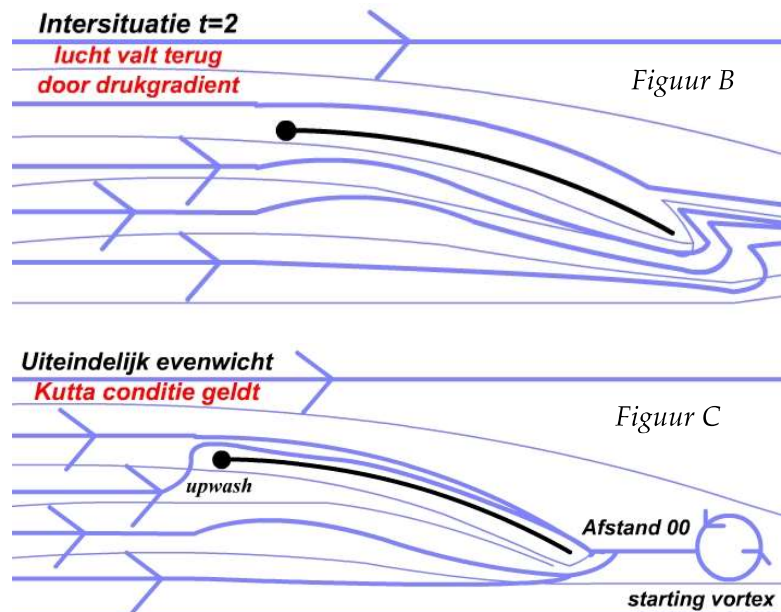
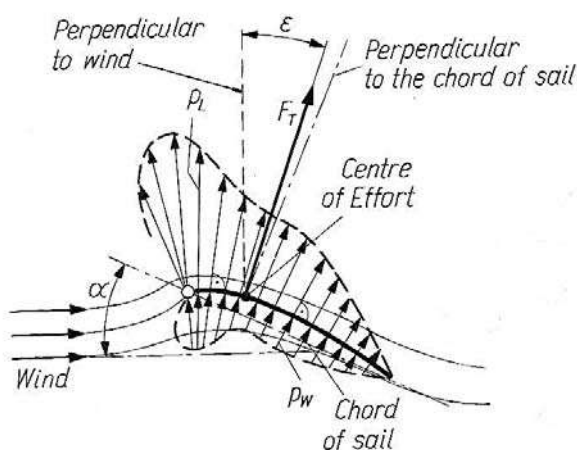
Volgens de regels van het debiet, zal een grotere toestroom van lucht resulteren in een snelheidsverhoging. De wind zal aan de loefzijde nu sneller het achterzeil bereiken, dan de wind aan de lijzijde. De wind krult hierdoor naar de lijzijde, om het zeil heen (figuur B). Lucht vindt het echter helemaal niet leuk om een scherpe bocht te nemen.

Daardoor breekt de lucht af, en gaat aan de achterkant van het zeil rond bewegen. Dit veroorzaakt wervelingen, ook wel de 'starting vortex' genoemd. Dit wervelinggebiedje draait linksom, zoals in figuur C te zien is. De lucht die nu via de loefzijde aankomt, zal door dit gebied worden afgewend, precies de andere kant op. Dit principe is te vergelijken met twee radertjes. De wervelingen draaien linksom, waardoor de aankomende luchtstroom rechtsonder gaat draaien. Dit zorgt voor een algemene potentiële rechtsdraaiende circulatie, die de 'upwash' bij de mast als gevolg kent, dit leggen we nog uit.

Deze circulatie heeft dus twee effecten, die allebei tot een drukverschil leiden, voor een verduidelijkende illustratie zie de afbeelding op de volgende pagina.

De circulerende luchtstroom zorgt voor een snelheidsverhoging van de lucht aan lij (die met de circulatie mee stroomt), en een snelheidsverlaging van de lucht aan loef (tegen de circulatie in).

Bovendien veroorzaakt de potentiële luchtstroom een afbuiging van de lucht bij de mast, in 'vliegtuig vakjargon' noemt men dit de 'upwash'. In plaats van dat er meer lucht naar loef gaat, stroomt er juist meer lucht naar lij (bij de mast). Dit heeft (volgens de debietwet) wederom een snelheidsverhoging tot gevolg aan de lijzijde (en een snelheidsverlaging aan loef).

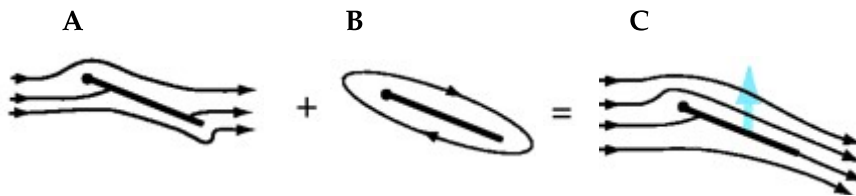


Hierbij komt Bernoulli om de hoek kijken. Hij beredeneerde: een snelheidsverhoging resulteert in een drukverlaging, en een snelheidsverlaging in een drukverhoging. Omdat de lucht aan de lijzijde sneller stroomt, zal er daar een lagere druk heersen. Aan de loefzijde stroomt de lucht langzamer, er heerst daar een hogere druk. Aan de lijzijde heb je dus zuiging, en aan de loefzijde extra druk. Dit zorgt voor de zogenaamde 'lift', maar ook voor drukweerstand:

De combinatie van deze twee is te zien in de bijgaande figuur als F_T . Deze heeft een

bepaalde hoek ε ten opzichte van de lijn recht op de wind. De F_T grijpt aan in het zogenaamde 'centre of effort'. Deze F_T bestaat uit een oneindig aantal componenten. Zoals u kunt zien zijn er niet alleen componenten vooruit, maar ook zijwaarts en zelfs achteruit.

Deze circulatie is slechts een potentiële stroom. In de figuur ziet u de beginsituatie (A) en de daarop volgende potentiële (dus niet werkelijk bestaande) circulatiestroom (B). Samen vormen ze een heel systeem (C). Dit hele systeem produceert de lift. Hierbij is de circulatiestroom niet meer te zien. Over situatie C zegt men dat de Kutta-conditie geldt: het uiteindelijke evenwicht dat ontstaat door de starting vortex, die volgens de theorie oneindig ver achter het zeil invloed blijft hebben. Omdat dit evenwicht steeds behouden moet worden, maar de luchtstroom wel fluctuaties kent, ontstaan er telkens 'starting vortex'-en: dit zorgt voor de zogenaamde Karman wervelingen achter een object in een (lucht)stroom. Wij verwijzen naar [bijlage 9](#) voor een uitleg van een deel van de wiskunde achter deze theorie.



Bernoulli

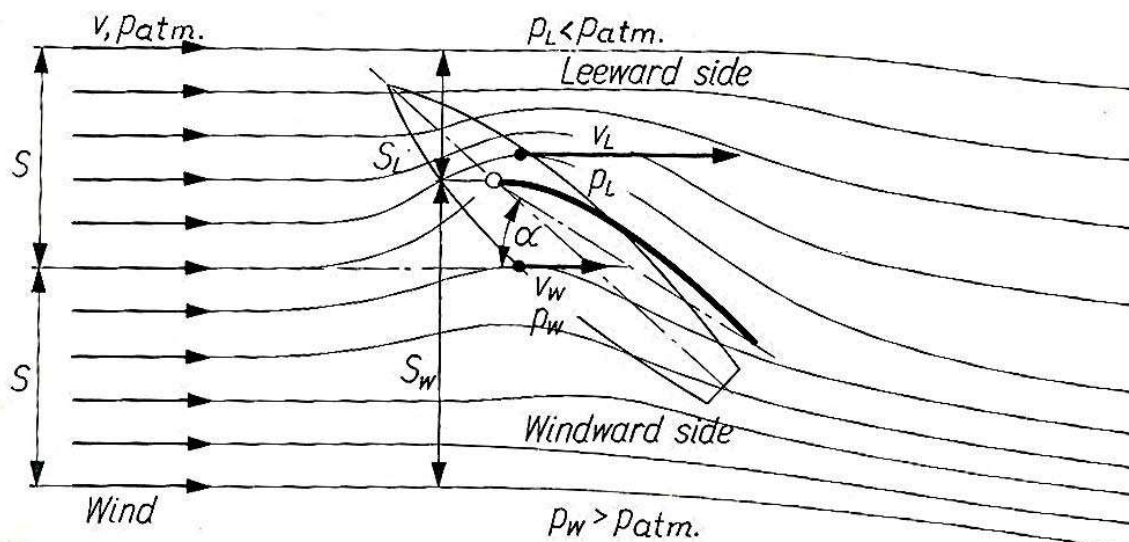
Bij de circulatietheorie hadden we het over een drukverschil dat lift veroorzaakte. De man die dit heeft bedacht en uitgewerkt is Bernoulli. Hij drukte het verband tussen de snelheid van de vloeistof en de druk zo uit:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v^2 + mgh = \text{constant}$$

Waarin...

- p_1 = druk (Pa)
- ρ = luchtdichtheid (kg/m^3)
- v = snelheid (m/s)
- m = massa van de lucht (kg)
- g = gravitatie (m/s^2)
- h = hoogteverschil in de richting van de gravitatie (m)

Het totaalplaatje van het zeil, met snelheidsverandering en drukverschil, staat hieronder:



Compressie

Sommige mensen denken dat de lucht - door het bewegen van het zeil - aan de loefzijde wordt samengedrukt. Dat is niet waar. Deze compressie door beweging zou alleen significant zijn bij een snelheid van rond de geluidssnelheid.

Invalshoek

De Wet van Bernoulli geldt natuurlijk vooral bij wat kleinere windinvalshoeken. Daar is de circulatie rond het zeil het grootst. Bij voordewind is er alleen maar een wind, die van achteren inkomt. Er is dan geen circulatiestroom rond het zeil. Toch ontstaat er een drukverschil, maar dat komt omdat de wind aan loef tegen het zeil drukt. Dan overheerst meer de verklaring van de derde Wet van Newton. (zie ook [bijlage 9](#))

Bij kleinere windinvalshoeken speelt niet de loefdruk de grootste rol, maar de zuiging aan lij. Dit is goed te zien in de figuur hieronder. Zoals u kunt zien komt de wind scherp van voren. Wanneer we letten op de grafiek van het zeil met zeillatten (battens), zien we dat over alle linies de zuiging (suction) groter is dan de druk (pressure). Bij een kleinere windinvalshoek komt Bernoulli's theorie dus het dichtste bij de werkelijkheid, en bij een grotere Newton's theorie.

