

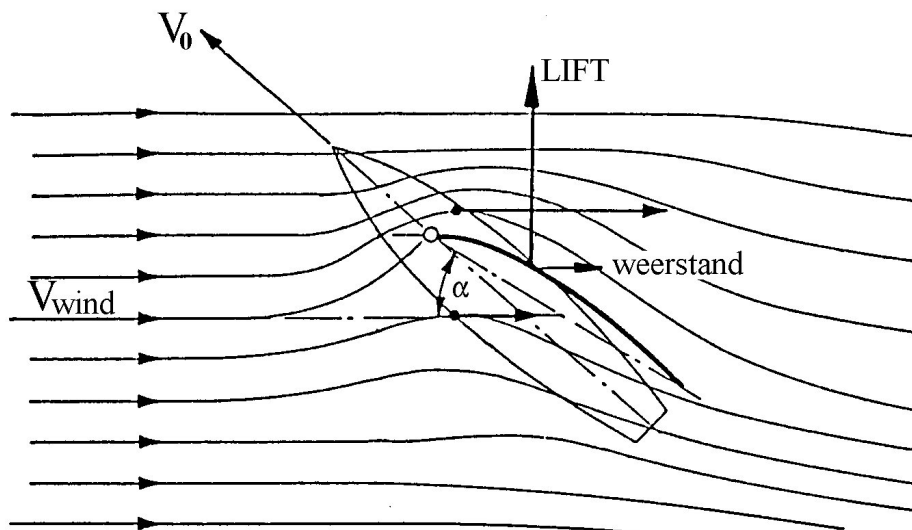
8. VOORTSTUWING

In een eerder hoofdstuk is de weerstand van lichamen in een uniforme stroming behandeld. Het is echter niet zo dat voorwerpen die zich ten opzichte van een omringend medium verplaatsen alleen maar een weerstand ondervinden.

Zoals aangetoond werken op een lichaam geplaatst in een uniforme stroming van een ideale vloeistof geen resulterende krachten in de richting van de stroming: er is geen weerstand. Dit geldt zolang het lichaam zich niet bevindt in de onmiddellijke nabijheid van een vrij vloeistof oppervlak. Het is echter mogelijk om in een ideale stroming krachten te vinden welke loodrecht op de stromingsrichting staan. Zo een kracht noemen we: **liftkracht**.

De eigenschap van speciaal gevormde lichamen om onder specifieke omstandigheden een liftkracht op te wekken is in de techniek van groot belang. Dit zal in het hierna staande worden toegelicht.

Beschouw de figuur hieronder waarin de stroming wordt weergegeven rond een in een ideale vloeistof geplaatste vleugel.



Het stromingsbeeld is twee dimensionaal. De vergelijking van Bernoulli kan worden gebruikt om het ontstaan van de lift te verklaren. De stroming wordt verondersteld stationair te zijn zodat de stroomlijnen zoals geschetst in de figuur de banen van de vloeistofdeeltjes weergeven.

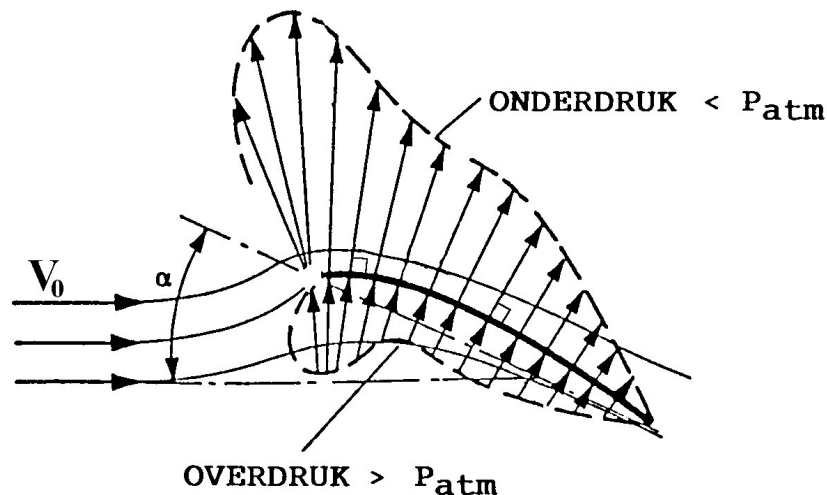
De vloeistofstroom wordt door de aanwezigheid van het vleugelprofiel in twee gedeelten gesplitst: het ene gedeelte passeert de vleugel aan de bovenzijde het andere gedeelte aan de onderzijde.

De getoonde stroomlijnen zijn gevonden door experimentele bepaling maar zijn overigens ook te berekenen uit potentiaal theoretische beschouwingen. Uit de tekening kunnen we aflezen dat de stroming aan de bovenkant in doorsnede beperkt wordt van S naar S_L . Aangezien de vloeistof onsamendrukbare wordt verondersteld geldt de continuïteitsbetrekking en dit impliceert dat de snelheid aan de bovenkant van de vleugel toeneemt en wel het meest daar waar de stroomlijnen het sterkst convergeren. De snelheid daar ter plaatse is dus groter dan in de vrije vloeistofstroming.

Volgens de Wet van Bernoulli moet dit betekenen dat de druk daar ter plaatse afneemt. De grootste onderdruk treedt op aan de voorkant van de vleugel. Naar achteren toe bouwt de druk zich langzaam weer op.

Beschouwen we het gedeelte aan de onderzijde van de vleugel dan vinden we dat het doorstromingsoppervlak hier groter wordt, de snelheid neemt derhalve af en de druk toe ten opzichte van de statische druk in de vrije stroming.

De drukverdeling over de vleugel ziet er ongeveer uit zoals in de onderstaande figuur.



De resulterende druk aan de bovenzijde is lager dan de statische druk en aan de onderzijde hoger. De integratie van de resulterende druk over het oppervlak van de vleugel levert een netto kracht omhoog: **de lift**.

In het geval van een oneindig lange vleugel in een ideale (dus wrijvingsloze) vloeistof staat deze resulterende kracht loodrecht op de aanstromende vloeistof richting. In werkelijkheid hebben we evenwel met ideale vloeistoffen nooit te maken en is er altijd een invloed van de viscositeit, hoewel soms gering. De aanwezigheid van enige vorm van viscositeit is zelfs voorwaarde om tot lift op een lichaam te komen. Hierop zal later iets verder worden ingegaan.

Een andere beschouwingwijze om tot de lift op een vleugel te komen wordt in de theoretische beschouwingen over vleugels veelvuldig gebruikt.

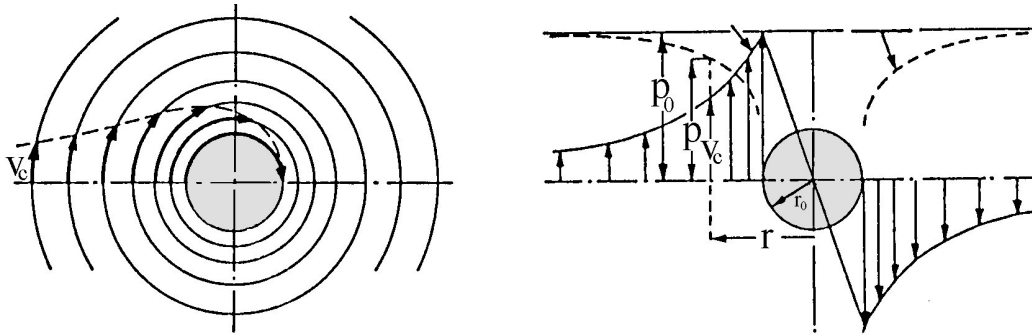
Hierbij wordt de resulterende stroming rond een vleugel beschouwd te zijn opgebouwd uit twee type stromingen: een homogeen aanstromende vloeistofstroom met uniforme constante snelheid, en een circulerende stroming rond de vleugel.

Deze circulerende stroming kan men zich voorstellen als een roterende stroming rond een denkbeeldig middelpunt waarvan de snelheid afneemt met de reciproque waarde van de afstand tot het middelpunt.

De stroming voldoet aan:
$$V_c = \frac{\text{constante}}{r}$$

waarin r de afstand tot het middelpunt voorstelt.

Een circulerende stroming ziet er uit zoals geschetst in de volgende figuur.



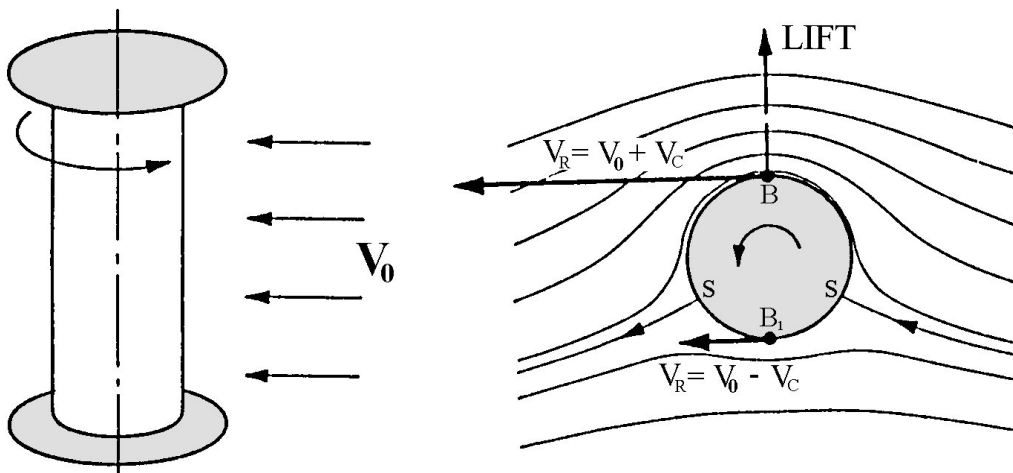
Naar de kern toe wordt de snelheid steeds hoger en in de kern theoretisch zelfs oneindig hoog. Volgens de wet van Bernoulli moet dit tevens gepaard gaan met een verlaging van de druk. Dit beeld vertoont veel gelijkenis met dat van een windhoos: de zeer hoge windsnelheid en de zeer lage druk worden ook in de kern van zo'n windhoos waargenomen. Ook depressies zijn in principe wervelsystemen en vertonen een vergelijkbaar karakter zoals uit de vele satellietfoto's inmiddels genoegzaam bekend is.

Wervels in een of andere gedaante komen in de natuur zeer vaak voor. De combinatie van deze beide geschetste stromingsbeelden, dus de uniforme stroming en de circulatie stroming, leidt tot hetzelfde stromingsbeeld zoals gegeven in de eerdere figuur. De stroomsnelheden en richtingen van beide stromingen worden in elk punt van de stroming bij elkaar opgeteld.

Door de circulatie wordt de resulterende stroming boven de vleugel versneld en onder de vleugel vertraagd. Deze beschrijving van het stromingsbeeld wordt in de theoretische beschouwingen veel gehanteerd, omdat beide stromingen wiskundig goed te manipuleren zijn.

Dat deze beschouwingswijze voor de stroming rond een vleugel niet uitsluitend een mathematische beschrijving van de werkelijkheid is, maar wel degelijk ook een fysische betekenis heeft, moge blijken uit de experimenten van Magnus.

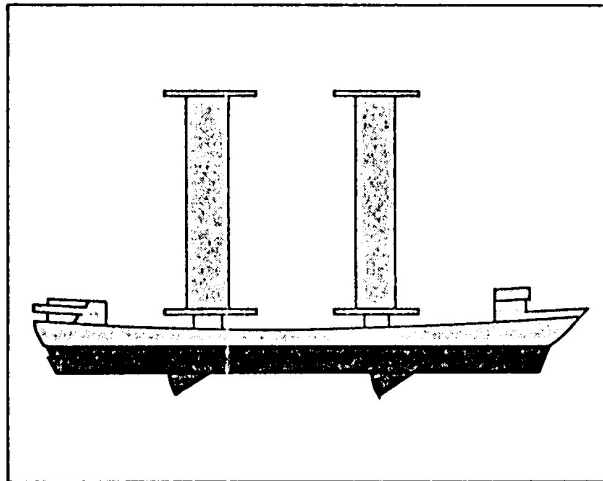
Deze toonde aan dat men zich een circulerende stroming kan denken te ontstaan rond een in een vloeistof roterende cilinder.



Wordt deze cilinder nu blootgesteld aan een uniforme stroming dan ontstaat er een liftkracht loodrecht op het vlak door de as van de cilinder en de richting van de aankomende stroming.

Dit verschijnsel wordt in de literatuur algemeen aangeduid met het Magnus effect.

Flettner construeerde indertijd een voortstuwingsinstallatie op een schip gebaseerd op dit Magnuseffect, waarbij een tweetal rotors gebruikt werden als voortstuwende elementen. Met de wind van opzij was de liftkracht op de rotors recht naar voren gericht en kon het schip hiermee voortgestuwd worden. Het schip vertoonde op deze manier gelijkenis met een zeilschip, met dien verstande dat de rotors effectiever waren dan de zeilen. Het idee bewees in de praktijk te werken maar was commercieel geen succes.



De grootte van de liftkracht wordt bepaald door de snelheid van de aankomende stroming en de snelheid van de circulerende stroming, kortweg aangeduid als de circulatie sterkte.

De sterkte van de circulatie blijkt afhankelijk te zijn van de precieze vormgeving van de vleugel, waaronder begrepen de eventuele asymmetrie van de doorsnede, het plan-vorm van de vleugel en de effectieve invalshoek van de stroming op de vleugel.

De circulatie kan geschreven worden als:

$$\Gamma = V_c \cdot 2\pi r_0$$

Combinatie van deze en de eerdere vergelijking levert:

$$\Gamma = 2\pi \cdot \text{constante}$$

dat wil zeggen dat de circulatie een constante waarde heeft voor elk gesloten pad rond de kern van de wervel. Voor de lift per eenheid van spanlengte (b) van de vleugel valt nu te schrijven:

$$\frac{L}{b} = \rho V_0 \Gamma$$

ofwel:

$$\frac{L}{b} = \rho V_0 (V_c 2\pi r_0)$$

De resulterende lift is inderdaad afhankelijk van de snelheid van de aanstromende vloeistof en de circulatie rond de vleugel. Hieruit valt eenvoudig te destilleren wat een goede manier is om vleugel eigenschappen met elkaar te vergelijken, immers de lift blijkt afhankelijk te zijn van een product van twee snelheden. Een dimensieloze presentatie van de liftkracht wordt derhalve gevonden door deze te delen door de stuwdruk en het oppervlak van de vleugel volgens:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

In het hoofdstuk over modelwetten hebben we gezien dat hier sprake is van Newtons modelwet voor lichamen in een uniforme stroming.

De coëfficiënt C_L bevat nu de specifieke lift producerende eigenschappen van de vleugel afhankelijk van vormgeving en invalshoek en andere van belang zijnde parameters. Door deze coëfficiënt bijvoorbeeld op modelschaal te meten kan voor elke andere vleugel met afwijkende afmetingen de lift bepaald worden.

De beschouwingen gelden in principe voor ideale vloeistoffen, dus zonder de invloed van de viscositeit. Echter om het ontstaan van circulatie te verklaren is het in de beschouwing betrekken van deze viscositeit onontbeerlijk gebleken. Volgens een hier niet te bewijzen theorema van Kelvin voor ideale vloeistoffen is de hoeveelheid circulatie in een vloeistof constant.

Dat betekent dat in een vloeistof waar geen circulatie is ook geen circulatie kan ontstaan of deze moet gecompenseerd worden door een even grote circulatie met tegengesteld teken.

Circulatie moet dus door een of ander mechanisme in de vloeistof gebracht worden. Bij de Magnus rotor geschiedt dit door het roteren van de cilinder en de viscositeit van de omringende vloeistof waardoor deze uiteindelijk een circulerend stromingsbeeld te zien geeft.

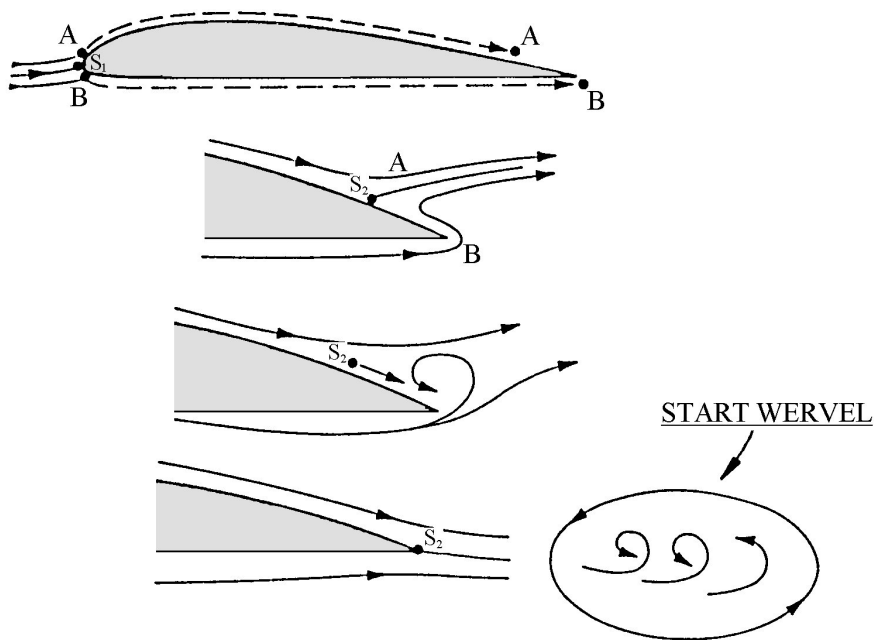
Bij een vleugel geschiedt dit op een andere manier. Beschouw daartoe een vleugel in rust in een stilstaande vloeistof. In deze situatie is er geen circulatie. Plotseling zet de vleugel zich in beweging. Het stromingsbeeld rond de vleugel ziet er dan in eerste instantie uit zoals gegeven in de bijgaande figuur.

Het stuwpunt aan de voorzijde ligt iets aan de onderkant het stuwpunt aan de achterzijde ligt iets aan de bovenzijde op de "rug" van de vleugel. Dit impliceert dat de vloeistofdeeltjes rond de scherpe achterrand van de vleugel moeten stromen en dat kan alleen met een relatief hoge snelheid (en versnelling).

Dit is het beeld dat zou ontstaan als we te maken hebben met een ideale wrijvingsloze vloeistof. In een viskeuze vloeistof echter is het onmogelijk om deze scherpe achterrand zo te omstromen, ten gevolge van de optredende schuifspanningen. De stroming breekt af bij de achterrand van de vleugel en daar ter plaatse ontstaat een wervel welke de circulatie in de stroming brengt.

Deze wervel wordt in de literatuur de **startwervel** genoemd, omdat zij gelet op het theorema van Kelvin het ontstaan van de circulatie rond de vleugel inluit. De circulatie rond de vleugel ontstaat nu in tegengestelde richting t.o.v. de startwervel.

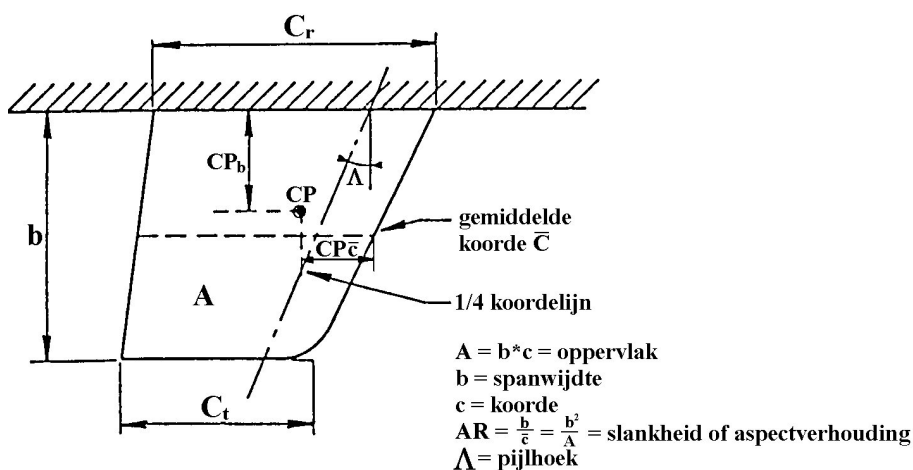
Het principe lijkt veel op de analogie in de mechanica waar een momentum in rotatie niet kan ontstaan zonder dat een tegengesteld momentum wordt opgewekt volgens het principe actie = reactie.



Bij elke verandering van de lift van een vleugel en dus van de circulatie ontstaat er opnieuw een startwervel. Het bestaan van de startwervel is door vele experimenten aangetoond en is dus niet slechts een theoretisch bedenkfel om het ontstaan van de circulatie te verklaren.

De viscositeit van de reële vloeistoffen veroorzaakt tevens een kleine weerstandskracht, zodat een oneindig lange vleugel in een twee dimensionale stroming toch een kleine weerstand ondervindt, deze is vele malen kleiner dan de liftkracht.

Tot hertoe is gesproken over twee dimensionale stromingen zoals we die uitsluitend aantreffen bij oneindig lange vleugels. In de praktijk is hiervan uiteraard nooit sprake, hoewel de zeer lange en slanke vleugels van bijvoorbeeld een zweefvliegtuig wel als zodanig beschouwd mogen worden. Voor vleugels met een eindige spanlengte geldt dat de stroming niet meer gelijkvormig is voor elk vlak in de aanstromingsrichting en loodrecht op de span van de vleugel, maar dat deze over de lengte van de span van de vleugel varieert: er ontstaan ook snelheidscomponenten langs de span van de vleugel. In dergelijke gevallen spreekt men van een drie dimensionale stroming.



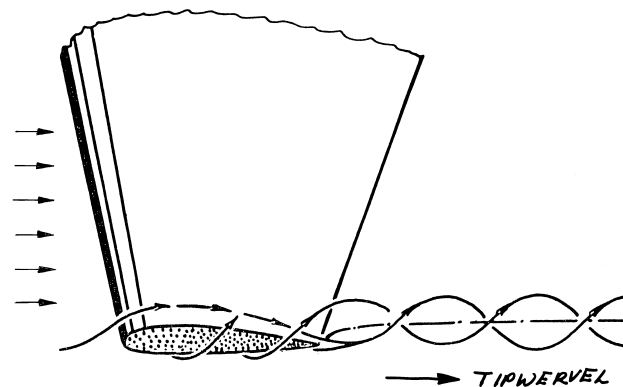
Voor het beschrijven van de geometrie van een vleugel wordt gebruik gemaakt van een standaard terminologie. Ter illustratie wordt verwezen naar de bovenstaande figuur.

Een belangrijk gevolg van de eindigheid van de span van de vleugel is het ontstaan van een extra weerstandscomponent en het verkleinen van de optredende circulatie bij een gegeven invalshoek.

Deze vindt zijn oorzaak in het stromingspatroon in het gebied rond de vleugeltip.

De hoge druk aan de onderzijde van de vleugel komt daarbij in contact met de lage druk zone aan de bovenzijde van de vleugel.

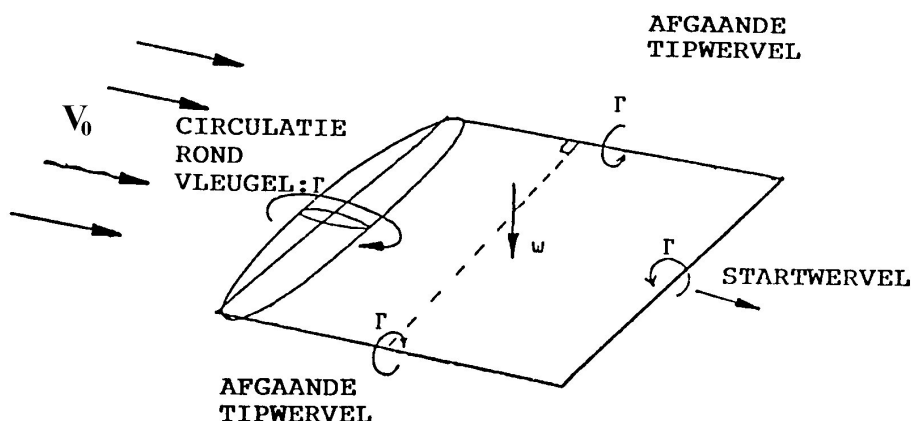
Doordat aan het einde van de vleugel er geen barrière meer is tussen beide drukgebieden staan deze als het ware in een open verbinding met elkaar. Het gevolg hiervan is een druk uitwisseling en een resulterende stroming van de hoge drukzijde naar de lage drukzijde. Gesuperponeerd over de uniform aanstromende vrije vloeistofstroming ontstaat hier een wervel welke **tipwervel** wordt genoemd.



In de mathematische beschrijving van de stroming rond de vleugel zijn deze tipwervels ook een essentieel onderdeel aangezien de circulatie rond de vleugel beschouwd als wervel niet zomaar in de vloeistof kan eindigen, zoals is aangetoond met het Theorema van Helmholtz.

De tipwervels nu voeren de circulatie van de vleugel af naar oneindig achter de vleugel zodat aan dit theorema wordt voldaan.

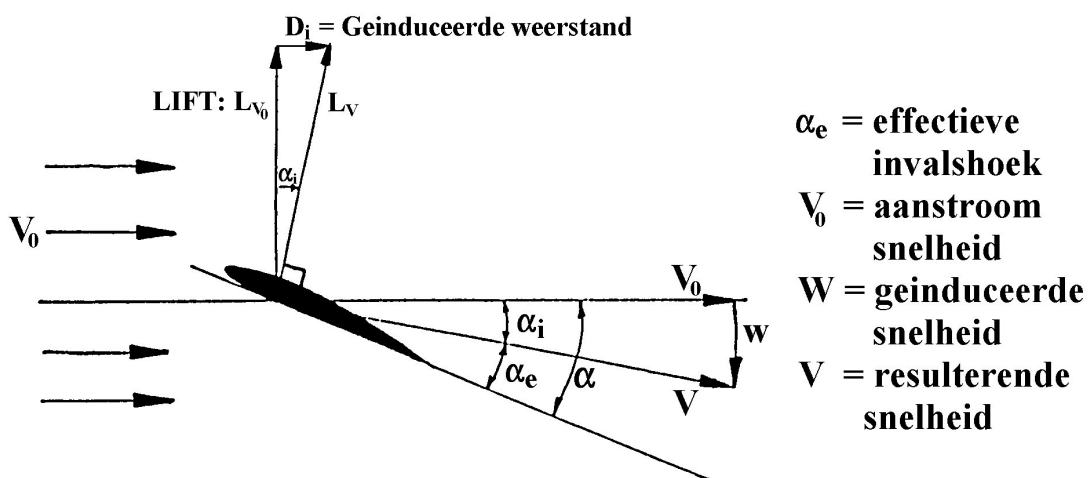
Ook hier weer blijkt de wervelbeschouwing van de vleugel geheel aan te sluiten bij het fysische beeld. Deze tipwervels kunnen in de praktijk worden waargenomen bij vliegtuigvleugels en ook bij schroefbladen.



Deze afgaande tipwervels nu induceren als vrije wervels snelheden in de vloeistof. Door hun oriëntatie als aflopende wervel induceren zij een verticaal naar beneden gerichte snelheidscomponent over het profiel, waardoor de effectieve invalshoek van de aankomende stroming wordt verkleind, zoals in onderstaande figuur staat weergegeven.

Hierdoor neemt de lift af en draait de liftkracht ten opzichte van de ongestoorde stromingsrichting van de vloeistof over een kleine hoek, waardoor een component van de lift in deze stromingsrichting ontstaat: **de geïnduceerde weerstand**.

Deze weerstandscomponent is dus ook aanwezig in een ideale vloeistof. De mate waarin de tipwervels de stroming beïnvloeden is afhankelijk van de sterkte van de circulatie rond de vleugel, want zij hebben de zelfde sterkte als de circulatie rond de vleugel en zijn dus afhankelijk van de grootte van de opgewekte lift en van de oppervlakte-span verhouding van de vleugel.



De verhouding tussen de koorde van de vleugel en de span van de vleugel noemen we de **aspectverhouding (AR)** van de vleugel.

Dit is een belangrijke parameter voor de bepaling van de vleugelkarakteristieken.

Samengevat blijkt een vleugel in een vloeistof zowel een liftkracht als ook een weerstandskracht te ontwikkelen. Deze laatste is opgebouwd uit een vormweerstandcomponent en een wrijvingsweerstandcomponent maar daarnaast in hoofdzaak uit een geïnduceerde weerstandscomponent, welke onlosmakelijk verbonden is met het genereren van de lift zelf, door vleugels met een eindige span. De afmetingen van de vleugel en de profieldoorsnede bepalen in hoge mate de lift en weerstandskarakteristieken.

Om vleugel- en profieldoorsneden onderling te kunnen vergelijken worden deze karakteristieken meestal gegeven in de volgende gedaante:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \qquad C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

waarin: A = het vleugel oppervlak = span x koorde
 V = de aanstroomsnelheid

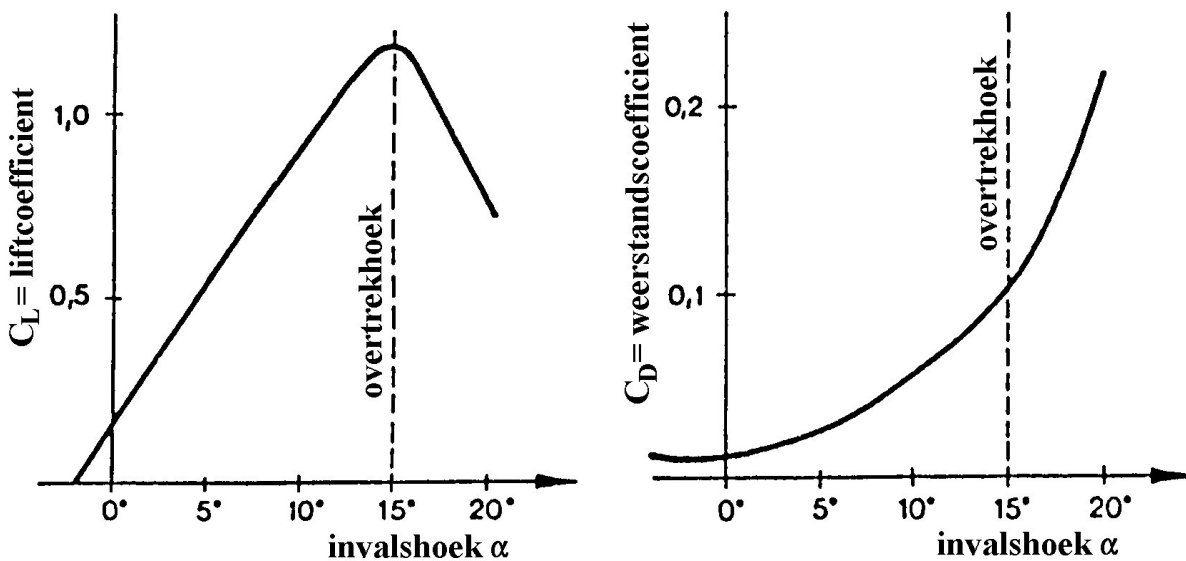
ρ = de soortelijke massa van het medium

C_L en C_D zijn dan de lift- en weerstandscoëfficiënten van de onderzochte vleugel en zijn afhankelijk van de profiel doorsnede, de aspectverhouding en de invalshoek.

De karakteristieken van een vleugel worden veelal gegeven in de vorm van een aantal grafieken.

De eerste figuur geeft het verloop van de liftcoëfficiënt als functie van de invalshoek over de vleugel.

Het valt op dat de lift in eerste instantie lineair toeneemt met de invalshoek, totdat een maximum bereikt wordt, voor normale vleugels meestal gelegen tussen de 20 en de 30 graden. Daarna neemt de lift met het toenemen van de invalshoek snel af. Dit komt doordat de stroming het profiel niet meer kan volgen en er loslatingsverschijnselen ontstaan aan de lage drukzijde van de vleugel: de vleugel overtrekt.

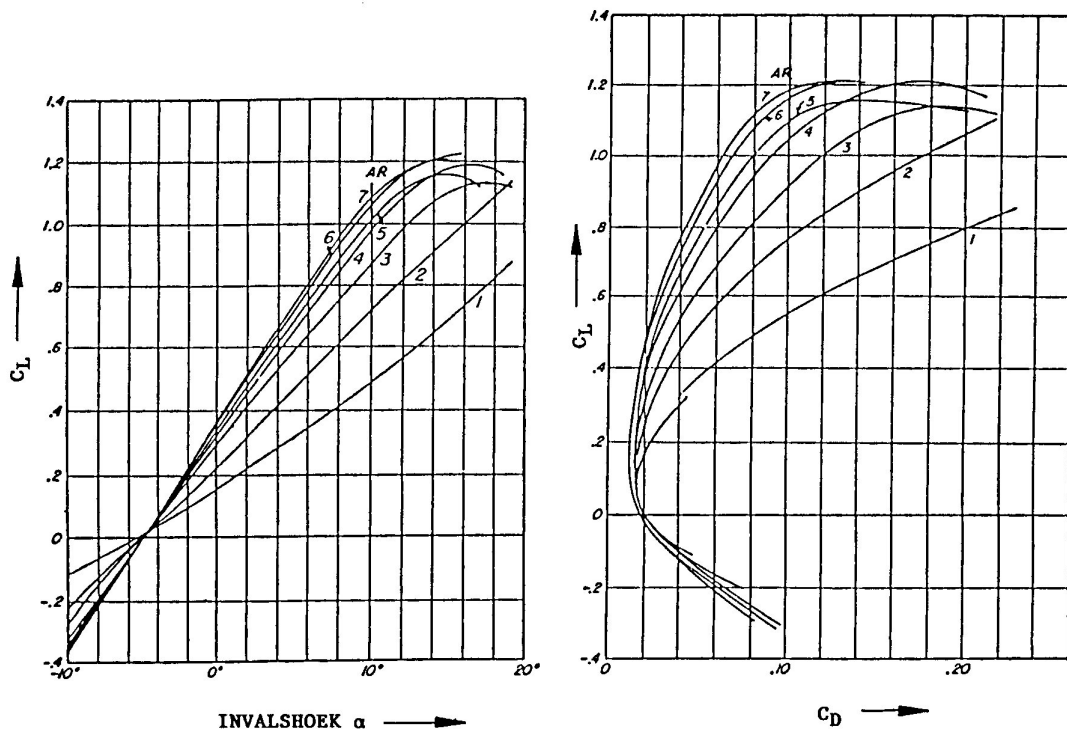


Terzelfder tijd neemt de weerstand van de vleugel echter sterk toe. Dit valt duidelijk waar de nemen uit de tweede figuur, waarin het verloop van de weerstandscoëfficiënt gegeven staat als functie van dezelfde invalshoek van de stroming. Tot aan de hoek waarbij de stroming loslaat neemt de weerstand ruwweg toe met het kwadraat van de invalshoek (en dus met de lift welke lineair met de invalshoek toeneemt) volgens:

$$C_D = C_{D_0} + C_{D_i} = C_{D_0} + \frac{C_L^2}{\pi AR}$$

daarna neemt de weerstand aanzienlijk sterker toe. De weerstand die de vleugel ook bij die invalshoek waarbij geen lift geproduceerd wordt, ondervindt is de vorm- en wrijvingsweerstand van de vleugel.

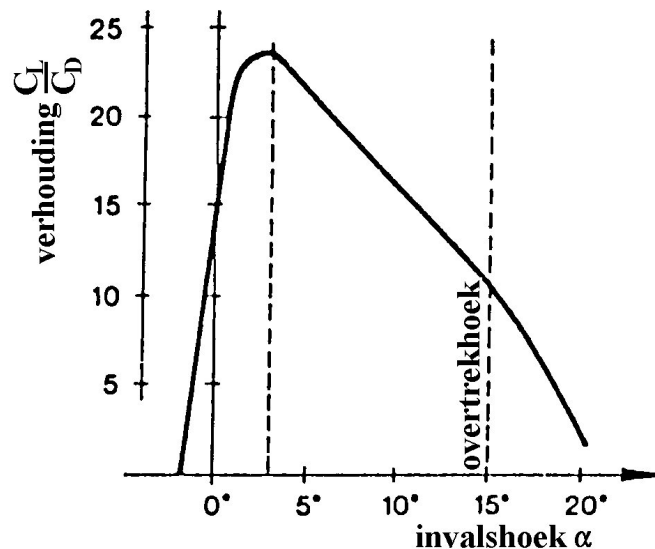
De invloed van de eerder genoemde aspectverhouding op zowel de lift als de weerstand valt af te lezen uit de onderstaande figuur.



Invloed aspectverhouding (=AR) op C_L en C_D .

De toename van de lift en de afname van de geïnduceerde weerstand bij toenemend aspectverhouding zijn evident. Opvallend is echter dat de vleugel met hoge aspectverhouding bij veel kleinere invalshoek reeds overtrekt, een in vele technische toepassingen nadelige eigenschap. In vele technische toepassingen speelt de lift-weerstand verhouding van een vleugel een belangrijke rol: veelal wordt de lift gewenst om een of ander doel te bereiken en moet de weerstand daarbij overwonnen worden; er moet een zo groot mogelijke lift geproduceerd worden ten koste van zo weinig mogelijk weerstand.

De verhouding C_L/C_D is dan belangrijk en deze kan gepresenteerd worden als functie van de invalshoek zoals in de onderstaande figuur.



In de meeste praktische toepassingen is rond het werkpunt van het systeem de lift vele malen groter dan de weerstand. Er zijn vele technische toepassingen waarbij gebruik gemaakt wordt van het vermogen van een vleugel om een kracht loodrecht op de stromingsrichting op te wekken.

Te denken valt hierbij aan:

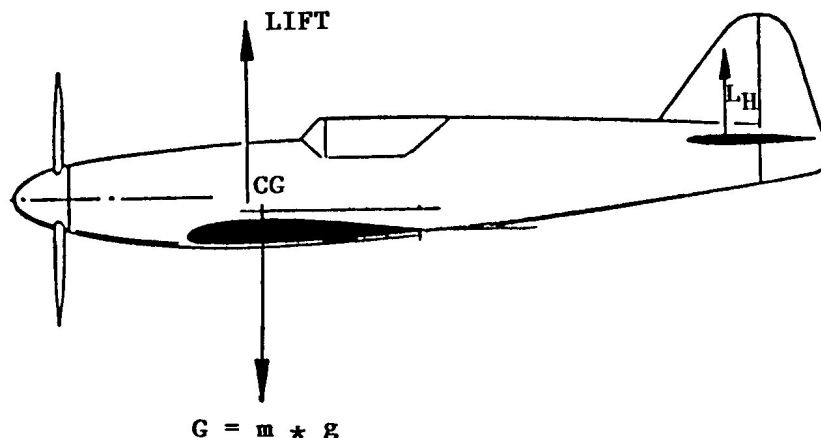
- vliegtuigen
- draagvleugelboten
- roeren van schepen
- propellers en scheepsschroeven
- turbines
- windmolens
- zeilen op schepen etc. etc.

Een klein aantal van deze toepassingen zullen in het hierna volgende belicht worden.

Vliegtuigen

Het meest sprekende voorbeeld van een technische toepassing van een vleugel is bij een vliegtuig. Een principe schets van een doorsnee vliegtuig is gegeven in de onderstaande figuur.

Normaliter bestaat een vliegtuig uit een romp met een stel grote horizontale vleugels voor en een stel kleinere horizontale vleugels achter plus een verticaal staartvlak. Doordat de vleugels onder een hoek worden aangestroomd en bovendien meestal asymmetrisch van vorm zijn, ontwikkelen zij een grote liftkracht omhoog waarmee het gewicht van het toestel gedragen kan worden.



In het algemene geval dienen de vleugels vóór om het gewicht van het toestel te dragen en achter om de stabiliteit van het vliegtuig bij plotselinge veranderingen van de evenwichtssituatie ten gevolge van bijvoorbeeld windsnelheids- en richtingsveranderingen te garanderen.

Om een zo efficiënt mogelijk gebruik van het toestel te maken is het wenselijk dat een zo groot mogelijke last bij een zo klein mogelijke weerstand wordt gedragen.

Dit impliceert dat in de ontwerpconditie meestal wordt gestreefd naar een zo gunstig mogelijke lift weerstand verhouding. De hoge aspectverhouding van de vleugels welke het zwaarst belast worden is daaruit te verklaren, dit garandeert een hoge lift ten koste van geringe geïnduceerde weerstand.

Dat de vleugels niet oneindig lang worden vindt zijn oorzaak in ondermeer de constructieve beperkingen: een lange vleugel wordt zwaarder om het torsie en buigend moment op te vangen en in het feit dat geïnduceerde weerstand niet de enige weerstands component is. Tijdens het opstijgen als het gewicht van het toestel, ten gevolge van de volle tanks, het grootst is, moet, om het toestel van de grond omhoog te tillen, een lift ontwikkeld worden welke groter is dan het gewicht van het toestel. Bij de relatief lage snelheid waarmee dit gebeurt betekent dit dat de C_L waarde van de vleugels hoog moet zijn. Immers:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A \cdot C_L$$

Om een zo groot mogelijke circulatie te verkrijgen wordt behalve een aanzienlijke invalshoek van de vleugels ook de profiel doorsnede hiervan verder geoptimaliseerd door het gebruik van flappen. De invalshoek, benodigd voor het opstijgen, wordt verkregen door de staart van het vliegtuig met het staartvlak naar beneden te drukken. Het staartvlak levert dus negatieve lift welke het gewicht van het toestel schijnbaar vergroot.

Het zal duidelijk zijn dat de stand die het toestel aanneemt ten opzichte van het horizontale vlak groter is dan de hoek die de uiteindelijke baan die het toestel aflegt daarmee maakt.

Tijdens het dalen moet de snelheid zodanig gereduceerd worden dat het toestel binnen de baanlengte tot stilstand kan worden gebracht. Het totaal gewicht van het toestel is over het algemeen lager en bovendien is de totale lift lager dan het gewicht zodat relatief minder hoge liftcoëfficiënten benodigd zijn dan bij het stijgen.

Het streven is echter om met een zo laag mogelijke snelheid aan de grond te komen. De combinatie van de relatief lage voorwaartse snelheid met de daalsnelheid maakt echter dat de invalshoeken over de vleugel hoge waarden kunnen bereiken. De weerstand speelt in deze situatie een meer ondergeschikte rol dan bij het opstijgen, aangezien het toestel toch vertraagd moet worden.

Bij het stijgen wordt het profiel van de vleugel dus zo aangepast met behulp van flappen dat een hoge lift bij geringe weerstand kan worden bereikt.

Bij het dalen wordt de geometrie door flappen zo aangepast dat naast een hoge liftcoëfficiënt ook een hoge overtrekhoek wordt gerealiseerd.

Bij het toenemen van de hoogte verandert ook ρ , de soortelijke massa van de lucht. Daar deze een wezenlijke bijdrage levert aan de weerstand is het mogelijk op grotere hoogte hogere snelheden te behalen. Om dezelfde liftkracht te genereren is dat dan ook nodig.

Roeren

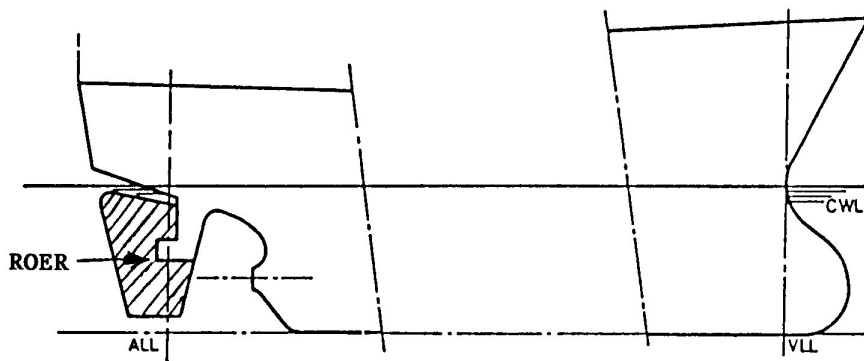
Om bijvoorbeeld schepen (maar ook vliegtuigen) van koers te doen veranderen is het noodzakelijk een moment in de gewenste richting op te wekken. Beperken we ons tot schepen.

Om dit moment op te wekken wordt gebruik gemaakt van een verticaal geplaatste vleugel op zo groot mogelijke afstand van het zwaartepunt van het schip, meestal aan de achterzijde.

Door de voorwaartse snelheid van het schip en de oriëntatie van de vleugel wordt bij het geven van een kleine roerhoek een grote dwarskracht en dus een moment ten opzichte van het zwaartepunt opgewekt, welke het schip van koers doet veranderen.

De extra weerstand die door het roergeven wordt veroorzaakt moet zo klein mogelijk zijn, vandaar dat indien mogelijk voor zo efficiënt mogelijke vormgeving van het roer wordt zorggedragen (grote aspectverhouding). Hieraan is echter een praktische grens aangezien ook met grote roerhoeken gewerkt moet kunnen worden om een gewenst moment op te wekken vooral als de voorwaartse snelheid van het schip gering is.

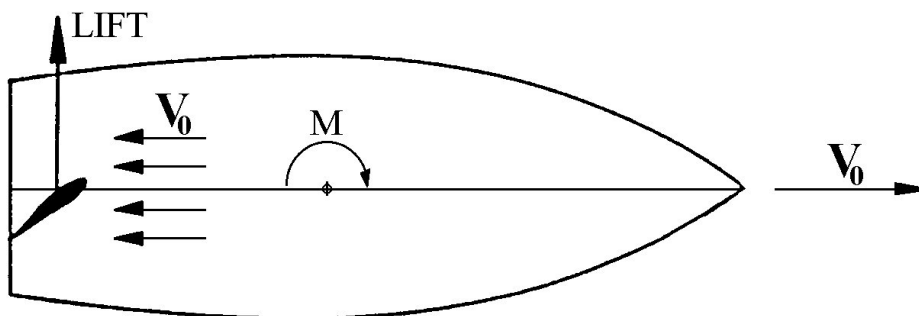
Derhalve mag het roer niet te snel overtrekken. Immers:
$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A \cdot C_L$$



Een lage voorwaartse snelheid impliceert een hoge invalshoek om een bepaalde dwarskracht te kunnen opwekken. Uit een eerdere figuur ten aanzien van de invloed van het aspect getal op de lift karakteristiek bleek echter al dat een hoog aspect getal het risico van overtrekken vergroot.

Het haalbare moment bij lage snelheden blijft echter kleiner dan bij hoge snelheid en de manoeuvreerbaarheid van schepen is bij lage snelheden dan ook beduidend minder.

Voor het manoeuvreren in havens waarbij over het algemeen met lage snelheden gevaren wordt is dit een ernstige handicap. Veelal zal men trachten een minimale snelheid ook in die omstandigheden vol te houden i.v.m. de manoeuvreereigenschappen.



Het minimale roeroppervlak wordt dan ook onder andere bepaald uit deze overwegingen.
Bij hoge snelheden kan dan volstaan worden met relatief kleine roeruitslagen.
Zeer snel varende schepen kunnen volstaan met relatief kleine roeren.

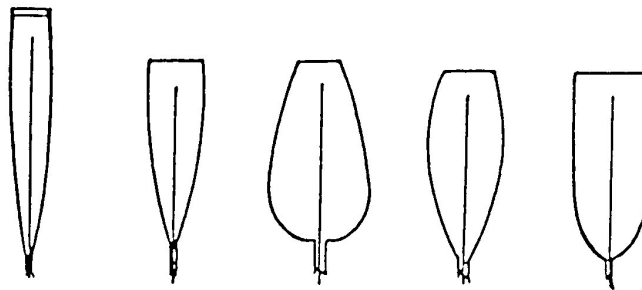
Schroeven

Een andere toepassing van vleugels vinden we bij het voortstuwten van schepen. Om het schip een snelheid te geven ten opzichte van het omringende water is het noodzakelijk dat op het schip een kracht in die richting wordt uitgeoefend: de stuwkracht.

Deze stuwkracht kan in principe worden opgewekt door gebruik te maken van een op verschillende wijze opgewekte reactiekracht van het water op een bewegend (aangedreven) lichaam. We onderscheiden:

- **de weerstand die een lichaam ondervindt bij een verplaatsing door het water.**

Bij deze manier van voortstuwten kunnen we ondermeer denken aan de weerstand die roeiriemen of paddle's ondervinden bij een geforceerde beweging door het water tegen de gewenste bewegingsrichting van het schip in. Door de reactiekracht kan het schip aldus worden voortgestuwd.



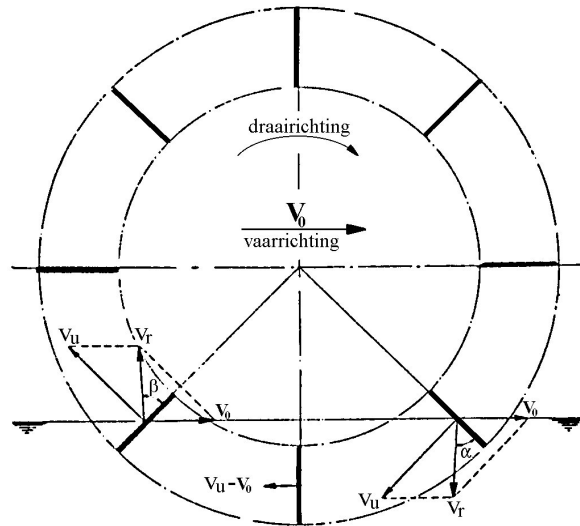
De snelheid waarmee het blad door het water gehaald wordt is in hoge mate bepalend voor de opgewekte weerstandskracht, aangezien de weerstand evenredig is met de het kwadraat van de relatieve snelheid tussen blad en water.

Vandaar dat lange horizontaal bewogen roeiriemen meer stuwkracht kunnen leveren dan een korte verticale paddle. Naarmate het schip sneller vaart is een grotere snelheid van het blad nodig om dezelfde relatieve snelheid tussen blad en omringende water te handhaven. Aangezien de slag van de roeier beperkt is moet het tempo worden opgevoerd.

Het scheprad is in principe een ring van paddle's welke met een niet geringe hoeksnelheid om een dwarsscheeps geplaatste horizontale as draait. In zijn eenvoudigste uitvoering zijn de paddle's gefixeerd aan de ring wat stand betreft.

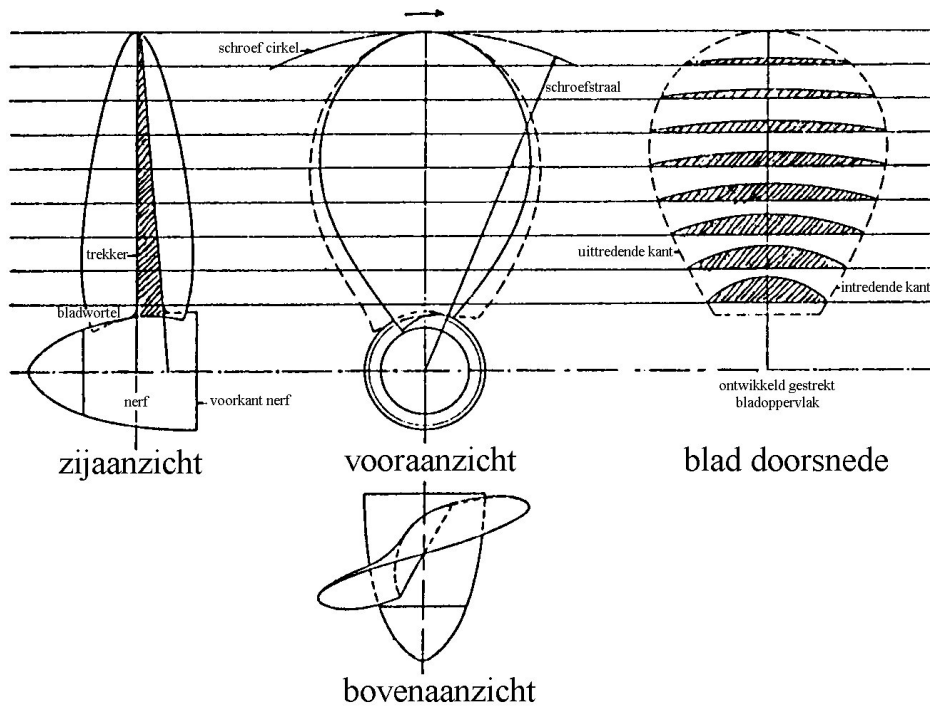
Voor een groter rendement werden zij ook wel tijdens het draaien van de ring zodanig verdraaid dat zij "stootloos" het water in- en uitreden waarbij een zo groot mogelijk geprojecteerd oppervlak gerealiseerd wordt.

Door de bladen tijdens het omwentelen van het gehele rad van stand te doen veranderen is het mogelijk om een optimale stand van het blad ten opzichte van de relatieve snelheidsvector te realiseren. Zo kan onder meer ook tijdens een gedeelte van het ondergedompelde traject lift geproduceerd worden. Dit blijkt ondermeer uit de beschouwing van de figuur, waarin in een drietal situaties de relatieve snelheid tussen water en blad geschetst staan.



Dit leidt langzaam tot het concept van een normale schroef zoals hierna te bespreken. Beperkingen aan de breedte van het vaartuig leiden er toe dat het "paddle-wheel" later aan de achtersteven van het schip bevestigd werd, zoals dat bekend is van de stoomboten op de Amerikaanse rivieren. Het overall rendement van dit soort voortstuwing, dat is de verhouding tussen het effectief geleverde voortstuwingsvermogen en het toegeleverde vermogen, is over het algemeen niet erg hoog.

– **de liftkracht opgewekt door draagvleugels**



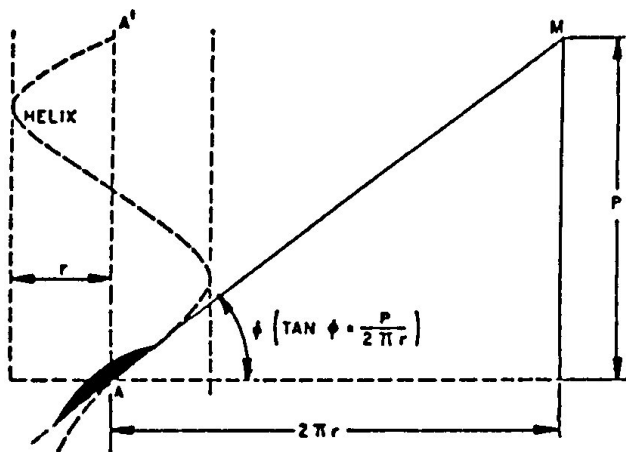
Dit principe wordt toegepast bij de bekende scheepsschroef. De karakteristieken van een scheepsschroef kunnen goed begrepen worden door deze te beschouwen als een serie vleugels (bladen) geplaatst op een as. Beschouwen we daartoe de geometrie van een schroef zoals weergegeven in de bijgaande figuur. De schroef is opgebouwd uit een naaf

met daarop onder een hoek geplaatst een aantal bladen. De hoek die de bladen met de langsas door de naaf maken is belangrijk. Deze wordt de spoedhoek van het blad genoemd en staat gedefinieerd in de figuur. De spoed van de schroef wordt gedefinieerd door de voorwaartse beweging van een blad tijdens een gehele omwenteling van de schroef. De dimensieloze weergave hiervan, die normaal gebruikt wordt, is de spoedverhouding. Dit is de spoed P gedeeld door de diameter van de schroef: P/D .

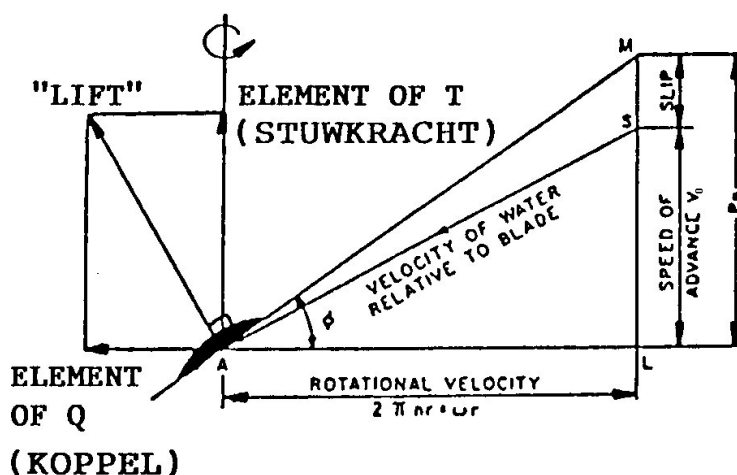
Door de rotatie van de as, daartoe aangedreven door de hoofdmotor van het schip, transleren de bladen door het water. Elk radiaal stripje van het blad doet dat met een andere snelheid afhankelijk van zijn afstand tot het hart van de as en het toerental van de as.

Lichten we nu een stripje eruit op een kenmerkende afstand van de as en beschouwen we die als representatief voor het blad.

De afstand van dit blad-elementje tot het hart van de as nemen we op 70 % van de straal. Dit elementje staat weergegeven in de onderstaande figuur.



Definitie spoedhoek van een blad-elementje.



Snelheden op een blad-elementje

De bladdoorsnede is een vleugel profiel. De snelheid en de aanstroomrichting van het water worden nu bepaald door verschillende snelheidsvectoren welke gesuperponeerd moeten worden.

Dit zijn:

- De translatiesnelheid van de schroef in de lengterichting van het schip ten gevolge van de voorwaartse snelheid van het schip, V_0
- de translatiesnelheid van het blad-elementje ten gevolge van de rotatie van de schroef rond de as, $2 \pi n r$
- de door de krachten op de bladen geïnduceerde snelheden.

Uit de figuur blijkt dat beide eerste componenten, waartoe we ons nu zullen beperken, in principe loodrecht op elkaar staan. De relatieve grootte van beide componenten bepaalt nu de invalshoek en de aanstroomsnelheid van het water op het blad-elementje (velocity of water relative to blade). Net als een vleugel ontwikkelt het elementje van het schroefblad zo een lift en een weerstandskracht. Zoals inmiddels bekend worden deze in hoge mate bepaald door de invalshoek en de snelheid van de stroming alsmede door de bladgeometrie en profiel.

De liftkracht kan ontbonden worden in een component in de lengterichting van het schip, welke door de daadwerkelijke voortstuwing zorg draagt en een component loodrecht op de as, welke een aandeel levert in een askoppel nodig om de schroef rond te draaien. Datzelfde geldt uiteraard voor de weerstand, met dien verstande dat de bijdrage aan de stuwkracht negatief is.

De effectieve invalshoek van de stroming moet in principe beneden de overtrekhoek van het profiel blijven maar kan ook niet te klein zijn daar anders niet voldoende lift wordt geleverd.

Dit impliceert dat voor een optimale invalshoek de spoedhoek van het blad-elementje over de span van het blad moet variëren, aangezien de afstand tot het hart van de as toeneemt en daarmee de snelheidscomponent ten gevolge van de rotatie immers:

$$\text{Translatie snelheid} = 2\pi nr$$

Bij normale schroeven is dus altijd sprake van een spoedverloop over het blad, de elementjes van het blad verder gelegen van het hart van de as krijgen een kleinere spoedhoek omdat de aanstroomsnelheid steeds meer radiaal inkomt.

De onderlinge verhouding tussen de voorwaartse snelheid van het schip, het toerental van de schroef en de spoed van de schroef zijn bepalend voor de grootte van de stuwkracht en het benodigde askoppel van de schroef. Daar de geleverde stuwkracht op zijn beurt weer de resulterende voorwaartse snelheid van het schip bepaalt en het benodigde vermogen van de motor weer afhangt van het koppel en toerental, zal het duidelijk zijn dat het ontwerpen van een goede schroef voor elk schip opnieuw moet geschieden.

Een hulpmiddel daarbij zijn de schroefdiagrammen ontleend aan modelproeven met een groot aantal systematisch gevarieerde schroeven. Hierin staat op basis van de snelheidsgraad:

$$J = \frac{V_0}{n D}$$

waarin: V_0 = voorwaartse snelheid schip (m/sec)
 n = omwentelingen/tijdseenheid (1/s)
 D = schroefdiameter (m)

waarin de verhouding tussen voorwaartse snelheid en toerental vastgelegd wordt, voor een bepaalde schroef met gegeven spoed, aantal bladen en bladoppervlakte, de stuwkracht, het benodigde askoppel en het rendement uitgezet. Deze worden gegeven in de vorm van dimensieloze coëfficiënten zodat ze voor schroeven van verschillende afmetingen te gebruiken zijn. Deze zijn:

de stuwkracht coëfficiënt:
$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

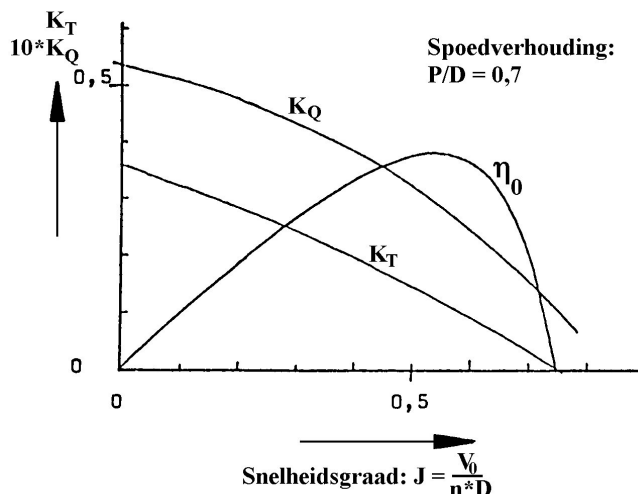
de askoppel coëfficiënt:
$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

Het open water rendement geeft de verhouding tussen het stuwvermogen en het opgenomen vermogen van de schroef.

het open water rendement:
$$\eta_0 = \frac{TV_0}{2\pi Qn} = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi}$$

- hierin is: T = stuwkracht (N)
 Q = koppel (Nm)
 n = toerental (omw/s)
 D = diameter schroef (m)
 V₀ = voorwaartse snelheid schip (m/s)

Een voorbeeld van zo'n schroefdiagram wordt gegeven in de volgende figuur:

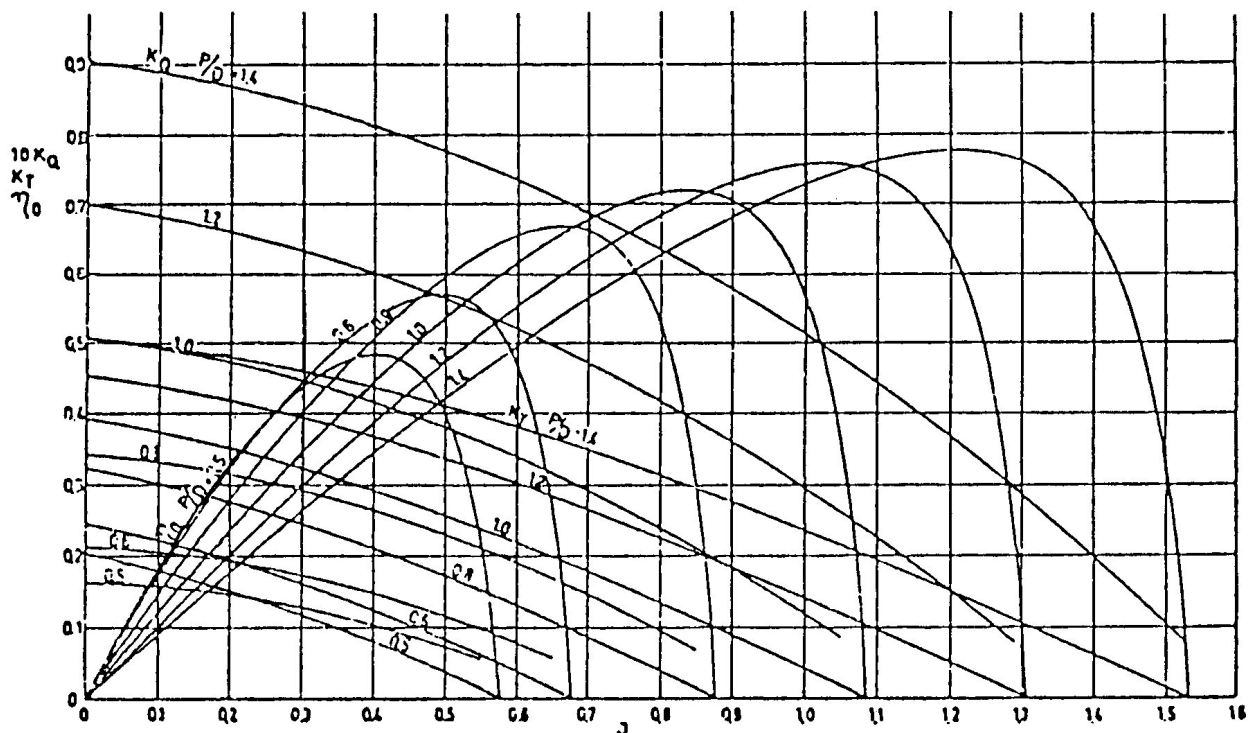


Zo valt te zien dat bij een lage snelheid en een relatief hoog toerental (J is klein) zoals dat voorkomt bij het accelereren van het schip de schroef een hoge stuwkracht levert ten koste van een hoog askoppel. De invalshoek op de bladen is groot, dat wil zeggen grote lift en dus ook weerstand. Het rendement is laag doordat het product van stuwkracht en voorwaartse snelheid laag is. Bij toenemende snelheid en gelijkblijvend toerental neemt J

toe en de invalshoek op de bladen af totdat een snelheid wordt bereikt waarbij de effectieve invalshoek op de bladen nul wordt en er derhalve geen stuwkracht geleverd wordt. Het askoppel wordt echter niet gelijk aan nul door de vorm- en wrijvingsweerstand van de bladen. Het rendement is dus nul. Voor de beschouwde schroef wordt het optimale rendement bereikt bij $J = 0.55$ en bedraagt circa 40%.

Een aanzienlijk hoger rendement tot circa 65-70% is voor een schroef haalbaar.

Dit blijkt ondermeer uit onderstaande figuur waarin voor verschillende spoedverhoudingen van een schroef met gelijk aantal bladen en gelijk blijvend oppervlak van de bladen de waarden voor K_T en K_Q en η_0 worden gegeven.



Schroefdiagram bij verschillende spoedverhoudingen

De optimale keuze van de schroef blijkt duidelijk afhankelijk te zijn van de omstandigheden waarin gevaren wordt, bijv. hoge of lage voorwaartse snelheid.

Voor schepen die met sterk wisselende functies te maken hebben, zoals sleepboten en visserboten, kan het derhalve voordelig zijn om de spoed van de schroef te kunnen variëren. Dit heeft geleid tot de introductie van de schroeven met verstelbare bladen zodat de spoed aangepast kan worden aan de omstandigheden.

Het open water schroef diagram zoals dat hier boven getoond is wordt veel gebruikt bij het bepalen van de juiste schroef voor een te bouwen schip. Het geeft de prestaties van een schroef zonder de aanwezigheid van het schip; vandaar de term "open water".

Er zijn een aantal zogenaamde "schroef series" bekend, waarbij deze schroefdiagrammen bepaald zijn van een familie van systematisch gevarieerde schroeven. Ook hier is het startpunt van de serie weer een "parent" schroef (moedermodel), waarvan vervolgens een

Op basis van vele metingen in de sleeptanks over de gehele wereld achter vele verschillende modellen zijn er allerlei formuleringen gevonden voor deze snelheidsreductie w_N achter het schip. Deze wordt dan uitgedrukt als functie van verschillende "romp" grootheden zoals lengte van het schip, volheid van het onderwater schip etc
De nominale snelheid wordt dan gegeven door:

$$V_A = V_0 = V_S (1 - w_N)$$

De schroef heeft echter ook een effect op de drukverdeling over de romp. Het blijkt dat de aanwezigheid van de schroef de weerstand van het schip verhoogt. Dit gebeurt zowel doordat de schroef omdat hij water "aanzuigt" de watersnelheid over de romp vergroot als wel doordat hij de druk opbouw over het achterschip verstoort en daardoor over het achterschip een lagere druk bewerkstelligt dan dat er zou zijn als er geen schroef zou werken. De voortstuwende kracht welke een schroef moet leveren moet dus groter zijn dan de weerstand die het schip ondervindt bij die specifieke snelheid als er geen schroef zou zijn. Dit laatste is veelal de weerstand zoals die in de sleeptank gemeten wordt of zoals die volgt uit een of andere berekenings- of benaderingsmethode.
De toename van de weerstand tengevolge van de schroefwerking wordt uitgedrukt in het "zog getal" of "trust deduction factor" t :

$$t = (T - R) / T$$

waarin T = de stuwkracht welke voor een bepaalde snelheid geleverd moet worden
 R = de weerstand van het schip bij die snelheid zonder schroef

De ontwerp procedure voor een schroef in zijn meest algemene zin gaat als volgt:
Het schip wordt ontworpen voor een bepaalde snelheid. Als het volgstromgetal van de romp bij die snelheid bepaald is met behulp van een of andere formulering dan is de intrede snelheid van een schroef, nodig voor het openwaterdiagram, bekend. Daarnaast zal de weerstand van het schip voor de ontwerpsnelheid ook bekend moeten zijn, hetzij uit een modelproef of uit een berekenings- of benaderingsmethode. Met gebruikmaking van een eveneens (empirisch) geschatte trust deduction factor kan nu de benodigde stuwkracht T bepaald worden. De trust deduction factor kan ook in een sleeptank model gemeten worden door een schroef achter het model te hangen en die de benodigde stuwkracht (en dus drukveld) te laten leveren. De extra weerstand kan zo bepaald worden. De schroef ontwerper is nu vrij om het aantal bladen voor zijn schroef te bepalen net als de oppervlak verhouding van de bladen, de diameter van de schroef en het toerental etc. Er gelden voor deze grootheden veel beperkingen of randvoorwaarden, bijvoorbeeld:

- hij moet achter het schip passen (diameter);
- hij moet ruim onder water blijven (diameter);
- hij mag niet gaan caviteren (zie later –bladoppervlak!!);
- romp trillingen moeten voorkomen worden (aantal bladen en toerental);

- de schroef moet het vermogen kunnen opnemen van de motor, die dat moet kunnen leveren (koppel en toerental).

Met behulp van het juiste schroefdiagram kan een ontwerper vervolgens op zoek naar de schroef met het hoogste rendement.

Een specifiek probleem bij scheepsschroeven wordt veroorzaakt door de omstandigheid dat zij opereren in water.

Uit de beschouwingen over de werking van vleugels is gebleken dat zij een liftkracht opwekken door een drukverhoging en een drukverlaging aan het blad oppervlak.

Door deze drukverlaging nu is het mogelijk dat op een bepaalde plaats op het blad de druk lager wordt dan de dampdruk van water, waardoor dampvorming in het water optreedt. Gelet op de drukverdeling aan de zuigzijde van het blad, zie figuur bladzijde 8.2, zullen deze meestal in het eerste gedeelte van het blad ontstaan.

Hierdoor ontstaan "holten" in de vloeistof gevuld met waterdamp. Deze worden door de stroming langs het blad naar achteren gevoerd en door het daar weer toenemen van de druk "imploderen" deze dan weer.

Dit gaat gepaard met grote krachten, die ernstige schade aan het blad kunnen veroorzaken. Ook de lift opwekking kan hierdoor ernstig verstoord raken. Dit fenomeen wordt met verwijzing naar de holten **caviteren** genoemd (caviteit = holte).

Het kan alleen voorkomen worden door er voor te zorgen dat de onderdruk op het blad de dampspanning niet overschrijdt.

Dit impliceert, aangezien kracht = druk maal oppervlak, dat het blad oppervlak niet te klein gekozen mag worden of de belasting van het blad te hoog. Ook het diep onderdompelen van de schroef onder water helpt hierbij aangezien de hydrostatische druk toeneemt met de diepte. In de meest voorkomende gevallen wordt de schroef dan ook zo diep als praktisch mogelijk is geplaatst.

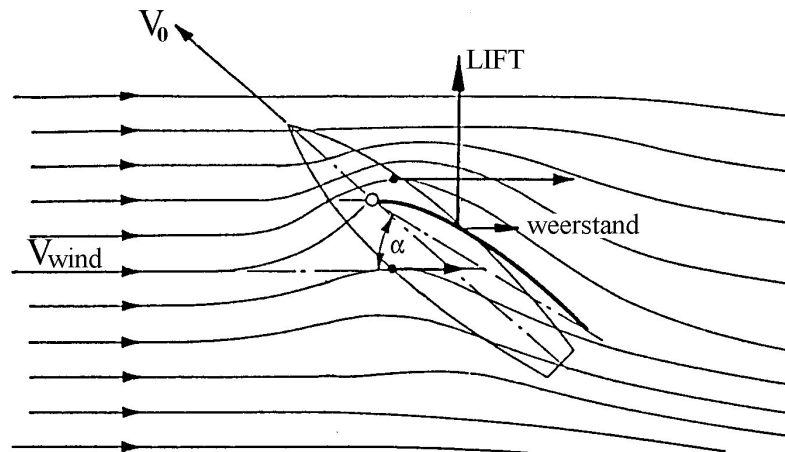
Zeilen

Een geheel andere toepassing van de eigenschappen van vleugels wordt gevonden bij het gebruik van zeilen op schepen om deze voort te stuwten.

Bij een zeil is er sprake van een asymmetrische vleugel met een zeer geringe dikte. Hierin onderscheidt het zich van de gangbare vliegtuig vleugel.

De krachten op een zeil in een homogene uniforme stroming vertonen veel gelijkenis met die op een vleugel.

In onderstaande figuur wordt het stromingsbeeld rond een zeil geplaatst onder een kleine hoek met de stroming weergegeven. De analogie met dat van de vleugel is evident. Ook hier wordt een relatief grote liftkracht geproduceerd en een relatief kleine weerstandskracht.



De lift- en weerstandskracht kunnen ontbonden worden in componenten in langsrichting van het schip en loodrecht daarop.

De som van de componenten in langsrichting levert de uiteindelijk beschikbare voortstuwende kracht aan het schip. Meerdere standen van het zeil ten opzichte van de langsas van het schip en dus tevens ten opzichte van de aankomende wind, geven in dit opzicht resultaat. Een specifieke stand levert echter de maximale voortstuwende kracht. De componenten in dwars richting zullen op de een of andere wijze gecompenseerd moeten worden. Hierover later meer.

Een belangrijk verschil tussen een zeil en een vleugel komt voort uit het feit dat de meeste zeilen van doek worden gemaakt. Dit impliceert dat het zeil in vorm gehouden moet worden door de drukverdeling die het rondom zich zelf genereert. Is deze drukverdeling daartoe niet in staat, zoals bij zeer kleine invalshoeken verwacht mag worden, dan is de vorm van het zeil niet langer stabiel en wordt de vleugelwerking verstoord:

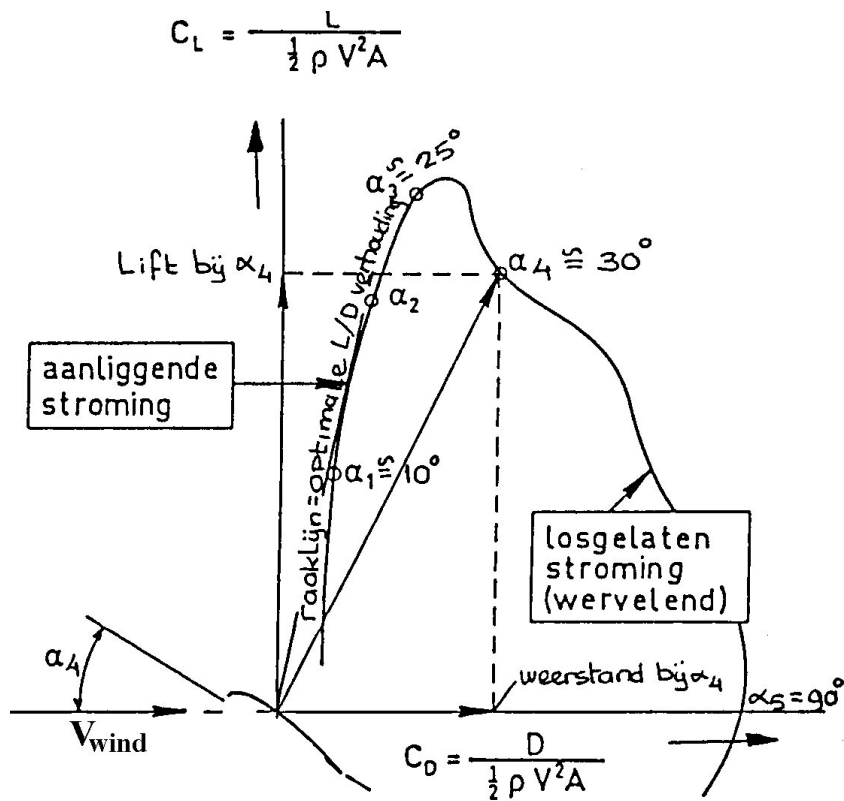
bij een invalshoek kleiner dan 5 graden gaat het zeil over het algemeen klapperen, de liftproductie is dan gelijk aan nul.

Uit wat in het hierna staande besproken zal worden zal blijken dat, om een schip op alle denkbare koersen te kunnen voortstuwen, het onvermijdelijk is dat de range van invalshoeken over het zeil kan variëren tussen de 5 en 90 graden.

Het moet namelijk in alle mogelijke combinaties van vaarrichting van het schip en invalshoek van de wind in staat zijn om een optimale voortstuwende kracht te ontwikkelen. Later zal blijken dat dit evenwel niet mogelijk is.

Dat betekent dat voor het voortstuwen van schepen het eveneens van belang is de karakteristieken van het zeil te kennen bij invalshoeken waarbij de stroming reeds lang is losgelaten. Bij de meeste andere technische toepassingen is dit niet het geval.

De lift en weerstand van een zeil wordt dus meestal gegeven in de vorm van een polaire kromme. Een voorbeeld van een dergelijke kromme staat gegeven in de onderstaande figuur.



Hierin staan de lift- en weerstandscoefficiënt van een bepaald zeil gegeven als functie van de invalshoek van de wind in het zeil. Bij de kleine invalshoeken overheerst de lift tot bij circa 22 graden het profiel begint te overtrekken.

Bij toenemende invalshoek neemt de lift af en de weerstand snel toe. Bij een invalshoek van 90 graden is er van lift geen sprake meer en is er dus uitsluitend nog weerstand.

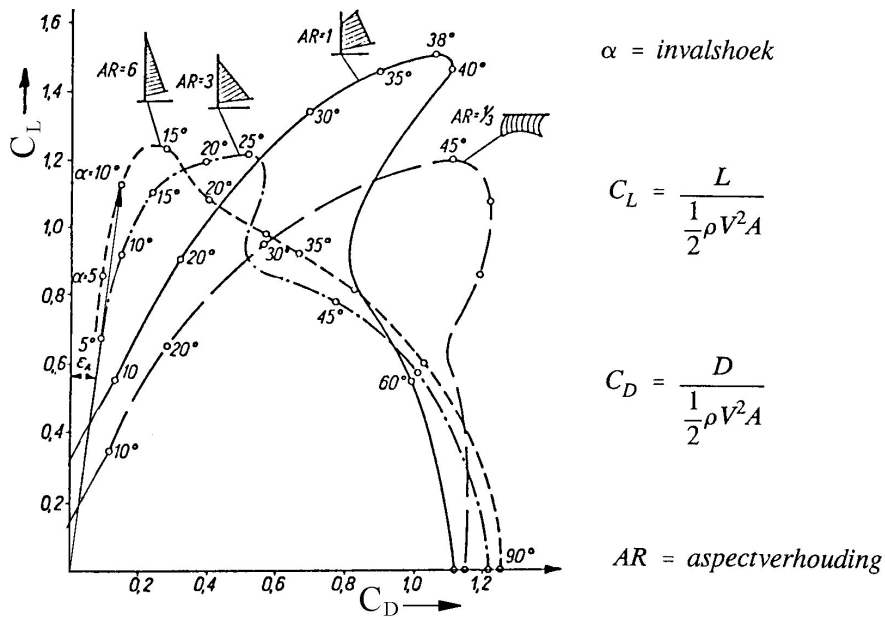
Evenals bij een vleugel is ook de vorm van deze polaire kromme in sterke mate afhankelijk van de geometrie van de tuigage.

Twee belangrijke parameters hiervan zullen we kort behandelen.

De eerste is de planvorm van het zeil. Deze is in de loop der eeuwen sterk veranderd door veranderende technische inzichten en praktische mogelijkheden. Zo is het geëvalueerd van een rechthoekig zeil tot een driehoekig zeil en van laag en breed tot hoog en smal.

Ook hierbij speelt de aspectverhouding van het zeil als vleugel een belangrijke rol, vooral in relatie tot de geïnduceerde weerstand van het zeil. Een complicatie ten aanzien van de optimalisatie van de planvorm is gelegen in het feit dat dit optimum duidelijk verschillend is voor verschillende invalshoeken waarmee het zeil gebruikt moet gaan worden.

Deze zijn zoals later zal blijken weer afhankelijk van de koers van het schip. De invloed van de planvorm van het zeil staat weergegeven in de onderstaande figuur.

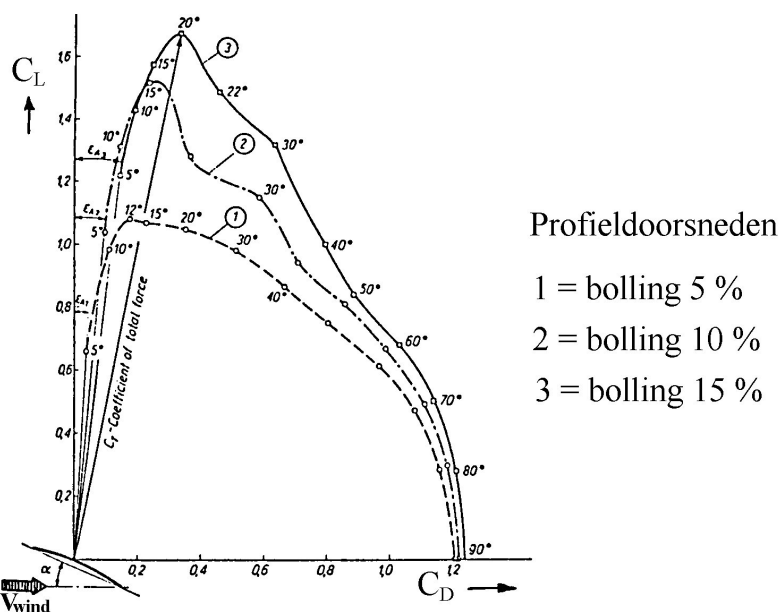


Als belangrijk verschil in karakteristiek tussen de verschillende planvormen valt te noemen de raaklijn aan de kromme vanuit de oorsprong voorstellende de optimale lift-weerstand verhouding welke onder specifieke omstandigheden van belang blijkt te zijn. Hierbij is het zeil met het hoge aspect getal in het voordeel, zoals verwacht, deze levert immers minder geïnduceerde weerstand. De maximaal haalbare lift van zo'n zeil is hoog maar het zeil overtrekt snel. ($\alpha = \pm 15^\circ$)

Een laag aspect getal van het zeil heeft een aanzienlijk hogere overtrekhoek en is in dat opzicht in het voordeel. Het min of meer rechthoekige zeil produceert een duidelijk grotere totale kracht bij grote invalshoeken en het zal blijken dat dit op bepaalde koersen een voordeel is. ($\alpha = \pm 25^\circ$)

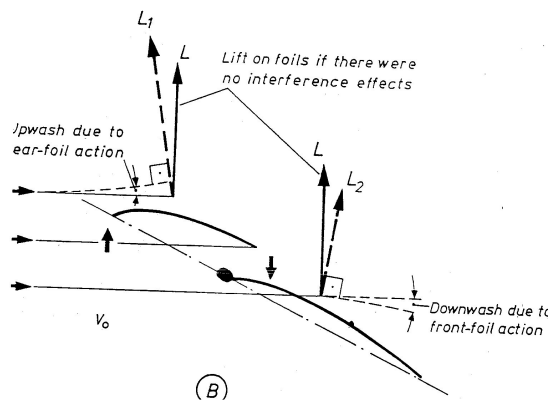
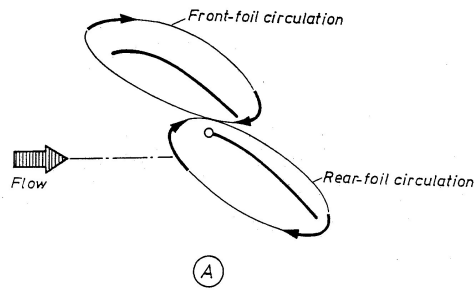
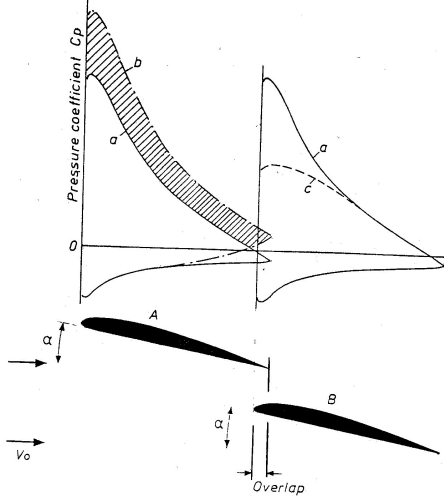
Een tweede belangrijke parameter is de bolling van het zeil. Deze wordt gedefinieerd door de verhouding tussen de maximale diepte van het profiel en de plaatselijke koorde.

In de bolling van het zeil is eigenlijk zijn inherente asymmetrie als vleugel beschouwd. Een grotere bolling produceert meer lift. Echter ook de vormweerstand van het zeil neemt toe, zoals uit de figuur blijkt.



In de praktijk wordt het zeiloppervlak van een zeilschip meestal verdeeld over meerdere zeilen. Dit wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de noodzaak de zeilen hanteerbaar te houden, alsmede door beperkingen in de mogelijke tuigage. Ook de stabiliteit van het schip speelt hierbij een belangrijke rol.

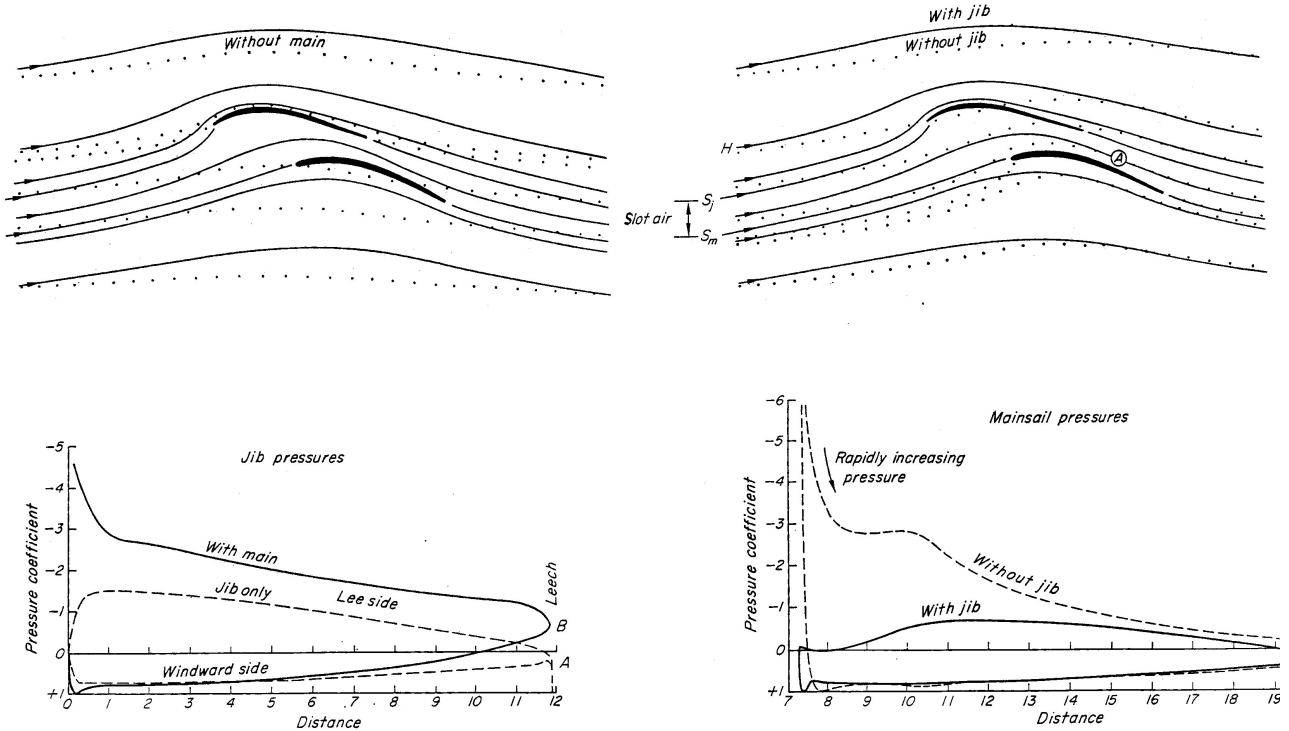
Door deze onderverdeling van de zeilen ontstaat het probleem van de onderlinge interactie van deze zeilen. Het ene zeil beïnvloedt de stroming rond het andere en omgekeerd.



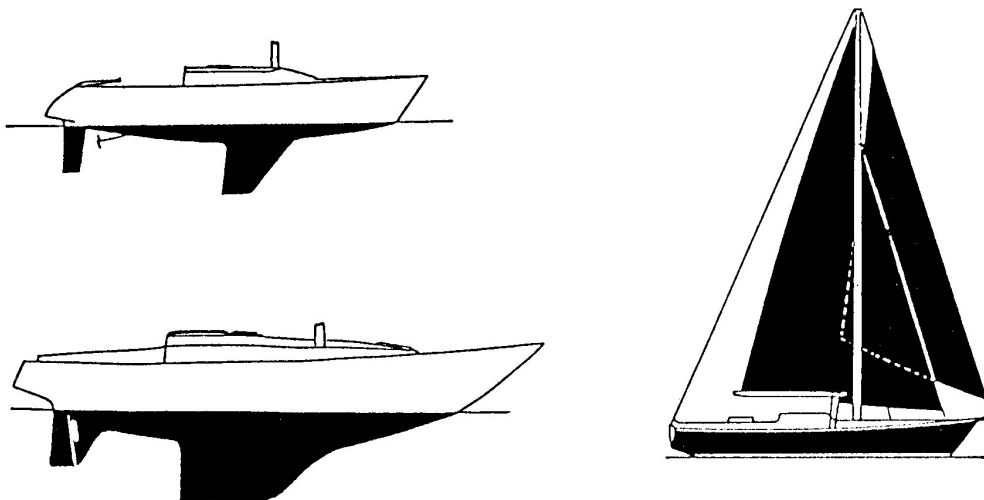
De lift en weerstand van zo'n combinatie van twee of meer zeilen is van zeer veel factoren afhankelijk en het bespreken hiervan voert buiten de scope van dit college.

Vermeld zij echter dat de polaire kromme van een combinatie van bijvoorbeeld twee zeilen een geheel ander aanzien kan hebben en zeer afhankelijk blijkt te zijn van de positie van beide zeilen ten opzichte van elkaar. Dit is een extra complicatie maar tevens een mogelijkheid om de uiteindelijk gewenste voortstuwende kracht te optimaliseren.

The effect of the jib on flow pattern and mainsail pressure distribution. (Drawing by kind permission of A Gentry.)



Beschrijven we nu de geometrie van een zeilboot in zijn meest algemene gedaante. In principe bestaat deze uit een romp van het schip welke door de krachten op de zeilen voortbewogen moet worden. Daartoe zijn op de romp een of meerdere masten geplaatst waaraan de zeilen bevestigd kunnen worden. Deze masten moeten star aan het schip bevestigd en overeind gehouden worden waarvoor meestal een stelsel van langsscheepse en dwarsscheepse draden gebruikt worden. Deze beperken tevens de mogelijkheid om de zeilen in elke gewenste stand ten opzichte van de wind te zetten.



Zoals reeds is gebleken hebben de op de zeilen werkende krachten ook componenten die niet aan de voortstuwing van het schip bijdragen en die derhalve gecompenseerd moeten worden.

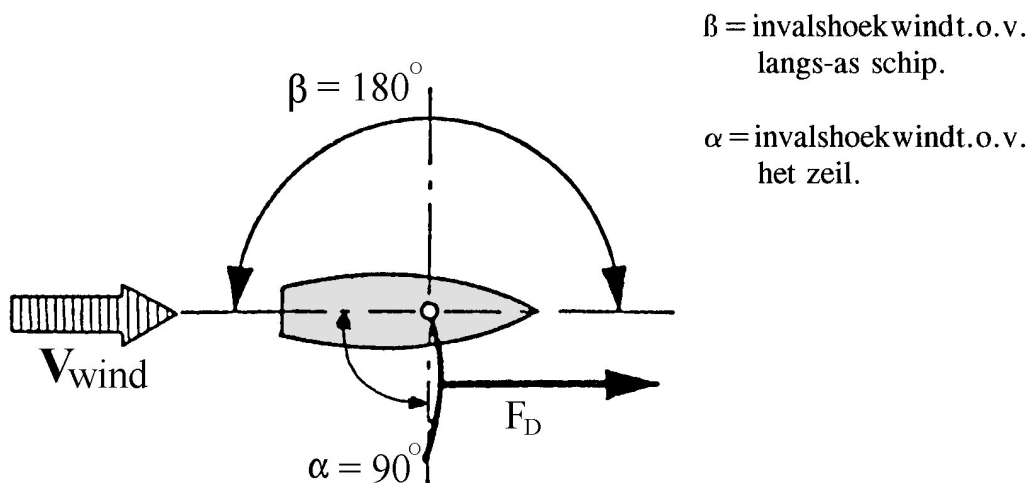
Hiertoe is het schip naast het gebruikelijke roer onderwater ook voorzien van een midscheeps geplaatste vleugel met de koorde in lengterichting en de span verticaal: **de kiel**.

Deze moet grote dwarskrachten kunnen leveren om die van het zeil te compenseren, maar dient tegelijkertijd ook voor het omlaag brengen van het zwaartepunt van het schip ter vergroting van de stabiliteit, om het kenterende moment van deze zelfde dwarskracht op te vangen.

Om een zeilschip als een geschikt vervoermiddel te kunnen gebruiken zou het in alle richtingen t.o.v. de wind moeten kunnen varen. Daarom is de range van invalshoeken van de wind t.o.v. het zeil veel groter dan bij de meer "normale" toepassingen van vleugels, bijvoorbeeld bij vliegtuigen en schroeven. Bezien we daartoe de op de verschillende koersen t.o.v. de wind in het spel zijnde invalshoeken en resulterende krachten op het zeil.

Beschouwen we nu eerst de situatie waarbij de wind ten opzichte van de langsas van het schip recht van achteren inkomt.

De hoek α is in deze situatie gelijk aan 90 graden, omdat door de aanwezigheid van de dwarsscheeps staande tuigage welke de mast overeind houdt het niet mogelijk is het zeil verder uit te vieren. Aangezien de wind in de verplaatsingsrichting van het schip waait zijn we voor de voortstuwing niet geïnteresseerd in lift, deze zou slechts krachten leveren dwars op de gewenste verplaatsingsrichting.



Het zeil is maximaal dwars gezet zodat het op de wind geprojecteerde oppervlak zo groot mogelijk is. Het zeil fungeert volledig als weerstandsopwekker zoals uit de polaire kromme van het zeil blijkt. De geprojecteerde totaalcracht van het zeil op de gewenste verplaatsingsrichting is zo echter maximaal: de weerstand van het zeil komt geheel ten goede aan de stuwkracht. De ontwikkelde liftkracht is nul. Er zijn geen dwarsscheepse componenten van de totaalcracht.

Evenwicht wordt bereikt bij die snelheid waarbij de weerstand van de romp even groot is als de stuwkracht van het zeil. De eerste neemt met het toenemen van de snelheid toe. De laatste neemt met het toenemen van de snelheid van het schip af doordat de snelheid

van het schip in mindering gebracht moet worden op de ware windsnelheid als het er om gaat te bepalen welke snelheid de wind heeft ten opzichte van het zeil: bij het berekenen van de lift (en weerstand) van het zeil speelt de relatieve snelheid tussen wind en (bewegend) zeil een rol.

Hiermee is het fenomeen **schijnbare wind** geïntroduceerd.

Dit is de vectoriële sommatie van de werkelijke windvector en de windvector die aangeeft welke wind het zeil zou ervaren als het in windstil weer met de snelheid van het schip voortbewogen zou worden.

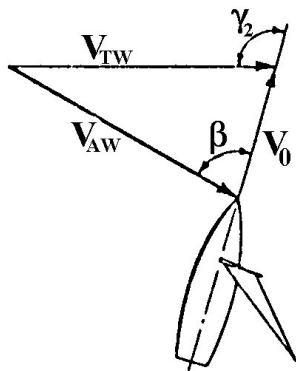
Deze laatste is daarom de negatieve versie van de sloopssnelheidsvector.

De som is de snelheid die het zeil ervaart.

Recht voor de wind varend is de schijnbare windsterkte dus kleiner dan de werkelijke windsnelheid. Zie de figuur.

Met schuin van voren inkomende wind wordt de schijnbare wind aanzienlijk groter dan de werkelijke windsnelheid, echter ook de invalshoek ten opzichte van hartschip wordt kleiner. Aangezien de lift kwadratisch toeneemt met de snelheid is er op deze koersen toch een aanzienlijk grotere liftkracht te verwachten.

Bij dwars inkomende wind worden deze verschillen kleiner.



schijnbare wind:

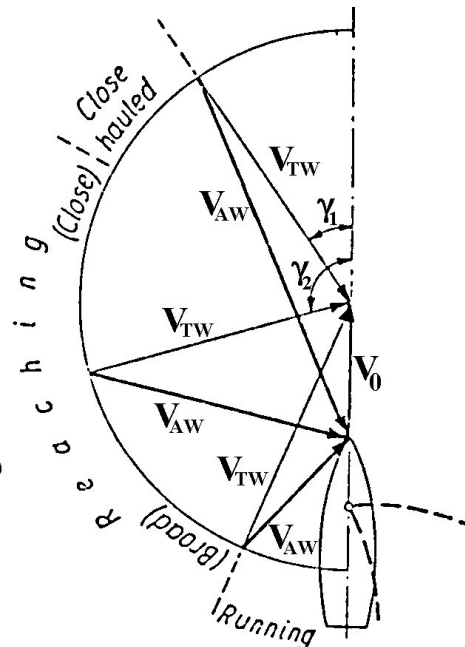
V_0 = voorwaardse snelheid schip

V_{TW} = ware windsnelheid

V_{AW} = schijnbare windsnelheid

γ = invalshoek ware wind

β = invalshoek schijnbare wind

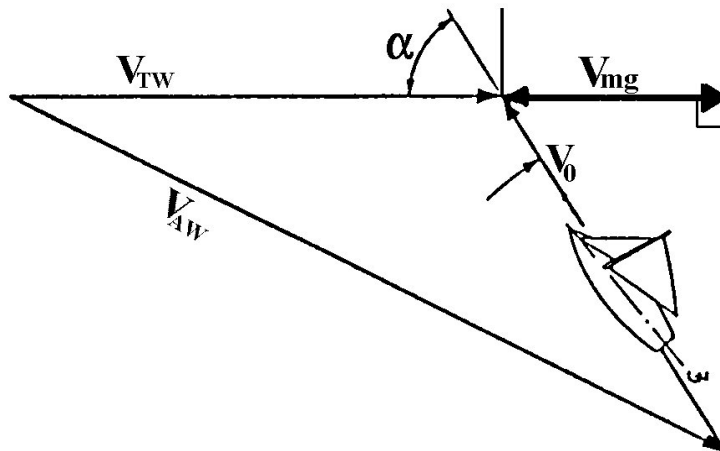


De tweede koers waarbij we het krachten spel zullen beschouwen is die waarbij het schip zoveel mogelijk recht tegen de wind invaart.

Uit wat eerder gezegd is over de minimaal mogelijke invalshoek van de zeilen valt op te maken dat recht tegen de wind in geen lift gegenereerd wordt door het zeil. Zou dit wel mogelijk zijn geweest dan is het evengoed niet mogelijk om een component van de liftkracht als stuwkracht te laten werken. Met het zeil midscheeps zou de lift uitsluitend dwarsscheeps werken en de onvermijdelijke weerstand zelfs in tegengestelde richting ten opzichte van de gewenste verplaatsingsrichting: er is dus een negatieve voortstuwende kracht.

Naarmate het schip een toenemende hoek gaat aannemen met de werkelijke wind ontstaat echter een component van de lift welke wel als stuwkracht gebruikt kan worden. Zo rond een invalshoek van 40 tot 45 graden blijkt in de praktijk een voldoende grote stuwkrachtcomponent opgewekt te worden om met succes vooruit te komen. De hoek met

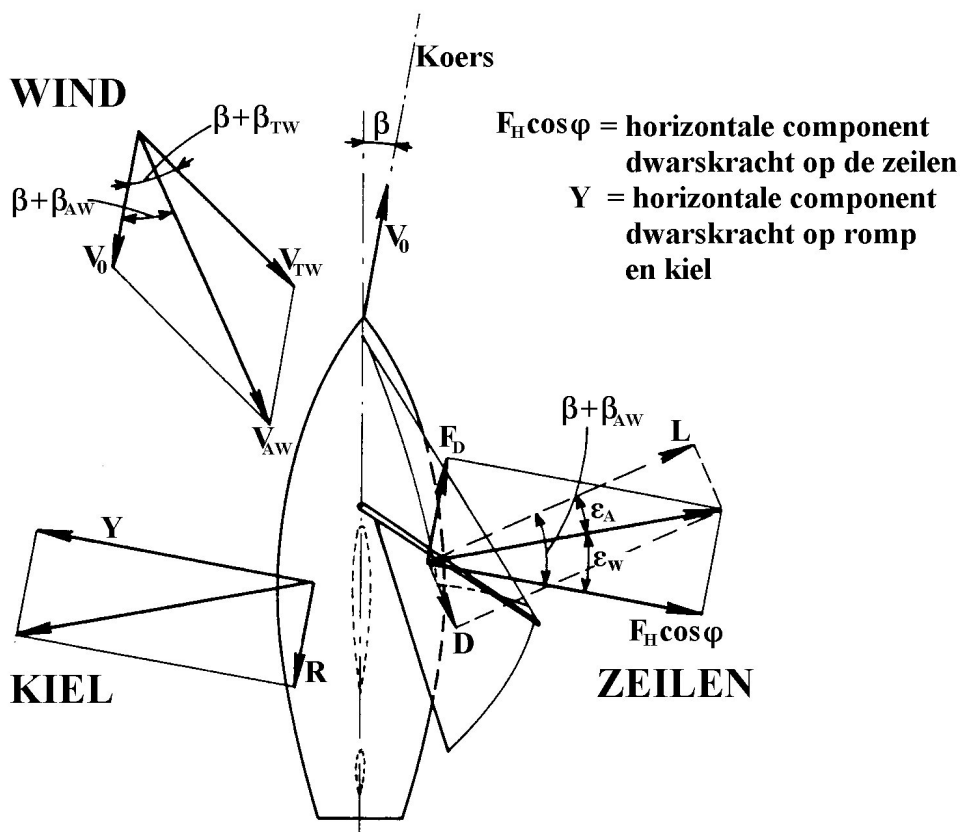
de werkelijke wind verkleinen betekent dat de snelheid afneemt en deze hoek vergroten betekent dat de projectie van de snelheid van het schip in de windrichting kleiner wordt ondanks het feit dat de snelheid toeneemt. Deze geprojecteerde snelheidsvector op de werkelijke windvector noemen we de Speed Made Good (V_{mg}), zie de figuur.



Dit is uiteindelijk de snelheid waarmee recht tegen de wind wordt ingevaren en is als zodanig een belangrijke maat voor de prestaties van het schip.

Beschouwen we nu het krachterevenwicht op het aan de wind varende schip, zoals deze bovengeschetste toestand genoemd wordt.

Evenwicht van waterkrachten en windkrachten



De figuur geeft de krachten in het horizontale vlak weer. Links de krachten op het onderwaterschip en rechts de krachten op de zeilen.

De schijnbare wind is samengesteld uit de werkelijke windvector en de tegengestelde vector van de scheepssnelheid. De schijnbare windsnelheid is in deze situatie groter van snelheid dan de werkelijke wind en de hoek die de schijnbare wind met de langsas van het schip maakt is kleiner.

Op het zeil werken onder invloed van deze schijnbare wind een lift- en een weerstandskracht, respectievelijk L en D in de figuur, welke zich door enige vectoriële manipulatie laten ontbinden in een component in de gewenste vaarrichting F_D en een component loodrecht daarop $F_H \cos \varphi$.

De component F_D is de stuwkracht van het zeil welke in staat is een zekere weerstand van het schip te overwinnen. Het schip vaart hierdoor vooruit.

De component $F_H \cos \varphi$ staat loodrecht op de vaarrichting van het schip en moet door het onderwaterschip efficiënt gecompenseerd worden wil vermeden worden dat het schip met grote snelheid dwars uit gaat.

Hiertoe dient de vleugel welke in langsscheepse richting onder het schip is geplaatst: de kiel.

Onder invloed van de dwarskracht gaat het schip met een zekere snelheid dwars uit. Deze kleine dwarsscheepse component levert vectoriëel gesommeerd op de voorwaartse snelheid van het schip een resulterende snelheid van het schip door het water op die een kleine hoek maakt met de langsas van het schip. Deze hoek noemt men de **drifthoek**. Doordat de snelheid van het water over de kiel hier precies omgekeerd aan is, ontwikkelt de kiel een grote dwarskracht aangezien zij nu onder een kleine hoek wordt aangestroomd, welke tegengesteld is aan de ontwikkelde dwarskracht op de zeilen. Tezelfdertijd wordt echter ook een niet onaanzienlijke weerstand ontwikkeld, zoals eerder verklaard.

In de evenwichtssituatie compenseert de dwarskracht op de kiel precies de dwarskracht op de zeilen.

Dit wordt gerealiseerd doordat de drifthoek bij gegeven snelheid net zo lang toeneemt totdat evenwicht is bereikt, dan pas heeft de dwarsscheepse snelheid een constante waarde bereikt.

De drifthoek moet zo klein mogelijk gehouden worden omdat zij een negatieve invloed heeft op de speed-made-good van het schip.

De weerstand, zijnde de som van vorm-, wrijvings- en geïnduceerde weerstand moet hierbij zo klein mogelijk gehouden worden door een zo gunstig mogelijke vormgeving van de kiel.

Aangezien:
$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A \frac{dC_L}{d\alpha} \alpha$$

en
$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D$$

met
$$\frac{dC_L}{d\alpha} = \frac{0.1AR}{1.8 + \cos \Lambda \sqrt{\frac{AR^2}{\cos^4 \Lambda} + 4}}$$

en

$$C_D = C_{D_0} + C_{D_i} = C_{D_0} + \frac{C_L^2}{\pi AR}$$

waarin:

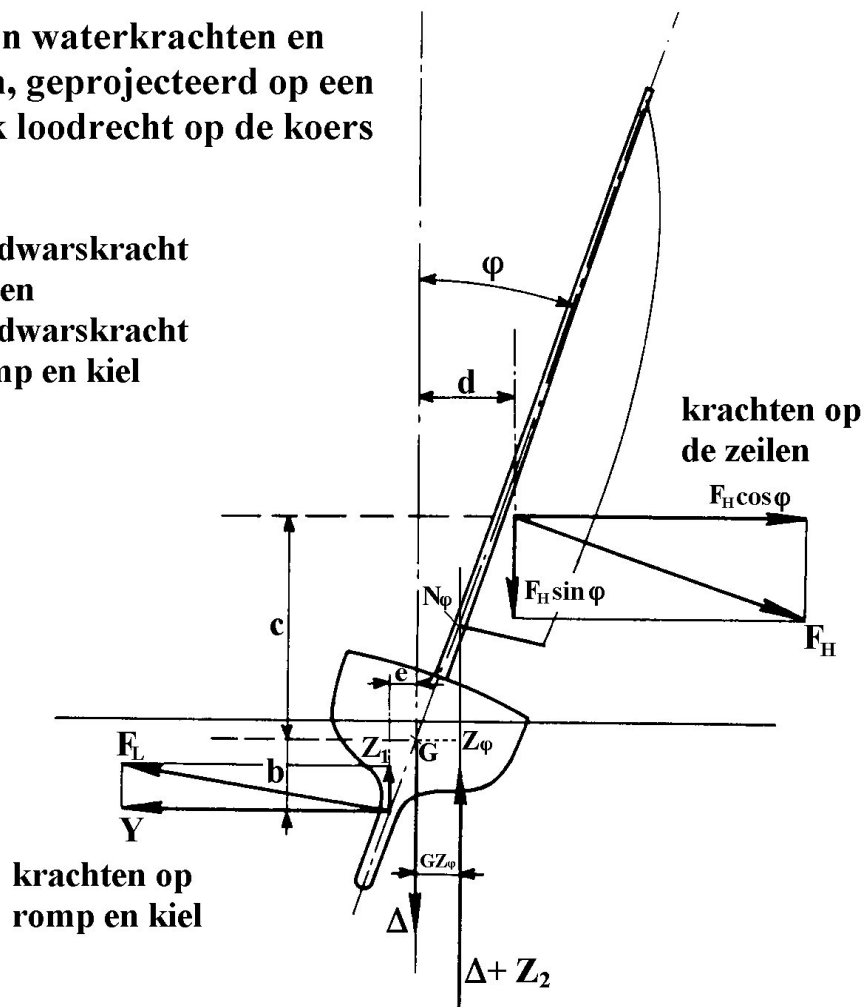
- ρ = soortelijke massa (kg/m³)
- A = oppervlakte (m²)
- AR = aspectverhouding
- V = snelheid (m/s)
- α = invalshoek (rad.)
- Λ = pijlstelling van de kiel graden
- C_{D_0} = vormweerstandscoefficiënt
- C_{D_i} = geïnduceerde weerstandscoefficiënt.

Hieruit blijkt duidelijk dat een grote aspectverhouding een gunstige invloed heeft op zowel de gegenereerde lift als op de geïnduceerde weerstand. Daarom kiest men het liefst voor diepstekende slanke kielen. Diepgangsbependingen in verband met de waterdiepte stellen hier echter meestal een grens, zodat in vele gevallen naar een compromis gezocht moet worden.

De dwarskracht op de zeilen heeft nog een consequentie. Bezien we daartoe het krachtenevenwicht in het verticale vlak. Dit staat weergegeven in de onderstaande figuur.

Evenwicht van waterkrachten en windkrachten, geprojecteerd op een verticaal vlak loodrecht op de koers

F_H = totale dwarskracht op zeilen
 F_L = totale dwarskracht op romp en kiel



$$Y = F_H \cos \varphi$$

$$Z_1 + Z_2 = F_H \sin \varphi$$

$$GZ_\varphi (\Delta + Z_2) = b * Y + c * F_H \cos \varphi + d * F_H \sin \varphi + e * Z_1 \quad 0.33$$

De dwarskracht op het zeil en op de kiel vormen samen een koppel, welke het schip wil doen kenteren. Dit hellende moment moet gecompenseerd worden door het stabiliteitsmoment van het schip. Het schip zal een helling aannemen.

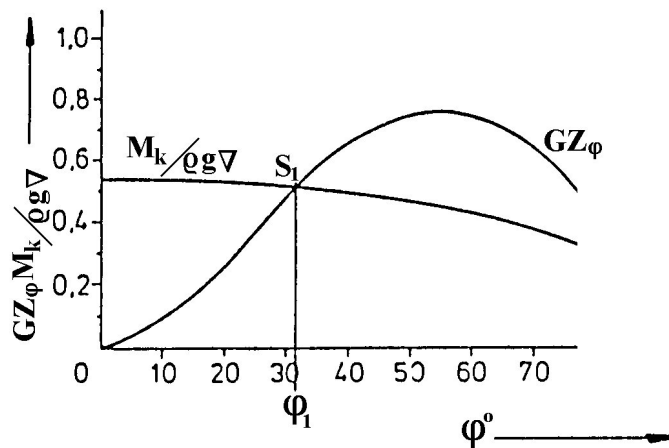
Hierdoor neemt de horizontale component van de liftkracht in de langsrichting van het schip (de voortstuwende kracht) af.

Dit gaat ongeveer evenredig met de cosinus van de hellingshoek. Helling verkleint dus de voortstuwing. Daarenboven neemt de weerstand van de romp door de helling toe. Over het geheel genomen zal helling dus een verlaging van de uiteindelijk te behalen snelheid bewerkstelligen bij overigens gelijkblijvende omstandigheden.

Bij toenemende helling neemt het stabiliteitsmoment van het schip toe (voordat het maximum bij circa 60 graden bereikt wordt). Het hellende moment ten gevolge van de dwarskracht op zeilen en kiel neemt bij toenemende helling af, aangezien het aan de wind blootgestelde oppervlak afneemt.

Evenwicht wordt gevonden bij die hellingshoek waarbij het hellende en het herstellende moment aan elkaar gelijk zijn.

Voorwaarde voor het behalen van een goede snelheid is echter wel dat de hellingshoek zeker niet groter mag worden dan 30 graden.



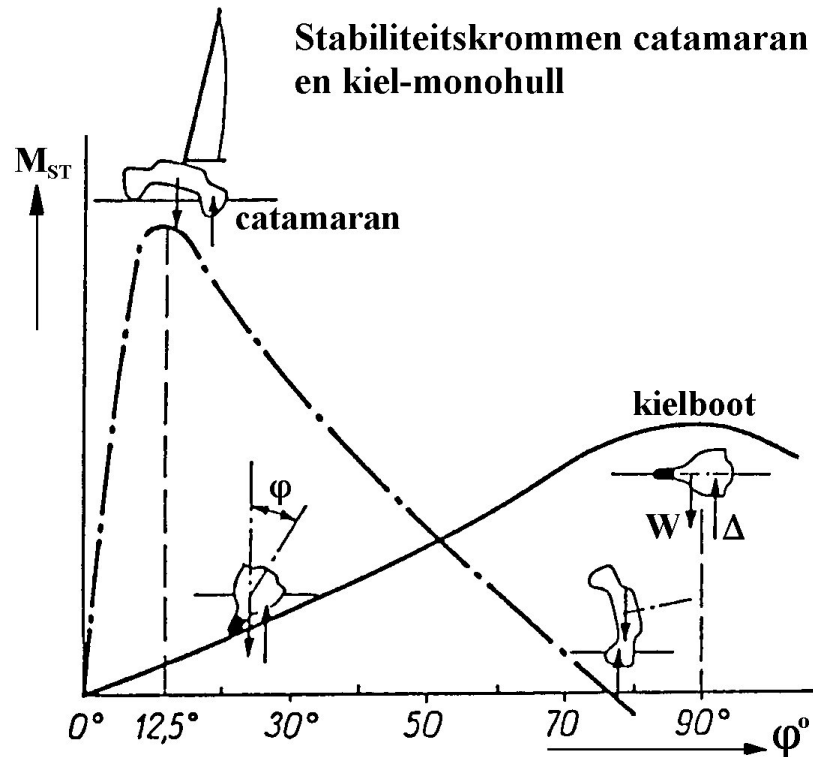
Essentieel voor de maximaal toelaatbare dwarskracht (en dus voor de stuwkracht!!) is dat de stabiliteit van het schip zo groot mogelijk is. Niet alleen is het mogelijk hierdoor een grotere stuwkracht te genereren maar ook de weerstandstoename ten gevolge van de helling van het schip wordt zo klein mogelijk gehouden.

Hiertoe wordt de kiel welke onder aan het schip hangt meestal dan ook massief uitgevoerd in gietijzer of lood en bedraagt het gewicht van de kiel veelal de helft van het totale gewicht van het schip. Hierdoor tracht men een zo laag mogelijke ligging van het zwaartepunt te realiseren. Ook hier is een diepstekende kiel in het voordeel.

Nadeel van de hier geschetste methode van stabiliteitsvergroting is dat het totaal gewicht van het schip aanzienlijk vergroot wordt. Hierdoor neemt tevens de weerstand van het schip aanzienlijk toe. Alternatieve methoden om tot een zeer grote stabiliteit bij relatief kleine hellingshoeken te komen worden gevonden in de zogenaamde meerrompschepen. Hier wordt het zeer grote stabiliteitsmoment gerealiseerd door een zeer grote verschuiving van het drukingspunt ten gevolge van de helling en niet door een vergroting van het displacement.

Zie hiervoor de figuur.

Stabiliteitskrommen catamaran en kiel-monohull



Hierin staat de stabiliteitskromme van een catamaran vergeleken met die van een enkelrompsschip. Het verschil in karakter is evident: een catamaran levert bij kleine hellingshoeken een veel groter stabiliteitsmoment waardoor een veel grotere kracht op het zeil "verwerkt" kan worden. De voortstuwende kracht kan dan ook veel groter zijn.

Bij elke willekeurige invalshoek van de wind ten opzichte van de langsas van het schip kan nu die stand van het zeil gevonden worden waarbij de stuwkracht van het zeil zo groot mogelijk is.

In het geval van een invalshoek kleiner dan 90 graden zal met voordeel gebruik gemaakt worden van de lift van het zeil.

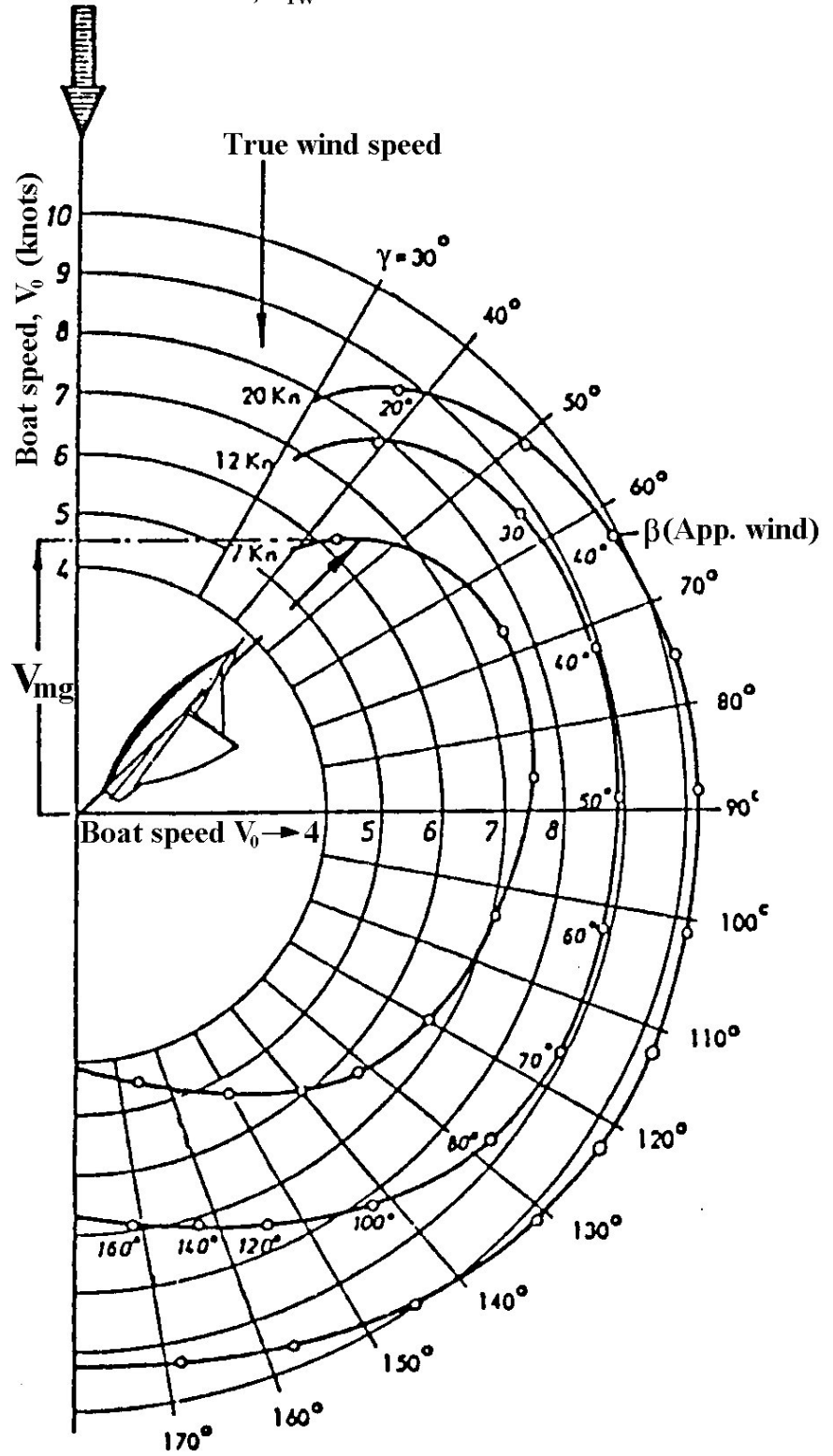
Bij grotere invalshoeken steeds meer van de weerstand van het zeil.

Door de voortstuwende kracht van de zeilen gegeven de windsnelheid en invalshoek te berekenen is de snelheid van het schip te bepalen waarbij evenwicht gemaakt wordt met de weerstandskrachten.

Door dit voor een groot aantal invalshoeken en windsnelheden te doen, kan een zogenaamd snelheidspolaire van het beschouwde schip geconstrueerd worden, waarin de te behalen snelheid als functie van de invalshoek gegeven wordt.

Een voorbeeld daarvan vindt U hier onder.

Direction of true wind, V_{TW}



**Polair snelheids-
diagram van een
zeiljacht**