Cw-kromme

Roelf Pot, februari 2015

Roeisloepwedstrijden worden beslist door te berekenen hoeveel vermogen de roeiers nodig hadden om de gehaalde gemiddelde roeisnelheid te halen.

Om dat vermogen (P) te berekenen worden drie gegevens gebruikt: de gemiddelde vaarsnelheid in de wedstrijd (v), de (water-)weerstand bij die vaarsnelheid (Cw) en het aantal roeiers in de sloep (n):

$$P = v^3 * Cw \ / \ n$$

Zie voor meer hierover de tekst over uitslagberekeningen; deze tekst gaat over de weerstand (Cw).

Weerstands-kromme

De weerstand in het water is snelheidsafhankelijk, bij toenemende snelheid ondervindt de sloep steeds meer weerstand. Het verband tussen de snelheid en de weerstand is complex en laat zich in theorie pas redelijk goed beschrijven met een erg ingewikkelde wiskundige functie (hierna 'echte' kromme genoemd). In de praktijk volstaat echter een benadering met een hyperbool-functie, zolang deze functie wordt toegepast op het snelheidstraject waarmee daadwerkelijk wordt geroeid.

$$Cw = A/(1- (v/ B)^2)$$

waarbij: v is snelheid, A en B zijn sloep-specifieke constanten.

De waarden A en B zijn voor elke sloep in het sloepregister vastgelegd, evenals een 'standaard' waarde voor Cw. Dat is de waarde die geldt voor de, eveneens vermelde, roeisnelheid waarbij de A en B-waarden zijn vastgesteld in de sleepproef. De sleepproef is uitgevoerd met deze roeisnelheid en met 10% sneller en langzamer; de Cw-kromme is alleen geldig in dit snelheidstraject.

De weerstand die een sloep in het water ondervindt wordt door een aantal factoren veroorzaakt. De belangrijkste daarvan zijn:

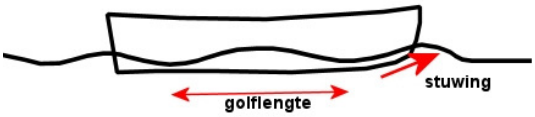
- Frictie of waterverplaatsing
- Boeggolf
- Wandruwheid
- Golfslag
- Wind

Alleen de weerstand door frictie en de boeggolf worden in de Cw-kromme verwerkt. Wandruwheid wordt zo laag mogelijk gemaakt en golfslag en wind wordt buiten beschouwing gelaten.

Frictie

Frictie is de belangrijkste weerstandscomponent bij lagere snelheid. Dit ontstaat doordat de sloep bij beweging water verplaatst. Naarmate een sloep zwaarder is, is de waterverplaatsing groter en daarmee ook de weerstand. Ook de dichtheid van het water (zout water heeft een hogere dichtheid dan zoet water) en de temperatuur (water heeft zijn hoogste dichtheid bij 4 °C) heeft een kleine invloed op de weerstand die frictie oproept. Verder speelt de vorm van de boot ook nog een rol: een boot met een scherpe boeg snijdt door het water en geeft daardoor minder frictie omdat er minder energie nodig is om het water te verplaatsen.
De weerstandstoename door frictie bij een hogere snelheid is kwadratisch: een verdubbeling van de snelheid geeft vier keer zoveel frictieweerstand.

Golfweerstand



De boeggolf is een staande golf langs de romp die ontstaat tijdens het varen doordat de boot vooral water naar voren duwt. Er ontstaat daardoor een stuwing voor de boeg en een dal iets verder naar achteren. Daarna komt weer een top en daarachter weer een dal, etc. Wanneer zich precies bij de achterkant van de boot een dal bevindt, vaart de boot dus voortdurend tegen een hoogteverschil op. Dat geeft veel weerstand. De weerstand is het laagst als er zich precies bij de achterkant van de boot een top bevindt. De mate van weerstand wordt daarnaast beinvloed door de scherpte van de boeg; als een boeg door het water snijdt wordt de boeggolf minder hoog en daardoor wordt ook de weerstand minder.
De golflengte loopt op met de snelheid. De snelheid waarbij er precies één golf langs de boot loopt wordt *rompsnelheid* genoemd. Dus des te langer een boot des te hoger is de rompsnelheid. De rompsnelheid is te berekenen uit de lengte van de sloep op de waterlijn:

$v_r = 1{,}25 * \sqrt{}$ (lengte)

Bij de rompsnelheid is de weerstand ten gevolge van de boeggolf dus relatief gering. De weerstand loopt voorbij de rompsnelheid echter erg snel op tot deze maximaal is bij 2x de rompsnelheid omdat er dan een dal precies bij de achtersteven ligt en dus het hoogteverschil voor en achter het grootst is. Als de boot nog sneller gaat varen is dat alleen mogelijk als deze 'over de boeggolf heen klimt', dat heet planeren.

De gangbare snelheid bij een roeisloep ligt ruim onder de rompsnelheid. Sloepen die zowel slanke als licht zijn roeien bij ongeveer 75-85 % van de rompsnelheid, sloepen die zowel plomp als zwaar zijn roeien bij ongeveer 55-65% van de rompsnelheid.

Wandruwheid

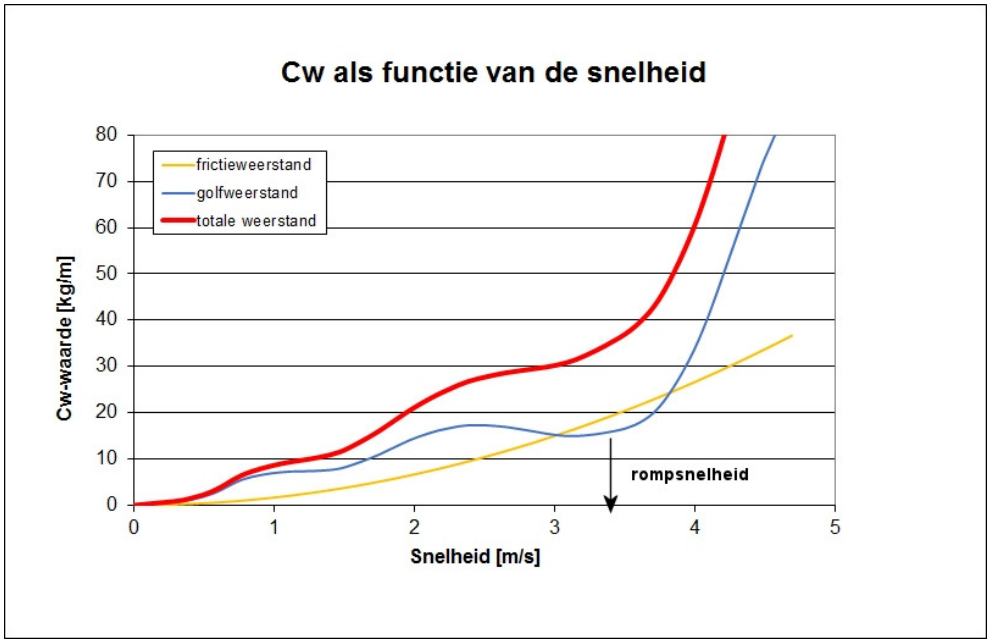
Wandruwheid is de mate waarin het water 'kleeft' aan de romp. Een zeer gladde romp laat water gemakkelijk langs lopen, een zeer ruwe wand staat dat minder toe. Dat zorgt ervoor dan een laag water rond de boot zich gedraagt alsof het onderdeel van de romp is en dus ook water verplaatst. Dit kan wel enige procenten extra 'frictie' geven. Er circuleren spectaculaire percentages, maar die hebben meestal betrekking op grote schepen met aangroei tot wel dan 10 cm dik die bovendien met hoge snelheid varen en daardoor sowieso al een hoge frictie hebben, terwijl de golfweerstand geminimaliseerd is door slimme ontwerpen van de boeg.

Golfslag en windweerstand

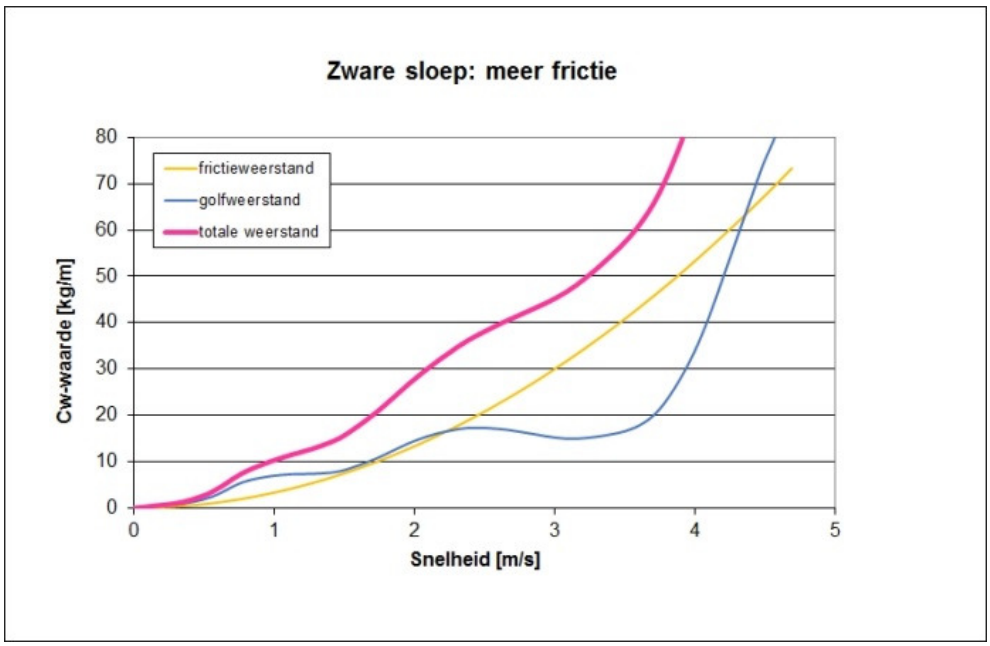
Golfslag is niet onbelangrijk maar is zó onvoorspelbaar dat daarmee in de praktijk geen rekening kan worden gehouden, net als weerstand door eventuele wind. Het is wel de soort weerstand waar je met de roeitechniek op kunt inspelen, maar sommige sloepen hebben door hun vorm onmiskenbaar meer hinder van golfslag dan andere en hebben daar nadeel van bij een wedstijd met veel wind.
Dat laatste geld ook voor weerstand door harde wind zelf. Grotere sloepen hebben daar meer last van, en een stuurman kan de weerstand beïnvloeden door hoog of laag te gaan zitten. Sloepen met een scherpe kiel kunnen voorts last hebben van schuine dwarswind als ze daardoor scheef worden gezet; er ontstaat daardoor werveling rond de kiel die veel weerstand oplevert.

Totale weerstand

In de Cw-kromme wordt alleen weerstand door frictie en boeggolf beschreven. De andere factoren worden tijdens de sleepproef geminimaliseerd (wandruwheid, golfslag) of weg-berekend (wind). Sloepen die op 2/3 van de rompsnelheid roeien hebben dus een dal bij de achtersteven. Bij toenemende snelheid kan de golfweerstand daardoor afnemen, waardoor de totale weerstand nauwelijks verandert (de frictie blijft wel stijgen). De Cw-kromme tussen 67 en 80% van de rompsnelheid is daardoor relatief vlak. Sloepen die met een lagere snelheid dan 2/3 van de rompsnelheid varen ondervinden juist een stijgende golfweerstand omdat het waterhoogteverschil voor en achter de boot stijgt.

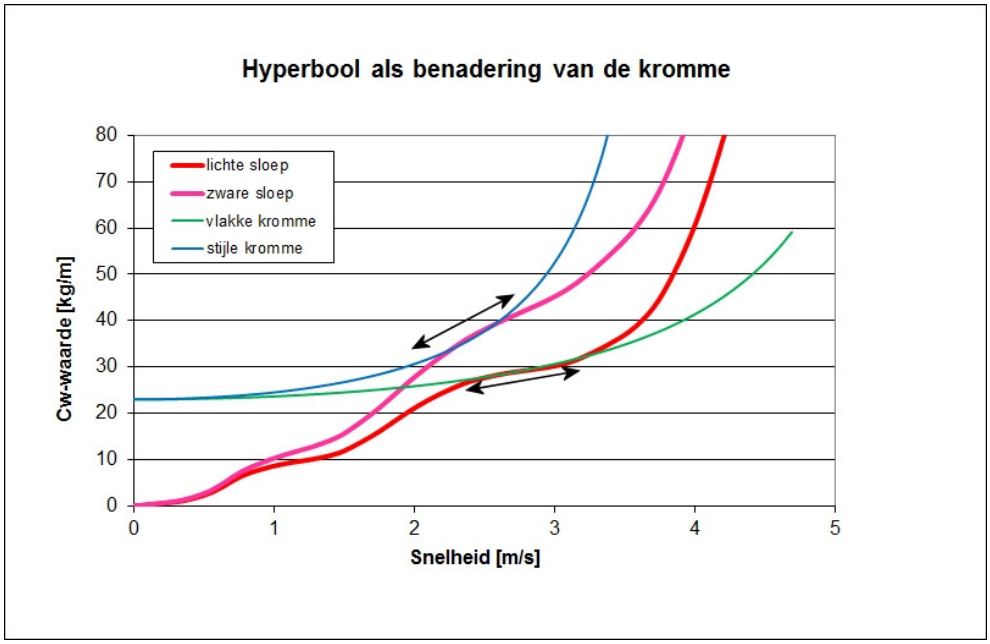


Bij een zwaardere sloep is de frictie groter terwijl de golfweerstand niet per sé hoger hoeft te zijn (als de rompvorm vergelijkbaar is). Daardoor wordt de totale kromme minder vlak.



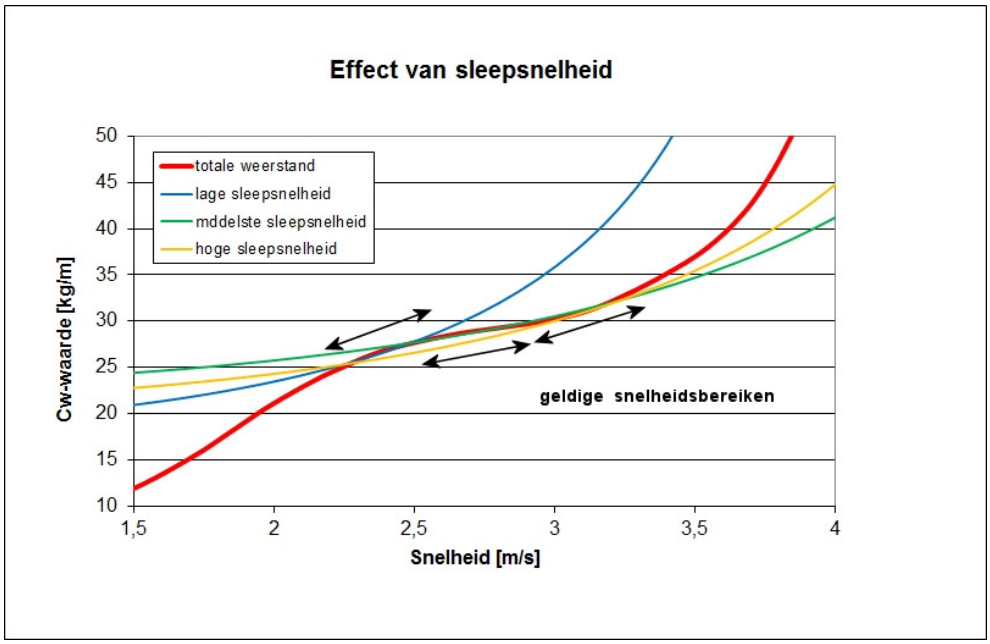
Hyperbool als beste benadering

De totale Cw-kromme is niet goed in een formule te beschrijven. We zijn echter alleen geïnteresseerd in het deel in de buurt van de snelheid waarmee ook echt wordt geroeid. Om dat deel te beschrijven volstaat een hyperbool . In de figuur zijn voor beide eerder genoemde krommen de best passende hyperbolen getekend bij de snelheid waarmee wordt geroeid (pijlen).



Vanzelfsprekend is het geldigheidbereik van zo'n hyperbool beperkt. Omdat de hyperbool wordt berekend met metingen rond de verwachte roeisnelheid, 10% langzamer en 10% sneller is de hyperbool betrouwbaar bij snelheden tussen 85% en 115% van die middelste snelheid. In dat bereik wijkt de snelheid nooit meer dan 5% af van een snelheid waarbij de weerstand daadwerkelijk gemeten is.

Effect van verkeerde snelheid kiezen

Wanneer er wordt geroeid bij een snelheid die te sterk afwijkt van het geldigheidbereik van de hyperbool, dan gaat de berekende weerstand afwijken van de ondervonden weerstand. Dat zou tot een verkeerde berekening van het geleverde vermogen leiden. In welke richting die afwijking optreedt is afhankelijk van de verhouding tot de rompsnelheid en of er sneller of langzamer wordt geroeid.
Een sloep met een relatief hoge sleepsnelheid ten opzicht van de rompsnelheid (gele lijn) heeft buiten het geldige bereik altijd een hogere weerstand dan de hyperbool aangeeft en wordt daardoor benadeeld, zowel bij sneller als bij langzamer varen (gele lijn ligt dan onder de rode: de berekende weerstand is kleiner dan de echte)
Een sloep die bij gemiddelde snelheid t.o.v. de rompsnelheid is gesleept wordt ook benadeeld bij een te hoge snelheid, maar wordt bevoordeeld bij een te lage snelheid. Sloepen die erg langzaam zijn gesleept worden ook bij een te hoge snelheid ten onrechte bevoordeeld.
Om die laatste reden is het erg onwenselijk om een sloep op een snelheid te slepen waarvoor minder dan 60-70 Watt nodig is, terwijl ze in een wedstrijd een snelheid varen die (ruim) meer dan 10% hoger ligt, waarvoor meer dan 100 Watt nodig is. De echte kromme vlakt bij die te hoge snelheid dan af, terwijl de hyperbool juist steeds sneller gaat stijgen (blauwe lijn). Het berekende vermogen

wordt dan veel hoger dan wat echt geleverd was. Dit effect treedt vooral op bij lichte, slanke sloepen die te langzaam zijn gesleept.