

1 Statische stabiliteit

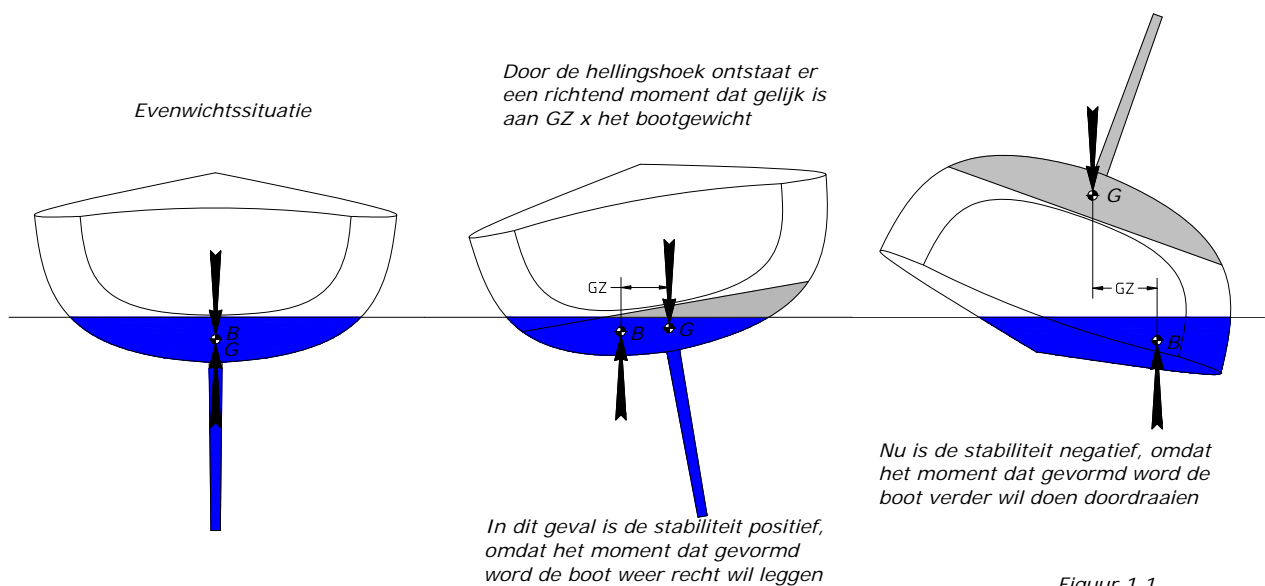
Wat is statische stabiliteit eigenlijk? Als zeilers nemen we het woord graag in de mond en waarschijnlijk weten we ook wel waar het ongeveer over gaat, maar wat is het nu eigenlijk precies en wat voor gevolgen hebben verschillende aanpassingen op de boot?

Statische stabiliteit is kort samen te vatten als: de karaktereigenschappen van een boot gedurende een dwarsscheepse draaibeweging van 180 graden zonder dat er golfslag is, ofwel hoeveel weerstand wekt een boot op tegen omduwen?

Er zijn twee factoren die daar invloed op hebben, de eerste is de opdrijvende kracht van het water en de tweede is de zwaartekracht, die op de boot werkt. De wet van Archimedes (een wiskundige die leefde omstreeks 250 jaar voor Christus en die veel onderzoek heeft gedaan naar drijvende objecten) stelt dat een schip net zo diep inzinkt tot dat het gewicht van het verplaatste water gelijk is aan het gewicht van de boot. Dat betekent dus dat als we gewicht toevoegen dat de boot dieper zal inzinken zodat het gewicht van het verplaatste water weer gelijk is aan het toegenomen bootgewicht. Simpele wiskunde die iedereen van nature kent en begrijpt.

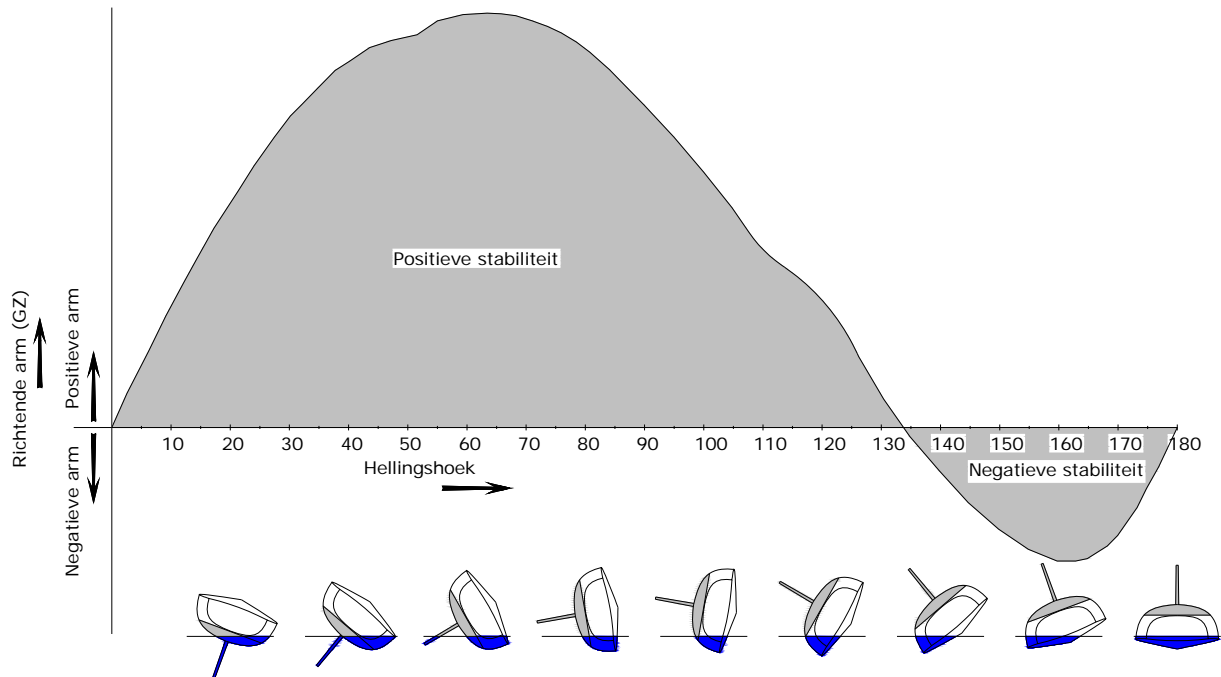
Bij statische stabiliteit spreken we over de eigenschappen van de boot wanneer we deze gecontroleerd scheef trekken in vlak water, bijvoorbeeld in de haven.

Het gewichtszwaartepunt van een boot in ruste zal zich in een verticale positie ten opzichte van het zwaartepunt van het verplaatste water willen positioneren. (zie *figuur 1.1*)



Door het geven van een hellingshoek aan de boot creëren we een richtend moment, dit komt omdat de vorm van het verplaatste watervolume veranderd. Zoals in *figuur 1.1* getekend komt er aan BB waterverplaatsing bij terwijl er aan de SB kant de zelfde hoeveelheid waterverplaatsing af gaat. Gevolg hiervan is dat het zwaartepunt van het verplaatste watervolume veranderd ten opzichte van de boot en dat er zodoende een moment ontstaat. De algemene definitie van een moment is een samenwerking tussen een kracht en een afstand, in ons geval is de kracht het gewicht van de boot (zwaartekracht) en de arm (GZ) is de horizontale afstand tussen het drukkingspunt (B) en het gewichtszwaartepunt van de boot (G). Als we geen helling hebben is er geen horizontale afstand tussen B en G, dat betekent dat er geen richtend moment is en dat de boot in ruste is.

In *figuur 1.2* zien we een voorbeeld van het verloop van GZ als we de boot 180 graden zouden ronddraaien. Bij de boot die we in dit voorbeeld zien verandert de stabiliteit van positief naar negatief bij een hellingshoek van ongeveer 133 graden. Dit komt omdat de arm die het moment veroorzaakt negatief wordt, ofwel de boot wordt stabiel op zijn kop. In *figuur 1.1*, in het rechter tekeningetje is te zien hoe dat komt. De hellingshoek waarbij de stabiliteit negatief wordt, wordt de kenterhoek genoemd.



Figuur 1.2

Als we *figuur 1.2* nader gaan bekijken dan zien we een aantal leuke details, ik heb hier als voorbeeld de GZ curve van een 50 voeter genomen met slechts een kleine opbouw en een grote bulb aan het einde van een diepe vinkiel. Het eerste detail in de grafiek dat we zien is wanneer de bulb uit het water getild wordt, dat gebeurt bij ongeveer 45 tot 50 graden helling. Dat is te zien door het “deukje” dat in de grafiek zichtbaar is bij deze hellingshoek.

Misschien klinkt het een beetje raar, maar een ballast bulb heeft ook opdrijvend vermogen als ze onderwater gedompeld is. De wet van Archimedes zegt namelijk dat de opdrijvende kracht van een voorwerp gelijk is aan de massa van het verplaatste water. Stel nu dat we spreken over een bulb van 3 ton die gemaakt is van lood (de soortelijke massa van lood is 11.35 ton/m^3) het volume van de bulb is dan $3/11.35 = 0.264 \text{ m}^3$ ofwel 264 l. en 264 l. zeewater weegt 271 kg. Het opdrijvende vermogen is dus 271 kg. Stel dat de bulb geen gewicht had, dan wil het water de bulb omhoog drukken met een kracht van 271 kg. Dit betekent dat deze bulb onderwater 271 kg minder weegt dan wanneer deze bovenwater is, bij een hellingshoek van 45 tot 50 graden komt de bulb boven water en wordt daar relatief zwaarder en de boot zodoende een beetje stabiel.

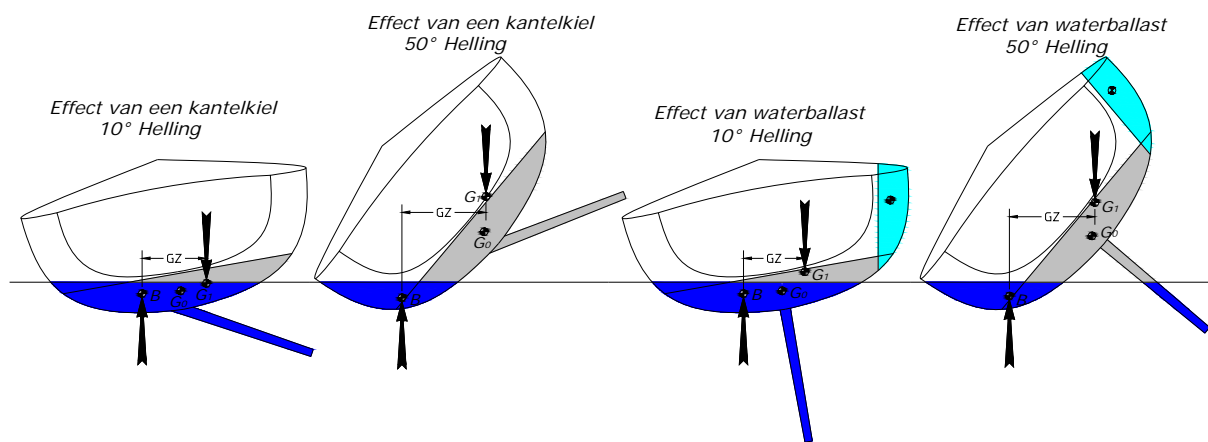
Het tweede goed zichtbare detail is de kajuitopbouw die onderwater verdwijnt. Bij een hoek van ongeveer 110 graden wordt de opbouw in het water gedrukt en krijgt volgens Archimedes dus ook een opdrijvende kracht. Deze opdrijvende kracht geeft de boot meer weerstand tegen door draaien, het volume van de opbouw levert dus een positieve bijdrage aan de statische stabiliteit bij extreem grote hellinghoeken.

Factoren die van invloed zijn op statische stabiliteit

Zoals eerder vastgesteld is statische stabiliteit niet meer dan de karakteristieken van een boot in vlakwater uitgedrukt in een richtend moment. Duidelijk moge zijn dat het stabiliteitstechnisch gezien goed is om een zo groot mogelijk positief richtend moment te hebben en een zo klein mogelijk negatief richtend moment. Er zijn twee basis principes om een moment te vergroten, de eerste is de arm groter maken, de andere is de kracht groter maken. Echter zodra je iets veranderd aan een boot heeft dat vele gevolgen voor de rest van het geheel, en die gevolgen zijn lang niet altijd positief.

Het vergroten van de positieve stabiliteitsarm kan op een aantal verschillende manieren:

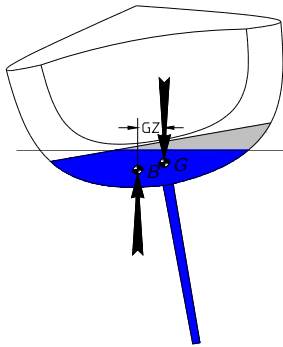
- 1) Gewichtszwaartepunt omlaag brengen
- 2) Massa die zich aanboord bevindt naar loef brengen (bijv. bemanning op de rand of een kantelkiel)
- 3) Massa aan loef toevoegen (bijv. waterballast)
- 4) Drukkingspunt van de watermassa veranderen



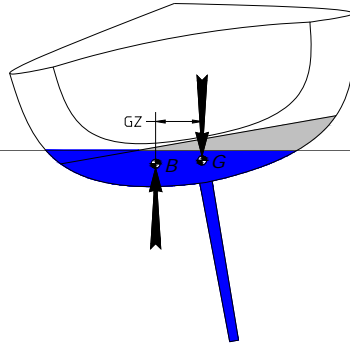
Figuur 1.3

Zoals zichtbaar is in *figuur 1.3* gaat zowel bij de zwenkkiel als bij de waterballast situatie het gewichtszwaartepunt van de boot niet alleen opzij, maar ook omhoog. Als de helling (bij deze voorbeelden) boven de 50 graden komt dan komt het zwaartepunt van de ballast in verticale lijn te liggen met het zwaartepunt van de boot als geheel, zodra dit gebeurt dan draagt de ballast niet meer bij aan de stabiliteit. Als het zwaartepunt van de ballast zelfs nog meer richting hartschip verschuift, dan werken deze stabiliteitsverhogende factoren juist tegen. De situatie van 50 graden helling of meer zal niet vaak voorkomen in de dagelijkse praktijk, maar met een dwars inkomende golf met windje 6 op de Noordzee kan het wel voorkomen, de gevolgen zijn niet rampzalig, maar hebben wel degelijk een belangrijke invloed. Overigens, hoe breder de boot, hoe kleiner deze invloed is. Bij de meeste zeegaande jachten ligt het gewichtszwaartepunt van de boot ongeveer ter hoogte van de waterlijn of iets daar onder. Bij sommige, extreem smalle boten, komt het voor dat het gewichtszwaartepunt zo extreem laag ligt dat waterballast zelfs averechts werkt als de hellingshoek groter is dan 15 graden. Dat zwaartepunt moet dan zo laag liggen om een arm te creëren die groot genoeg is om voldoende oprichtend vermogen te verkrijgen.

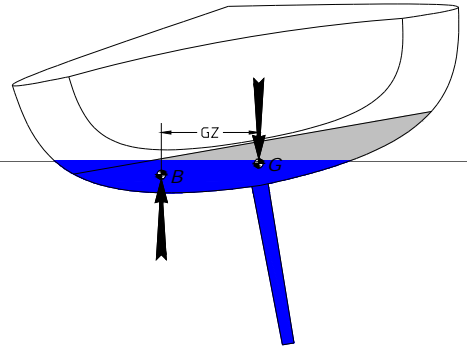
Effect van waterlijn breedte
Smal



Effect van waterlijn breedte
Gemiddeld



Effect van waterlijn breedte
breed



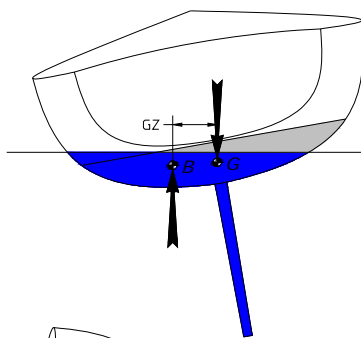
Figuur 1.4

Een andere methode om de stabiliteit te vergroten is het drukingspunt van het water verder naar buiten brengen. In *figuur 1.4* is het effect van (waterlijn) breedte te zien. Zoals goed zichtbaar in de tekening is de richtende arm van de brede boot veel groter dan van de smalle boot. Als we uit gaan van een gelijk gewicht van beide boten dan heeft de brede boot dus een veel grotere stabiliteit bij de zelfde hellingshoek. De invloed van de breedte heeft echter ook een grote invloed op de negatieve stabiliteit. Dat betekent dat als de boot eenmaal ondersteboven ligt, dat deze ook veel moeilijker weer overeind zal kunnen komen. Omgekeerd geldt dat natuurlijk ook voor de smalle boot, deze draait makkelijker door, maar komt daarentegen ook veel makkelijker overeind dan zijn bredere zusje.

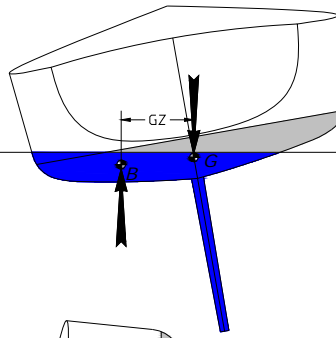
De vorm van de romp heeft ook een belangrijke invloed op de plaats van het drukingspunt.

Het effect van rompvorm op de plaats van het drukingspunt

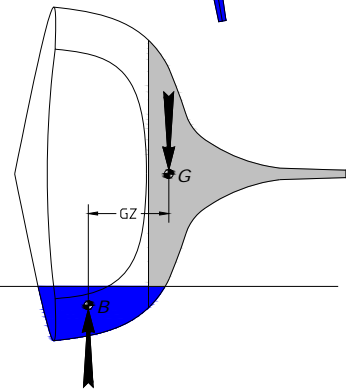
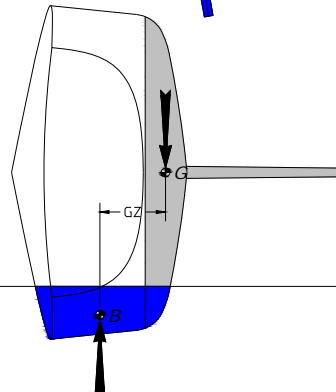
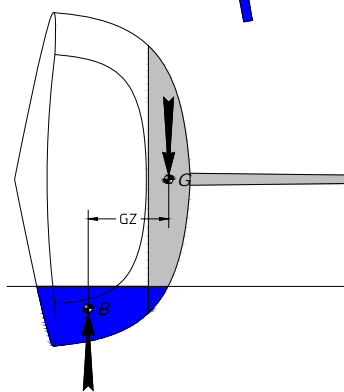
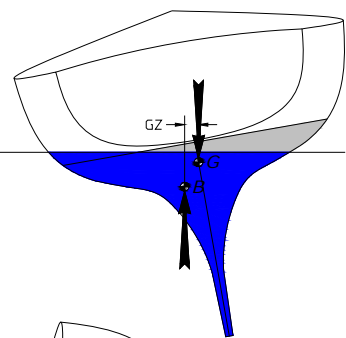
Gemiddelde vorm



Scherpe kinnen



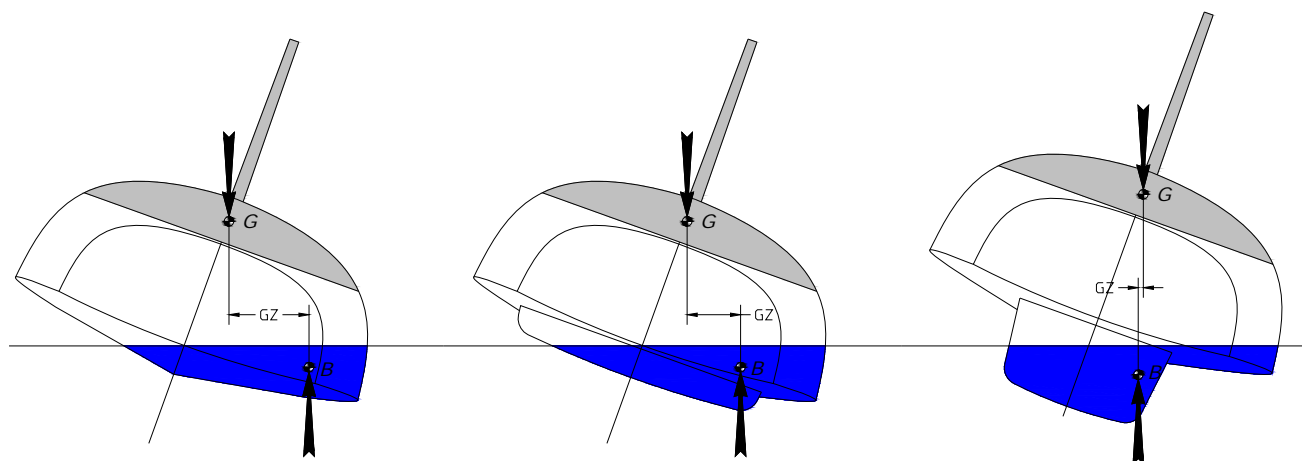
Klassieke S-spant



Figuur 1.5

In *figuur 1.5* zien we 3 verschillende rompvormen bij 10 graden helling, links een gemiddelde boot, in het midden een boot met scherpe kimmen en links een klassieke S-spant. De meest stabiele boot is bij deze helling de boot in het midden met de scherpe spant vorm, de minst stabiele is de S-spant. In de onderste rij zien we dezelfde schepen, maar dan met een helling van 90 graden. Nu blijkt dat de meest stabiele boot bij 10 graden helling de minst stabiele is bij 90 graden helling, de S-spant en de gemiddelde vorm scoren hier gelijk. Een goede stabiliteit kan dus minder goed eindigen en omgekeerd. Om de veiligheid van een boot te kunnen benoemen is het dus belangrijk om de volledige rij aan karaktereigenschappen te bekijken.

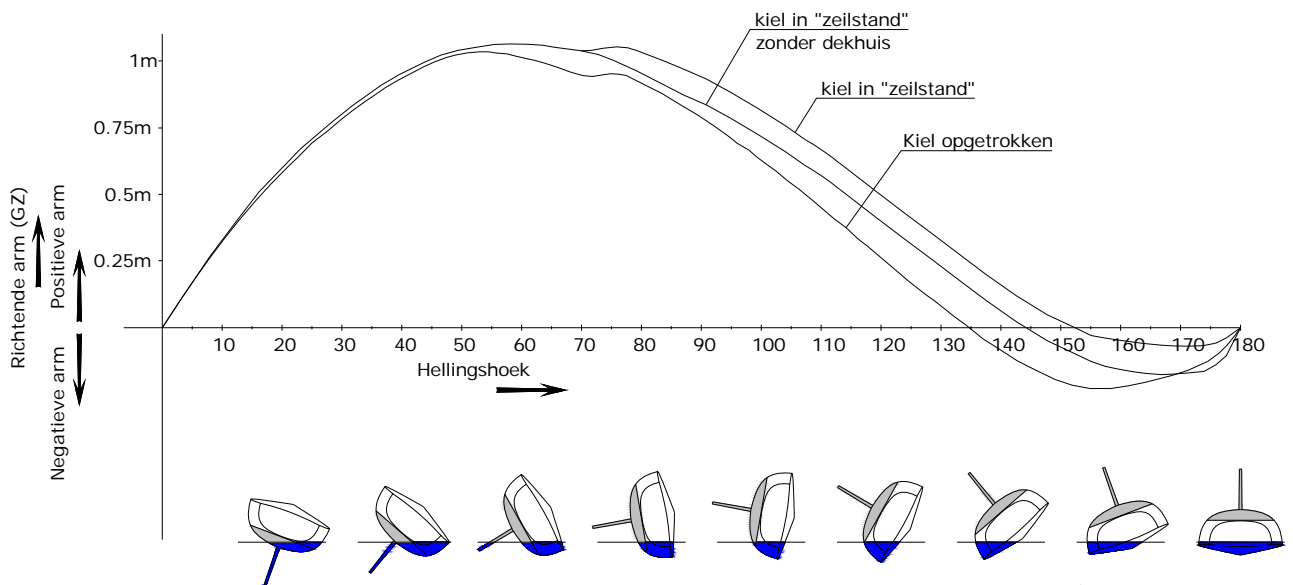
Als de boot eenmaal onderste boven ligt, dan is de vorm en afmeting van de opbouw van grote invloed op de positie van het opdrijvende punt van de boot.



Figuur 1.6

Bovenstaande tekening geeft aan hoe dat kan, de boot meest links heeft helemaal geen opbouw waardoor de positie van de opdrijvende kracht vrij ver naar buiten ligt, dit resulteert in een grote GZ waarde. De boot in het midden heeft een brede en niet zo hoge opbouw, de opdrijvende kracht verschuift hierdoor meer naar het midden van de boot, de GZ waarde wordt dus kleiner. De boot rechts heeft een opbouw die net zo veel volume heeft als de opbouw van de boot in het midden, deze is echter smaller en hoger. Dit brengt het opdrijvende punt nog meer naar het midden. Terwijl er bij de twee linker boten sprake is van een negatieve stabiliteit, heeft de rechtse boot nog steeds een klein beetje positieve stabiliteit over.

Er bestaan zeiljachten waarvan de ballast beweegbaar is, om een goede indruk te krijgen van de veiligheid moet je van een zogenaamde "worst case" scenario uitgaan. In *figuur 1.7* is de stabiliteitscurve te zien van een sportief toerjacht met een hefkiel, in de "zeilstand" is de diepgang 2.75m en ligt het gewichtszwaartepunt van de boot 22cm onder de waterlijn. In de tweede curve is dezelfde boot zichtbaar, maar dan met de kiel volledig opgetrokken. In opgetrokken toestand is de diepgang nog maar 1.10m en ligt het zwaartepunt 28cm hoger. Bij deze curve is ook zeer goed te zien dat de negatieve stabiliteit vrijwel verdwenen is, dat is mogelijk omdat de boot is uitgerust met een deksalon, in de berekening gaan we ervan uit dat de opbouw waterdicht is en blijft, ook onder de druk van het water op de relatief grote ramen. Voor een vergelijk heb ik ook de stabiliteitscurve getoond van dezelfde boot maar dan zonder het dekhuis.



Figuur 1.7

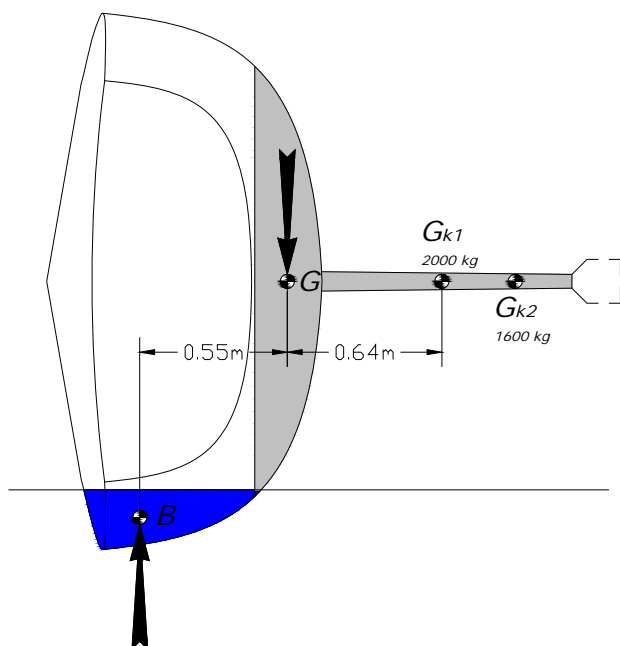
De grafiek maakt duidelijk dat de “zeilstand” van de kiel, zoals verwacht, de meest gunstige is. We vergelijken hier de twee buitenste lijnen met elkaar. Het positieve gedeelte begint nagenoeg gelijk voor beide situaties, dit komt omdat het grootste deel van de arm gecreëerd wordt door de vorm van de romp. Pas als de hellingshoek groter begint te worden neemt de invloed van de hoogte van het gewichtszwaartepunt toe, omdat deze bij de opgetrokken kiel minder gunstig is zien we hier de stabiliteit minder worden. Bij 90 graden helling is het verschil in lengte arm 28 cm dat is het hoogte verschil van het gewichtszwaartepunt als de kiel wel of niet opgetrokken is. Wat verder opvalt is dat de oppervlakte onder de grafieklijn in verhouding slechts een paar procent minder is tussen al dan niet opgetrokken. De oppervlakte onder de grafiek geeft aan hoeveel energie er nodig is om de boot te doen omslaan. Het verschil in oppervlakte van de negatieve stabiliteit is echter zeer groot, wel 5 keer, conclusie; als de kiel omhoog getrokken is wordt de boot op zijn kop 5x stabielere dan wanneer de kiel in zijn laagste stand staat.

Wat gebeurt er met de statische stabiliteit als ik een nieuwe kiel onder mijn boot hang?

Je hoort wel eens zeggen dat iemand een nieuwe kiel onder zijn boot heeft laten maken om deze sneller te laten zeilen, vaak gaat het hier om een diepere kiel met minder gewicht, maar heeft zo'n kiel invloed op de statische stabiliteit van mijn boot?

Het antwoord is: Ja!

Stabiliteit gaat in grote mate over oprichtend vermogen, dat kun je ook uitdrukken in een oprichtend moment. En een moment was een samenwerking tussen een afstand en een kracht. Stel nu dat we de kiel lichter maken, maar door het gewichtszwaartepunt van de



Figuur 1.9

kiel lager te maken kan deze het zelfde moment op de romp uit oefenen als de oude kiel, alleen weegt de boot als geheel dan minder... Daar gaat het dus fout. Stabiliteit heeft het gewicht van de boot nodig om tot een bepaald moment te kunnen komen, als we het gewicht van de boot minder groot maken, dan wordt dus ook de stabiliteitsomvang minder groot. Hoe moet het dan wel om stabiliteit gelijk te houden?

Het gelijk houden van stabiliteit is nagenoeg onmogelijk, het geheel veranderd hoe dan ook op een bepaalde manier. Laten we eens aan de hand van een rekenvoorbeeld bekijken wat er allemaal gebeurt als we een andere kiel onder de boot hangen.

De originele kiel noemen we kiel 1 en de nieuwe kiel noemen we kiel 2. Het doel van de kiel verwisseling is om de boot 400kg lichter te maken, maar wel met behoud van de originele stabiliteit. De oude kiel oefent een moment uit op de romp van $2000\text{kg} \times 0.64\text{m} = 1280\text{kgm}$

De nieuwe kiel zou dan zijn zwaartepunt moeten hebben op $1280/1600 = 0.80\text{m}$ dat is 16 cm dieper dan origineel.

Het originele oprichtende moment van de boot was $5000\text{kg} \times 0.55\text{m} = 2750\text{kgm}$

Echter, door de nieuwe kiel is de boot 400kg lichter geworden, dat betekent dat er nog maar $4600\text{kg} \times 0.55\text{m} = 2530\text{kgm}$ overblijft, dat is 8% minder oprichtend vermogen bij een hellingshoek van 90 graden. De vraag is nu, hoe diep moet het zwaartepunt van de nieuwe kiel dan liggen?

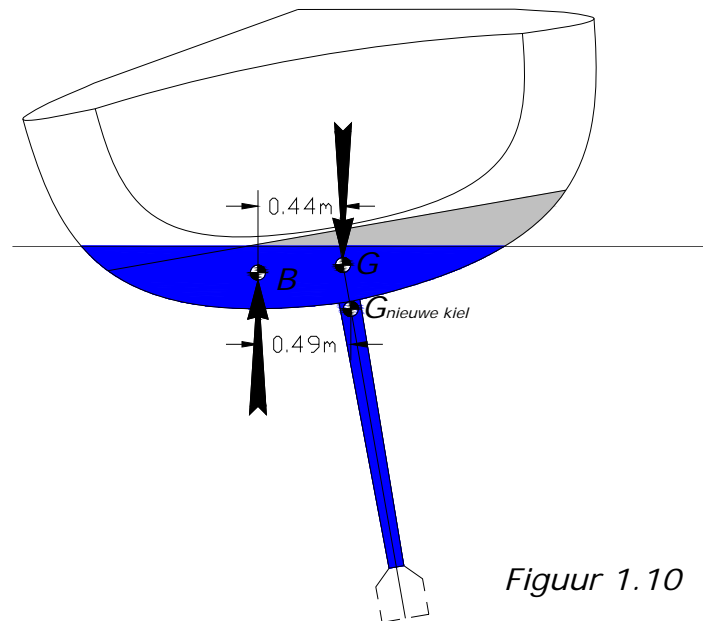
Om daar achter te komen moeten we dus eerst de nieuwe positie van het zwaartepunt van de boot uitrekenen. We willen een oprichtend moment hebben van 2750 kgm en hebben een boot van 4600 kg, dan moet de richtende arm $2750/4600 = 0.60\text{m}$ worden. Ofwel het gewichtszwaartepunt van de boot moet 5 cm lager komen te liggen. De kiel moet in een extra moment uitoefenen van $4600\text{kg} \times 0.05\text{m} = 230\text{kgm}$. Om dat te bereiken moet

het zwaartepunt $230/1600 = 14\text{cm}$ verder naar beneden, deze lag al 16 cm lager dan origineel, maar wordt nu $16+14 = 30\text{cm}$. De krachten die de nieuwe kiel op de bodem constructie uitoefenen nemen nu ook toe, en wel met $1280/(1600\text{kg} \times (0.64\text{m} + 0.30\text{m})) = 18\%$

De kiel vernieuwen vraagt in dit geval dus een relatief zwaardere kiel dan er origineel onder hing. We hebben dit nu alleen maar bekeken voor een helling hoek van 90 graden, dat is een hoek die zelden of nooit zal voorkomen, maar wat is de invloed op kleinere hoeken?

In figuur 1.10 zien we dezelfde boot nogmaals, maar dan onder een hellings-hoek van 10 graden. De GZ waarde die de boot origineel had was 0.44m, de nieuwe GZ waarde is 0.49 m. De bijbehorende richtende momenten zijn dan: $0.44 \times 5000 = 2200\text{kgm}$ en $0.49 \times 4600 =$

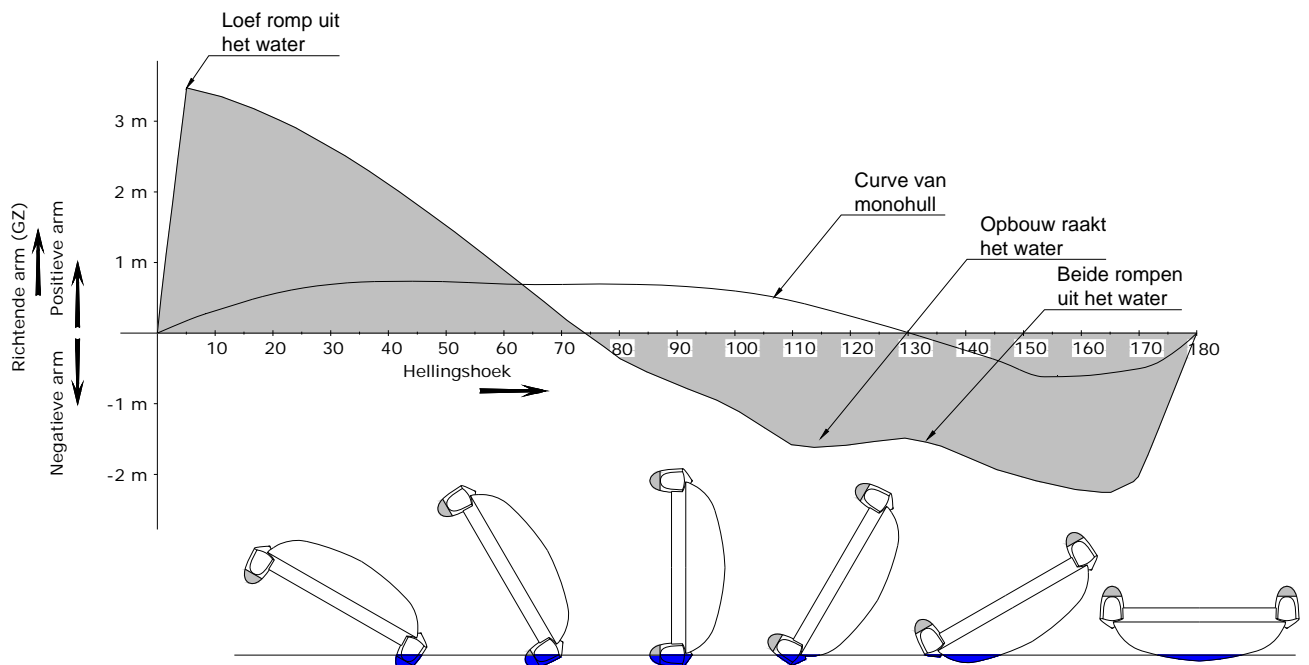
2254kgm de nieuwe kiel zorgt dus voor een toename van 3.5%. Dat betekent, minder gewicht en minder snel reven, en toch een boot die bij grotere hellingshoeken nog net zo veilig is als het originele ontwerp, de vraag is alleen kan de kiel fundatie dat beetje extra moment verwerken, evenals aan de grond lopen met een diepere kiel.



Figuur 1.10

Stabiliteit van een multihull

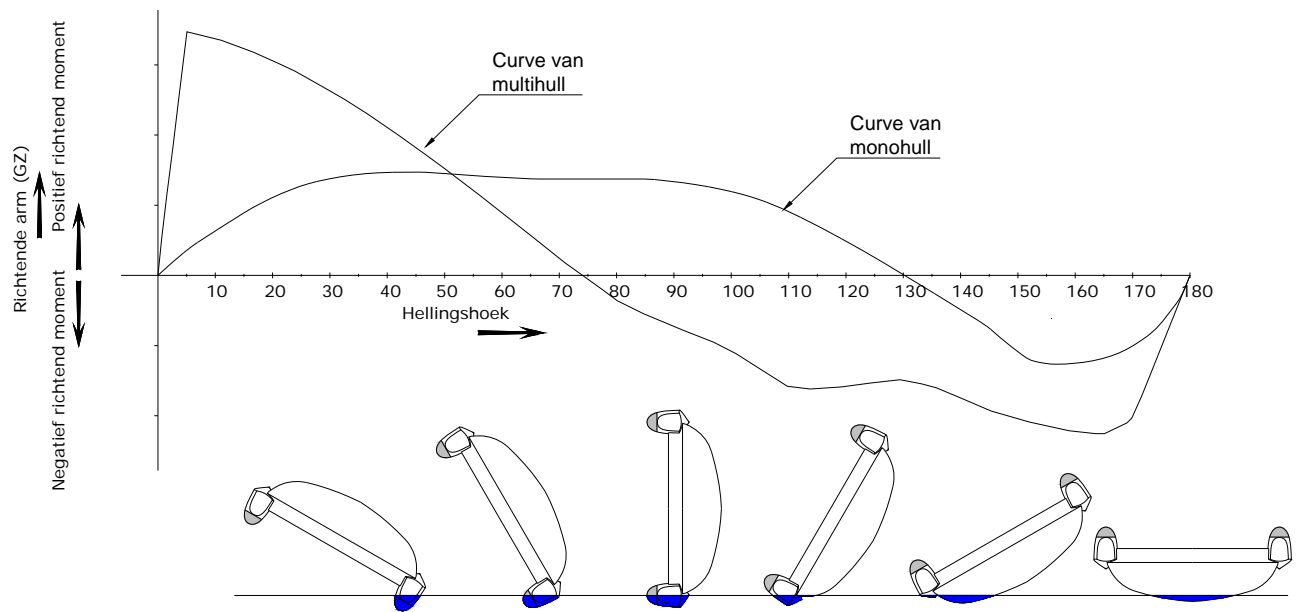
Een multihull wordt gezien als een stabiel werkplatform en over het algemeen vertonen multihulls nauwelijks tot geen hellingshoeken, daarentegen blijven ze, eenmaal omgeslagen meestal ondersteboven drijven. Hoe zien de karakteristieken er precies uit en is er wat te doen aan het onderste boven blijven liggen?



Figuur 1.11

In figuur 1.11 zien we een stabiliteitscurve van een 10 meter lange, snelle toer catamaran. Bijna de volledige accommodatie bevindt zich in de opbouw bovenop het brugdek. Om de grootte van de richtende arm een beetje beter weer te geven, heb ik die van een monohull er bij in getekend. Er zijn direct een aantal grote verschillen zichtbaar als we de richtende armen vergelijken. Ten eerste zien we dat de curve van een catamaran zeer recht omhoog gaat en dan een scherpe knik vertoont zodra de loef romp boven wat uitkomt. Daarna gaat het als een razende berg afwaarts en de negatieve stabiliteit is bijna net zo groot als de positieve. Hoe zit het nu met de echte stabiliteit van een catamaran in vergelijking met een monohull? Om daar iets zinnigs over te zeggen moeten we richtende momenten vergelijken. In *figuur 1.12* zien we de richtende momenten van de twee zelfde schepen. De monohull heeft een massa die ruim 1,5 keer zo groot is als die van de multihull. Nu kunnen we wel een vergelijk maken van het geheel. Zo is bijvoorbeeld te zien dat de hoeveelheid energie die een multihull nodig heeft om de loef drijver uit het water te tillen ongeveer overeenkomt met een hoeveelheid energie die een monohull tot 45 graden zou doen overhellen.

Zo zien we bijvoorbeeld dat een monohull rechtop ongeveer 4x zo stabiel is als ondersteboven, maar dat de stabiliteit van de catamaran op zijn kop net zo groot is als wanneer deze rechtop op ligt.



Figuur 1.12

Een goed vergelijk tussen een enkelromper en een meerromper is erg moeilijk te maken omdat de verschillen binnen de scheepstypen zelf al verschrikkelijk groot zijn. Er zijn monohulls die verhoudingsgewijs vergelijkbaar zijn met een multihull, zo zijn er monohulls die nagenoeg geen negatieve stabiliteit hebben, dat is iets dat bij een multihull niet voor zal kunnen komen.

De stabiliteit op zijn kop is sterk te beïnvloeden door het volume van de opbouw te veranderen. We moeten er hierbij wel vanuit gaan dat een opbouw volledig waterdicht is. Dat geldt zowel voor de ramen als ook voor de vaak toegepaste schuifdeuren.

Een aspect dat we ook onderzochten moeten nemen is het feit dat een mast tijdens het omslaan vrijwel zeker zal breken en dat de "restanten" die aan de boot blijven hangen als drijfanker zullen fungeren wat het veel moeilijker zal maken om weer terug te draaien. Bij een monohull is de verstaging in verhouding tot de scheepsbreedte zo lang, dat het tuig over het algemeen naast de boot blijft drijven en de boot voldoende ruimte zal geven om terug te draaien.

Om een catamaran omver te krijgen zullen we, voor onze voorbeeld catamaran, een golf nodig hebben die in staat is om de boot 70 graden te laten overhellen en daarbij minimaal 10 meter hoog zal moeten zijn. Golven die een dergelijke steilheid en hoogte hebben (deze twee aspecten gaan wel vaak samen) zijn erg zeldzaam.