Rapport no. 387.

LABORATORIUM VOOR SCHEEPSBOUWKUNDE

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

ZEILPRESTATIES VAN EEN VOLLENHOVESE BOL ;
HYDRODYNAMISCHE EIGENSCHAPPEN VAN ZEEZWAARDEN

door

L.H. Brozius
J. Gerritsma
M.A. de Groot
G. Moeyes

Rapport no. 387.

LABORATORIUM VOOR SCHEEPSBOUWKUNDE

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

ZEILPRESTATIES VAN EEN VOLLENHOVESE BOL ; HYDRODYNAMISCHE EIGENSCHAPPEN VAN ZEEZWAARDEN

door

L.H. Brozius *)
J. Gerritsma **)
M.A. de Groot *)
G. Moeyes ***)

*) student scheepsbouwkunde TH Delft
**) hoogleraar-beheerder Lab. voor Scheepsbouwkunde
***) wetenschappelijk-medewerker Lab. voor Scheepsbouwkunde

Inhoud

Paragraaf		blz.
	Voorwoord	1
1.	Vergelijking van vorm en hoofdafmetingen van een platbodem- en kieljacht	3
2.	Het krachtenspel op een zeilend jacht	5
	2.1. Het krachtenspel voor-de-wind zeilend	5
	2.2. Het krachtenspel aan-de-wind zeilend	5
3.	Modelexperimenten	7
	3.1. Algemene modelwetten	7
	3.2. Modelopstelling	8
	3.3. Modelsimulatie van een voor-de-wind zeilend jacht	9
	3.4. Modelsimulatie van een aan-de-wind zeilend jacht	9
	3.5. Verder uitgevoerde modelexperimenten	10
4.	Zeilprestaties van de Vollenhovese bol	11
	4.1. Snelheid-voor-de-wind	11
	4.2. Snelheid-in-de-wind	12
5.	Dwarskracht en weerstand van zwaarden, romp en roer	14
	5.1. Algemeen	14
	5.2. Door de zwaarden geleverde dwarskracht	17
	5.3. Door de romp geleverde dwarskracht	20
	5.4. Door het roer geleverde dwarskracht	20
	5.5. Het samenstellen van de door romp, zwaard en roer geleverde dwarskrachten	21
	5.6. Door de zwaarden ondervonden weerstand	23
	5.7. Door de romp ondervonden weerstand	23
	5.8. Door het roer ondervonden weerstand	24
6.	Konklusies	25
	Tabellen	26
	Figuren	33

Voorwoord

Het onderzoek naar de zeileigenschappen van een platbodemjacht, waarvan het onderhavige rapport de weerslag is, was nieuw voor het Laboratorium voor Scheepsbouwkunde te Delft. Tot dusver waren, wat jachten betreft, alleen analyses van scherpe kieljachten uitgevoerd.

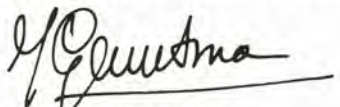
Bij modelonderzoek van schepen zijn variaties in vorm en verhoudingen van hoofdafmetingen interessant, omdat de eigenschappen van het schip daar uiteraard nauw verband mee houden. Juist het verzoek om een Vollenhovese bol onder de loupe te nemen was welkom, want een platbodem wijkt aanzienlijk af van het gemiddelde kieljacht. Het beloofde dus afwijkende en interessante resultaten op te leveren.

Na lezing van dit rapport zal blijken dat het uitgevoerde onderzoek geenszins volledig is, vooral met betrekking tot de onderzochte zwaardvormen. Die volledigheid is ook niet nagestreefd, mede omdat de daarvoor benodigde tijd en mankracht in de sleeptank niet beschikbaar is. Dat desondanks deze eerste aanzet reeds vrij omvangrijk kon zijn is niet in de laatste plaats te danken aan de medewerking van twee studenten, de Heren Brozius en De Groot, die enige maanden werkten aan de uitvoering en uitwerking van de metingen.

Dit rapport bevat ruwweg de stof die in een drietal lezingen gepresenteerd is voor een groep belangstellenden op de werf van Kooijman en De Vries Jachtbouw B.V., de werf, die ook het model ter beschikking stelde. De heterogene samenstelling van het gehoor was er de oorzaak van dat het gehele experiment vanaf opzet en begin beschreven moest worden. Dit rapport volgt die opzet geheel, zodat het voor velen wellicht reeds bekende stof zal bevatten.

De uitgevoerde metingen laten een meer uitgebreide analyse toe dan in de lezingen is gepresenteerd. Indien de mogelijkheden hiertoe gevonden kunnen worden zullen ook deze nadere gegevens in de toekomst gepubliceerd worden.

De Hoogleraar-Beheerder van het
Laboratorium voor Scheepsbouwkunde



Prof.ir. J. Gerritsma

1. Vergelijking van vorm en hoofdafmetingen van een platbodem- en kieljacht.

De belangrijkste afmetingen en gegevens van de onderzochte Vollenhovese bol zijn gegeven in tabel I. De vergelijking van de vorm van dit schip met die van een kieljacht moet op basis van één van de hoofdgegevens geschieden. In tabel II is daarvoor de lengte gekozen. Het geselekteerde kieljacht heeft bijna dezelfde lengte als de bol, zowel over alles als op de waterlijn. Daarbij is ook de maximum breedte vrijwel gelijk. In de grootste waterlijnbreedte manifesteert zich het eerste verschil. Vanaf het dek naar beneden wordt de romp van het kieljacht snel smaller, de bol blijft wat buikiger. Het kieljacht behoort tot de z.g. "light displacement" typen, zodat ook de diepgang van de romp zelf (zonder kiel) wat kleiner is dan die van de bol.Het belangrijkste verschil tussen platbodem en scherp jacht is echter de waterverplaatsing. Bij vrijwel gelijke hoofdafmetingen is die van de platbodem bijna twee maal zo groot als die van het scherpe jacht. Datzelfde verschil wordt uitgedrukt door de blokcoefficient en de slankheidsgraad, eveneens gegeven in tabel II. De blockcoefficient is de verhouding van het door het onderwaterschip ingenomen volume tot het volume van een rechthoekig blok met zijden gelijk aan de waterlijnlengte, de grootste waterlijnbreedte en de grootste diepgang van de romp. De slankheidsgraad is de lengte gedeeld door de derdemachts-wortel van het volume van het onderwaterschip en geeft dus aan hoeveel waterverplaatsing een schip heeft met betrekking tot zijn lengte. In tabel II geven de grotere blokcoefficient en de kleinere slankheidsgraad van de bol duidelijk de veel vollere vorm aan.

De verdeling van de waterverplaatsing over de scheepslengte, die voor de bol in dimensieloze vorm gegeven is in figuur 1, wordt grotendeels vastgelegd door twee grootheden, de prismatische coefficient en de relatieve ligging van het drukkingspunt. De prismatische coefficient is de verhouding van het volume van het onderwaterschip tot het volume van een cilinder met een lengte gelijk aan de waterlijnlengte en een doorsnede gelijk aan de grootspantdoorsnede van het schip (zie figuur 2). De prismatische coefficient geeft de spreiding van de waterverplaatsing over de einden aan; hoe groter de coefficient, des te voller zijn de scheepseinden.
De prismatische coefficienten in tabel II tonen duidelijk het essentiele verschil in vorm tussen een rond en een scherp jacht aan.

Of de meeste waterverplaatsing in het voorschip of achterschip is ondergebracht wordt aangegeven door de relatieve ligging van het drukkingspunt, dit is het volumezwaartepunt van het onderwaterschip. Ligt het drukkingspunt vóór het midden van de waterlijnlengte, zoals bij de bol, dan betekent dit dat het voorschip voller is dan het achterschip. Bij het kieljacht is dit juist andersom.

Ondanks het grote verschil in waterverplaatsing is de hoeveelheid zeil die beide schepen aan-de-wind voeren niet sterk verschillend. Het zeiloppervlak in relatie tot de waterverplaatsing ($SA/\Delta^{2/3}$) geeft voor bol en kieljacht dan ook verschillen.

Resumerend kan gezegd worden dat platbodem en kieljacht bij vrijwel gelijke lengte, breedte en diepgang alleen een groot verschil vertonen in waterverplaatsing. Qua rompvorm is de platbodem veel voller in de einden, met name in het voorschip. Het spreekt voor zich dat deze verschillen invloed hebben op de hydrodynamische eigenschappen. Waar nodig zal dit in de volgende paragrafen aangeduid worden.

2. Het krachtenspel op een zeiljacht

2.1. Het krachtenspel voor-de-wind zeilend

Als het schip recht voor-de-wind vaart en de zeilen zijn goed gesteld, dan ondervindt het tuig een zeilkracht F_L die recht naar voren, in de vaartrichting, werkt (figuur 3). Bij een konstante windsnelheid neemt de scheepssnelheid toe tot de weerstand R die het schip in het water ondervindt precies gelijk is aan de zeilkracht. Er is dan een evenwichtstoestand ontstaan, waarbij de scheepssnelheid niet verder toe zal nemen zolang de windsterkte gelijk blijft. Zeilkracht en weerstand vormen samen een koppel dat het schip voorover zal doen trimmen. Dit gebeurt inderdaad, tot een hoek waarbij het langsscheeps stabiliteitsmoment gelijk is aan het vertrimmend koppel (figuur 3). Als aangenomen wordt dat de zeilvoering zodanig is dat de zeilkracht precies op hart schip aangrijpt zullen geen verdere krachten en koppels optreden. Het schip vaart dan met volledig opgehaalde zwaarden zonder helling, zonder drifthoek, en met het roer in de middenstand.

2.2. Het krachtenspel aan-de-wind zeilend.

Als het schip aan-de-wind vaart ontstaat een zeilkracht die verondersteld wordt loodrecht op de mast te staan.

In achteraanzicht (figuur 4) zijn de dwarskomponent F_D en vertikale komponent F_V van de zeilkracht zichtbaar. In dwarsrichting moet F_D evenwicht maken met een dwarskracht Y, die door het onderwaterschip, vooral door het zwaard, geleverd moet worden. Deze dwarskracht Y kan alleen ontstaan als schip en/of zwaard scheef door het water aangestroomd worden, dus als het schip een drifthoek heeft en/of als het zwaard toespoor (een hoek tussen de hartlijn van het schip en de basislijn van het zwaard, ontstaan door "opsnijden" van de zwaardklamp) heeft. De vertikale komponent F_V van de zeilkracht veroorzaakt dat het schip wat dieper inzinkt en daardoor wat meer waterverplaatsing krijgt. De zeilkracht en de kracht op het onderwaterschip vormen ook in dwarsrichting een koppel, dat het schip doet hellen. De helling wordt zo groot dat het hellend moment gelijk is aan het dwarsscheeps stabiliteitsmoment. Dit laatste wordt gevormd door het gewicht van het schip, aangrijpend in het gewichtszwaartepunt G, en de opwaartse kracht van de waterverplaatsing, aangrijpend in het drukkingspunt B_ϕ van het gehelde onderwaterschip.

In de vaartrichting maakt de voortstuwende komponent F_L evenwicht met de totale weerstand R (figuur 5). Evenals voor-de-wind vormen ze een koppel dat een kleine vertrimming veroorzaakt.

Het bovenaanzicht (figuur 6) toont alleen de komponenten in de vaartrichting en loodrecht daarop.
De zeilkrachtkomponenten F_L en F_D maken evenwicht met respektievelijk de weerstand R en dwarskracht Y.

In figuur 6 is de zeilkracht ook op een andere manier ontbonden, namelijk in een komponent in de richting van de schijnbare wind, een weerstand D, en in een komponent loodrecht daarop, de liftkracht L van het zeil. Meetkundig is te bewijzen dat de hoek 3 tussen vaartrichting en schijnbare wind gelijk is aan de som van de hoeken 1 en 2 (figuur 6). Hoe kleiner deze som, des te hoger vaart het schip aan-de-wind. Hoek 1 en 2 afzonderlijk worden bepaald door de lift-weerstand verhouding, respektievelijk van onderwaterschip en zeilen. Hoe groter deze verhoudingen, des te kleiner worden de hoeken 1,2 en dus 3. Een kleinere weerstand, zowel van de zeilen als van het onderwaterschip, heeft daarom altijd tot gevolg dat het schip hoger aan-de-wind vaart.

3. Modelexperimenten

3.1. Algemene modelwetten

Bij modelonderzoek moet gelijkvormigheid bestaan tussen werkelijkheid en modelsituatie.

Allereerst wordt geometrische gelijkvormigheid vereist; het model moet precies op schaal zijn. Neemt het schip een helling aan of vertrimt het over een zekere hoek, dan moeten helling en vertrimming bij het model precies gelijk zijn.

Ten tweede moet dynamische gelijkvormigheid bestaan, dat wil zeggen : alle bij de modelproef optredende krachten moeten in een vaste verhouding tot overeenkomstige krachten in de werkelijkheid staan.

Hie dit doorwerkt in de modelsimulatie van de zeilkrachten wordt in de volgende paragrafen beschreven.

Omdat de golfweerstand een kracht is, moet ook deze voor model en schip aan de gegeven verhouding voldoen. Dit is het geval als het golfprofiel rond het model gelijkvormig is aan dat rond het schip. Het wordt bereikt als aan de wet van Froude voldaan wordt, d.w.z. als het Froudegetal, F_n, voor de situatie bij model en schip een gelijke waarde heeft.

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{gL}} \qquad (3.1.1)$$

waarin v = snelheid in m/s.

g = versnelling van de zwaartekracht in m/sec^2 (9.81 m/s^2)

L = waterlijnlengte in m.

Als bij voorbeeld de modelschaal 1:4 is, dus als de modellengte 4 keer zo klein is als de scheepslengte, betekent een gelijk Froudegetal dat de modelsnelheid $\sqrt{4}=2$ keer zo klein moet zijn als de scheepssnelheid om een gelijkvormig golfprofiel en een golfweerstand "op schaal" te krijgen.

Behalve de golfweerstand zou ook de wrijvingsweerstand van het model "op schaal" moeten zijn . Dit zou betekenen dat het getal van Reynolds, R_n, voor model en schip gelijk moet zijn.

$$R_n = \frac{vL}{\nu} \qquad (3.1.2.)$$

waarin : v =snelheid in m/s.

L =lengte in m.

ν =kinematische viskositeit (stroperigheid, taaiheid) van de vloeistof.

Bij een modelproef zijn modellengte en snelheid al vastgelegd door de modelschaal en het Froudegetal. Dit betekent dat, om toch in de modelsituatie en de werkelijkheid een overeenkomstig getal van Reynolds te verkrijgen, de viskositeit (taaiheid) van de vloeistof bij model en schip verschillend moet zijn, zelfs in aanzienlijke mate. In de praktijk is het moeilijk een sleeptank b.v. met kwik te vullen, zodat op praktische gronden niet aan de eis van een gelijk getal van Reynolds voldaan kon worden, als tegelijkertijd al aan de wet van Froude voldaan wordt. Dit houdt in dat bij modelproeven de golfweerstand wel, maar de wrijvingsweerstand niet "op schaal" is. Omdat men toch uit modelproeven de weerstand van het echte schip wil voorspellen, moet bij deze voorspelling voor het wrijvingsgedeelte een korrektie toegepast worden.

3.2. Modelopstelling

Figuur 7 geeft een vereenvoudigde schets van de ophanging en inrichting van het model. Het model is in twee punten door kogelscharnieren via een uitgebalanceerd stelsel van hefbomen, de z.g. trimapparaten, aan de sleepwagen bevestigd. Door deze apparatuur is het model vrij om te trimmen, in te zinken en te hellen. Alleen in dwarsrichting wordt het vastgehouden. De krachten in dwarsrichting kunnen gemeten worden. Door het achterste trimapparaat in dwarsrichting te verplaatsen krijgt het model een drifthoek. Het wordt voortgesleept aan een draad, bevestigd aan een dynamometer op de sleepwagen. De gemeten trekkracht in deze draad is gelijk aan de weerstand van het model. Een hoekmeter met waterpas dient om tijdens een meting te kontroleren of het model de juiste helling aanneemt. Verder is een gewicht aangebracht dat zowel in langs- als in dwarsrichting verschuifbaar is. Door een verschuiving worden momenten aangebracht die voor een juiste simulatie van het krachtenspel noodzakelijk zijn (zie volgende paragrafen). Op hart schip, onder het effektieve zeilpunt is ter hoogte van de kogelscharnieren een schaaltje opgehangen voor het aanbrengen van extra gewichten. Deze dienen eveneens ter simulatie van het krachtenspel op het schip.

3.3. Modelsimulatie van een voor-de-wind zeilend jacht.

Aangenomen wordt dat voor-de-wind zeilend de drifthoek en roerhoek nul zijn. Op het model zijn de zwaarden volledig opgehaald. De weerstand R van schip en model grijpt in hetzelfde punt (op schaal) aan. De voorwaarts gerichte zeilkracht F_L, die op het schip ergens hoog in het tuig aangrijpt, wordt op het model uitgeoefend door de trekkracht in de draad, die in het scharnierpunt S aangrijpt (figuur 3). Het door zeilkracht en weerstand uitgeoefende voorover trimmende moment is op het model dus relatief kleiner dan op het werkelijke schip. In de modelsituatie wordt, om de vertrimmende momenten weer "op schaal" te maken, een extra korrektiemoment uitgeoefend door een gewicht in het schip voorwaarts te verschuiven (zie figuur 3).

De meting wordt uitgevoerd door de sleepwagen met model een snelheid te geven en de weerstand te meten.

3.4. Modelsimulatie van een aan-de-wind zeilend jacht.

Als de aan-de-windse vaart van het schip gesimuleerd moet worden , wordt ook op het model het zwaard neergelaten. Omdat de voorwaarts gerichte komponent F_L van de zeilkracht op het model niet "op schaal" aangrijpt (figuur 5) wordt ook nu een extra vertrimmend korrektiemoment op het model aangebracht door een gewicht langsscheeps te verschuiven. De vertikale komponent F_V van de zeilkracht op het schip, wordt op het model uitgeoefend door een berekend gewicht op het schaaltje te leggen (figuur 4 en 5). De stroming rond het onderwaterschip is bij het model en in werkelijkheid gelijk, zodat de dwarskracht Y op schaal in hetzelfde punt aangrijpt. De dwarskomponent F_D van de zeilkracht op het schip wordt in de modelsituatie gesimuleerd door de kracht waarmee de trimapparaten in de scharnierpunten het model in z'n juiste stand houden. Figuur 4 toont dat de gehele "zeilkracht" op het model in de scharnierpunten wordt uitgeoefend, in plaats van ergens hoger in het "tuig", zoals op het schip. Dit betekent dat het hellend moment, gevormd door de zeilkracht en de op het onderwaterschip uitgeoefende kracht, op het model relatief te klein is. Dit wordt gekompenseerd door op het model een extra hellend moment uit te oefenen met een dwarsscheepse verschuiving van een bekend gewicht. Eventuele verschillen in het stabiliteitsmoment van schip (op schaal) en model worden eveneens in een dwarsscheepse verschuiving van dit gewicht verwerkt.

De proef wordt uitgevoerd door met vooraf ingestelde korrektiemomenten bij een gegeven snelheid te gaan varen.

De drifthoek wordt dan zodanig ingesteld dat de helling de gewenste waarde krijgt. Gemeten worden de weerstand, de dwarskracht en de uiteindelijk ingestelde drifthoek. De meting wordt herhaald voor verschillende hellingshoeken, modelsnelheden en drifthoeken.

Volledige series van bovenstaande metingen zijn uitgevoerd met het oorspronkelijk ontworpen zwaard, zowel met een toespoor van $1\frac{1}{2}$ graad als van 6 graden.

Eveneens is een serie metingen uitgevoerd waarbij het oorspronkelijke zwaard vervangen is door een nieuw. Dit heeft een gelijke diepgang als het oorspronkelijke, maar is in dikte en breedterichting $1\frac{1}{2}$ keer vergroot (zie figuur 8).

3.5. Verder uitgevoerde modelexperimenten

Naast de simulatie van de vaart voor-de-wind en aan-de-wind, die in het Laboratorium voor Scheepsbouwkunde tot de standaardprestatiemeting van een zeiljacht behoren , zijn met de Vollenhovese bol extra proeven uitgevoerd. Deze dienden om inzicht te verkrijgen in de verdeling van de dwarskracht over romp, zwaard en roer en bestonden uit de volgende series :

1. Meting van de dwarskracht en weerstand op de romp zonder zwaard, waarbij de romp dezelfde kombinaties van helling, drifthoek en snelheid heeft als bij de in paragraaf 3.4. beschreven proeven. Hierbij is de romp behalve in z'n oorspronkelijke toestand ook gesleept nadat een loefbijter was aangebracht, waarvan de vorm gegeven is in figuur 8.

2. Meting van de dwarskracht die door de romp zonder zwaard wordt opgewekt als deze met een drifthoek nul en met roerhoeken van 5, 10, 15, enz t/m 30 graden gesleept wordt.

3. Meting van de dwarskracht en weerstand op de zwaarden als deze onder verschillende hellings-, invals- en pijlhoeken (voor definities zie paragraaf 5.1. en figuur 15) vastgeklemd zijn onder de sleepwagen. Ook de snelheid is hierbij gevarieerd.

4. Zeilprestaties

4.1. Snelheid voor-de-wind

De weerstand van de romp met opgetrokken zwaarden, rechtop en zonder drifthoek en roerhoek, is gegeven in figuur 9 en tabel III. In figuur 9 is eveneens aangegeven het met de ITTC-extrapolatiemethode berekende wrijvingsdeel van de totale weerstand. Het blijkt dat al bij lage snelheid de golfweerstand groter wordt dan de wrijvingsweerstand. Figuur 10 toont dat de totale weerstand van het in paragraaf 1 genoemde kieljacht ongeveer de helft van die van de bol is. De weerstand per ton waterverplaatsing (tabel IV) verschilt voor beide schepen weinig, zodat het grote verschil in waterverplaatsing de hoofdoorzaak van het grote verschil in weerstand is. Andere grootheden zoals de prismatische coefficient en de relatieve ligging van het drukkingspunt hebben ten opzichte van de waterverplaatsing slechts een sekundaire invloed op de weerstand. Omdat, met betrekking tot de lengte, grote waterverplaatsing een essentieel kenmerk is van een platbodemjacht, zal dit schip altijd een anzienlijk grotere weerstand hebben dan een kieljacht van ongeveer gelijke hoofdafmetingen.

Uit de metingen is bij iedere scheepssnelheid de weerstand, dus ook de voortstuwende zeilkracht, bekend. In formulevorm is deze uit te drukken als :

$$R=F_L=C_D.\tfrac{1}{2}\rho_A.v_{aw}^2.SA_{ed} \qquad (4.1.1)$$

waarin : R = weerstand in kg
F_L = voortstuwende zeilkracht in kg
C_D = weerstandscoefficient van het zeil
ρ_A = soortelijke massa van lucht (0.125 kgm^2/s)
v_{aw} = snelheid van de schijnbare wind in m/s
SA_{ed} = effektief zeiloppervlak voor de wind.

In formule (4.1.1) zijn ρ_A en C_D konstanten, waarvan C_D uit windtunnelproeven bepaald is. Het effektieve zeiloppervlak SA_{ed} kan uit het zeilplan berekend worden, terwijl de weerstand R, dus ook de zeilkracht F_L uit de metingen bekend is. De snelheid van de schijnbare wind, v_{aw}, is dus te berekenen. Met de scheepssnelheid die bij de ingevoerde weerstand behoort is dan ook de snelheid van de werkelijke wind te berekenen.

Zo toont figuur 11 de snelheid in meters per sekonde en in knopen, die voor de Vollenhovese bol voor-de-wind haalbaar is bij een gegeven windsnelheid of windkracht. Tabel V geeft bij standaardwindsnelheden van 3.5, 7.0 en 10.0 m/s onder andere de snelheid-voor-de-wind van bol en kieljacht, zowel in absolute waarde als dimensieloos gemaakt in de vorm van een Froudegetal (zie uitdrukking 3.1.1). Het blijkt dat het ongeveer even lange kieljacht beduidend hogere snelheden behaalt dan de bol. Dit dankt het niet alleen aan de mogelijkheid om met een spinnaker het zeiloppervlak te vergroten, maar in belangrijker mate aan de kleinere weerstand. Met behulp van uitdrukking (4.1.1) is in te zien dat de bol zijn bijna twee keer zo grote weerstand ten opzichte van het kieljacht pas goed kan maken met een twee keer zo groot zeiloppervlak. De grote waterverplaatsing, die de bron is van de grote weerstand, is inhearent aan het platbodemtype. Zolang het zeiloppervlak van een platbodem, door welke hulpmiddelen dan ook, niet aanzienlijk vergroot kan worden, zal een dergelijk schip dus altijd langzamer zijn dan een ongeveer even lang modern kieljacht.

4.2. Snelheid-in-de-wind

Onder helling en met drifthoeken varend neemt de weerstand van het schip toe. De toename, die voor hellingshoeken van 10, 15 en 20 graden bij verschillende snelheden weergegeven is in figuur 9, is vrijwel even groot als de wrijvingsweerstand van het schip. Het loont dus door verbeteringen aan het onderwaterschip dit gedeelte van de totale weerstand te verminderen.
Zoals in net volgende hoofdstuk ter sprake zal komen is genoemde weerstandstoename voor een groot gedeelte het gevolg van de produktie van dwarskracht. Gebeurt dit met effektieve middelen zoals een goed gevormd zwaard dan is de weerstandstoename relatief gering.

Met standaardzeilcoefficienten (kracht per m^2 zeiloppervlak) en het berekende effektieve zeiloppervlak aan-de-wind worden de metingen van dwarskracht en weerstand uitgewerkt tot de optimale snelheid-in-de-wind. Dit is de maximale snelheid waarmee het schip in de wind op kan werken bij een gegeven windsnelheid (figuur 12). De snelheid-in-de-wind van de Vollenhovese bol is in figuur 13 gegeven met drie zwaardkonfiguraties :
1. het oorspronkelijke, smalle, zwaard met een toespoor van $1\frac{1}{2}^{o}$.
2. het smalle zwaard met 6^{o} toespoor
3. het verbrede zwaard met $1\frac{1}{2}^{o}$ toespoor.

Uit figuur 13 en tabel V blijkt dat de berekende snelheid-in-de-wind voor de drie konfiguraties slechts weinig verschilt.

De zeilcoefficienten waarmee de snelheid-in-de-wind berekend is zijn echter onafhankelijk van de drifthoek verondersteld. In werkelijkheid zal dit niet juist zijn, wat geillustreerd wordt in figuur 14. De beide schepen leveren bij gelijke snelheid precies dezelfde dwarskracht en ondervinden gelijke weerstand. Als de zeilcoefficienten in beide gevallen gelijk zijn zullen ze precies even hoog aande-wind varen en een gelijke snelheid-in-de-wind hebben. Omdat schip B door vergroting van het toespoor een kleinere drifthoek heeft is de invalshoek van het zeil van dit schip groter dan die van schip A. Dit betekent dat schip B meer mogelijkheden heeft zijn zeilen optimaal in te stellen. De zeilcoefficienten van schip B zullen dus in werkelijkheid "beter" kunnen zijn dan die van schip A. Volgens tabel V geven een groter toespoor en een breder zwaard een vermindering van de drifthoek, het eerste zelfs in aanzienlijke mate.
Wordt dit gegeven gekombineerd met de kromme in figuur 13 dan kan gekonkludeerd worden dat een vergroting van het toespoor of een geringe verbreding van het zwaard, zodanig dat de drifthoek van de romp verminderd wordt, wellicht een verbetering van de snelheid-in-de-wind geeft. Dit geldt in algemene zin voor alle maatregelen die een drifthoekvermindering geven zonder een beduidende weerstandsverhoging. Het geven van een roerhoek kan dus ook een gunstig effekt sorteren.

In tabel V is de bereikbare snelheid-in-de-wind zowel in absolute waarde als dimensieloos als Froudegetal, vergeleken met dezelfde grootheden van het kieljacht. Ook aan-de-wind blijkt de platbodem beduidend langzamer, ondanks zijn voor dwarskrachtproduktie zeer effektieve zwaard. De hoofdoorzaak hiervan is, evenals bij de vaart voor-de-wind, de bijna dubbel zo grote waterverplaatsing en dito weerstand van de bol.

5. Dwarskracht en weerstand van zwaarden, romp en roer.

5.1. Algemeen

Volgens paragraaf 2.2. moet, aan-de-wind zeilend door het onderwaterschip een dwarskracht geleverd worden om het evenwicht met de dwarsscheepse komponent van de zeilkracht te herstellen. Beide krachten samen vormen een hellend moment dat gelijk moet zijn aan het stabiliteitsmoment. Omdat het stabiliteitsmoment afhankelijk is van de helling, en de zeilkracht van de windsterkte, bestaat er in de optimale konditie een eenduidig verband tussen windsterkte, helling en dwarskracht. Zo neemt b.v. bij windsnelheden van ongeveer 5, 7 en 9 m/s de Vollenhovese bol een helling aan van respektievelijk 10°, 15° en 20°. De dwarskrachten die daarbij geleverd worden zijn respektievelijk 132 kg, 201 kg en 244 kg. Aan de dwarskracht produktie nemen romp, zwaard en roer in verschillende mate deel en ondervinden daarbij in verschillende mate weerstand. Ieder onderdeel is dus, evenals een vliegtuigvleugel en een zeil, te beschouwen als een draagvlak, hoewel dit voor de romp moeilijk voorstelbaar is. Alvorens in de volgende paragrafen op de metingen aan romp, zwaard en roer in te gaan zullen enige theoretische eigenschappen van draagvlakken besproken worden.

In figuur 15 zijn de belangrijkste definities van een draagvlak aangegeven, waarvoor als voorbeeld het zwaard gekozen is. Vaak zal de doorsnede van een zwaard asymmetrisch zijn; de binnenkant is hol, de buitenkant bol. De lijn die alle punten op de halve dikte verbindt is de welvingslijn. De maximale bolling van de welvingslijn heet de welving. Als de doorsnede symmetrisch is, zoals bij het roer, is de welvingslijn een rechte lijn en de welving nul. De invalshoek wordt gedefinieerd als de hoek tussen de aanstroomrichting van het water en de basislijn, de rechte lijn tussen begin en eindpunt van de welvingslijn. Het quotient van spanwijdte en gemiddelde koorde is de aspektverhouding of slankheid. Voor romp, zwaard en roer is de spanwijdte gelijk aan de respectievelijke diepgang. De koorde wordt in deze gevallen horizontaal, in het basisvlak gemeten (zie aanzicht en doorsnede in figuur 15) en over de spanwijdte gemiddeld. Een rond boeierzwaard heeft een kleine aspektverhouding, een smal, volledig neergelaten schokkerzwaard daarentegen een grote aspektverhouding. Bij de Vollenhovese bol is de aspektverhouding van de romp zeer klein, n.l. 0.09, die van roer en zwaard is groter, respektievelijk 0.64 en 3.30.

Als een draagvlak aangestroomd wordt kan de ondervonden kracht ontbonden worden in een komponent loodrecht op de stroomrichting, de lift, en een komponent in de stroomrichting, de weerstand. In het geval van de gehelde romp, zwaard of roer is de dwarskracht de horizontale komponent van de lift. De geleverde dwarskracht is te schrijven als :

$$Y = C_Y . \tfrac{1}{2}\rho_w . v^2 . A \qquad (5.1.1)$$

waarin : Y = dwarskracht in kg
C_Y = dwarskrachtcoefficient, in waarde afhankelijk van de invalshoek
ρ_w = soortelijke massa van water in kgs^2/m^4 (voor zoet water is $\rho_w = 102$, voor zout water $\rho = 104$)
v = aanstroomsnelheid in m/s
A = geprojekteerd oppervlak van het draagvlak in m^2.

Een asymmetrisch draagvlak levert bij een invalshoek nul nog een dwarskracht. De dwarskracht is pas nihil bij een van nul verschillende invalshoek, die de nullifthoek genoemd wordt (zie ook paragraaf 5.2.). Bij kleine invalshoeken is de dwarskrachtcoefficient evenredig aan de effektieve invalshoek, het verschil van geometrische invalshoek en nullifthoek.

$$C_Y = \frac{dC_Y}{d\alpha}\alpha_e = \frac{dC_Y}{d\alpha}(\alpha - \alpha_o) \qquad (5.1.2)$$

waarin : $\frac{dC_Y}{d\alpha}$ = helling van de kromme van dwarskrachtcoefficienten
α_e = effektieve invalshoek
α = geometrische invalshoek
α_o = nullifthoek

Met uitdrukking (5.1.2) is de dwarskracht bij kleine invalshoeken te schrijven als :

$$Y = \frac{dC_Y}{d\alpha}(\alpha - \alpha_o) . \tfrac{1}{2}\rho_w . v^2 . A.$$

De dwarskracht heet dan lineair afhankelijk van de invalshoek en kwadratisch afhankelijk van de snelheid v te zijn. De helling $\frac{dC_Y}{d\alpha}$ van de kromme van dwarskrachtcoefficienten bepaalt de toename van de dwarskracht per graad toename van de invalshoek. Hoe groter de aspektverhouding van het draagvlak, des te groter is deze toename. In het algemeen zal er naar gestreefd worden met een zo klein mogelijke invalshoek een zo groot mogelijke dwarskracht te kreeëren.

De effektiviteit van een draagvlak zal dus toenemen naarmate de aspektverhouding of slankheid groter wordt.In de volgende paragrafen zal dit gedemonstreerd worden. De romp van een platbodem is als dwarskrachtproducent bijzonder ineffektief. Het smalle zeezwaard is daarentegen zeer effektief, ook vergeleken met de kielen van moderne jachten, die een aspektverhouding van ongeveer 1 hebben.

Bij de metingen aan een draagvlak als het zwaard, de romp of het roer kan óf de invalshoek α, óf de snelheid v gevarieerd worden.Als dan de gemeten dwarskracht Y in een grafiek gezet wordt op basis van respektievelijk α of v^2, kan de geldigheid van uitdrukking (5.1.3) nagegaan worden. Als de gemeten punten op een rechte lijn liggen voldoet de uitdrukking. Bovendien kunnen uit deze grafieken de experimentele waarden van $\frac{dC_Y}{d\alpha}$ en α_o bepaald worden. Het bovenstaande zal in de volgende paragrafen geillustreerd worden.

De totale weerstand is de som van profielweerstand en geinduceerde weerstand.

$$D = D_o + D_i \qquad (5.1.4)$$

waarin D = totale weerstand

D_o = profielweerstand

D_i =geinduceerde weerstand.

De profielweerstand bestaat grotendeels uit wrijvingsweerstand, afhankelijk van snelheid en nat oppervlak, en verder uit vormweerstand en, indien het wateroppervlak doorsneden wordt, uit golfweerstand. De profielweerstand is bij een gegeven draagvlak slechts afhankelijk van de snelheid. De geinduceerde weerstand ontstaat door energieverlies tengevolge van de omstroming van de hoge- naar de lage drukzijde aan de tip van het draagvlak. De omstroming neemt toe als het drukverschil toeneemt. Aangezien dit laatste tevens een verhoging van de lift geeft betekent dit dat de geinduceerde weerstand toeneemt bij toenemende dwarskracht (lift). Bij gelijke dwarskracht kan de geinduceerde weerstand verminderd worden door een draagvlak met een grotere slankheid of aspektverhouding te kiezen. De omstroming aan de tip krijgt dan relatief minder betekenis.

Na een theoretische beschouwing is de geinduceerde weerstand bij kleine invalshoeken te schrijven als :

$$D_i = C_{D_i}^{*} \cdot \tfrac{1}{2}\rho_w \cdot A \cdot v^2 \cdot \alpha_e^2 \qquad (5.1.5)$$

waarin : $C_{D_i}^{*}$ = konstante

ρ_w = soortelijke massa van water

A = geprojekteerd oppervlak van het draagvlak

v = aanstroomsnelheid

α_e = effektieve invalshoek

Bij de proeven zijn invalshoek en snelheid gevarieerd en is de weerstand gemeten. Door deze respektievelijk tegen α_e^2 of v^2 uit te zetten kan, zoals dit bij de liftkracht gebeurd is, de geldigheid van uitdrukking (5.1.5) nagegaan worden. Eveneens is voor romp, roer en zwaard de waarde van $C_{D_i}^{*}$ te bepalen. In de volgende paragrafen wordt dit nader besproken.

5.2. Door de zwaarden geleverde dwarskracht

In figuur 16 is de dwarskrachtproduktie van het smalle en brede zwaard van de bol gegeven. De waarden gelden voor een snelheid van 4.8 kn en een pijlhoek en hellingshoek van 0°. Opvallend is dat bij een invalshoek van 0° toch nog een dwarskracht gemeten wordt. Dit vindt zijn oorzaak in de asymmetrie, de welving van het zwaard. De hoek waarbij geen dwarskracht geleverd wordt, de nullifthoek, is voor de beschouwde zwaarden -3° à -4°. Hoe groter de welving van het zwaard, des te verder zal de nullifthoek naar negatieve waarden schuiven. Bij kleine invalshoeken neemt de dwarskracht regelmatig (lineair) toe met de invalshoek, en voldoet hierbij dus aan betrekking (5.1.3). De toename zet zich voort tot een hoek bereikt wordt waar de stroming niet meer het profiel volgt maar losscheurt. Het zwaard wordt dan "overtrokken" en levert relatief weinig dwarskracht bij een, volgens paragraaf 5.5., hoge weerstand. In de praktijk is overtrekken waar te nemen aan de vele wervelingen die aan de lage-drukzijde (binnenkant) van het zwaard ontstaan. Bij het zeilen komt overtrekken voor als het schip met weinig snelheid door de wind gaat of bij een harde wind in veel golven te hoog aan de wind vaart. Bij de lage snelheden die in deze gevallen voorkomen kan het zwaard zelfs bij grote invalshoeken zijn vereiste aandeel in de dwarskracht niet leveren, zodat het schip sterk verlijert. De tekortkomingen van het overtrokken zwaard moeten dan gekompenseerd worden door de romp en het roer. De hoek van overtrekken is bij het brede zwaard, met de kleinere aspektverhouding, groter dan bij het slanke zwaard (respektievelijk bijna 20° en ruim 10°).
Bij een nog breder en ronder, minder slank, zwaard treedt overtrekken pas bij nog grotere hoeken op. Hoewel het brede zwaard een $1\frac{1}{2}$ keer groter oppervlak heeft dan het smalle, is de dwarskracht in het lineaire gebied, bij kleine invalshoeken minder dan $1\frac{1}{2}$ keer zo groot.

De dwarskracht per m^2 oppervlakte, waarvoor de dwarskrachtcoefficient (figuur 17) een maat is, neemt bij kleine invalshoeken dus duidelijk af naarmate de aspektverhouding of slankheid minder wordt. De experimenteel bepaalde helling van de kromme van dwarskrachtcoefficienten bij kleine invalshoeken is, evenals de nullifthoek, voor beide zwaarden gegeven in tabel VII.
Voor draagvlakken met kleine aspektverhouding is door L. Folger Whicker en L.F. Fehlner in "Free stream characteristics of a family of low aspect-ratio, all movable control surfaces for application to ship design" (report 933, Naval Ship Research and Development Center, 1958) op grond van theoretische afleidingen en experimentele resultaten een formule opgesteld voor de berekening van $\frac{dC_Y}{d\alpha}$, de helling van de kromme van liftcoefficienten:

$$\frac{dC_Y}{d\alpha} = \frac{0.1a_e}{1.8+\cos\Lambda\sqrt{a_e^2/\cos^4\Lambda+4}} \qquad (5.2.1)$$

waarin : a_e = effektieve aspektverhouding (voor draagvlakken met een goede eindplaat is deze gelijk aan 2 keer de geometrische aspektverhouding, voor draagvlakken die het wateroppervlak doorsnijden 1.6 à 2.0 keer)

Λ = pijlhoek

Voor de beide zwaarden is met (5.2.1) de helling van de kromme van dwarskrachtcoefficienten berekend, waarbij als effektieve aspektverhouding de dubbele geometrische aspektverhouding gebruikt is. De resultaten, weergegeven in tabel VII, vertonen kwalitatief een goede overeenkomst met de experimenten. De kwantitatieve overeenkomst is zodanig dat formule (5.2.1) voorlopig alleen voor benaderende berekeningen gebruikt kan worden. Opgemerkt moet worden dat de overeenkomst bij gebruik voor kielen van scherpe jachten zeer goed gebleken is.

Bij de bovenbeschreven metingen zijn de zwaarden kunstmatig voorzien van een weinig ruwe oppervlakte om de stroming in overeenstemming met de werkelijkheid te brengen. Daarnaast zijn de metingen gedeeltelijk herhaald met een volkomen glad zwaardoppervlak. Bij kleine invalshoeken bleek de dwarskracht hier nauwelijks door beinvloed te worden. De hoek waarbij overtrekken optreedt is bij het gladde zwaard echter naar grotere hoeken verschoven, waardoor het lineaire gebied van de dwarskrachtenkromme langer is en de maximale dwarskracht hoger (zie figuur 17). Het verdient dus aanbeveling het zwaard glad af te werken, vooral aan de voorkant. De doorsnede van de neus moet parabolisch of afgerond zijn.

Slecht gemonteerde ijzeren beschermingsbanden en hoekige kanten zijn daar uit den boze. De achterrand kan beter niet afgerond zijn, maar spits uitlopen of, nog beter, recht afgehakt zijn (zie de doorsnede in figuur 15).

De vertikale ligging van het aangrijpingspunt van de dwarskracht is eveneens gemeten. Dit blijkt ongeveer halverwege de diepgang van het zwaard te zijn. De horizontale ligging is niet gemeten, maar uit windtunnelproeven met andere draagvlakken is bekend dat dit op de kwart-koordelijn is.

De invloed van de snelheid op de dwarskracht is gedemonstreerd in figuur 18. Met de methode aangegeven in paragraaf 5.1. is gekontroleerd dat de dwarskrachtproduktie redelijk voldoet aan betrekking (5.1.3.), dat wil zeggen dat de dwarskracht kwadratisch afhankelijk is van de snelheid. Bij gelijke invalshoek geeft een 2 keer zo grote snelheid ruwweg een 2x2=4 keer zo grote dwarskracht, en verder. Wel wordt er bij hogere snelheden enige invloed ondervonden van het golfdal dat aan het wateroppervlak ontstaat en waardoor zowel het oppervlak als de aspektverhouding enigszins afnemen. De dwarskracht (lift-) coefficient (zie uitdrukking (5.1.3)) wordt dan ook in het hoge-snelheidsgebied ongeveer 10% kleiner. Het aangrijpingspunt van de dwarskracht blijft zich, vrijwel onafhankelijk van de snelheid, bevinden op ongeveer de halve diepgang van het zwaard.

Als het schip gaat hellen wordt het ondergedompelde oppervlak van het lijzwaard groter. De richting van de opgewekte liftkracht gaat echter steeds verder afwijken van de horizontaal, waardoor de horizontale komponent van de lift, de dwarskracht, kleiner wordt. Zoals uit figuur 19 blijkt heffen beide effekten elkaar ruwweg op zodat de geproduceerde dwarskracht bij gelijke invalshoek vrijwel onafhankelijk van de helling van het schip is.

Als het zwaard verder opgehaald wordt, dus als de pijlhoek vergroot wordt, wordt het ondergedompelde oppervlak kleiner. Bovendien neemt de verhouding tussen diepgang (spanwijdte) en koorde, de aspektverhouding, af waardoor de dwarskracht per m^2 oppervlak eveneens kleiner wordt. Gezamenlijk geven deze effekten bij een toename van de pijlhoek een sterke afname van de dwarskracht, zoals getoond is in figuur 20. Bij een smal zwaard blijft ook bij gedeeltelijk ophalen het aangrijpingspunt ongeveer halverwege de momentane diepgang.

5.3. Door de romp geleverde dwarskracht

Bij een konstante helling is bij gevarieerde drifthoeken de door de romp geleverde dwarskracht gemeten (figuur 21). Bij een drifthoek nul wordt nog een dwarskracht gemeten omdat het schip een helling heeft. Het onderwaterschip is dan asymmetrisch waardoor de romp werkt als een gewelfd draagvlak. Hoewel het lateraaloppervlak van de romp veel groter is dan dat van het zwaard is de dwarskrachtproduktie veel kleiner. De oorzaak hiervan is de zeer kleine aspektverhouding en de bijzonder ineffektieve vorm van de romp als draagvlak. Door de afgeronde zijden vindt gemakkelijk omstroming van de hoge- naar de lagedrukzijde plaats. De kromme van dwarskrachtcoefficienten is in figuur 17 vergeleken met die van de beide zwaarden. Het verschil in effektiviteit is hiermee gedemonstreerd. De gemeten dwarskracht blijkt lineair afhankelijk van de drifthoek te zijn (zie figuur 21), zodat voor het beschouwde gebied van drifthoeken (tot bijna 10°) betrekking (5.1.2) geldig is. De experimenteel bepaalde waarde van $\frac{dC_Y}{d\alpha}$ is gegeven in tabel VII.

In figuur 21 is opvallend dat door het aanbrengen van een loefbijter, waarvan de vorm gegeven is in figuur 8, de dwarskracht bijna verdubbelt, terwijl de vergroting van het lateraaloppervlak van de romp slechts gering is. De loefbijter, die als draagvlak een relatief gunstige vorm heeft en in een door de romp nog vrijwel ongestoord stromingsveld werkt, levert zelf een dwarskracht, maar heeft bovendien een gunstige invloed op de effektiviteit van de eigenlijke romp door het tegengaan van de omstroming.

Dat voor de dwarskrachtproduktie van de romp vooral het voorschip van belang is wordt gedemonstreerd door de ligging van het aangrijpingspunt. Zonder loefbijter ligt dit punt op ongeveer 24% van de waterlijnlengte voor het midden; met loefbijter schuift het naar voren tot ongeveer 28% voor het midden van de testwaterlijn. Te grote lijgierigheid van een schip kan dus gemakkelijk door het aanbouwen van een loefbijter tegengegaan worden.

5.4. Door het roer geleverde dwarskracht

Door het roer een uitslag te geven wordt een extra dwarskracht door de kombinatie van romp en roer uitgeoefend. Deze kracht is gemeten door de kombinatie onder verschillende hellingshoeken met een drifthoek nul, met gevarieerde snelheden en roerhoeken te slepen. De zwaarden zijn opgetrokken. Een keuze uit de resultaten is getoond in figuur 22.

Vooral bij grote roerhoeken en een hoge snelheid blijken grote krachten uitgeoefend te kunnen worden. Dit valt des te meer op als men in aanmerking neemt dat het roer in het ongunstige stromingsveld van het zog geplaatst is. Een vissend roer, waarvan het gedeelte onder het vlak door een vrijwel ongestoorde stroming getroffen wordt, zal waarschijnlijk beduidend effektiever zijn.

Het experimenteel bepaalde aangrijpingspunt van de dwarskracht ligt op het roer. Dit wil zeggen dat de dwarskracht ontstaat door drukfluktuaties alleen aan weerszijden van het roerblad. Het roer werkt dus, waarschijnlijk door het open schroefraam voor het roer, als een zelfstandige eenheid en niet als een flap aan de romp. In het laatste geval zou door een roeruitslag het drukveld rondom de romp eveneens beinvloed worden en zou de door de kombinatie geleverde dwarskracht waarschijnlijk ergens op het achterschip aangrijpen. Bovengenoemde eigenschap rechtvaardigt uit de metingen de berekening van de dwarskrachtcoefficienten (zie uitdrukking 5.1.1) op basis van het lateraaloppervlak van het roer alleen. Na analyse blijkt betrekking (5.1.1) geldig te zijn; de dwarskracht is dus kwadratisch afhankelijk van de snelheid. Bovendien is de door het roer geleverde dwarskracht, zeker tot uitslagen van 30°, vrijwel lineair afhankelijk van de roerhoek, zodat uitdrukking (5.1.2) eveneens geldig is. De waarde van $\frac{dC_Y}{d\alpha}$ is gegeven in tabel VII.
Ter vergelijking zijn de dwarskrachtcoefficienten van het roer opgenomen in figuur 17. Hierin wordt duidelijk de invloed gedemonstreerd van de aspektverhouding (slankheid) op de helling van de kromme en de invalshoek waarbij overtrekken plaats vindt. (zie ook paragraaf 5.2.)

5.5. Het samenstellen van de door romp, zwaard en roer geleverde dwarskrachten.

In de voorgaande paragrafen zijn de dwarskrachteigenschappen van romp, zwaard en roer afzonderlijk besproken. Als van het samengestelde geheel de invalshoeken bekend zijn zou met de gegevens uit tabel VII de dwarskrachtproduktie van de afzonderlijke delen berekend kunnen worden. De som van deze komponenten blijkt echter niet gelijk te zijn aan de bij het samengestelde geheel gemeten dwarskracht, omdat **er** interaktie tussen de komponenten bestaat. Dit wil zeggen dat het zwaard door de aanwezigheid van de romp andere eigenschappen heeft dan alleen; en omgekeerd. Figuur 24 geeft hiervan een illustratie. Als de Vollenhovese bol een helling van 15° heeft kan de gewenste dwarskracht van 201 kg door verschillende kombinaties van drifthoek en snelheid geleverd worden, overeenkomstig het in (5.1.1) gegeven verband.

Deze kombinaties zijn experimenteel bepaald, waarna eveneens de dwarskrachtproduktie van romp en zwaard afzonderlijk bepaald is in identieke geometrische situaties. De dwarskrachten die zo aan de afzonderlijke delen gemeten zijn, zijn in figuur 24 als percentage van de totaal gewenste dwarskracht van 201 kg gegeven. Er blijkt dan een restant te zijn wat aan interaktie toegeschreven moet worden. De onderlinge beinvloeding van romp en zwaard kan verklaard worden door de snelheidsverandering van het water naast de romp. Als het schip geen drifthoek heeft treedt een oversnelheid op, die in de praktijk waargenomen kan worden en ,zoals bij een kieljacht gemeten is, tot 10% van de scheepssnelheid kan bedragen, Als de drifthoek van de romp groter wordt neemt de oversnelheid ter plaatse van het lijzwaard steeds meer af om tenslotte waarschijnlijk in een ondersnelheid te veranderen. Aan de loefzijde wordt de oversnelheid juist groter. In figuur 23 is dit geillustreerd. Een oversnelheid geeft een vergroting van de dwarskrachtproduktie, dus een gunstige vorm van de interaktie, een ondersnelheid het tegenovergestelde.
Figuur 24 demonstreert dat bij een kombinatie van grote snelheid en kleine drifthoek de dwarskrachtbijdrage ten gevolge van interaktie groot is. Bij afnemende snelheid, en daardoor toenemende drifthoek, wordt de positieve uitwerking van de interaktie minder om tenslotte zelfs negatief te worden. Waarschijnlijk bestaat het grootste gedeelte van de interaktieverschijnselen uit de bovenbeschreven invloed van de romp op de dwarskrachtproduktie van het zwaard. De invloed van zwaard op romp wordt veel kleiner verondersteld. De onderlinge beinvloeding van zwaard en roer wordt vanwege de grote afstand verwaarloosd, terwijl die van romp en roer al in de meetresultaten verwerkt is omdat ze in kombinatie beproefd zijn. Het kan voordelig zijn gebruik te maken van de positieve uitwerking van interaktieverschijnselen. Aan-de-wind varend is het daarom beter de snelheid hoog te houden, ogenschijnlijk ten koste van een verlies aan hoogte, dan te laag. De grote drifthoek die bij een te lage snelheid optreedt wordt meestal onderschat, zodat het hoog aan-de-wind varen slechts suggestie blijkt te zijn. De invloed van de drifthoek op de effektiviteit van de zeilen, zoals die in paragraaf 4.2. besproken en in figuur 14 geillustreerd is, moet hierbij tevens beschouwd worden.

5.6. Door de zwaarden ondervonden weerstand.

Figuur 25 toont de weerstand die door de beide zwaarden ondervonden wordt, uit de modelexperimenten berekend voor de Vollenhovese bol. De kleinste weerstand wordt gemeten als de invalshoek bijna nul is. Dit is de profielweerstand (zie ook paragraaf 5.1). Naarmate de invalshoek, dus ook de geleverde dwarskracht, toeneemt wordt de totale weerstand groter. De toename is de geinduceerde weerstand. Na een analyse volgens de methode die in paragraaf 5.1. beschreven is blijkt de geinduceerde weerstand kwadratisch afhankelijk te zijn van de snelheid en de effektieve invalshoek, mits het zwaard niet "overtrokken" wordt. De geinduceerde weerstand voldoet in dat gebied aan betrekking (5.1.5), waarvoor de waarde van de geinduceerde-weerstandscoefficient gegeven is in tabel VII. Als het zwaard overtrokken wordt neemt de weerstand ook relatief sterk toe. Voor dit gebied van invalshoeken, bij het smalle zwaard boven ongeveer 15°, bij het brede boven 20°, is uitdrukking (5.1.5) niet meer geldig.

Bij verandering van snelheid of helling verandert de weerstandscoefficient nauwelijks. De verhouding tussen dwarskracht en weerstand blijft dus praktisch konstant.

Als het zwaard opgehaald wordt, dus als de pijlhoek groter en daarmee de aspektverhouding kleiner wordt, neemt de geinduceerde-weerstandscoefficient bij toenemende pijlhoeken af, bij pijlhoeken groter dan ongeveer 30° echter minder dan de dwarskrachtcoefficient. Als het zwaard te ver opgehaald wordt, wordt de verhouding tussen weerstand en dwarskracht groter, d.w.z. ongunstiger. Bij aande-wind varen moet het zwaard dus voldoende steil staan. Als dan het schip te loefgierig wordt is het uit rendementsoverwegingen beter de zwaardbout naar achteren te verplaatsen of een grotere roerhoek (met grotere roerkracht) te geven, dan het zwaard te ver op te halen.

5.7. Door de romp ondervonden weerstand.

Omdat de dwarskracht die door de romp zonder zwaard geleverd wordt gering is, is ook de absolute waarde van de geinduceerde weerstand niet groot, zeker niet ten opzichte van de "profielweerstand" van de romp (de wrijvings-, vorm- en golfweerstand). Uit een analyse van de geinduceerde weerstand volgens de in paragraaf 5.1. beschreven methode blijkt voor kleinere drifthoeken (zeker beneden 10°) bij benadering formule (5.1.5) geldig te zijn. De experimenteel bepaalde waarde van de coefficient $C_{D_i}^{*}$ is gegeven in tabel VII, zowel voor de romp zonder als met loefbijter. Hierbij is opvallend dat door het aanbrengen van een loefbijter de geinduceerde weerstand vrijwel evenredig met de dwarskracht toeneemt.

De geinduceerde weerstand is echter een fraktie van de totale weerstand zodat de verhouding van dwarskracht tot totale weerstand wél toeneemt. Omdat juist deze verhouding voor het zeilen aan-de-wind belangrijk is kan het gunstig zijn een platbodem te voorzien van een loefbijter. Hierbij moet opgemerkt worden dat de wrijvings- en golfweerstand van het schip door een loefbijter niet meetbaar toenemen.

5.8. Door het roer ondervonden weerstand

De geinduceerde weerstand van het roer blijkt na analyse bij de gemeten roerhoeken (30° of kleiner) goed te voldoen aan uitdrukking (5.1.5). Hoewel de experimenteel bepaalde waarde van $C_{D_i}^{*}$ in geringe mate afhankelijk blijkt te zijn van de scheepssnelheid en de hellingshoek, is in tabel VII één waarde gegeven die voor algemeen gebruik goed geacht wordt. Omdat de geinduceerde weerstand kwadratisch afhankelijk is van de roerhoek neemt deze bij grotere roerhoeken onevenredig snel toe. Bij een roerhoek van b.v. 20° en een scheepssnelheid van 5 kn betekent bij de Vollenhovese bol de geinduceerde weerstand een toename van ongeveer 45% van de scheepsweerstand. Aan-de-wind zeilend moet het schip dus zo getrimd worden dat de roerhoeken niet groter dan 5° à 10° zijn. Is dit niet mogelijk zonder dat de goede instelling van zwaard en zeilen geweld aangedaan wordt dan moeten konstruktieve veranderingen van het schip overwogen worden (verplaatsing van mast of zwaarden).

6. Konklusies

De belangrijkste konklusies die uit het onderzoek aan de Vollenhovese bol getrokken kunnen worden zijn :

-Het belangrijkste verschil in geometrie tussen een rond en een scherp jacht van gelijke lengte is de volle vorm en de veel grotere waterverplaatsing van het ronde jacht.

-De absolute waarde van de weerstand van een rond jacht is hoog vanwege de grote waterverplaatsing.

-Door de hoge weerstand en het relatief geringe zeiloppervlak is de snelheid-voor-de-wind van de Vollenhovese bol matig.

-Door bovengenoemde oorzaken is de snelheid-in-de-wind evenmin hoog.

-De dwarskrachtproduktie van zwaarden, romp en roer is lineair afhankelijk van de invalshoek en kwadratisch afhankelijk van de snelheid.

-Hoe slanker het zwaard, des te groter is de dwarskracht per m^2 oppervlak. Het zeezwaard is als dwarskrachtleverancier zeer effektief.

-De dwarskrachtproduktie van de romp is gering. Door het aanbrengen van een loefbijter kan deze sterk vergroot worden, waardoor tevens het aangrijpingspunt (lateraalpunt) naar voren verschuift.

-Er bestaat een sterke onderlinge beinvloeding (interaktie) van romp en zwaard die zowel een positieve als negatieve uitwerking op de dwarskrachtleverantie kan hebben.

-De geinduceerde weerstand van zwaarden, romp en roer is kwadratisch afhankelijk van de snelheid en de invalshoek.

-Aan de wind zeilend is bij een bepaalde vereiste dwarskracht de weerstand minimaal bij roerhoeken van 5° à 10° en een toespoor van het zwaard van 2° à 5°. De optimale hoeken zijn afhankelijk van de windsnelheid en de vorm en afmetingen van roer en zwaar. Bij weinig wind behoren de hoeken het kleinst te zijn.

Tabel I : Vollenhovese bol : Belangrijkste gegevens van schip en model.

Symbool	omschrijving	eenheid	schip	model (1)
L_{OA}	lengte over alles	m	8.50	1.700
L_{TWL}	lengte op testwaterlijn (zonder stevens)	m	7.00	1.400
B_{MAX}	maximum breedte romp (zonder berghout)	m	2.90	0.580
B_{TWL}	max. breedte op testwaterlijn	m	2.60	0.520
T_H	diepgang van de romp (zonder scheg en stevens)	m	0.58	0.116
T	maximale diepgang met zwaard neer	m	1.65	0.330
Δ_H	deplacement romp (zonder roer,scheg,zwaard en stevens)	1000 kg	5.611	44.888 kg
Δ	deplacement totaal (zonder zwaard)	1000 kg	5.680	45.440 kg
LCB_H	ligging drukkingspunt romp in lengte tov midden testwaterlijn	m	+0.166(2)	0.033
$L_{TWL}/\Delta_H{}^{1/3}$	lengte-deplacement verhouding		3.94	
B_{TWL}/T_H	breedte-diepgang verhouding		4.48	
LCB_H/L_{TWL}	relatieve ligging drukkingspunt	%	+2.37 (2)	
C_{P_H}	prismatische coefficient van de romp		0.69	
S	totaal nat oppervlak (zonder zwaard)	m^2	20.9	0.837
z_{G_S}	ligging gewichtszwaartepunt tov testwaterlijn	m	0.20	
SA_{eb}	effektief zeiloppervlak aan-de-wind	m^2	32.8	
SA_{ed}	effektief zeiloppervlak voor-de-wind	m^2	34.4	
z_{CE_e}	effektief zeilpunt boven testwaterlijn	m	4.28	

(1) modelschaal 1:5

(2) + is vóór het midden, - is achter het midden

Tabel II :

Vollenhovese bol : vergelijking van de belangrijkste gegevens met die van een kieljacht.

omschrijving	bol	kieljacht
lengte over alles	8.50 m	8.40 m
lengte op waterlijn	7.00 m	7.00 m
maximum breedte romp	2.90 m	2.81 m
maximum breedte waterlijn	2.60 m	2.22 m
diepgang romp alleen	0.58 m	0.44 m
maximum diepgang	1.65 m	1.58 m
totale waterverplaatsing	5.68 ton	3.03 ton
blokcoefficient romp	0.53	0.44
$L_{TWL}/\Delta_H^{1/3}$ (slankheidsgraad)	3.9	4.9
prismatische coefficient	0.69	0.58
relatieve ligging drukkingspunt	2.4% vóór	3.8% achter
effektief zeiloppervlak	33 m^2	28 m^2
$SA_{eb}/\Delta^{2/3}$(relatief zeiloppervlak)	10.2	13.3
verhouding effektief zeiloppervlak/ nat oppervlak	1.57	1.76

Tabel III :

Vollenhovese bol : weerstand rechtop en zonder drift.

scheepssnelheid		weerstand	Froudegetal	
v_s m/s	V_s kn	R_{T_s} kg	F_n(1)	R_{T_s}/Δ_H kg/ton
1.342	2.61	8.8	0.162	1.6
1.565	3.04	12.3	0.189	2.2
1.789	3.48	16.8	0.216	3.0
2.012	3.91	23.6	0.243	4.2
2.236	4.35	34.6	0.270	6.2
2.348	4.56	42.1	0.283	7.5
2.460	4.78	51.2	0.297	9.1
2.571	5.00	61.2	0.310	10.9
2.683	5.22	72.9	0.324	13.0
2.795	5.43	85.5	0.337	15.2
2.907	5.65	100.4	0.351	17.9
3.019	5.87	115.2	0.364	20.5
3.130	6.08	131.4	0.378	23.4
3.242	6.30	151.1	0.391	26.9
3.354	6.52	175.7	0.405	31.3
3.466	6.74	205.8	0.418	36.7
3.578	6.96	240.8	0.432	42.9
3.690	7.17	280.4	0.445	50.0
3.801	7.39	325.6	0.459	58.0

(1) : $F_n = \dfrac{v_s(m/s)}{\sqrt{gL_{TWL}}}$

Tabel IV :

Vollenhovese bol : Vergelijking van de weerstand per ton waterverplaatsing van de romp.

Froudegetal F_n	R_{T_s}/Δ_H kg/ton	
	Voll. bol $L_{TWL}=7.0$	kieljacht $L_{TWL}=7.0$
0.20	2.5	3.8
0.25	4.6	6.1
0.30	9.5	9.5
0.35	17.7	15.5
0.40	29.6	31.0

Tabel V :

Vollenhovese bol : Prestaties bij standaard windsnelheden

windsnelheid	grootheid	Vollenhovese bol			kieljacht
		smal zw. toesp. 1.5°	smal zw. toesp.6°	breed zw. toesp.1.5°	
3.5 m/s ≙ 6.8 kn	v_d	1.47	1.47	1.47	1.88
	$v_d/\sqrt{gL_{TWL}}$	0.177	0.177	0.177	0.227
	v_{mg}	1.23	1.27	1.18	1.61
	$v_{mg}/\sqrt{gL_{TWL}}$	0.149	0.153	0.143	0.194
	$v_s/\sqrt{gL_{TWL}}$	0.226	0.218	0.222	0.258
	ϕ	6.1	6.3	5.8	8.9
	β	-	-0.1	-	2.9
7.0 m/s ≙ 13.6 kn	v_d	2.48	2.48	2.48	3.23
	$v_d/\sqrt{gL_{TWL}}$	0.299	0.299	0.299	0.390
	v_{mg}	1.88	1.84	1.87	2.27
	$v_{mg}/\sqrt{gL_{TWL}}$	0.226	0.222	0.226	0.274
	$v_s/\sqrt{gL_{TWL}}$	0.294	0.294	0.281	0.339
	ϕ	14.4	14.8	14.8	21.2
	β	5.2	1.6	3.7	4.7
10.0 m/s ≙ 19.4 kn	v_d	3.08	3.08	3.08	-
	$v_d/\sqrt{gL_{TWL}}$	0.372	0.372	0.372	-
	v_{mg}	2.04	2.12	2.03	2.36
	$v_{mg}/\sqrt{gL_{TWL}}$	0.246	0.256	0.245	0.284
	$v_s/\sqrt{gL_{TWL}}$	0.347	0.331	0.345	0.353
	ϕ	22.6	23.0	22.3	29.9
	β	5.4	2.9	3.1	7.1

v_d = snelheid voor-de-wind in m/s

v_{mg} = snelheid in-de-wind in m/s

v_s = scheepssnelheid in m/s bij zeilen aan-de-wind

ϕ = hellingshoek in graden, aan-de-wind

β = drifthoek in graden, aan-de-wind

g = versnelling van de zwaartekracht in m/s^2

L_{TWL} = effektieve lengte testwaterlijn in m (voor beide schepen 7.00m).

Tabel VI :

Vollenhovese bol : Gezeilde tijd op een standaardbaan (1)

schip	gezeilde tijd in uur/min/s		
	v_{tw}=3.5 m/s	v_{tw}=7.0 m/s	v_{tw}=10.0 m/s
Vollenhovese bol	7/40/05	4/49/11	4/11/33
kieljacht	5/55/52	3/51/27	--

(1) : De baan is 10 mijl lang en wordt heen en terug gevaren. De windrichting is evenwijdig aan de baan.

Tabel VII :

Vollenhovese bol : Dwarskracht- en weerstandseigenschappen van zwaard, romp en roer afzonderlijk.

onderdeel	A(1) m^2	$\frac{dC_Y}{d\alpha}$(2)	α_o(2) graden	$C_{D_i}^*$ (3)
experimenteel bepaald				
smal zwaard	0.83	0.070	-3.4	0.00081
breed zwaard	1.24	0.055	-4.1	0.00077
romp zonder loefbijter(4)	4.46	0.006	+1.3	0.00008
romp met loefbijter(4)	4.80	0.008	+0.9	0.00011
roer aan romp (5)	0.64	0.028	-	0.00032
berekend				
smal zwaard	0.83	0.077	-	-
breed zwaard	1.24	0.067	-	-

(1): A = geprojekteerd oppervlak in m^2

(2):Zie uitdrukking (5.1.3);α in graden

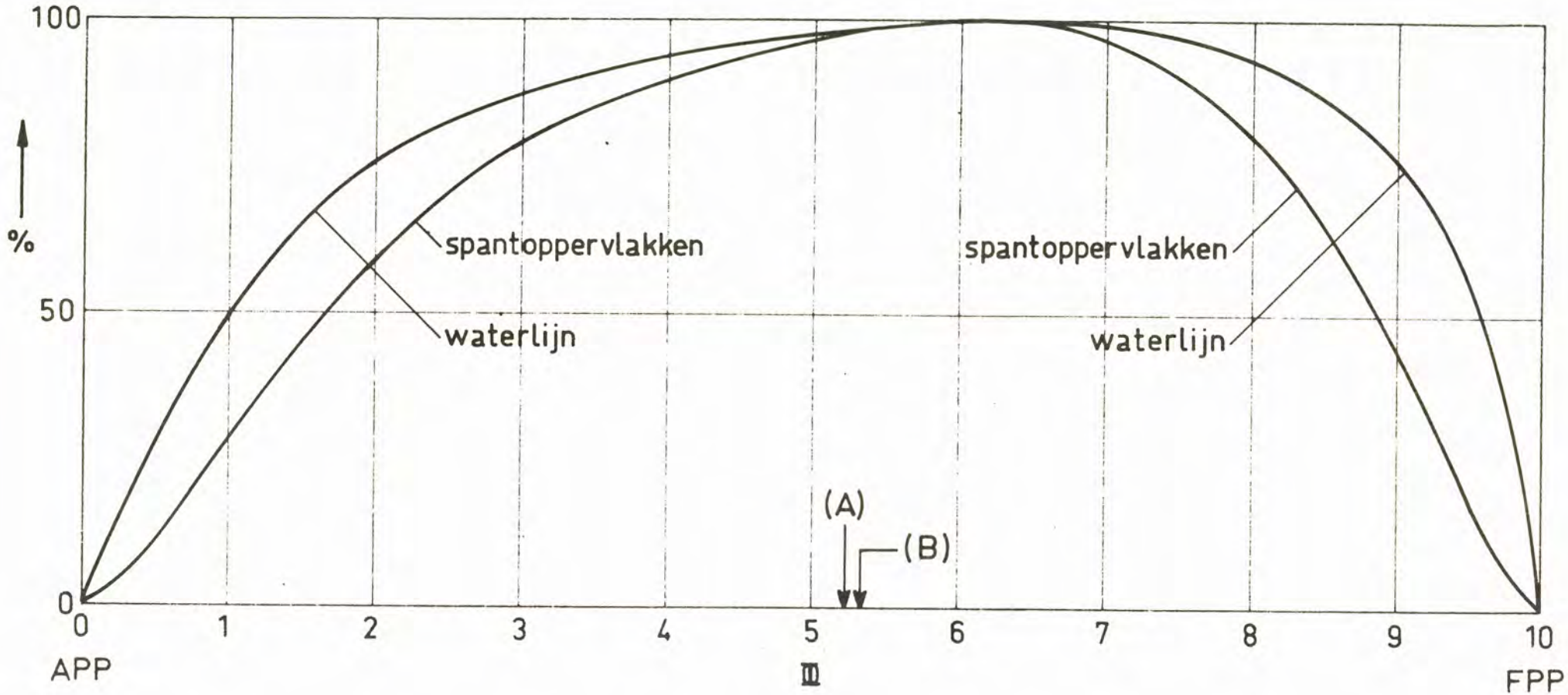
(3):Zie uitdrukking (5.1.5);α in graden, v in m/s

(4):De gegeven waarden gelden voor een helling van de romp van 15^o. Bij hellingen van 10^o en 20^o zijn de coefficienten niet signifikant verschillend. De metingen zijn uitgevoerd met het roer aangehangen in de middenstand

(5):De coefficienten zijn gemeten met het roer aan de romp onder een helling van 15^o. Bij andere hellingshoeken verschillen ze niet noemenswaard. Voor de berekening is het lateraaloppervlak van het roer gebruikt (zie paragraaf 5.4.)

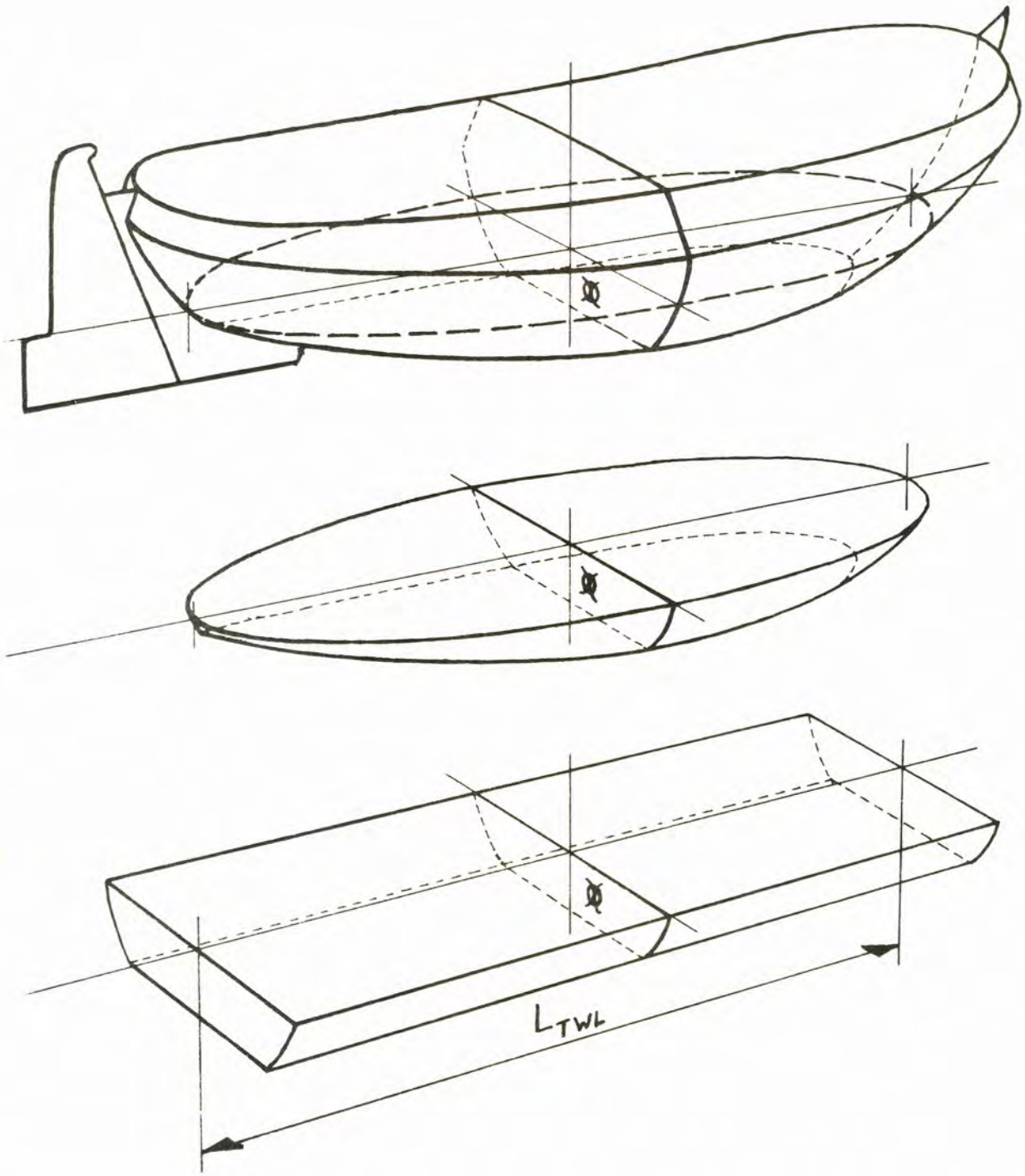
Figuren :

1.Vorm testwaterlijn en kromme van spantoppervlakken
2.Illustratie prismatische coefficient
3.Krachtenspel op een voor-de-wind varend jacht en model
4.Krachtenspel op een aan-de-wind varend jacht en model (achteraanzicht)
5.Krachtenspel op een aan-de-wind varend jacht en model (zijaanzicht)
6.Krachtenspel op een aan-de-wind varend jacht (bovenaanzicht)
7.Geschematiseerde inrichting en bevestiging van het model
8.Beproefde zwaarden en loefbijter
9.Weerstand schip, varend onder helling en met drift
10.Vergelijking van de weerstand van Vollenhovese bol en kieljacht, rechtop varend zonder drift
11.Snelheid-voor-de-wind
12.Snelheidsdiagram van een aan-de-wind varend jacht
13.Optimale snelheid-in-de-wind
14.Invloed van de drifthoek op de invalshoek van het zeil
15.Geometrische definities van het zwaard
16.Door zwaard geleverde dwarskracht bij gevarieerde invalshoek
17.Dwarskrachtcoefficienten van zwaarden, romp en roer
18.Door zwaard geleverde dwarskracht bij variabele snelheid
19.Door zwaard geleverde dwarskracht bij variabele hellingshoek
20.Door zwaard geleverde dwarskracht bij variabele pijlhoek
21.Door de romp geleverde dwarskracht bij een variabele drifthoek
22.Door roer aan romp geleverde dwarskracht bij een variabele roerhoek
23.Snelheidsveld naast de romp, zonder en met een grote drifthoek
24.Bijdrage van romp en zwaard aan de totaal vereiste dwarskracht.
25.Door zwaard ondervonden weerstand bij variabele invalshoek.



A: ligging drukkingspunt romp in lengte
B: ligging waterlijnzwaartepunt in lengte

Fig. 1: Vorm testwaterlijn en kromme van spantoppervlakken



$$\text{prismatische coefficient} = \frac{\text{waterverplaatsing}}{\text{oppervlakte } \boxtimes \times L_{TWL}}$$

Fig. 2 : Illustratie prismatische coefficient

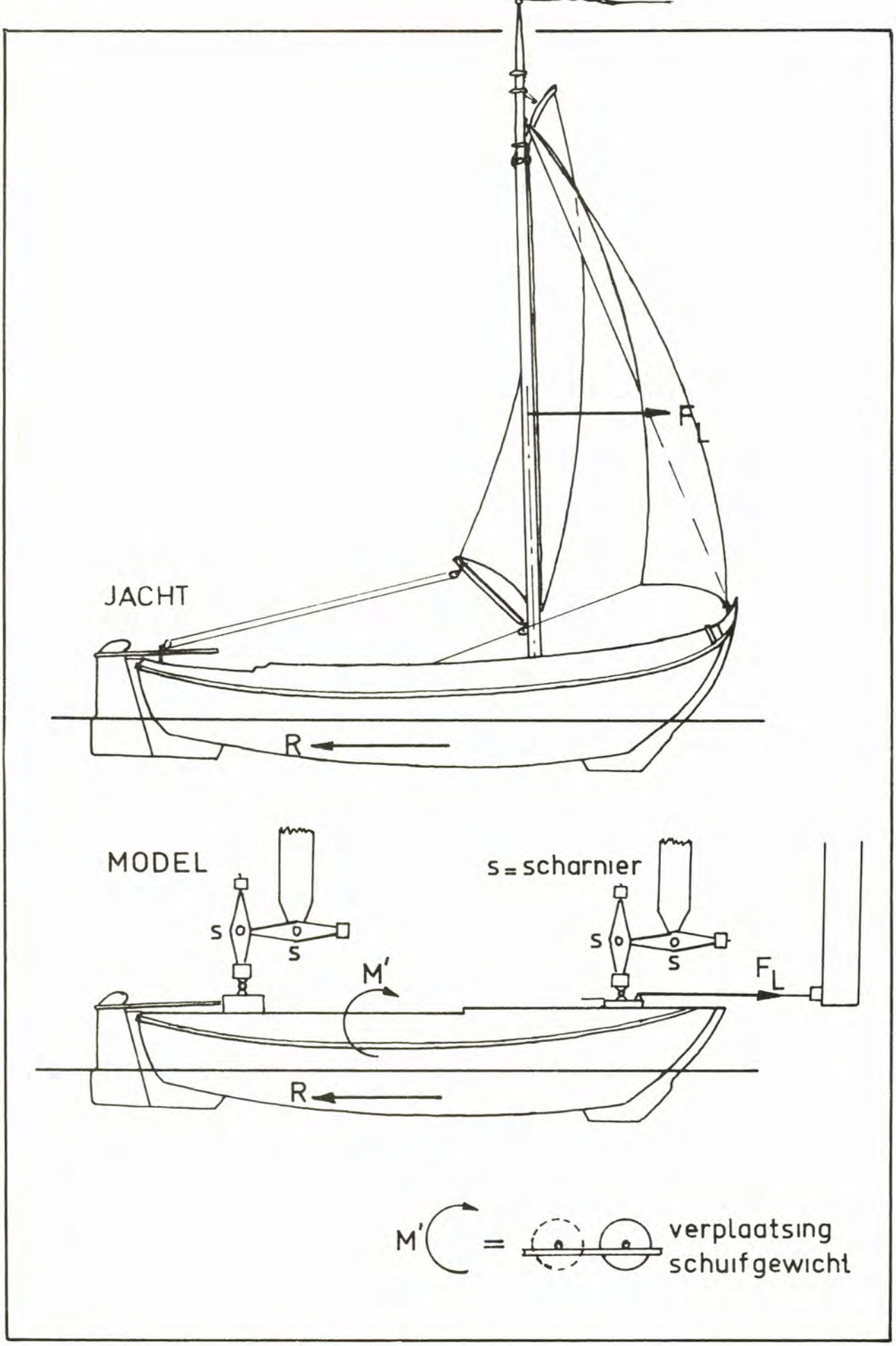


Fig. 3 : Krachtenspel op een voor-de-wind varende jacht en model

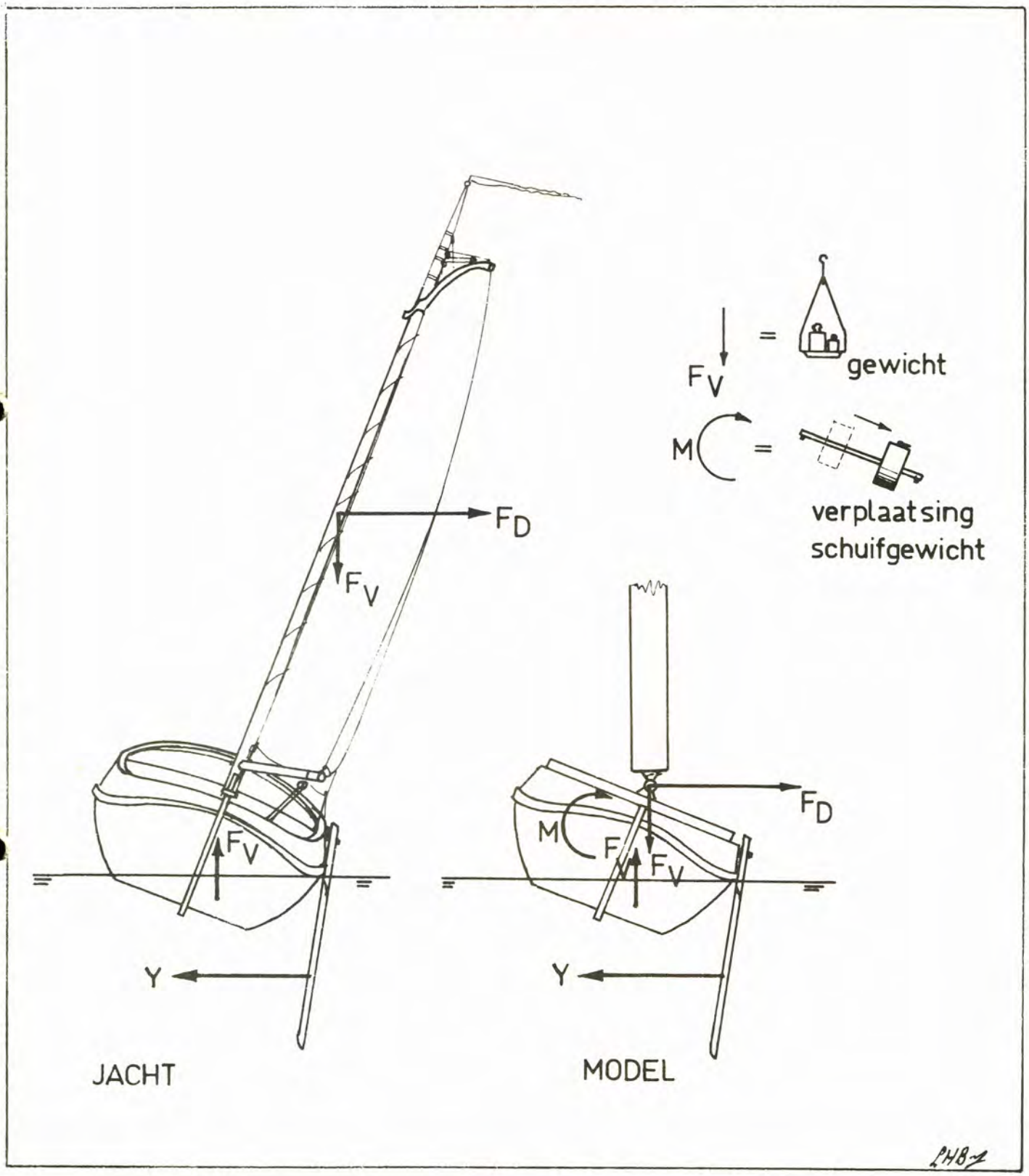


Fig. 4 : Krachtenspel op een aan-de-wind varend jacht en model (achteraanzicht)

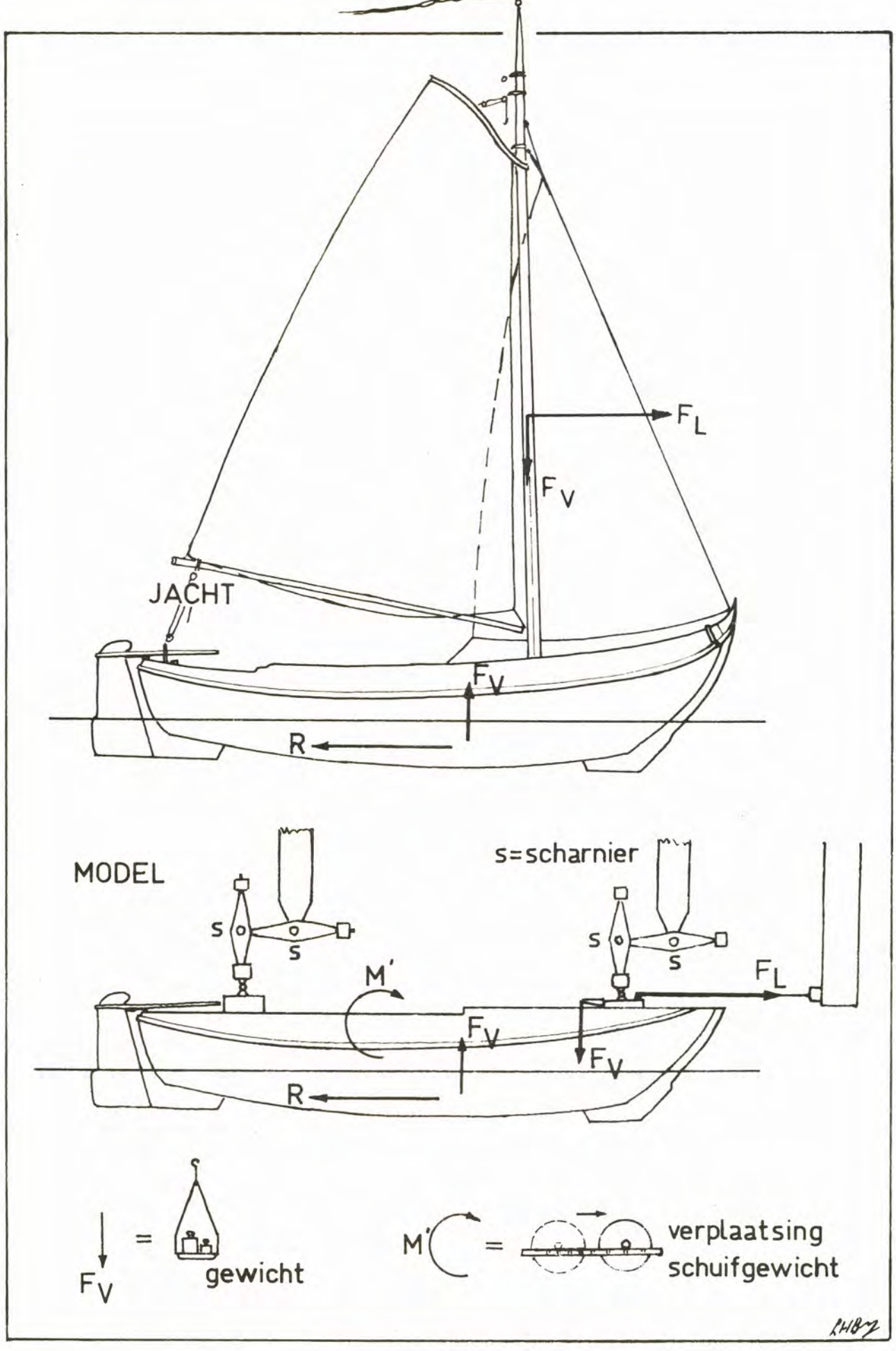
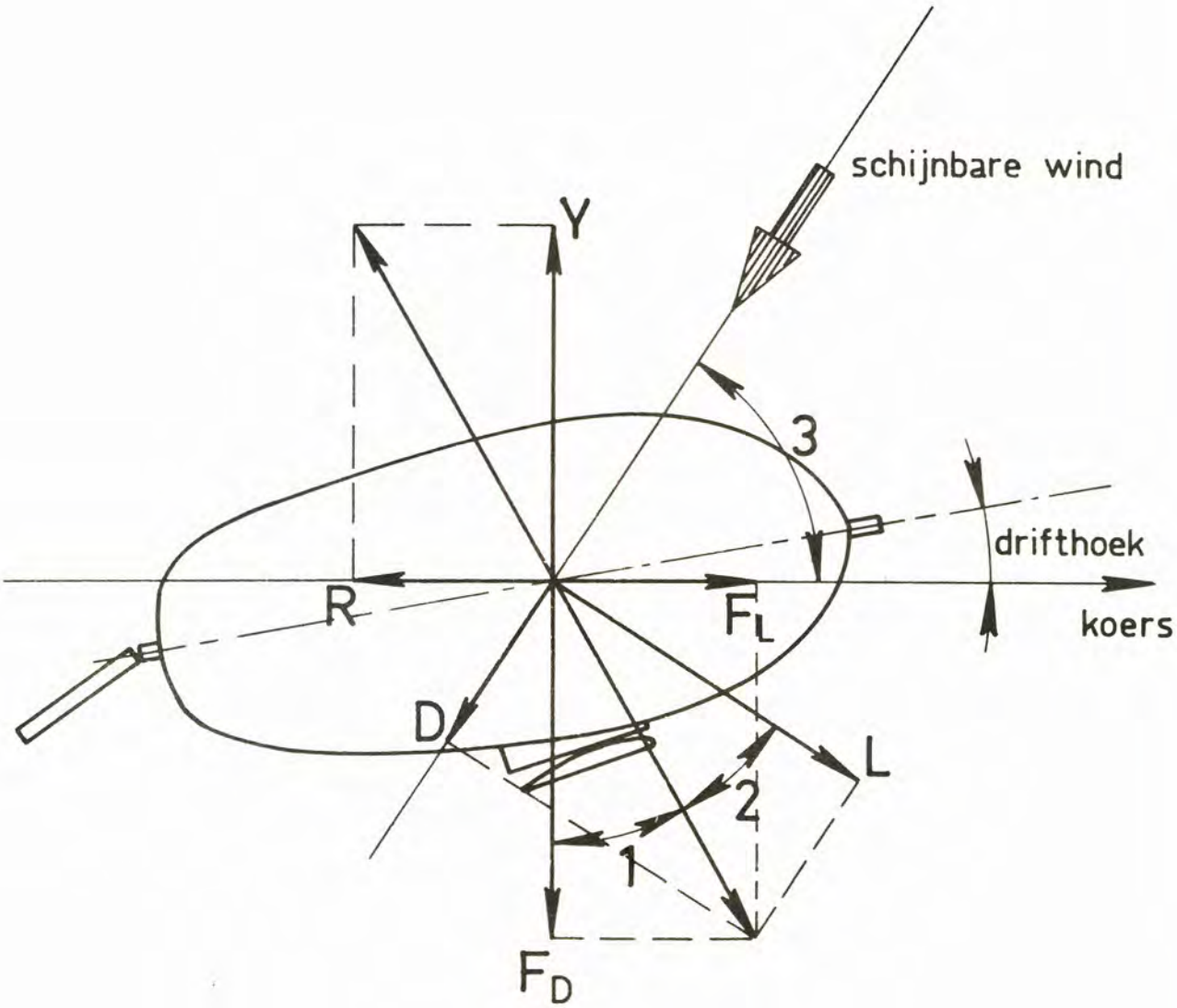


Fig. 5 : Krachtenspel op een aan -de-wind varend jacht en model (zijaanzicht)



Y = F_D
R = F_L
hoek 3 = hoek 1 + hoek 2

Fig. 6 : Krachtenspel op een aan-de-wind varend jacht (bovenaanzicht)

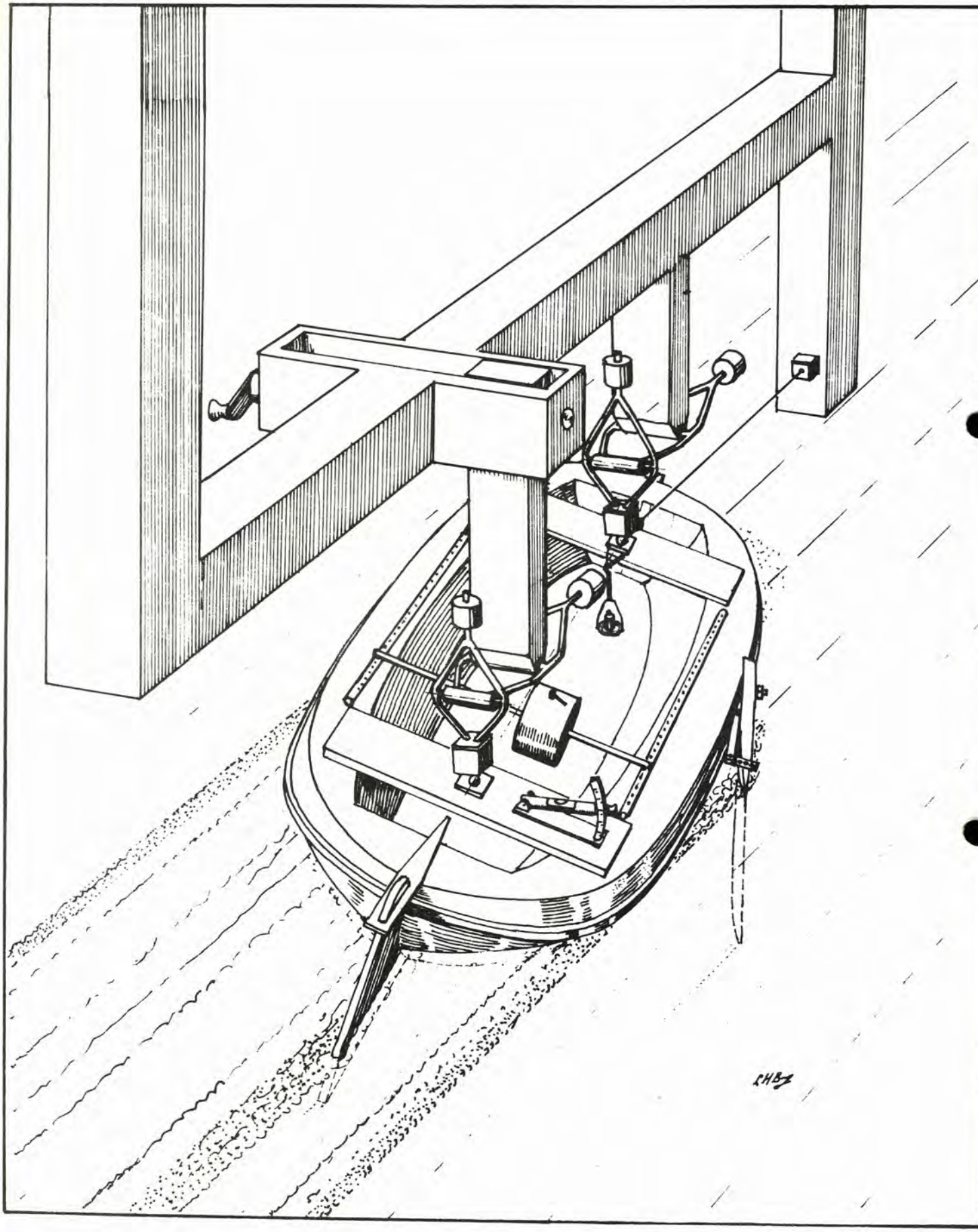
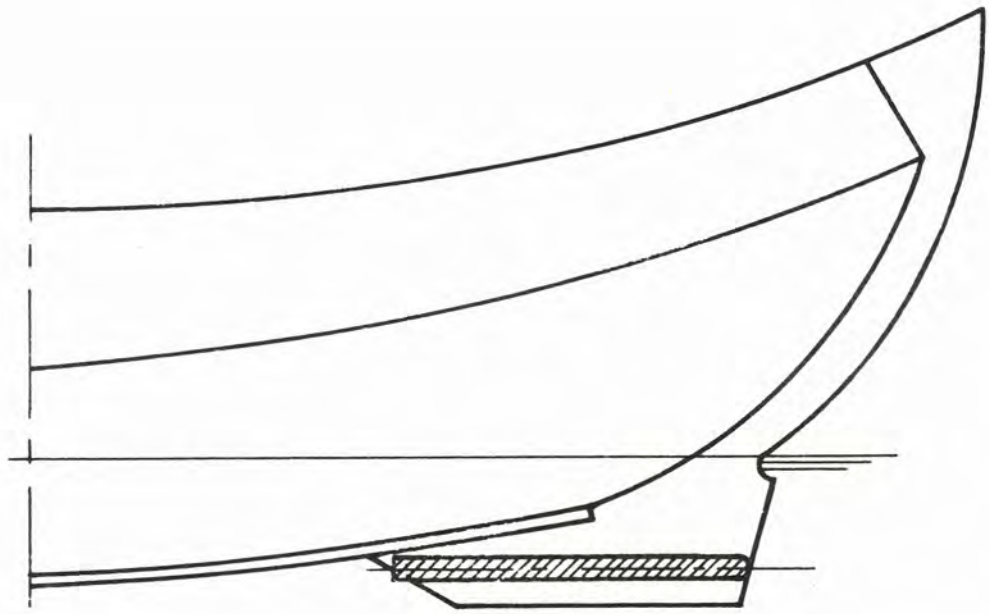


Fig. 7 : Geschematiseerde inrichting en bevestiging van een model



loefbijter

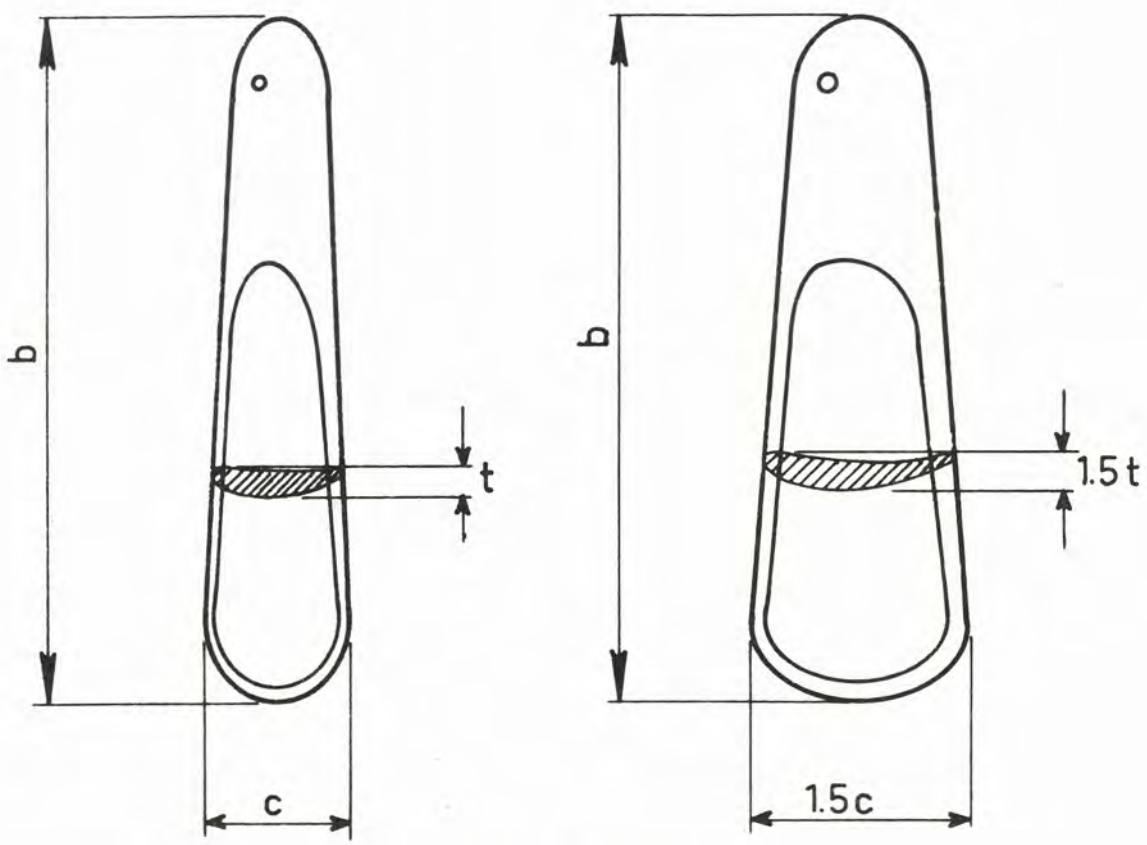


Fig. 8 : Beproefde zwaarden en loefbijter

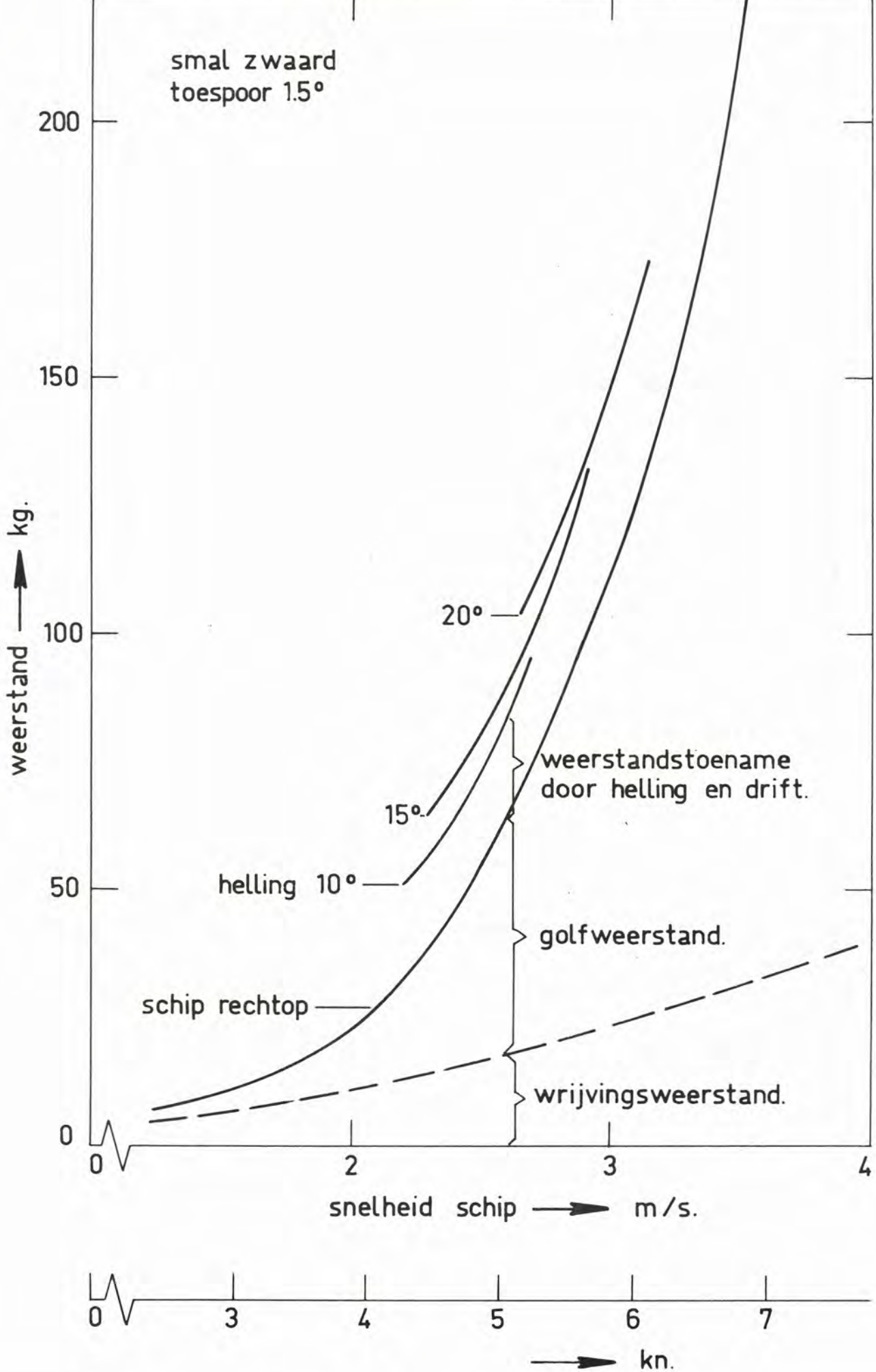


Fig. 9 : Weerstand schip, varend onder helling en met drift

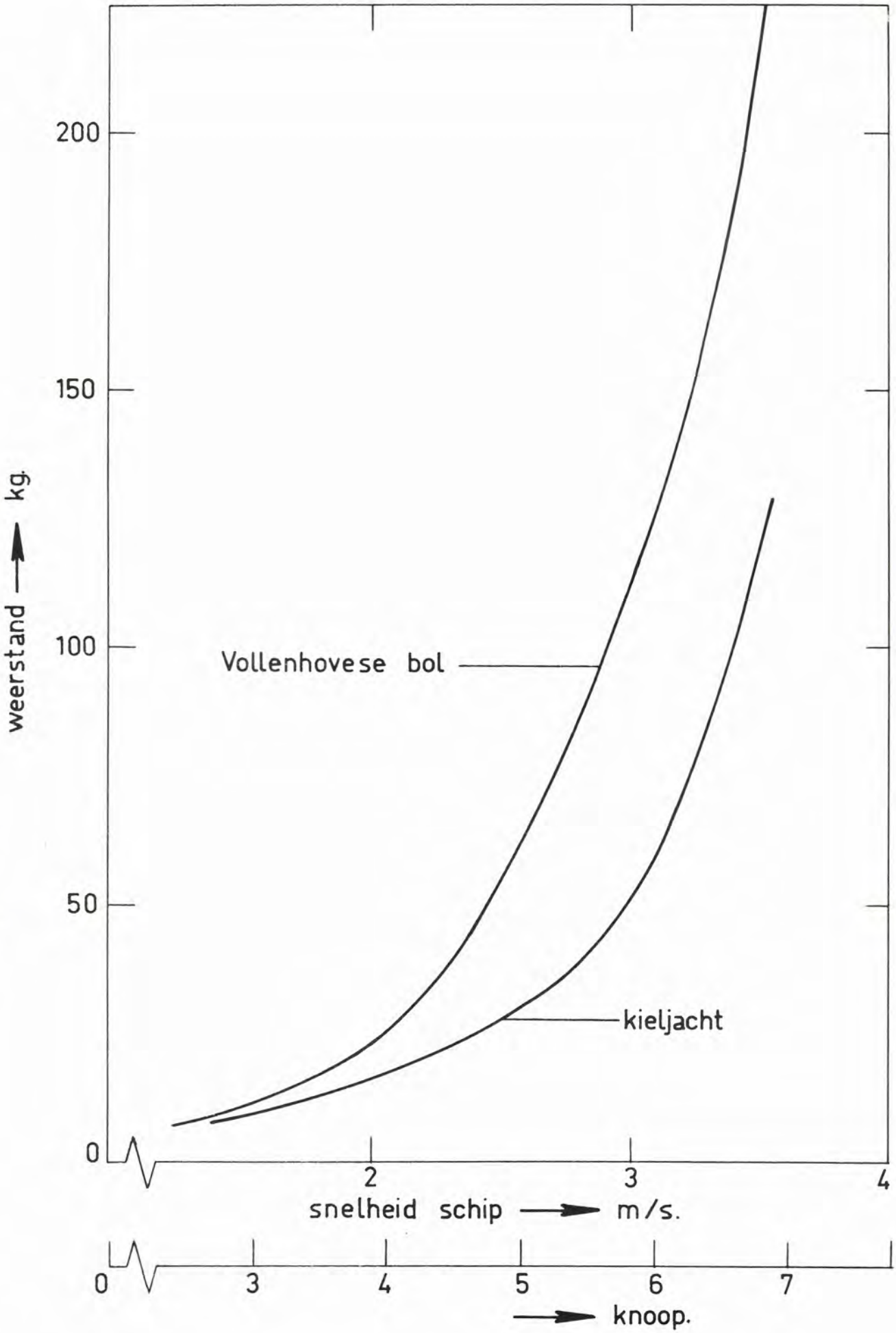


Fig. 10 : Vergelijking van de weerstand van Vollenhovese bol en kieljacht, rechtop varend zonder drift

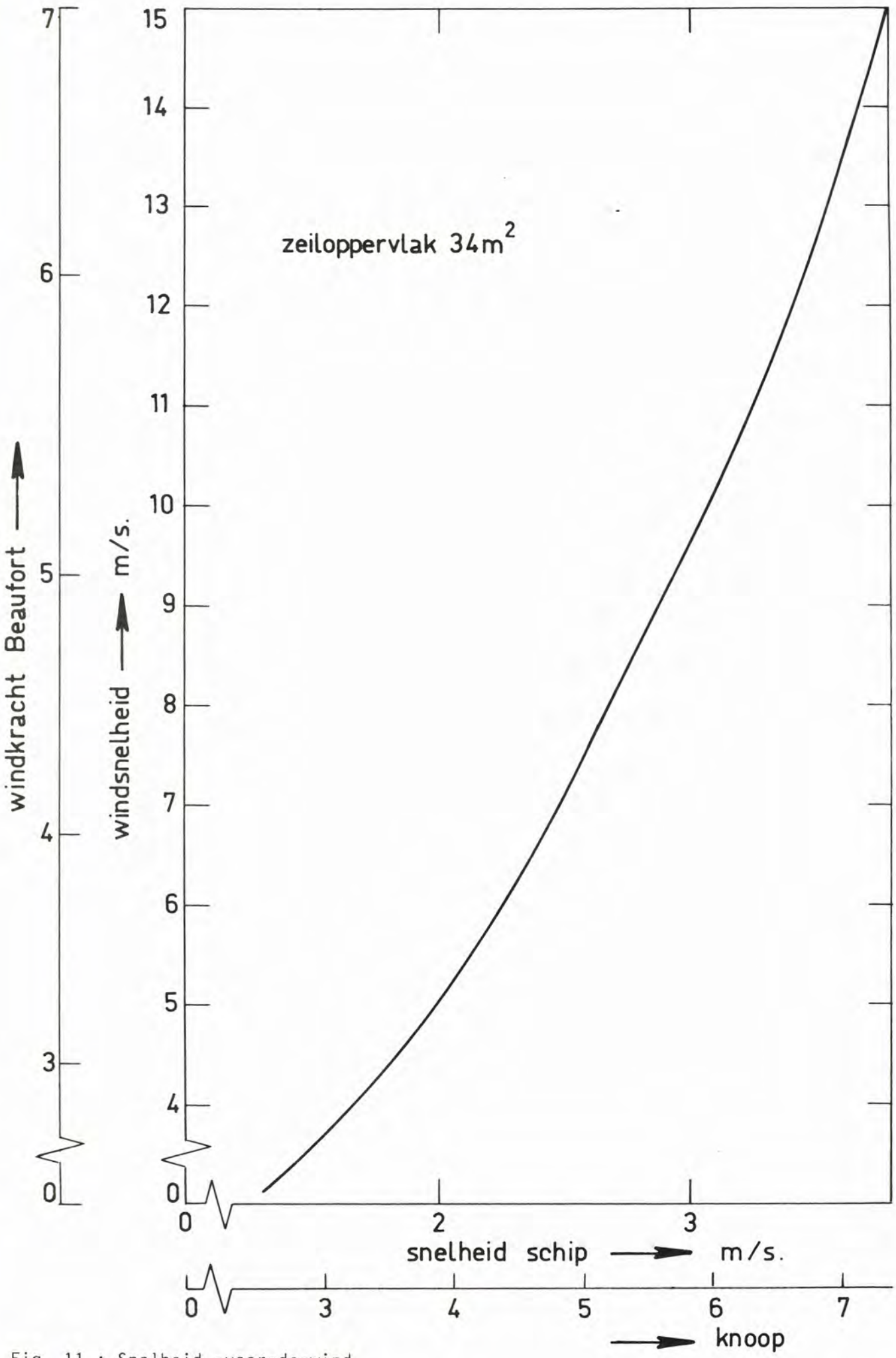


Fig. 11 : Snelheid -voor-de-wind

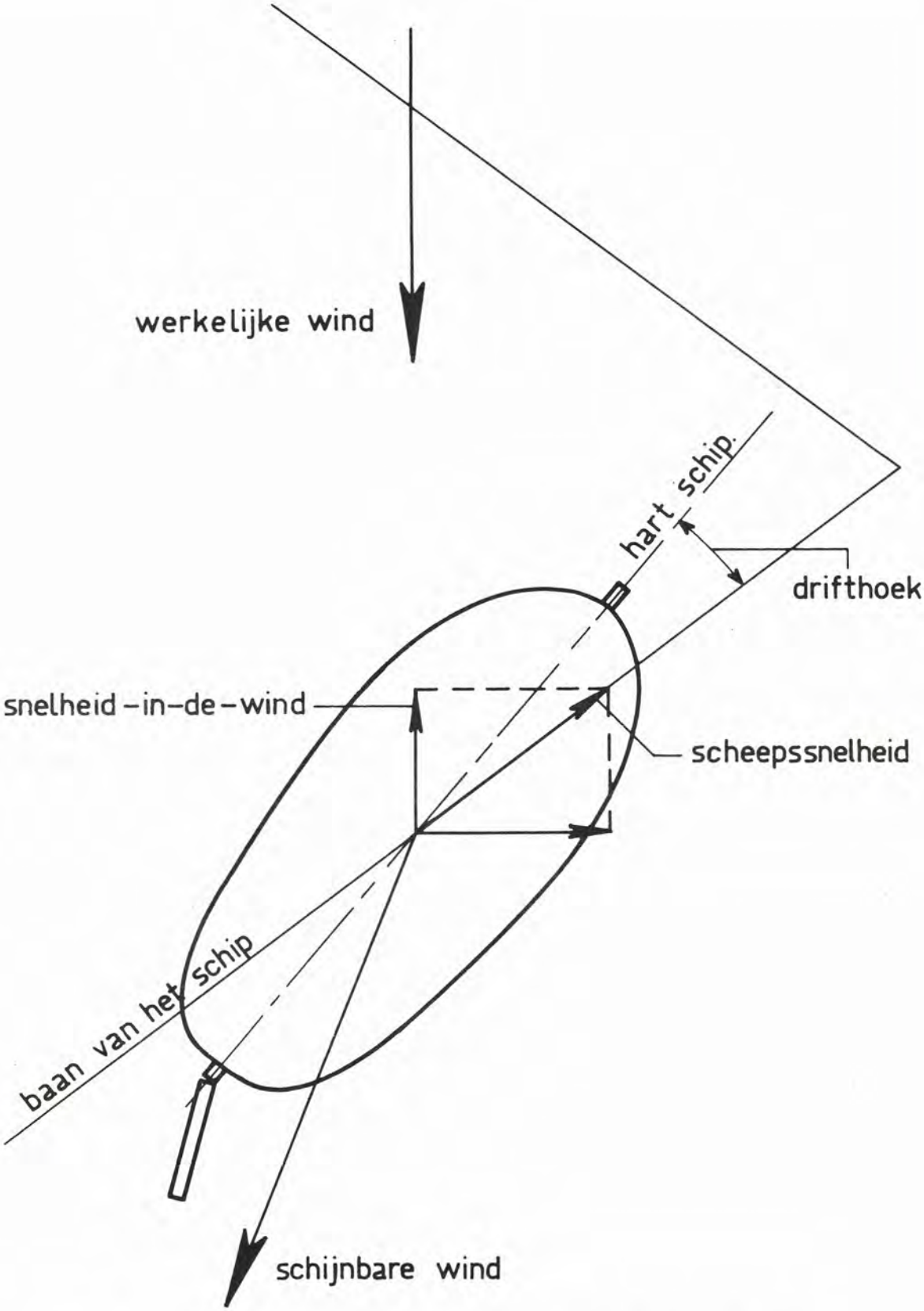


Fig. 12 : Snelheidsdiagram van een aan-de-wind varend jacht

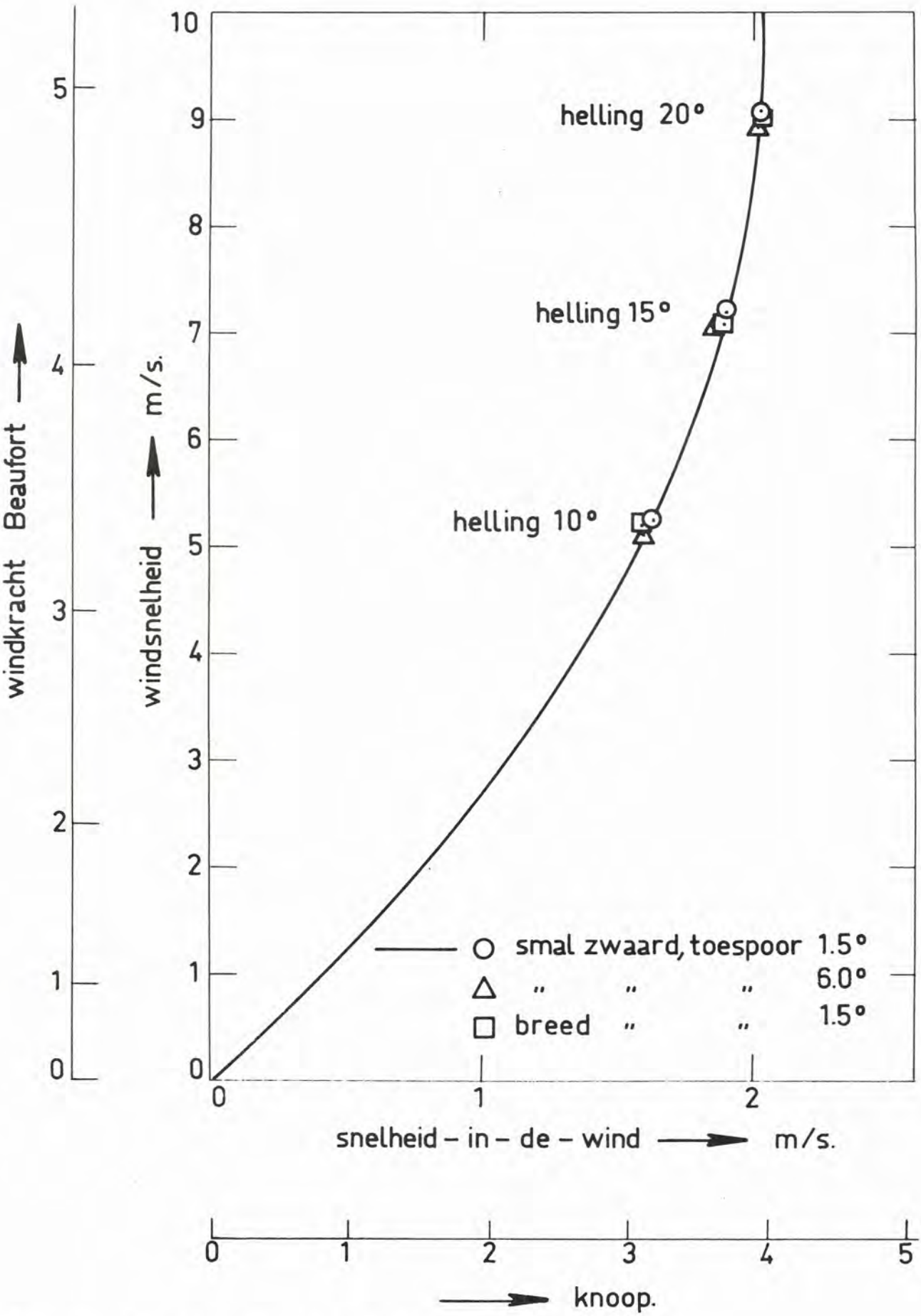


Fig. 13 : Optimale snelheid-in-de-wind

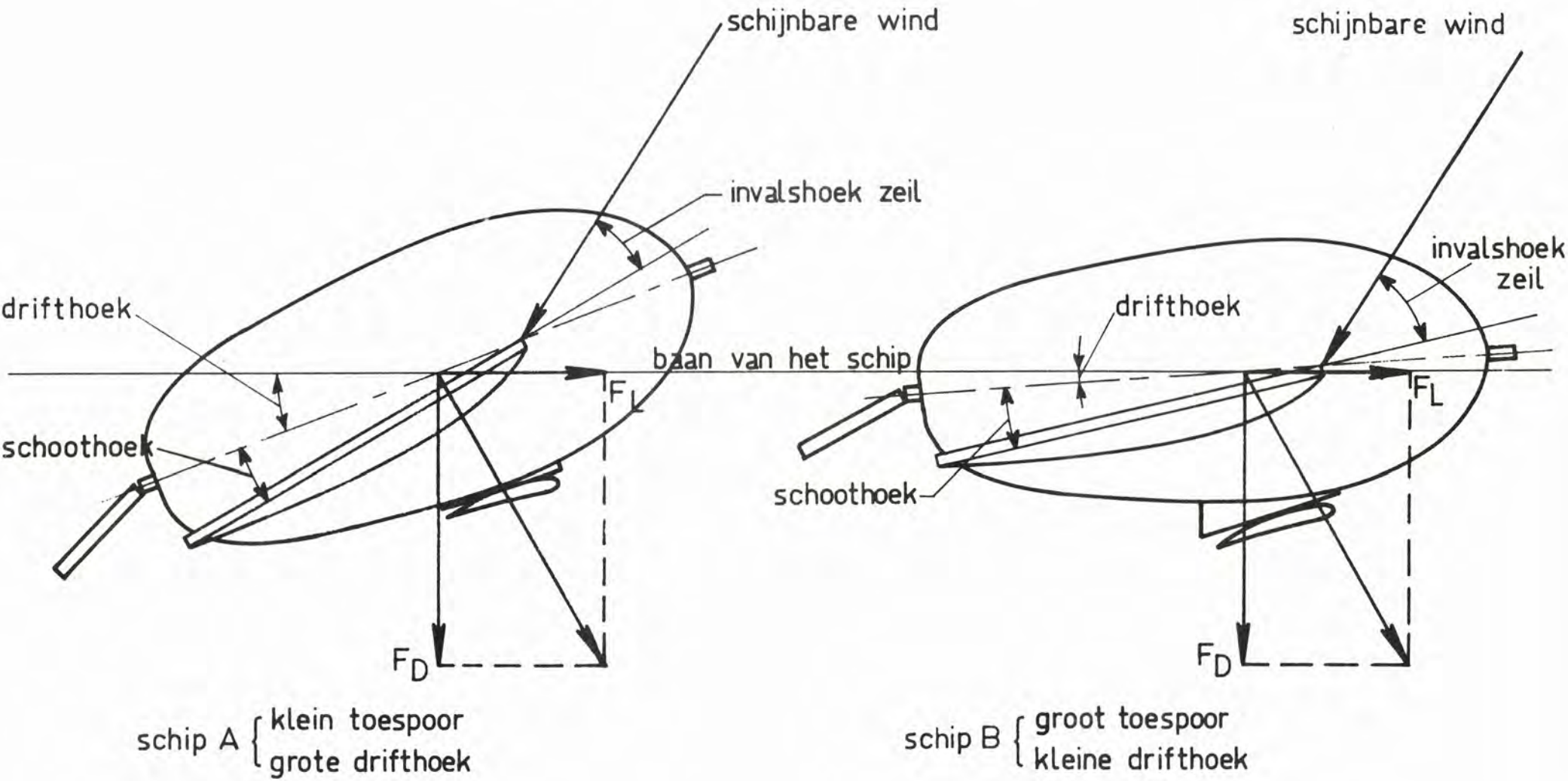


Fig. 14 : Invloed van de drifthoek op de invlashoek van het zeil

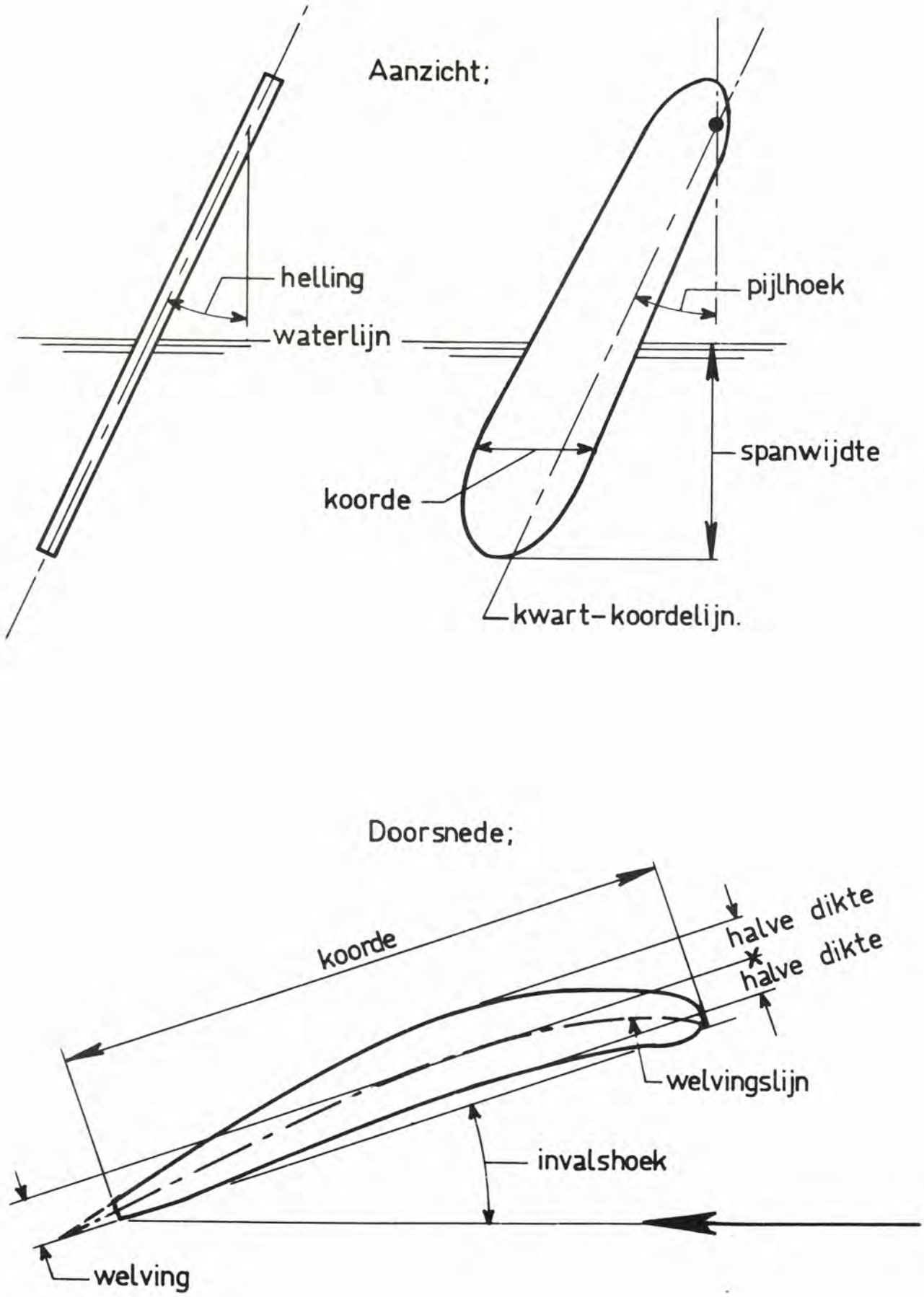


Fig. 15 : Geometrische definities van het zwaard

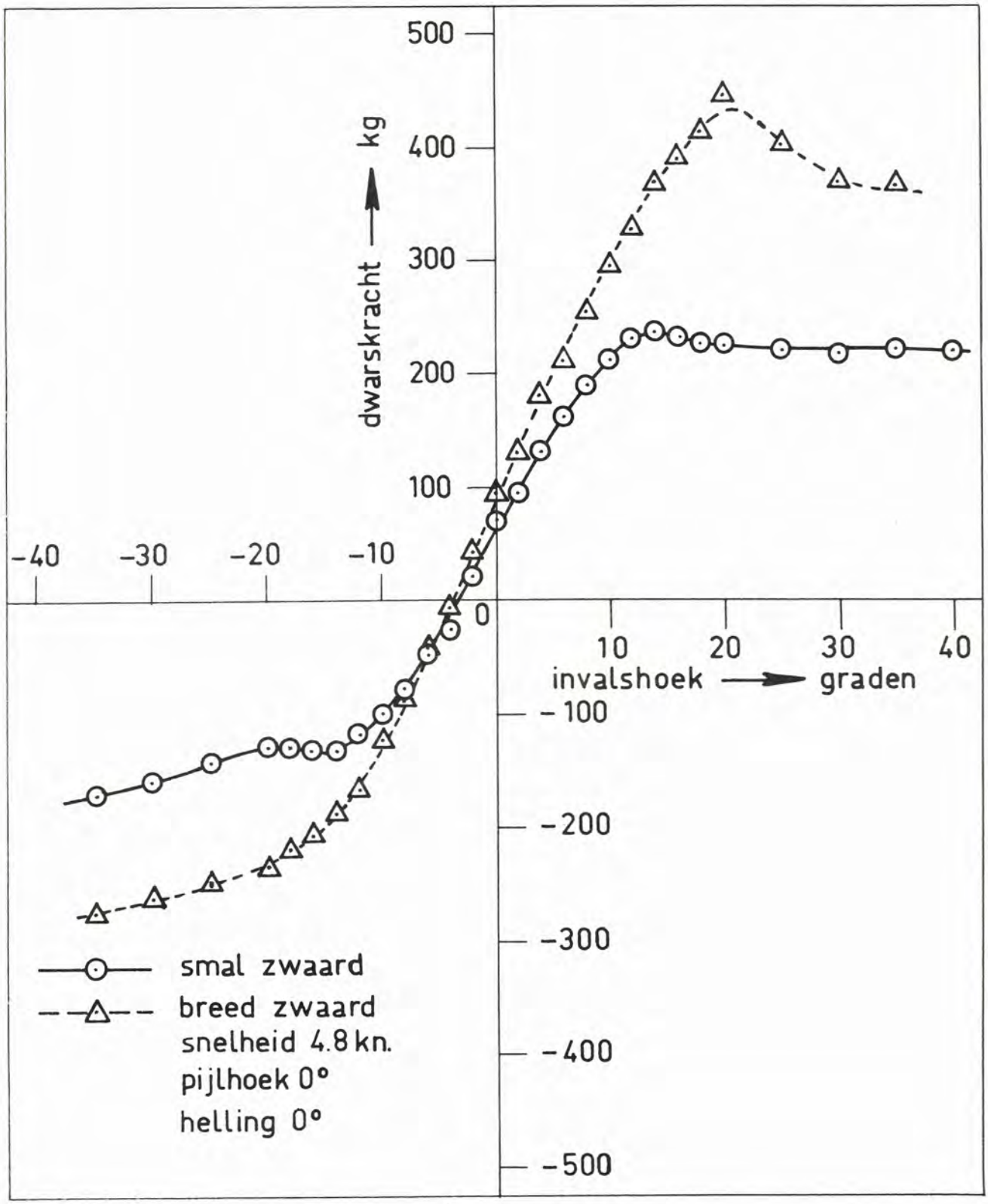


Fig. 16 : Door zwaard geleverde dwarskracht bij gevarieerde invalshoek

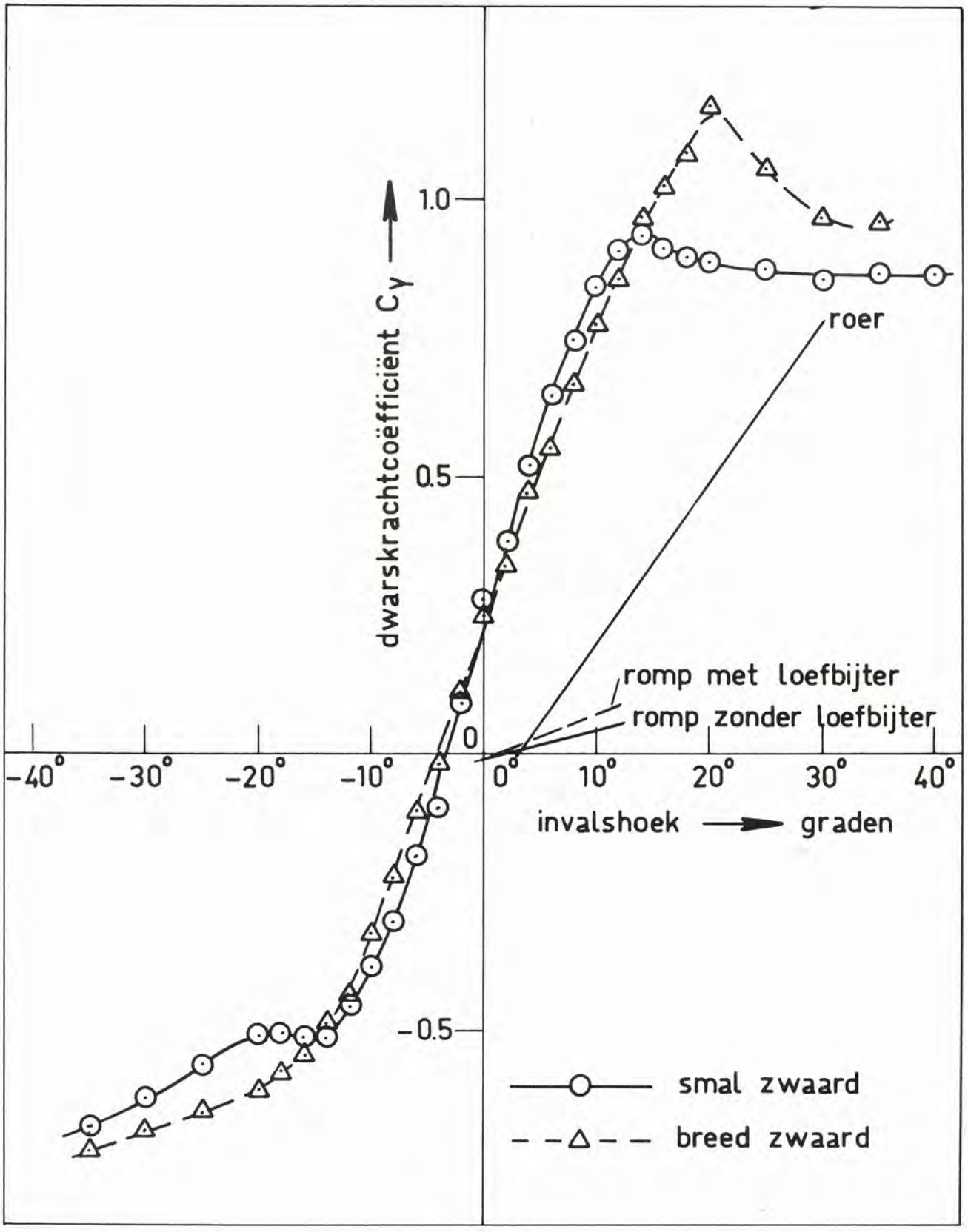


Fig. 17 : Dwarskrachtcoefficienten van zwaarden, romp en roer

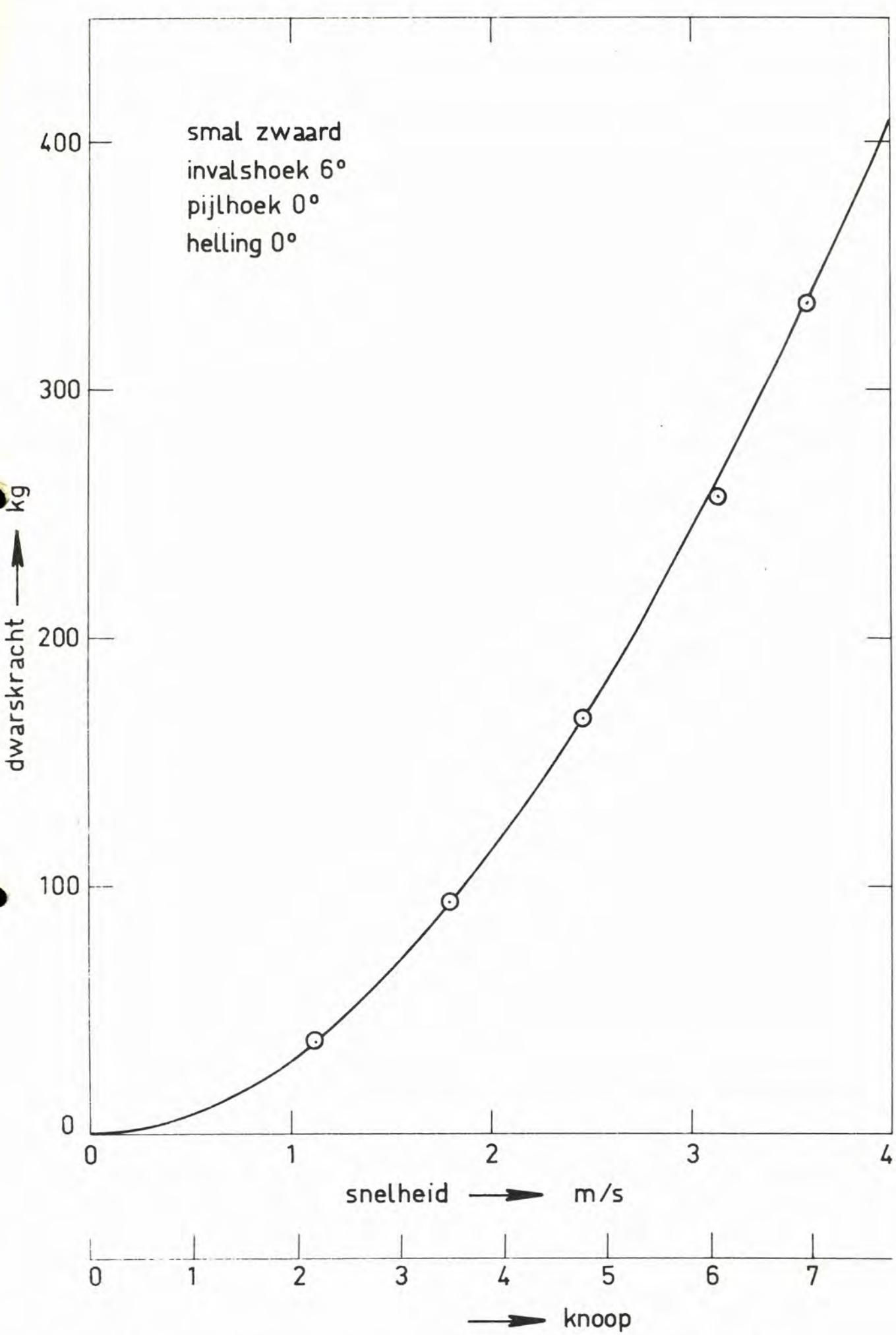


Fig. 18 : Door zwaard geleverde dwarskracht bij variabele snelheid

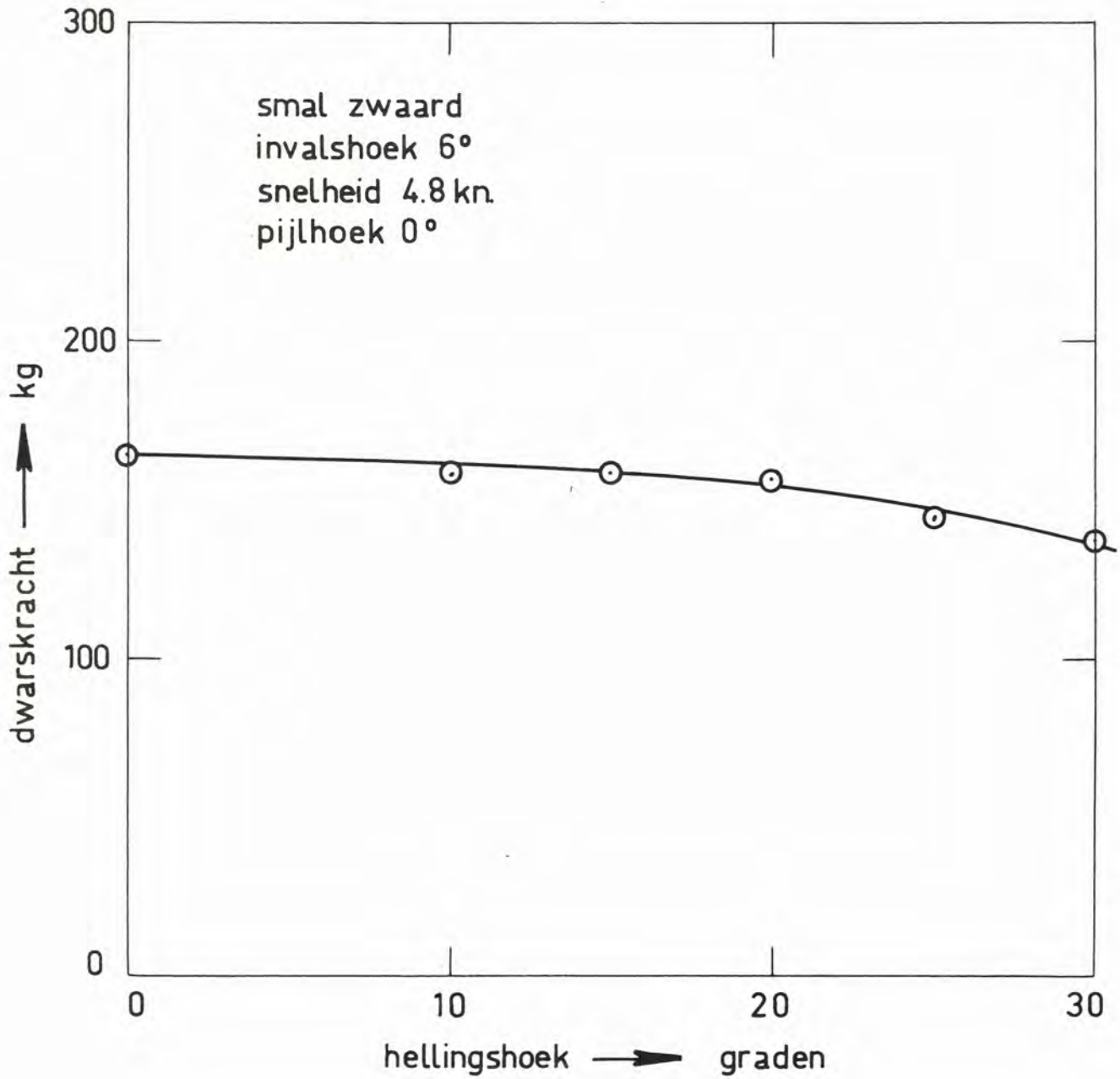


Fig. 19 : Door zwaard geleverde dwarskracht bij variabele hellingshoek

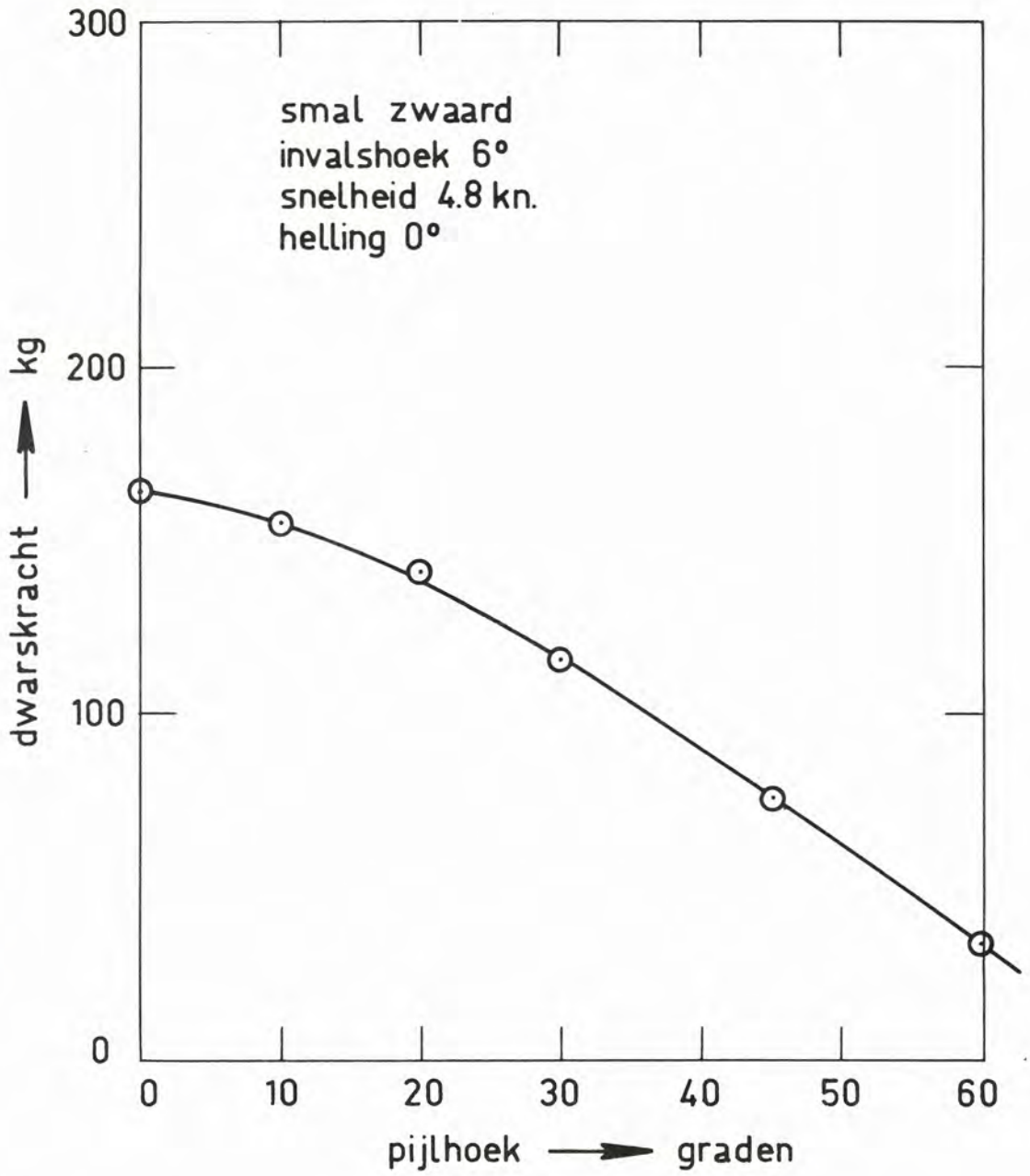


Fig. 20 : Door zwaard geleverde dwarskracht bij variabele pijlhoek

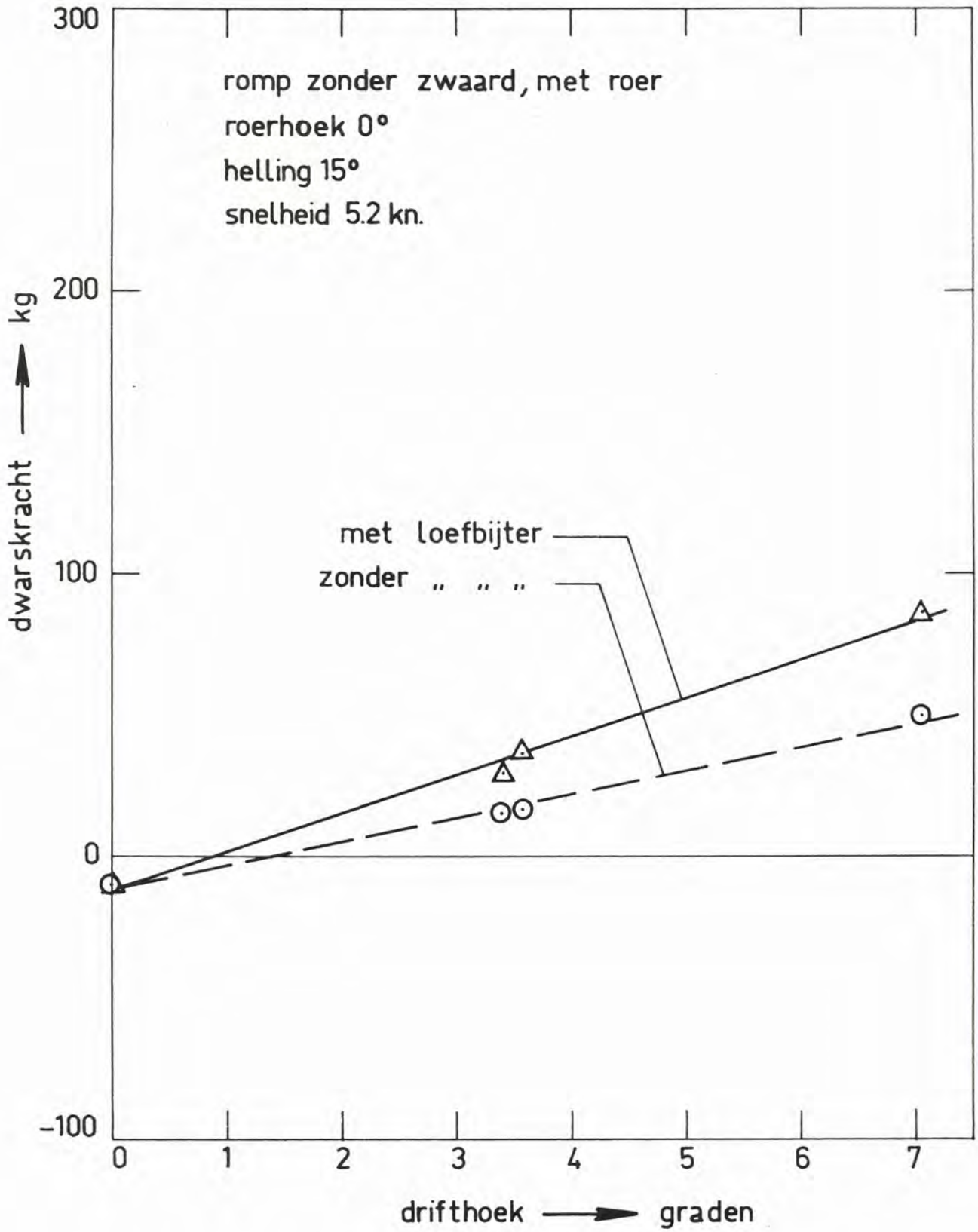


Fig. 21 : Door de romp geleverde dwarskracht bij een variabele drifthoek

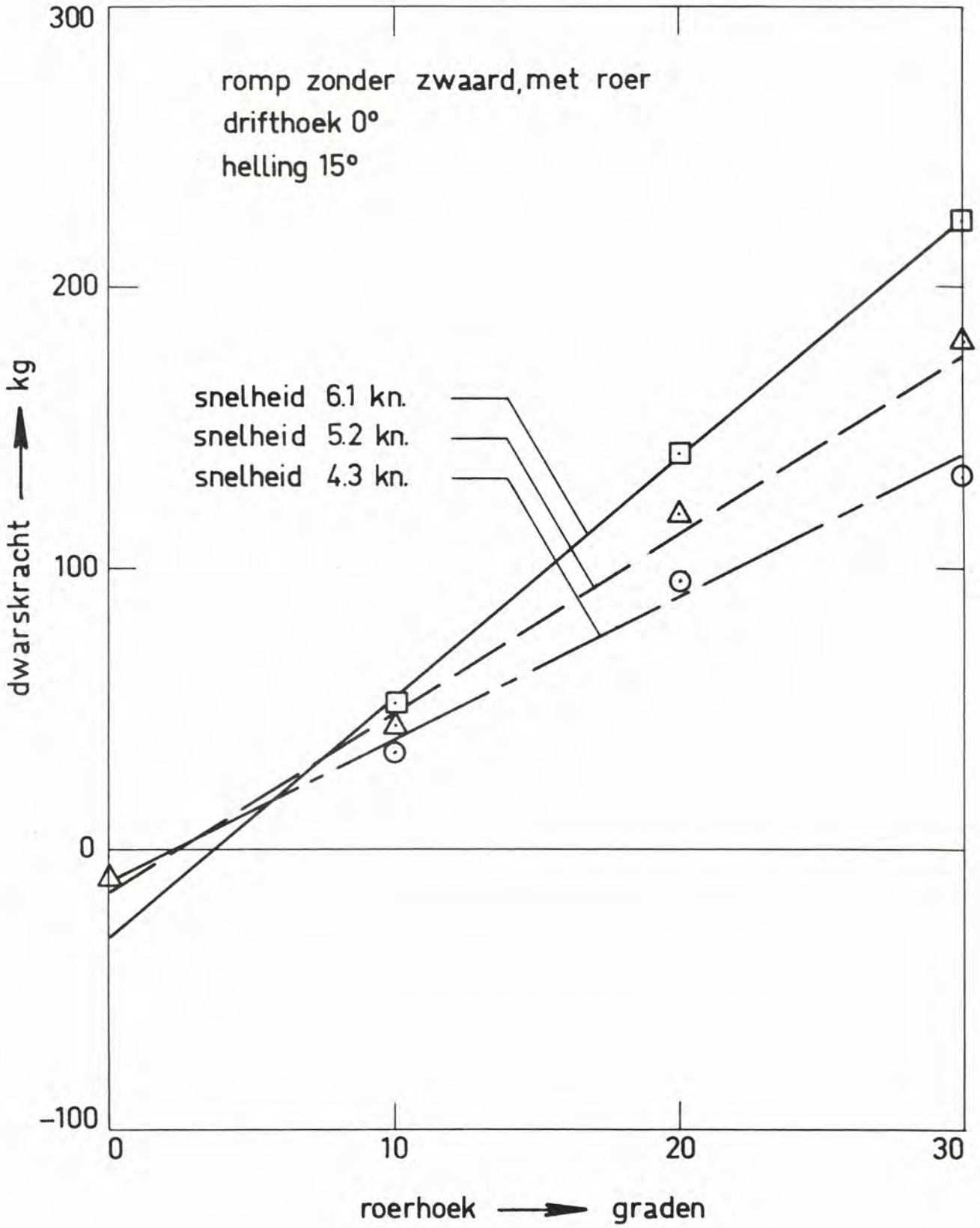
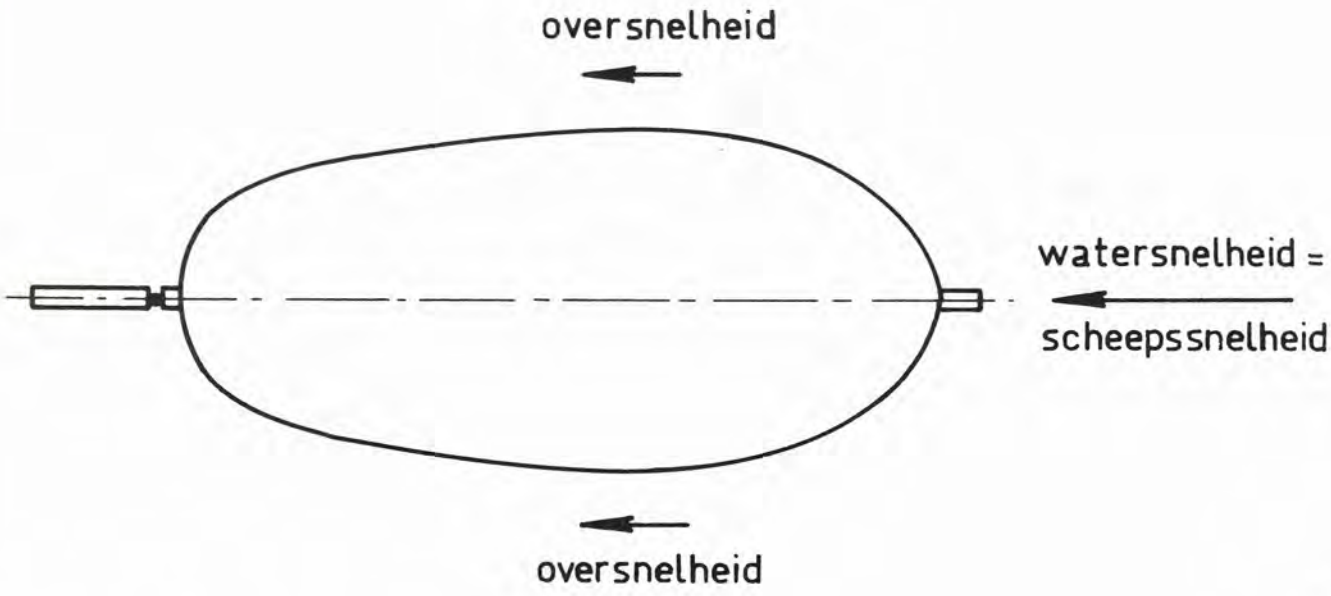


Fig. 22 : Door roer aan romp geleverde dwarskracht bij een variabele roerhoek



geen drifthoek

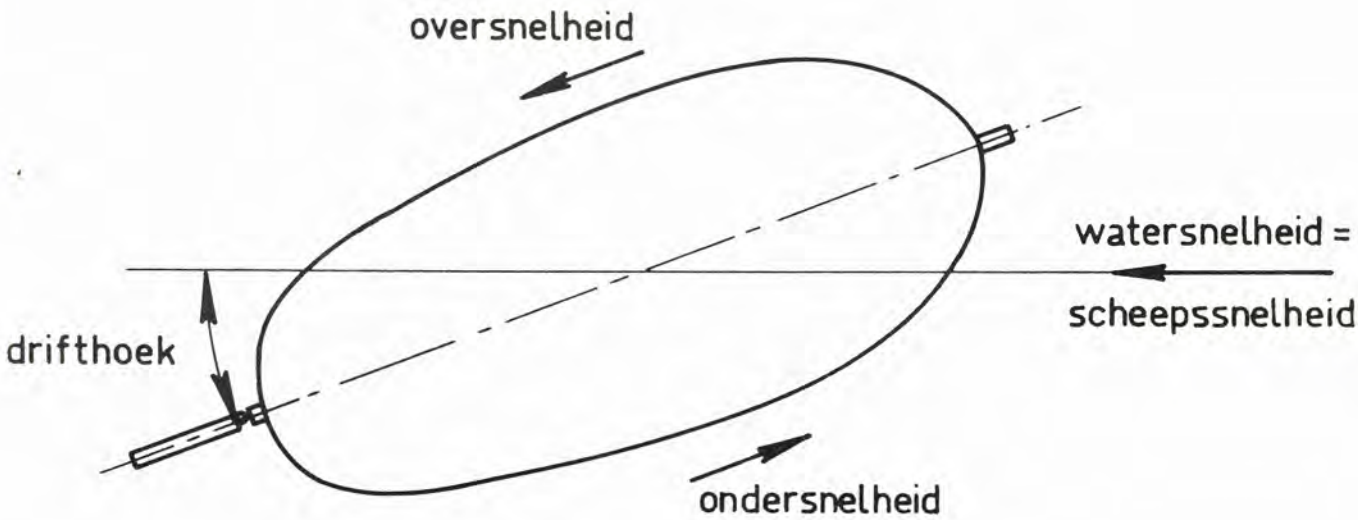


Fig. 23 : Snelheidsveld naast de romp, zonder en met een grote drifthoek

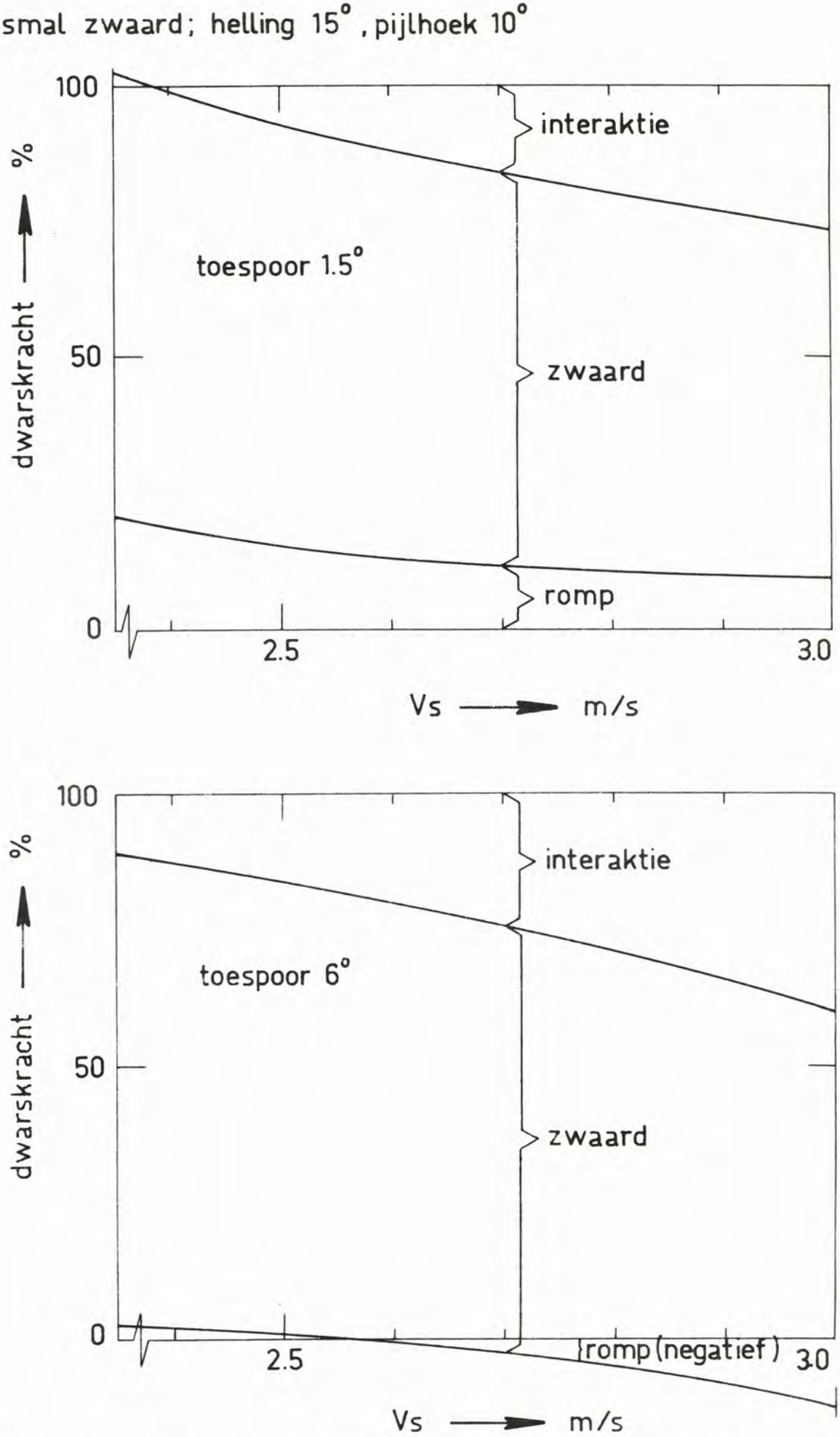


Fig. 24 : Bijdrage van romp en zwaard aan de totaal vereiste dwarskracht

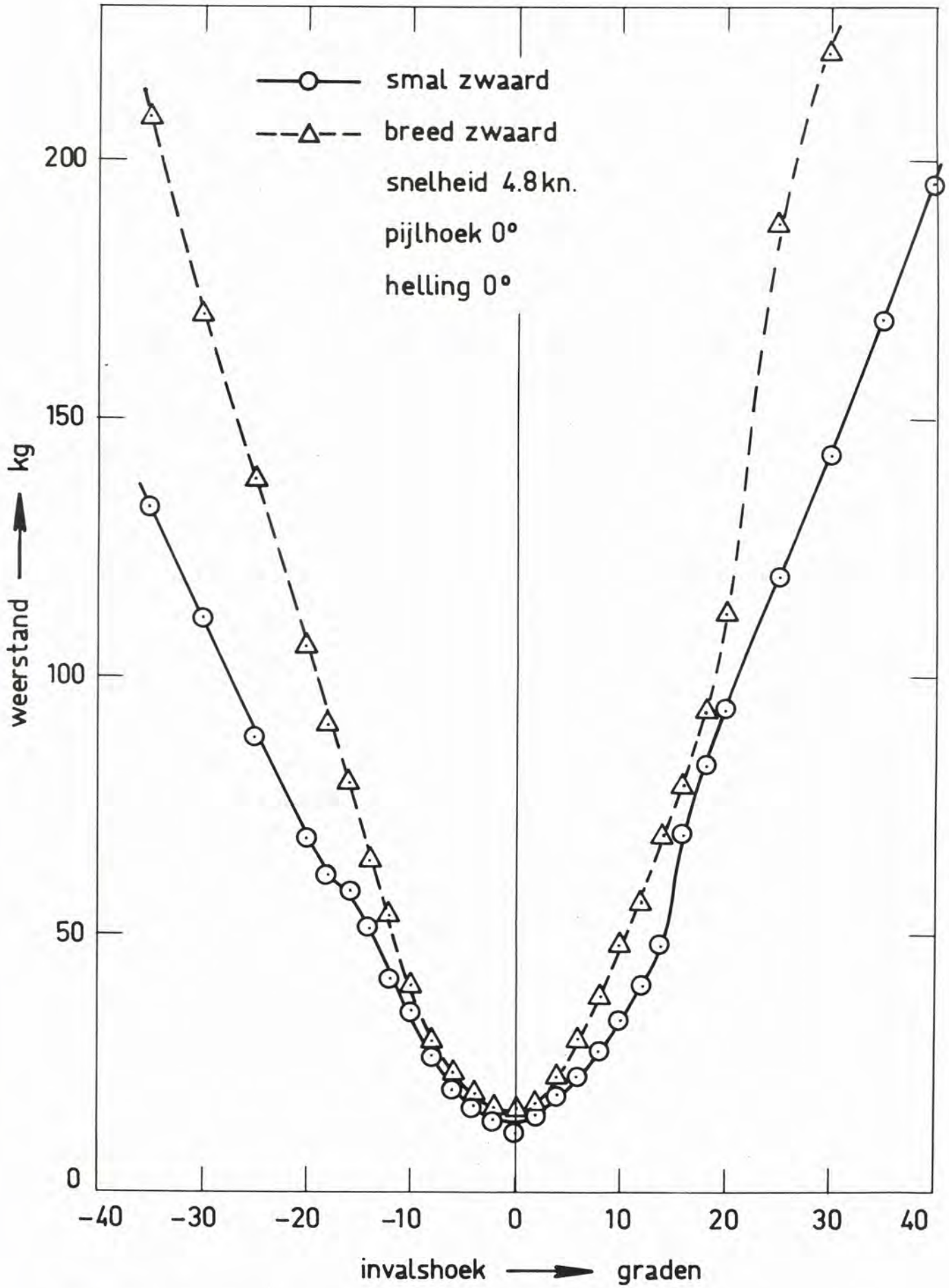


Fig. 25 : Door zwaard ondervonden weerstand bij variabele invalshoek