



BETTER SHIPS, BLUE OCEANS

Parametrisch model vermogensschatting binnenvaartschepen (TRANS2)

Een parametrisch model voor dubbelschroefs binnenschepen afgeleid uit CFD berekeningen

Report No. : 34417-1-SHIPS
Date : February 2025
Version : 1.1
Definitief rapport

Parametrisch model vermogensschatting binnenvaartschepen (TRANS2)

Een parametrisch model voor dubbelschroefs binnenschepen afgeleid uit CFD berekeningen

MARIN Projectnummer : 34417
MARIN Projectmanager : N. van Spronsen, E. Rotteveel

Classificatie : Publiek (subsidietraject)
Aantal pagina's : 36

Opdrachtgever : TKI Deltatechnologie
Bezuidenhoutseweg 12
2594 AV Den Haag

Orderdocument : Samenwerkingsovereenkomst TKI-TRANS2 (getekend ingediend bij TKI
Landbouw, water en voedsel, op 31 maart 2023)
Referentie : TRANS2

Gerapporteerd door : E. Rotteveel
Gecontroleerd door : N. van Spronsen

Versie	Datum	Versie beschrijving
1.0	Januari 2025	Definitief rapport
1.1	Februari 2025	Toevoeging samenvatting & enkele correcties

INHOUDSOPGAVE	PAGINA
MANAGEMENT SAMENVATTING	III
1 INLEIDING	1
2 AANPAK.....	2
2.1 Geometrisch model	2
2.2 CFD Berekeningen	3
2.3 Verwerking.....	6
3 PARAMETRISCH ROMPVORM-MODEL	8
3.1 Variatie-opties.....	8
3.2 Voorbeelden van romp-geometrieën	11
3.3 Spreiding van parameters	11
4 CFD BEREKENINGEN	13
4.1 Hoofddataset	13
4.2 Effect van roeren en assen.....	14
4.3 Effect van fijner grid.....	15
4.4 Effect van Ballast-conditie	15
4.5 Effect van ondiep water	15
5 PARAMETRISCHE VERMOGENSSCHATTING	17
5.1 Effect van waterdiepte	17
5.2 Model voor diep water	19
5.3 Verificatie en validatie.....	21
5.4 Geldigheidsbereik.....	22
5.5 Discussie	23
5.5.1 Model gefit op suboptimale schepen	23
5.5.2 Scheepstypen in dataset.....	23
5.5.3 Ondiepwater correctie	24
5.5.4 Spreiding van parameters	24
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	25
6.1 Conclusies	25
6.2 Aanbevelingen	25
APPENDIX I Bepaling van de golfweerstandcorrectie	1
APPENDIX II Open water efficiëntie (eta-o) schatting	1
APPENDIX III Referenties	1

Software documentatie sheets: ReFRESCO

MANAGEMENT SAMENVATTING

TKI project TRANS2: “TRANSitie naar een klimaatbestendig Rotterdams achterlandTRANSport” heeft MARIN gewerkt aan het opstellen van een model voor vermogensschatting voor binnenvaartschepen.

Doel van het model is om het vermogen van binnenvaartschepen te kunnen schatten ten behoeve van het voorspellen van brandstofverbruik en/of emissies in verschillende gesimuleerde scenarios, waarbij deze scenarios zich richten op de af- of toename van vrachtvolume, veranderingen in beschikbare waterdiepte, of bijvoorbeeld beschikbaarheid van nieuwe (zero-emissie) technologieën.

Om het model samen te stellen heeft MARIN ca. 420 CFD (computational fluid dynamics) berekeningen uitgevoerd met binnenvaartschepen die onderling varieerden in hun lengte, breedte, diepgang en enkele detailparameters. De resultaten van deze berekeningen zijn omgezet in vermogensschattingen, en voor deze vermogensschattingen is een regressiemodel opgesteld. Dit model is beschikbaar als een formule die geïmplementeerd kan worden in rekengereedschap of andere software.

Voorliggende rapportage is een product van het project TRANS2 (“TRANSitie naar een klimaatbestendig en duurzaam Rotterdams achterlandTRANSport”), een project met 15 partners onder coördinatie van Deltares. TRANS2 agat primair over klimaatadaptatie: hoe kan de binnenvaart zich aanpassen aan, meer grip krijgen op een veranderend klimaat? Project TRANS2 is mede gefinancierd door TKI Deltatechnologie uit de PPS-innovatie programmasubsidie van het Ministerie van Economische Zaken.

1 INLEIDING

MARIN doet mee aan TKI project TRANS2: “TRANSitie naar een klimaatbestendig Rotterdams achterlandTRANSport”. Doel van dit TKI project is om meer grip te krijgen op de binnenvaartlogistiek onder een veranderend klimaat. Dit gebeurt door onder andere verschillende scenario’s te analyseren met behulp van modellen m.b.t. routing, sluisen, ladingvoorraden en scheepsprestaties, en meer.

De bijdrage van MARIN is het opstellen en publiceren van een model dat gebruikt kan worden om het schroefvermogen van binnenvaartschepen te schatten. Het model is parametrisch en kan gebruikt worden voor binnenschepen van 50 meter lang tot schepen van 135 meter lang. Het model is zo opgesteld het scheepsweerstand en voortstuwingsparameters apart van elkaar voorspelt. Hiermee kan de gebruiker nog zelf een schatting toevoegen voor de efficiëntie van de voortstuw(er)s).

In het volgende hoofdstuk wordt de aanpak om tot het parametrisch model te komen beschreven. Daarna wordt in hoofdstuk drie het geometrisch model beschreven, met daarin de variatie-opties, enkele voorbeelden van gegenereerde rompen en het parameterbereik. In hoofdstuk vier worden de CFD berekeningen besproken. Hoofdstuk vijf presenteert de afleiding van het parametrisch model, en het model zelf. In hoofdstuk zes worden de belangrijkste bevindingen uit de studie beschreven.

2 AANPAK

Om een scheeps-performance model op te stellen, heeft MARIN achtereenvolgens scheepsgeometrieën gegenereerd, de omstroming van deze geometrieën berekend met CFD (Computational Fluid Dynamics), uit deze berekeningen voorspellingen van weerstand, volgstroom en zoggetal gehaald en daarna deze grootheden gecorrigeerd aan verschillende geometrische parameters om zo tot een parametrisch model te komen. In dit hoofdstuk wordt de aanpak/methode voor deze stappen beschreven.

2.1 Geometrisch model

Het geometrisch model heeft tot doel om op basis van hoofdparameters en detailparameters een digitale scheepsromp te genereren. De gegenereerde scheepsrompen moeten overeenkomen met scheepsvormen die in de praktijk ook voorkomen en toegepast worden. De digitale scheepsromp moet geschikt zijn voor gebruik in CFD berekeningen.

Een scheepsromp wordt gegenereerd door hoofdparameters en detailparameters om te zetten in punten in de ruimte (punten met een langsscheepse, dwarsscheepse en verticale positie – respectievelijk X, Y en Z), die samen bijvoorbeeld lijnen volgen om de boegvorm, achtersteven, tunnelrand of spiegel te beschrijven. Het omzetten van parameters naar punten wordt gedaan door met een serie (wiskundige) formules de parameter-waardes (typisch tussen 0.0 en 1.0) om te zetten naar de X-, Y- en Z-positie van die punten.

Onder de hoofd-parameters worden parameters verstaan die vaak al tijdens de concept-fase van een ontwerpproces gekozen moeten worden, omdat ze een grote invloed hebben op laadruimte en het beschikbare operationele gebied van het schip. Enkele voorbeelden zijn:

- Lengte
- Breedte
- Diepgang
- Holte
- Lengte voor- en achterschip
- Breedte en hoogte van de spiegel

Onder de detail-parameters worden parameters verstaan die een kleinere *directe* invloed hebben op de operationele mogelijkheden van het schip, maar die wel de prestaties (bijvoorbeeld brandstofverbruik) van het schip beïnvloeden tijdens de operatie. De keuze van de detail-parameters beïnvloedt dus de mate waarin het schip een operatie al dan niet optimaal kan uitvoeren. Voorbeelden van detail-parameters zijn:

- De breedte van de tunnel t.o.v. de schroefdiameter
- De schroefdiameter
- De helling van de voorsteven
- De hoogte van de tunnelrand t.o.v. het bodemvlak
- De kimstraal
- Het ontwerp van het begin, verloop en einde van de tunnelrand

Het parametrisch geometriemodel is opgebouwd in Rhino 3D® en Grasshopper®. De eerste is een generiek CAD (Computer Aided Drawing) programma dat zich vooral richt op ontwerpen met (gekromde) vlakken. De tweede is een extensie van dit programma dat helpt bij het parametrisch variëren van deze vlakken.

Het model is zo opgezet dat het schepen kan genereren met afmetingen behorende bij de gangbare CEMT-klassen. Echter is het niet beperkt tot deze klassen: het is mogelijk een scheepsvorm te

genereren met de lengte van een verlengd Rijnschip (klasse VIa, M12, 135 meter) maar de breedte en diepgang van een Kempenaar (6.6 meter breed en 2.6 meter diep). Het bereik van het model is zo opgezet dat het een Kempenaar of een verlengd Rijnschip, of alles daartussen met een continue verloop kan genereren.

Het model genereert een boegvorm, een middenschip en een achterschipvorm. De boeg en het middenschip zijn voor een groot deel van de operationele binnenschepen sterk gelijkvormig. In het parametrisch model is daarom ook maar één type boegvorm (die parametrisch gevarieerd kan worden met verschillende parameters) opgenomen. Voor het achterschip geldt dat er een aantal categorieën bestaat:

1. Enkelschroefsachterschip met geveegde achterstevan
2. Enkelschroefsachterschip met (brede) spiegel
3. Dubbelschroefsachterschip met (brede) spiegel
4. Drieschroefsachterschip met (brede) spiegel
5. Praamvormig achterschip met 1 of 2 schroeven met open assen
6. Praamvormig achterschip met 1 of 2 schroeven achter gondel(s)
7. Praamvormig achterschip met 1, 2, 3 of 4 roerpropellers (thrusters)

Er zijn mogelijk nog andere varianten toe te voegen aan deze lijst, maar er wordt aangenomen dat hiermee een groot deel van de vloot afgedekt is. Een extra aanname is dat de schroef in alle gevallen in een straalbuis geplaatst is.

Het geometrisch model in de huidige vorm ondersteunt het genereren van dubbelschroefsachterschepen met (brede) spiegel (nr. 3) en praamvormige schepen met open assen of roerpropellers (nrs. 5 en 7). Het was niet mogelijk om binnen het project alle verschillende opties in het parametrisch model in te bouwen.

Het parametrisch model richt zich op het genereren van een rompvorm. Dat betekent dat aanhangsels zoals straalbuizen, roeren, roerkoningen, asuithouders, etc. géén onderdeel zijn van het *parametrisch* model. In de berekeningen zijn wel altijd straalbuizen meegenomen, maar dit betrof een straalbuis van het Wageningen 37 type (vergelijkbaar met een OPTIMA® buis) die geschaald werd met de schroefdiameter. Een deel van de berekeningen is ook uitgevoerd met schroefassen, asuithouders en roeren, maar ook deze hadden een constant ontwerp waarvan de grootste schaalde met de schroefdiameter.

2.2 CFD Berekeningen

Van de geometrieën gegenereerd met het parametrisch geometriemodel worden scheepsweerstand en de voortstuwingsparameters (volgroomgetal en zoggetal) bepaald op basis van CFD berekeningen.

De CFD berekeningen worden uitgevoerd met ReFRESKO. ReFRESKO is een generieke *flow solver* waarmee de stroming rondom een of meerdere objecten bepaald kan worden. Ondanks dat de software generiek is, is de ontwikkeling ervan wel gericht op maritieme toepassingen.

De weerstand van een schip kan ermee bepaald worden doordat de (vloeistof)drukken op de romp en de frictie tussen de romp en de stroming erlangs berekend. De somming van drukken en frictie over de scheepshuid geven de krachten op de romp, en daarmee dus de scheepsweerstand. Het zoggetal kan bepaald worden door een voortstuwert te modelleren: de toename van scheepsweerstand ten gevolge van het modelleren van een voortstuwert geeft het zoggetal. Als laatste kan het volgroomgetal bepaald worden door het snelheidsveld ter plekke van de voortstuwert te nemen en daar de gemiddelde stroomsnelheid in te bepalen.

De berekeningen zijn in een aantal sets uitgevoerd:

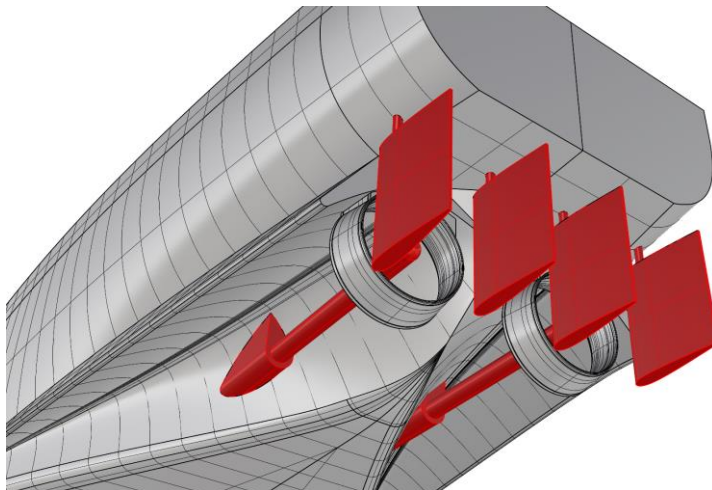
1. Een grote set berekeningen (260 rompvormen) om een dataset produceren die invloeden van rompvormparameters voldoende vangt
2. Een variatie van waterdiepte, uitgevoerd voor een subset van 20 rompvormen (gekozen uit de hierboven genoemde 260 rompen)
3. Sommen inclusief aanhangsels: roer, roerkoning, schroefassen, asuithouders en schroefaskokers, voor dezelfde 20 geselecteerde rompen als in (2).
4. Sommen op een fijner grid, inclusief aanhangsels uit (3) en met dezelfde rompen als in (2)

Daarnaast zijn er, om het volgstroomgetal goed te bepalen, sommen met enkel de straalbuis uitgevoerd. Hiermee kan de verhouding tussen stuwkracht en stroomsnelheid door de straalbuis vastgelegd worden. Deze verhouding is nodig om het volgstroomgetal te bepalen.

De berekeningen uit (1) zijn gedaan op een grover grid dan doorgaans toegepast worden bij CFD berekeningen door MARIN. Een grover grid leidt tot lagere kosten en rekentijd per berekening, ten koste van nauwkeurigheid. De ervaring leert echter dat de lagere nauwkeurigheid zich vooral in één richting uit: met een grover grid wordt er een hogere weerstand berekend. Ondertussen blijkt dat trends in een dataset (o.a. verschillen in weerstand tussen verschillende scheepsrompen) goed gevangen kunnen worden met behulp van berekeningen op een grover grid. Een eventuele onnauwkeurigheid in deze trends is gezien de gewenste nauwkeurigheid van de parametrisch vermogensschatting acceptabel.

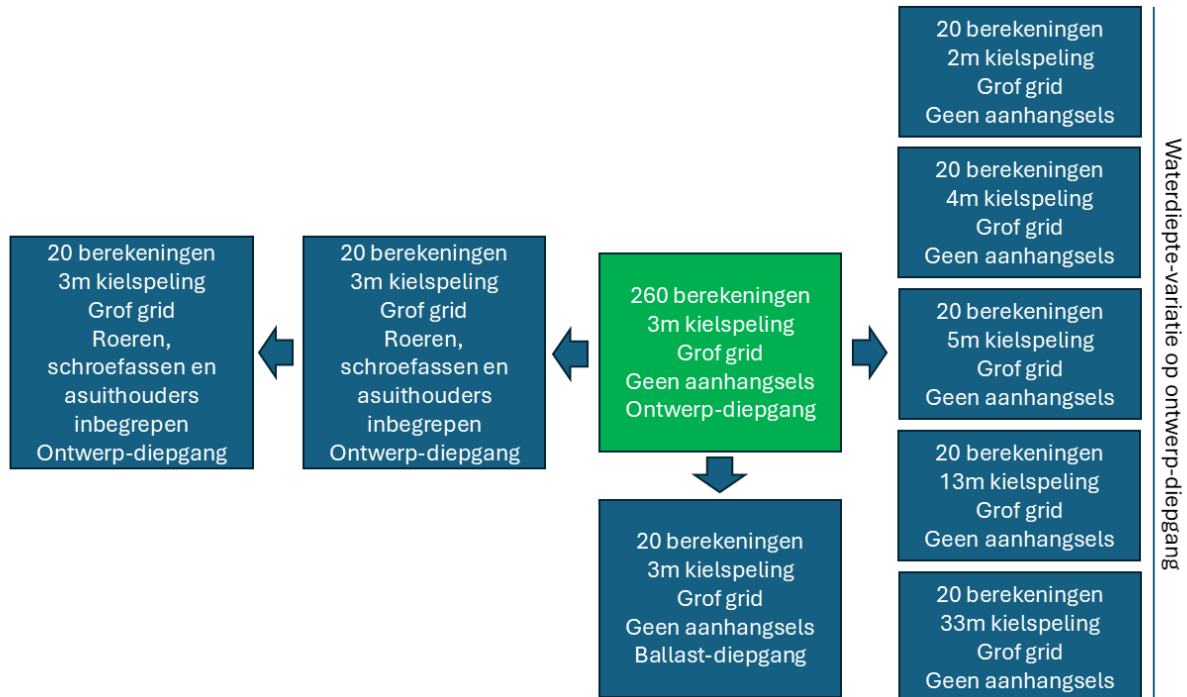
De sommen uit (1) zijn gedaan bij een kielspeling van 3 meter, voor alle scheepsrompen. Om het mogelijk te maken het parametrisch model te gebruiken voor meerdere waterdieptes zijn ook sommen op andere waterdieptes gedaan. De kielspeling is gevarieerd in stappen. De gebruikte waarden zijn: 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 13.0 en 33.0 meter. De laatste kan geïnterpreteerd worden als 'diep water'. De methode van Raven (2016) is gebruikt om de berekende weerstand bij 33.0 meter kielspeling nog te corrigeren voor 'echt' ondiep water.

De grof-grid sommen zijn uitgevoerd zonder aanhangsels zoals roeren en asuithouders. Dit is gedaan om de grote dataset van 260 sommen efficiënt uit te kunnen voeren in termen van kosten en tijd. Voor een subset van 20 berekeningen zijn deze aanhangsels echter wel toegevoegd om zo te bepalen welke afwijking geïntroduceerd wordt door het weglaten van deze aanhangsels. In Figuur 1 is aangegeven in rood welke onderdelen slechts voor deze subset zijn meegenomen.



Figuur 1: Aanhangels (rood) die voor een subset van 20 sommen zijn meegenomen, maar die bij het overgrote deel van de berekeningen zijn weggelaten. De straalbuizen zijn voor alle sommen meegenomen.

Om als laatste te schatten welke afwijking wordt geïntroduceerd door het uitvoeren van de sommen op een grof grid, is de subset van 20 berekeningen ook uitgevoerd op een fijner grid. Bij een fijner grid is het aantal cellen waarin de stroming berekend moet worden ca. 2.4X groter dan bij een grover grid. De rekentijd (en daarmee rekenkosten) schaalst met ongeveer het kwadraat van het aantal cellen en is daarmee ca. 5.6X groter voor een fijn grid, ten opzichte van een grof grid.



Figuur 2: Overzicht uitgevoerde sommen

De berekeningen zijn uitgevoerd voor één snelheid: 16 kilometer per uur. Deze keuze is gemaakt om de hoeveelheid berekeningen te beperken. Het toevoegen van een extra snelheid (totaal twee snelheden) zou namelijk direct ook een verdubbeling van het aantal sommen betekenen, indien de dataset-resolutie met betrekking tot rompvormparameters gelijk gehouden moet worden. De keuze kan tegelijk gerechtvaardigd worden door de relatief lage snelheid van binnenschepen. Het parametrisch vermogensmodel zal met variatie van snelheid kunnen werken door via een empirisch methode het aandeel van golfmakende weerstand te schalen voor snelheidsvariaties.

De diepgang van elke rompvorm was een ontwerpparameter. Diepgangsvariaties zijn niet uitgevoerd voor elke rompvorm, maar voor dezelfde subset van 20 rompvormen zijn berekeningen gedaan in ballast conditie, om zo een ballast-correctiefactor te kunnen bepalen.

Bij elkaar geteld moeten er per type achterschip dus 420 CFD berekeningen uitgevoerd worden. Het grootste deel hiervan gebeurt op een grof grid en is daarmee efficiënt in tijd en kosten uit te voeren. Desondanks was het qua tijd en budget slechts mogelijk om alleen voor het dubbelschroefsachterschip met aslijnen berekeningen uit te voeren.

De voortstuwer is gemodelleerd als een "pomp" die water door de straalbuis versneld. De krachtenverdeling binnen deze pomp is zo aangepast dat deze lijkt op die van een echte driedimensionale schroefgeometrie. Het was niet mogelijk om binnen de studie ook een daadwerkelijke schroefgeometrie te modelleren. Het vermogen van deze pomp komt overeen met dat van een *ideale schroef*: een schroef die 100% stuwkracht in langsscheepse richting produceert, zonder rotatieverliezen door wrijving of wervelingen in de stroming.

2.3 Verwerking

Uit de CFD berekeningen volgen de volgende waardes:

1. Totale kracht op scheepsrump (inclusief straalbuis) zonder schroefeffect
2. Totale kracht op scheepsrump (inclusief straalbuis) mét schroefeffect
3. Stuwkracht van het schroefmodel (versimpelde pomp) nodig is bij de scheepssnelheid
4. Het vermogen dat door het schroefmodel aan de stroming wordt toegevoegd

Om een parametrisch vermogensmodel op te bouwen zijn de scheepsweerstand, het zoggetal en het volgstroomgetal nodig.

De scheepsweerstand is onderdeel van de totale kracht op de romp (1), maar om de weerstand te bepalen moet de kracht op de straalbuis nog van de totale kracht afgetrokken worden. Dit is gedaan door de kracht op de straalbuis en aansluiting ervan op de romp apart te bepalen, en dit van de totale krachten af te trekken. Hiermee is de scheepsweerstand bekend. Door dit ook te doen voor de kracht uit (2) kan het zoggetal bepaald worden: dit is namelijk het verschil in kracht op de romp ten gevolge van het activeren van de voortstuwer.

Het volgstroomgetal vereist een extra stap. Hiervoor is gebruik gemaakt van een extra set berekeningen waarbij de straalbuis zónder het schip doorgerekend is, op verschillende doorstromsnelheden. Dit geeft per snelheid een verhouding tussen stuwkracht en vermogen. Uit de CFD berekening van het schip krijgen we ook een verhouding tussen stuwkracht (3) en vermogen (4), maar deze wijkt af van die uit berekeningen met de losse straalbuis bij gelijke snelheid. De juiste verhouding kan gevonden worden in een berekening met losse straalbuis bij een lagere snelheid. De verhouding tussen de scheepssnelheid en deze lagere snelheid geeft het volgstroomgetal. Dit getal is een maat voor de vertraging van de stroming ter plaatse van de schroef door aanwezigheid van de romp vóór de schroef.

Het gros van de berekeningen, met name de dataset waaruit relaties tussen vermogen en rompvormparameters afgeleid kunnen worden, is uitgevoerd bij een kielspeling van 3 meter. Deze moet gecorrigeerd worden naar diep water. Hiervoor is de methode van Raven (2016) gebruikt, tezamen met een correctie op die methode die afgeleid is uit de berekeningen voor kielspelingen van 2.0, 4.0, 5.0, 13.0 en 33.0 meter. Deze correctie is alleen gedaan voor weerstand. Hoewel bekend dat ook zoggetal en volgstroomgetal beïnvloed worden, blijkt ook dat de ondiep-water effecten op deze getallen niet goed door een eenvoudig (d.w.z. beperkt aantal en duidelijke parameters) model te representeren zijn.

Nadat volgens bovenstaande stappen de resultaten uit de CFD sommen verwerkt zijn, zijn de volgende gegevens beschikbaar:

1. Weerstand van het schip in diep water
2. Volgstroomgetal: de mate waarin de stroming ter plaatse van de schroef vertraagd is door de aanwezigheid van het schip
3. Zoggetal: het zuigingseffect van de schroef op de romp, leidend tot een verhoging van weerstand en dus ook van stuwkracht
4. Effect van waterdiepte of kielspeling op de scheepsweerstand
5. Vermogen van het versimpelde schroefmodel

Voor elk van deze onderdelen wordt een parametrisch model opgesteld. Dit wordt gedaan met behulp van machine-learning (ML) methodes. Hoewel er binnen dit kennisgebied een groot aantal methodes beschikbaar is, wordt er voor deze studie gekozen voor regressie-methodes, zodat de opgeleverde schattingsmodellen "leesbaar" zijn, dus in de vorm van $C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot x_2 + \dots$ waarbij C_1 , C_2 , etc. gefitte coëfficiënten zijn en x_1 , x_2 , etc. de bijbehorende rompvormparameters zijn.

Het volledige vermogensmodel heeft de volgende vorm gekregen:

$$P_D = R \cdot \frac{V_S}{\eta_O \cdot \eta_H}$$

$$R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_S^2 \cdot S \cdot (C_R + C_F) + \Delta R_W$$

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re) - 2.0)^2}$$

$$Re = \frac{L_{OA} \cdot V_S}{\nu}$$

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w}$$

$$w = (C_R + C_F) \cdot w^*$$

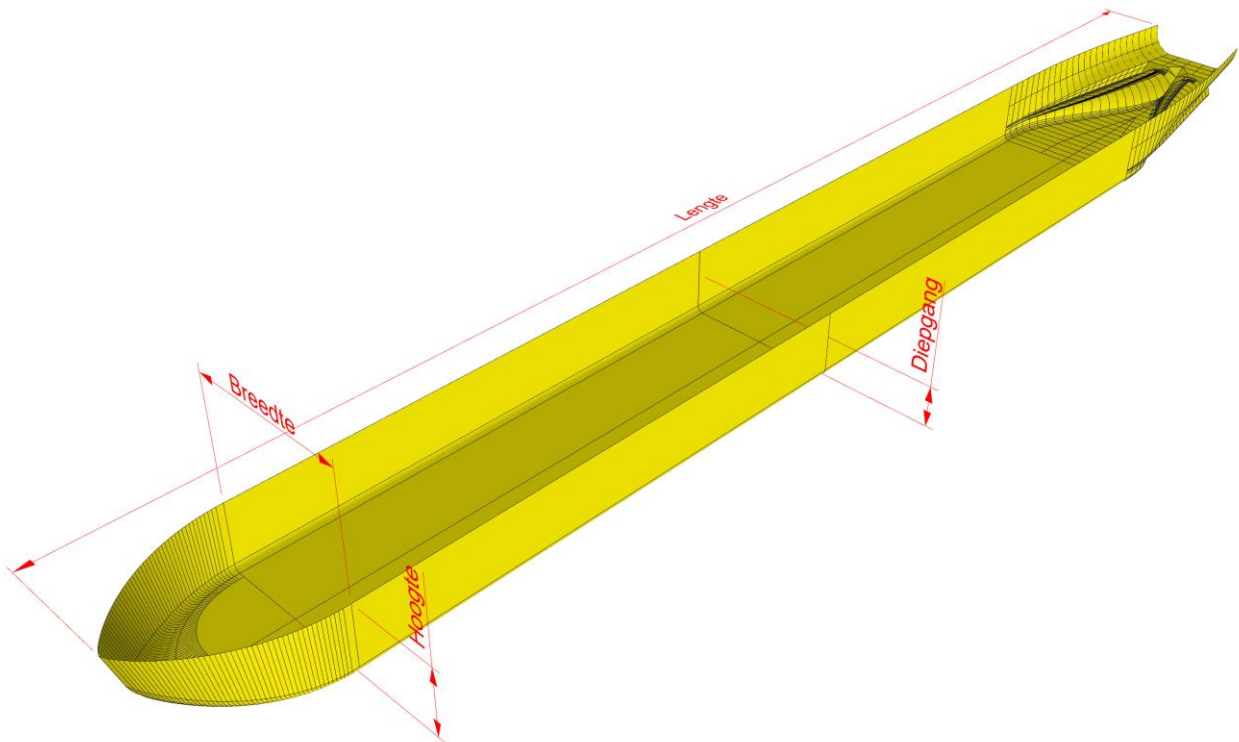
Waarin geldt dat $\rho = 999.0$ en $\nu = 1.1386 \cdot 10^{-6}$, en dat er parametrische modellen gefit worden voor nat oppervlak S (hoewel deze ook uit het ontwerp bekend is), de restweerstandscoefficiënt C_R , het zoggetal t en de volgstroomcoëfficiënt w^* (het volgstroomgetal is vaak een functie van de scheepsweerstand, dus daarom wordt het volgstroomgetal w beschreven als functie van een parametrische coëfficiënt en de weerstandscoefficiënt). Voor η_O , de open-water efficiëntie van een voortstuwer, kunnen diagrammen/modellen van schroefseries gebruikt worden (bijvoorbeeld de Wageningen Ka-series) en voor ΔR_W , die dient om het golfweerstandsaandeel te corrigeren voor snelheid, wordt gebruik gemaakt de formuleringen van Holtrop & Mennen (Holtrop, Mennen, 1982).

3 PARAMETRISCH ROMPVORM-MODEL

Het parametrisch model dat ontwikkeld is kan schepen genereren met een tunnel-achterschip en een praamvormig achterschip. In beide gevallen gaat het om achterschepen met een spiegel, en twee schroeven.

3.1 Variatie-opties

De hoofdparameters waarmee schepen gegeneren zijn de lengte, breedte, holte en diepgang van het schip. Daarnaast zijn ook lengte van voor- en achterschip belangrijke parameters die veel invloed hebben op bijvoorbeeld het laadvermogen. In Figuur 3 en Figuur 4 worden de hoofdparameters aangegeven.

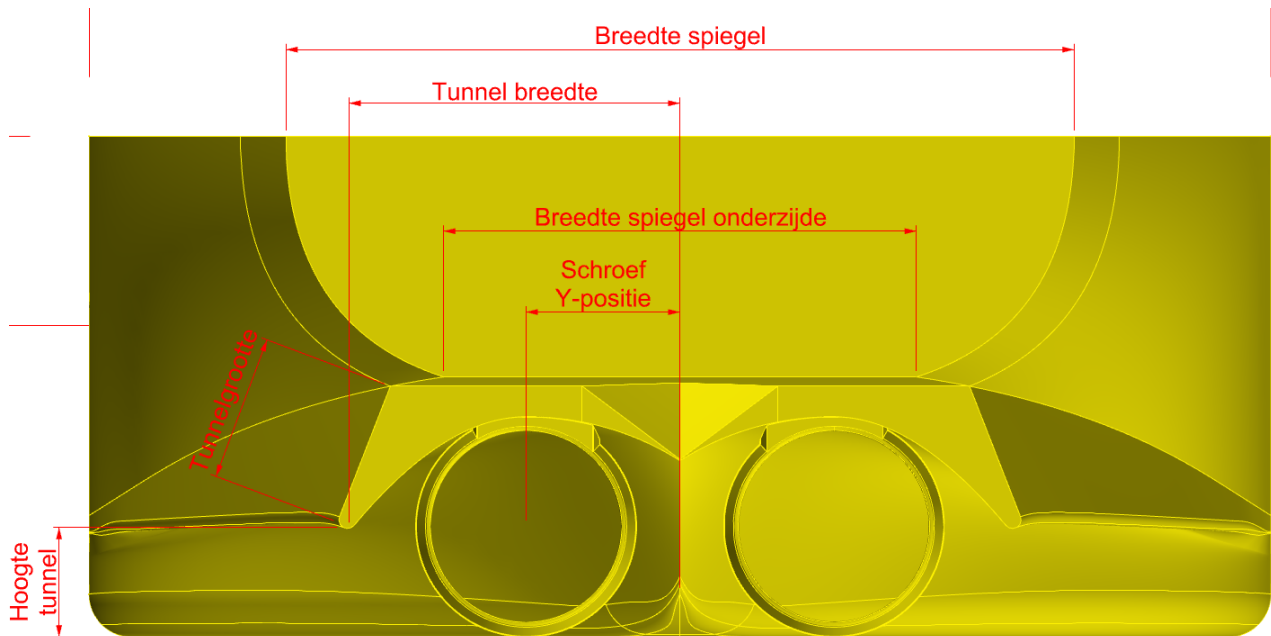


Figuur 3: Hoofdparameters lengte, breedte, diepgang en hoogte (ook wel holte genoemd)

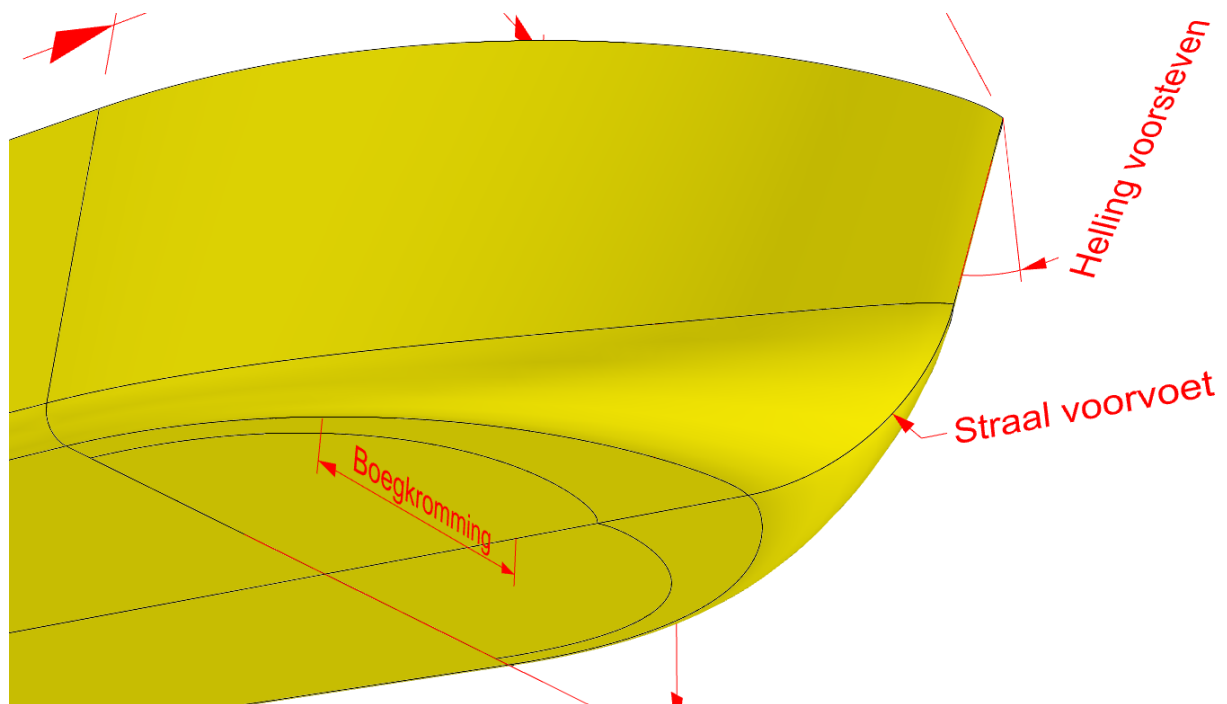


Figuur 4: Hoofdparameters lengte voor- en achterschip, en diepgang spiegel

De spiegel kan gevarieerd worden met parameters om zo de breedte aan bovenzijde en onderzijde, en de hoogte (en daarmee diepgang van de spiegel) vast te leggen. Dit is getoond in Figuur 5. In diezelfde figuur zijn ook parameters voor het tunnelontwerp opgenomen. Niet alle parameters van het tunnelontwerp zijn in de afbeelding zichtbaar. Het is bijvoorbeeld ook mogelijk om het verloop van de tunnel te variëren door lijnen/curves in langsricting te vervormen. Zo kan de tunnel bijvoorbeeld korter op het middenschip naar binnen trekken, of kan deze kromming verder naar achteren getrokken worden.



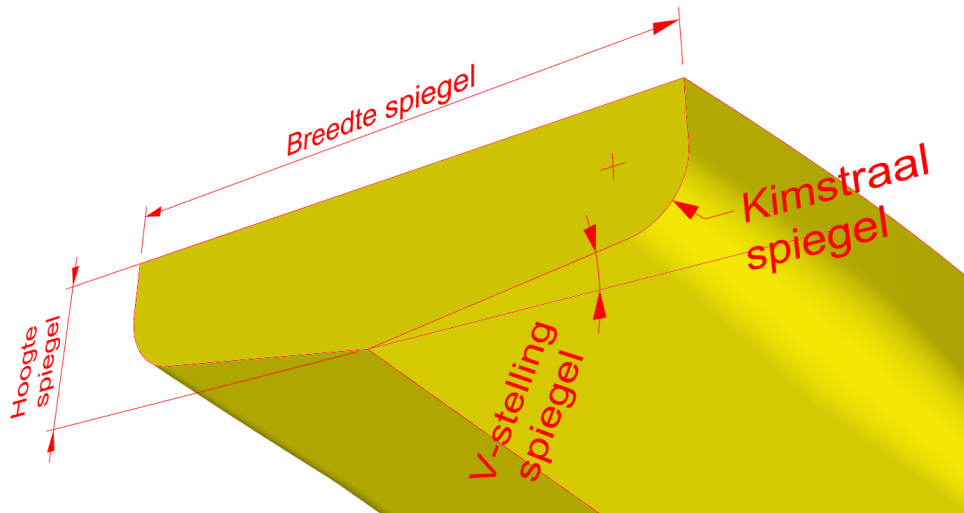
Figuur 5: Parameters voor de spiegel, tunnel en schroefpositionering



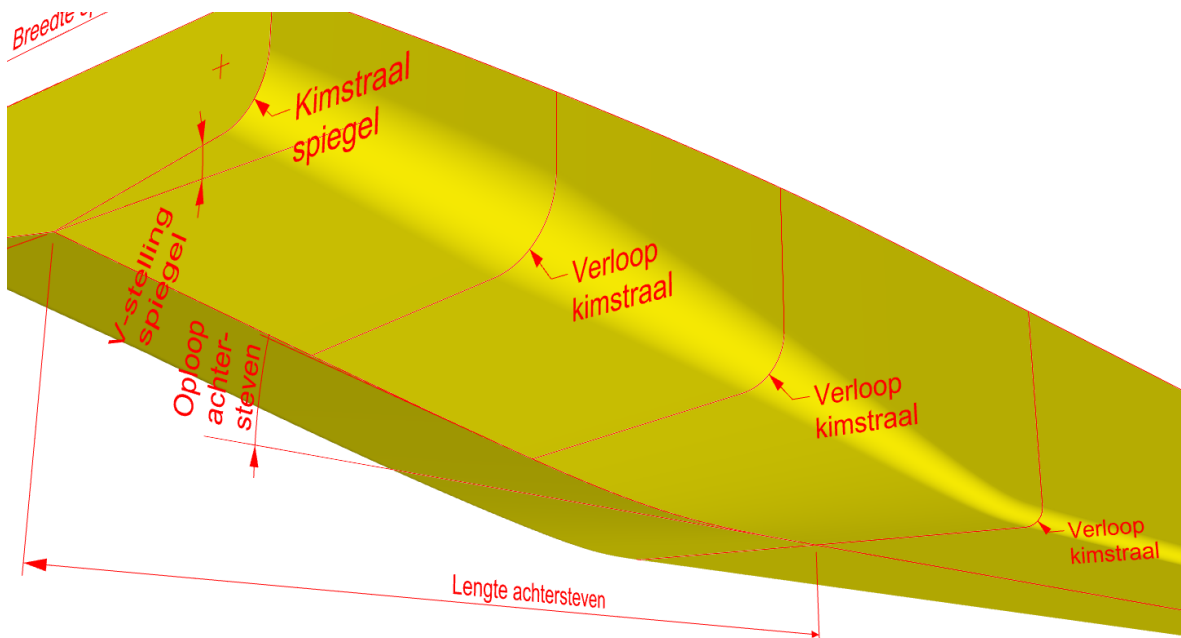
Figuur 6: Boegvorm parameters

Detail-parameters voor de boegvorm zijn getoond in Figuur 6 en toepasbaar op zowel praamvormige als tunnelvormige schepen: ze delen hetzelfde boegmodel. De lengte van de boeg kan aangepast worden als hoofdparameter, terwijl het verloop van de kimstraal, de helling van de voorsteven en de kromming van de boeg de details van het boegontwerp bepalen. De kromming van de boeg kan aan zowel de bodemzijde al de dekzijde aangepast worden.

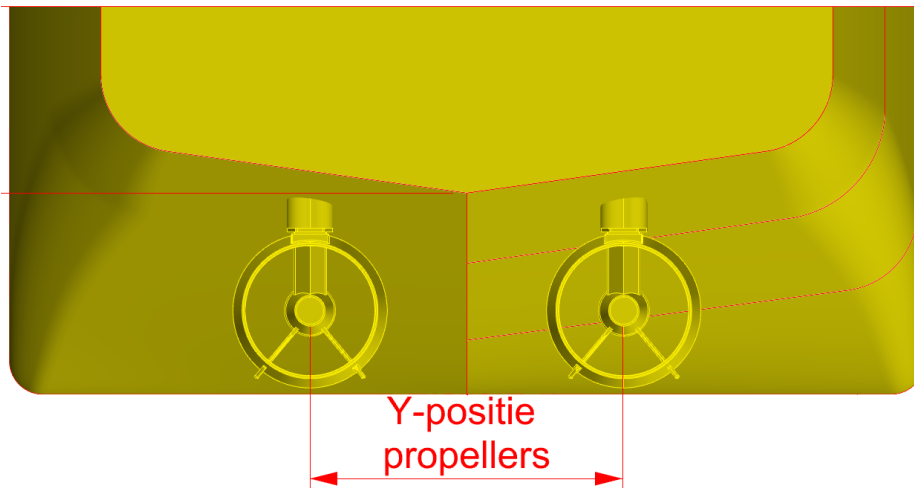
Voor praamvormige schepen kan ook de spiegelbreedte en hoogte (diepgang) aangepast worden. Daarnaast kan de v-stelling van de spiegel gevarieerd worden. Dit is te zien in Figuur 7. Figuur 8 laat zien dat voor praamvormige schepen het verloop van de kimstraal aangepast kan worden. Niet getoond in de afbeelding zijn parameters voor het verloop van de deklijn of het punt waar de kiel van het schip ophoudt. Figuur 9 laat de schroefpositionering zien voor praamvormige schepen met thrusters.



Figuur 7: Parameters voor spiegel praamvormige schepen



Figuur 8: Parameters voor achterschip praamvormige schepen

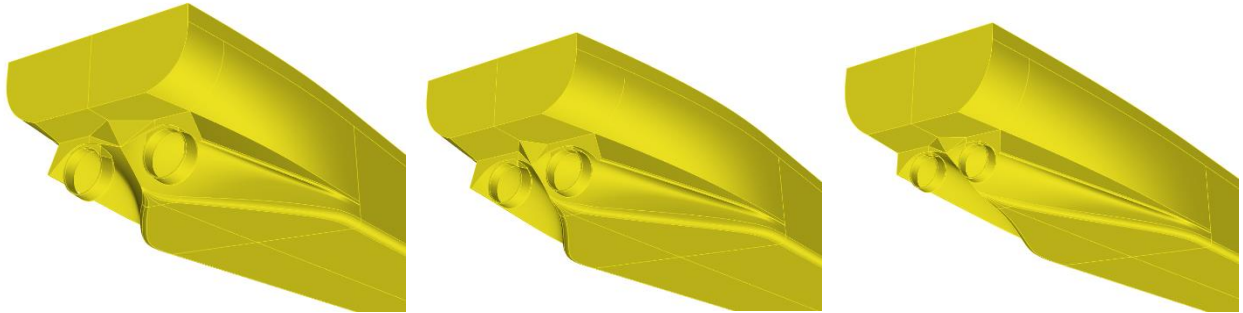


Figuur 9: Schroefpositie voor praamvormige schepen

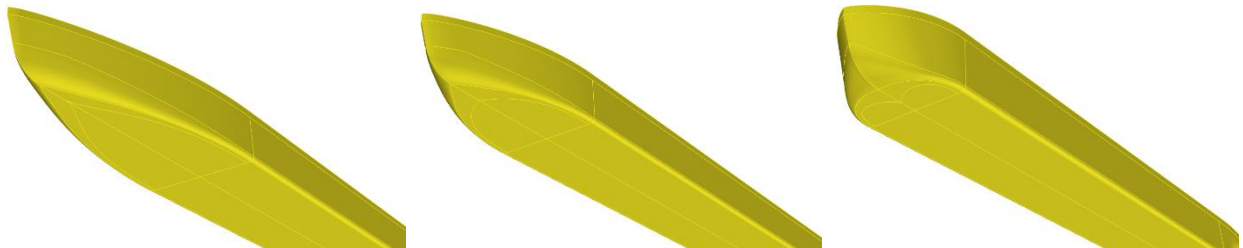
De schroefdiameter is afhankelijk van de beschikbare ruimte en is dus géén expliciete parameter in het model. Door de spiegeldiepgang en vorm van het achterschip of de tunnel te variëren verandert de ruimte die beschikbaar is voor de schroef en/of straalbuis. Die diameter ervan wordt gemaximaliseerd – met een bepaalde vrijslag tussen de schroef/straalbuis en de romp – op basis van de beschikbare ruimte.

3.2 Voorbeelden van romp-geometrieën

Figuur 10 en Figuur 11 laten enkele voorbeelden zien van rompvormen die met het model gegenereerd kunnen worden.



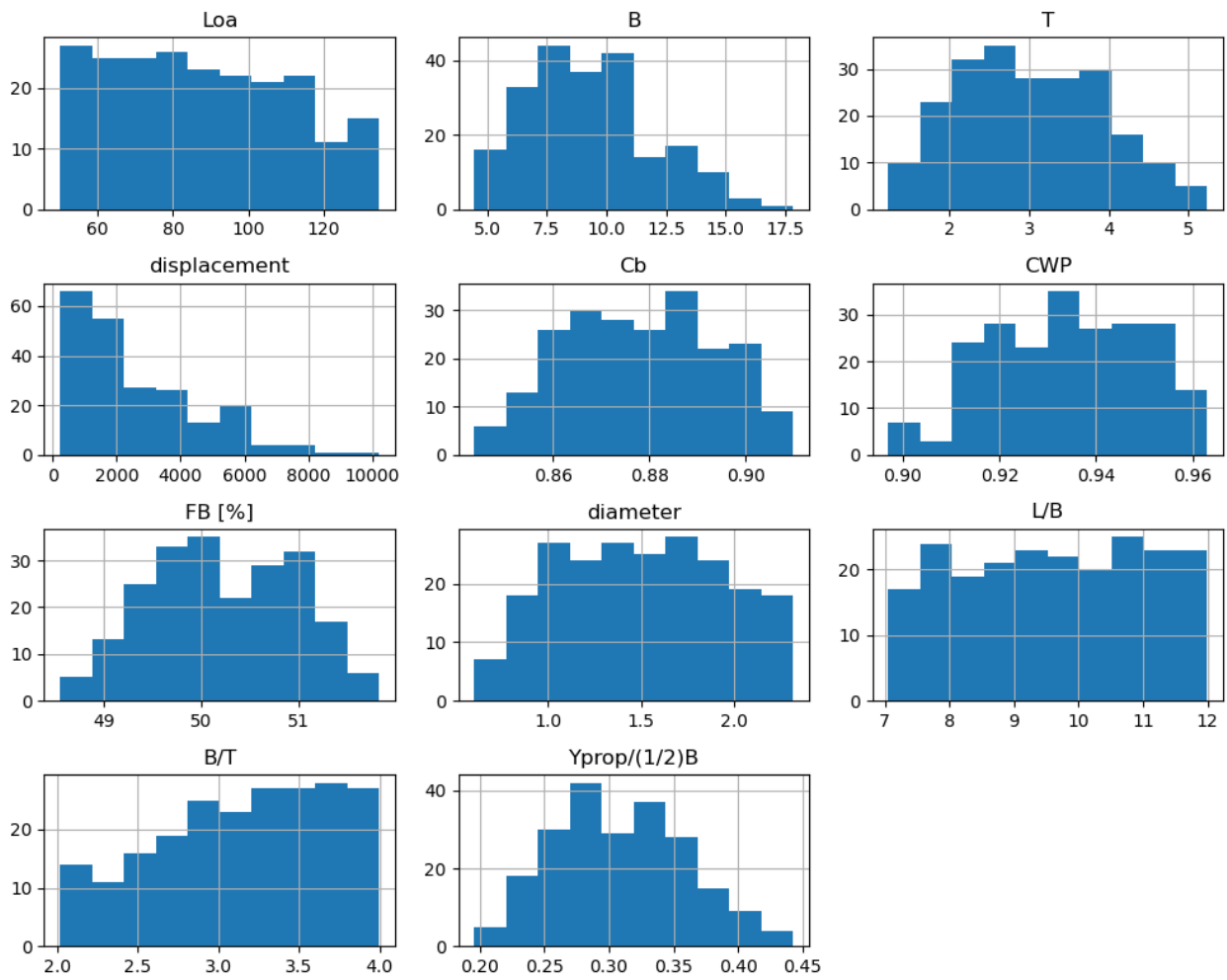
Figuur 10: Enkele voorbeelden van gegenereerde achterschepen: variatie van afstand tussen straalbuizen, of juist een kleine schroefdiameter door grote spiegel



Figuur 11: Enkele voorbeelden van gegenereerde boegvormen: variatie van boeglengte

3.3 Spreiding van parameters

Figuur 12 laat de spreading van de verschillende parameters zien in de hoofddataset van 260 rompvormen. Te zien is dat langere schepen wat minder goed vertegenwoordigd zijn. Dit is het gevolg van een filtering in de dataset op “realistische” vormen: de verhoudingen tussen parameters zorgen er bij grote lengtes voor dat bijvoorbeeld het tunnelontwerp niet realistisch meer is. Dergelijke rompen worden uit de dataset verwijderd. Hetzelfde geldt voor grotere breedtes. Door deze filtering zijn ook grotere waarden van waterverplaatsing slechter vertegenwoordigd. Hierbij moet opgemerkt worden dat waterverplaatsing een product van lengte, breedte en diepgang is, waardoor je zelfs bij een perfect uniforme verdeling van die drie parameters een aflopende verdeling van waterverplaatsing hebt. Overige veelal dimensieloze parameters zijn voldoende goed verdeeld over de dataset.



Figuur 12: Spreiding van geometrisch parameters over de dataset van 260 schepen

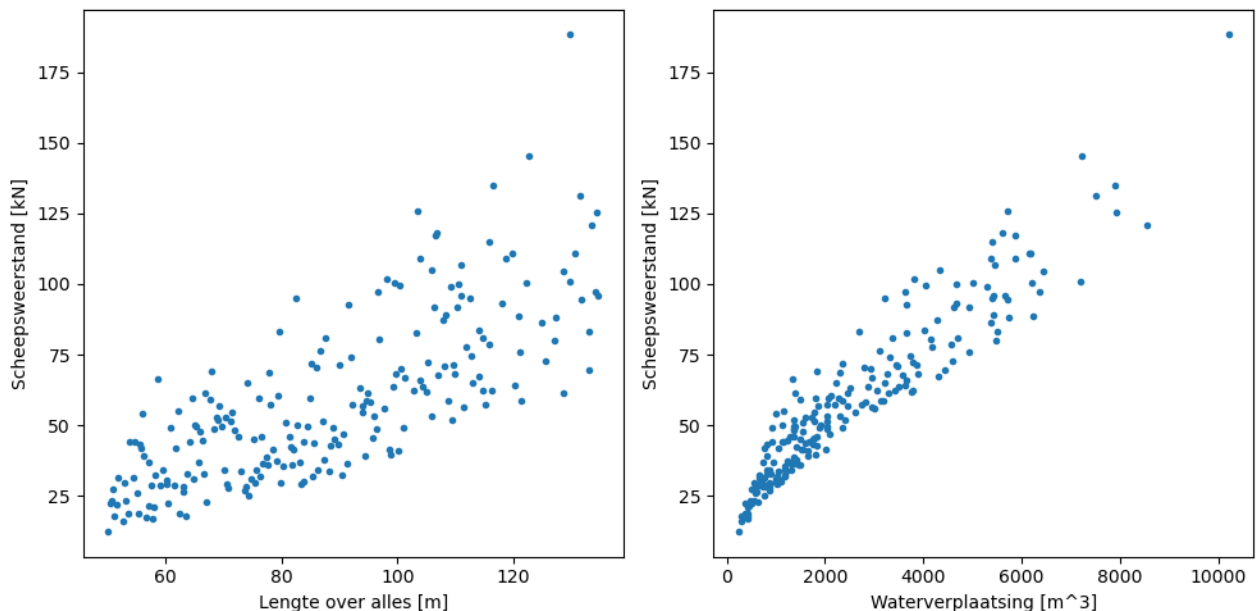
4 CFD BEREKENINGEN

Voor het dubbelschroefsachterschip met tunnels en aslijnen zijn in totaal 420 CFD berekeningen uitgevoerd. Deze zijn gedaan voor een hoofddataset van 260 scheepsvormen met een kielspeling van 3.0 meter, en daarnaast voor een subset van 20 sommen om de effecten van aanhangsels, waterdiepte, rekenen op een grof grid, en ballastdiepgang te bepalen.

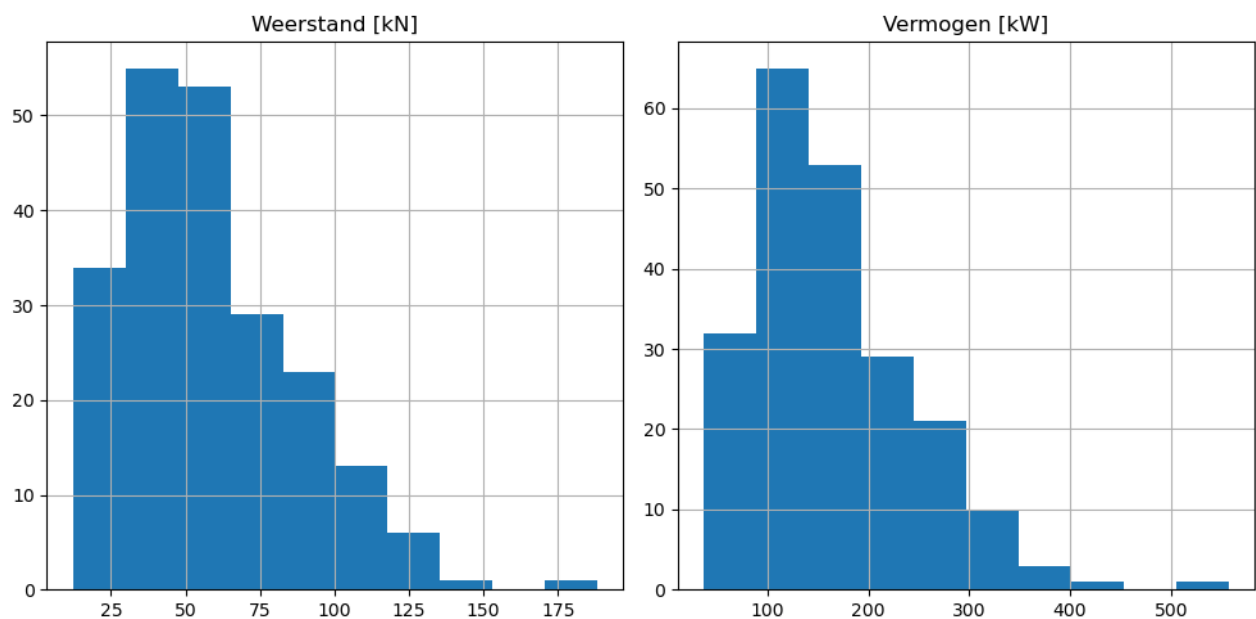
Dit hoofdstuk geeft een breed overzicht van de rekenresultaten. In hoofdstuk 5 wordt de data gebruikt om er parametrische modellen uit te genereren.

4.1 Hoofddataset

Figuur 13 laat zien hoe de data verdeeld is ten opzichte van scheepslengte en waterverplaatsing. Met name de relatie tussen scheepsweerstand en waterverplaatsing is goed zichtbaar.



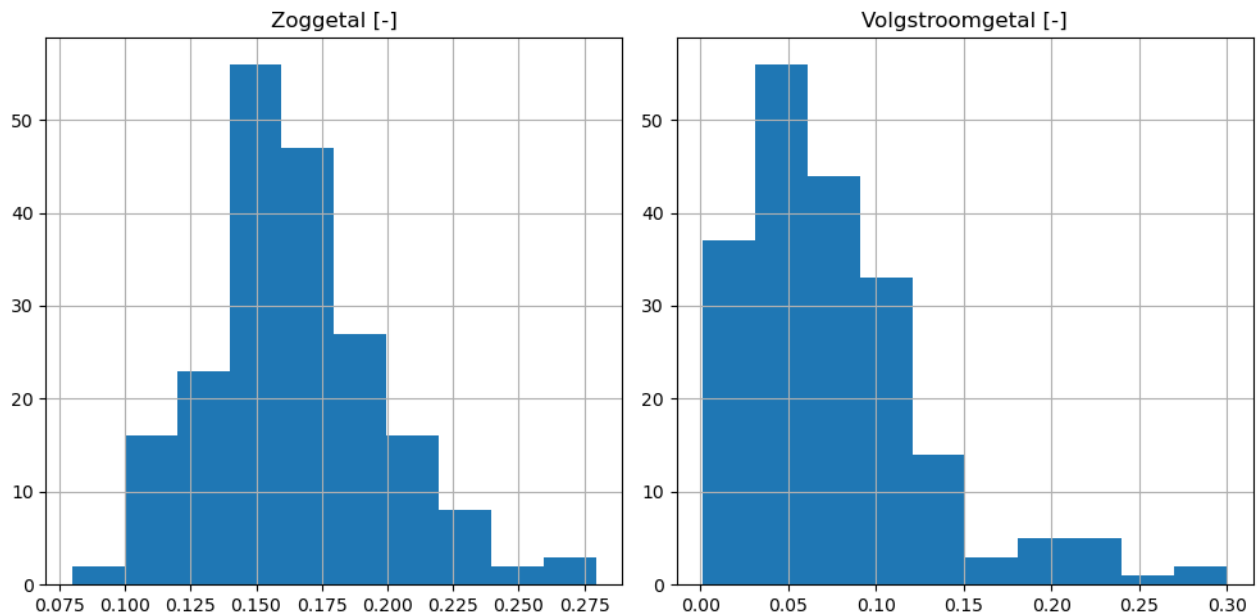
Figuur 13: Scheepsweerstand in hoofddataset uitgezet tegen scheepslengte [m] en waterverplaatsing [m³]



Figuur 14: Distributie van weerstand (links) [kN] en vermogen (rechts) [kW] over de hoofddataset

In Figuur 14 is te zien dat er een concentratie in de dataset is bij kleinere weerstanden en vermogens. Dit is te verklaren met de verdeling van waterverplaatsing (displacement) in Figuur 12: daar is een concentratie op lagere waarden van waterverplaatsing te zien. Dat samen met de duidelijke relatie tussen waterverplaatsing en scheepsweerstand (en daarmee ook tussen waterverplaatsing en vermogen) zorgt dat er een concentratie van lagere scheepsweerstand en vermogens optreedt.

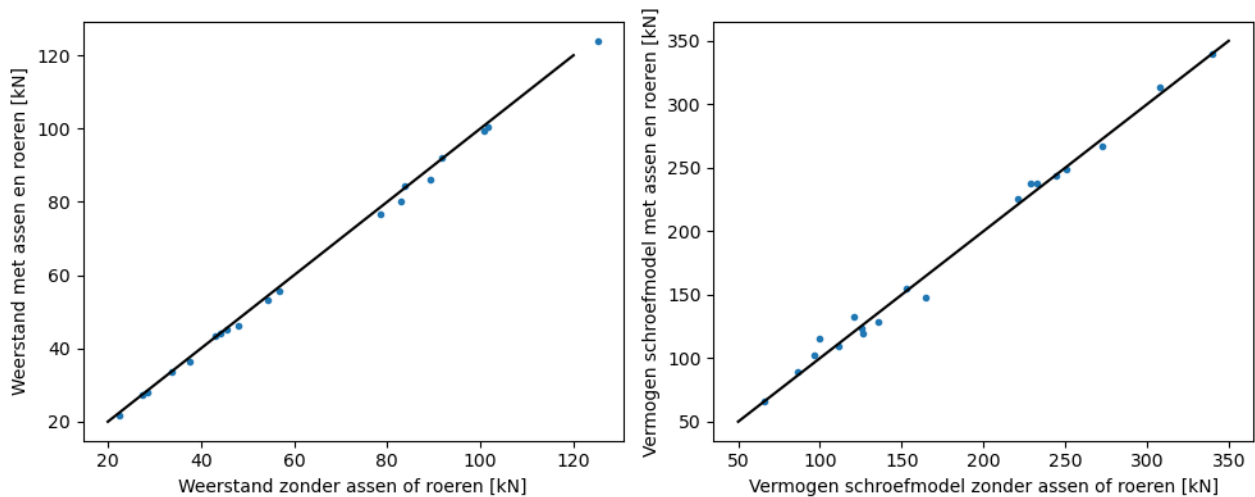
Figuur 15 laat de verdeling van zoggetal en volgstroomgetal in de dataset zien. Het zoggetal varieert hoofdzakelijk tussen 0.10 en 0.22 terwijl het volgstroomgetal tussen de 0.0 en 0.12 varieert.



Figuur 15: Distributie van zoggetal (links) en volgstroomgetal (rechts) over de hoofddataset

4.2 Effect van roeren en assen

Het effect van het wel of niet meenemen van roeren en schroefassen is onderzocht door bij een subset van 20 scheepsrompen deze aanhangsels wél mee te nemen, terwijl dat in de hoofddataset van 260 schepen niet gedaan is. In Figuur 16 zijn de resultaten van de betreffende berekeningen getoond. Te zien is dat het effect beperkt is. In veel gevallen is de impact verwaarloosbaar.



Figuur 16: Scheepsweerstand (links) en vermogen (rechts) zonder aanhangsels uitgezet tegen deze grootheden met aanhangsels

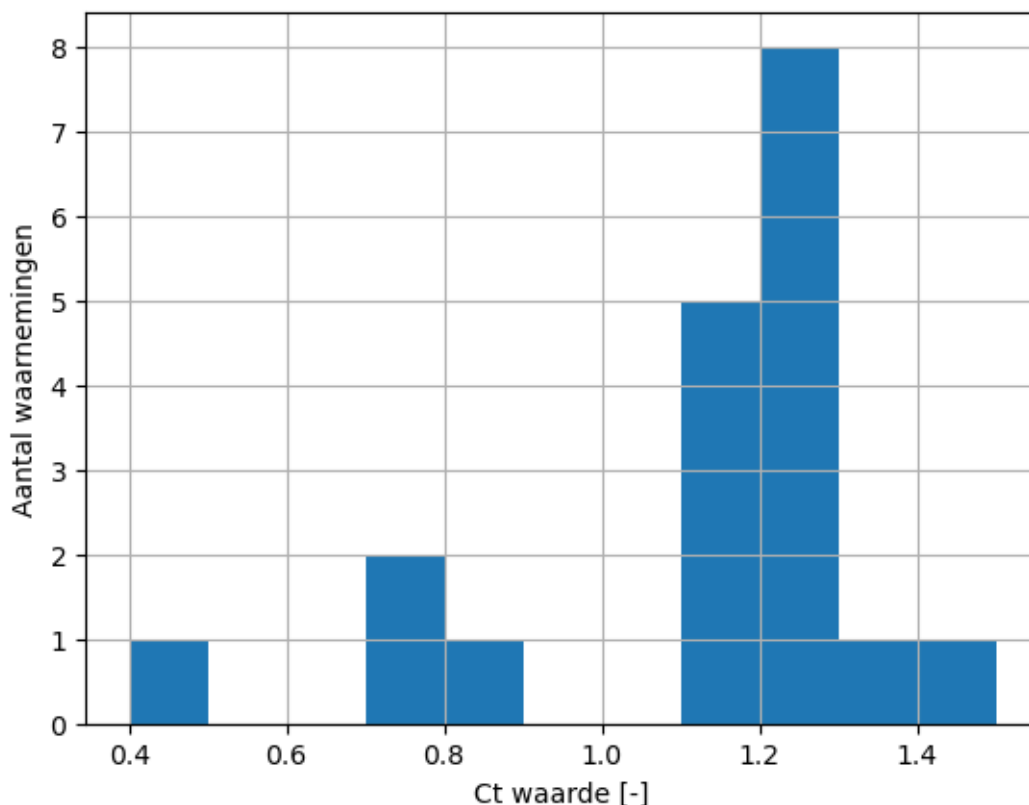
Er is geprobeerd een relatie tussen geometrische parameters en de invloed van aanhangsels te vinden, maar dit bleek niet goed mogelijk. De verklaring dat het effect erg klein is, is dat enerzijds de roeren buiten de schroefstraal staan (twee roeren achter elke straalbuis) zodat de roeren erg weinig weerstand hebben. Anderzijds geldt dat het schroefmodel (en ook een echte schroef) een hogedrukgebied creëert stroomafwaarts vanaf de schroefpositie. Deze hoge druk ligt dan ook op de achterzijde van de schroefas, wat leidt tot een voorwaartse kracht die mogelijk de extra weerstand van de schroefas (ten opzichte van het gehele schip) teniet doet.

4.3 Effect van fijner grid

Een vergelijk tussen sommen met het grove grid en het fijnere grid laat zien dat de weerstand en het geschatte vermogen bij een fijner grid ongeveer twee procent lager zijn. Deze correctie wordt daarom ook toegepast in het parametrisch model.

4.4 Effect van Ballast-conditie

Het effect van ballastconditie is in de meeste gevallen een reductie van weerstand van ongeveer 25%. De dataset was niet groot genoeg om een duidelijk relatie tussen geometrische parameters en de weerstandsreductie bij ballastconditie te bepalen. In Figuur 17 laat zien welke correcties voor weerstand tussen beladen en onbeladen conditie voorkwamen in de dataset. Er zijn enkele uitschieters te zien, maar het grootste deel van de dataset concentreert zich rond een ratio van 1.30.



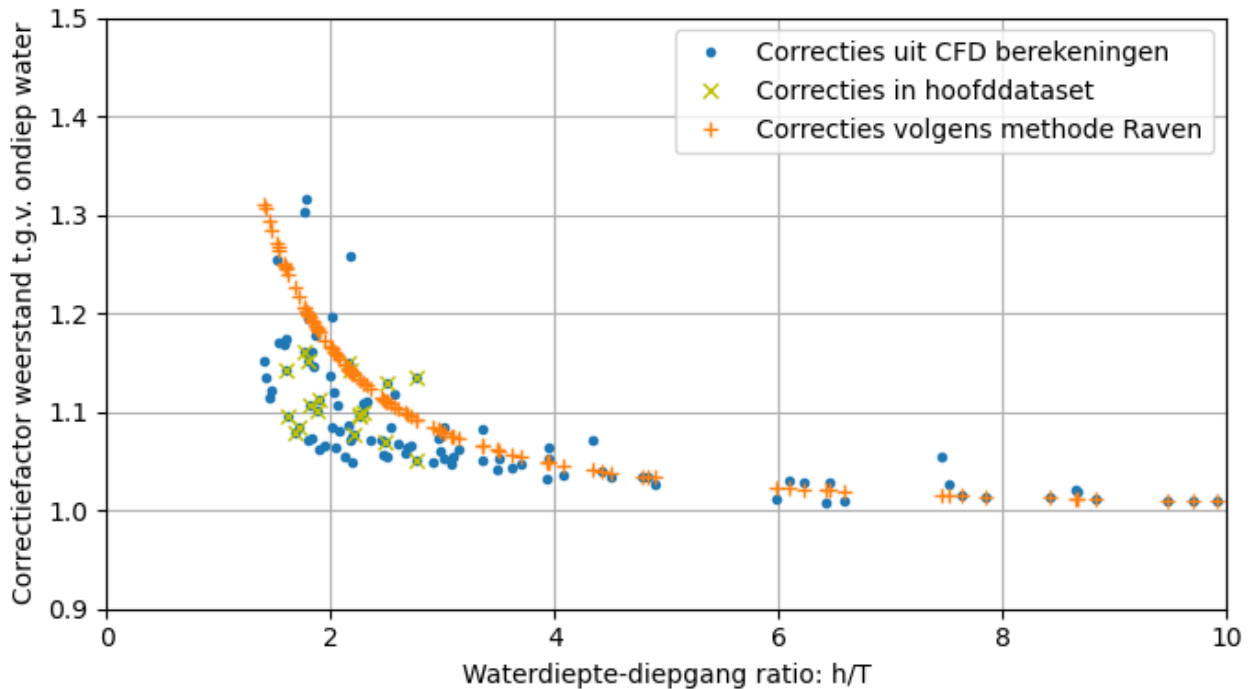
Figuur 17: Verhoudingen in weerstandscoefficiënt tussen volbeladen conditie en ballastconditie in de subset van 20 schepen die getest zijn bij ballastconditie.

4.5 Effect van ondiep water

Het effect van ondiep water zal ervoor zorgen dat de weerstand van veel scheepsvormen in de hoofddataset groter is dan in diep water. Omdat er een constante kielspeling toegepast is, varieert de waterdiepte tussen de scheepsrompen omdat de diepgang varieert. Doordat de schepen op verschillende waterdieptes, en dus verschillende h/T waarden, doorberekend zijn zal de waterdiepte

een invloed hebben op de trends in de dataset. In hoofdstuk 0 wordt de data daarom eerst gecorrigeerd voordat er een parametrisch model afgeleid wordt.

In Figuur 18 is te zien dat de correcties voor de kleinste kielspeling (2 meter) oplopen tot ca. 30% (correctiefactor 1.3) van de diepwaterweerstand. De hoofddataset kent correctiefactoren tussen de 1.05 en 1.17. Dit is significant genoeg om een correctie naar oneindig diep water toe te passen alvorens een parametrisch model uit de data af te leiden.



Figuur 18: Correctie van weerstand door ondiep water voor hoofddataset en datasets op afwijkende kielspeling(en). De methode van Raven (2016) is ook weergegeven

5 PARAMETRISCHE VERMOGENSSCHATTING

Op basis van de rekenresultaten voor de hoofddatasets en de extra datasets (rekenresultaten voor subsets van de schepen in de hoofddataset) kan een parametrisch model opgesteld worden waarmee vermogensschattingen van binnenvaartschepen gemaakt kunnen worden.

Deze vermogensschatting moet een redelijke nauwkeurigheid bieden, zodat de schattingen voldoende onderscheidend vermogen bieden om invloed van keuze tussen scheepsklassen of verschillende scheepsconcepten weer te kunnen geven. Aan de andere kant moet het model voldoende eenvoudig zijn dat het bruikbaar is in de conceptfase waarin nog niet alle details van de rompvorm beschikbaar zijn. Een nauwkeurigheid van +/- 15% is daarom acceptabel: dit is voldoende voor gebruik in scenario-analyses, economisch-logistieke modellen of tijdens het conceptontwerp.

Een andere voorwaarde voor het parametrisch model is dat het “leesbaar” is. Dat betekent dat de het model in feite een wiskundige formule is, bestaande uit een aantal termen en bijbehorende coëfficiënten: een polynoom. Een python-implementatie van de methode is ook beschikbaar.

In de hoofdstuk wordt de afleiding van het parametrisch model besproken. Als eerste dient de data van de hoofddataset gecorrigeerd te worden voor waterdiepte zoals besproken bij Figuur 18. Hieruit kan ook direct het model voor de invloed van waterdiepte worden bepaald. Daarna kunnen modellen afgeleid worden voor weerstand, zoggetal en volgstreamgetal.

5.1 Effect van waterdiepte

De methode van Raven (2016) is gebaseerd op een brede set van schepen en geeft in grote lijnen een goede trend in vergelijking met de rekenresultaten uit deze studie. Dit is te zien in Figuur 18. Echter is ook te zien dat de methode een gemiddeld overschatting van het ondiepwatereffect geeft voor de schepen die doorberekend zijn in deze studie.

In Figuur 19 is de afwijking tussen het ondiepwatereffect in de dataset en de methode van Raven uitgezet tegen verschillende parameters. Voor elke verschillende kielspeling is een andere kleur toegepast. De grafiek rechtsonder, waarin de afwijking is uitgezet tegen h/T , laat goed zien dat de afwijking pas ontstaat bij lagere h/T waardes. In de andere grafieken is ook te zien dat de grootste afwijkingen voorkomen bij een kielspeling van 2.0 meter (blauw), en dat de afwijkingen kleiner worden met grotere kielspeling.

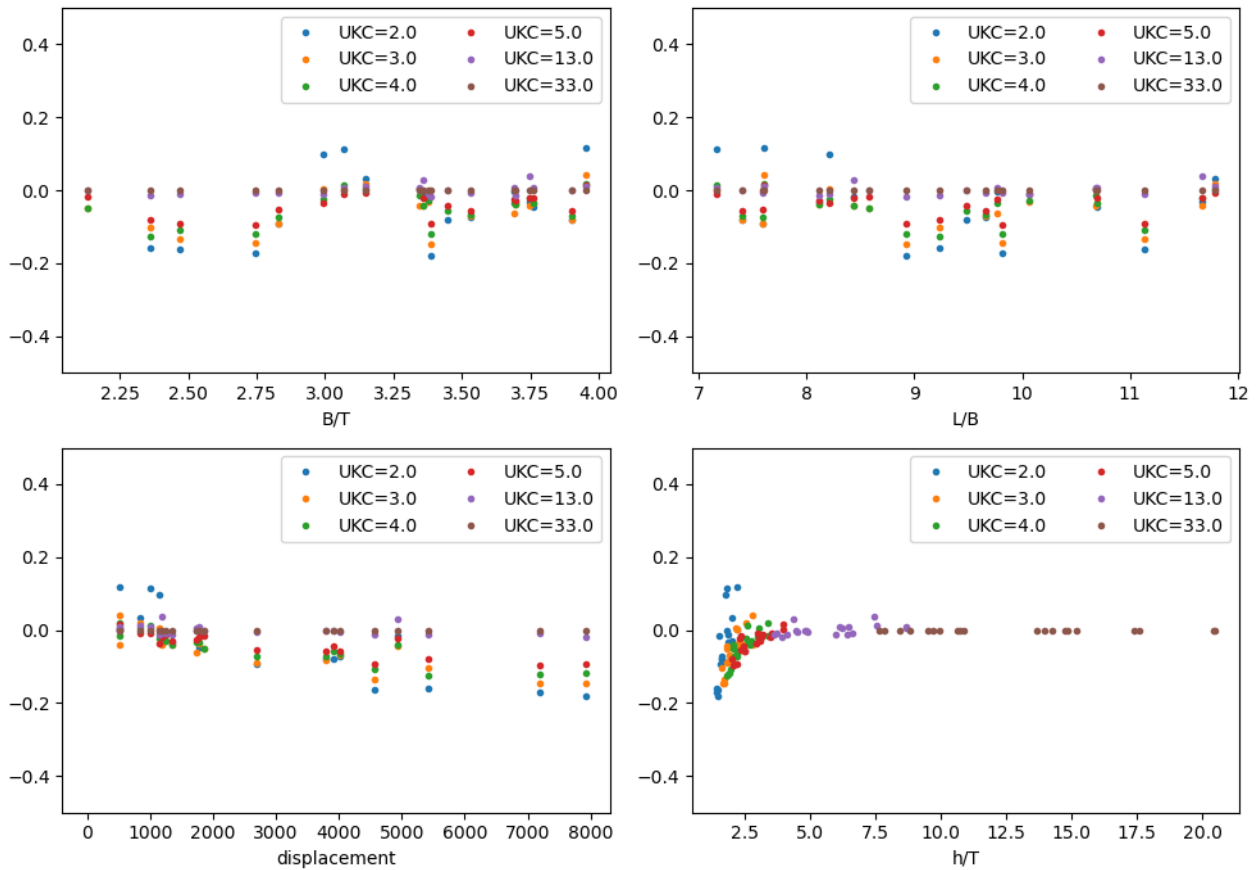
De meest duidelijke relatie tussen een rompvormparameter en de afwijking van de ondiepwatercorrectie werd gevonden door de afwijking uit te zetten tegen waterverplaatsing (displacement). Dit is gedaan in de grafiek linksonder in Figuur 19.

Er is daarom naar een aangepast fit van de methode van Raven gezocht. Dit werd gevonden met de volgende formule:

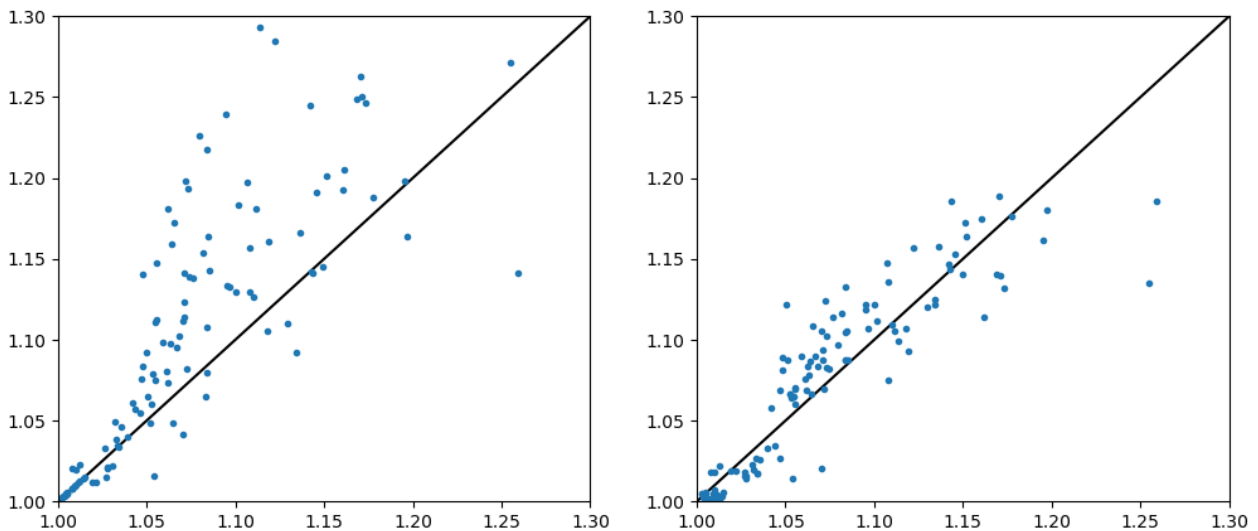
$$\frac{C_T}{C_T[h = \infty]} = 1.0 + 0.57 \cdot \left(\frac{h}{t}\right)^{-1.79} + \frac{-0.398 \cdot \nabla^{\frac{1}{3}} + 0.4052}{UKC}$$

Waarbij UKC de kielspeling bedraagt, en C_T de weerstandscoefficient ($C_T = \frac{R}{0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S}$, met S het nat oppervlak en R de scheepsweerstand), en ∇ de waterverplaatsing van het schip. De correctie gaat naar 1.0 wanneer de waterdiepte (en dus ook kielspeling) naar oneindig groot gaat.

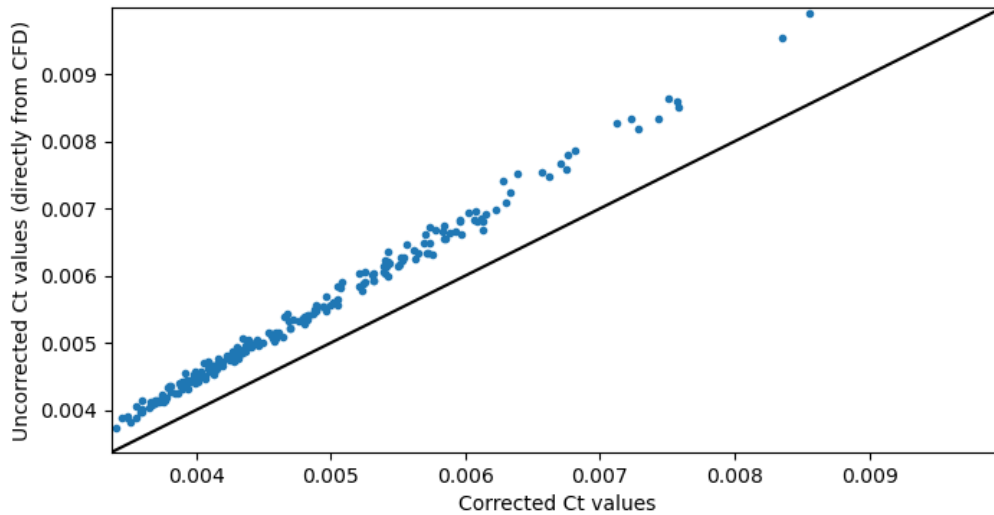
In Figuur 20 is de correlatie tussen berekende waardes en geschatte waardes voor de ondiepwatercorrectie vergeleken. De aangepaste methode past duidelijk beter op de dataset. De weerstandswaardes in de hoofddataset worden daarom ook met deze correctie omgerekend naar diep water.



Figuur 19: Afwijking van de correctie van de weerstand t.o.v. de methode van Raven, uitgezet tegen B/T , L/B , displacement en h/T



Figuur 20: Vergelijk van de correlatie tussen berekende waarden en de ondiepwater-correctie methode. Links de methode van Raven, rechts de aangepaste methode



Figuur 21: De weerstandscoefficient (C_t) bij 3 meter kielspeling uitgezet tegen de C_t waarde gecorrigeerd naar oneindige kielspeling

5.2 Model voor diep water

Het model voor diep water is samengesteld met behulp van *feature selection*, een techniek uit het machine-learning veld waarbij een voorspellingsmodel wordt opgesteld op basis van een afweging tussen zo min mogelijk parameters enerzijds, tegenover een zo hoog mogelijke nauwkeurigheid anderzijds. Deze nauwkeurigheid wordt bepaald door een model met een bepaald aantal parameters (een subset) te fitten op een deel van de data, en daarna de overeenkomst met de resterende data te bepalen. Deze aanpak wordt *cross-validation* genoemd. Met behulp van feature selection en cross validation kan voor deze studie een model worden opgesteld met een beperkt aantal parameters (waardoor het leesbaar blijft) maar wel met een voldoende nauwkeurigheid voor het doel: het geven van vermogensvoorspellingen voor scenario-simulaties of voor een conceptontwerp.

De parameters die werden gebruikt tijdens de *feature selection* zijn opgenomen in Tabel 1. In deze tabel is C_{WP}^* te vinden. Dit is de coëfficiënt van het waterlijnopervlak *exclusief* het middenschip. Deze parameter is daardoor gevoeliger voor vorm en afmeting van voor- en achterschip. De parameters in de tabel zijn niet allemaal onderdeel van het resulterende model, maar de feature selection procedure kon hieruit kiezen.

Tabel 1: Gebruikte parameters om parametrisch model te fitten.

L_{OA}	$\frac{L}{B}$	$\frac{B}{T}$	C_B
C_{WP}	C_{WP}^*	$\frac{L_{BOW}}{L_{OA}}$	$\frac{L_{STERN}}{L_{OA}}$
$\frac{D_{PROPELLER}}{T}$	$\frac{Y_{PROPELLER}}{\left(\frac{1}{2}\right)B}$	$D_{PROPELLER}$	$\frac{D_{PROPELLER}}{B}$
$\frac{B_{TRANSOM-DECK}}{B}$	$\frac{B_{TRANSOM-WL}}{B}$	$\frac{T_{TRANSOM}}{T}$	$\frac{A_{TRANSOM}}{B \cdot T}$

Om een model samen te stellen zijn steeds de volgende stappen doorlopen:

1. Uitbreiding dataset: van de parameters worden de inverses toegevoegd (dus voor L/B wordt ook B/L toegevoegd), worden producten van parameters toegevoegd (B/T en C_B worden dan samen een nieuwe "parameter") en worden kwadraten van parameters toegevoegd.
2. Forward feature selection: een model begint met 0 parameters en kan dan slechts de gemiddelde waarde in een dataset voorspellen. Daarna kiest het model uit de beschikbare parameters degene die zorgt voor de grootste afname van de afwijking tussen voorspelling en data. Dit wordt een aantal keer herhaald: steeds voegt het model de parameter toe die de grootste reductie van de afwijking oplevert.
3. De methode die bij de feature selection gebruikt wordt om voor elk aantal parameters een voorspellingsmodel op te stellen is *Elastic-net* fitting. Deze methode probeert zoveel mogelijk coëfficiënten op 0.0 te zetten om zo het aantal parameters in het model te beperken. Alle parameters (en combinaties van parameters, zie (1)) waarvan de coëfficiënten op 0.0 gezet zijn worden verwijderd, en op de resterende parameters wordt regressie toegepast.

Met bovenstaande stappen is onderzocht welk aantal parameters het meest geschikt is voor modellen voor weerstand, volgstroombetal en zoggetal. Het vermogensmodel heeft (zoals in sectie 2.3 besproken) de volgende vorm:

$$P_D = R \cdot \frac{V_S}{\eta_O \cdot \eta_H}$$

$$R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_S^2 \cdot S \cdot (C_R + C_F) + \Delta R_W$$

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re) - 2.0)^2}$$

$$Re = \frac{L_{OA} \cdot V_S}{\nu}$$

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w}$$

$$w = (C_R + C_F) \cdot \frac{w}{C_T}$$

Waarbij dus modellen nodig zijn voor C_R , w/C_T en t . Daarnaast kan ook S geschat worden op basis van een aantal parameters. η_O dient afgeleid te worden uit systematische schroevenseries. De formules zijn als volgt:

$C_R =$	$-0.00958 + 0.00033 \cdot \frac{B}{T} + 0.0264 \cdot \frac{L_{STERN}}{L_{OA}} + 0.03584 \cdot (1.0 - C_{WP}) + 0.16964 \cdot \frac{B}{L_{OA}} - 0.00084$ $\cdot D_{PROPELLER} - 0.00736 \cdot \frac{B^2}{L \cdot T} - 0.34624 \cdot \frac{L_{STERN}}{L_{OA}} \cdot \frac{B}{L_{OA}} - 0.46327 \cdot (1.0 - C_{WP})$ $\cdot \frac{B}{L_{OA}}$
$\frac{w}{C_T} =$	$50.47276 + 5.01097 \cdot \frac{L_{OA}}{B} - 4.69024 \cdot \frac{B}{T} + 67.46817 \cdot \frac{Y_{PROPELLER}}{\left(\frac{1}{2}\right)B} - 160.38854 \cdot \frac{B_{TRANSOM-WL}}{B}$ $+ 0.98587 \cdot \frac{L_{OA}}{B} \cdot \frac{B}{T} - 14.05169 \cdot \frac{L_{OA}}{B} \cdot \frac{Y_{PROPELLER}}{\left(\frac{1}{2}\right)B} - 2.24690 \cdot \frac{L_{OA}}{B}$ $\cdot \frac{B_{TRANSOM-WL}}{B} + 103.75348 \cdot \left(\frac{B_{TRANSOM-WL}}{B}\right)^2$
$t =$	$0.0555 - 0.68199 \cdot \frac{L_{STERN}}{L_{OA}} + 0.17349 \cdot \frac{Y_{PROPELLER}}{\left(\frac{1}{2}\right)B} + 0.81302 \cdot \frac{B}{L_{OA}} + 1.0632 \cdot \frac{D_{PROPELLER}^2}{B \cdot T}$

$S =$	$172.2061 - 137.04526 \cdot \frac{L_{OA}}{B} + 18.9852 \cdot L_{OA} + 104.65083 \cdot \frac{T}{B} + 15.3836 \cdot \left(\frac{L_{OA}}{B}\right)^2 - 2.9342$ $\cdot \frac{L_{OA}^2}{B} - 115.68933 \cdot \frac{L_{OA}}{B} \cdot \frac{T}{B} + 0.15003 \cdot L_{OA}^2 + 33.57659 \cdot L_{OA} \cdot \frac{T}{B} - 390.21366$ $\cdot \left(\frac{T}{B}\right)^2$
-------	---

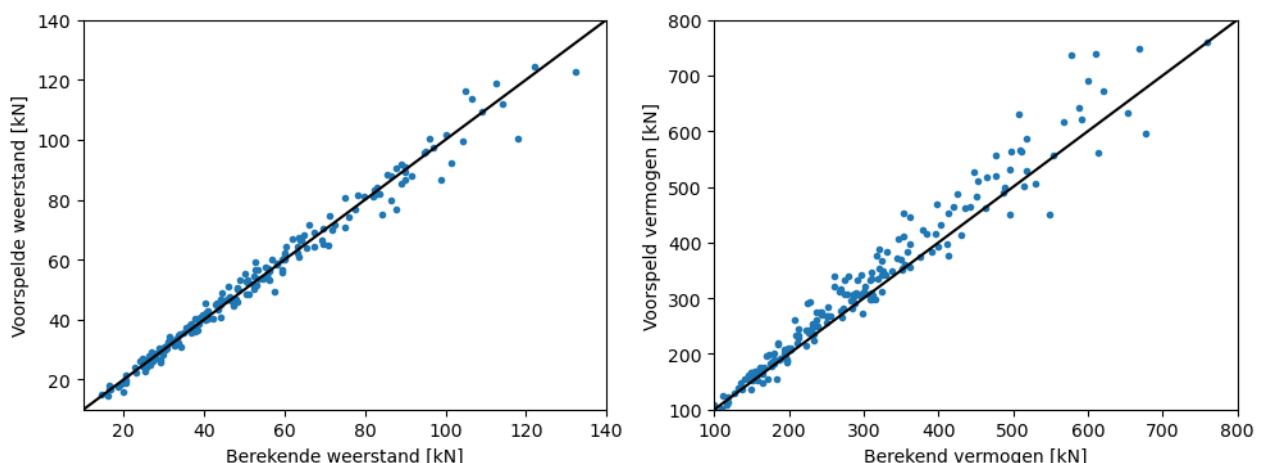
Om ΔR_W te bepalen wordt de methode van Holtrop (1982) gebruikt. Dit is mogelijk een beperking of onnauwkeurigheid in het hierboven beschreven model. Het bleek niet haalbaar om berekeningen uit te voeren op voldoende verschillende snelheden en zo een opsplitsing te kunnen maken tussen golfmakende weerstand (sterk snelheidsafhankelijk) en viskeuze weerstand (schaalt met het kwadraat van de scheepssnelheid).

De methodes om ΔR_W en η_O te schatten zijn beschreven in appendices II en III. Een correctie om het effect van ballastdiepgang te bepalen kon niet voldoende nauwkeurig worden afgeleid. In plaats daarvan kan een linear verloop over gemiddelde diepgang toegepast worden. Bij volle belading moet de weerstand met 0% gereduceerd worden, bij ballastdiepgang (i.e. minimale diepgang) moet de weerstand met 25% gereduceerd worden.

Voor het nat oppervlak S kan de waarde ook uit een geometrisch model of uit een tekening van het schip afgeleid worden. De bovenstaande methode kan gebruikt worden indien er geen tekening of niet voldoende informatie beschikbaar is.

5.3 Verificatie en validatie

In Figuur 22 is een vergelijk gemaakt tussen voorspellingen uit het model en de waardes direct uit de CFD berekeningen. De datapunten gelden voor een snelheid van 15 kilometer per uur. Er is een goede overeenkomst te zien voor scheepsweerstand. Voor het schroefvermogen is de spreiding rondom het model groter. Dit volgt voor een deel uit de grotere spreiding die te vinden is in de voorspelling van het volgstroomgetal. Ondanks de grotere spreiding is de verwachting dat het opgestelde model voldoende nauwkeurig is voor de beoogde toepassingen.

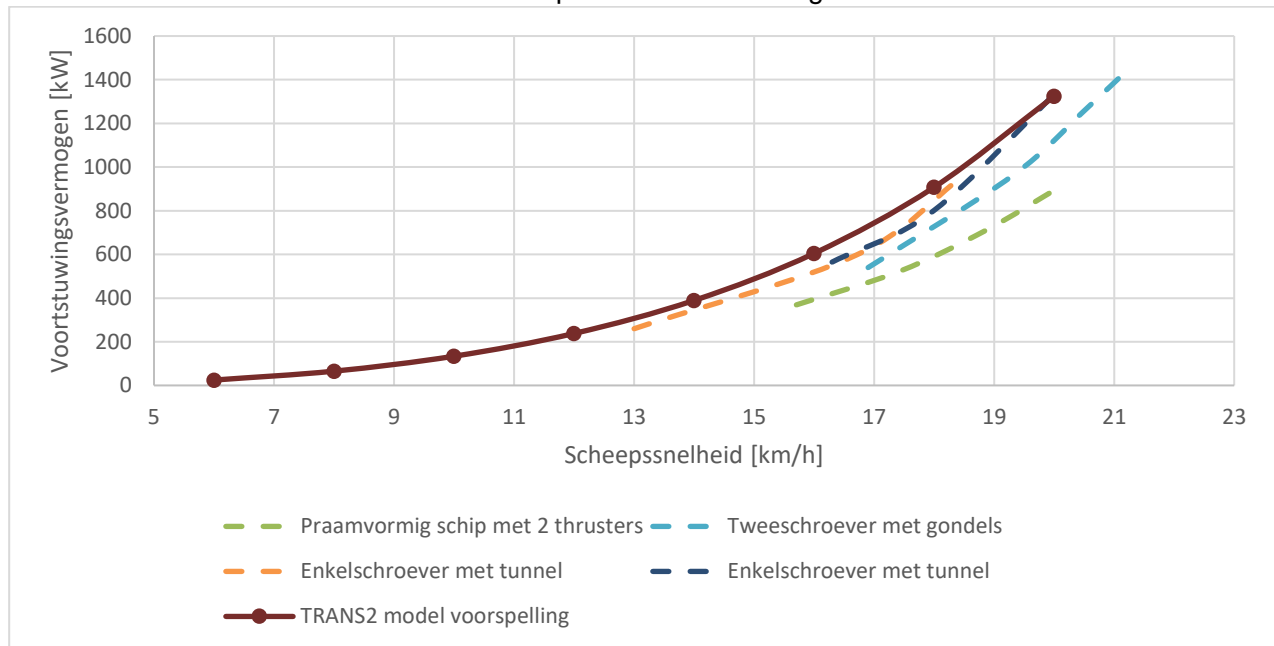


Figuur 22: Vergelijk tussen het voorspellingsmodel en weerstand/vermogen uit de CFD berekening

In Figuur 23 is een vergelijking te zien tussen een voorspelling van het parametrische model uit deze studie en ware-grootte metingen uit verschillende MARIN projecten. Alle lijnen in de grafiek betreffen schepen met lengte en breedte van 110 en 11.4 meter (klasse Va). De groene en blauwe stippelijnen zijn praamvormige schepen. Deze doen het in diep water doorgaans beter dan schepen met een tunnelachterschip. In ondiep water, echter, doen tunnelschepen het beter (Heuser, 1986). De oranje en donkerblauwe stippelijnen betreffen enkelschroevers met tunnels.

Het parametrisch model uit deze studie is voornamelijk slechts gefit op data van dubbelschroevers. Bij beperkte schroefbelasting is een enkelschroever doorgaans efficiënter door de gunstigere positie van de schroef ten opzichte van de scheepsrump: een gecentraliseerde schroef maakt voordelig gebruik van de vertraging in de inkomende stroming die veroorzaakt wordt door onder andere de wrijving langs de scheepshuid.

Het model uit deze studie geeft dus een wat hogere schatting van vermogen, maar dit kan goed komen door het feit dat de studie tot nu toe alleen op dubbelschroevers gericht was.



Figuur 23: Vergelijk tussen een voorspelling van het TRANS2 model en metingen uit verschillende MARIN projecten (allen 110x11.4 schepen)

5.4 Geldigheidsbereik

Het geldigheidsbereik van de parameters is bepaald aan de hand van de variatie in de dataset. Voor de parameters zoals ze gebruikt worden in het model gelden de volgende limieten:

Parameter	Minimum	Maximum
L_{OA}	50.0	135.0
$\frac{L_{OA}}{B}$	7.0	12.0
$\frac{B}{T}$	2.0	4.0
$\frac{L}{T}$	16.0	47.0
$C_B - C_{WP}$	-0.070	-0.044
$\frac{T_{TRANSOM}}{T}$	0.20	0.40
$\frac{L_{BOW}}{L_{QA}}$	0.10	0.25
$\frac{L_{STERN}}{L_{QA}}$	0.15	0.20
$\frac{B_{TRANSOM-WL}}{B}$	0.50	0.95

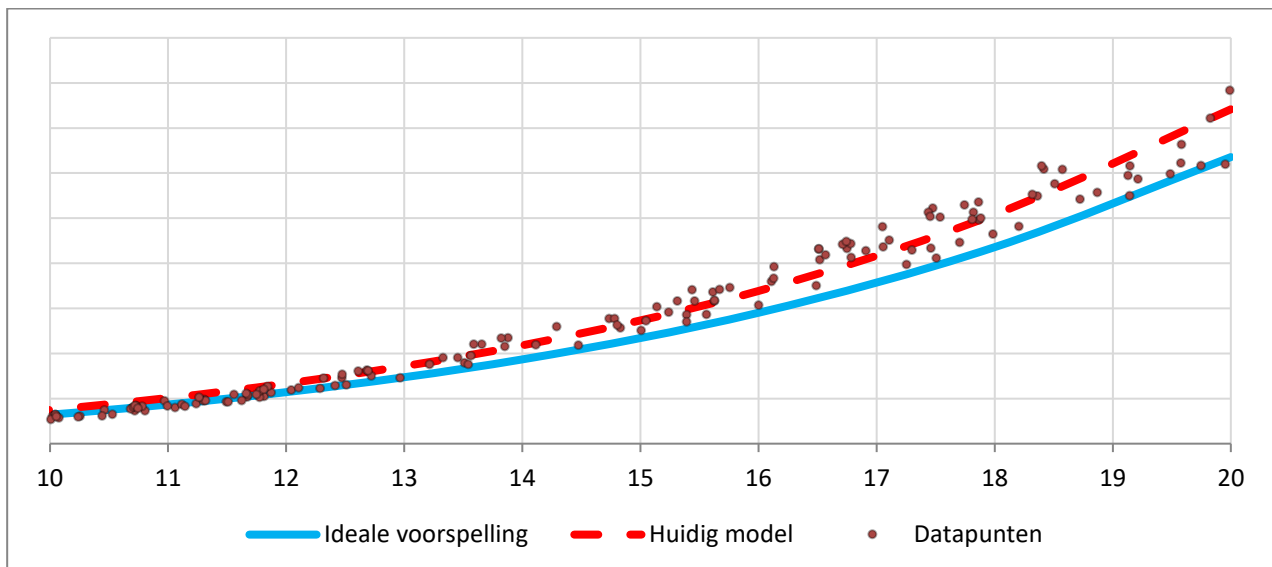
C_{WP}	0.895	0.963
$\frac{Y_{PROPELLER}}{0.5 \cdot B}$	0.21	0.45
$\frac{D_{PROPELLER}}{T}$	$-0.73 \cdot \frac{T_{TRANSOM}}{T} + 0.725$	

Het model is afgeleid uit data van dubbelschroefsschepen, maar de verwachting is dat het model, met een kleine reductie van de nauwkeurigheid, bruikbaar is voor enkelschroefsschepen met tunnel(s).

5.5 Discussie

5.5.1 Model gefit op suboptimale schepen

Het parametrisch model geeft mogelijk hogere schattingen dan idealiter mogelijk bij gelijke hoofdafmetingen en waterverplaatsing. Aanvankelijk was de aanpak om het vermogensmodel zo op te stellen dat het de "onderzijde" van de database zou representeren. Dat wil zeggen dat een gebruiker de laagst mogelijke schatting krijgt bij de parameters die door hem zijn ingevuld. Daarnaast zou een onzekerheid gepresenteerd kunnen worden die aangeeft hoeveel hoger de vermogensschatting zou kunnen zijn wanneer detailparameters (die niet in het model opgenomen worden) verkeerd gekozen worden. Om dit te doen bleek de huidige hoeveelheid berekeningen (260) nog niet voldoende. Een uitbreiding van de dataset is nodig om een goede opsplitsing te maken tussen gevolgen van hoofdparameters (parameters die in het conceptontwerp gekozen worden, bijvoorbeeld) en ruis. Ter illustratie is een voorbeeld gegeven in Figuur 24.



Figuur 24: Illustratie van hoe een ideaal model aan zou sluiten op de onderzijde van de dataset, terwijl het huidige model eerder door het midden van de dataset gefit is

5.5.2 Scheepstypen in dataset

Het model is gefit op data van dubbelschroefers met tunnelachterschepen. De verwachting is dat het model ook voor enkelschroefers met tunnels goed zal werken, omdat de meeste parameters geen relatie hebben met het aantal schroeven of de positie van de schroeven. Wel is de verwachting dat het volgstroomgetal, w , wat hoger zal zijn voor enkelschroefers omdat de schroef in bij die schepen recht achter een scheg of gondel geplaatst is. Een redelijke verhoging van het volgstroomgetal ligt tussen de 0.05 en 0.10.

5.5.3 Ondiepwater correctie

De correctie van weerstand voor ondiep water is gebaseerd op de methode van Raven (2016). Hierbij moet opgemerkt worden dat de gebruikte formule $(1.0 + 0.57 \cdot \left(\frac{h}{T}\right)^{-1.79}$ normaalgesproken slechts het *viskeuze* deel van de weerstand corrigeert. Daarnaast bevat de volledige methode van Raven ook een extra aanpassing van weerstand/vermogen op basis van de verwachte extra inzinking in ondiep water. Deze extra effecten zijn in deze studie niet opgenomen, en de formule is toegepast als zijnde een correctie voor de gehele weerstand. In een vervolgstudie kan ook gekeken worden naar de veranderingen van trim en inzinking in ondiep water, om zo de methode van Raven op de juiste manier toe te passen en te corrigeren voor specifiek binnenvaartschepen.

5.5.4 Spreiding van parameters

Figuur 12 liet zien dat schepen met grote breedte en lengte wat minder goed vertegenwoordigd zijn in de dataset. Dit ten gevolge van de schaling van bijvoorbeeld de tunnel in het achterschip. Hierdoor zijn dus ook schepen met een grotere waterverplaatsing minder goed vertegenwoordigd. De fittingsmethode van het parametrisch model is in zekere mate gevoelig voor de dichtheid van data. Het verder verbeteren van het geometrisch model zal ook de (brede) nauwkeurigheid van het model verbeteren.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 Conclusies

De volgende conclusies vatten de belangrijkste zaken uit het rapport samen:

- Er is een parametrisch model voor schroefasvermogen, scheepsweerstand, volgstroomgetal en zoggetal (de laatste twee zijn zogeheten voortstuwingskarakteristieken) opgesteld voor dubbelschroefs binnenvaartschepen met lengtes tussen de 50 en 135 meter. Het model geldt voor diep water.
- Er is een correctie voor scheepsweerstand in ondiep water afgeleid, op basis van een correctie van de methode van Raven (2016).
- Het model kent een nauwkeurigheid van ca. 15% op vermogen en is daarmee geschikt voor toepassing in scenariosimulaties of in de eerste fase van een conceptontwerp.
- Het model is toepasbaar op schepen met een tunnelachterschip. Hoewel ontwikkeld op basis van berekeningen met dubbelschroefsschepen, is de verwachting dat het model ook bruikbaar is voor enkelschroefsschepen. Een eventuele correctie op het volgstroomgetal kan hiervoor nodig zijn.

6.2 Aanbevelingen

- Het parametrisch model genereerde voor schepen met grote lengtes en breedtes meer onrealistische vormen dan bij kleinere afmetingen. Hierdoor zijn de grootste schepen iets slechter vertegenwoordigd in de dataset. Het verbeteren van het geometrisch model en het uitvoeren van extra sommen voor grotere schepen is aan te raden om schattingen voor deze schepen te verbeteren.
- De weerstandsreductie door varen op ballastdiepgang (i.e. minimale diepgang) kon niet voldoende goed gevangen worden door een parametrisch model. Er zijn 20 sommen op ballastdiepgang uitgevoerd. Om parametrische predicties voor ballastdiepgang op te stellen is waarschijnlijk een grotere dataset nodig.
- De berekeningen zijn gedaan bij rechthoekig varen, bij constante snelheid. Effecten van sturen en accelereren of decelereren zijn daarom niet opgenomen in het model. Studies met reissimulaties hebben laten zien dat tijdens de "gewone" vaart op de rivier, de impact van manoeuvreren op het totaalvermogen beperkt is. Echter het manoeuvreren in havens kan een grotere invloed hebben, met name wanneer er gekeken moet worden naar "lokale" emissies in stedelijk gebied.

De hierboven beschreven conclusies en aanbevelingen doen niets af aan de opmerkingen en bevindingen in eerdere hoofdstukken, tabellen en figuren in dit rapport.

Wageningen, February 2025
MARITIME RESEARCH INSTITUTE NETHERLANDS

Ir. G. Gaillarde
Head of Ships Department

APPENDIX I BEPALING VAN DE GOLFWEERSTANDCORRECTIE

De CFD berekeningen voor deze studie zijn uitgevoerd bij slechts één snelheid. Het grootste deel van de scheepsweerstand van binnenschepen schaaft met het kwadraat van de snelheid. Hierdoor wordt er geen grote onnauwkeurigheid geïntroduceerd: de berekende weerstand kan immers eenvoudig naar andere snelheden geschaald worden. Voor het golfmakende deel van de weerstand geldt echter dat dit bij hogere snelheden (vanaf ca. 16 km/h voor een 110 meter schip) niet meer met het kwadraat, maar eerder met de derde macht of zelfs de vierde macht van de snelheid schaaft. Om dus een realistische weerstands (en vermogens) schatting te krijgen bij hogere snelheden is een correctie van dit golfmakende deel nodig.

Er is gekozen om dit te doen via met methodes gepubliceerd door Holtrop & Mennen. Hoewel binnenvaartschepen op de rand of zelfs buiten de onderliggende dataset van deze methode vallen, is de verwachting dat dit met name een probleem oplevert voor de *absolute* schatting van het golfmakende deel van de scheepsweerstand. Wanneer gebruikt als een correctie zal de aanpak voldoende goed werken voor het doel van deze studie.

De formule om de correctie van golfmakende weerstand te bepalen is als volgt:

$$\Delta R_W = R_W - R_W[V_S = 15.0]$$

$$R_W = c_1 c_5 \nabla \rho g e^{m_1 F_N^d + m_2 \cos(\lambda F_N^{-2})}$$

Waarin de volgende coëfficiënten gebruikt worden:

$$c_1 = 2223105 c_7^{3.78613} \cdot \left(\frac{T}{B}\right)^{1.07961} \cdot (90.0 - i_e)^{-1.37565}$$

$$c_7 = \begin{cases} .229577 \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^{0.33333} & \frac{B}{L} < 0.11 \\ \frac{B}{L} & 0.11 \leq \frac{B}{L} < 0.25 \\ 0.5 - 0.0625 \cdot \left(\frac{L}{B}\right) & \frac{B}{L} \geq 0.25 \end{cases}$$

$$c_5 = 1.0 - 0.8 \cdot \frac{A_{TRANSOM}}{B \cdot T \cdot C_M}$$

$$m_1 = 0.0140407 \cdot \frac{L}{T} - 1.75254 \cdot \frac{\sqrt[3]{\nabla}}{L} - 4.79323 \cdot \frac{B}{L} - c_{16}$$

$$m_2 = c_{15} \cdot C_P^2 \cdot e^{-0.1 F_N^{-2}}$$

$$c_{16} = \begin{cases} 8.07981 \cdot C_P - 13.8673 \cdot C_P^2 + 6.984388 \cdot C_P^3 & C_P < 0.8 \\ 1.73014 - 0.7067 \cdot C_P & C_P \geq 0.8 \end{cases}$$

$$c_{15} = \begin{cases} -1.69385 & \frac{L^3}{\nabla} < 512 \\ -1.69385 + \frac{\frac{L}{\sqrt[3]{\nabla}} - 8.0}{2.36} & 512 \leq \frac{L^3}{\nabla} < 1727.0 \\ 0.0 & \frac{L^3}{\nabla} > 1727.0 \end{cases}$$

$$\lambda = \begin{cases} 1.446 C_P - 0.03 \cdot \frac{L}{B} & \frac{L}{B} < 12.0 \\ 1.446 C_P - 0.36 & \frac{L}{B} \geq 12.0 \end{cases}$$

$$d = -0.9$$

Verder zijn i_e de halve entreehoek bij de boeg en is F_N het Froudegetal. De eerste is weliswaar een geometrische parameter die uit een tekening afgeleid kan worden, maar is ook te schatten via:

$$i_e \cong \deg \left(\operatorname{atan} \left(\frac{\left(\frac{1}{2}\right)B}{0.333L_{BOW}} \right) \right)$$

De definitie van het Froudegetal is als volgt De snelheid V_S moet in meters per seconde worden gebruikt.

$$F_N = \frac{V_S}{\sqrt{g \cdot L_{OA}}}$$

Als laatste is g de zwaartekrachtversnelling, $g = 9.8065$

APPENDIX II OPEN WATER EFFICIENTIE (ETA-O) SCHATTING

Wanneer er geen open-water diagram voorhanden is, kan de volgende formule gebruikt worden op de open-water efficiëntie, η_o , te schatten:

$$\eta_o = \frac{2}{1.0 + \sqrt{1.0 + \tau \cdot C_T}} - 0.15$$

Met daarin $\tau = 0.70$, welke het aandeel van de stuwkracht aangeeft dat door de schroef wordt geleverd. Bij $\tau = 0.70$ wordt 70% van de stuwkracht door de schroef, en 30% van de stuwkracht door de straalbuis opgebracht. C_T is de stuwkrachtcoëfficiënt – hier niet te verwarren met de weerstandcoëfficiënt die eerder in het rapport genoemd is – die als volgt bepaald wordt:

$$C_T = \frac{T}{0.5\rho(V_{S(1.0-w)})^2 \left(\frac{1}{4}\right) D_{PROP}^2 \pi}$$

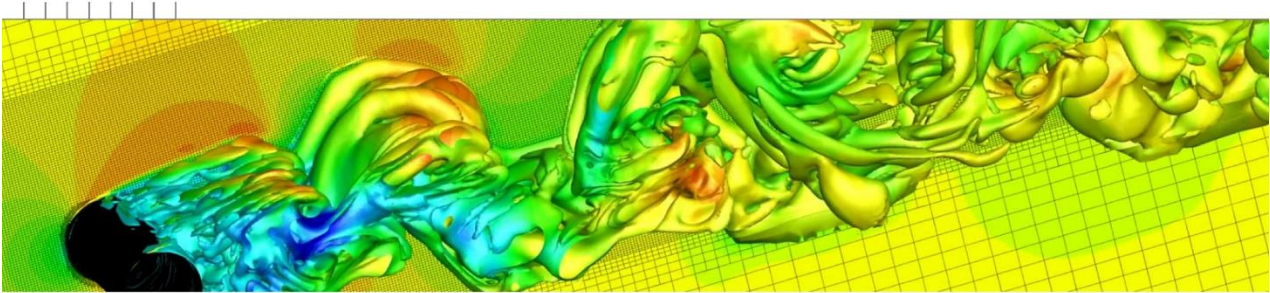
Waarin T de stuwkracht in newtons en ρ de dichtheid van water (voor binnenvaart geldt meestal $\rho = 999.0 \text{ kg/m}^3$).

APPENDIX III REFERENTIES

Raven, H.C. "A new correction procedure for shallow-water effects in ship speed trials", Proceedings of PRADS2016, Kopenhagen, 2016

Holtrop, J. and Mennen, G.G.J. "An approximate power prediction method", International Shipbuilding Progress, 1982

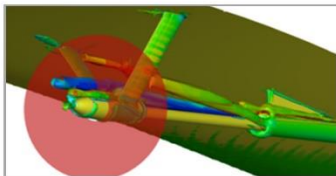
Heuser, H. and Müller, E. "Verdrängungsschiffe auf flachem Wasser, Neue Ergebnisse Hydrodynamischer Forschung und ihre Anwendung beim Entwurf", Schiffstechnik, B33, 1986



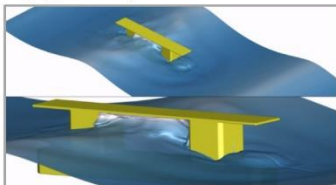
ReFRESKO

A community-based open-usage and open-source CFD code for the Maritime World

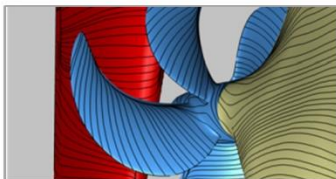
The CFD code ReFRESKO has been under development since 2005. It is based on state-of-the-art numerical algorithms and software features, and on the long-standing experience of MARIN in CFD. ReFRESKO stands for Reliable&Fast Rans Equations (code for) Ships (and) Constructions Offshore. In several respects it resembles a general-purpose CFD commercial code, although it has been verified, validated and optimised specifically for numerous maritime industry applications.



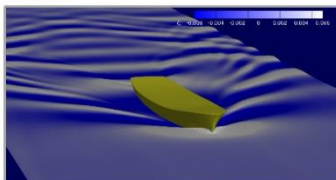
Fully-appeded ships



Impacts



Cavitation



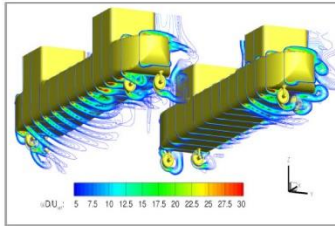
Free surface & waves

Computational method

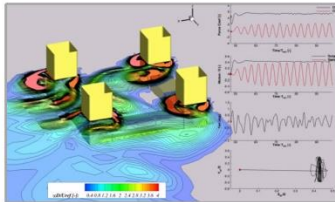
ReFRESKO is a viscous-flow CFD code that solves multiphase (unsteady) flows using the incompressible Navier-Stokes equations, complemented with turbulence and cavitation models [1]. The equations are discretised using a finite-volume approach and in strong-conservation form. A pressure-correction equation based on the SIMPLE algorithm is used to ensure mass conservation [2]. At each implicit time step, the non-linear system for velocity and pressure is linearised using Picard's method. A segregated or coupled approach may be used. The code is parallelised using MPI and runs on Linux workstations and HPC clusters.

CFD features

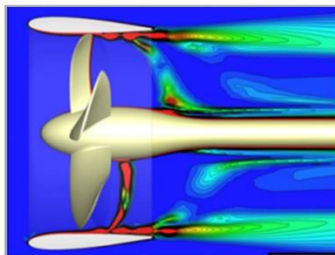
Due to specific numerical schemes, ReFRESKO can deal robustly with low up to high (full-scale) Reynolds numbers, permitting the accurate estimation of scale effects. The face-based implementation permits the handling of grids from several different grid-generation packages. State-of-the-art CFD features such as moving, sliding and deforming grids, as well automatic grid adaptation (refinement and/or coarsening) are also available. Both 6DOF rigid-body, and flexible-body (fluid-structure interaction) simulations, can be performed. For turbulence modelling, both traditional RANS and Scale-Resolving Simulations (SRS) models such as SAS/DDES/IDDES/XLES, PANS and LES can be used. Noise predictions can be made using an acoustic analogy module. Couplings with propeller models (RANS-BEM coupling), fast-time simulation tools (XMF) and wave generation potential flow codes (OceanWave3D, SWASH) are implemented.



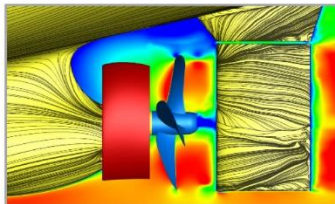
Current loads



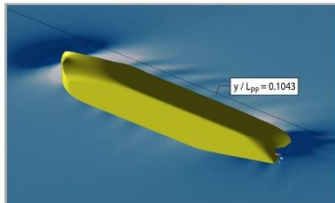
VIV & VIM



Propellers



Energy Saving Devices (ESDs)



Propulsion

For more information contact MARIN:
 the ReFRESKO YouTube channel or
 contact the MARIN CFD group
 T +31 317 49 39 11
 E refresco@marin.nl
 W www.refresco.org

Development and applications

ReFRESKO is currently being developed, verified and validated at MARIN in collaboration with several other worldwide non-profit organisations (universities and research institutes). Modern verification & validation (V&V) techniques and tools are used in the development and application of ReFRESKO. ReFRESKO has been applied, verified and validated for the following range of applications:

- Resistance and propulsion of fully- appended ship hull forms;
- Submarines, including manoeuvres and geometry optimisation;
- Propeller and complex propulsor flows, including cavitation;
- Energy-saving devices;
- Marine current and floating wind turbines;
- Current and wind loads on offshore structures;
- VIV and VIM of offshore structures and renewable energy devices;
- Thruster-hull and thruster-thruster interaction problems;
- Free-surface flows, wave loads and wave impacts;
- Seakeeping problems such as loads and motions for free-floating structures.

ReFRESKO-Operation and ReFRESKO-ReSearch

Two types of partnership are available to companies and institutes wishing to use ReFRESKO. The ReFRESKO-ReSearch partnership focuses on sharing the code for collaborative research, without any fees but common open development, testing, verification and validation. Tight quality control is enforced by MARIN and there is only one ReFRESKO source repository for all partners. ReFRESKO-Operation extends the ReFRESKO-ReSearch partnership by allowing commercial application of ReFRESKO (a membership fee is required). In addition, the user gains access to ReFRESKO support services, as well as MARIN's CFD best practice guidelines.

Bibliography

- [1] Vaz, G., Jaouen, F. and Hoekstra, M.; "Free-Surface Viscous Flow Computations. Validation of URANS code FreSCO", OMAE2009, Hawaii, Honolulu, USA. 2009.
- [2] Klaij, C. M., and Vuik, C.; "Simple-type Preconditioners for Cell-centered, Colocated Finite Volume Discretization of Incompressible Reynolds-averaged Navier-stokes Equations", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 71(7), pp. 830–849. 2013.



MARIN
P.O. Box 28

6700 AA Wageningen
The Netherlands

T +31 317 49 39 11
E info@marin.nl

I www.marin.nl
   