

Toekomstige vlootsamenstelling

TRANSitie naar een klimaatbestendig en duurzaam Rotterdams
achterlandTRANSport (TRANS2)



Toekomstige vlootsamenstelling

Auteur(s)

Johan Gille,
Gaston Tchang,
Frederik Vinke,
Jourian Ligtenberg,
Cornelis van Dorsser,
Arjen Ros,
Stefan Salome,
Rolien van der Mark,
Fedor Baart,
Geert Snoeij.

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 gaat 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.

Toekomstige vlootsamenstelling

| | |
|-----------------------|---|
| Opdrachtgever | TKI Deltatechnologie |
| Contactpersoon | |
| Referenties | |
| Trefwoorden | TRANS2, klimaatadaptatie, transport over water, vlootsamenstelling, scheepvaart, binnenvaart, vloot |

Documentgegevens

| | |
|----------------------|-----------------------|
| Versie | 1.0 |
| Datum | 06-02-2025 |
| Projectnummer | 11209638-001 |
| Document ID | 11209638-001-ZWS-0003 |
| Pagina's | 43 |
| Classificatie | |
| Status | definitief |

Auteur(s)

| | | |
|--|---|--|
| | Johan Gille, Gaston Tchang, Frederik Vinke, Jourian Ligtenberg, Cornelis van Dorsser, Arjen Ros, Stefan Salome, Rolien van der Mark, Fedor Baart, Geert Snoeij. | |
| | | |

Samenvatting

Het project TRANS2 is erop gericht om te komen tot een meer robuuste binnenvaartlogistiek die weerbaar is bij periodes van droogte, zoals ervaren in 2018 en 2022. Tijdens het project werd helder dat hiervoor inzicht in toekomstige vlootsamenstelling nodig is, omdat die in belangrijke mate bepaalt wat voor en hoeveel lading onder droge omstandigheden vervoerd kunnen worden, en wanneer/waar het gaat knellen met de huidige of een toekomstige vloot. Tevens bleek dat ook voor andere opgaven, zoals verduurzaming, beter inzicht in de mogelijke toekomstige vlootmix noodzakelijk is.

Binnen TRANS2 is een zogenaamd systeem-dynamisch (SD) model ontwikkeld. Dit SD-model laat het belang zien van het op peil houden van de transportcapaciteit tijdens droogte – juist daarvoor is beter inzicht in de mogelijke toekomstige vlootsamenstelling nodig. Dit onderstreept het belang om in de toekomst betere vlootsценario's te ontwikkelen en daarbij ook naar de (investerings)kosten van vloot- (en andere) interventies te kijken.

Hiertoe hebben we eerst gekeken naar de huidige vlootmix (o.b.v. databases van RWS en ILT) en van daaruit met eenvoudige aannames verkend hoe die mix in de toekomst zou kunnen ontwikkelen en welk effect dat heeft op de transportcapaciteit bij 'normale' en 'droge' omstandigheden. Er zijn drie toekomstscenario's voor de vlootmix van 2050 opgesteld, een zogenaamde baseline, een scenario gedreven door regelgeving en een scenario gedreven door klimaatadaptatie. Daarbij is gekeken naar de vernieuwingsgraad van de vloot, die ook wordt beïnvloed door beleid rondom verduurzaming, naar verschuivingen tussen grootteklassen, en naar de mate van 'laagwaterbestendigheid' in het scheepsontwerp.

Bij het bekijken van de effecten van laagwater op de prestatie van de schepen is het van belang te beseffen dat lang niet alle schepen hetzelfde zijn: gewicht en constructie van het schip zijn hierin mede bepalend en ook het onderscheid naar type schepen is van belang. Tankers liggen bijvoorbeeld door hun dubbele wand altijd al dieper dan droge-ladingschepen. We hebben methodische overwegingen voorgesteld om de binnen TRANS2 uitgevoerde vlootanalyse verder te finetunen door rekening te houden met specifieke kenmerken van schepen en ladingsegmenten. We hebben in TRANS2 een model doorontwikkeld om op basis van deze kenmerken het gedrag van een individueel schip te beschrijven.

Met het Systeem-Dynamisch model is gekeken naar een brede set maatregelen gericht op verandering van de vloot, vaarweg en logistiek. Hiermee kunnen mogelijke maatregelen gericht op onder andere de vlootsamenstelling worden geanalyseerd. Hiermee wordt de dialoog gevoed over het effect van maatregelen op de transportprestatie.

Op elk van de componenten zijn verbeteringen nodig en mogelijk, en hiervoor worden voorstellen gedaan.

Dit rapport is tot stand gekomen door de kennis en inzet van medewerkers van het Havenbedrijf Rotterdam, Havenbedrijf Amsterdam, Koninklijke Binnenvaart Nederland, Ministerie van IenW (DGLM), Rijkswaterstaat, Copernicos en Deltares. Niet eerder (voor dit rapport) was een geslaagde poging gedaan om scenario's voor toekomstige vlootsamenstelling op te stellen. Het proces was een zoektocht met elkaar naar geschikte werkwijze, aanpak en naar beschikbare gegevens. Deze rapportage is daarmee ook een waardevolle vastlegging van de relevante aandachtspunten die we tegenkwamen in de discussies.

Inhoud

| | | |
|----------|--|-----------|
| | Samenvatting | 4 |
| 1 | Context, aanpak en relevante aspecten | 7 |
| 1.1 | Achtergrond en context | 7 |
| 1.2 | Van bestaande scenario's naar onze aanpak | 7 |
| 1.3 | Externe ontwikkelingen met impact op de vlootsamenstelling | 8 |
| 1.4 | Een beeld van de toekomstige vloot | 10 |
| 2 | Kwantificering vlootsamenstelling | 12 |
| 2.1 | Inleiding | 12 |
| 2.2 | Eerste vingeroefening toekomstscenario's vloot 2050 | 12 |
| 2.3 | Nadere analyse huidige vlootsamenstelling | 14 |
| 2.3.1 | Methode en data | 14 |
| 2.3.2 | Resultaten | 15 |
| 2.4 | Conclusie | 17 |
| 2.5 | Aanbevelingen | 17 |
| 3 | Methodische overwegingen bij modellering vlootsamenstelling | 19 |
| 3.1 | Inleiding | 19 |
| 3.2 | Stap 1: Beschrijven huidige vloot | 19 |
| 3.3 | Stap 2: Naar een set van individuele schepen | 21 |
| 3.4 | Stap 3: Simuleren van de vlootontwikkeling over de tijd | 22 |
| 3.5 | Conclusie | 23 |
| 4 | Toepassing in het SD-model | 24 |
| 4.1 | Beknopte beschrijving SD-model | 24 |
| 4.2 | Uitkomsten SD-model | 25 |
| 4.3 | Aanbevelingen geredeneerd vanuit SD-model | 26 |
| 5 | Conclusies en aanbevelingen | 28 |
| 5.1 | Conclusies | 28 |
| 5.2 | Aanbevelingen | 28 |
| | Referenties | 31 |
| A | Analyse ILT-data huidige vloot | 32 |
| B | Parametrisch model voor capaciteit van binnenvaartschepen | 40 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| C | Ontwikkeling en samenstelling van de actieve Nederlandse vloot op Nederlands grondgebied | 41 |
| D | Beschikbare data | 42 |

1 Context, aanpak en relevante aspecten

1.1 Achtergrond en context

TRANS2 richt zich, zoals in het projectvoorstel is gesteld, op de TRANSitie naar een klimaatbestendig Rotterdams achterlandTRANSport. Het doel is om meer grip op de binnenvaartlogistiek te verkrijgen onder een veranderend klimaat en met oog voor synergie met andere gaande transitie's. Om meer inzicht te creëren in de invloed van de huidige en toekomstige vlootsamenstelling op de veerkracht van het transport over water, maken we in TRANS2 een start met de ontwikkeling van vlootsценario's. Ook om inzicht te krijgen in hoe de toekomstige vlootsamenstelling er idealiter uit zou moeten zien om voldoende klimaatrobust te zijn, is kennis over de ontwikkeling in vlootsamenstelling nodig.

In dit hoofdstuk beschrijven we hoe we tot scenario's zijn gekomen (§1.2), welke externe ontwikkelingen we daarbij hebben beschouwd (§1.3) en tot welke beschrijvingen van vlootsценario's we zijn gekomen (§1.4), die in de navolgende hoofdstukken verder worden uitgewerkt en gekwantificeerd.

Zoals gezegd is dit slechts een start van het bijeenbrengen van kennis over de (toekomstige) vlootsamenstelling. Dit rapport is tot stand gekomen door de kennis en inzet van medewerkers van het Havenbedrijf Rotterdam, Havenbedrijf Amsterdam, Koninklijke Binnenvaart Nederland, Ministerie van IenW (DGLM), Rijkswaterstaat, Copernicos en Deltares. Niet eerder (vóór dit rapport) is een geslaagde poging gedaan om scenario's voor toekomstige vlootsamenstelling op te stellen. Het proces was een zoektocht met elkaar naar geschikte werkwijze, aanpak en naar beschikbare gegevens. Deze rapportage is daarmee ook een vastlegging van de relevante aandachtspunten die we tegenkwamen in de discussies.

1.2 Van bestaande scenario's naar onze aanpak

We zullen geen nieuwe wereldperspectieven/toekomstbeelden of scenario's maken, dat is al gedaan door CPB (WLO), Havenbedrijf Rotterdam (Cambridge Econometrics) en vele anderen (IPCC, KNMI, IEA, IMF, etc.). In deze scenario's zal de vraag naar vervoer via binnenvaart iets kunnen stijgen of dalen, maar zitten de veranderingen vooral in de samenstelling van de lading: afname van fossiele bulkstromen, toename van containervervoer en van nieuwe energiedragers en circulaire lading.

Het gaat hier om de vraag: wat betekenen toekomstige ontwikkelingen in die bestaande perspectieven voor de toekomstige vlootsamenstelling? We gaan daarom op zoek naar factoren die leidend zijn voor de vlootontwikkeling, en ondervangen die met de relevante assen, zodat we het toekomstige bereik afdekken met een beperkt aantal scenario's.

Van belang is wat klimaatverandering in de toekomst voor verstoringen oplevert en hoe de samenstelling van de vloot daarin een rol speelt. Winters worden naar verwachting natter en zomers worden droger, wateroverlast en langdurige droogtes zullen vaker voorkomen (KNMI 2023) met gevolgen voor de rivierafvoeren en waterstanden (Deltares, 2023; 2024).

In droge periodes zal de scheepvaart steeds meer hinder ondervinden van langdurig lage waterstanden. Mede door de bodemerrosie neemt de bevaarbaarheid van de rivieren af. Onder andere delen van de Waal en de gehele bovenloop van de IJssel zijn hier gevoelig voor. Schepen kunnen daardoor minder zwaar worden beladen. Op termijn is een structurele verschuiving van binnenvaart naar wegtransport niet uitgesloten (KiM, 2021).

Ook neemt de kans toe op te weinig aanvoer van water via de IJssel naar het IJsselmeergebied als zoetwaterbuffer (zie bijv. IenW, 2023). De grenzen van fysieke maatregelen om alle rivierfuncties te kunnen blijven accommoderen, komen daarmee in zicht. Ook de functies zelf zullen zich moeten aanpassen: van de scheepvaart (kleinere en/of ondieper stekende schepen) tot de natuur, landbouw en recreatie langs de rivier (zie bijv. ENW, 2023).

Mogelijke reacties op perioden van laagwater vanuit de binnenvaartlogistiek

- De sector investeert in andere (laagwater) schepen, met aangepaste maatvoering (mondjesmaat tot nu toe).
- De sector past andere (lichtere) materialen, schroeven, etc. toe maar niet de maatvoering.
- Vaart minder beladen, krijgt laagwatertoeslag en er worden meer schepen ingezet (huidige situatie).
- De sector verliest lading aan andere modaliteiten doordat binnenvaart onvoldoende betrouwbaar is ten gevolge van klimaatverandering (ongewenste trend).

Dit leidt ook tot vragen zoals:

- Reageert de sector anders als het elk jaar hoog/laag water is dan wanneer het incidenteel is?
- Kan de sector investeren in vervanging en is het rendabel?
- Is vervanging door verduurzaming een moment om ook aanpassingen te doen als gevolg van klimaatverandering: win-win (bijv. scheepsafmetingen of gebruikt materiaal)?
- Remt de laagwatertoeslag de bereidheid tot aanpassen van de vloot?

Overdenking infrastructuur

Het is gezien de hoge kosten niet te verwachten dat de infrastructuur zal worden aangepast (dan moet men immers het hele vaarwegennetwerk aanpassen). Bovendien zou aanpassing (besluitvorming plus uitvoering) decennia duren, dus hierop wachten is onverstandig. Vaarwegen zullen gedimensioneerd blijven op de maatgevende schepen. Of andersom: schepen worden gedimensioneerd op de maatgevende vaarweg. De vraag is of maatgevende schepen gedurende het hele jaar kunnen worden ingezet. Wel is het bij vervangings- en renovatie-opgaven en bij nieuwbouw te overwegen om bijvoorbeeld brughogtes aan te passen, zodat de doorvaarthoogte gegarandeerd blijft bij maatgevend hoogwaterstanden. Tevens kunnen kleinere infrastructurele aanpassingen zoals het verplaatsen van ondiepe kabels/leidingen bijdragen aan meer waterdiepte bij laagwatersituaties.

Laagwater heeft gevolgen op het hele netwerk, niet enkel op de vrij-afstromende rivieren, maar ook op routes tussen sluzen zoals het Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal. Hoewel daar geen beperking in waterdiepte is, zijn er vaak schutbeperkingen van kracht om water te sparen of zout water buiten te houden, en daarnaast is het drukker op de vaarwegen. De schepen zijn minder beladen en er zijn meer schepen nodig voor dezelfde hoeveelheid lading. Dit gaat ook op voor schepen die van het Noordzeekanaal komen en een bestemming hebben in bijvoorbeeld Duitsland.

1.3 Externe ontwikkelingen met impact op de vlootsamenstelling

Om te komen tot factoren die bepalend zijn voor de toekomstige vlootsamenstelling (en daarmee de relevante assen), zijn er enkele brainstorms gehouden. De belangrijkste elementen uit de brainstorms zijn hieronder samengevat:

- Er is een historische trend van schaalvergroting. Grotere schepen en meer schepen per onderneming: nodig om als onderneming het hoofd boven water te houden.
- Er wordt een grotere rol voor coöperaties verwacht.
- We zien integratie van barge operators en inland terminals in het containersegment.
- We zien multimodale integratie (barge operators die ook spoor en wegdiensten aanbieden).
- We zien afname van de totale actieve vloot (analyse RWS), terwijl het vervoerde volume ongeveer stabiel is gebleven over de afgelopen decennia (bron: CCR jaarrapport 2024). Dit duidt op schaalvergroting (minder schepen met groter laadvermogen) en daarnaast op een efficiëntere benutting van de vlootcapaciteit (trend).
- Historische trends zijn ook:
 - Groeiende rol containersegment: meer schepen *dedicated*, meer gebruik van koppelverbanden.
 - Groeiende rol duwbakken (goedkoper, flexibel, breed inzetbaar).
 - Afname van het aantal zeer kleine schepen, omdat die bedrijfseconomisch niet meer aantrekkelijk zijn (met uitzonderingen in niche markten).
- De respons op de recente laagwater-zomers (2018 en 2022) laat zien dat een klein deel van de verladers overweegt andersoortige schepen te laten ontwerpen/bouwen die bij laagwater een groter laadvolume kunnen blijven vervoeren. Net als voor verduurzaming geldt dat dergelijke grote investeringen vragen om langjarige commitment van verladers. Mogelijk komen in de toekomst meer van dergelijke ontwikkelingen door regelgeving.
- Innovaties zoals autonoom varen vinden geleidelijk plaats en lijken niet echt gerelateerd aan volumegroei of iets dergelijks. Snelheid van innovaties wordt eerder bepaald door regelgeving (zie verschil België vs. Nederland). Onduidelijk is of dit tot andere afmetingen van schepen leidt.
- Vergrijzing en arbeidsmarkt: het blijkt in de huidige krappe arbeidsmarkt steeds moeilijker om mensen te vinden die in volcontinue dienst willen werken of die lang van huis willen zijn. Hierdoor zal een deel van de ondernemingen stoppen en niet opgevolgd worden. Autonoom varen kan hier deels een oplossing voor bieden. Ook de trend naar minder familiebedrijven/meer loondienst is waarschijnlijk mede een gevolg hiervan.
- Rol van kleinere vaarwegen neemt af (kostenaspect, sluiting bedrijventerreinen, woningbouw, enz.). Vervoer daarheen gaat meer via de weg. Het is maar zeer de vraag of in een toekomst met meer binnenlands vervoer die trend ineens gekeerd zal worden.
- Sommige nieuwe soorten lading (bijv. ammoniak) zullen mogelijk leiden tot vraag naar extra scheepscapaciteit met specifieke eigenschappen. Andere nieuwe soorten lading kunnen worden vervoerd met conventionele schepen (geen specifieke scheepseisen; bijv. shift van kolen naar biomassa of circulaire droge bulk vraagt niet om andere typen schepen).
- Regelgeving met betrekking tot milieueisen en Arbo zullen scheepseigenaren dwingen om te investeren in hun schip. Een deel zal dat niet kunnen (financieel niet meer rendabel) - waarschijnlijk betreft dit vooral oudere en kleinere schepen. Dit leidt dus tot een verjonging van de vloot. Het tempo hiervan hangt vooral af van politiek / regelgeving.

Scenario's

Hoe komen we met de hierboven beschreven ontwikkelingen en overwegingen tot een set aan scenario-beschrijvingen die vervolgens gekwantificeerd kunnen worden? Het voorgaande leert ons:

- Al met al is de indruk dat de geschetste ontwikkelingen geen aanleiding geven om te verwachten dat de historische trends in vlootontwikkeling nu ineens zullen stoppen:
 - Baseline scenario = doortrekken huidige trend – waarbij we binnen TRANS2 kijken naar een zichtjaar 2050.
 - Verschillende ontwikkelingen kunnen het tempo van veranderingen beïnvloeden, maar geen rigoureuze veranderingen of omkering in trend van schaalvergroting is verwacht in dit scenario.

- Niches/nieuwe markten (duurzame lading, energietransitie) zorgen beperkt voor aanvulling/vernieuwing van de vloot.
- Bovenstaande overziend, zijn de factoren die de vlootsamenstelling/vlootontwikkeling domineren weergegeven in twee richtingen/assen:
 - Trage versus snelle energietransitie / verduurzaming / circulaire transitie (driver “van buitenaf” voor hoe snel de wereld verduurzaamt en daarmee het type goederen en daarmee het type schepen aanpast).
 - Trage versus snelle wet- en regelgeving m.b.t. vervanging (belangrijkste driver waarmee meer of minder impuls wordt gegeven aan vlootaanpassing/vlootvervanging, het makkelijker of moeilijker wordt gemaakt om aan te passen).
- Als de trend van schaalvergroting doorzet, gaat dit nog meer schuren aangezien het aantal laagwaterperioden ook verder gaat toenemen. De schaalvoordelen zullen door een beperking van de belading minder kunnen worden benut in laagwaterperioden.
- De vraag of laagwater een driver voor vlootverandering is, is een lastige. Vaker laagwater in de toekomst is een gegeven. Een incidentele periode van laagwater zal marginale invloed hebben. Enkele verladers zullen zich wellicht willen wapenen, zie bijvoorbeeld de bouw van de schepen voor BASF. Wanneer extreme waterstanden frequenter gaan voorkomen, meerdere jaren kort achter elkaar, dan loopt de economische schade op en wordt de motivatie om hierop voorbereid te zijn groter. Dit zou zich kunnen uiten door het aanpassen van de dimensies of toegepaste materialen bij bestaande vervangingsplannen, maar het kan zich ook uiten in eerder vervangen dan op basis van de historische trend danwel wet- en regelgeving te verwachten zou zijn. Het vervangingstempo wordt opgeschroefd (dit zal tijdelijk zijn; als de vloot vervangen is, dan gaat de vervanging weer terug naar een historisch tempo). Je zou een golfbeweging kunnen krijgen, na de jaren van extreem water ligt de vervangingsimpuls wat hoger, maar na een aantal jaar gaat het weer terug.

1.4 Een beeld van de toekomstige vloot

De reden om binnen TRANS2 onderzoek te doen naar de vlootsamenstelling in de toekomst, is dat deze een belangrijke zo niet bepalende factor zal zijn voor de mate waarin de binnenvaartlogistiek robuust is bij klimaateffecten zoals – vaker of heviger – laagwaterperiodes. Daarvoor hebben we in de scenario's drie dimensies beschouwd:

- Het aantal beschikbare schepen in de toekomst,
- De verdeling over scheepsklassen,
- Het draagvermogen (laadvermogen) ten opzichte van de inzinking van het schip.

Op basis hiervan zijn drie mogelijke vlootsamenstellingen geformuleerd, als volgt:

1) Baseline: vloot ontwikkelt zich conform historische trend

In deze toekomst (2050) is er een afname van het aantal schepen ten opzichte van nu. Hierbij gaan we uit van een geleidelijke schaalvergroting zoals historisch waargenomen (maar wel afvlakkend). Per saldo blijft het totale laadvermogen van de vloot gelijk, conform de trendlijn van CCR data van de afgelopen jaren en passend bij vervoersprognoses die geen grote toename in volume laten zien.

Het gevolg hiervan is dat de flexibiliteit van de vloot bij langdurig laagwater afneemt. De mogelijkheid om inzet van kleinere schepen op te schalen is in de toekomst kleiner dan nu. Ten behoeve van verdere kwantificering (Hoofdstuk 2) veronderstellen we een gemiddelde vervangingsgraad zoals historisch waargenomen van ca. 1% per jaar. De mix van schepen verandert licht (verhouding tussen aantallen per grootteklasse en ladingtype), in lijn met verwachte veranderingen in ladingmix.

Bij droogte neemt de beschikbare transportcapaciteit af: het maximale laadvermogen wordt beperkt en bij extremere droogte kunnen grotere schepen niet meer worden ingezet.

2) Vervanging gedreven door regelgeving

Aanleiding voor vervanging is hier primair regelgeving met betrekking tot milieu en ARBO-eisen. Ten opzichte van de baseline zal er meer nieuwbouw zijn, omdat retrofit voor oudere schepen niet meer rendeert door de strengere regelgeving. Dat biedt tegelijk kansen voor het meenemen van laagwater-ontwerp (bredere romp, minder diepe schroeven e.d.).

Ten behoeve van kwantificering veronderstellen we een hoge gemiddelde vervanging van 4% per jaar, gebaseerd op de aanname dat regelgeving zal vereisen dat in 2050 de hele vloot voldoet aan duurzaamheidseisen – dit is een extreme aanname. Eventueel kunnen we hierin nog differentiëren tussen het aandeel dat via nieuwbouw gaat voldoen en het aandeel van de vloot dat door middel van retrofit compliant wordt.

De mix van schepen verandert mee met ladingpatroon net als in de baseline. Door de hogere vervangingsgraad is de verwachte mate van laagwater-robustheid iets groter.

3) Meer gerichte aanpassing gedreven door klimaatadaptatie

In dit scenario wordt er niet per se vaker vervangen dan in het tweede scenario (want Business Case en levensduur van het schip blijven leidend voor de eventuele investeringsbeslissing). Verondersteld wordt dat, áls er wordt vervangen, er sterker wordt ingezet op laagwater-adaptatie. Hierdoor neemt de mate van klimaat-robustheid sterker toe (bijvoorbeeld door een sterkere gemiddelde afname van diepgang t.o.v. laadvermogen van de vloot).

In de hoofdstukken 2 en 3 wordt verder uitgewerkt hoe dit kwantitatief kan worden ingevuld.

2 Kwantificering vlootsamenstelling

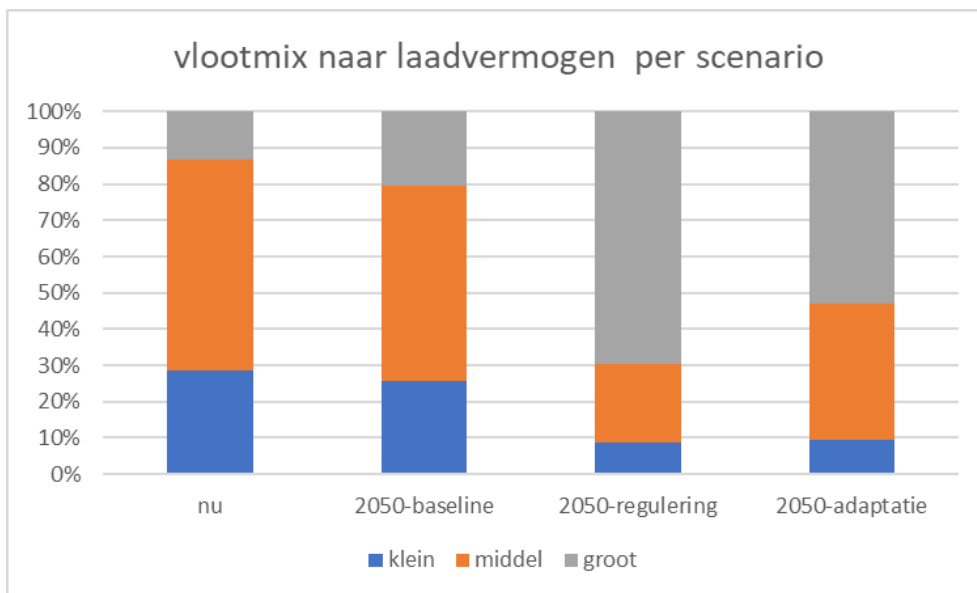
2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de huidige vlootsamenstelling geanalyseerd als basis voor kwantificering van de in Hoofdstuk 1 geschetste toekomstscenario's. Hiervoor is een inschatting gemaakt van de huidige vloot op basis van ILT-data (Inspectie Leefomgeving en Transport) onder Nederlandse vlag.

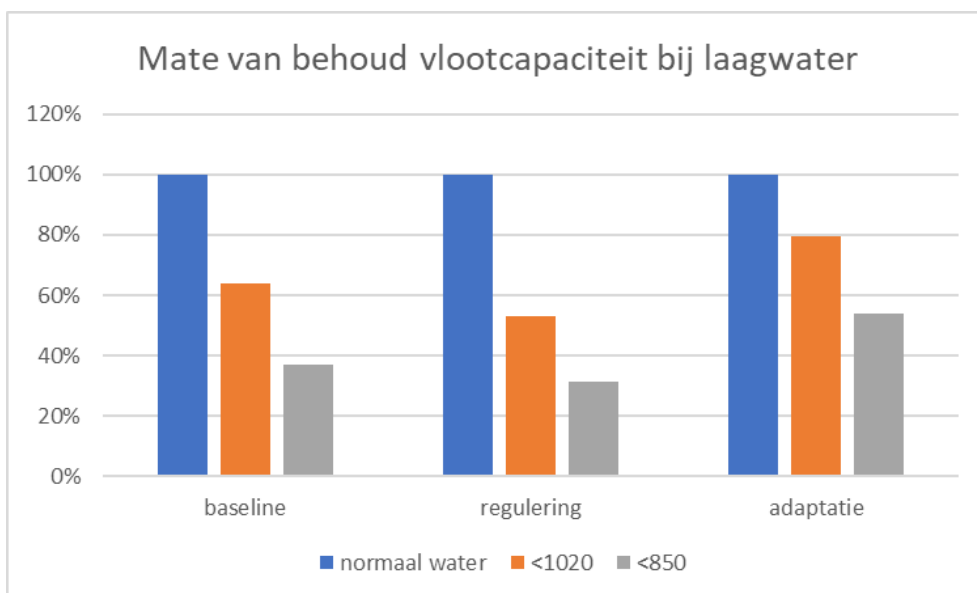
De toekomstige vlootvervangingsscenario's als beschreven in Sectie 1.4 zijn verder gekwantificeerd in termen van vlootsamenstelling. Echter moet hierbij worden opgemerkt dat dit slechts een eerste vingeroefening is geweest, zonder gedegen onderzoek of wetenschappelijke basis. In Hoofdstuk 3 wordt een aantal overwegingen gegeven voor een verbeterde methodiek.

2.2 Eerste vingeroefening toekomstscenario's vloot 2050

In eerste instantie is voor de drie scenario's uit Sectie 1.4 (huidig, 'baseline 2050', 'regulering 2050', 'adaptatie 2050') gekeken wat de mix van de vloot is en wat de transportcapaciteit is van de betreffende vloot bij a) normale omstandigheden, b) laagwater en c) extreem laagwater. Hiertoe is een ruw onderscheid gemaakt in kleine, middelgrote en grote schepen. Figuur 2-1 toont de toekomstige vlootmix voor de huidige situatie en de drie scenario's. In de baseline is een afname van kleinere schepen en toename van grotere schepen te zien doordat de huidige trend wordt doorgetrokken. In het scenario Regulering versnelt dit, en in het scenario Klimaatadaptatie is er een specifieke inzet op laagwaterschepen, wat effect heeft op het laadvermogen. Vervolgens zijn aannames gedaan over de inzetbaarheid van een laagwaterschip. Een laagwaterschip heeft minder laadvermogen dan een gewoon schip, maar is langer inzetbaar bij laagwater en extreem laagwater. Bij normale omstandigheden zijn zowel het gewone schip als het laagwaterschip voor 100% inzetbaar. Hiermee is een inschatting gemaakt van de transportcapaciteit bij de betreffende vloot bij verschillende omstandigheden (percentages zijn indicatief). In het adaptatie-scenario (met laagwaterschepen) neemt de transportcapaciteit af bij verminderde afvoer, maar minder dan in de scenario's zonder specifieke aandacht voor klimaatadaptatie. Uit een dergelijke analyse valt op te maken welke 'winst' er te halen is met een klimaatadaptieve vloot.



Figuur 2-1 Vingeroefening: toekomstige vlootmix in 2050 voor de huidige situatie en drie scenario's.



Figuur 2-2 Vingeroefening (percentages indicatief): mate van behoud transportcapaciteit bij toekomstige vlootscenario's voor 2050 voor verschillende omstandigheden (normale afvoer, afvoer Lobith <1020 en <850 m³/s).

Opmerkingen die geplaatst worden bij deze aanpak zijn:

- Vervangingsgraad¹ van kleine schepen is hoger dan van grotere schepen, o.a. door gebrek aan personeel en hogere vaarkosten waardoor de business case niet meer uit kan.
- Huidige nieuwbouw vindt vooral plaats in het grotere schepen segment.
- In de huidige opzet is vooral gedacht vanuit de huidige vloot, scheepsafmetingen en aantallen, en minder vanuit de marktsegmenten. Dat maakt het lastig om accurate toekomstscenario's met betrekking tot vlootverdeling en vlootomvang te maken. Zeker omdat het type lading mede bepalend is voor het type schip dat de lading gaat vervoeren.
- Om schepen zo lang mogelijk te laten varen bij lage afvoeren wil je: 1) zo licht mogelijk bouwen, 2) zo min mogelijk diepgang en 3) zo veel mogelijk holte.
- De verwachting is dat een deel van de duwvaart zal wegvallen in de toekomst, vanwege diepgang maar ook omdat de markt waarin deze actief zijn (o.a. kolentransport) in omvang afneemt, en een ander deel van de duwbakken zal worden omgebouwd naar andere typen duwbakken. Zie nadere uitleg in Hoofdstuk 3.
- Een mogelijke andere aanpak is om te kijken naar bijvoorbeeld de segmenten natte bulk, droge bulk en containers en voor een aantal schepen de tonkm-prestatie te bepalen en wat het aandeel is van die schepen. Vervolgens kan bekeken worden hoe de vervoersprestatie in de toekomst verandert.

2.3 Nadere analyse huidige vlootsamenstelling

2.3.1 Methode en data

Bij deze eerste vingeroefening werd duidelijk dat een aantal aannames verbetering nodig had. Op basis van casco-gegevens uit een ILT-dataset zijn daartoe de volgende stappen uitgevoerd:

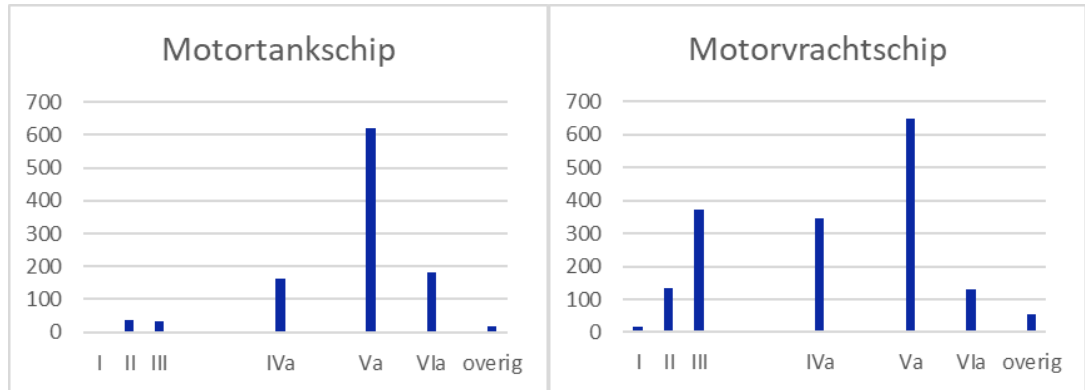
- 1 De data is omgezet van scheepsafmetingen naar een verdeling volgens de CEMT-klasse op basis van de Richtlijnen Vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2020). De indeling volgens de CEMT-classificatie is geaggregeerd naar een drietal groepen:
 - De kleine motorschepen: CEMT I - CEMT III (RWS-klasse M1-M5);
 - De middelgrote motorschepen: CEMT IV (RWS-klasse M6-M7);
 - De grote motorschepen: CEMT V +CEMT VI (RWS-klasse M8-M12).
- 2 Aan de indeling volgens de CEMT zijn karakteristieke scheepsafmetingen (scheepslengte, -breedte en ledige diepgang) toegevoegd (Bijlage A).
- 3 Voor de betreffende schepen is de vervoerscapaciteit bepaald m.b.v. een geüpdatete versie van het model volgens Dorsser et al. (2024), opgenomen in Bijlage B.

In de analyse is onderscheid gemaakt tussen motortankschepen en motorvrachtschepen. Gegevens over de containervaart waren niet uit de dataset te filteren en deze zijn daarom niet als aparte groep schepen meegenomen in de analyse, ze zijn onderdeel van de categorie motorvrachtschepen.

¹ Mbt de 'vervangingsgraad': schepen worden niet per se 1-op-1 vervangen door een nieuwere versie met dezelfde afmetingen. Het gaat hier over verschuivingen in de totale vlootmix als geheel, waarbij het aantal kleine schepen dat jaarlijks uit de vaart gaat groter is dan het aantal grotere schepen dat er jaarlijks bij komt. Dat hangt samen met beschikbaar personeel, business case voor de investering maar ook met de leeftijdsopbouw van de vloot zelf. Wat er voor terugkomt (als er iets voor terugkomt, want we kunnen niet zeggen welk schip door welke nieuwe is vervangen) is gemiddeld genomen groter in afmetingen.

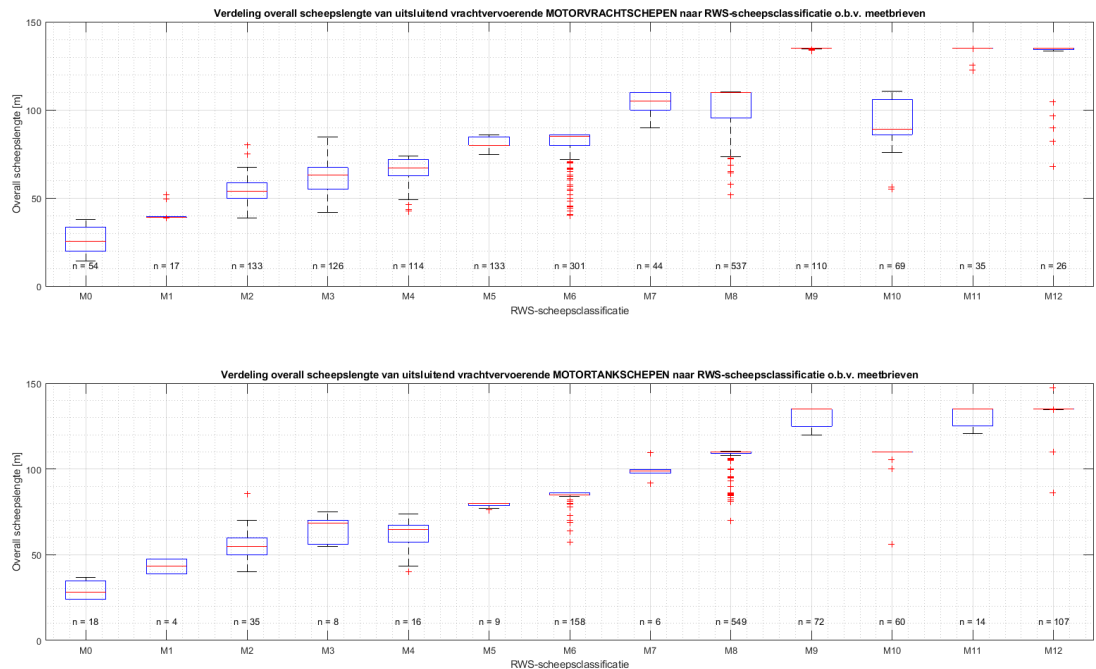
2.3.2 Resultaten

Figuur 2-3 laat de resultaten zien van de verbeterstappen 1 en 2. Het aandeel kleine schepen (CEMT I-III) is klein ten opzichte van de middelgrote en grote schepen (CEMT IVa respectievelijk CEMT Va & VIa). De vloot van de motortankschepen bestaat vooral uit CEMT-klasse IVa, Va en VIa, waarbij Va het grootste aandeel vertegenwoordigt. Voor motorvrachtschepen is de verdeling meer gespreid, maar is het aandeel Va ook het grootst. Het aantal schepen van CEMT klasse III is ook aanzienlijk bij motorvrachtschepen. Een overzicht van de aantallen en afmetingen is te vinden in Bijlage A.

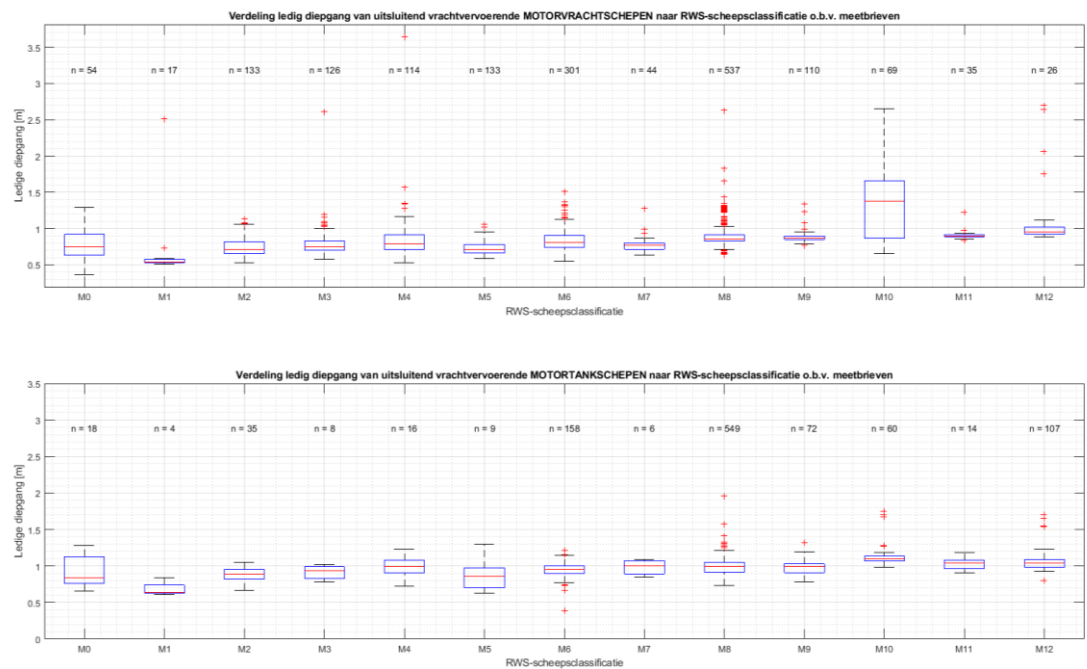


Figuur 2-3 samenstelling huidige vloot (bron: ILT-data in bezit van RWS).

Voor verbeterstap 3 is de data geanalyseerd naar scheepsafmetingen, te weten: 1) lengte, 2) breedte en 3) ledige diepgang. De box-plots in Figuur 2-4 geven weer hoe de scheepslengte van de vloot varieert voor de verschillende scheepsklassen. Figuur 2-5 toont de ledige diepgang. Op basis van de box-plots en de aantallen (n) is geprobeerd een inschatting te maken van een karakteristiek schip (lengte x breedte x ledige diepgang) voor een bepaald segment en CEMT-klasse.



Figuur 2-4 Box-plots van scheepslengte per RWS-klasse (bron RWS/ILT).



Figuur 2-5 Box-plots van ledige diepgang per RWS-klasse (bron RWS/ILT).

In Figuur 2-5 is ook duidelijk te zien dat motortankschepen een grotere ledige diepgang hebben dan motorschepen; het gaat hierbij om ongeveer 10 cm voor iedere scheepsklasse. Deze motortankschepen zullen dan ook eerder last hebben van minder beschikbare diepgang bij lage afvoeren en zullen eerder stoppen met varen (zie ook analyse van Vinke et al., 2023).

In stap 4 is een vertaling gemaakt wat de vervoerscapaciteit is van de betreffende karakteristieke schepen met behulp van het model volgens Dorsser et al. (2024). Het model kan op basis van karakteristieke afmetingen bepalen wat de vervoerscapaciteit is van het betreffende schip. De uiteindelijke resultaten van de vier stappen voor motorvrachtschepen worden weergegeven in Tabel 2-1. Dit geeft een totaalbeeld van de huidige vloot geregistreerd in Nederland. Op basis hiervan kan een inschatting worden gemaakt van de totale vervoerscapaciteit van de vloot bij verschillende afvoersituaties op de rivier.

Tabel 2-1 Overzicht van huidige vloot van karakteristieke motorvrachtschepen per CEMT-klasse.

| CEMT-klasse | Aantal [-] | Lengte [m] | Breedte [m] | Ledige diepgang [m] | Capaciteit [ton] |
|-------------|------------|------------|-------------|---------------------|------------------|
| I | 17 | 39 | 5,1 | 0,5 | 331 |
| II | 133 | 55 | 6,6 | 0,75 | 553 |
| III | 373 | 55 | 6,6 | 0,75 | 553 |
| | | 55 | 7,2 | 0,75 | 616 |
| | | 70 | 7,2 | 0,75 | 806 |
| | | 73 | 8,2 | 0,75 | 1.020 |
| IVa | 345 | 86 | 9,6 | 0,8 | 1.562 |
| | | 100 | 9,5 | 0,8 | 1.842 |
| Va | 647 | 135 | 11,6 | 0,8 | 4.100 |
| | | 110 | 11,6 | 0,8 | 3.116 |
| Vla | 130 | 135 | 22,9 | 1 | 8.131 |
| | | 135 | 17,5 | 1 | 6.213 |

2.4 Conclusie

De analyse met de uitgevoerde verbeteringen laten zien hoe de huidige vloot is opgebouwd en wat de scheepsafmetingen zijn van de karakteristieke schepen en de bijbehorende vervoerscapaciteit. De resultaten geven een beeld over de huidige vloot. Een vingeroefening is gedaan naar hoe de toekomstige vloot er mogelijk uit kan zien. Echter zijn er verdiepingsslagen nodig op meerdere onderdelen. Hieronder doen we een aantal aanbevelingen.

2.5 Aanbevelingen

Op basis van deze analyse blijft nog een aantal punten open of zijn er nog enkele verdiepingsslagen toe te passen.

Openstaande punten zijn:

- Deze analyse is uitgevoerd voor de vloot onder Nederlandse vlag, mogelijk dat er breder gekeken kan worden naar alle schepen die op de Nederlandse vaarwegen worden ingezet. De beschikbaarheid van de benodigde data is een aandachtspunt en dit wordt nader uiteengezet in Hoofdstuk 3.
- Het bepalen welke schepen (1) in de toekomst mogelijk verdwijnen, (2) in aantal zullen toenemen en (3) voor mogelijke andere type lading ingezet kan worden, zie ook Hoofdstuk 3.
- Het bepalen van het type laagwaterschepen dat in de toekomst gebouwd gaat worden met bijbehorende scheepsafmetingen en transportcapaciteiten met model van Dorsser (2024), zodanig dat de schepen bij laagwater langer kunnen doorvaren en bij lage afvoeren meer kunnen meenemen. In Hoofdstuk 3 wordt uitgelegd hoe dit bereikt kan worden.

- Wat betekent de vlootverandering voor de beschikbare vervoerscapaciteit bij verschillende afvoerscenario's (volgens methodiek "vingeroefening").

Verdiepingslagen:

- Op dit moment zijn de aantallen schepen bepaald voor de CEMT-klassen, echter is dit nog niet uitgevoerd voor de karakteristieke schepen binnen de CEMT-klasse.
- De scheepsafmetingen zijn afgelezen op basis van de diverse plots. Een statistische analyse van de scheepsafmetingen met behulp van bijvoorbeeld cluster-technieken zou meer inzicht kunnen geven over wat precies de karakteristieke schepen zijn.
- Een koppeling leggen met de te verwachten ladingstroom-ontwikkeling; ladingstromen bepalen voor een deel immers het type schepen.

De resultaten van de analyse kunnen worden gebruikt in analyses zoals is uitgevoerd in de "eerste vingeroefening", maar kunnen ook dienen als input voor het Systeem-Dynamisch model, ontwikkeld door Copernicos en dat in Hoofdstuk 4 wordt gepresenteerd, of het Digital Twin Vaarwegen model, ook toegepast in TRANS2.

3 Methodische overwegingen bij modellering vlootsamenstelling

3.1 Inleiding

Het in kaart brengen van de huidige samenstelling en toekomstige ontwikkeling van de Nederlandse en West Europese binnenvaartvloot en hun prestatie op laagwater is een lastige opgave, omdat:

- Het ontbreekt aan consistente informatie over de omvang en samenstelling van de vloot naar land, type schip (motorschip, duwbak), type lading (droge lading, natte lading) en scheepsgrootte (afmetingen, tonnage).
- Het laadvermogen van schepen niet homogeen is en varieert met de afmetingen van het schip, het type schip, het soort schip en de mate waarin er gekozen is voor een lichter of een zwaarder schip. Het effect van het eigen scheepsgewicht op de capaciteit speelt vooral bij laagwater.
- De ontwikkeling van de vloot en haar samenstelling niet exogeen te schatten valt, maar meebeweegt met de vraag naar transportcapaciteit, al dan niet begrensd door een gebrek aan personeel. Ook sturing via regelgeving of subsidie kan bijdragen aan de ontwikkeling. In Hoofdstuk 1 zijn relevante aspecten hieromtrent besproken.

In Hoofdstuk 2 is een eerste aanzet gedaan om een inschatting te maken van de toekomstige samenstelling van de binnenvaartvloot aan de hand van drie mogelijke scenario's. Hoewel deze vingeroefening waardevolle inzichten heeft opgeleverd, is meer tijd voor overdenking van de scenario's en een verdiepingsslag van de gehanteerde methode nodig. Uit de gevoerde discussies en analyse kan worden geconcludeerd dat het aan te bevelen is rekening te houden met het endogene karakter van de vloot in relatie tot de vraag en het aanbod van scheepsruimte. Dit hoofdstuk schetst de contouren voor een verbeterde methode om tot een betere toekomstige vlootinschatting te komen.

3.2 Stap 1: Beschrijven huidige vloot

In het vorige hoofdstuk is al een kwantificering van de huidige vloot gemaakt. Hier zetten we uiteen hoe die eerste analyse verbeterd zou kunnen worden door gebruikmaking van meerdere bronnen. Voor het beschrijven van de samenstelling van de vloot is het wenselijk om voldoende detail mee te nemen om de verschillende subcategorieën goed te beschrijven, maar ook niet te veel om de analyse overzichtelijk en werkbaar te houden.

Gezien de primaire verschillen tussen motorschepen en duwbakken en tussen droge en natte lading ligt het voor de hand om onderscheid te maken naar motorvrachtschepen, vrachtbakken, motortankschepen en tankbakken van verschillende groottes. Wat betreft de grootte van de schepen kan de volgende onderverdeling worden gesuggereerd:

- De kleine schepen: CEMT I - CEMT III (250-1000 ton);
- De kanaalschepen: CEMT IV (1000-1500 ton);
- De conventionele Rijnvaartschepen: CEMT V (1500-3000 ton);
- Grote Rijnvaartschepen: CEMT VI (3000+ ton).

Hierbij moet opgemerkt worden dat het tonnage een statistische inschatting vormt voor de grootte klassen, maar dat deze feitelijk bepaald worden door de afmetingen van de schepen in relatie tot de beschikbare infrastructuur.

De achterliggende redenering voor de gesuggereerde indeling is dat de eerste categorie vrijwel geheel bestaat uit enkelwandige droge lading schepen en een beperkt aantal bunkerscheperen voor brandstoflevering aan de binnenvaart (niet te verwarren met grote binnenvaart bunkertankers die brandstof leveren aan de zeevaart). Dit zijn twee relatief homogene groepen die nagenoeg geen nieuwbouw kennen, omdat dat doorgaans niet uit kan. De omvang van dit segment neemt geleidelijk aan af.

De tweede groep (klasse IV) heeft betrekking op de vaart op de kanalen. Dit is een redelijk homogene groep schepen met min of meer vergelijkbare afmetingen. Op deze groep heeft klimaatverandering niet zo'n prominente invloed. In dit segment vindt nog wel vernieuwing plaats, maar desondanks neemt de omvang van deze groep steeds verder af. Wel neemt het aantal droge lading bakken toe, mogelijk doordat motorschepen worden omgebouwd tot bak in combinatie met gebruik als koppelverband.

De derde groep betreft ook een relatief homogene groep schepen die gekenmerkt wordt door een lengte van 110 meter en een breedte van 11,40 meter. Dit zijn de min of meer 'standaard' Rijnschepen die geschikt zijn voor de Rijn en haar zijrivieren. Voor deze groep is draagvermogen in relatie tot laagwater wel van belang. Naar verwachting zal deze groep geleidelijk aan meer schepen krijgen die langer door kunnen varen bij laagwater (tot een diepgang van circa 1,20 meter, waar deze schepen nu doorgaans moeten stoppen als een diepgang van circa 1,50 meter niet meer mogelijk is) en die lichter gebouwd worden, zodat ze circa 100 tot 150 ton extra mee kunnen nemen.

De laatste groep is actief in het deltagebied en/of op de Rijn. De schepen die op de Rijn actief zijn worden net als de vorige groep nadrukkelijk geraakt door klimaatverandering. De vloot die in het deltagebied actief is (ARA, Amsterdam-Rotterdam-Antwerpen) zal deels kiezen voor flexibiliteit (en dus ook optimaliseren voor laagwater) en deels kiezen voor zo veel mogelijk capaciteit (en dus een navenant grotere diepgang). Ten aanzien van het laagwater-bestendig maken van de schepen spelen de volgende mechanismen:

- Meer schroeven met een kleinere diepgang (langer doorvaren bij lager water);
- Optimaliseren van het ledige scheepsgewicht (lichtgewicht constructie) om meer draagvermogen te krijgen op een lage diepgang;
- Verminderen van de holte om gewicht te besparen. Deze maatregel is heel rigoureuus omdat voor elke ton die zo op extreem laag water gewonnen wordt ongeveer 10 ton laadcapaciteit op diep water verloren gaat;
- Verlengen en verbreden van het schip tot 135 meter lengte (maximaal toegestaan voor een ondeelbaar schip op de Rijn) en verbreden van het schip tot maximaal 17,5 meter (maximale breedte toegestaan in het Binger Loch midden op de Rijn);
- Varen als koppelverband (met 1 tot 3 bakken voor en langszij) waarmee bij laag water toch meer meegenomen kan worden. Hierbij moet opgemerkt worden dat bakken door hun kleinere ledige diepgang relatief meer draagvermogen hebben.
- In de 3^e groep (Rijnschepen van 110 meter) vindt enige groei plaats. De meeste groei vindt echter plaats in de 4^e groep. Dit zijn zowel schepen die geoptimaliseerd worden op veel tonnage in het benedenstroomse gebied als schepen die geoptimaliseerd worden voor de Rijnvaart (met meer focus op laag water).

KBN heeft in juni 2023 een data-analyse gepubliceerd voor de samenstelling van de actieve Nederlandse vloot op Nederlands grondgebied van 2008 t/m 2022. Deze analyse is gebaseerd op maatwerk dat CBS in opdracht van andere partijen heeft uitgevoerd. Deze analyse is bijgevoegd in Bijlage C en bevat voldoende detail om bovenstaande indeling te ondersteunen, maar omdat het geen standaard rapportage betreft kan de continuïteit van deze tabel niet worden gegarandeerd.

Voor de West-Europese en/of Europese vloot zijn helaas minder gedetailleerde gegevens beschikbaar (zie Bijlage D over de beschikbare data).

Voor de totale omvang van de Rijnvaartvloot kan het beste worden uitgegaan van de gegevens van de CCR, die op basis van Eurostat en nationale gegevens een inschatting maakt. De CCR geeft een inschatting voor het totaal aantal schepen in de Rijnvaart en op de Donau, maar ze maakt geen onderscheid tussen motorschepen en duwbakken en ook geen onderscheid naar verschillende grootte klassen.

De door Eurostat gerapporteerde waarden hebben betrekking op zelf varende en niet zelf varende schepen in drie lading categorieën (<1000 ton, 1000-3000 ton, 3000+ ton). Hierbij ontbreekt onderscheid tussen tankschepen en droge vracht/containerschepen. Ook is het door het ontbreken van een opsplitsing in de categorie 1000-3000 ton niet mogelijk om onderscheid te maken tussen Rijnvaartschepen en kanaalschepen. Om dit te ondervangen zal moeten worden gekeken of hier met behulp van nationale data een onderscheid in gemaakt kan worden.

Belangrijk om te weten is dat Eurostat-gegevens een vrije rapportage-standaard kent voor de opgave van de actieve vloot. Voor Nederland wordt de omvang van de actieve vloot bepaald aan de hand van het totaal van de binnenlandse en buitenlandse schepen die in een bepaald jaar door IVS geregistreerd zijn. Dit bevat dus ook buitenlandse schepen waardoor er in Eurostat een dubbel telling ontstaat. De CCR corrigeert hiervoor door bij het CBS de gegevens voor de actieve Nederlandse schepen op Nederlands grondgebied op te vragen (dit zijn dezelfde gegevens als KBN geanalyseerd heeft).

Om een consistent beeld te krijgen van de samenstelling van de actieve Europese vloot in de Rijnvaart en Donau landen kunnen de volgende stappen worden uitgevoerd:

- Uitgangspunt zijn de totale aantallen in de CCR rapportage;
- Voor Nederland zijn detailgegevens per categorie beschikbaar in de KBN-analyse;
- Voor andere landen kan worden gekeken naar gegevens van Eurostat per soort schip (motorschip of bak) en drie grootte klassen;
- Voor sommige landen zoals Duitsland zijn aanvullende statistieken beschikbaar (<https://www.gdws.wsv.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Binnenschiffsbestandsdatei/2022.pdf>);
- Op basis van de beschikbare gegevens kan getracht worden een consistent beeld te vormen van de huidige vloot, waarbij ontbrekende gegevens geschat moeten worden op basis van een nog te ontwikkelen methode.

Meer achtergrond over de beschikbare data is opgenomen in Bijlage D.

3.3 Stap 2: Naar een set van individuele schepen

Bij het in kaart brengen van het effect van laagwater op de capaciteit van de vloot is het wenselijk om rekening te houden met de daadwerkelijke heterogeniteit in de vloot en de verschillen in hoofdafmetingen, ledige diepgang en de capaciteit van de schepen. Dit is niet zo eenvoudig, omdat er geen volledige database beschikbaar is waarin de gegevens van alle schepen opgenomen zijn. In afwezigheid van een dergelijke database kan, als second best optie, gekeken worden naar het samplen van schepen uit een bestaande populatie.

Hierbij kan dankbaar gebruik gemaakt worden van de database van schepen die bij ILT geregistreerd staan en die door Rijkswaterstaat binnen het TKI-project TRANS2 geanalyseerd zijn (Hoofdstuk 2) en het parametrisch model voor het bepalen van de capaciteit van binnenschepen van Van Dorsser (2020) dat in het kader van TRANS2 bij KBN doorontwikkeld is (Van Dorsser, 2024) en samen met de bijhorende programmeercode (in python) beschikbaar gesteld is op GitHub.

De ILT-database betreft een database met in Nederland gecertificeerde schepen waarvan het type, de lengte, de breedte en de ledige diepgang vertrouwelijk gedeeld zijn met RWS voor analyse en waarvan de uitkomsten openbaar gemaakt zijn onder TRANS2 (Hoofdstuk 2 en Bijlage A). Deze analyse omvat box-plots voor de lengte, breedte en ledige diepgang van de schepen naar grootte klasse op basis van het type schip en de RWS klasse indeling.

Nadat in stap 1 de huidige samenstelling van de vloot op hoofdlijnen vastgesteld is, kan door statistische trekkingen uit de categorieën te nemen een gesimuleerde set schepen worden verkregen dat een vergelijkbare heterogeniteit kent als de werkelijke vloot. Van deze schepen is dan de lengte, breedte en de ledige diepgang bekend. In een volgende stap kan op basis van deze gegevens met behulp van het model van Van Dorsser (2024) voor elk van de schepen de laadcapaciteit over de diepgang worden vastgesteld. Dit resulteert in een set schepen die de heterogene vlootsamenstelling representeert en die als vertrekpunt kan worden gebruikt om de ontwikkeling van de vloot over de tijd in kaart te brengen door aannames te doen over binnenvaartschepen die uit de vloot verdwijnen en die eraan toegevoegd worden in relatie tot de ontwikkeling van de vraag.

3.4 Stap 3: Simuleren van de vlootontwikkeling over de tijd

Voor het in kaart brengen van de toekomstige vlootsamenstelling is het van belang te beseffen dat deze niet los gezien kan worden van de ontwikkeling van de vraag naar vervoer in de verschillende segmenten. Als de vraag in een bepaald segment kleiner wordt dan het aanbod zal de vloot uitfaseren. Hoe dit mechanisme precies werkt moet nog nader worden onderzocht, maar wellicht kan worden uitgegaan van een bepaald percentage van de vloot indien een bepaalde waarde onderschreden wordt. Bijvoorbeeld, als de vraag minder wordt dan 60% van het aanbod, dat dan elk jaar 25% van de verschilcapaciteit wegvalt (bij 50% vraag t.o.v. aanbod kom je dan op $(60\%-50\%)*25\% = 2,5\%$ vlootreductie). NB: De bovenstaande getallen zijn een hypothetisch voorbeeld en moeten nog worden vastgesteld.

Het creëren van nieuwe capaciteit kan afhankelijk van de geopolitieke situatie snel gaan. Als schepen in China gebouwd worden en in Nederland afgebouwd worden, is de doorlooptijd nog geen 2 jaar. Als de geopolitieke situatie verandert, ga je wellicht naar 3 jaar doorlooptijd toe. De mate waarin er nieuwe schepen bijgebouwd gaan worden zal afhangen van het verdienvermogen. Dit hangt feitelijk af van de te verwachten financiële rendementen, maar wellicht kan dit eenvoudiger worden gemodelleerd door uit te gaan van een bepaald percentage nieuwe schepen zodra de factor vraag over aanbod meer dan bijvoorbeeld 80% bedraagt. Zeg nieuwbouw bijvoorbeeld 25% van het overaanbod boven de 80% in de betreffende categorie.

Bij de simulatie van de toekomstige vlootsценario's kan de Digital Twin Vaarwegen², ook ingezet in TRANS2 voor casestudies rond omvaren en 'hubs & spokes', in combinatie met een geografische verdelingsfunctie in het ladingaanbod (zoals uit BIVAS) bepalen in welke segmenten er overschot en gebrek aan capaciteit is. Daar waar overschot is, moet bepaald worden welke schepen er afvloeien.

² <https://smartport.nl/digital-twin-voor-grip-op-binnenvaartlogistiek/>

Dit kan bijvoorbeeld op basis van een nutswaarde functie waarbij gekeken wordt naar de capaciteit van het schip in relatie tot de vaarweg (te kleine schepen op groter vaarwater verdwijnen eerst), de laagwater kenmerken van het schip (schepen met een grote ledige diepgang en minder capaciteit verdwijnen ook sneller) en de leeftijd van het schip (oudere schepen >35 jaar komen ook eerder aan de beurt voor vervanging). Bij nieuwbouw speelt iets vergelijkbaars. Bij nieuwbouw wordt ingezet op een zo groot en efficiënt mogelijk schip. Indien het schip op de rivier vaart is er optimalisatie voor laagwater condities, indien er alleen in de delta gevaren wordt (bijvoorbeeld bunkerschepen voor zeevaart) zal er geoptimaliseerd worden voor capaciteit. Verder kan nog worden gekeken naar specifieke kenmerken van de markt (grootte van ladingpakketten) en kan rekening gehouden worden met eventuele toepassing van alternatieve brandstoffen en aandrijving.

Een ander onderwerp waar ook nog naar gekeken moet worden is de rol van bakken in combinatie met laagwater. Is het mogelijk en heeft het zin om droge lading bakken die afgeschreven zijn en over enkele jaren niet meer nodig zijn voor het vervoer van kolen te behouden en bij laagwater in te zetten in het containervervoer? En heeft het zin om ook nieuwe tankbakken voor laagwater te bouwen die enerzijds gebruikt worden voor drijvende opslag en anderzijds als extra capaciteit bij laagwater fungeren?

3.5 Conclusie

Het modelleren van de toekomstige samenstelling van de binnenvaartvloot is een complexe, maar noodzakelijke uitdaging om de sector robuust en toekomstbestendig te maken. Het gebrek aan consistente en gedetailleerde gegevens vormt momenteel een belangrijke belemmering. Om te komen tot een realistische verwachting zijn drie stappen voorgesteld die nodig zijn voor een analyse: (1) een gedetailleerde beschrijving van de huidige vlootsamenstelling (d.w.z., uitbreiding van de eerste aanzet in Hoofdstuk 2), (2) het ontwikkelen van een representatieve set individuele schepen, en (3) het simuleren van de toekomstige vlootontwikkeling met scenario's die rekening houden met veranderende vraag-aanbodynamieken, klimaatverandering en technische innovatie.

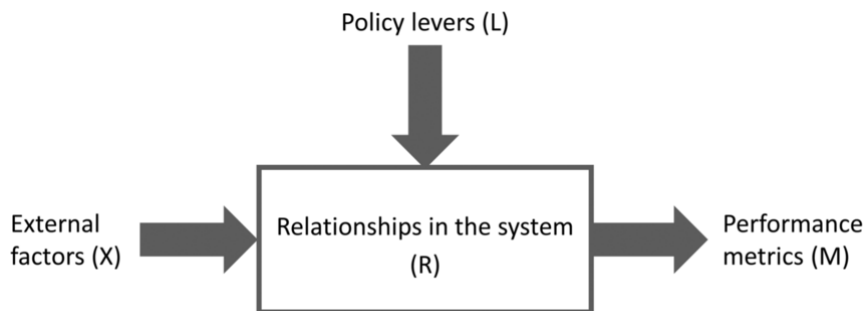
Door gebruik te maken van bestaande datasets, statistische methoden, Digital Twin Vaarwegen, BIVAS en modellen zoals die van Van Dorsser (2024), kan een representatief beeld van de vlootsamenstelling worden gevormd. Deze aanpak maakt het mogelijk om toekomstscenario's te simuleren van de binnenvaartvloot. Er moet aandacht blijven voor ontbrekende gegevens en de ontwikkeling van nieuwe methodieken om een consistente basis te creëren voor toekomstig beleid en vlootbeheer.

4 Toepassing in het SD-model

4.1 Beknopte beschrijving SD-model

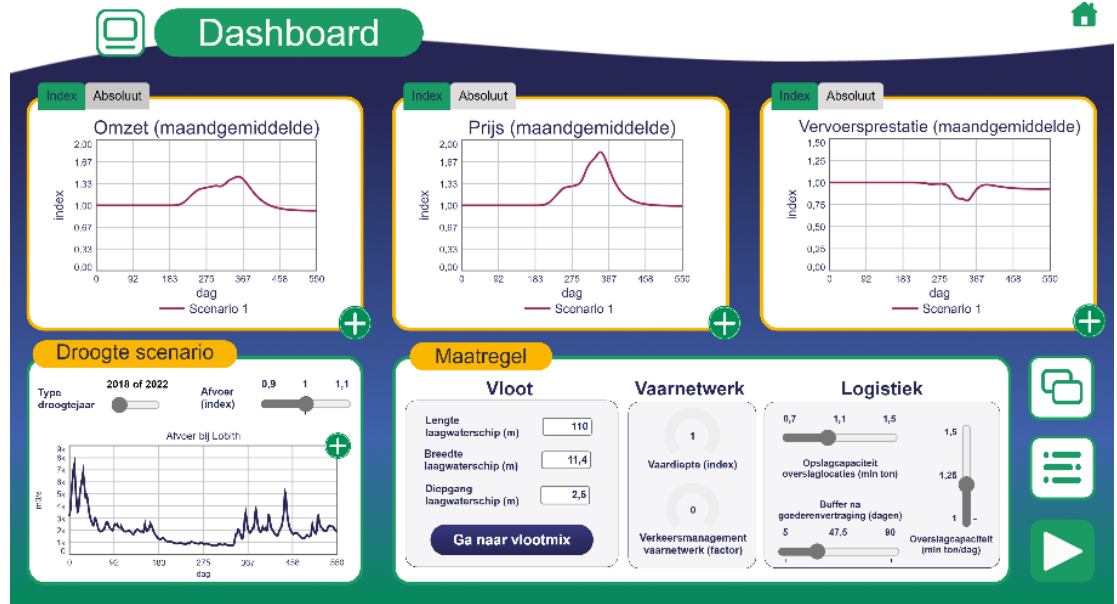
In het kader van TRANS2 heeft Copernicos een systeem-dynamisch model (SD-model) gebouwd waarmee scenario-analyses uitgevoerd kunnen worden. Hiermee zijn verschillende maatregelen – verandering van de vloot, de vaarweg of de logistiek – onderzocht om goederenvervoer via binnenvaart op peil te houden bij klimaatverandering, specifiek bij droogte. Voor dit model is een aparte rapportage gemaakt als onderdeel van de gebruikerstool (Figuur 4-2), die online beschikbaar is via deze link: exchange.iseesystems.com/public/copernicos/trans2/index.html#page1.

Het SD-model is gebouwd op basis van het XLRM-framework:



Figuur 4-1 XLRM-framework.

Met literatuuronderzoek, data-analyse, simulatie, expert interviews, en gesprekken tijdens dialoogsessies (zie Figuur 4-1) is het binnenvaartsysteem (R) in kaart gebracht en zijn verschillende maatregelen (L) geïdentificeerd. Ook is een aantal belangrijke KPI's (M) vastgesteld, waarbij de belangrijkste de vervoersprestatie is. Vervolgens is een aantal droogtejaren (X) in het model gebracht. Hiermee kan onderzocht worden hoe het binnenvaartsysteem reageert op laagwater zonder en met (aanvullende) maatregelen. De maatregelen hebben onder andere betrekking op de vloot(samenstelling) maar betreffen ook andere logistieke factoren (zoals voorraden en overslagcapaciteiten) en vaarweginfrastructuur-factoren (zoals vaardiepte). Voor de huidige vloot in het model is uitgegaan van de schepen die in de Nederlandse wateren operationeel zijn (CBS data).



Figuur 4-2 Screenshot van het dashboard van het SD-model.

4.2 Uitkomsten SD-model

De maatregelen die het meest robuust zijn, oftewel de maatregelen die in de meeste mogelijke toekomst het beste resultaat opleveren, zijn de maatregelen die ervoor zorgen dat de transportcapaciteit van binnenvaartschepen tijdens droogte hoog blijft. Dit kan met verschillende maatregelen bereikt worden, zoals het verlagen van de diepgang van schepen of het vergroten van de waterdiepte. Hierbij is er waarschijnlijk meer winst (op de beladingsgraad) te behalen met het verlagen van de ledige diepgang van schepen dan het verhogen van waterdiepte, naast het nemen van lokale maatregelen om plaatselijke bottlenecks weg te nemen (als voorbeeld de harde laag bij Nijmegen).

Binnen het aanpassen van de diepgang van schepen is ondervonden dat schepen met een lagere diepgang en (zoveel mogelijk) gelijke laadcapaciteit als voorheen het meest effectief zijn. Deze maatregel noemen wij 'laagwaterschepen'. Kleinere schepen (met een lagere diepgang en minder laadcapaciteit als voorheen) zijn minder effectief dan laagwaterschepen³, omdat er dan meer schepen nodig zijn om dezelfde hoeveelheid lading te vervoeren. Dit kan zorgen voor logistieke problemen (congestie in het vaarwegennetwerk of problemen met overslagcapaciteit), en problemen met het bemannen van schepen.

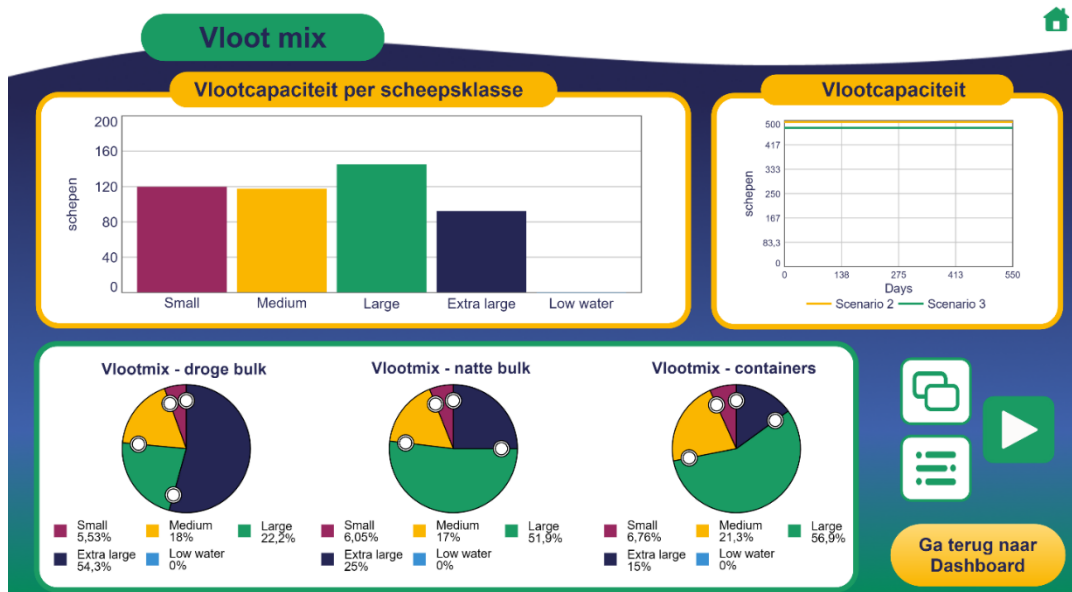
De verwachting is dat in de toekomst (steeds) vaker extreem weer gaat plaatsvinden en dus meer (extreme) droogtedagen, dus de verhouding droogtedagen – normale dagen beweegt steeds meer richting droogtedagen. Daarmee worden laagwaterschepen steeds profijtelijker. Hier staan natuurlijk wel investeringen tegenover, dus een gradueel ingroeipad dat meebeweegt met het aantal droogtedagen is noodzakelijk.

³ In deze definitie is een laagwaterschip dus een minder diep stekend schip met volledig behoud van laadvermogen ten opzichte van een 'normaal' schip met dezelfde afmetingen. In praktijk zal er altijd wel iets verlies zijn, maar minder dan bij traditionele kleinere schepen.

4.3 Aanbevelingen geredeneerd vanuit SD-model

Eerste berekeningen met het Systeem-Dynamisch model laten zien dat in de toekomst, met vaker laagwater en langzaam verdwijnen van het kleine schip, de vloot niet meer in staat is om aan de transportvraag te voldoen. Het huidige SD-model bevat de inputvariabelen om te 'spelen' met de vlootsamenstelling en laagwaterschepen. Per type lading (nat, droog, container) kan een verdeling in scheepsgrootte worden opgegeven (klein – midden – groot – extra groot – laagwaterschip), zie ook Figuur 4-3.

Tijdens een werksessie hebben we als vingeroefening enkele situaties doorlopen en vergeleken: de huidige vloot zoals die in het model zit, de huidige vloot met vaker laagwater (knelt het dan), een aangepaste vloot met vaker laagwater (lost dit iets op). Dit soort exercities is heel waardevol gebleken, en we hebben met elkaar gewenste model-uitbreidingen geïdentificeerd om de waarde van zulke analyses te vergroten.



Figuur 4-3 Invoerpagina in het dashboard waar de vlootmix kan worden ingevoerd.

Gewenste model-uitbreidingen:

- Opnemen van kosten en met name investeringen van scheepsaanpassingen, zodat kosten/baten analyse mogelijk wordt van verschillende vlootinterventies. Hiermee kan inzicht verkregen worden in de kosteneffectiviteit van verschillende vlootsamenstellingen in de toekomst.
- Opnemen van (de ontwikkeling van) de arbeidsmarkt voor wat betreft bemanningscapaciteit als externe factor.
- Bij investeringen in nieuwe schepen ook rekening houden met verduurzaming, toevoegen aan het model van milieuprestaties en -kosten (hierbij kan gebruik gemaakt worden van eerder werk van Copernicos en werk van o.a. MARIN).
- Nu kan het model een droogtejaar simuleren, gewenst is om meerjarige simulaties mogelijk te maken, zodat een verschuiving in de vlootsamenstelling over de tijd gesimuleerd kan worden (onder verschillende omstandigheden en externe scenario's) en de kosten/baten op de langere termijn beter in beeld gebracht kunnen worden.
- Verschillende vaarwegcorridors opnemen in het model (nu met name de Rijn gemodelleerd, hoewel 'mechanismen' vrij generiek van aard zijn).

- In het gedetailleerdere SD-model is het overslagmechanisme niet helemaal goed gemodelleerd, dit kan verbeterd worden.
- Uitbreiden van maatregelen met (tijdelijke) verschuivingen van transportmodaliteiten en verplaatsen van productielocaties.

Nodig van anderen (om het SD-model verder te verbeteren):

- Zienswijze op en validatie van dimensionering van laagwaterschepen, de belangrijkste parameters.
- Validatie van aannames (er is een aparte pagina van aannames beschikbaar: exchange.iseesystems.com/public/copernicos/trans2/index.html#page30).
- Automatiseren inlezen datasets voor verschillende parameters datasets (bijvoorbeeld van CBS).
- Workshops voor de modellering van de gewenste model-uitbreidingen.

Gebruik door anderen:

- Er is al een interactieve rapportage beschikbaar waarin ook een dashboard is opgenomen: exchange.iseesystems.com/public/copernicos/trans2/index.html#page1
- Gewenst zou zijn om in workshops de scenario's verder uit te diepen en verschillende vlootscenario's en mogelijke andere maatregelen verder te finetunen.
- Het is ook mogelijk om verschillende scenario's als datasets uit het model op te leveren (een export maken), die weer gebruikt kunnen worden voor rapportagedoeleinden (bijvoorbeeld in de vorm van grafieken).
- Het SD-model kan gebruikt worden om snel veel scenario's en strategieën te onderzoeken, waarvan de meest relevante, kansrijke of waarschijnlijke verder uitgedetailleerd kunnen worden in de Digital Twin Vaarwegen.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

- Het is nuttig en waardevol om vlootscenario's te hebben voor studies die kijken naar de toekomst. Deze behoefte is geconstateerd niet alleen vanuit laagwater-problematiek, maar ook vanuit diverse andere opgaven, waaronder verduurzaming van de vloot. Voor dit rapport waren er nog geen geslaagde pogingen hiervoor gedaan.
- Het komen tot vlootscenario's is niet triviaal, omdat veel achtergrond-data ontbreekt of niet altijd toegankelijk is. Inzicht in verwachte transportvolumes en samenstelling van de huidige vloot is onvolledig. Het resultaat dat binnen het TRANS2 project is bereikt, drie toekomstscenario's voor de vlootmix van 2050, moet gezien worden als een vingeroefening – een eerste stap, waarbij er nog de nodige methodische overwegingen zijn die aandacht behoeven en waarvoor (wetenschappelijk) onderzoekwerk nodig is. Binnen het project is een overzicht van afwegingen en aandachtspunten opgeleverd.
- We hebben de toepassing van vlootscenario's laten zien met behulp van het systeem-dynamisch model: hiermee brengen we de impact van (veranderingen in) de vlootmix op de logistieke performance in beeld en laten we het effect zien van mogelijke maatregelen.
- Maatregelen voor verduurzaming (energietransitie, klimaatmitigatie) kunnen de ontwikkeling van de vlootmix beïnvloeden, en vervanging door verduurzaming kan een moment zijn om ook aanpassingen te doen ten behoeve van klimaatverandering.
- De ontwikkeling van de vloot (qua omvang, maar vooral ook qua samenstelling) kan niet los gezien worden van de ontwikkeling van transportvolumes en ladingsamenstelling. Voor vele vraagstukken is die dynamische relatie van belang om in modellen mee te nemen. Het SD-model geeft daar een eerste aanzet toe, o.a. door laadvermogen dynamisch te modelleren.
- Het SD-model laat ook zien dat de relatie tussen vaarweg en vlootsamenstelling dynamisch is en veranderingen in één van beide direct gevolgen heeft voor de logistiek.

5.2 Aanbevelingen

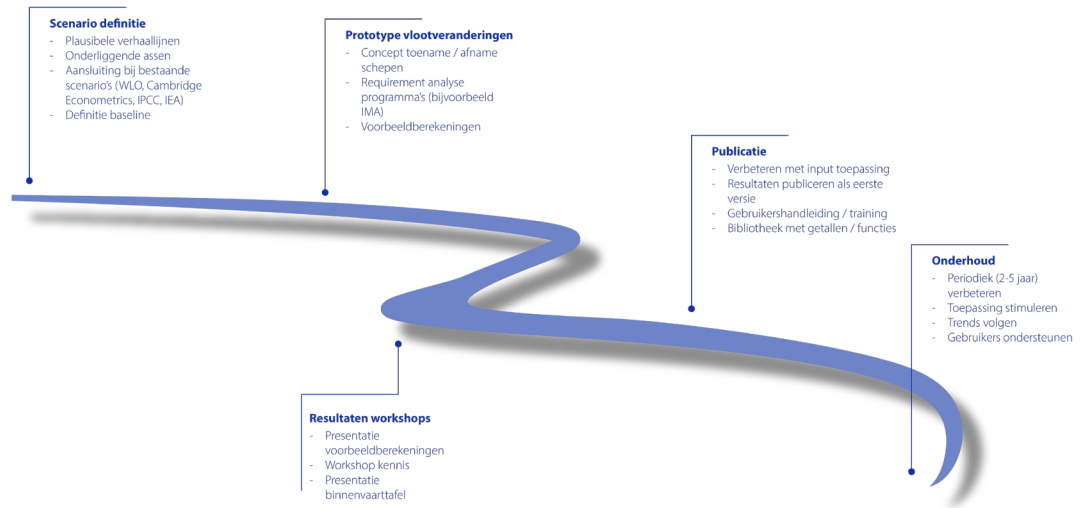
De TRANS2 werkzaamheden hebben geleid tot aanbevelingen om tot meer (wetenschappelijk) onderbouwde vlootsamenstelling scenario's te komen, waarbij in beeld is:

- Welke bronnen nodig en beschikbaar zijn;
- Welke methodische rekenstappen dienen te worden gezet;
- Hoe het SD-model verder kan worden ontwikkeld om de verfijndere vlootmix in de analyse op te nemen.

Dit met als doel om beter inzichtelijk te krijgen wat de toekomstige vervoersvraag is, de mogelijke toekomstige vlootmix (o.a. kijkend naar de manier van logistieke inzet van verschillende deelgroepen schepen, zoals het gebruik van duwbakken en koppelverbanden, en wellicht de ombouw van materieel dat door de energietransitie niet meer inzetbaar is), en in die scenario's de impact van verminderde beschikbaarheid van de vaarweg als gevolg van droogte.

Het is, om de vervoersvraag te bepalen, ook van belang aannames te doen op het gebied van de ontwikkeling van ladingstromen. De WLO scenario's zouden hiervoor kunnen dienen (de update verschijnt medio 2025). Meer dan voorheen zijn dergelijke scenario's van belang, omdat komende decennia de samenstelling van stromen fundamenteel gaat veranderen als gevolg van de energietransitie.

Fossiele stromen worden afgebouwd en nieuwe energiedragers zullen opkomen. Nog niet duidelijk is welke energiedragers dit zijn en hoe ze vervoerd zullen gaan worden. Aanbevolen wordt om toe te werken naar vlootscenario's die breed gedragen zijn om te kunnen toepassen in beleidsanalyses. Dit vergt een goede (wetenschappelijke) analyse naar factoren bepalend voor de dynamiek in de vlootontwikkeling. Dit zou bijvoorbeeld kunnen aan de hand van de onderstaande roadmap (Figuur 5-1).



Figuur 5-1 Roadmap vlootscenario's.

Vragen om daarbij tenminste te adresseren zijn:

- Wat zijn de dynamieken die de vlootontwikkeling bepalen en welke invloed hebben deze dynamieken (bijv. verandering ladingstromen, einde levensduur, vergrijzing personeel, vergroening, schaalvergroting) op de toekomstige vloot?
- Wat is de impact van klimaatverandering op de capaciteit en beschikbaarheid van vaarwegen en op welke termijn speelt dit?
- Welke aanpassingen aan de schepen in de vloot zijn het meest effectief (bijv. lichtere materialen, andere afmetingen)?

Het is ook mogelijk verder te gaan op de huidige set vlootgegevens, analyses worden dan gevoed met betere gegevens dan dat nu worden gebruikt. Maar uitspraken zullen dan wellicht algemener / meer indicatief van aard zijn en meer een wat-als karakter kennen (wat-als de diepgang met X% daalt).

Het is zinvol om te bekijken hoeveel meerwaarde een zeer gedetailleerde, kostbaardere aanpak heeft ten opzichte van een iets pragmatischer aanpak, en wat de impact van bepaalde aannames is. De vertaalslag van huidig naar toekomst blijft immers altijd een inschatting, ook als de huidige vloot in groot detail bekend is.

Parallel zou nagedacht moeten worden over vragen als: hoe kan je bij vervanging of renovatie klimaatadaptie meenemen en tegelijkertijd het verlies in laadvermogen beperken? Hoe beweeg je de markt tot aanpassing? Welke sturingsmiddelen vanuit de overheid zijn gewenst en nodig?

Aanpassingen in de vloot zijn een zaak van lange adem, de levensduur van schepen is lang. Daarom is het op korte termijn wellicht effectiever andere maatregelen, in de vorm van aanpassingen in de logistiek, te nemen. Hoewel eerste berekeningen met het SD-model aangeven dat het effect daarvan kleiner is.

Referenties

- Deltares (2024). Vergelijking KNMI'23 en KNMI'14 scenario's ten behoeve van stresstesten "Klimaatbestendige Netwerken – Hoofdvaarwegennet" KBN-HVWN. Deltares rapport 11210314-000-ZWS-0001, 27 mei 2024. A. van den Hoek & R. van der Mark.
- Deltares (2023). Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse. Deltares rapport 11209265. Buitink, J., Tsiokanos, A., Geertsema, T., ten Velden, C., Bouaziz, L., & Sperna Weiland, F.
- ENW (2023). Advies Ontwerp-POW Integraal Riviermanagement. Advies nummer 23-10 van 24 november 2023. <https://www.enwinfo.nl/publish/pages/225137/enw-23-10-advies-aan-dgwb-inzake-pow-irm.pdf>
- IenW (2023). Kamerstuk 27625 Waterbeleid, nr 659; Brief van de Minister van Infrastructuur en Waterstaat. Den Haag, 27 november 2023.
- KiM, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (2021). Klimaatverandering en het mobiliteitssysteem. ISBN/EAN: 978-90-8902-248-6. T. Tillema, S. Moorman, M. van der Horst, H. Boonstra & M. Kansen.
- KNMI (2023). KNMI'23-klimaatscenario's. Geraadpleegd van <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/knmi-23-klimaatscenario-s>.
- Rijkswaterstaat (2020). Richtlijnen Vaarwegen 2020. ISBN: 978-90-9033423-3.
- Van Dorsser, C., F. Vinke, R. Hekkenberg, & M. van Koningsveld (2020). The effect of low water on loading capacity of inland ships. *EJTIR* 20(3), 2020, pp.47-70.
- Van Dorsser, C. (2024). Parametrisch model voor de capaciteit, waterverplaatsing en het deplacement van binnenschepen als functie van hun hoofdafmetingen en diepgang. Koninklijke Binnenvaart Nederland. <https://github.com/TUdelft-CITG/OpenTNSim/pull/70>.
- Vinke, F., B. Turpijn, P. van Gelder, & M. van Koningsveld, (2023). Inland shipping response to discharge extremes: A 10 years case study of the Rhine. *Climate Risk Management*, 43, Article 100578. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2023.100578>

A Analyse ILT-data huidige vloot

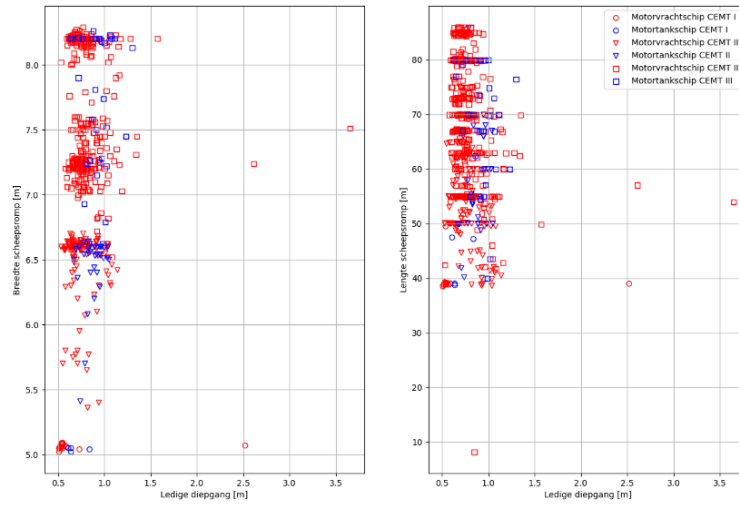
Tabel A-1 *Geregistreerde motortankschepen naar geregistreerde klasse (jaar 2024). Bron ILT database (niet openbaar toegankelijk).*

| CEMT-klasse | Aantal | Lengte [m] | Breedte [m] | Ledige diepgang [m] | Capaciteit [ton] |
|---------------|--------|------------|-------------|---------------------|------------------|
| I | 4 | 39 | 5,1 | 0,6 | 373 |
| II | 35 | 55 | 6,6 | 0,8 | 612 |
| III | 33 | 55 | 6,6 | 1 | 544 |
| | | 73 | 8,2 | 1 | 897 |
| | | 70 | 7,2 | 0,9 | 802 |
| | | 55 | 7,2 | 0,9 | 630 |
| IVa | 164 | 100 | 9,6 | 1 | 1633 |
| | | 86 | 6,6 | 0,95 | 877 |
| Va | 621 | 135 | 11,6 | 0,9 | 4034 |
| | | 110 | 11,6 | 1 | 2929 |
| Vla | 181 | 135 | 22,9 | 1,1 | 11006 |
| | | 135 | 17,5 | 1,1 | 8411 |
| Totaal | | | | | |

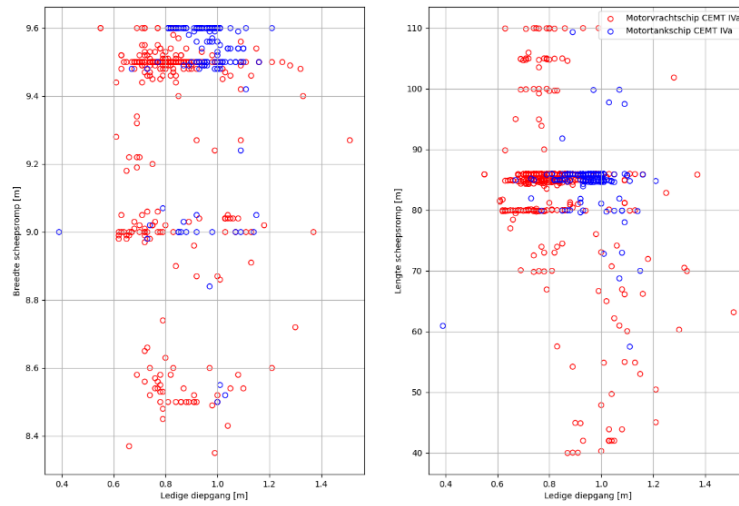
Tabel A-2 *Geregistreerde motorvrachtschepen naar geregistreerde klasse (jaar 2024). Bron ILT database (niet openbaar toegankelijk).*

| CEMT-klasse | Aantal | Lengte [m] | Breedte [m] | Ledige diepgang [m] | Capaciteit [ton] |
|---------------|--------|------------|-------------|---------------------|------------------|
| I | 17 | 39 | 5,1 | 0,5 | 331 |
| II | 133 | 55 | 6,6 | 0,75 | 553 |
| III | 373 | 55 | 6,6 | 0,75 | 553 |
| | | 55 | 7,2 | 0,75 | 616 |
| | | 70 | 7,2 | 0,75 | 806 |
| | | 73 | 8,2 | 0,75 | 1020 |
| IVa | 345 | 86 | 9,6 | 0,8 | 1562 |
| | | 100 | 9,5 | 0,8 | 1842 |
| Va | 647 | 135 | 11,6 | 0,8 | 4100 |
| | | 110 | 11,6 | 0,8 | 3116 |
| Vla | 130 | 135 | 22,9 | 1 | 8131 |
| | | 135 | 17,5 | 1 | 6213 |
| Totaal | | | | | |

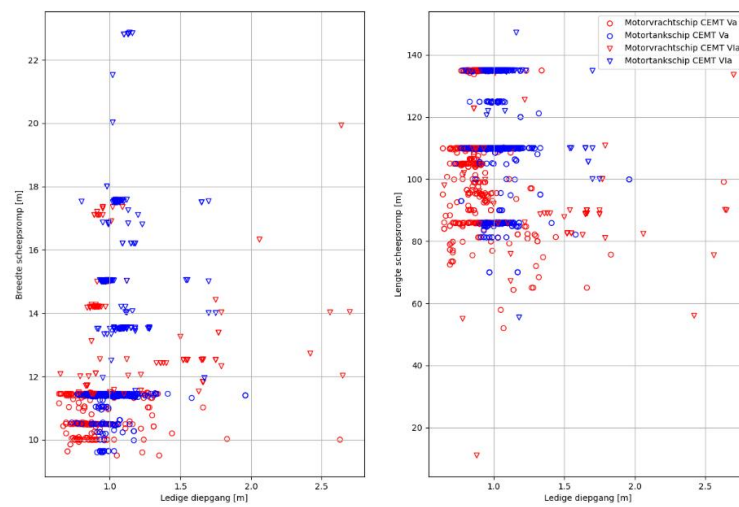
Kleine schepen



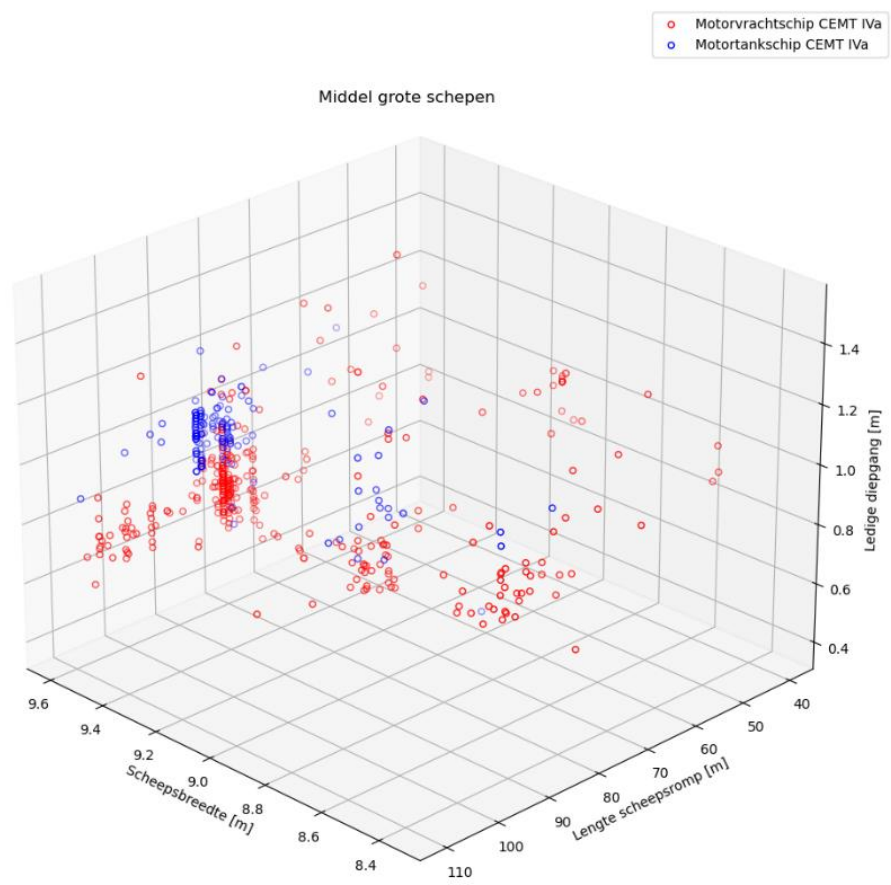
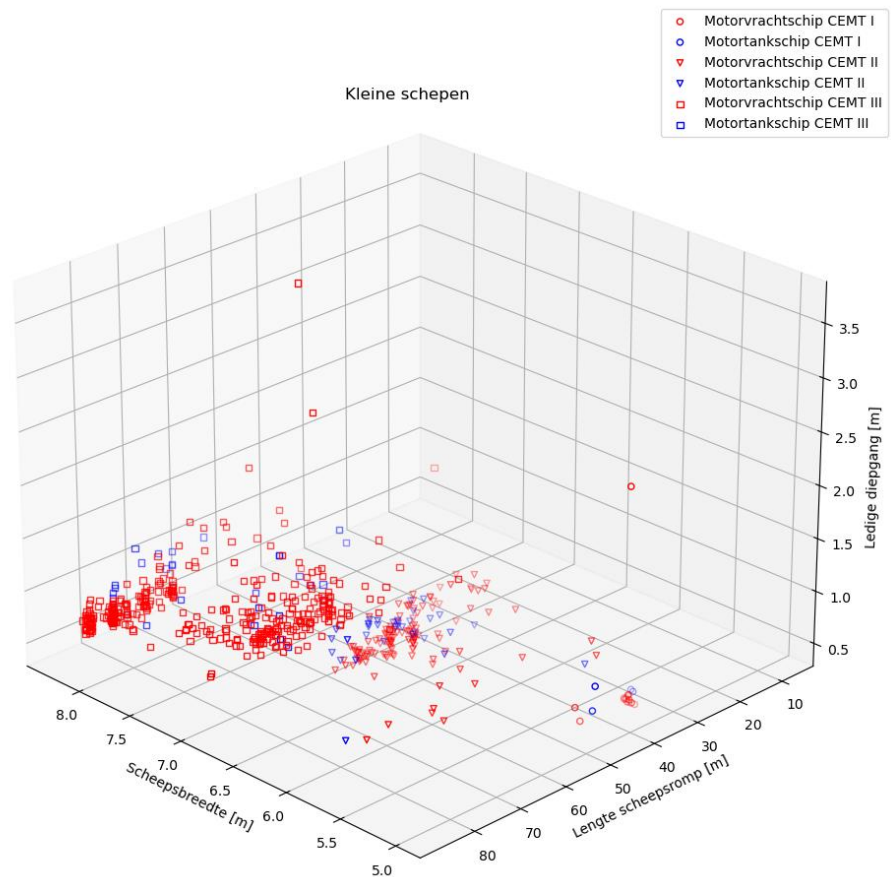
Middelgrote schepen



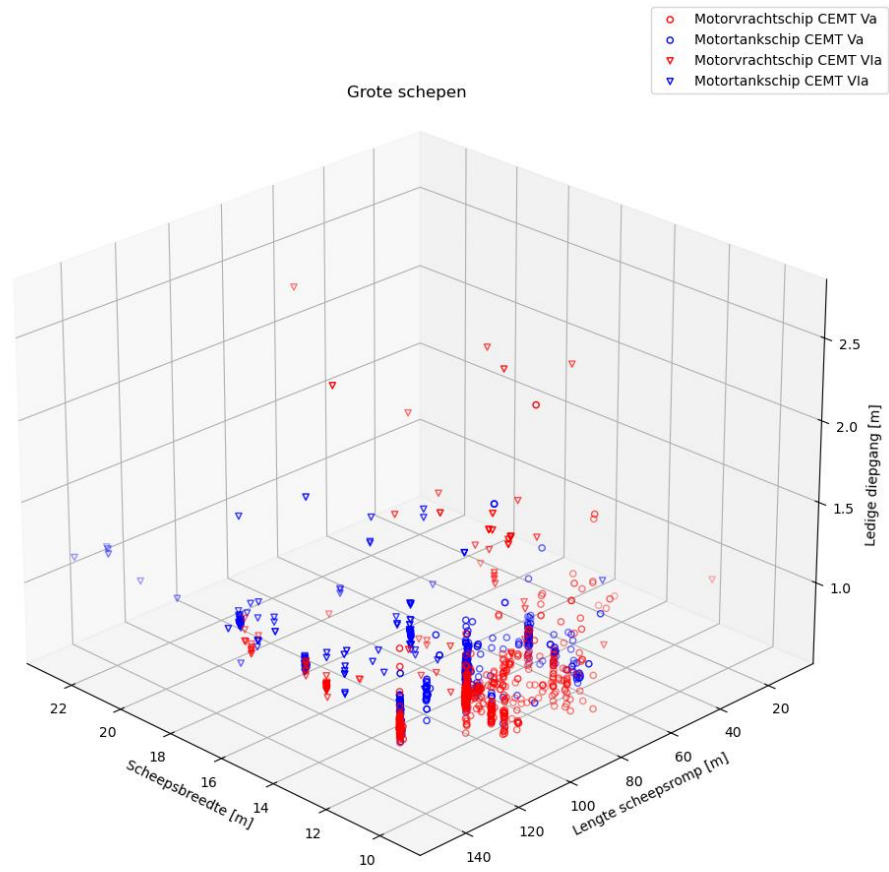
Grote schepen



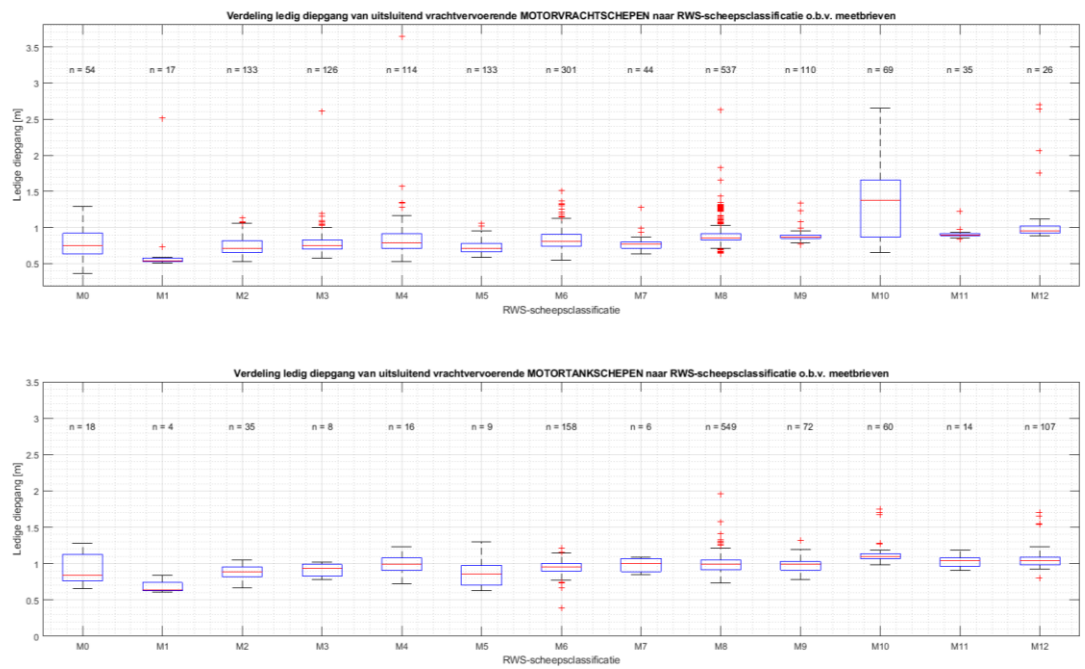
Figuur A-1 Analyse schepen 2D-plots: klein, middelgroot, groot.



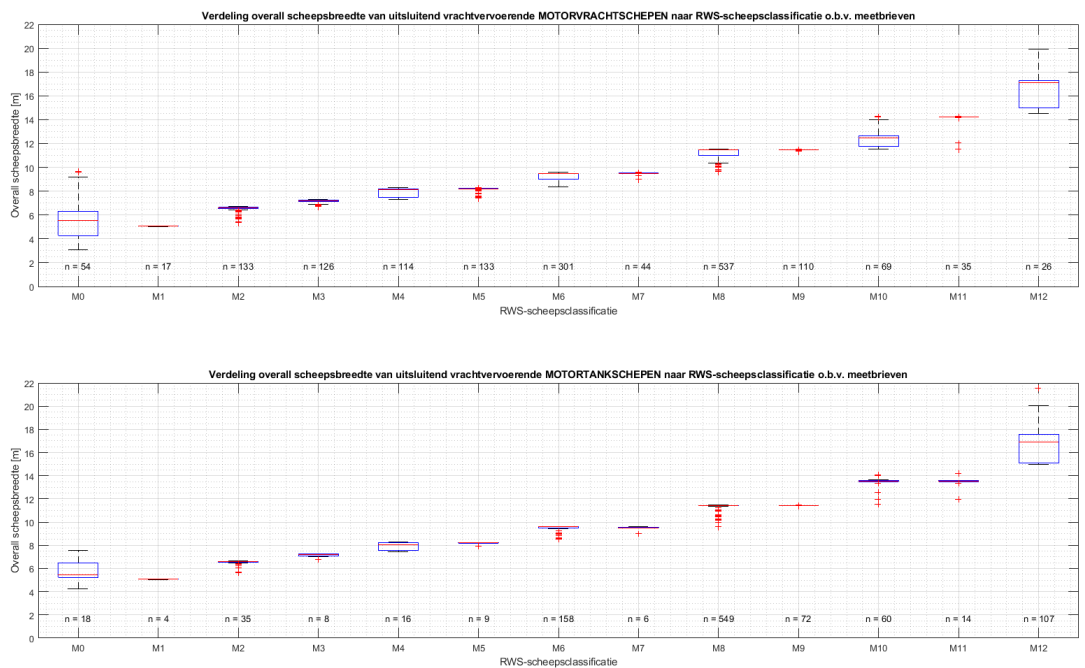
Figuur A-2 Analyse schepen 3D-plots: klein, middelgroot, (volgende pagina) groot.



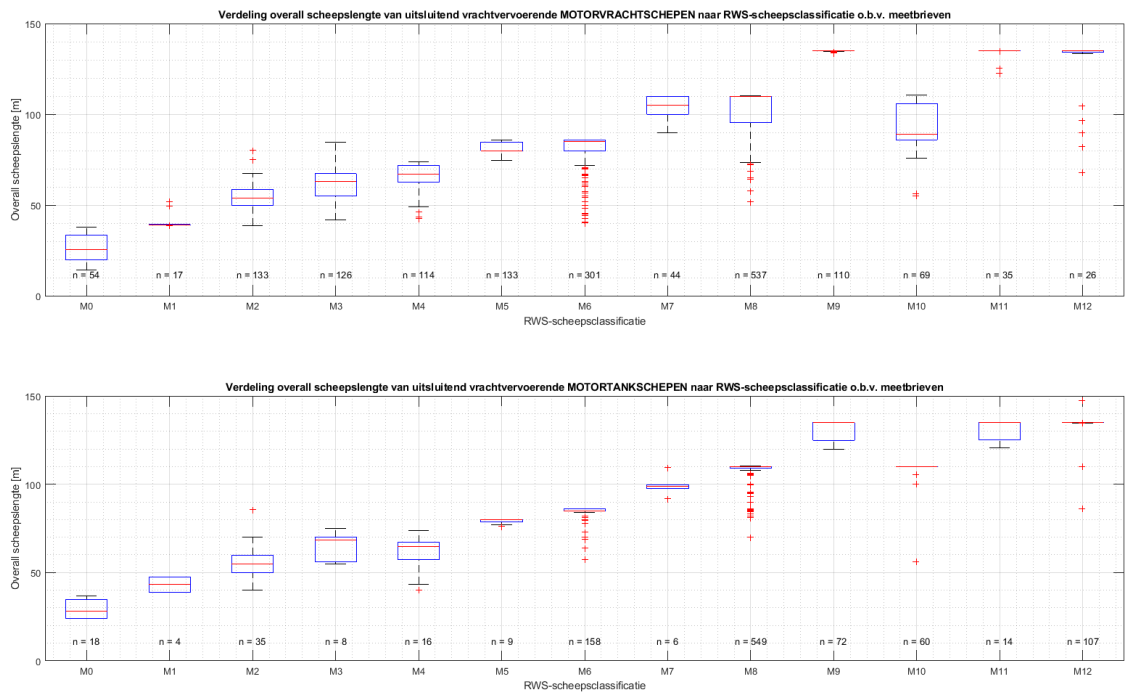
Figuur A-2 (vervolg) Analyse schepen 3D-plots: klein, middelgroot, groot.



Figuur A-3 Boxplots afmetingen schepen: ledige diepgang voor motorvrachtschepen en motortankschepen.



Figuur A-4 Boxplots afmetingen schepen: scheepsbreedte voor motorvrachtschepen en motortankschepen.



Figuur A-5 Boxplots afmetingen schepen: scheeps lengte voor motorvrachtschepen en motortankschepen.

Tabel A-3 Waarden boxplot data.

Verdeling ledig diepgang [m] van uitsluitend vrachtvervoerende MOTORVRACHTSCHEPEN naar RWS-scheepsclassificatie o.b.v. meetbrieven

| | M0 | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 | M11 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Upper whisker | 1,29 | 0,59 | 1,06 | 1,00 | 1,17 | 0,95 | 1,13 | 0,87 | 1,03 | 0,95 | 2,65 | 0,93 |
| 3rd quantile | 0,92 | 0,58 | 0,82 | 0,83 | 0,91 | 0,78 | 0,90 | 0,80 | 0,91 | 0,90 | 1,66 | 0,92 |
| Median | 0,76 | 0,54 | 0,71 | 0,76 | 0,79 | 0,71 | 0,81 | 0,77 | 0,86 | 0,87 | 1,38 | 0,90 |
| 1st quantile | 0,63 | 0,53 | 0,66 | 0,70 | 0,71 | 0,66 | 0,74 | 0,72 | 0,83 | 0,85 | 0,87 | 0,89 |
| Upper whisker | 0,36 | 0,51 | 0,53 | 0,58 | 0,53 | 0,59 | 0,55 | 0,63 | 0,71 | 0,79 | 0,65 | 0,86 |

Verdeling ledig diepgang [m] van uitsluitend vrachtvervoerende MOTORTANKSCHEPEN naar RWS-scheepsclassificatie o.b.v. meetbrieven

| | M0 | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 | M11 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Upper whisker | 1,28 | 0,84 | 1,05 | 1,02 | 1,23 | 1,30 | 1,15 | 1,09 | 1,21 | 1,19 | 1,18 | 1,18 |
| 3rd quantile | 1,13 | 0,74 | 0,95 | 0,99 | 1,08 | 0,98 | 1,00 | 1,07 | 1,05 | 1,03 | 1,14 | 1,08 |
| Median | 0,84 | 0,64 | 0,89 | 0,94 | 0,99 | 0,86 | 0,95 | 1,00 | 0,99 | 0,99 | 1,10 | 1,05 |
| 1st quantile | 0,76 | 0,63 | 0,82 | 0,83 | 0,91 | 0,70 | 0,90 | 0,89 | 0,92 | 0,91 | 1,07 | 0,96 |
| Upper whisker | 0,66 | 0,61 | 0,67 | 0,78 | 0,72 | 0,63 | 0,77 | 0,85 | 0,73 | 0,78 | 0,98 | 0,91 |

Verdeling overall scheeps lengte [m] van uitsluitend vrachtvervoerende MOTORVRACHTSCHEPEN naar RWS-scheepsclassificatie o.b.v. meetbrieven

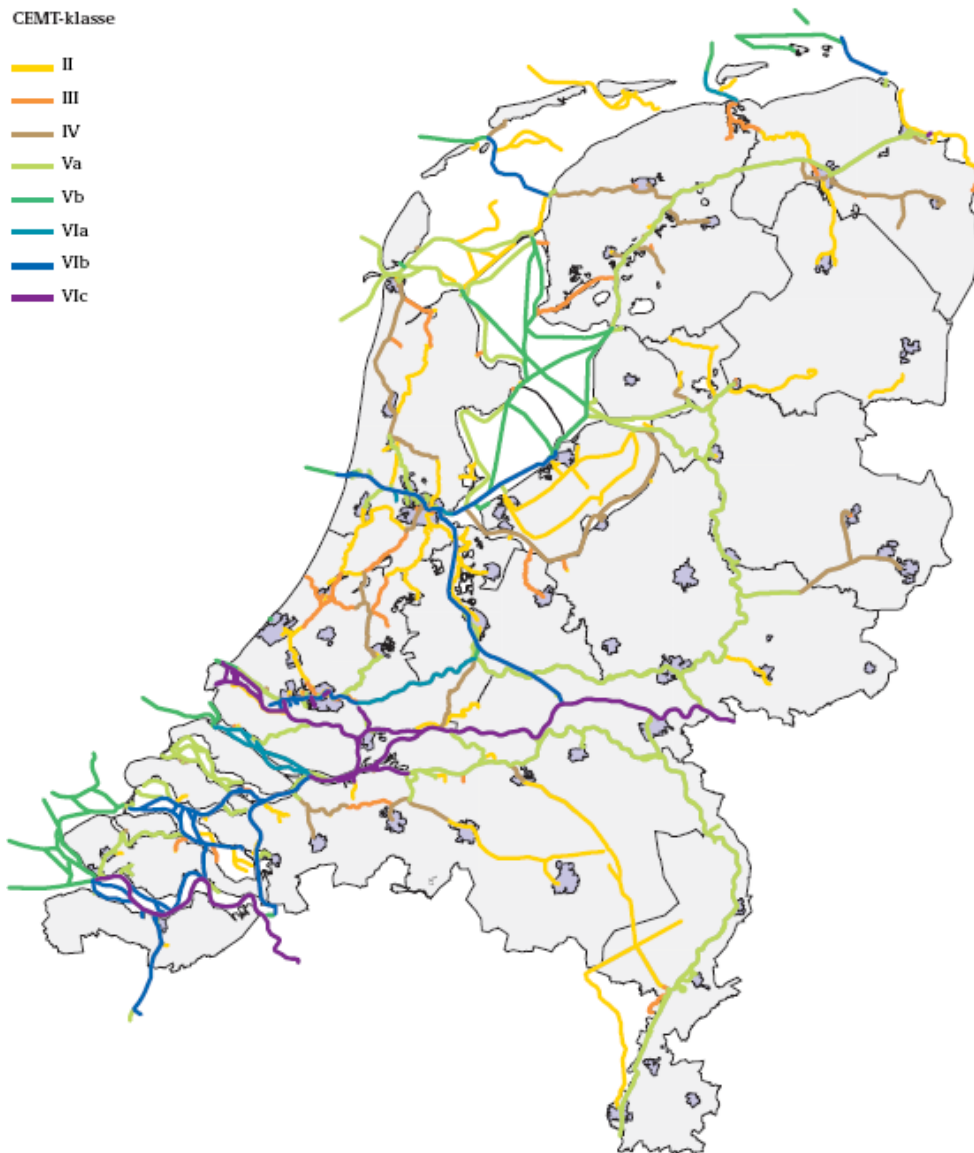
| | M0 | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 | M11 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Upper whisker | 37,96 | 39,39 | 67,27 | 84,50 | 73,90 | 85,99 | 86,00 | 110,00 | 110,09 | 135,05 | 110,78 | 135,00 |
| 3rd quantile | 33,48 | 39,21 | 58,76 | 67,23 | 72,00 | 84,73 | 85,90 | 109,89 | 109,98 | 135,00 | 105,96 | 135,00 |
| Median | 25,26 | 39,04 | 54,00 | 62,94 | 67,11 | 80,00 | 84,86 | 104,90 | 109,88 | 134,97 | 88,98 | 135,00 |
| 1st quantile | 19,80 | 38,98 | 49,94 | 55,00 | 62,55 | 79,86 | 79,96 | 99,94 | 95,25 | 134,90 | 86,00 | 134,96 |
| Upper whisker | 14,32 | 38,81 | 38,70 | 41,67 | 48,82 | 74,41 | 71,95 | 89,86 | 73,45 | 134,80 | 75,88 | 134,95 |

Verdeling overall scheeps lengte [m] van uitsluitend vrachtvervoerende MOTORTANKSCHEPEN naar RWS-scheepsclassificatie o.b.v. meetbrieven

| | M0 | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 | M11 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Upper whisker | 36,70 | 47,45 | 69,94 | 74,80 | 73,60 | 80,00 | 86,00 | 99,84 | 110,46 | 135,00 | 110,00 | 135,00 |
| 3rd quantile | 34,92 | 47,39 | 59,98 | 69,98 | 67,03 | 79,94 | 85,90 | 99,84 | 109,96 | 134,93 | 109,98 | 134,98 |
| Median | 28,32 | 43,16 | 54,95 | 68,37 | 64,65 | 79,90 | 84,98 | 98,78 | 109,90 | 134,83 | 109,95 | 134,86 |
| 1st quantile | 24,12 | 38,85 | 49,99 | 56,02 | 57,33 | 78,62 | 84,80 | 97,49 | 109,04 | 124,90 | 109,90 | 125,00 |
| Upper whisker | 24,03 | 38,70 | 40,14 | 54,98 | 43,50 | 76,98 | 83,92 | 97,49 | 107,99 | 119,97 | 109,80 | 120,50 |

Verdeling overall scheepsbreedte [m] van uitsluitend vrachtvervoerende MOTORVRACHTSCHEPEN naar RWS-scheepsclassificatie o.b.v. meetbrieven

| | M0 | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 | M11 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Upper whisker | 9,19 | 5,10 | 6,70 | 7,30 | 8,29 | 8,25 | 9,60 | 9,54 | 11,50 | 11,45 | 14,02 | 14,20 |
| 3rd quantile | 6,32 | 5,08 | 6,63 | 7,25 | 8,20 | 8,22 | 9,50 | 9,52 | 11,45 | 11,45 | 12,67 | 14,20 |
| Median | 5,53 | 5,08 | 6,60 | 7,20 | 8,15 | 8,20 | 9,50 | 9,50 | 11,45 | 11,45 | 12,45 | 14,20 |
| 1st quantile | 4,28 | 5,06 | 6,56 | 7,11 | 7,50 | 8,20 | 9,02 | 9,50 | 11,00 | 11,45 | 11,75 | 14,20 |
| Upper whisker | 3,07 | 5,04 | 6,45 | 6,91 | 7,32 | 8,18 | 8,35 | 9,48 | 10,34 | 11,45 | 11,52 | 14,20 |



Figuur A-6 CEMT klassen vaarwegen.

B Parametrisch model voor capaciteit van binnenvaartschepen

Parametrisch model voor de capaciteit, waterverplaatsing en het displacement van binnenschepen als functie van hun hoofdafmetingen en diepgang

Dr. Cornelis van Dorsser, versie 22-11-2024

Wetenschappelijk adviseur, Koninklijke Binnenvaart Nederland

E-mail: c.van.dorsser@binnenvaart.nl

Abstract

De binnenvaart wordt geconfronteerd met uiteenlopende complexe vraagstukken over zaken als het effect van extreem laag- en hoogwater in relatie tot klimaatverandering, de verduurzaming van de vloot, het behoud van een goed functionerende vaarweg en de wens om een positieve 'modal shift' te bewerkstelligen. Voor het analyseren van dergelijke vraagstukken is inzicht in de kenmerken van schepen nodig. Deze kennis is in praktijk aanwezig op het niveau van de individuele schepen, maar vindt slechts moeizaam haar weg naar de wetenschap en beleidsanalyses. Deze publicatie bespreekt de tekortkomingen van de huidige modellen voor het rammen van de capaciteit en waterverplaatsing van individuele binnenvaartschepen. Door twee bestaande modellen te combineren en aan te vullen met empirisch onderzoek wordt een nieuwe schattingsmethode verkregen die op basis van minimale informatie over de lengte, breedte en het type schip een betrouwbare raming geeft van de capaciteit en waterverplaatsing op een gegeven diepgang. De nauwkeurigheid van deze raming kan worden vergroot door extra informatie toe te voegen over de ledige diepgang en het ledige scheepsgewicht en/of over de ontwerpdiepgang en de bijhorende ontwerpcapaciteit. Het model is direct toepasbaar om de effecten van laag water op de capaciteit van de binnenvaartvloot te bepalen, maar draagt ook bij aan de ontwikkeling van geavanceerde binnenvaartmodellen zoals de 'Digital Twin Vaarwegen' die in het Trans2 project verder ontwikkeld wordt en waar deze publicatie onderdeel van uitmaakt.

1. Inleiding

De binnenvaart wordt geconfronteerd met uiteenlopende complexe vraagstukken over zaken als het effect van extreem laag- en hoogwater in relatie tot klimaatverandering, de verduurzaming van de vloot, het behoud van een goed functionerende vaarweg en de wens om een positieve 'modal shift' te bewerkstelligen. Voor het analyseren van dergelijke vraagstukken is inzicht in de kenmerken van schepen nodig. Deze kennis is in praktijk aanwezig op het niveau van de individuele schepen, maar vindt slechts moeizaam haar weg naar de wetenschap en beleidsanalyses. In wetenschappelijke publicaties en beleidsanalyses wordt doorgaans gewerkt met een aantal maatgevende schepen die representatief geacht worden voor de gehele vloot (Roelse, 2002; Hekkenberg et al. 2017; Koedijk, 2020; Van Dorsser et al. 2020; Vinke et al. 2024). In werkelijkheid zijn deze schepen lang niet altijd representatief. Om de hedendaagse vraagstukken goed te analyseren is het van belang om met de werkelijke kenmerken van individuele schepen te rekenen en de samenstelling van de vloot niet te vereenvoudigen tot enkele maatgevende scheepsklassen.

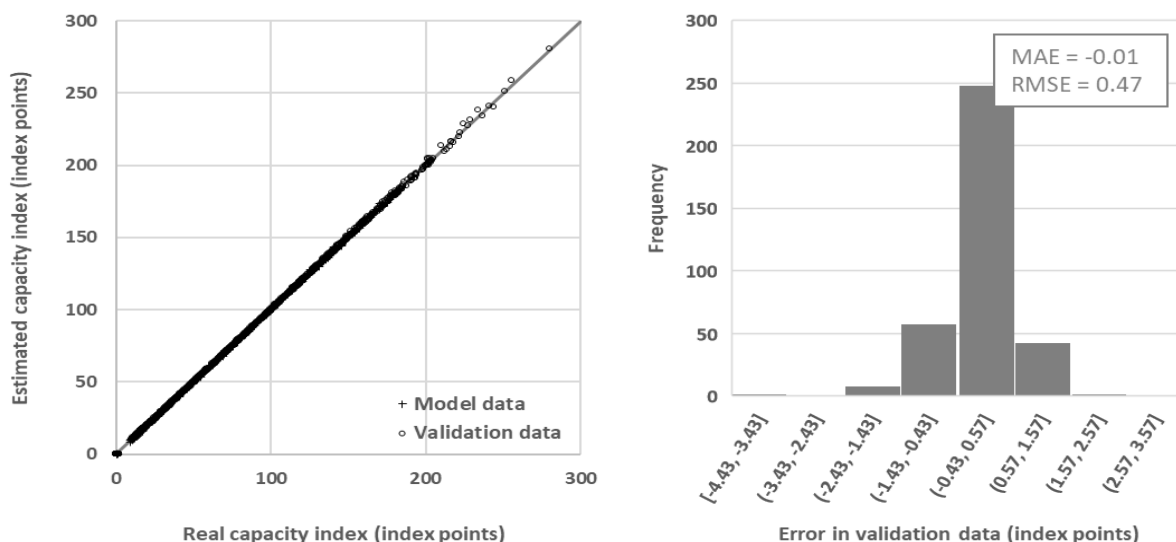
Het verkrijgen van gedetailleerde gegevens over individuele schepen is niet of nauwelijks op grote schaal mogelijk. Wel is het mogelijk om het gedrag van schepen te modelleren. Idealiter heeft een dergelijk model aan minimale informatie voldoende zoals de lengte (L), breedte (B) en het type schip. Daarnaast kan de uitkomst van het model specifiek op een individueel schip worden toegesneden als meer over het schip bekend is. Dit kan met aanvullende gegevens over de ontwerpdiepgang (T_d) en de bijhorende ontwerpcapaciteit op zoet water (DWT_{fw}) en met gegevens over de ledige diepgang (T_e) en het ledige scheepsgewicht (LSW). Deze publicatie beschrijft hoe afhankelijk van de beschikbare informatie een zo nauwkeurig mogelijke beschrijving van de capaciteit, de waterverplaatsing (∇) en het displacement (Δ) van individuele binnenvaartschepen verkregen kan worden.

De capaciteit heeft betrekking op de het draagvermogen van het schip voor het vervoer van lading en voorraden zoals brandstof en water. De capaciteit wordt uitgedrukt in kubieke meter draagvermogen of in tonnen laadcapaciteit. De term draagvermogen komt voort uit de fysische wetmatigheid van Archimedes, die stelt dat de opwaartse kracht van een schip gelijk is aan de massa van het door het schip verplaatste volume. Het totale gewicht van het schip wordt het displacement genoemd. Het displacement komt overeen met het ledige scheepsgewicht plus het gewicht van de lading en de voorraden, beide uitgedrukt in metrische tonnen¹. Het totale door het schip verplaatste volume hangt af van het displacement en de dichtheid van de vloeistof waarin het schip drijft. Het volume wordt de waterverplaatsing genoemd. Op zoet water met een dichtheid van 1 ton per kubieke meter is het draagvermogen in kubieke meter identiek aan de waterverplaatsing in tonnen.

Voor het bepalen van het effect van de beschikbare waterdiepte op de laadcapaciteit van de schepen is het voldoende om naar het draagvermogen te kijken, maar voor andere vraagstukken is meer informatie nodig. Zo is voor het bepalen van de bouwkosten het gewicht van het ledige schip belangrijk. Dat geldt ook voor het bepalen van de stabiliteit van het schip (tegen omslaan). Voor vraagstukken die betrekking hebben op het energieverbruik en de motoremissies is inzicht in de totale waterverplaatsing relevant. Deze publicatie richt zich daarom op het modelleren van de capaciteit, de waterverplaatsing en het displacement.

De hier beschreven methode is mede mogelijk gemaakt door het TKI-project TRANS2 ten behoeve van de doorontwikkeling van de 'Digital Twin Vaarwegen', een open source model van Deltares. De methode bouwt voort op het empirische capaciteitsmodel Van Dorsser et al. (2020, tabel 3) dat op basis van de ledige diepgang en actuele diepgang een accurate raming geeft van de capaciteit van een schip in relatie tot de capaciteit op een diepgang van 2,5 meter. De capaciteit wordt hierbij uitgedrukt als een index van de capaciteit op 2,5 meter diepgang. Het werken met een relatieve capaciteitsfactor is omslachtig en zal in deze methode worden geëlimineerd. Het toepassing van het relatieve capaciteitsmodel heeft als voordeel dat het model accuraat is. Het model heeft een MEA van -0.01 en een RMSE van 0.47 (zie Figuur 1)².

Figuur 1: Foutmarge van relatieve capaciteitsmodel van Van Dorsser et al. (2020) bij gegeven T_e



Bron: eigen berekeningen op basis van brondata Van Dorsser et al. (2020)

¹ In deze publicatie wordt uitsluitend gesproken over metrische tonnen van 1000 kg per ton.

² Post publicatie is een fout ontdekt in de berekening van de geschatte capaciteit in het validatiemodel. Na herstel van deze fout bleek de foutmarge kleiner te zijn dan de gerapporteerde waarde. De oorspronkelijke publicatie vermeldt een MAE van -0.99 en een RMSE van 1.39.

Het probleem met de bovengenoemde methode is dat de ledige diepgang meestal niet bekend is. Ook is extra informatie over de capaciteit van het schip op een gegeven diepgang vereist om het absolute tonnage te bepalen. Denk hierbij aan de ontwerpcapaciteit en de ontwerpdiepgang.

Als de ledige diepgang, de ontwerpdiepgang en/of de ontwerpcapaciteit niet bekend zijn biedt de publicatie ondersteunende modellen (van Dorsser et al., 2020, tabel 4 en tabel 5). Deze modellen zijn minder betrouwbaar dan het relatieve capaciteitsmodel. Er is gebleken dat ze bij ongebruikelijke scheepsafmetingen aantoonbaar foute waarden opleveren. Zo neemt de berekende ledige diepgang bij korte brede schepen toe als de breedte vergroot wordt terwijl in praktijk een afname verwacht wordt (dit gebeurt ongeveer bij schepen met een L/B verhouding van 8 of kleiner). De oorzaak ligt in het oneigenlijk extrapoleren van gegevens buiten de empirische dataset van de schepen waarop het ondersteunende model gebaseerd is. Omdat de publicatie van Dorsser et al. (2020) niet ingaat op de reikwijdte van de ondersteunende modellen is het van belang deze alsnog eenduidig vast te stellen en te valideren. Dit gebeurt aan de hand van 133 schepen waarvan de meetbriefgegevens bij de auteur bekend zijn. Buiten het toepassingsgebied van deze modellen is een andere methode vereist.

De problematiek met de ondersteunende modellen kan worden ondervangen door de methode gedetailleerder uit te werken. Dit resulteert in een model met 6 vergelijkingen en 12 parameters. Van deze parameters zijn de lengte en de breedte altijd bekend waardoor er sprake is van 4 onbepaalde parameters. Om het model op te lossen moeten er steeds 4 parameters bekend zijn of nauwkeurig geraamd kunnen worden. In het ideale geval zijn het ledige scheepsgewicht, de ledige diepgang, de ontwerpcapaciteit en de ontwerpdiepgang bekend. In dat geval kan een zeer nauwkeurige representatie van de capaciteit over de diepgang worden gegeven. Als er minder bekend is zijn aanvullende gegevens of ramingen nodig. Hiervoor komen in eerste instantie twee vorm parameters in aanmerking die relatief weinig spreiding kennen. Dit zijn de blok coëfficiënt (c_b) die bepaald wordt door het onderwatervolume te delen door het product van lengte, breedte en diepgang en de parameter β die overeen komt met het onderwatervolume gedeeld door het product van de waterlijnopervlakte maal de diepgang. Zodra bekend is of het een motorschip of een duwbak betreft kan met behulp van default waarden voor c_b en β en informatie over twee aanvullende parameters zoals de ontwerpdiepgang en de ontwerpcapaciteit nog steeds een nauwkeurige raming worden verkregen zonder dat er gebruik gemaakt hoeft te worden van de ondersteunende modellen.

Als er minder dan twee aanvullende parameters bekend zijn moeten er parameters geraamd worden. Bij gangbare scheepsafmetingen kan gebruik gemaakt worden van de ondersteunende modellen van Van Dorsser et al. (2020, tabel 4 en tabel 5) voor de ontwerpdiepgang en de ledige diepgang. Bij ongebruikelijke afmetingen (die buiten het toepassingsbereik van deze modellen liggen) is het ramen van de ledige diepgang op deze wijze niet langer geoorloofd. In dat geval kan gebruik gemaakt worden van de geavanceerde vuistregels van Hekkenberg (2013). In Annex E wordt nader op het toepassingsgebied van de ondersteunende modellen ingegaan. Hekkenberg (2013) ontwikkelde een methode waarmee hij op basis van het type schip en de hoofdafmetingen automatisch een scheepsontwerp kon genereren dat aan de klasse eisen (ontwerpregels) voor schepen voldoet. Hiermee ontwierp hij een systematische reeks schepen van 40 tot 185 meter lengte, 5 tot 25 meter breedte en 1,5 tot 4,5 meter diepgang. De verkregen dataset gebruikte hij vervolgens om met behulp van lineaire regressie een aantal geavanceerde vuistregels op te stellen. De reikwijdte van dit model omspant vrijwel alle denkbare binnenschepen in West Europa. Het model geeft daarmee ook voor ongebruikelijke scheepsafmetingen een betrouwbare schatting van het ledige scheepsgewicht. Voor gangbare schepen is het model van Hekkenberg (2013) echter minder nauwkeurig dan het model van Van Dorsser et al. (2020).

De methode van Hekkenberg (2013) richt zich op motorvrachtschepen, motorcontainerschepen en motortankschepen. Er is geen module aanwezig voor het ramen van het gewicht van duwbakken. Hiervoor wordt in de Annex F een nieuwe schattingsmethode geïntroduceerd.

Paragraaf 2 beschrijft het generieke model voor het bepalen van de capaciteit, waterverplaatsing en displacement op zoet water. Paragraaf 3 bespreekt hoe afhankelijk van beschikbare informatie over de ledige diepgang, het ledige scheepsgewicht, de ontwerpdiepgang en de ontwerpcapaciteit een oplossing kan worden verkregen. Dit resulteert in totaal in 16 verschillende oplossingsmethoden. Paragraaf 4 beschrijft een interne controle om foutieve modeluitkosten te detecteren die ontstaan als gevolg van onrealistische invoer. Paragraaf 5 bespreekt de externe validatie die aan de hand van gedetailleerde gegevens van 21 motorschepen is uitgevoerd. Paragraaf 6 laat zien hoe de gevonden oplossing vereenvoudigd kan waardoor er gemakkelijker mee te werken valt. Paragraaf 7 bespreekt de uitbreiding van het model naar zout water. Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek en implementatie in de 'Digital Twin Vaarwegen' volgen in Paragraaf 8.

2. Een model voor de capaciteit op zoet water

De beoogde uitkomst deze publicatie is een programmeerbaar model dat voor elk denkbaar Europees binnenvaartvrachtschip een passende beschrijving geeft van de laadcapaciteit, de waterverplaatsing en het displacement. Het toepassingsbereik van het model komt overeen met de lengte en breedte uit het model van Hekkenberg (2013). Dit betekent dat zij geschikt is voor schepen met een lengte tussen de 40 en 185 meter en een breedte van 5 tot 25 meter. Ten aanzien van de ontwerpdiepgang kan overeenkomstig het model van Hekkenberg een bereik van 1,5 tot 4,5 meter worden aangehouden voor droge lading en containerschepen. Voor tankers en duwbakken worden in praktijk ook grotere waarden tot c.a. 5,0 meter waargenomen. Dergelijke schepen zijn ook aanwezig in de dataset van Van Dorsser et al. (2020). Het toepassingsbereik voor de ontwerpdiepgang van tankers en duwbakken bedraagt daarom 1,5 tot 5,0 meter.

In navolging van Van Dorsser et al. (2020) wordt de capaciteit $CAP(T)$ gedefinieerd als een 2^e-graads functie van de diepgang. De diepgang kan hierbij variëren tussen de ledige diepgang (T_e) en de ontwerpdiepgang (T_d), beide gemeten op zoet water. De waterverplaatsing betreft het volume van het door het schip verplaatste water. Deze is afhankelijk van het gewicht van het schip inclusief de lading en de aanwezige voorraden en van de dichtheid van het water (ρ). Op zoet water met een dichtheid van 1 ton per kubieke meter vereenvoudigt het model zich tot:

$$FW1: \quad CAP(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$$

$$FW2: \quad DWT_{fw}(T) = CAP(T)$$

$$FW3: \quad DWT_{fw} = DWT_{fw}(T_d)$$

$$FW4: \quad LSW = LSV_{fw}$$

$$FW5: \quad \nabla(T) = CAP(T) + LSV_{fw}$$

$$FW6: \quad \Delta_{fw}(T) = DWT_{fw}(T) + LSW$$

Waarbij:

$CAP(T)$: Lading dragend onderwatervolume op actuele diepgang t.o.v. T_e in m^3 ;

$DWT_{fw}(T)$: Laadvermogen van het schip op zoet water op diepgang T in tonnen;

DWT_{fw} : Ontwerpcapaciteit in tonnen op ontwerpdiepgang;

LSW : Ledige scheepsgewicht in tonnen;

LSV_{fw} : Onderwatervolume van het ledige schip op zoet water in m^3 ;

$\nabla(T)$: Waterverplaatsing van het schip op diepgang T in m³;
 $\Delta_{fw}(T)$: Displacement van het schip op diepgang T in tonnen;
 a, b, c: modelconstanten die het volume van het schip beschrijven tussen T_e en T_d;
 T: Actuele diepgang van het schip in meter;
 T_e: Ledige diepgang van het schip in meter op zoet water met $\rho=1$;
 T_d: Ontwerpdiepgang van het schip in meter op zoet water met $\rho=1$.

Dit zoet water (FW) model is eenvoudig te programmeren en toe te passen op individuele schepen. De kunst is om voor elk schip de beschrijvende parameters a, b, c, LSW en T_d zo accuraat mogelijk te bepalen. Zodra deze parameters bekend zijn ligt het gewicht en de capaciteit van het schip volledig vast. Het bepalen van deze gegevens vraagt echter kennis over de vorm en het gewicht van het schip. In praktijk komt dit neer op de carène gegevens uit het stabiliteitsboek (indien aanwezig) en de voltallige gegevens uit de meetbrief³. Deze gegevens zijn meestal niet aanwezig. In dat geval moeten deze parameters op een andere wijze vastgesteld worden. Dat kan aan de hand van een uitgebreider model met 6 vergelijkingen en 12 parameters. Het betreft hier de volgende parameters:

Gehanteerde modelparameters:

- L: Lengte van het schip (specifiek LOA: lengte over alles in meters);
- B: Breedte van het schip (specifiek B_m: gemalde breedte in meters);
- α : Factor die betrekking heeft op de grootte van het schip die wordt bepaald als het tonnage op 2,5 meter gedeeld door het indexgetal 100.
- β : Factor die betrekking heeft op de vorm van het schip die wordt bepaald als het ledige scheepsgewicht gedeeld door het product van de waterlijnopervlakte en de diepgang;
- ε : Absolute foutterm die aan het model wordt toegevoegd uitgedrukt in tonnen;
- T_e: Ledige diepgang van het schip (gelijklastige diepgang in meters);
- T_d: Ontwerp diepgang van het schip (gelijklastige diepgang in meters);
- LSW: Ledige scheepsgewicht (in tonnen waterverplaatsing);
- DWT_{fw}: Maximale capaciteit aan laadvermogen op zout water (in tonnen lading);
- A_{wl}: Waterlijn oppervlak (gemeten in m² op ledige diepgang);
- c_{wl}: Waterlijn coefficient bepaald als A_{wl}/(L·B) (gemeten op ledige diepgang);
- c_b: Blok coefficient bepaald als LSW/(L·B·T_e) (gemeten op ledige diepgang).

De eerste twee parameters hebben betrekking op de lengte (L) en de breedte (B) van het schip. Deze worden altijd bekend verondersteld. Voor de overige 10 parameters moet steeds gekeken worden welke van de parameters bekend zijn, welke parameters op een nauwkeurige wijze exogeen geschat kunnen worden en welke parameters endogeen kunnen worden afgeleid. Bij het opstellen de publicatie is uitgegaan van de mogelijke beschikbaarheid van de parameters T_e, T_d, LSW en DWT_{fw}.

De keuze van de exogene parameters is belangrijk omdat ze effect heeft op de nauwkeurigheid van endogeen bepaalde parameters. Voor elke combinatie van bekende invoerparameters is een andere oplossingsmethode nodig om het uitgebreide model te definiëren. Zodra alle parameters van het

³ De carène gegevens beschrijven het volume van het onderwaterschip op een gegeven diepgang vanaf de kiel tot aan de ontwerpdiepgang. De meetbrief beschrijft voor elke cm diepgang hoe groot de laadcapaciteit van het schip is. Hierbij wordt uitgegaan van een gelijklastige inzinking. Dat wil zeggen dat het schip recht in het water ligt en de diepgang voor en achter even groot zijn. Op ledige diepgang is de capaciteit 0 ton. Het volume van het onderwaterschip uit de carène gegevens op ledige diepgang is op zoet water gelijk aan het ledig scheepsgewicht. In praktijk wordt in stabiliteitsberekeningen vaak gebruik gemaakt van benaderde carène gegevens. Als gevolg hiervan is het ledig scheepsgewicht in dat geval ook niet exact bekend.

uitgebreide model bekend zijn kunnen aan de hand van de resultaten de coëfficiënten a, b en c en de parameters LSW en T_d van het simpele model worden vastgesteld (zie paragraaf 6).

Het vertrekpunt voor het uitgebreide model is het relatieve capaciteitsmodel uit tabel 3 van Van Dorsser et al. (2020). Dit model beschrijft de laadcapaciteit als functie van de ledige diepgang bij een dichtheid van 1 ton/m³. We hebben een schaalfactor α toegevoegd om de relatieve capaciteitsindex te vertalen naar absolute tonnen laadvermogen. De foutterm ε wordt in de publicatie niet genoemd, maar volgt uit het feit dat de formule op een empirische wijze is afgeleid.

$$CAP(T) = \alpha \cdot (c_0 + c_1 \cdot T_e + c_2 \cdot T_e^2 + c_3 \cdot T + c_4 \cdot T^2 + c_5 \cdot T_e \cdot T) + \varepsilon$$

Waarbij:

- α : schaalfactor (capaciteit schip op diepgang 2,5 meter gedeeld door index 100);
- T: actuele diepgang van het schip in meters;
- T_e : ledige diepgang op zoet water met $\rho=1$;
- c_0 : coëfficiënt 0 met waarde 2.0323139721E+01;
- c_1 : coëfficiënt 1 met waarde -7.8577991460E+01;
- c_2 : coëfficiënt 2 met waarde -7.0671612519E+00;
- c_3 : coëfficiënt 3 met waarde 2.7744056480E+01;
- c_4 : coëfficiënt 4 met waarde 7.5588609922E-01;
- c_5 : coëfficiënt 5 met waarde 3.6591813315E+01;
- ε : toegevoegde foutterm.

Hoewel de foutterm in het model van Van Dorsser et al. (2020) relatief klein is kan zij niet genegeerd worden. Het negeren van de foutterm leidt ertoe dat andere parameters bij het definiëren van het model buiten hun gangbare bereik gedrukt kunnen worden.

Bij het opstellen van de methode is gebleken dat er problemen met over specificatie van het model ontstaan als naast de lengte (L) en de breedte (B) ook de ledige diepgang (T_e), het ledige scheepsgewicht (LSW), de ontwerp diepgang (T_d), en de ontwerpcapaciteit op zoet water (DWT_{fw}) bekend zijn. In situaties waarbij niet alle bovenstaande parameters bekend zijn is toevoeging van de foutterm in feite niet nodig, maar is toch gebleken is dat het opnemen van de foutterm een significante verbetering van de nauwkeurigheid oplevert.

De rest van deze paragraaf gaat in op het specificeren van het uitgebreide model (EQ). De eerste twee vergelijkingen (EQ1 en EQ2) worden verkregen door de randvoorwaarden van de capaciteit in te vullen voor de ledige diepgang T_e en de ontwerpdiepgang T_d .

$$EQ1: \quad CAP(T_d) = \alpha \cdot (c_0 + c_1 \cdot T_e + c_2 \cdot T_e^2 + c_3 \cdot T_d + c_4 \cdot T_d^2 + c_5 \cdot T_e \cdot T_d) + \varepsilon = DWT_{fw}$$

$$EQ2: \quad CAP(T_e) = \alpha \cdot (c_0 + c_1 \cdot T_e + c_2 \cdot T_e^2 + c_3 \cdot T_e + c_4 \cdot T_e^2 + c_5 \cdot T_e^2) + \varepsilon = 0$$

De derde vergelijking (EQ3) volgt uit de vergelijking voor de waterlijnopervlakte $A(T)$ als functie van de diepgang die per definitie gelijk is aan de afgeleide van de capaciteit. De waterlijnopervlakte op ledige diepgang wordt in deze publicatie aangeduid als A_{wl} .

$$A(T) = \frac{d}{dT} CAP(T) = \alpha(c_3 + 2 \cdot c_4 \cdot T + c_5 \cdot T_e)$$

$$EQ3: \quad A_{wl} = A(T_e) = \alpha \cdot (c_3 + 2 \cdot c_4 \cdot T_e + c_5 \cdot T_e)$$

Op basis van vergelijking EQ3 kan de waterlijn coëfficiënt c_{wl} worden bepaald. Deze coëfficiënt geeft aan hoe vol het schip is op de waterlijn. Deze coëfficiënt wordt bepaald op de ledige diepgang.

$$\text{EQ4: } c_{wl} = \frac{A_{wl}}{L \cdot B}$$

Voor het bepalen van het ledige scheepsgewicht wordt doorgaans gekeken naar de blokcoëfficiënt c_b . Deze coëfficiënt geeft een indicatie van de volheid van het onderwaterschip op ledige diepgang.

$$\text{EQ5: } c_b = \frac{LSW}{L \cdot B \cdot T_e}$$

Bij het bepalen van het ledige scheepsgewicht (LSW) op basis van de blokcoëfficiënt wordt nog geen rekening gehouden met de vorm van het schip ter hoogte van de waterlijn, terwijl daar uit de formule voor de capaciteit wel informatie over beschikbaar is. Een accuratere raming wordt verkregen door het scheepsgewicht te bepalen met een coëfficiënt die het onderwatervolume beschrijft als fractie van het product van de waterlijnopervlakte en de ledige diepgang. Deze coëfficiënt heeft in de literatuur nog geen naam en zal worden aangeduid met β .

$$\text{EQ6: } LSW = \beta \cdot A_{wl} \cdot T_e = \alpha \cdot \beta \cdot (c_3 + 2 \cdot c_4 \cdot T_e + c_5 \cdot T_e) \cdot T_e$$

Door vergelijking EQ 4, EQ5 en EQ6 te combineren kan worden afgeleid dat de coëfficiënt β een speciale betekenis heeft. Deze komt overeen met de blokcoëfficiënt gedeeld door de waterlijncoëfficiënt ($\beta = c_b/c_{wl}$).

3. Invoer afhankelijke modeloplossingen

In de vorige paragraaf is een uitgebreid model geïntroduceerd voor het ramen van de capaciteit en de waterverplaatsing op een gegeven diepgang. Het uitgebreide model bestaat uit 6 vergelijkingen met 12 parameters ($L, B, \alpha, \beta, \varepsilon, T_e, T_d, LSW, DWT, A_{wl}, c_{wl}, c_b$)⁴. De oplossing van het model hangt af van de beschikbare informatie over het schip. Minimale invoer bestaat uit de lengte (L) en de breedte (B) van het schip en gegevens over het type schip (d.w.z. motorschip, koppelbak of duwbak), het soort lading (droge lading, container of tankvaart) en de enkel- of dubbelwandigheid van de scheepsconstructie. De kwaliteit van de raming kan worden verbeterd met aanvullende informatie over de ledige diepgang (T_e), het ledige scheepsgewicht (LSW) de ontwerpdiepgang (T_d) en/of de ontwerpcapaciteit (DWT_{fw}). Als twee van de vier aanvullende parameters bekend zijn is informatie over het soort lading in de meeste gevallen overigens niet noodzakelijk.

Als de gewenste informatie niet beschikbaar is zullen er enkele parameters geraamd moeten worden. Hiervoor komen als eerste de default waarden voor β en c_b in aanmerking. Deze parameters worden gekenmerkt door een beperkte spreiding. Eerst wordt de β vastgesteld en daarna pas de c_b omdat de spreiding van β kleiner is dan die van de c_b . Als er minder dan twee aanvullende parameters bekend zijn moeten er naast β en c_b nog andere parameters geraamd worden. Als eerste wordt dan de ontwerpdiepgang (T_d) geraamd. Dit gebeurt met Van Dorsser et al. (2020, tabel 5). Vervolgens wordt voor schepen met gangbare afmetingen uitgegaan van de ledige diepgang (T_e) op basis van Van Dorsser et al. (2020, tabel 4) en voor schepen met afwijkende afmetingen uitgegaan van het ledige scheepsgewicht (LSW) op basis van Hekkenberg (2013). De gehanteerde werkwijze hangt dus af van de beschikbare informatie en deze is niet voor alle situaties hetzelfde. De verschillende oplossingen worden in deze paragraaf verder uitgewerkt.

Oplissing 1, indien T_e, T_d, LSW en DWT_{fw} bekend zijn:

Als alle vier de aanvullende invoerparameters bekend zijn kunnen de parameters α, β rechtstreeks worden bepaald door α uit de vergelijkingen EQ1 en EQ2 op te lossen. Dit gaat als volgt:

⁴ We hanteren hier de term uitgebreid model om onderscheid te maken tussen dit model en het eenvoudige capaciteitsmodel op basis van de parameters a, b, c , en LSW dat in paragraaf 6 behandeld wordt.

$$EQ1 - EQ2 = \alpha \cdot [c_3 \cdot (T_d - T_e) + c_4 \cdot (T_d^2 - T_e^2) + c_5 \cdot (T_d \cdot T_e - T_e^2)] = DWT_{fw}$$

Uit het quotiënt van deze twee vergelijking valt α als volgt te bepalen:

$$R1.1: \quad \alpha = \frac{DWT_{fw}}{(c_3 + c_4 \cdot T_d + c_4 \cdot T_e + c_5 \cdot T_e) \cdot (T_d - T_e)}$$

Uit vergelijking EQ3 valt β als volgt te bepalen:

$$R1.2: \quad \beta = \frac{LSW}{\alpha \cdot T_e \cdot (c_3 + 2 \cdot c_4 \cdot T_e + c_5 \cdot T_e)}$$

Tenslotte kan ϵ worden bepaald uit EQ2:

$$R1.3: \quad \epsilon = -\alpha \cdot (c_0 + c_1 \cdot T_e + c_2 \cdot T_e^2 + c_3 \cdot T_e + c_4 \cdot T_e^2 + c_5 \cdot T_e^2)$$

De coëfficiënt c_b volgt rechtstreeks uit EQ5:

$$R1.4: \quad c_b = \frac{LSW}{L \cdot B \cdot T_e}$$

De coëfficiënt c_{wl} volgt uit de vergelijking $\beta = c_b / c_{wl}$ (zie toelichting onder EQ6):

$$R1.5: \quad c_{wl} = \frac{c_b}{\beta}$$

Het waterlijnopervlak volgt uit de definitie in EQ4:

$$R1.6: \quad A_{wl} = c_{wl} \cdot L \cdot B$$

Oplossing 2, indien T_d , LSW en DWT_{fw} bekend zijn:

Indien T_d , LSW en DWT_{fw} bekend zijn wordt als 4^e parameter in eerste instantie de β bepaald en vastgezet op een default waarde van 0,926 voor motorschepen (zie Annex A); 0,932 voor koppelbakken en 0,961 voor gewone bakken (zie Annex B). Voor het vaststellen van de ledige diepgang kan worden uitgegaan van de resultaten uit oplossing 1 waarbij R1.2 als volgt kan worden omgeschreven en gelijkgesteld aan R1.1.

$$\alpha = \frac{LSW}{\beta \cdot T_e \cdot (c_3 + 2 \cdot c_4 \cdot T_e + c_5 \cdot T_e)} = \frac{DWT_{fw}}{(c_3 + c_4 \cdot T_d + c_4 \cdot T_e + c_5 \cdot T_e) \cdot (T_d - T_e)}$$

De volgende stap is om bovenstaande vergelijking op te lossen voor T_e . Dit resulteert in de volgende vergelijking die op te lossen is met de abc-formule:

$$a \cdot T_e^2 + b \cdot T_e + c = 0$$

Waarbij:

$$a = (2 \cdot c_4 + c_5) \cdot \beta \cdot DWT_{fw} + (c_4 + c_5) \cdot LSW;$$

$$b = \beta \cdot c_3 \cdot DWT_{fw} + (c_3 - c_5 \cdot T_d) \cdot LSW;$$

$$c = -(c_3 \cdot T_d + c_4 \cdot T_d^2) \cdot LSW;$$

Het oplossen van vergelijking R2.1 met de abc-formule levert een bruikbaar resultaat bij:

$$R2.1: \quad T_e = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

Merk op dat de parameters a, b en c hier lokaal gedefinieerd zijn en niet overeenkomen met de globale parameters voor het simpele model uit paragraaf 2 en 6.

Zodra T_e bepaald is kunnen α , ε , c_b , c_{wl} en A_{wl} berekend worden met behulp van vergelijking R1.1, R1.3, R1.4, R1.5 en R1.6.

De gevonden oplossing hangt af van de gehanteerde oplosroutine. Een andere mogelijkheid zou zijn om niet de β maar de c_b als default startwaarde te hanteren. Deze oplossing is ook geanalyseerd, maar het blijkt dat de oplossing met β als default variabele een accurate schatting oplevert.

Oplossing 3, indien T_e , LSW en DWT_{fw} bekend zijn:

Indien T_e , LSW en DWT_{fw} bekend zijn wordt als 4^e parameter de β bepaald en vastgezet op de eerder beschreven default waarde (zie oplossing 2). De volgende stap is om α op te lossen. Dit kan door het resultaat van R1.2 te herschrijven als:

$$R3.1: \quad \alpha = \frac{LSW}{\beta \cdot T_e \cdot (c_3 + 2 \cdot c_4 \cdot T_e + c_5 \cdot T_e^2)}$$

Vervolgens worden de parameters ε , c_b , c_{wl} en A_{wl} bepaald met behulp van de eerder gevonden resultaten voor R1.3, R1.4, R1.5 en R1.6.

De ontwerpdiepgang valt ten slotte op te lossen met behulp van vergelijking EQ1 die omgeschreven kan worden naar de volgende tweedegraads vergelijking:

$$a \cdot T_d^2 + b \cdot T_d + c = 0$$

Waarbij:

$$\begin{aligned} a &= c_4; \\ b &= c_3 + c_5 \cdot T_e; \\ c &= c_0 + c_1 \cdot T_e + c_2 \cdot T_e^2 + \frac{\varepsilon - DWT_{fw}}{\alpha}. \end{aligned}$$

Oplossen met de abc-formule levert het volgende bruikbare resultaat:

$$R3.2: \quad T_d = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

Oplossing 4, indien T_e , T_d en DWT_{fw} bekend zijn:

Indien T_e , T_d en DWT_{fw} bekend zijn wordt als 4^e parameter de β bepaald en vastgezet op de eerder beschreven default waarde (zie oplossing 2). Vervolgens wordt de LSW bepaald door R1.2 te herschrijven als:

$$R4.1: \quad LSW = \alpha \cdot \beta \cdot T_e \cdot (c_3 + 2 \cdot c_4 \cdot T_e + c_5 \cdot T_e^2)$$

Tenslotte worden de parameters ε , c_b , c_{wl} en A_{wl} bepaald met behulp van de eerder gevonden resultaten voor R1.3, R1.4, R1.5 en R1.6.

Oplossing 5, indien T_e , T_d en LSW bekend zijn:

Indien T_e , T_d en LSW bekend zijn wordt als 4^e parameter de β bepaald en vastgezet op de eerder beschreven default waarde (zie oplossing 2). De volgende stap is om opeenvolgend c_b , c_{wl} en A_{wl} te bepalen met behulp van de eerder gevonden resultaten voor R1.4, R1.5 en R1.6. Zodra A_{wl} bekend is kan EQ3 herschreven worden als:

$$R5.1: \quad \alpha = \frac{A_{wl}}{(c_3 + 2 \cdot c_4 \cdot T_e + c_5 \cdot T_e^2)}$$

De foutterm ε is vervolgens op te lossen met behulp van resultaat R1.3. Daarna kan de DWT_{fw} bepaald worden aan de hand van EQ1.

$$R5.2: DWT_{fw} = \alpha \cdot (c_0 + c_1 \cdot T_e + c_2 \cdot T_e^2 + c_3 \cdot T_d + c_4 \cdot T_d^2 + c_5 \cdot T_e \cdot T_d) + \varepsilon$$

Oplossing 6, indien LSW en DWT_{fw} bekend zijn:

Als de aanvullende parameters LSW en DWT_{fw} bekend zijn wordt de β vastgezet de eerder beschreven default waarde (zie oplossing 2). Op gelijke wijze worden c_b coëfficiënten vastgezet op de default waarden van 0,811 voor motorschepen; 0.848 voor koppelbakken en 0,866 voor gewone bakken (zie Annex A en B). De volgende stap is om T_e op te lossen. Dit kan door EQ5 te herschrijven als:

$$R6.1: T_e = \frac{LSW}{c_b \cdot L \cdot B}$$

Vervolgens kunnen c_{wl} en A_{wl} bepaald worden met behulp van resultaat R1.5 en R1.6. Daarna kan α worden bepaald op basis van R5.1 en volgt T_d uit oplossing R3.2.

Oplossing 7, indien LSW en T_e bekend zijn:

Indien LSW en T_e bekend zijn wordt als 3^e parameter de β bepaald en vastgezet op de eerder beschreven default waarde (zie oplossing 2). Het vastzetten van c_b als 4^e parameter is niet mogelijk omdat c_b af te leiden valt uit de LSW en de T_e en dus niet vrij te bepalen is. Wel oplosbaar zijn c_b , c_{wl} en A_{wl} uit R1.4, R1.5 en R1.6. Vervolgens kan α worden bepaald met R5.1 en volgt ε uit R1.3.

Voor het vaststellen van T_d en DWT_{fw} is één exogene raming nodig. De ontwerpdiepgang kan worden bepaald met het aanvullende model van Van Dorsser (2020) zoals beschreven in Annex C. Hiervoor is inzicht in het type schip en het soort lading nodig.

R7.1: T_d exogeen ramen met van Dorsser et al. 2020 (tabel 5), met als aanvullende voorwaarde dat de maximale diepgang voor droge ladingschepen en containerschepen minimaal 2,30 meter bedraagt en gemaximeerd wordt op 4,5 meter en voor tankers en duwbakken op 5,0 meter⁵.

Als de T_d bepaald is volgt de DWT_{fw} uit het oplossingsresultaat R5.2.

Oplossing 8, indien LSW en T_d bekend zijn:

Als de aanvullende parameters LSW en T_d bekend zijn worden de β en de c_b coëfficiënten vastgezet op hun default waarden (zie oplossing 6). De volgende stap is om T_e op te lossen met behulp van resultaat R6.1. Vervolgens kunnen c_{wl} en A_{wl} bepaald worden met behulp van resultaat R1.5 en R1.6. Daarna kan α worden bepaald op basis van R5.1 en volgt ε uit R1.3. Als laatste kan ook de DWT_{fw} worden bepaald met behulp van R5.2.

Oplossing 9, indien DWT_{fw} en T_d bekend zijn:

Als de parameters DWT_{fw} en T_d bekend zijn worden de β en de c_b coëfficiënten vastgezet op hun default waarden (zie oplossing 6). Vervolgens worden c_{wl} en A_{wl} bepaald met R1.5 en R1.6.

Het oplossen van T_e kan door ε te elimineren uit de capaciteitsvergelijkingen. Dit kan door EQ2 af te trekken van EQ1 en het resultaat om te schrijven naar α . Daarna kan ook EQ3 omgeschreven worden naar α . Door beide vergelijkingen aan elkaar gelijk te stellen kan α worden geëlimineerd:

⁵ Het opleggen van minimale en maximale waarden is noodzakelijk om problemen met extrapolatie buiten de reikwijdte van de empirische dataset van schepen waarop het model gebaseerd is te ondervangen.

$$\alpha = \frac{DWT}{(c_3 \cdot T_d - c_3 \cdot T_e + c_4 \cdot T_d^2 - c_4 \cdot T_e^2 + c_5 \cdot T_e \cdot T_d - c_5 \cdot T_e^2)} = \frac{A_{wl}}{(c_3 + 2 \cdot c_4 \cdot T_e + c_5 \cdot T_e)}$$

Dit resulteert in de volgende kwadratische vergelijking die oplosbaar is met de abc-formule:

$$a \cdot T_e^2 + b \cdot T_e + c = 0$$

Waarbij:

$$a = (c_4 + c_5) \cdot A_{wl}$$

$$b = (2 \cdot c_4 + c_5) \cdot DWT + (c_3 - c_5 \cdot T_d) \cdot A_{wl}$$

$$c = c_3 \cdot DWT - c_3 \cdot T_d \cdot A_{wl} - c_4 \cdot T_d^2 \cdot A_{wl}$$

De oplossing van deze vergelijking levert het volgende bruikbare resultaat op:

$$R9.1: T_e = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

Zodra T_e bekend is kan α bepaald worden met behulp van resultaat R5.1. Daarna is ε te bepalen aan de hand van R1.3. tenslotte volgt het ledig scheepsgewicht uit resultaat R4.1.

Oplossing 10, indien DWT_{fw} en T_e bekend zijn:

Als de aanvullende parameters DWT_{fw} en T_e bekend zijn worden de β en de c_b coëfficiënten vastgezet op hun default waarden (zie oplossing 6). Vervolgens worden c_{wl} en A_{wl} bepaald met behulp van resultaat R1.5 en R1.6. Daarna wordt LSW bepaald met EQ6:

$$R10.1: LSW = \beta \cdot A_{wl} \cdot T_e$$

Vervolgens kan α worden bepaald op basis van R5.1 en volgt ε uit de oplossing van R1.3. Als laatste is T_d op te lossen met resultaat R3.2.

Oplossing 11, indien T_e en T_d bekend zijn:

Als de aanvullende parameters T_e en T_d bekend zijn worden de β en de c_b coëfficiënten vastgezet op hun default waarden (zie oplossing 6). Vervolgens kunnen c_{wl} en A_{wl} bepaald worden met behulp van resultaat R1.5 en R1.6. Daarna kan LSW bepaald worden op basis van R10.1. De parameter α volgt uit vergelijking 5.1 waarna de foutterm ε op te lossen is met behulp van resultaat R1.3. Uiteindelijk kan DWT_{fw} bepaald worden aan de hand van R5.2.

Oplossing 12, indien alleen T_e bekend is:

Als alleen T_e bekend is worden de β en de c_b coëfficiënten vastgezet op hun default waarden (zie oplossing 6). Het ramen van T_d gebeurt exogeen conform de oplossing voor R7.1. Daarna volgen c_{wl} en A_{wl} uit R1.5 en R1.6, α uit R5.1, LSW uit R10.1, ε uit R1.3 en DWT_{fw} uit R5.2.

Oplossing 13, indien alleen LSW bekend is:

Als alleen LSW bekend is worden de β en de c_b coëfficiënten vastgezet op hun default waarden (zie oplossing 6). Het ramen van T_d gebeurt exogeen conform de oplossing voor R7.1. Daarna volgen c_{wl} en A_{wl} uit R1.5 en R1.6. Om T_e op te lossen kan EQ6 worden herschreven als:

$$R12.1: T_e = \frac{LSW}{\beta \cdot A_{wl}}$$

Met behulp van T_e kan α worden opgelost uit R5.1 en volgt ε uit R1.3. Tenslotte kan DWT_{fw} bepaald worden aan de hand van R5.2.

Oplossing 14, indien alleen DWT_{fw} bekend is

Als T_d niet bekend is en DWT_{fw} wel dan is de oplossing niet vanzelfsprekend. Het lijkt logisch om T_d eerst exogeen te ramen en deze dan vervolgens toe te voegen, maar dat wordt afgeraden omdat de exogene schattingsmethoden voor T_d geen directe relatie heeft met de DWT_{fw} . Als beide parameters op een niet corresponderende wijze bepaald worden kan de spreiding in deze parameters behoorlijke afwijkingen veroorzaken bij het endogeen bepalen van de ledige diepgang en de parameters β , c_b en LSW. De volgende oplossingsroutine wordt daarom aanbevolen:

1. Maak een raming van de T_d^* op basis van van Dorsser et al. 2020 (conform oplossing R7.1);
2. Maak een raming van de LSW* op basis van T_d^* en methode beschreven in Annex E en F;
3. Bepaal de parameters op basis van oplossing 6, gebruik makend van de berekende LSW* waarde en de bekende DWT_{fw} als invoer.

Oplossing 15, indien alleen T_d bekend is:

Bepaal de LSW* conform stap 2 van oplossing 14. Zodra de LSW bepaald is kunnen de parameters verder bepaald worden aan de hand van oplossing 8.

Oplossing 16, indien geen aanvullende informatie bekend is

Idem als oplossing 15, maar nu eerst T_d ramen met behulp van de methode beschreven onder R7.1.

4. Interne controle van modeloplossingen

Voor de interne controle van de modeloplossingen wordt gekeken of de waarden van β , c_b en ε zich binnen een gangbare bandbreedte bevinden. Als dat niet zo is dat moet de modeloplossing in twijfel worden getrokken en nader worden geanalyseerd. De predictie intervallen voor motorschepen en niet zelf varende duwbakken worden beschreven in Annex A en B. Acceptabele waarden voor β liggen, uitgaande van de 99% betrouwbaarheidswaarden, voor motorschepen in het predictie interval $[0,863; 0,989]$ en voor niet zelf varende dubbakken in het predictie interval $[0,917; 1,000]$. Voor c_b kan voor motorschepen worden uitgegaan van het predictie interval $[0,734; 0,887]$ en voor niet zelf varende duwbakken van $[0,797; 0,936]$. Voor duwbakken van koppelverbanden, die in veel gevallen beperkt zelf varend zijn, is nauwelijks informatie beschikbaar. Hiervoor kan uit worden gegaan van de omhullende van beide intervallen, d.w.z. $[0,863; 1,000]$ voor β en $[0,734; 0,936]$ voor c_b . De waarde voor ε hoort in het interval $[-5 \cdot \alpha; 5 \cdot \alpha]$ te liggen. De keuze voor dit interval is arbitrair afgeleid uit de histogram in figuur 1. Vanaf $\pm 2 \cdot \alpha$ is feitelijk al sprake van een uitzonderlijke situatie die nader onderzoek vergt. Vanaf $\pm 5 \cdot \alpha$ is nagenoeg zeker dat de waarde buiten het bereik van de te verwachten foutmarge ligt. Dan kan ervanuit gegaan worden dat er iets niet klopt.

5. Externe validatie van modeloplossingen

Externe validatie is mogelijk door de resultaten van het model te vergelijken met gegevens van schepen waarvan zowel de meetbrief als de werkelijke carène gegevens bekend zijn. De auteur beschik over gegevens van 21 schepen. Dit betreft 9 containerschepen en 12 chemietankers. De verschillende oplossingen zijn voor deze schepen doorgerekend en vergeleken met de werkelijke waarden. De berekende foutmarges zijn weergegeven in tabel 3.

De analyse laat zien dat de foutmarge af neemt naarmate er meer aanvullende informatie bekend is. De groen gearceerde velden hebben betrekking op oplossingen die in praktijk gangbaar zijn omdat de benodigde data goed aansluit op gegevens uit beschikbare bronnen.

Tabel 3: Analyse van optredende foutmarges bij toepassing op 21 schepen

| Oplossingsmethode | Oplossing 1 | Oplossing 2 | Oplossing 3 | Oplossing 4 | Oplossing 5 | Oplossing 6 | Oplossing 7 | Oplossing 8 | Oplossing 9 | Oplossing 10 | Oplossing 11 | Oplossing 12 | Oplossing 13 | Oplossing 14 | Oplossing 15 | Oplossing 16, o.b.v. van Dorsser (2020) | Oplossing 16, o.b.v. Hekkenberg (2013) |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---|--|
| Bij aanvang van de berekening bekende parameters | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Te | v | x | v | v | v | x | v | x | x | v | v | v | x | x | x | x | x |
| Td | v | v | x | v | v | x | x | v | v | x | v | x | x | x | v | x | x |
| LSW | v | v | v | x | v | v | v | v | x | x | x | x | v | x | x | x | x |
| DWT | v | v | v | v | x | v | x | x | v | v | x | x | x | v | x | x | x |
| Gemiddelde afwijking t.o.v. werkelijke parameters (MAE) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C _b | 0.0% | 1.8% | 0.0% | 2.7% | 0.0% | 0.2% | 0.0% | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 0.2% |
| β | -2.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% |
| Te | 0.0% | -1.8% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | -0.1% | 0.0% | -0.1% | -5.8% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | -0.1% | -4.0% | -4.4% | -4.0% | -20.2% |
| Td | 0.0% | 0.0% | 1.8% | 0.0% | 0.0% | 1.6% | 1.3% | 0.0% | 0.0% | 1.7% | 0.0% | 1.3% | 1.3% | 0.4% | 0.0% | 1.3% | 1.3% |
| Awl, Cwl | 2.3% | 1.5% | -0.3% | 2.4% | -0.3% | -0.1% | -0.3% | -0.1% | -0.1% | -0.1% | -0.1% | -0.1% | -0.1% | -0.1% | -0.1% | -0.1% | -0.1% |
| LSW | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 2.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | -5.5% | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 0.0% | -3.8% | -4.2% | -3.8% | -20.2% |
| DWT | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | -2.6% | 0.0% | -0.4% | -2.2% | 0.0% | 0.0% | -2.4% | -0.3% | -0.1% | 0.0% | -0.3% | 1.6% | 9.4% |
| Gemiddelde afwijking t.o.v. laadvermogen op gegeven diepgang (MAE) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.25 m | 0.3% | 0.9% | 0.0% | 0.3% | 0.0% | 0.1% | 0.0% | 0.1% | 2.2% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.1% | 1.7% | 1.9% | 1.7% | 8.8% |
| 2.00 m | 0.6% | 1.0% | -0.5% | 0.6% | 0.0% | -0.3% | -0.5% | -0.3% | 1.8% | -0.5% | -0.5% | -0.5% | -0.3% | 1.3% | 1.5% | 1.3% | 8.6% |
| 2.75 m | 0.3% | 0.5% | -1.6% | 0.3% | -1.6% | -1.3% | -1.6% | -1.3% | 0.8% | -1.5% | -1.5% | -1.5% | -1.3% | 0.4% | 0.6% | 0.4% | 7.9% |
| Gemiddelde absolute afwijking t.o.v. werkelijke parameters (MAE) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C _b | 0.0% | 1.9% | 0.0% | 2.9% | 0.0% | 2.7% | 0.0% | 2.7% | 2.7% | 2.7% | 2.7% | 2.7% | 2.7% | 2.7% | 2.7% | 2.7% | 2.7% |
| β | 2.3% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% | 2.1% |
| Te | 0.0% | 1.9% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 2.7% | 0.0% | 2.7% | 5.8% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 2.7% | 6.1% | 5.9% | 6.1% | 20.8% |
| Td | 0.0% | 0.0% | 1.9% | 0.0% | 0.0% | 2.2% | 7.2% | 0.0% | 0.0% | 1.7% | 0.0% | 7.2% | 7.2% | 1.4% | 0.0% | 7.2% | 7.2% |
| Awl, Cwl | 2.3% | 1.6% | 2.1% | 2.4% | 2.1% | 1.6% | 2.1% | 1.6% | 1.6% | 1.6% | 1.6% | 1.6% | 1.6% | 1.6% | 1.6% | 1.6% | 1.6% |
| LSW | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 2.9% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 7.1% | 2.7% | 2.7% | 2.7% | 0.0% | 5.6% | 5.4% | 5.6% | 20.7% |
| DWT | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 2.7% | 0.0% | 10.4% | 3.1% | 0.0% | 0.0% | 2.4% | 10.5% | 10.7% | 0.0% | 2.2% | 9.8% | 13.3% |
| Gemiddelde absolute afwijking t.o.v. laadvermogen op gegeven diepgang (MAE) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.25 m | 0.3% | 1.0% | 0.2% | 0.3% | 0.2% | 1.3% | 0.2% | 1.3% | 2.2% | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 1.3% | 2.5% | 2.5% | 2.5% | 9.1% |
| 2.00 m | 0.6% | 1.0% | 0.9% | 0.6% | 0.9% | 1.8% | 0.9% | 1.8% | 1.8% | 0.7% | 0.7% | 0.7% | 1.8% | 2.5% | 2.3% | 2.5% | 9.1% |
| 2.75 m | 0.3% | 0.5% | 1.8% | 0.3% | 1.8% | 2.5% | 1.8% | 2.5% | 0.8% | 1.6% | 1.6% | 1.6% | 2.5% | 2.1% | 2.0% | 2.1% | 8.7% |
| Maximale absolute afwijking t.o.v. de werkelijke parameters | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C _b | 0.0% | 4.2% | 0.0% | 6.3% | 0.0% | 4.9% | 0.0% | 4.9% | 4.9% | 4.9% | 4.9% | 4.9% | 4.9% | 4.9% | 4.9% | 4.9% | 4.9% |
| β | -0.7% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% | 4.2% |
| Te | 0.0% | 0.9% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 5.5% | 0.0% | 5.5% | 0.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 5.5% | 10.7% | 8.0% | 10.7% | 6.2% |
| Td | 0.0% | 0.0% | 4.2% | 0.0% | 0.0% | 5.4% | 13.1% | 0.0% | 0.0% | 3.7% | 0.0% | 13.1% | 13.1% | 4.5% | 0.0% | 13.1% | 13.1% |
| Awl, Cwl | 4.7% | 4.5% | 3.9% | 4.7% | 3.9% | 3.1% | 3.9% | 3.1% | 3.1% | 3.1% | 3.1% | 3.1% | 3.1% | 3.1% | 3.1% | 3.1% | 3.1% |
| LSW | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 6.3% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 4.7% | 4.9% | 4.9% | 4.9% | 0.0% | 10.5% | 7.8% | 10.5% | 5.3% |
| DWT | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 1.3% | 0.0% | 18.2% | 2.0% | 0.0% | 0.0% | 0.3% | 20.2% | 23.0% | 0.0% | 4.7% | 22.4% | 39.9% |
| Maximale absolute afwijking t.o.v. laadvermogen op gegeven diepgang | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.25 m | 0.7% | 1.9% | 0.6% | 0.7% | 0.6% | 2.7% | 0.6% | 2.7% | 4.5% | 0.4% | 0.4% | 0.4% | 2.7% | 5.3% | 5.5% | 5.3% | 18.1% |
| 2.00 m | 1.1% | 1.6% | 1.1% | 1.1% | 1.1% | 2.8% | 1.1% | 2.8% | 3.1% | 0.8% | 0.8% | 0.8% | 2.8% | 4.5% | 5.2% | 4.5% | 19.0% |
| 2.75 m | 0.8% | 1.1% | 1.1% | 0.8% | 1.1% | 2.3% | 1.1% | 2.3% | 1.8% | 0.7% | 0.7% | 0.7% | 2.3% | 4.2% | 4.9% | 4.2% | 19.1% |

Bron: eigen berekening op basis van een vergelijk met de werkelijke gegevens voor 21 schepen

Het verschil tussen oplossing 1 en de overige oplossingen is niet helemaal zuiver omdat de β en c_b coëfficiënt bij gebrek aan data niet geheel onafhankelijk zijn vastgesteld. Dit betekent dat de fouten in

de oplossing 2 t/m 16 bij een volledige onafhankelijke dataset iets hoger kunnen liggen, in de orde van 1 procent punt voor optie 2 t/m 7 en 2 procent punt voor optie 8 t/m 16 afgaande op de foutmarges bij het vaststellen van de gemiddelde waarden van c_b (0.811 in interval [0,799; 0,823]) en β (0.928 in interval [0,916; 0,936]).

6. Vereenvoudigd model voor zoet water

Aan het begin van paragraaf 2 is een eenvoudig zoetwatermodel gepresenteerd. Dit model geeft een identieke beschrijving van de capaciteit en de waterverplaatsing van het schip als het model met 6 vergelijkingen en 12 variabelen, maar gebruikt uitsluitend de coëfficiënten a , b , c , het LSW en de T_d . De coëfficiënten a , b en c volgen uit EQ2 en kunnen met α , T_e , en ε bepaald worden.

$$FW1: \quad CAP(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c \quad (\text{herhaald})$$

Met a , b , c bepaald als:

$$\begin{aligned} a &= \alpha \cdot (c_4) \\ b &= \alpha \cdot (c_3 + c_5 \cdot T_e) \\ c &= \alpha \cdot (c_0 + c_1 \cdot T_e + c_2 \cdot T_e^2) + \varepsilon \end{aligned}$$

7. Uitbreiding van het model naar zout water

In praktijk varen binnenvaartschepen ook op zout water. Om het draagvermogen van het schip op zout water te bepalen is een aanpassing van het zoetwater model nodig. Deze beschrijving is voor de volumecapaciteit op een gegeven diepgang identiek aan die op zoet water, mits de ledige diepgang gedefinieerd wordt op zoet water en deze niet gecorrigeerd wordt voor zout water condities. Dit leidt tot de volgende formules voor de capaciteit, waterverplaatsing en het displacement.

Zoutwater model:

$$SW1: \quad LSV_{fw} = \int_{T=0}^{T=T_e} A(T) dT = LSW$$

$$SW2: \quad CAP(T) = \int_{T=T_e}^{T=T} A(T) dT = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$$

$$SW3: \quad \nabla(T) = \int_{T=0}^{T=T} A(T) dT = LSV_{fw} + CAP(T)$$

$$SW4: \quad \Delta_{sw}(T) = \rho \cdot \nabla(T) = \rho \cdot [CAP(T) + LSV_{fw}] = \rho \cdot [CAP(T) + LSW]$$

$$SW5: \quad DWT_{sw}(T) = \Delta(T) - LSW = (\rho - 1) \cdot LSW + \rho \cdot CAP(T)$$

Waarbij:

LSV_{fw} : Onderwatervolume van het ledige schip op zoet water in m^3 ;

LSW : Ledige scheepsgewicht in tonnen;

$CAP(T)$: Lading dragend onderwatervolume op actuele diepgang t.o.v. T_e in m^3 ;

$\nabla(T)$: Waterverplaatsing van het schip op diepgang T in m^3 ;

$\Delta_{sw}(T)$: Displacement van het schip in zout water op diepgang T in metrische tonnen;

$DWT_{sw}(T)$: Laadvermogen van het schip in zout water op diepgang T in metrische tonnen;

a , b , c : modelconstanten die het volume van het schip beschrijven tussen T_e en T_d ;

T : Actuele diepgang van het schip in meters;

T_e : Ledige diepgang van het schip in meters op zoet water met $\rho=1$;

T_d : Ontwerpdiepgang van het schip in meters op zoet water met $\rho=1$.

ρ : Dichtheid van water in tonnen per m^3 .

Door de definitie van de capaciteit te baseren op het volume tussen de ledige diepgang en de ontwerpdiepgang op zoet water kunnen bij het beschrijven van het ledige scheepsgewicht (LSW) en

de capaciteit CAP(T) de bijhorende coëfficiënten worden overgenomen uit het zoetwatermodel. Het displacement volgt uit de waterverplaatsing keer de dichtheid van het water. Het laadvermogen in tonnen wordt op zout water verkregen door het ledig scheepsgewicht van het displacement af te trekken. Deze is gelijk aan de capaciteit op zoet water keer de dichtheid van het water plus een correctie $(\rho-1)\cdot LSW$ voor het extra draagvermogen op ledige diepgang.

8. Conclusies en aanbevelingen

Deze publicatie beschrijft een nieuw parametrisch model voor het ramen van de capaciteit en het displacement van binnenvaartschepen op zoet en zout water dat ontwikkeld is in het kader van het TKI-project Trans2 ten behoeve van de doorontwikkeling van de 'Digital Twin Vaarwegen'.

Het model bouwt voort op de bestaande modellen van Van Dorsser et al. (2020) en van Hekkenberg (2013). Het biedt een oplossing voor de problemen die in het huidige capaciteitsmodel ontstaan bij extrapolatie buiten de gangbare scheepsafmetingen. Voor het model zijn gegevens over de lengte, breedte en het type schip vereist samen met gegevens over het soort lading en de enkel- of dubbelwandigheid van het schip. De nauwkeurigheid kan worden vergroot met behulp van aanvullende gegevens over de ontwerpdiepgang en de bijhorende ontwerpcapaciteit en/of de ledige diepgang en het ledige scheepsgewicht.

Het model en de bijhorende programmeercode in python bieden een solide basis voor het analyseren van tal van vraagstukken over de binnenvaart. De modelresultaten kunnen rechtstreeks worden gebruikt om het effect van laag water op de capaciteit van de vloot te bepalen of worden geïmplementeerd als module in andere binnenvaartmodellen die bijvoorbeeld betrekking hebben op de stabiliteit van schepen of de weerstand en het brandstofverbruik.

De parametrische opzet van het model moet het mogelijk maken om ook andere modellen die gegevens over binnenvaartschepen nodig hebben parametrisch door te ontwikkelen. Hiermee wordt een begin gemaakt aan een volledig parametrisch scheepmodel in de 'Digital Twin Vaarwegen'.

Gewenste verbeteringen van de methode hebben vooral betrekking op de gewichtsschatting in de situatie dat er minder dan 2 aanvullende parameters bekend zijn en de validatie van het model voor motorvrachtschepen en duwbakken. Ook ontbreekt er nog een goede schatting voor de β en de c_b van koppelbakken.

Literatuur

- Hekkenberg, R. (2013) *Inland Ships for Efficient Transport Chains*, Doctoral dissertation, TU Delft, The Netherlands, ISBN 978-94-6186-099-6.
- Hekkenberg, R., C. van Dorsser, en J. Schweighofer (2017) Modelling sailing time and cost for inland waterway transport, *European Journal of Transport Infrastructure Research*, Vol 17, No. 4, pp. 508-529.
- Heuser, H. (1986) *Anwendung Deim Entwurf von Binnenschiffen*, *Schifftechnik*, Band 33, Heft 1.
- Hofman, M. (2006) *Inland container vessel: Optimal characteristics for a specified waterway*, RINA Coastal Ships & Inland Waterways II conference.
- Koedijk, O.C. (2020) *Richtlijnen Vaarwegen 2020*, Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Roelse (2002) *Classificatie en kenmerken van de Europese vloot en de actieve vloot in Nederland*, Rijkswaterstaat, Dienst verkeer en scheepvaart.
- Van Dorsser, C. et al. (2020) The effect of low water on loading capacity of inland ships, *European Journal of Transport Infrastructure Research*, Vol 20, No. 3, pp. 47-70.
- Vinke, F et al. (2024) Inland shipping response to discharge extremes – A 10 years case study of the Rhine, *Climate Risk Management*, Vol. 43, 100578.

Annexes

A. Het vaststellen van de vormcoëfficiënten van motorschepen

Het oplossen van het model vraagt om default waarden voor de vorm coëfficiënten c_b en β . Deze coëfficiënten kunnen voor sommige schepen in praktijk worden afgeleid uit de meetbrief⁶ en de carène gegevens uit de stabiliteitsboeken⁷. Met uitzondering van globale indicaties voor de bandbreedte van c_b waardes op volledige diepgang zijn dergelijke gegevens in de literatuur niet voorhanden. Om een inschatting te maken zijn er gegevens voor individuele schepen opgehaald bij scheepseigenaren. De auteur heeft voor 21 schepen de benodigde gegevens verzameld. Het betreft gegevens van 9 containerschepen (L: 63,0 - 134,8 m; B: 7,20 - 14,25 m; en T_d : 2.79 - 3.64 m) en 12 chemietankers (L: 85,6 - 110,0 m; B: 10,50 - 14,06 m; en T_d : 2,89 - 4,46 m). Met behulp hiervan zijn default waarden voor de c_b en β van motorvrachtschepen vastgesteld. De resultaten van de analyse worden in deze annex gerapporteerd.

Het vaststellen van de blok coëfficiënt:

De blokcoëfficiënt (c_b) beschrijft het onderwatervolume van het schip als fractie van de het product van de lengte (L), breedte (B) en ledige diepgang (T_e). Het ledige scheepsgewicht (LSW) wordt hiermee als volgt beschreven:

$$LSW = c_b \cdot L \cdot B \cdot T_e$$

De waarden voor de blokcoëfficiënt liggen voor de 21 motorschepen tussen de 0,775 en 0,857 met een gemiddelde van 0,811. Belangrijk is dat het gaat om de blokcoëfficiënt van het schip op ledige diepgang. Op grotere diepgang neemt de blokcoëfficiënt toe. Het 95% betrouwbaarheidsinterval voor de gemiddelde waarde van de c_b bedraagt [0,799; 0,823]. De overeenkomstige 95% en 99% predictie intervallen zijn respectievelijk [0,755; 0,867] en [0,734; 0,887] op basis van een 2-zijdige student-t verdeling. De waarde van 0.811 ligt net iets boven de waarde van 0.80 die vaak als conservatieve schatting in stabiliteitsberekeningen gehanteerd wordt indien de daadwerkelijke carène gegevens en het ledige scheepsgewicht niet bekend zijn⁸. Deze waarde ligt dus in lijn met de verwachting. Een waarde onder de 0.80 had niet voor de hand gelegen omdat dit zou betekenen dat de stabiliteit bij het gebruik van default waarden overschat zou worden.

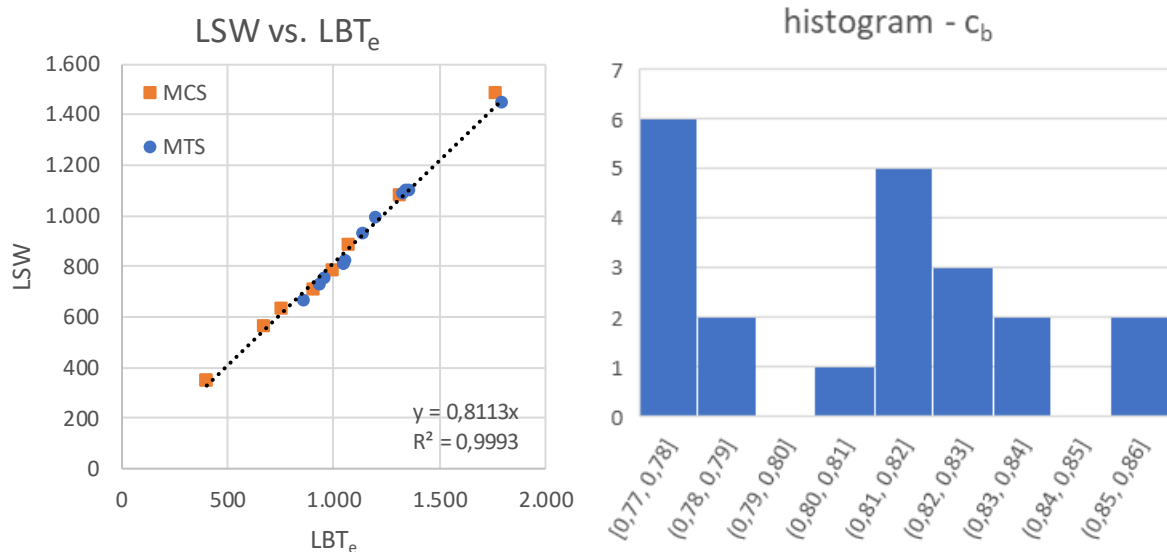
De resultaten van de analyse voor het bepalen van de c_b zijn weergegeven in figuur A1. Er is geen significant verschil geconstateerd tussen de c_b van containerschepen en tankers. Daarom worden alle motorvracht- en tankschepen verder als één populatie motorschepen behandeld.

⁶ Voor de volledigheid moet worden opgemerkt dat bij het opstellen van de officiële meetbrief een kleine fout wordt gemaakt. De meetbrief veronderstelt een gelijklastige inzinking van het schip terwijl de meting onder trim plaats vindt. Bij het bepalen van de ledige inzinking wordt geen rekening gehouden met het feit dat het voorschip voller is dan het achterschip. Er worden in het midden en op gelijke afstand van het midden 3 punten gemeten en de gemiddelde waarde wordt als ledige diepgang aangehouden. Dit terwijl het schip, als er een zuiver moment op uitgeoefend zou worden om het gelijklastige te leggen, in werkelijkheid iets omhoog zou komen. Hierdoor zal de ledige diepgang in werkelijkheid c.a. 0 tot 2 cm lager uitvallen dan in de meetbrief vermeld staat. Aangezien dit effect zonder een geavanceerde modelbeschrijving van de rompvorm niet te ramen is wordt het in deze publicatie verder buiten beschouwing gelaten.

⁷ Er moet opgemerkt worden dat niet alle stabiliteitsboeken daadwerkelijke carène gegevens bevatten omdat er vaak gerekend wordt met een benaderingsformule. In dit onderzoek is alleen gebruik gemaakt van gegevens van schepen waarvan de daadwerkelijke carène gegevens ook in de stabiliteitsboeken vermeld staan.

⁸ De default c_b waarde van 0.80 die gehanteerd wordt in veel stabiliteitsberekeningen wordt nergens officieel voorgeschreven, maar bij het analyseren van meerdere stabiliteitsboeken die met een benaderingsformule werken kan deze waarde telkens weer worden teruggevonden. Het lijkt daarmee een ongeschreven standaard.

Figuur A1: Ledig scheepsgewicht in relatie tot product van lengte, breedte en diepgang



| Betrouwbaarheid | 2 zijde t-waarde | Gemiddelde | Ondergrens | Bovengrens |
|-----------------|------------------|------------|------------|------------|
| 95% | 2,09 | 0,811 | 0,755 | 0,867 |
| 99% | 2,85 | 0,811 | 0,734 | 0,887 |

Bron: eigen analyse op basis van gegevens van 21 container- en tankschepen

Vaststellen van de β -coëfficiënt:

Het nadeel van het gebruik van de blokcoëfficiënt bij het bepalen van het ledige scheepsgewicht is dat deze coëfficiënt de in het model aanwezige informatie over de rompvorm onbenut laat. Een gerichtere schatting wordt verkregen door het ledige scheepsgewicht te bepalen als een factor (β) maal het waterlijnopervlak op ledige diepgang (A_{wl}) en de ledige diepgang (T_e).

$$LSW = \beta \cdot A_{wl} \cdot T_e$$

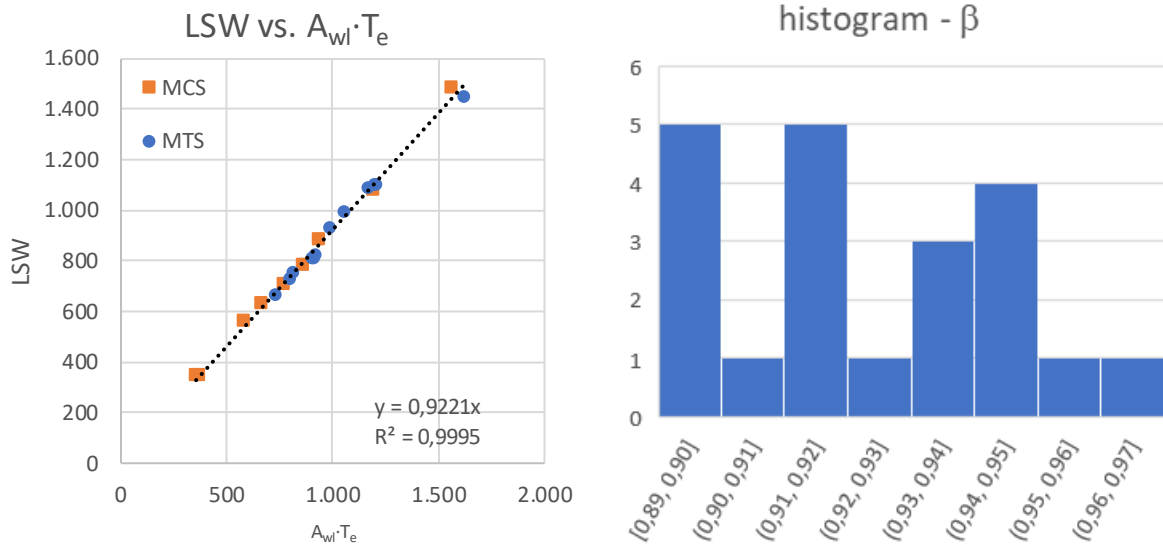
Hierbij valt de waterlijnopervlak in de bovenstaande formule te bepalen uit de afgeleide van de vergelijking voor de capaciteit op een gegeven diepgang. Voor het bepalen van de A_{wl} zijn de beschikbare waarden uit de meetbrief (die in praktijk per cm inzinking vastgesteld worden) eerst omgezet in een 2^e-graads polynoom en is vervolgens de afgeleide bepaald. De fit van deze lineaire regressie heeft voor de 21 voorbeeldschepen een R^2 -waarde van 0,9999 tot 1,0000.

De parameter β ligt voor de 21 voorbeeldschepen tussen de 0,894 en 0,966 met een gemiddelde van 0,928. Het bijhorende 95% betrouwbaarheidsinterval voor de gemiddelde waarde bedraagt [0,916; 0,936]. De overeenkomstige 95% en 99% predictie intervallen bedragen respectievelijk [0,880; 0,972] en [0,863; 0,989] op basis van een 2-zijdige student-t verdeling.

De spreiding in het met behulp van de β -coëfficiënt berekende ledige scheepsgewicht is kleiner dan bij het gebruik van de blokcoëfficiënt. Dit is logisch omdat de blokcoëfficiënt geen informatie over de rompvorm bevat terwijl de β -coëfficiënt aansluiting maakt op een model dat de scheepsvorm boven de waterlijn op ledige diepgang beschrijft.

De resultaten van de analyse zijn weergegeven in figuur A2.

Figuur A2: Ledig scheepsgewicht in relatie tot product waterlijnoppervlak en ledige diepgang



| Betrouwbaarheid | 2 zijde t-waarde | Gemiddelde | Ondergrens | Bovengrens |
|-----------------|------------------|------------|------------|------------|
| 95% | 2,09 | 0,926 | 0,880 | 0,972 |
| 99% | 2,85 | 0,926 | 0,863 | 0,989 |

Bron: eigen analyse op basis van de gegevens van 21 container en tankschepen

De geringe spreiding in de waarden van de parameters β en c_b maakt beide parameters zeer geschikt voor het ramen van de capaciteit, de waterverplaatsing en het displacement van motorschepen (d.w.z. droge lading schepen, containerschepen en tankers die voorzien zijn van eigen voortstuwing).

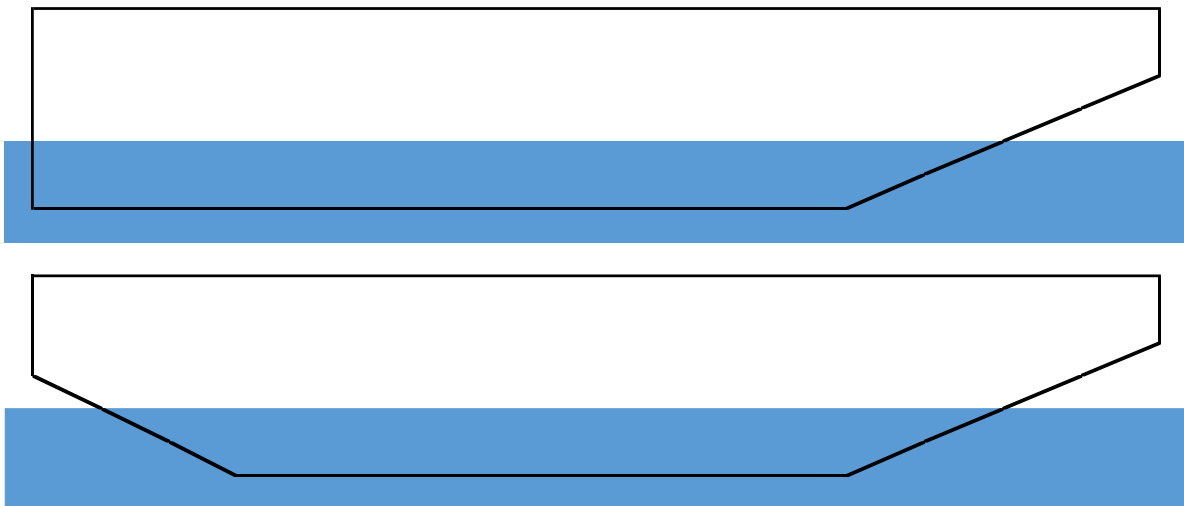
B. Vaststellen vormcoëfficiënten van duwbakken

Aangezien duwbakken voller worden geconstrueerd dan motorschepen moet hierbij gerekend worden met een hogere β en c_b waarde. Voor het schatten van deze parameters beschikt de auteur niet over de benodigde carène gegevens. Er is daarom is een alternatieve werkwijze gehanteerd waarbij het ledige scheepsgewicht van duwbakken eerst geraamd moest worden.

Bij duwbakken moet onderscheid gemaakt worden tussen de duwbakken van koppelverbanden en gewone duwbakken. Duwbakken van koppelverbanden zijn doorgaans wat meer gevormd (kleinere c_b) en vaak voorzien van een boegschroef waarmee het schip langzaam kan varen. Voor koppelbakken beschikt de auteur slechts over de gegevens van één specifieke bak (afkomstig uit de meetbrief en de carène tabellen van het stabiliteitsboek). Voor deze koppelbak bedraagt de c_b waarde 0.848 en de waarde voor β 0.932. Deze waarden kunnen als default gehanteerd worden voor koppelbakken.

Voor gewone niet zelf varende duwbakken worden doorgaans geen stabiliteitsboeken opgesteld en zijn dus ook geen carène gegevens beschikbaar. Wel zijn er meetbrieven op internet te vinden. Voor duwbakken is daarom een alternatieve benadering gehanteerd om de c_b en β coëfficiënt te ramen. Deze methode maakt gebruik van de specifieke vormeigenschappen van bakken. Dit wordt verder toegelicht aan de hand van een schematische weergave van duwbakken in figuur B1.

Figuur B1: schematische weergave van niet zelf varende duwbakken



In tegenstelling tot motorschepen en koppelbakken die over het algemeen ronder gevormd zijn is het onderwaterschip van niet zelf varende duwbakken relatief eenvoudig te beschrijven. Deze duwbakken hebben een recht afgeschuinde voorzijde en in sommige gevallen ook een recht afgeschuinde achterzijde die zodanig ontworpen is dat zij op ledige diepgang boven water uitsteekt. Ook blijft de vorm over de gehele breedte zo goed als identiek. Dit betekent de waterlijn oppervlakte bij niet zelf varende duwbakken lineair afneemt richting de kiel. Deze specifieke eigenschap maakt het mogelijk om met behulp van de meetbrief een betrouwbare inschatting te maken van het ledige gewicht en de bijhorende β en c_b waarden.

Voor het schatten van het ledige scheepsgewicht van niet zelf varende bakken is uitgegaan van de meetbrief op de ledige diepgang (T_e) en op een diepgang van $T_e + 10$ cm en $T_e + 20$ cm. Er is met stappen van 10 cm gewerkt omdat de meetbrief feitelijk ook steeds met stappen van 10 cm wordt opgesteld⁹. De eerste stap is om de gemiddelde waterlijnoppervlakte op $T_e + 5$ cm en $T_e + 15$ cm te

⁹ De tussenliggende waarden worden in de meetbrief niet exact per cm bepaald maar lineair geïnterpoleerd waardoor ze niet volledig juist zijn. Feitelijk gezien wordt in de meetbrief elke 10 cm een tonnage bepaald en

bepalen. De waarde voor het waterlijnoppevlak op $T_e + 5$ cm volgt uit het verschil in capaciteit op $T_e + 0$ cm en $T_e + 10$ cm en het hoogteverschil van 10 cm. Voor $T_e + 15$ wordt gekeken naar de capaciteit bij $T_e + 10$ cm en $T_e + 20$ cm (respectievelijk 10 en 20 cm inzinking).

De gehanteerde berekening ziet er als volgt uit:

$$A(T_e + 0.05) = \frac{CAP(T_e + 0.10) - 0}{0.10}$$

$$A(T_e + 0.15) = \frac{CAP(T_e + 0.20) - CAP(T_e + 0.10)}{0.20 - 0.10}$$

Als de kniklijn bij de voor- en achterstevan ten minste 20 cm boven de waterlijn op ledige diepgang ligt¹⁰ kan de afname van de waterlijnoppevlakte per cm diepgang worden bepaald als:

$$\gamma = \frac{A(T_e + 0.15) - A(T_e + 0.05)}{0.15 - 0.05}$$

Hieruit kan de waterlijnoppevlakte op ledige diepgang worden berekend en een schatting (*) worden gemaakt van de denkbeeldige waterlijnoppevlakte ter hoogte van de kiel (voor het geval dat het schip uit het water getild zou worden en de kiel precies op de waterlijn komt te liggen). Dit resulteert in de volgende benadering:

$$A_{wl} = A(T_e + 0.05) - 0.05 \cdot \gamma$$

$$A_k^* = A_{wl} - \gamma \cdot T_e$$

Met behulp van A_{wl} en A_k^* kan een inschatting gemaakt worden van het ledige scheepsgewicht van niet zelf varende duwbakken. Deze schatting is als volgt te berekenen:

$$LSW^* = \frac{A_{wl} + A_k^*}{2} \cdot T_e$$

Met behulp van LSW^* kunnen ook c_b^* en β^* voor niet zelf varende duwbakken worden geraamd:

$$c_b^* = \frac{LSW^*}{L \cdot B \cdot T_e}$$

$$\beta^* = \frac{LSW^*}{A_{wl} \cdot T_e}$$

De bovenstaande berekening is uitgevoerd voor 44 duwbakken waarvan de meetbrieven bekend zijn. Dit resulteerde in de verdeling van de c_b^* en β^* waarden zoals weergegeven in figuur B2 en B3.

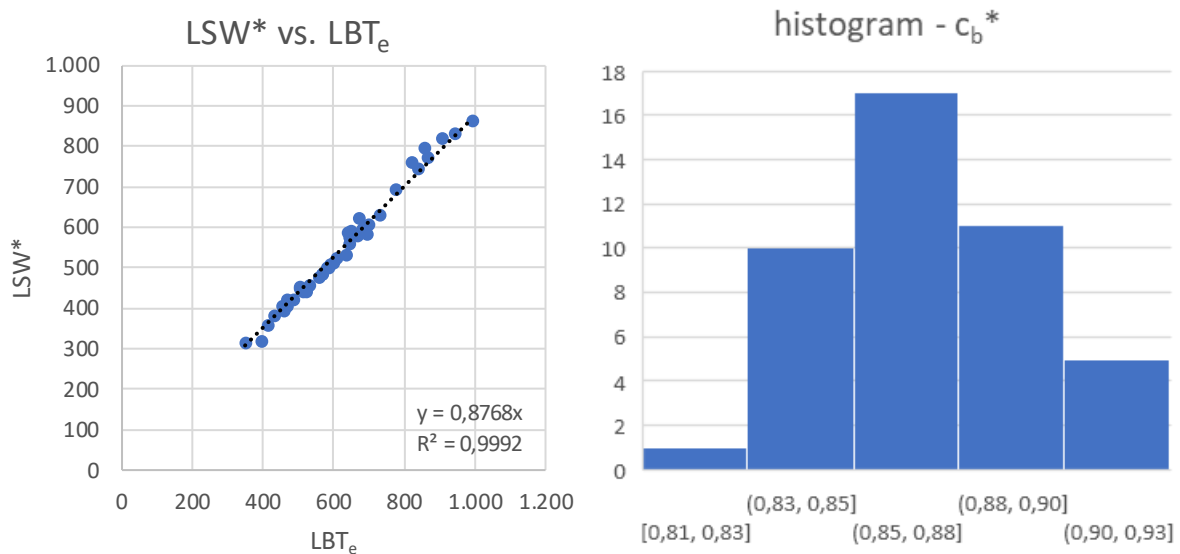
De β^* en c_b^* coëfficiënten geven een schatting voor de volheid van de duwbak. De gemiddelde c_b^* waarde bedraagt 0,866 met een 95% betrouwbaarheidsinterval voor het gemiddelde van [0,855; 0,877]. Voor β^* is het gemiddelde 0,961 en het 95% betrouwbaarheidsinterval [0,956; 0,966]. De

wordt deze vervolgens door 10 gedeeld om de capaciteit per cm te bepalen. Deze benadering is voor het schatten van het verband tussen de waterlijnoppevlakte en de diepte niet geschikt. Daarom is gekeken naar de waarden die op 10 en 20 cm boven de ledige diepgang liggen.

¹⁰ In dat geval is er sprake van een lineair verband tussen de diepgang en het bijhorende waterlijnoppevlak op die gegeven diepgang voor diepgangen vanaf de kiel tot aan $T_e + 20$ cm.

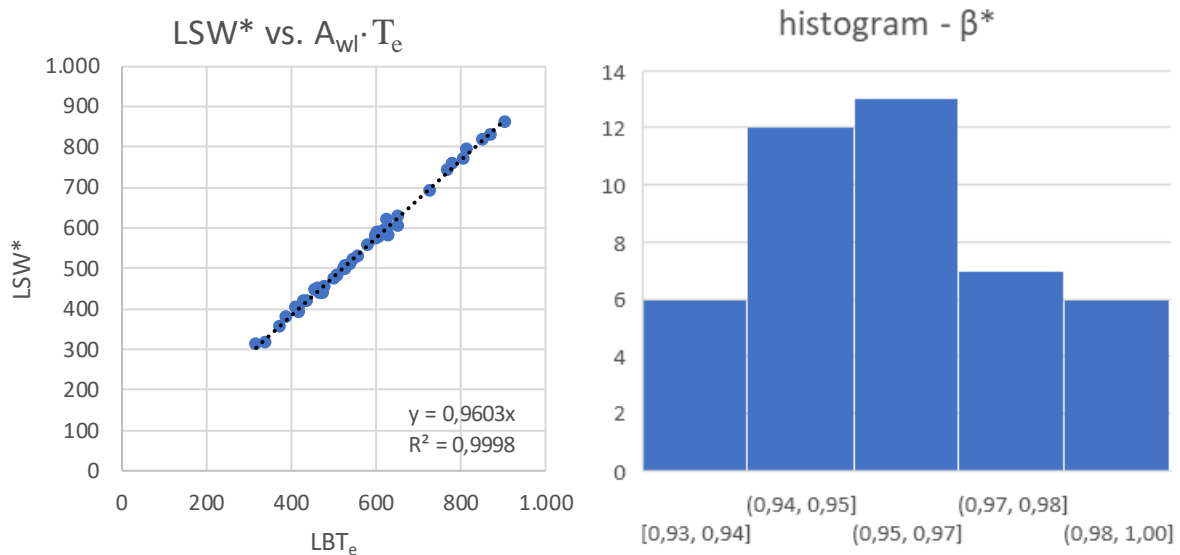
bijhorende 95% en 99% predictie intervallen voor individuele schepen zijn weergegeven in figuur B2. Hierbij is voor β^* de bovengrens afgekapt op de theoretische waarde van 1.000.

Figuur B2: Met behulp van de meetbrief benaderde c_b^* waarden voor gewone bakken



| Betrouwbaarheid | 2 zijdige t-waarde | Gemiddelde | Ondergrens | Bovengrens |
|-----------------|--------------------|------------|------------|------------|
| 95% | 2,09 | 0,866 | 0,815 | 0,917 |
| 99% | 2,85 | 0,866 | 0,797 | 0,936 |

Figuur B3: Met behulp van de meetbrief benaderde β^* waarden voor gewone duwbakken



| Betrouwbaarheid | 2 zijdige t-waarde | Gemiddelde | Ondergrens | Bovengrens |
|-----------------|--------------------|------------|------------|------------|
| 95% | 2,02 | 0,961 | 0,928 | 1,000 |
| 99% | 2,70 | 0,961 | 0,917 | 1,000 |

Het is mogelijk dat deze raming iets boven de werkelijke waarde ligt omdat ze niet gebaseerd is op daadwerkelijke carène gegevens, maar op een benadering (die geen rekening houdt met een eventuele afronding onder water). Hiermee kan desgewenst rekening gehouden worden bij de interne validatie van het model zoals beschreven in sectie 4.

C. De ondersteunende modellen van Van Dorsser

De publicatie van Van Dorsser et al. (2020) bevat naast het relatieve capaciteitsmodel (tabel 3) ook een aantal ondersteunende modellen. Relevante modellen zijn het ondersteunende model voor het bepalen van de ontwerpdiepgang (tabel 5) en de ledige diepgang (tabel 4). Deze modellen worden onderstaand weergegeven in tabel C1 en C2:

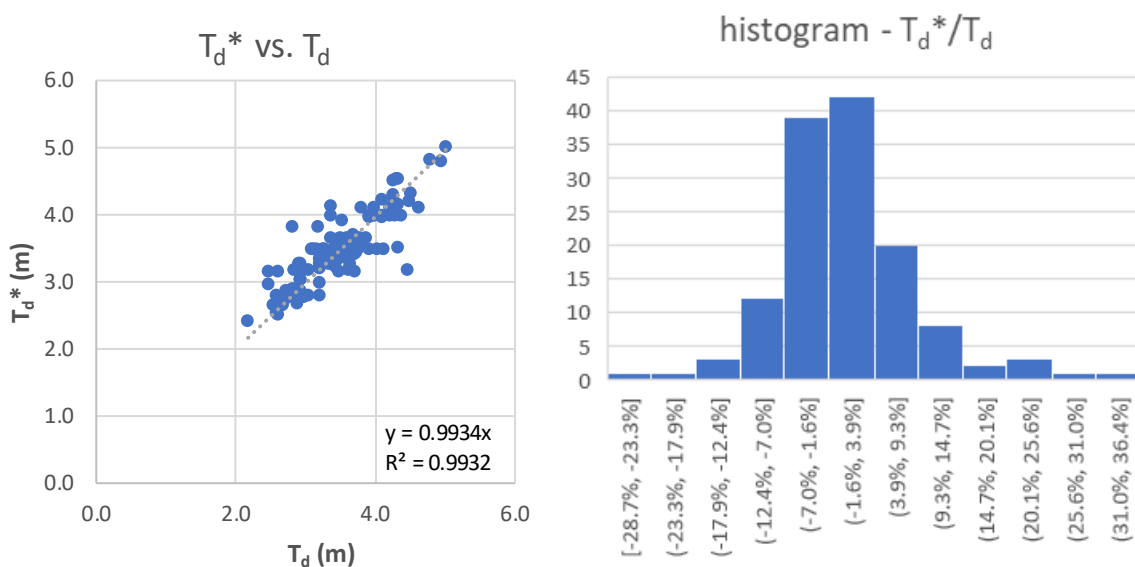
Tabel C1: Ondersteunend model voor bepalen van de ontwerpdiepgang

| Regression Outcome | Coefficients | St. Error | t Stat | Regression Statistics | |
|--|-------------------|-----------|--------|-----------------------|-------|
| Intercept | not included | N/A | N/A | Multiple R | 0,998 |
| Dummy Containers | 1,7244153371E+00 | 0,377 | 4,57 | R Square | 0,995 |
| Dummy Dry Bulk | 2,2767179246E+00 | 0,090 | 25,29 | Adjusted R Square | 0,986 |
| Dummy Dumb Barge | 1,3365379898E+00 | 0,379 | 3,53 | Standard Error | 0,256 |
| Dummy Tanker | -5,9459308905E+00 | 0,919 | -6,47 | Observations | 124 |
| Dummy Containers * L ^{0.4} * B ^{0.6} | 6,2902305560E-02 | 0,013 | 4,82 | | |
| Dummy Dry Bulk * L ^{0.7} * B ^{2.6} | 7,7398861528E-05 | 0,000 | 10,22 | | |
| Dummy Dumb Barge * L ^{0.3} * B ^{1.8} | 9,0052384439E-03 | 0,001 | 7,23 | | |
| Dummy Tanker * L ^{0.1} * B ^{0.3} | 2,8438560877E+00 | 0,277 | 10,28 | | |

* For dummy parameters, set value of variable to 1 if True.

Het ondersteunende model voor het bepalen van de ontwerpdiepgang geeft voor gangbare schepen een betrouwbare schatting, maar vliegt bij afwijkende waarden uit de bocht. Om de kwaliteit van het model te valideren is voor 133 schepen van verschillende typen een analyse gemaakt van de fout. De uitkomst van deze analyse is weergegeven figuur C1. De gemiddelde absolute fout bedraagt voor deze dataset c.a. 6%. Het 99% betrouwbaarheidsinterval ligt binnen de 20% afwijking.

Figuur C1: Validatie van modeluitkomsten ontwerpdiepgang voor gangbare schepen



| Betrouwbaarheid | 2 zijde t-waarde | Gemiddelde | Ondergrens | Bovengrens |
|-----------------|------------------|------------|------------|------------|
| 95% | 1.98 | 0.6% | -14% | 15% |
| 99% | 2.61 | 0.6% | -18% | 20% |

| | |
|------------------------------|----------|
| Gemiddelde fout | 0.6% |
| Gemiddelde absolute fout | 6.0% |
| Gemiddelde kwadratische fout | 7.40E-03 |

Bij niet gangbare schepen ligt de situatie anders. Gangbare diepgangen liggen tussen de 2,3 m en de 5,0 m (afgaande op de gegevens in de empirische dataset van 133 schepen waarvan meetbrieven bekend zijn). Als we de lengte en breedte in het ondersteunende model variëren dan volgt dat meerdere ramingen buiten de gangbare afmetingen van c.a. 2,3 t/m 4,5 à 5,0 meter ontwerpdiepte vallen (zie figuur C2).

Figuur C2: Geraamde ontwerpdiepgang bij ongebruikelijke scheepsafmetingen

| L | B | Type | Td* | Type | Td* | Type | Td* | Type | Td* |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 40.00 | 5.00 | MVS | 2.34 | MCS | 2.45 | MTS | 0.72 | DB | 1.83 |
| 40.00 | 7.50 | MVS | 2.47 | MCS | 2.65 | MTS | 1.58 | DB | 2.36 |
| 40.00 | 10.00 | MVS | 2.68 | MCS | 2.82 | MTS | 2.26 | DB | 3.05 |
| 40.00 | 12.50 | MVS | 3.00 | MCS | 2.98 | MTS | 2.83 | DB | 3.90 |
| 40.00 | 15.00 | MVS | 3.45 | MCS | 3.12 | MTS | 3.32 | DB | 4.90 |
| 40.00 | 17.50 | MVS | 4.02 | MCS | 3.26 | MTS | 3.76 | DB | 6.04 |
| 40.00 | 20.00 | MVS | 4.75 | MCS | 3.38 | MTS | 4.16 | DB | 7.32 |
| 40.00 | 22.50 | MVS | 5.63 | MCS | 3.51 | MTS | 4.52 | DB | 8.73 |

| L | B | Type | Td* | Type | Td* | Type | Td* | Type | Td* |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 60.00 | 5.00 | MVS | 2.37 | MCS | 2.57 | MTS | 0.99 | DB | 1.89 |
| 60.00 | 7.50 | MVS | 2.53 | MCS | 2.81 | MTS | 1.89 | DB | 2.49 |
| 60.00 | 10.00 | MVS | 2.82 | MCS | 3.01 | MTS | 2.60 | DB | 3.28 |
| 60.00 | 12.50 | MVS | 3.24 | MCS | 3.20 | MTS | 3.19 | DB | 4.24 |
| 60.00 | 15.00 | MVS | 3.83 | MCS | 3.37 | MTS | 3.70 | DB | 5.36 |
| 60.00 | 17.50 | MVS | 4.60 | MCS | 3.53 | MTS | 4.16 | DB | 6.65 |
| 60.00 | 20.00 | MVS | 5.56 | MCS | 3.68 | MTS | 4.57 | DB | 8.09 |
| 60.00 | 22.50 | MVS | 6.73 | MCS | 3.82 | MTS | 4.95 | DB | 9.69 |

| L | B | Type | Td* | Type | Td* | Type | Td* | Type | Td* |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 80.00 | 5.00 | MVS | 2.39 | MCS | 2.68 | MTS | 1.20 | DB | 1.94 |
| 80.00 | 7.50 | MVS | 2.59 | MCS | 2.94 | MTS | 2.12 | DB | 2.60 |
| 80.00 | 10.00 | MVS | 2.94 | MCS | 3.17 | MTS | 2.85 | DB | 3.45 |
| 80.00 | 12.50 | MVS | 3.46 | MCS | 3.38 | MTS | 3.46 | DB | 4.50 |
| 80.00 | 15.00 | MVS | 4.18 | MCS | 3.57 | MTS | 3.99 | DB | 5.73 |
| 80.00 | 17.50 | MVS | 5.11 | MCS | 3.75 | MTS | 4.46 | DB | 7.13 |
| 80.00 | 20.00 | MVS | 6.29 | MCS | 3.91 | MTS | 4.88 | DB | 8.70 |
| 80.00 | 22.50 | MVS | 7.73 | MCS | 4.08 | MTS | 5.27 | DB | 10.44 |

| L | B | Type | Td* | Type | Td* | Type | Td* | Type | Td* |
|--------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 120.00 | 5.00 | MVS | 2.42 | MCS | 2.85 | MTS | 1.49 | DB | 2.02 |
| 120.00 | 7.50 | MVS | 2.69 | MCS | 3.15 | MTS | 2.46 | DB | 2.76 |
| 120.00 | 10.00 | MVS | 3.16 | MCS | 3.42 | MTS | 3.21 | DB | 3.73 |
| 120.00 | 12.50 | MVS | 3.85 | MCS | 3.67 | MTS | 3.85 | DB | 4.91 |
| 120.00 | 15.00 | MVS | 4.80 | MCS | 3.89 | MTS | 4.40 | DB | 6.29 |
| 120.00 | 17.50 | MVS | 6.04 | MCS | 4.10 | MTS | 4.89 | DB | 7.88 |
| 120.00 | 20.00 | MVS | 7.61 | MCS | 4.30 | MTS | 5.33 | DB | 9.66 |
| 120.00 | 22.50 | MVS | 9.52 | MCS | 4.49 | MTS | 5.74 | DB | 11.62 |

| L | B | Type | Td* | Type | Td* | Type | Td* | Type | Td* |
|--------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| 140.00 | 5.00 | MVS | 2.44 | MCS | 2.92 | MTS | 1.61 | DB | 2.06 |
| 140.00 | 7.50 | MVS | 2.74 | MCS | 3.25 | MTS | 2.59 | DB | 2.83 |
| 140.00 | 10.00 | MVS | 3.26 | MCS | 3.53 | MTS | 3.35 | DB | 3.84 |
| 140.00 | 12.50 | MVS | 4.03 | MCS | 3.79 | MTS | 4.00 | DB | 5.08 |
| 140.00 | 15.00 | MVS | 5.09 | MCS | 4.03 | MTS | 4.56 | DB | 6.53 |
| 140.00 | 17.50 | MVS | 6.47 | MCS | 4.25 | MTS | 5.06 | DB | 8.19 |
| 140.00 | 20.00 | MVS | 8.22 | MCS | 4.46 | MTS | 5.50 | DB | 10.05 |
| 140.00 | 22.50 | MVS | 10.34 | MCS | 4.66 | MTS | 5.92 | DB | 12.11 |

Een praktische manier om hiermee om te gaan is om een minimum model uitkomst van 2,3 meter diepgang te hanteren in combinatie met een maximum waarde van 4,5 meter voor droge lading- en containerschepen (+koppelbakken) en van 5,0 meter voor tankers en niet zelf varende duwbakken.

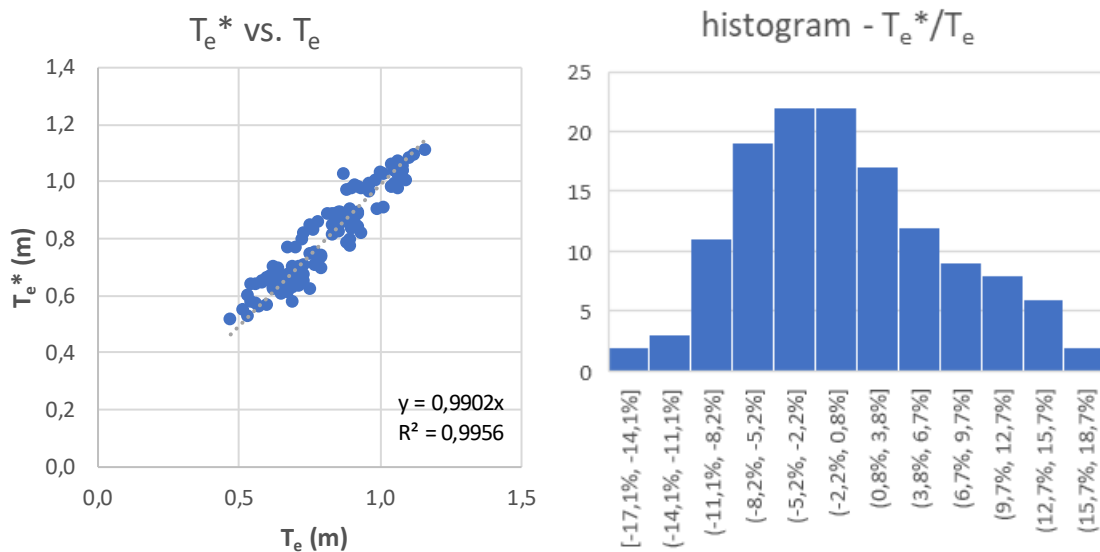
Tabel C2: Ondersteunend model voor bepalen van de ledige diepgang

| Regression Outcome | Coefficients | St. Error | t Stat | Regression Statistics | |
|-----------------------------------|-------------------|-----------|--------|-----------------------|-------|
| Intercept | 7,5740820927E-02 | 0,104 | 0,73 | Multiple R | 0,949 |
| Beam | 1,1615080992E-01 | 0,017 | 6,68 | R Square | 0,900 |
| (L * T_design)/B | 1,6865973494E-02 | 0,003 | 6,19 | Adjusted R Square | 0,894 |
| (L * B)^0.5 | -2,7490565381E-02 | 0,005 | -5,24 | Standard Error | 0,051 |
| L * B * T_design | -5,1501240744E-05 | 0,000 | -4,06 | Observations | 124 |
| Dummy DH Dry Bulk & DH Containers | 1,0257551153E-01 | 0,016 | 6,33 | | |
| Dummy DH Tanker | 2,4299435211E-01 | 0,018 | 13,39 | | |
| Dummy Dumb Barge | -2,1354295627E-01 | 0,024 | -8,97 | | |

* For dummy parameters, set value of variable to 1 if True; DH = double hull.

Om de kwaliteit van het model voor het bepalen van de ledige diepgang te valideren is voor 133 bestaande schepen van verschillende grootten en typen een analyse gemaakt van de fout. De uitkomst van deze analyse is weergegeven figuur C3. De gemiddelde absolute fout bedraagt voor deze dataset 5.9% en het 99% betrouwbaarheidsinterval ligt op 19% afwijking. Het model geeft voor gangbare schepen dus een redelijke inschatting als er geen aanvullende informatie over het schip bekend is.

Figuur C3: Validatie van modeluitkomsten ledige diepgang voor gangbare schepen



| Betrouwbaarheid | 2 zijdige t-waarde | Gemiddelde | Ondergrens | Bovengrens |
|-----------------|--------------------|------------|------------|------------|
| 95% | 1,98 | -0,001 | -14% | 14% |
| 99% | 2,61 | -0,001 | -19% | 19% |

| | |
|------------------------------|----------|
| Gemiddelde fout | -0,1% |
| Gemiddelde absolute fout | 5,9% |
| Gemiddelde kwadratische fout | 5,23E-03 |

Voor schepen met ongebruikelijke afmetingen zijn de modeluitkomsten niet zondermeer toepasbaar. Om de kwaliteit van het model bij dergelijke afmetingen te valideren is een vergelijkbare berekening gemaakt als voor het ondersteunende model dat de ontwerpdiepgang bepaald. Hierbij is uitgegaan van een ontwerpdiepgang van 3,0 meter. De uitkomsten zijn weergegeven in figuur C4. Deze figuur maakt de probleemgebieden inzichtelijk.

Figuur C4: Geraamde ledige diepgang bij ongebruikelijke scheepsafmetingen

| L | B | Td | Type | Te* | Type | Te* | Type | Te* | Type | Te* | L/B |
|-------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-----|
| 40,00 | 5,00 | 3,00 | MVS | 0,744 | MCS | 0,744 | MTS | 0,885 | DB | 0,428 | 8,0 |
| 40,00 | 7,50 | 3,00 | MVS | 0,797 | MCS | 0,797 | MTS | 0,937 | DB | 0,481 | 5,3 |
| 40,00 | 10,00 | 3,00 | MVS | 0,931 | MCS | 0,931 | MTS | 1,071 | DB | 0,614 | 4,0 |
| 40,00 | 12,50 | 3,00 | MVS | 1,100 | MCS | 1,100 | MTS | 1,241 | DB | 0,784 | 3,2 |
| 40,00 | 15,00 | 3,00 | MVS | 1,289 | MCS | 1,289 | MTS | 1,430 | DB | 0,973 | 2,7 |
| 40,00 | 17,50 | 3,00 | MVS | 1,491 | MCS | 1,491 | MTS | 1,632 | DB | 1,175 | 2,3 |
| 40,00 | 20,00 | 3,00 | MVS | 1,701 | MCS | 1,701 | MTS | 1,842 | DB | 1,385 | 2,0 |
| 40,00 | 22,50 | 3,00 | MVS | 1,918 | MCS | 1,918 | MTS | 2,058 | DB | 1,602 | 1,8 |

| L | B | Td | Type | Te* | Type | Te* | Type | Te* | Type | Te* | L/B |
|-------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 60,00 | 5,00 | 3,00 | MVS | 0,844 | MCS | 0,844 | MTS | 0,984 | DB | 0,528 | 12,0 |
| 60,00 | 7,50 | 3,00 | MVS | 0,802 | MCS | 0,802 | MTS | 0,942 | DB | 0,485 | 8,0 |
| 60,00 | 10,00 | 3,00 | MVS | 0,877 | MCS | 0,877 | MTS | 1,018 | DB | 0,561 | 6,0 |
| 60,00 | 12,50 | 3,00 | MVS | 1,004 | MCS | 1,004 | MTS | 1,145 | DB | 0,688 | 4,8 |
| 60,00 | 15,00 | 3,00 | MVS | 1,159 | MCS | 1,159 | MTS | 1,300 | DB | 0,843 | 4,0 |
| 60,00 | 17,50 | 3,00 | MVS | 1,331 | MCS | 1,331 | MTS | 1,472 | DB | 1,015 | 3,4 |
| 60,00 | 20,00 | 3,00 | MVS | 1,515 | MCS | 1,515 | MTS | 1,656 | DB | 1,199 | 3,0 |
| 60,00 | 22,50 | 3,00 | MVS | 1,708 | MCS | 1,708 | MTS | 1,848 | DB | 1,392 | 2,7 |

| L | B | Td | Type | Te* | Type | Te* | Type | Te* | Type | Te* | L/B |
|-------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 80,00 | 5,00 | 3,00 | MVS | 0,957 | MCS | 0,957 | MTS | 1,097 | DB | 0,641 | 16,0 |
| 80,00 | 7,50 | 3,00 | MVS | 0,823 | MCS | 0,823 | MTS | 0,963 | DB | 0,507 | 10,7 |
| 80,00 | 10,00 | 3,00 | MVS | 0,843 | MCS | 0,843 | MTS | 0,984 | DB | 0,527 | 8,0 |
| 80,00 | 12,50 | 3,00 | MVS | 0,930 | MCS | 0,930 | MTS | 1,071 | DB | 0,614 | 6,4 |
| 80,00 | 15,00 | 3,00 | MVS | 1,053 | MCS | 1,053 | MTS | 1,193 | DB | 0,737 | 5,3 |
| 80,00 | 17,50 | 3,00 | MVS | 1,197 | MCS | 1,197 | MTS | 1,338 | DB | 0,881 | 4,6 |
| 80,00 | 20,00 | 3,00 | MVS | 1,357 | MCS | 1,357 | MTS | 1,497 | DB | 1,041 | 4,0 |
| 80,00 | 22,50 | 3,00 | MVS | 1,527 | MCS | 1,527 | MTS | 1,668 | DB | 1,211 | 3,6 |

| L | B | Td | Type | Te* | Type | Te* | Type | Te* | Type | Te* | L/B |
|--------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 120,00 | 5,00 | 3,00 | MVS | 1,207 | MCS | 1,207 | MTS | 1,348 | DB | 0,891 | 24,0 |
| 120,00 | 7,50 | 3,00 | MVS | 0,895 | MCS | 0,895 | MTS | 1,036 | DB | 0,579 | 16,0 |
| 120,00 | 10,00 | 3,00 | MVS | 0,809 | MCS | 0,809 | MTS | 0,950 | DB | 0,493 | 12,0 |
| 120,00 | 12,50 | 3,00 | MVS | 0,819 | MCS | 0,819 | MTS | 0,960 | DB | 0,503 | 9,6 |
| 120,00 | 15,00 | 3,00 | MVS | 0,881 | MCS | 0,881 | MTS | 1,021 | DB | 0,565 | 8,0 |
| 120,00 | 17,50 | 3,00 | MVS | 0,974 | MCS | 0,974 | MTS | 1,114 | DB | 0,658 | 6,9 |
| 120,00 | 20,00 | 3,00 | MVS | 1,087 | MCS | 1,087 | MTS | 1,228 | DB | 0,771 | 6,0 |
| 120,00 | 22,50 | 3,00 | MVS | 1,216 | MCS | 1,216 | MTS | 1,356 | DB | 0,900 | 5,3 |

| L | B | Td | Type | Te* | Type | Te* | Type | Te* | Type | Te* | L/B |
|--------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| 140,00 | 5,00 | 3,00 | MVS | 1,340 | MCS | 1,340 | MTS | 1,481 | DB | 1,024 | 28,0 |
| 140,00 | 7,50 | 3,00 | MVS | 0,941 | MCS | 0,941 | MTS | 1,081 | DB | 0,625 | 18,7 |
| 140,00 | 10,00 | 3,00 | MVS | 0,803 | MCS | 0,803 | MTS | 0,944 | DB | 0,487 | 14,0 |
| 140,00 | 12,50 | 3,00 | MVS | 0,777 | MCS | 0,777 | MTS | 0,917 | DB | 0,460 | 11,2 |
| 140,00 | 15,00 | 3,00 | MVS | 0,809 | MCS | 0,809 | MTS | 0,949 | DB | 0,492 | 9,3 |
| 140,00 | 17,50 | 3,00 | MVS | 0,876 | MCS | 0,876 | MTS | 1,017 | DB | 0,560 | 8,0 |
| 140,00 | 20,00 | 3,00 | MVS | 0,968 | MCS | 0,968 | MTS | 1,109 | DB | 0,652 | 7,0 |
| 140,00 | 22,50 | 3,00 | MVS | 1,077 | MCS | 1,077 | MTS | 1,217 | DB | 0,761 | 6,222 |

Uit de resultaten in figuur C4 volgt dat de uitkomsten van het model voor het ramen van de ledige diepgang een onjuiste toename van de diepgang laten zien bij een oplopende breedte. Dit impliceert dat het model voor afwijkende scheepsafmetingen (kleine L/B waarde) aantoonbaar foute waarden geeft. Het model is daarom alleen toepasbaar bij gangbare scheepsafmetingen ($\approx L/B > 8$).

Toepassingsgebied methode van Dorsser et al. (2020)

In de publicatie van Van Dorsser et al. (2020) is het geldige toepassingsgebied voor de modellen niet gespecificeerd. Met betrekking tot het toepassingsgebied van het relatieve capaciteitsmodel uit tabel 3 van de publicatie hebben zich geen problemen voorgedaan. Dit komt doordat alle datapunten van alle bij het opstellen van de publicatie aanwezige scheepsgegevens in de empirische regressie analyse betrokken zijn geweest. Als gevolg hiervan is de methode voor zover bekend op alle denkbare binnenschepen in het in sectie 2 beschreven toepassingsbereik geschikt.

Dit laatste geldt niet voor de ondersteunende modellen. Bij het ondersteunende model voor het ramen van de ontwerpdiepgang speelt dat de gehanteerde ontwerpdiepgang niet zozeer een fysische wetmatigheid volgt, maar veel meer een arbitraire keuze is van de ondernemer die een nieuw schip laat bouwen binnen de gangbare wensen van de markt. Om hier praktisch mee om te gaan wordt aanbevolen de ondergrens af te kappen op c.a. 2,30 meter en de bovengrens af te kappen op 4,50 meter voor motorvrachtschepen die met droge lading of containers varen (+ koppelbakken die bij deze schepen horen) en op 5,0 meter voor motortankschepen en duwbakken. Daartussenin kan gebruik gemaakt worden van de beschikbare formules uit tabel 5 van Van Dorsser et al. (2020).

Voor het bepalen van de ledige diepgang ligt de situatie nog gecompliceerder. Voor gangbare schepen is uit de bovenstaande analyse gebleken dat de absolute foutmarge 5.9% bedraagt en met 99% zekerheid niet meer dan 19%. Maar er is ook bekend dat het model bij afwijkende afmetingen aantoonbaar foute uitkomsten geeft. In tegenstelling tot de ontwerpdiepgang (waar de diepgang bepaald wordt door de gangbare diepte op de rivier) is er ook geen sprake van een duidelijke bandbreedte waarbinnen de ledige diepgang zich kan bevinden. Uit een verdere analyse van de fouten blijkt dat de spreiding van de foutterm zich niet laat verklaren door eenvoudige parameters als L, B, L/B, of L·B. Dit betekent dat er op basis van deze parameters geen afbakening gemaakt kan worden van het toepassingsgebied waarbinnen de foutmarge onder een bepaalde waarde blijft. Wel kunnen we vaststellen dat het model voor de geanalyseerde schepen een redelijke waarde op levert. Het is daarom reëel om het toepassingsgebied te definiëren aan de hand van de reikwijdte van de schepen in de dataset van 133 schepen die voor de validatie gebruikt is. Deze dataset beslaat zowel het bestand aan schepen uit de eerdere publicatie van Van Dorsser et al. (2020) als een aantal nieuw toegevoegde schepen. De in de dataset aanwezige afmetingen zijn voor de verschillende categorieën schepen weergegeven in tabel C3.

Tabel C3: Kenmerken van schepen in de gehanteerde dataset voor validatie

| Reikwijdte model Type schip | Aantal # | L | | B | | Td | | L/B | |
|--------------------------------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| | | min | max | min | max | min | max | min | max |
| Enkelwandig droge lading met luiken | 21 | 46.22 | 109.95 | 6.33 | 11.40 | 2.17 | 3.22 | 7.3 | 11.1 |
| Dubbelwandig droge lading met luiken | 19 | 84.88 | 135.00 | 8.20 | 11.45 | 2.47 | 3.72 | 7.8 | 11.8 |
| Dubbelwandig containerschip | 23 | 63.00 | 135.00 | 7.03 | 17.10 | 2.79 | 4.27 | 7.5 | 11.8 |
| Subtotaal motorvrachtschepen | 63 | 46.22 | 135.00 | 6.33 | 17.10 | 2.17 | 4.27 | 7.3 | 11.8 |
| Enkelwandige tankers | 3 | 84.60 | 110.00 | 9.50 | 11.36 | 2.82 | 4.02 | 8.9 | 9.8 |
| Dubbelwandige tankers | 33 | 85.59 | 135.00 | 9.50 | 17.55 | 2.89 | 5.01 | 7.5 | 11.7 |
| Subtotaal motortankschepen | 36 | 84.60 | 135.00 | 9.50 | 17.55 | 2.82 | 5.01 | 7.5 | 11.7 |
| Gewone bakken | 29 | 69.95 | 109.99 | 9.43 | 12.54 | 2.80 | 4.95 | 6.71 | 9.65 |
| Koppelbakken | 5 | 71.00 | 87.47 | 10.43 | 11.46 | 2.47 | 4.46 | 6.41 | 7.95 |
| Subtotaal bakken | 34 | 69.95 | 109.99 | 9.43 | 12.54 | 2.47 | 4.95 | 6.4 | 9.6 |
| Totaal alle schepen | 133 | 46.22 | 135.00 | 6.33 | 17.55 | 2.17 | 5.01 | 6.4 | 11.8 |

D. Geavanceerde vuistregels van Hekkenberg

Hekkenberg (2013) concludeerde dat er nagenoeg geen modellen voor het ramen van het ledig scheepsgewicht in de literatuur aanwezig zijn. Hofman (2006) beschrijft een globaal verband waarmee het ledige gewicht van binnenschepen op basis van lengte, breedte en holte geschat kan worden. Dit verband is gebaseerd op relatief oude gegevens van Heuser (1986) en kent een grote spreiding. Als zodanig is het model van Hofman (2006) niet bruikbaar. Hekkenberg (2013) ontwikkelde een ontwerptool waarmee hij automatisch scheepsontwerpen van een bepaald type met gegeven hoofdafmetingen kon genereren. Deze tool is gebaseerd op de klasse regels voor het ontwerp van schepen zoals bepalingen voor spantafstanden en minimale plaatdiktes. Het model kan automatisch scheepsontwerpen genereren voor droge ladingschepen, containerschepen en dubbelwandige motortankschepen. De hoofdafmetingen kunnen variëren tussen een lengte van 40 tot 185 meter, een breedte van 5 tot 25 meter en een ontwerpdiepgang van 1,5 tot 4,5 meter. Door het type schip en de hoofdafmetingen systematisch te variëren vergaarde hij een omvangrijke dataset met theoretische data die het gehele bereik aan mogelijke scheepsafmetingen voor de binnenvaart op de Rijn beschrijft. Met behulp van lineaire regressie stelde hij een aantal 'geavanceerde vuistregels' op waarmee het laadvermogen en het ledige scheepsgewicht rechtsreeks zonder gebruik van de tool geschat kunnen worden. De 'geavanceerde vuistregels' van Hekkenberg (2013, Annex D) hebben als voordeel dat ze over het hele spectrum van mogelijke scheepsafmetingen een robuuste schatting van het ledige scheepsgewicht geven. Dit geldt ook voor schepen met zeer ongebruikelijke afmetingen. Een minpunt is wel dat de methode alleen geschikt is voor motorschepen en niet toepasbaar is op duwbakken en koppelbakken.

Een complicerende factor is dat Hekkenberg (2013) onderscheid maakt tussen schepen met een langs- en een dwars verstijfde constructie. Voor relatief korte schepen is een dwars verstijfde constructie lichter. Voor lange motorschepen is een langs verstijfde constructie gunstiger. Een praktische wijze om met deze onbekende invoerparameter om te gaan is om de verstijving te selecteren die de lichtste constructie oplevert. De coëfficiënten van zijn model zijn samengevat in tabel D1.

Correctie op gewicht van accommodatie, leidingwerk en equipment

Bij het toepassen van het model van Hekkenberg (2013) is geconcludeerd dat het model het ledige scheepsgewicht substantieel overschat bij kleine schepen (<70 m). De vermoedelijke oorzaak is een te hoge inschatting voor het gewicht van de accommodatie en de equipment. Voor een klein schip van c.a. 46 x 6,3 meter bedroegen deze componenten volgens het model c.a. 58% van het totale scheepsgewicht wat resulteerde in een veel te hoge gewichtsinschatting. De oorzaak houdt mede verband met de toegenomen regelgeving die het bouwen van een klein schip tegenwoordig moeilijker maken, maar dit is bij lange na geen afdoende verklaring.

Om dit te ondervangen wordt voorgesteld het scheepsgewicht voor motorvracht- en motortank schepen te maximeren op 1,25 keer het berekende staalgewicht. Deze waarde is enigszins arbitrair vastgesteld en zal nog nader onderzocht moeten worden, maar gegevens daarvoor ontbreken. Na het toepassen van de correctie wordt de resterende afwijking bij het betreffende kleine schip van 46 x 6,3 meter gereduceerd van 56% tot 13%. De correctie heeft nauwelijks tot geen consequenties voor grotere schepen omdat die niet geraakt worden door de correctie.

Tabel D1: Model voor het bepalen van het ledig scheepsgewicht volgens Hekkenberg

| Scheepstype | | Droge lading | | Containers | | Droog of containers | | Tankers |
|---|-----|--------------|------------|------------|------------|---------------------|------------|------------|
| Staalgewicht | | | | | | | | |
| Type verstijving* | | Dwars | Langs | Dwars | Langs | Dwars | Langs | Gemengd |
| constante | c1 | -2,597E+01 | 4,985E+01 | -2,200E+01 | 5,107E+01 | -2,399E+01 | 5,046E+01 | 4,220E+02 |
| L x B | c2 | 2,320E-01 | 2,290E-01 | 2,540E-01 | 2,440E-01 | 2,430E-01 | 2,365E-01 | 0 |
| L ² x T | c3 | -1,552E-03 | -1,234E-05 | -1,975E-03 | -1,772E-04 | -1,764E-03 | -9,477E-05 | -7,694E-04 |
| L x B x T | c4 | 4,444E-02 | 1,910E-02 | 4,473E-02 | 1,588E-02 | 4,459E-02 | 1,749E-02 | 7,311E-02 |
| L ^{3.5} x B | c5 | 8,134E-07 | 9,584E-07 | 1,059E-06 | 1,100E-06 | 9,362E-07 | 1,029E-06 | 1,157E-06 |
| L ^{1.3} x T ^{0.7} / B | c6 | 1,024E+00 | 2,880E-01 | 9,600E-01 | 3,120E-01 | 9,920E-01 | 3,000E-01 | 0 |
| 1/(B ² x T ^{1.5}) | c7 | 7,691E+02 | -1,066E+03 | 6,676E+02 | -1,164E+03 | 7,184E+02 | -1,115E+03 | 0 |
| 1/(L x B x T) ^{0.5} | c8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -7,922E+03 |
| *Voor droge lading en containers de kleinste uitkomst van dwars en langsverstijving hanteren. | | | | | | | | |
| Accommodatie | | | | | | | | |
| max[L/4 x (B-2), 100] | c9 | 4,325E-01 | 4,325E-01 | 4,325E-01 | 4,325E-01 | 4,325E-01 | 4,325E-01 | 4,325E-01 |
| Motoren, equipment en outfitting | | | | | | | | |
| constante | c18 | 2,80E+01 | 2,80E+01 | 2,80E+01 | 2,80E+01 | 2,80E+01 | 2,80E+01 | 2,80E+01 |
| T | c19 | 4,61E+00 | 4,61E+00 | 4,61E+00 | 4,61E+00 | 4,61E+00 | 4,61E+00 | 4,61E+00 |
| LxB | c20 | 2,10E-02 | 2,10E-02 | 2,10E-02 | 2,10E-02 | 2,10E-02 | 2,10E-02 | 2,10E-02 |
| LxBxT | c21 | 2,24E-03 | 2,24E-03 | 2,24E-03 | 2,24E-03 | 2,24E-03 | 2,24E-03 | 2,24E-03 |
| 1/L ³ | c22 | -4,26E+05 | -4,26E+05 | -4,26E+05 | -4,26E+05 | -4,26E+05 | -4,26E+05 | -4,26E+05 |
| * Accommodatie en equipment maximaal 25% van het staalgewicht. | | | | | | | | |
| Leidingwerk | | | | | | | | |
| constante | c10 | -2,72E+00 | -2,72E+00 | -2,72E+00 | -2,72E+00 | -2,72E+00 | -2,72E+00 | -3,949E+00 |
| L | c11 | 6,23E-02 | 6,23E-02 | 6,23E-02 | 6,23E-02 | 6,23E-02 | 6,23E-02 | 8,191E-02 |
| B | c13 | 5,05E-02 | 5,05E-02 | 5,05E-02 | 5,05E-02 | 5,05E-02 | 5,05E-02 | -4,407E-01 |
| T | c14 | 9,97E-02 | 9,97E-02 | 9,97E-02 | 9,97E-02 | 9,97E-02 | 9,97E-02 | 0 |
| L x B x T | c15 | 1,34E-04 | 1,34E-04 | 1,34E-04 | 1,34E-04 | 1,34E-04 | 1,34E-04 | 1,065E-03 |
| L ^{0.6} x B | c16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6,966E-02 |
| B / L ³ | c17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,228E+04 |

NB: De coëfficiënten van de methode zijn samengevat in tabel D1. De maximale waarde voor het gewicht van de accommodatie en equipment is door de auteur toegevoegd en staat niet vermeld in de oorspronkelijke publicatie.

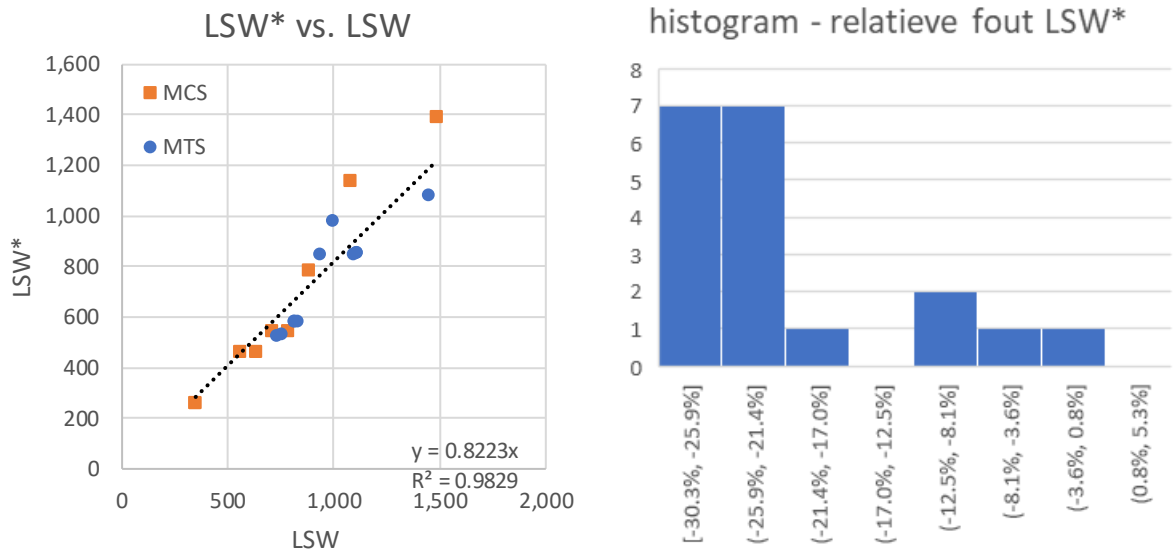
Validatie uitkomsten model Hekkenberg (2013)

Voor het gebruik van het model van Hekkenberg (2013) moeten de L, B en T_d bekend zijn. Als de T_d niet bekend is kan deze worden geraamd met behulp van de ondersteunende methode van Van Dorsser et al. (2020) (Tabel 5) en de eerder in Annex C genoemde afkapwaarden.

Om de kwaliteit van het model van Hekkenberg (2013) te valideren is een vergelijk gemaakt tussen de berekende waarden voor LSW* en de werkelijke waarden voor LSW in het geval dat de T_d* geraamd is met Van Dorsser et al. (2013) en het geval dat de T_d bekend is. De resultaten van deze validatieslag zijn weergegeven in figuur D1 en figuur D2.

De analyse laat zien dat het model van Hekkenberg (2013) vooral bij grote motorvrachtschepen en structurele afwijking heeft die resulteert in een te hoge LWS. Ook gaat het model van uit van dubbelwandige schepen, wat voor droge lading niet zondermeer het geval is.

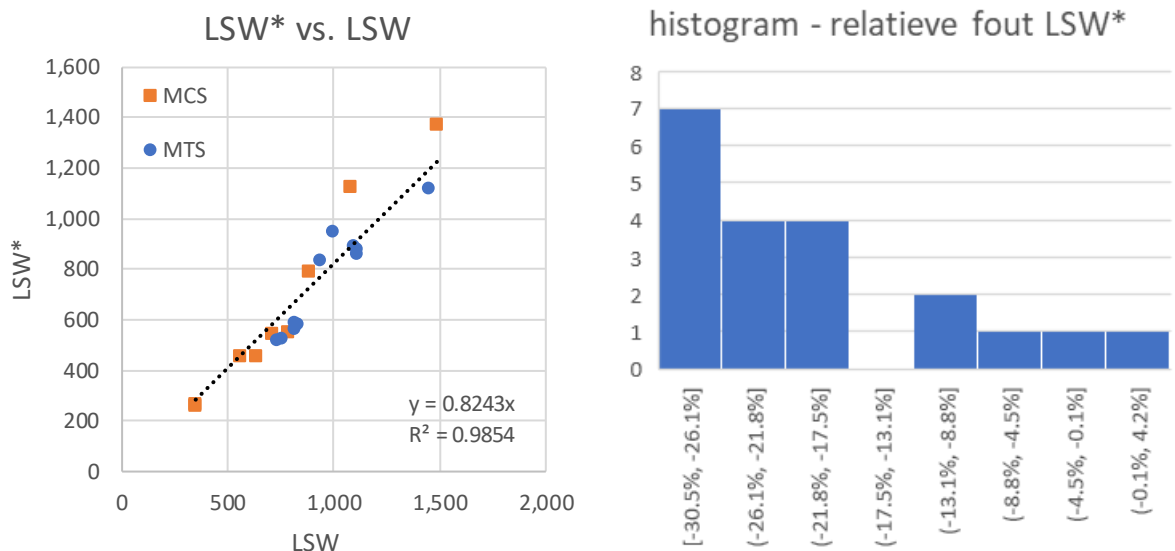
Figuur D1: Validatie van modeluitkomsten ledig scheepsgewicht bij geraamde Td*



| Betrouwbaarheid | 2 zijde t-waarde | Gemiddelde | Ondergrens | Bovengrens |
|-----------------|------------------|------------|------------|------------|
| 95% | 2.09 | -20.2% | -25.2% | -15.3% |
| 99% | 2.85 | -20.2% | -27.0% | -13.4% |

| | |
|------------------------------|----------|
| Gemiddelde fout | -20.2% |
| Gemiddelde absolute fout | 19.8% |
| Gemiddelde kwadratische fout | 5.08E-02 |

Figuur D2: Validatie van modeluitkomsten ledig scheepsgewicht bij bekende Td



| Betrouwbaarheid | 2 zijde t-waarde | Gemiddelde | Ondergrens | Bovengrens |
|-----------------|------------------|------------|------------|------------|
| 95% | 2.09 | -20.3% | -25.2% | -15.3% |
| 99% | 2.85 | -20.3% | -27.0% | -13.5% |

| | |
|------------------------------|----------|
| Gemiddelde fout | -20.3% |
| Gemiddelde absolute fout | 19.7% |
| Gemiddelde kwadratische fout | 5.02E-02 |

E. Toepassing methode Van Dorsser en Hekkenberg

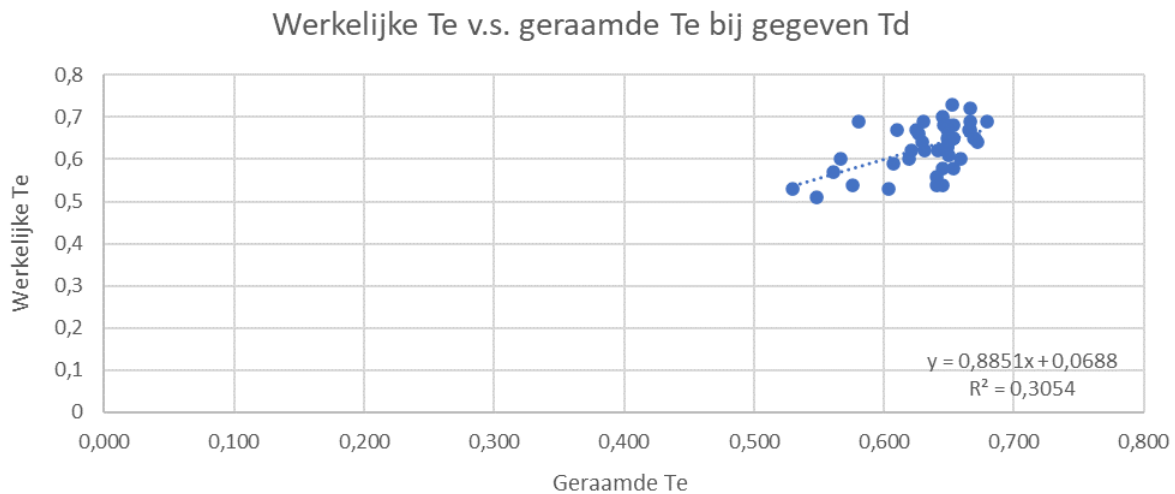
Het gebruik van de methoden van Van Dorsser et al. (2020) en Hekkenberg (2013) wordt pas relevant op het moment dat er onvoldoende bekend is om oplossing 1 t/m 13 uit paragraaf 3 toe te passen. In alle andere gevallen wordt het gebruik van oplossing 1 t/m 13 aanbevolen.

Mocht het nodig zijn om de LSW exogeen te ramen met Van Dorsser et al. (2020) en Hekkenberg (2013) dan hangt de keuze voor de toe te passen methode af van het al dan niet gangbaar zijn van de scheepsafmetingen. Voor de methode van Van Dorsser et al. (2020) is in Annex C vastgesteld dat deze voor schepen met de afmetingen vermeld in tabel C3 acceptabele resultaten oplevert. Omdat de binnenvaart veel standaard afmetingen kent is het wenselijk het toepassingsgebied iets ruimer te definiëren, bijvoorbeeld op 95% van de ondergrens en 105% van de bovengrens.

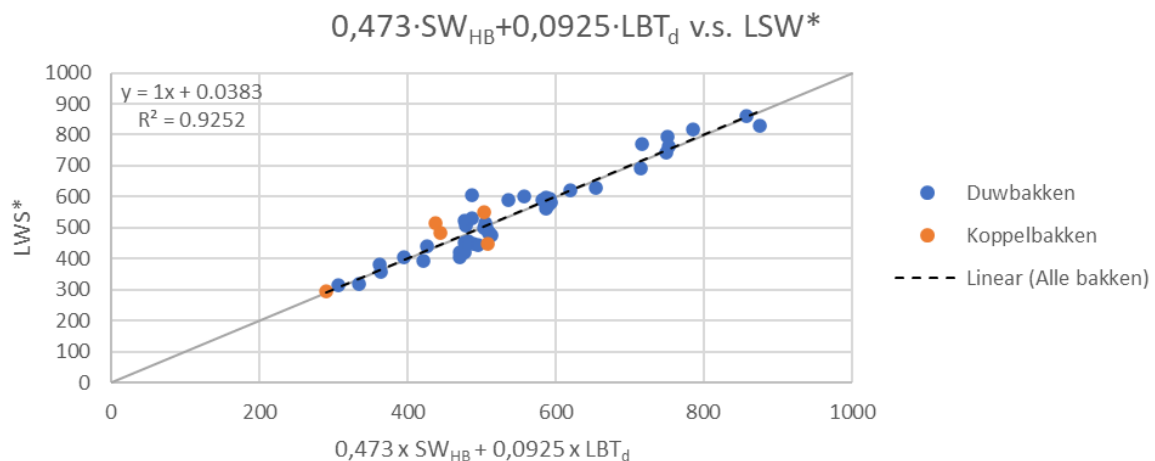
Als de afmetingen van het schip buiten de geregistreerde onder- en bovengrens van de in Tabel C3 vermelde waarden vallen dan kan de betrouwbaarheid van de ondersteunende modellen van Van Dorsser et al. (2020) niet langer worden gegarandeerd en wordt aanbevolen om het model van Hekkenberg (2013) toe te passen. In dit geval wordt de ontwerpdiepgang eerst geraamd met behulp van Van Dorsser et al. (2020) (tabel C1 met afkapwaarden) en wordt vervolgens de ledige diepgang (LSW) bepaald met de geavanceerde vuistregels van Hekkenberg (2013) en de aanname dat het gewicht van de accommodatie, equipment en outfitting niet meer dan 25% van het staalgewicht bedraagt (zie tabel D1). Zodra de LSW bepaald is volgt de T_e met behulp van c_b uit Annex A.

F. Bepalen ledig scheepsgewicht van duwbakken – nieuwe methode

Voor het ramen van het gewicht en de capaciteit van duwbakken kan voor oplossing 1 t/m 13 gebruik worden gemaakt van dezelfde methodiek als voor motorschepen, zij het dat er andere waarden voor c_b en β gehanteerd moeten worden voor duwbakken en koppelbakken. Voor oplossing 14 t/m 16 is het van belang om naast de T_d^* nog een tweede parameter exogeen te ramen. Dit kan voor T_e^* op basis van het ondersteunende model van Van Dorsser et al. (2020) zoals besproken in Annex C, maar die oplossing is niet bevredigend omdat de raming van de ledige diepgang alleen toepasbaar is voor schepen met gangbare afmetingen en omdat deze een relatief grote spreiding kent.



We hebben daarom gezocht naar een breder toepasbaar verband met een goede fit op basis van een schatting van het staalgewicht volgens Hekkenberg (2013) en een factor over de LBT_d .



Figuur G1: Gevonden verband voor het ramen van de LSW^* van duwbakken

Voor het ramen van het ledige scheepsgewicht van bakken wordt de volgende methode voorgesteld: (1) Bepaal de T_d aan de hand van tabel C1 en hanteer daarbij een minimum van 2,3 en een maximum van 5,0 meter; (2) Bepaal het staalgewicht volgens Hekkenberg (SW_{HB}) ware de duwbak een gewoon droog ladingschip; (3) Schat het ledige gewicht van de duwbak met de volgende formule:

$$LSW^* = 0.473 \cdot SW_{HB} + 0.0925 \cdot L \cdot B \cdot T_d$$

De methode is zowel toepasbaar op gewone duwbakken als op meer gevormde koppelbakken en kan worden toegepast voor het bepalen van de LSW^* in oplossing 14, 15 en 16.

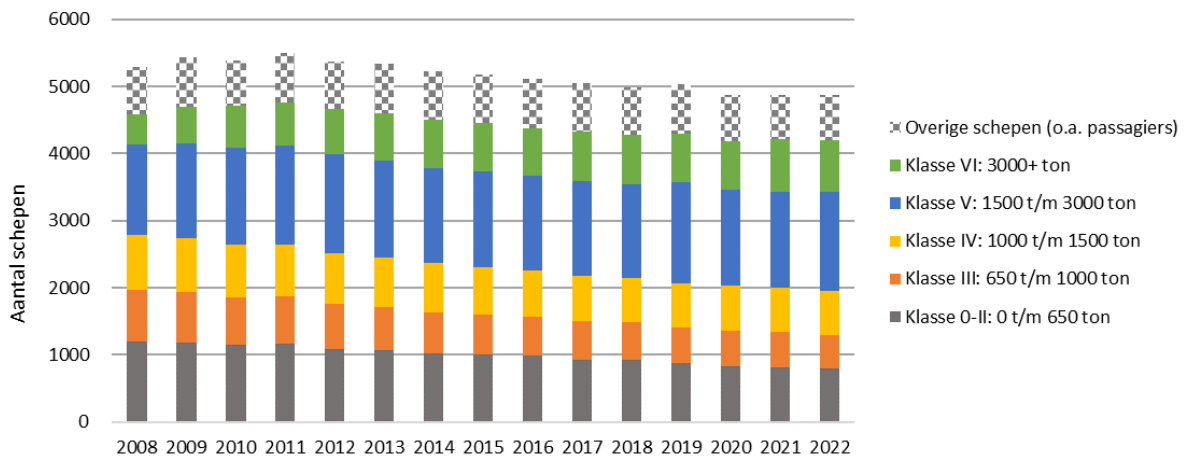
C Ontwikkeling en samenstelling van de actieve Nederlandse vloot op Nederlands grondgebied

Ontwikkeling en samenstelling van de actieve Nederlandse vloot op Nederlands grondgebied

Dr. Cornelis van Dorsser, 14 juni 2023, Koninklijke Binnenvaart Nederland.

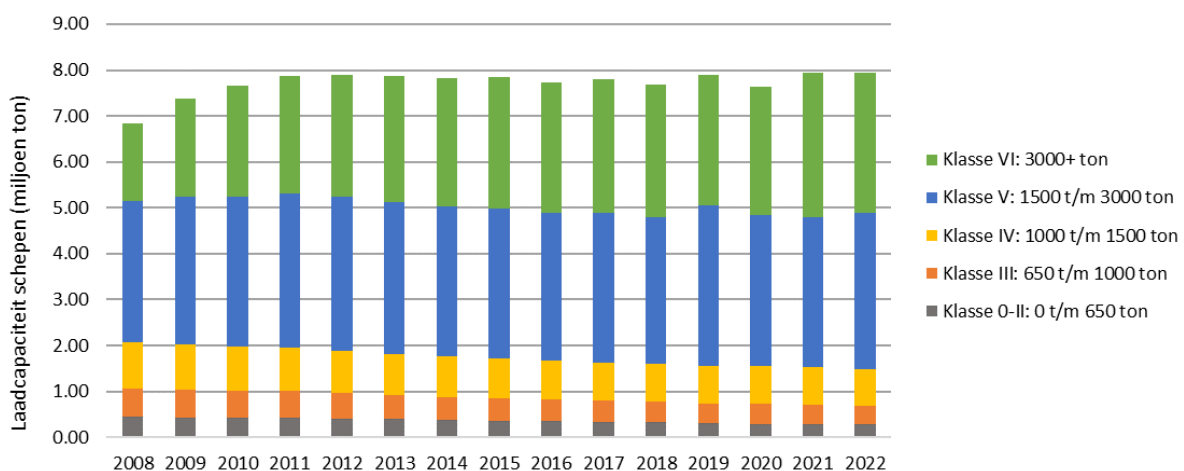
KBN hecht veel waarde aan goede cijfers over de binnenvaart. Recentelijk hebben we een viertal gegevensbestanden ontvangen die niet op Statline beschikbaar zijn maar waar het CBS wel over beschikt. Deze bestanden hebben betrekking op de Nederlandse schepen die in Nederland actief zijn. De data maakt onderscheid tussen motorvrachtschepen, vrachtbakken, motortankschepen, tankbakken en overige schepen. Deze schepen zijn ingedeeld naar grootteklassen op basis van tonnen laadvermogen. Deze notitie presenteert de geconsolideerde gegevens.

Totale actieve vloot naar globale grootteklasse



Figuur 1: In Nederland actieve Nederlandse schepen naar globale grootteklasse (aantal schepen)

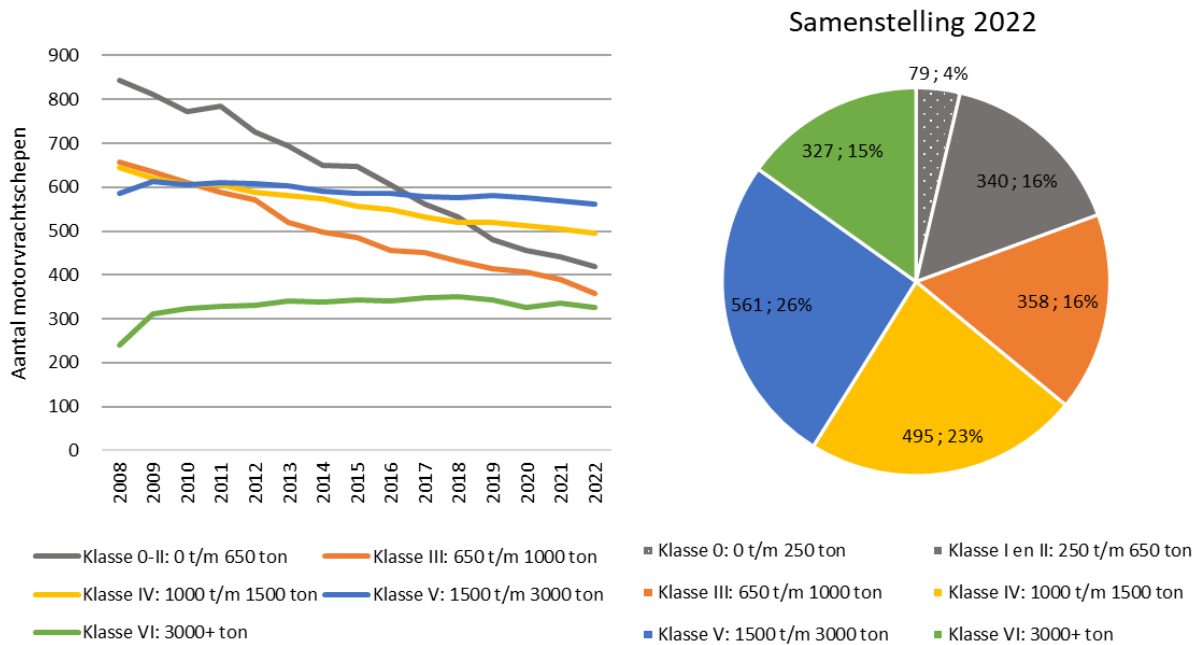
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.



Figuur 2: In Nederland actieve Nederlandse schepen naar globale grootteklasse (tonnen laadcapaciteit)

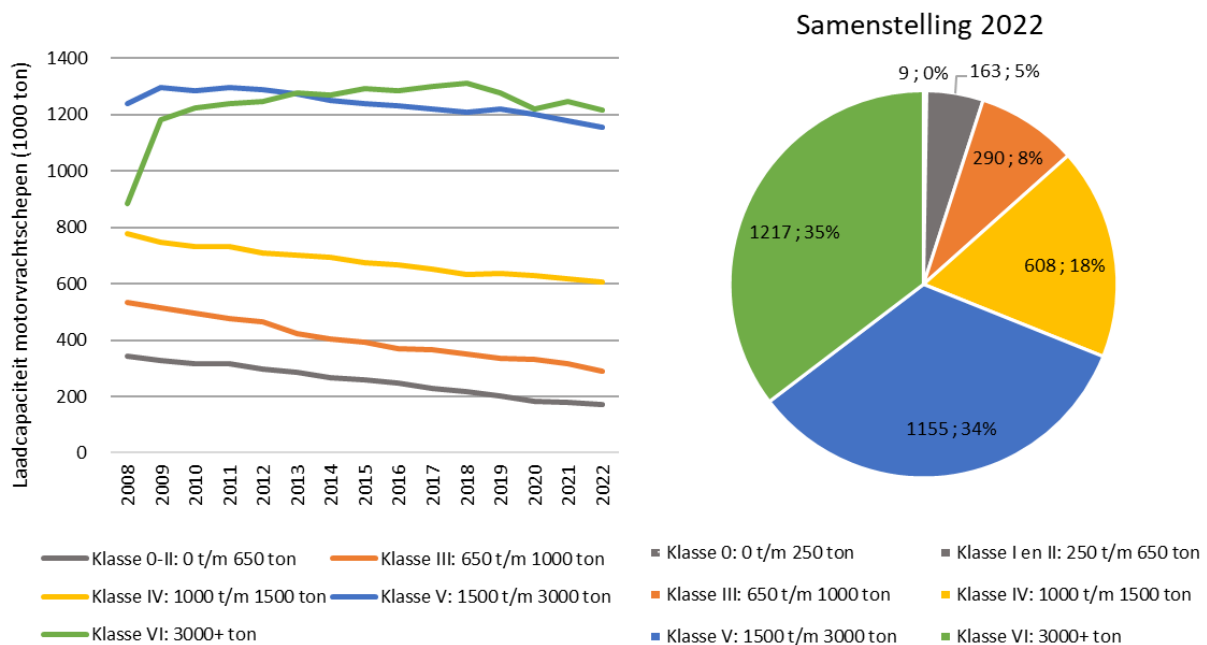
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.

Actieve motorvrachtschepen naar CEMT-klasse o.b.v. tonnage



Figuur 3: In NL actieve NL-motorvrachtschepen naar globale grootteklasse (aantal schepen)

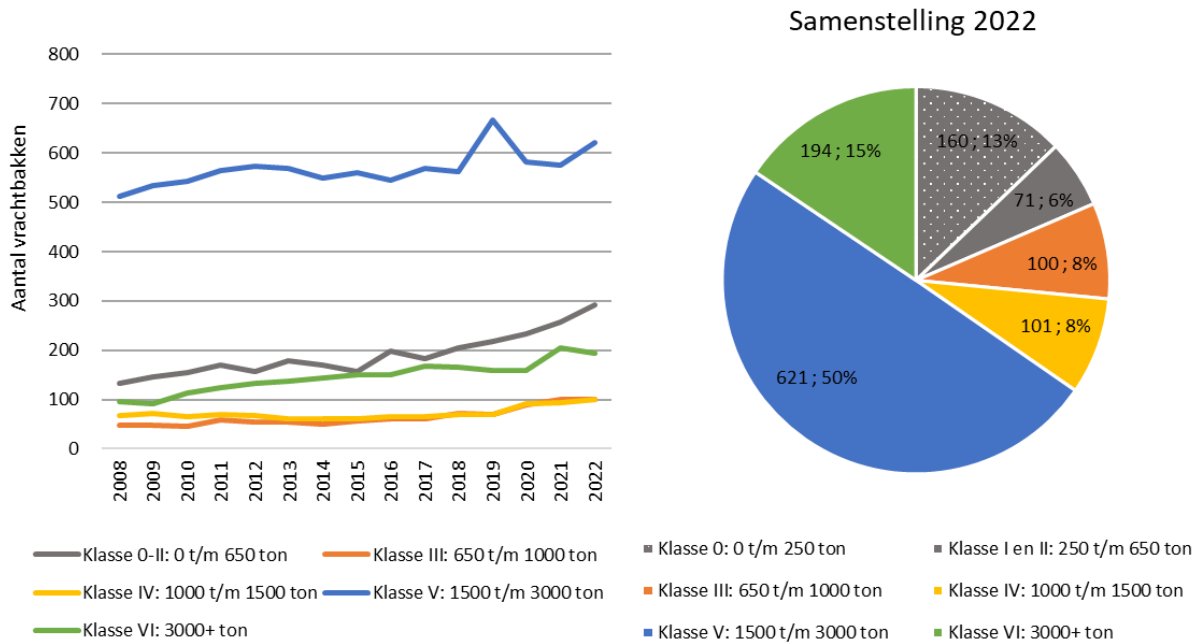
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.



Figuur 4: In NL actieve NL-motorvrachtschepen naar globale grootteklasse (tonnen laadcapaciteit)

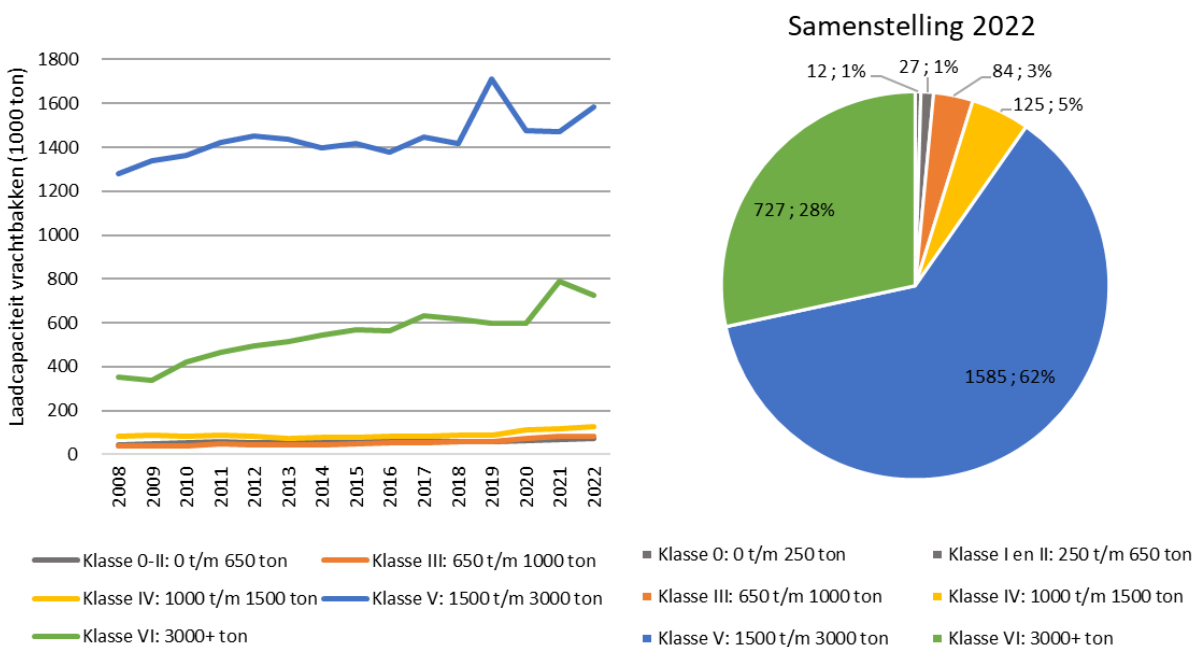
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.

Actieve vrachtbakken naar CEMT-klasse o.b.v. tonnage



Figuur 5: In NL actieve NL-vrachtbakken naar globale grootteklasse (aantal schepen)

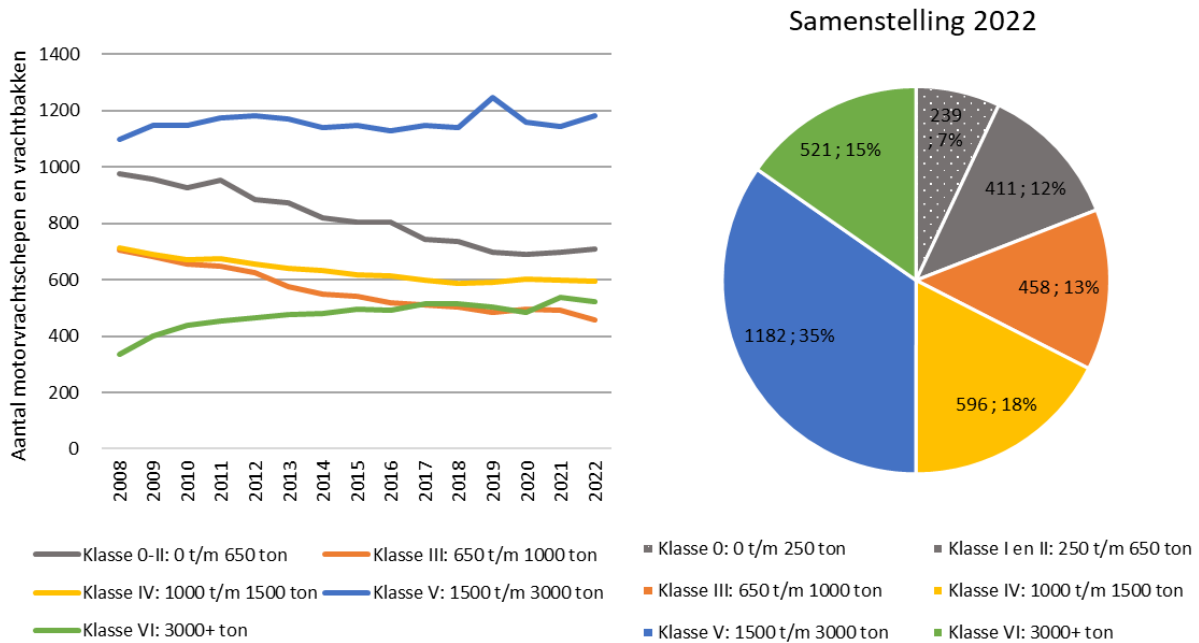
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.



Figuur 6: In NL actieve NL-vrachtbakken naar globale grootteklasse (tonnen laadcapaciteit)

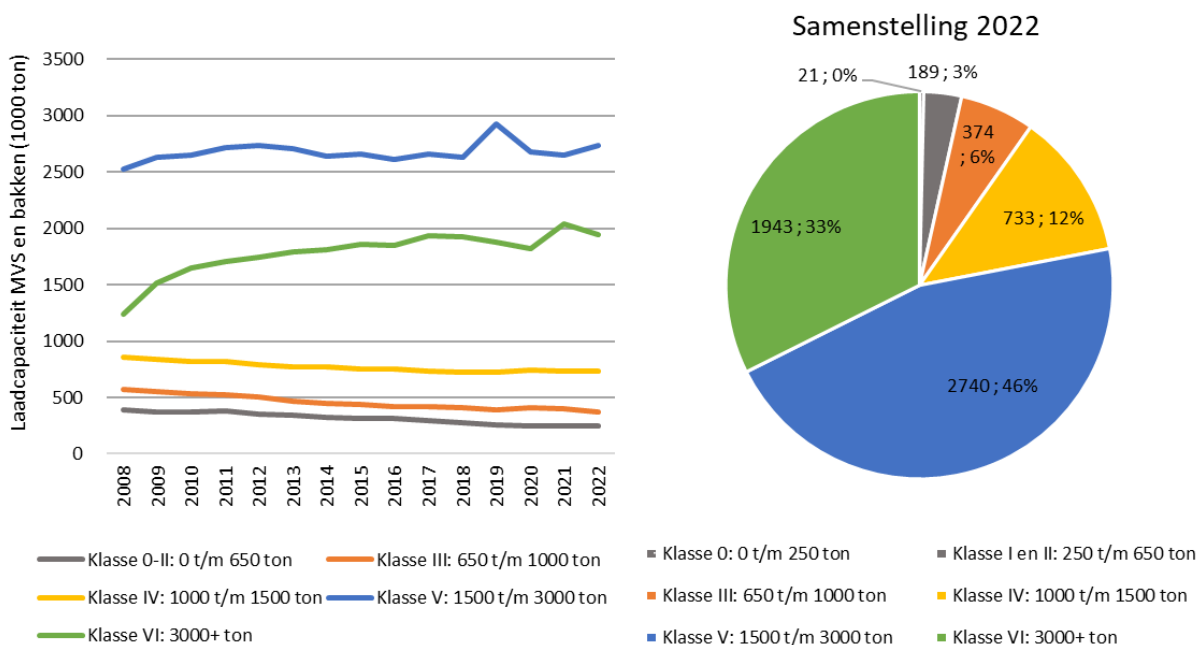
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.

Actieve motorvrachtschepen en vrachtbakken naar CEMT-klasse o.b.v. tonnage



Figuur 7: In NL actieve NL-vrachtschepen en bakken naar globale grootteklasse (aantal schepen)

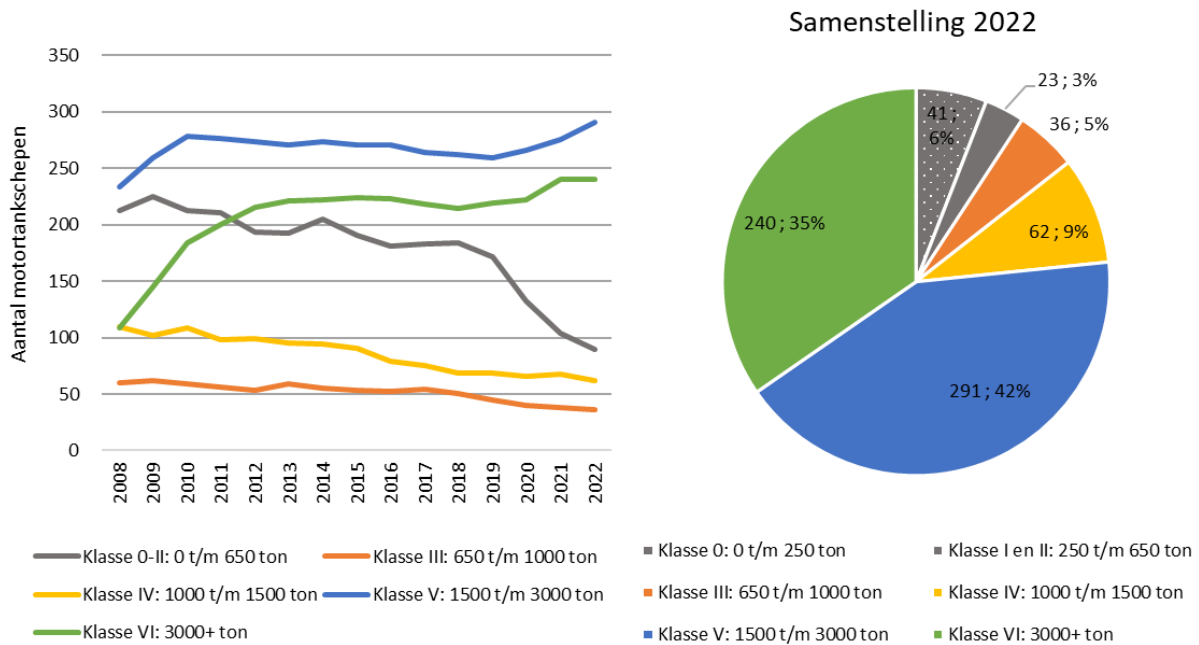
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.



Figuur 8: In NL actieve NL-vrachtschepen en bakken naar globale grootteklasse (tonnen laadcapaciteit)

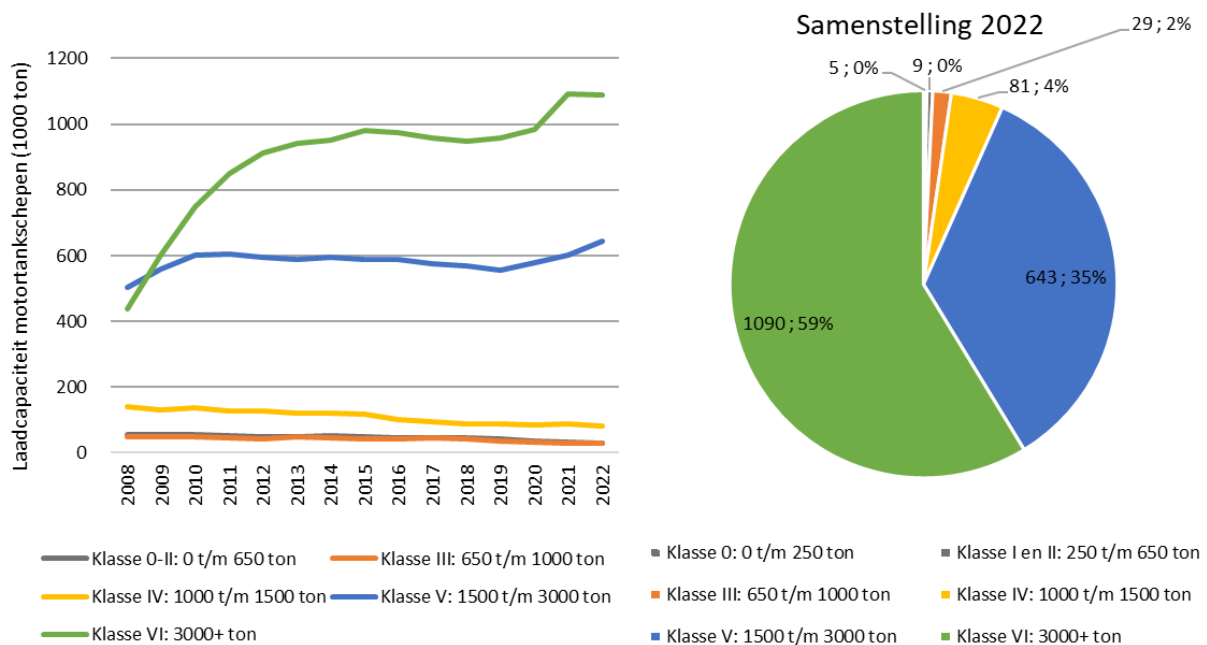
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.

Actieve motortankschepen naar CEMT-klasse o.b.v. tonnage



Figuur 9: In NL actieve NL-motortankschepen naar globale grootteklasse (aantal schepen)

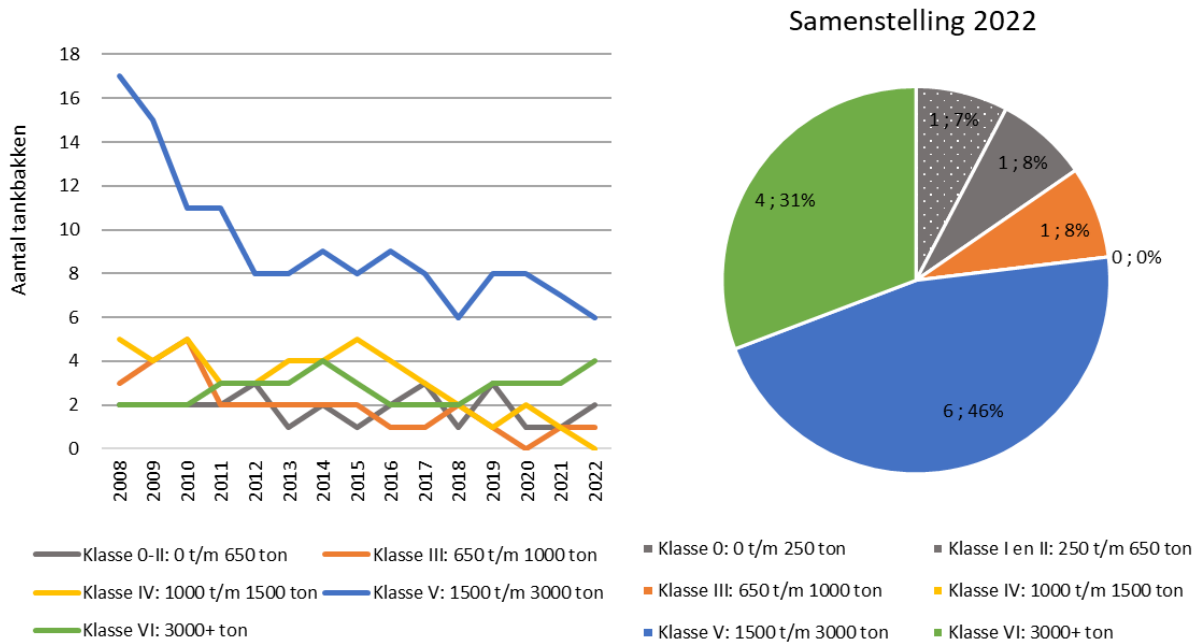
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.



Figuur 10: In NL actieve NL-motortankschepen naar globale grootteklasse (tonnen laadcapaciteit)

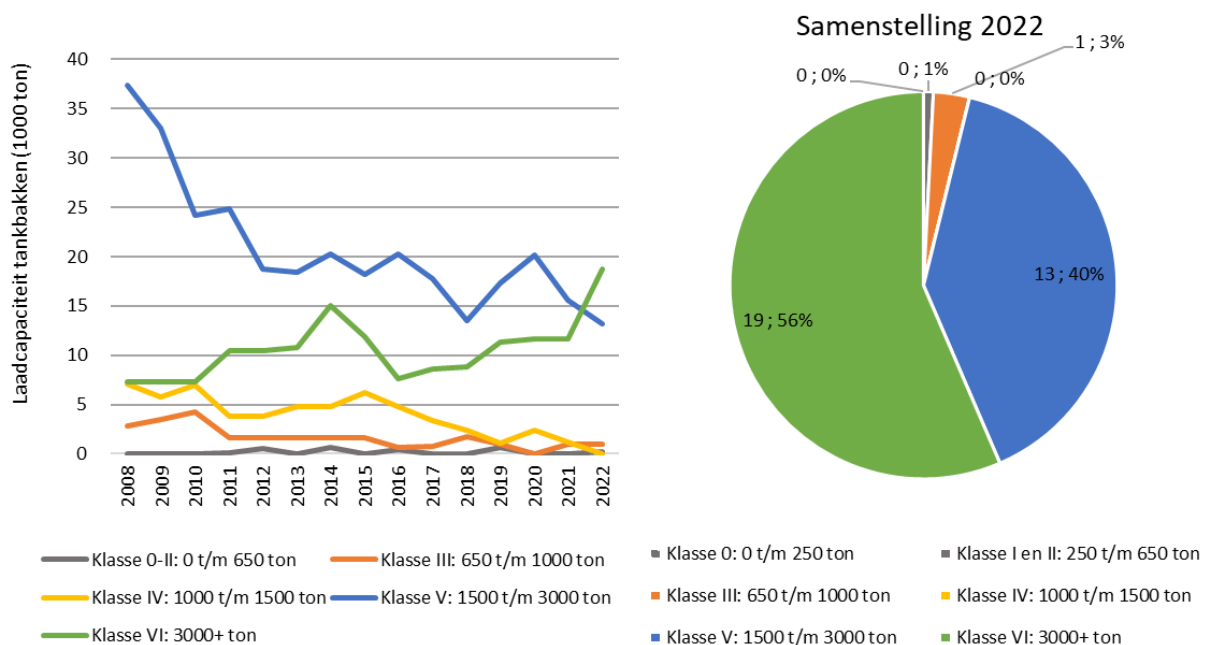
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.

Actieve tankbakken naar CEMT-klasse o.b.v. tonnage



Figuur 11: In NL actieve NL-tankbakken naar globale grootteklasse (aantal schepen)

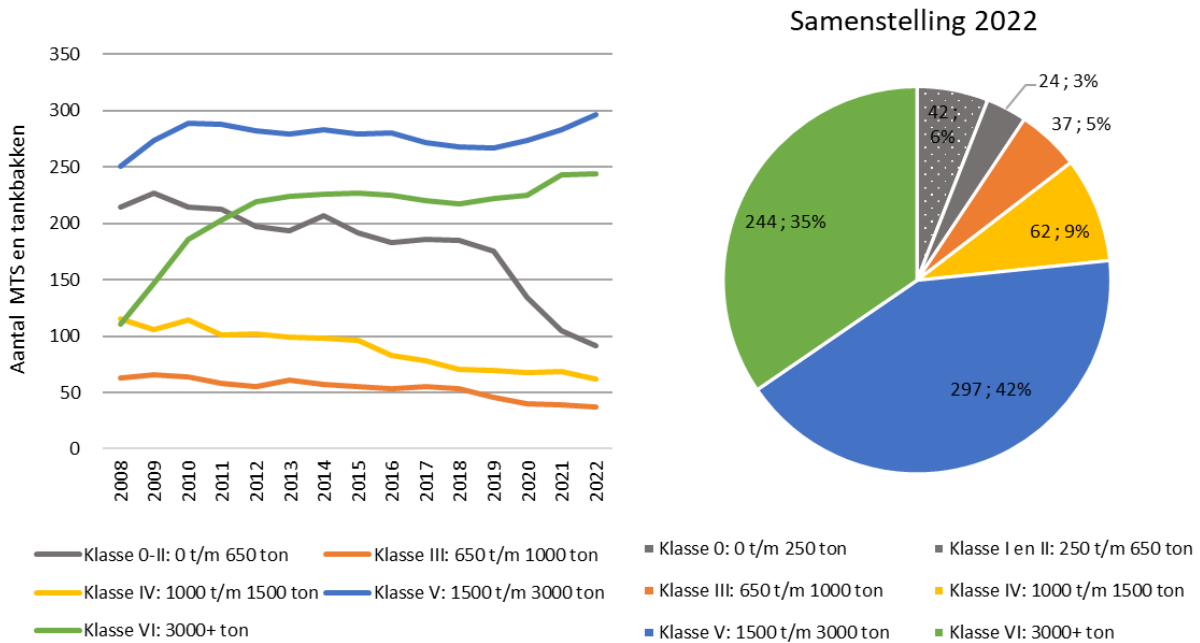
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.



Figuur 12: In NL actieve NL-tankbakken naar globale grootteklasse (tonnen laadcapaciteit)

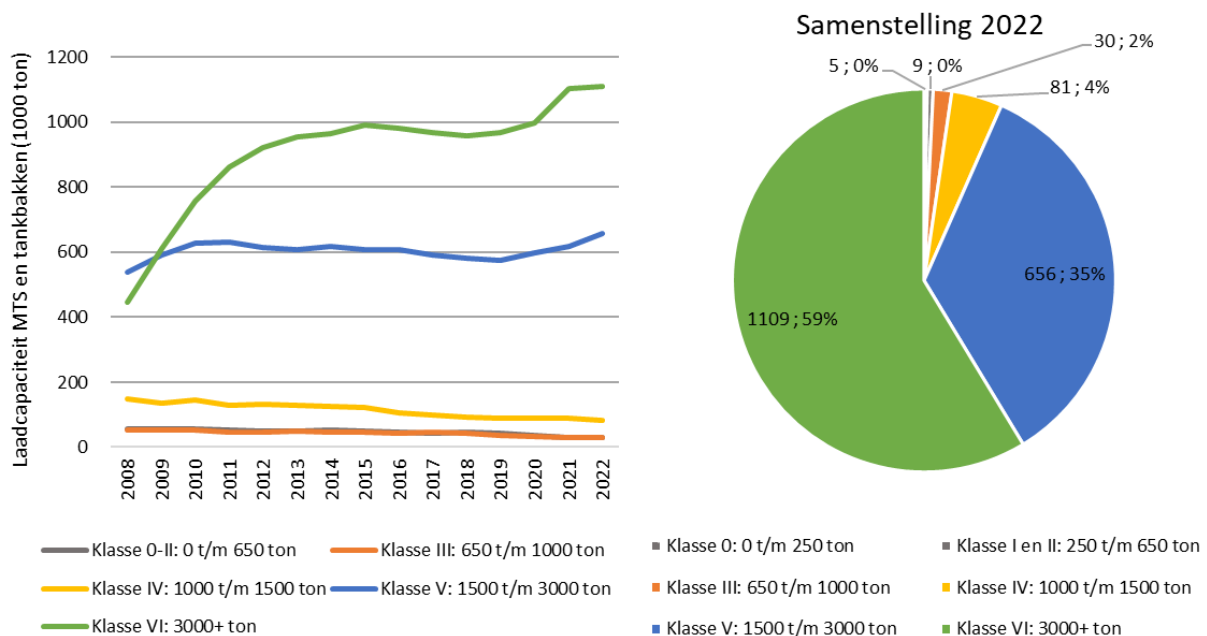
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.

Actieve motortankschepen en tankbakken naar CEMT-klasse o.b.v. tonnage



Figuur 13: In NL actieve NL-tankschepen en tankbakken naar globale grootteklasse (aantal schepen)

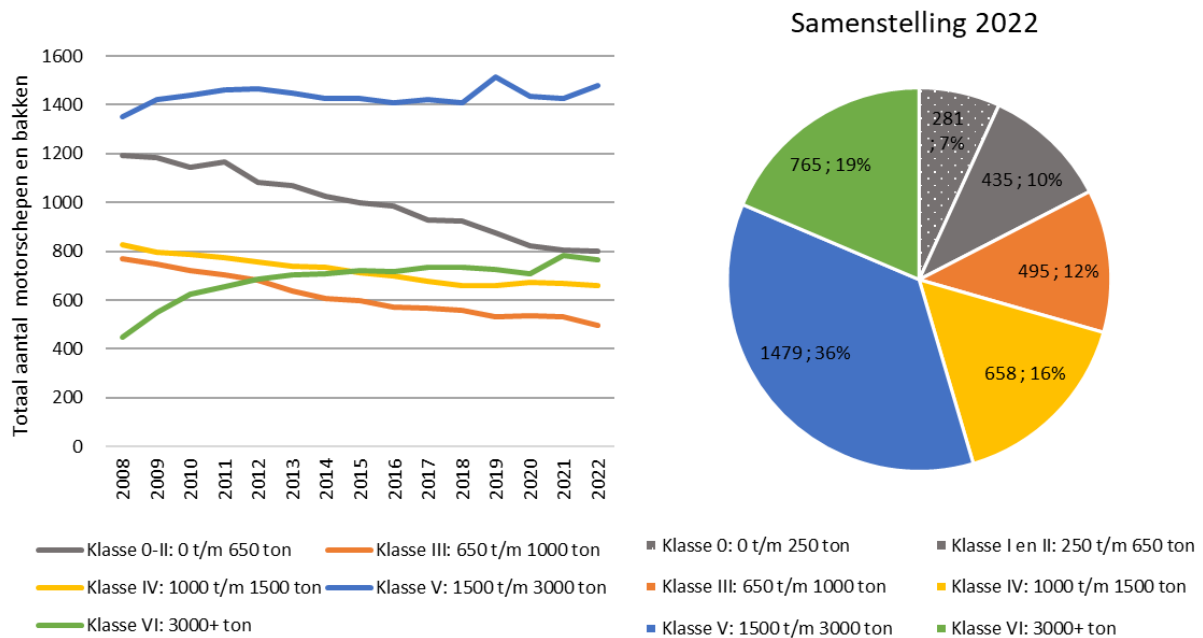
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.



Figuur 14: In NL actieve NL-tankschepen en tankbakken naar globale grootteklasse (tonnen laadcapaciteit)

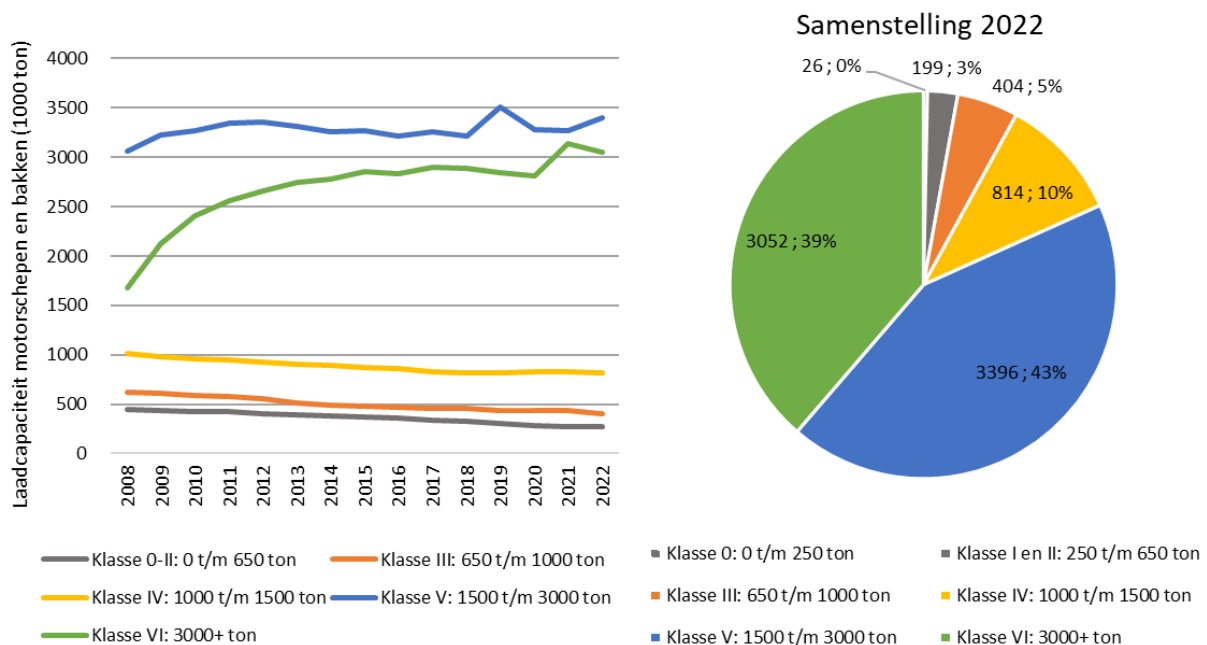
Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.

Actieve motorschepen en bakken naar CEMT-klasse o.b.v. tonnage



Figuur 15: In NL actieve NL-motorschepen en bakken naar globale grootteklasse (aantal schepen)

Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.



Figuur 16: In NL actieve NL-motorschepen en bakken naar globale grootteklasse (tonnen laadcapaciteit)

Bron: eigen bewerking van vier door CBS aangeleverde bronbestanden.

Geconsolideerde gegevens naar scheepstype en CEMT-klasse o.b.v. tonnage

| Motorvrachtschepen | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Aantal schepen | | | | | | | | | | | | | | | |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 83 | 96 | 89 | 79 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 398 | 359 | 352 | 340 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 843 | 812 | 773 | 784 | 727 | 695 | 650 | 647 | 605 | 561 | 533 | 481 | 455 | 441 | 419 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 658 | 636 | 611 | 588 | 572 | 521 | 498 | 485 | 457 | 451 | 431 | 414 | 408 | 391 | 358 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 645 | 620 | 606 | 605 | 588 | 580 | 573 | 556 | 549 | 533 | 520 | 520 | 512 | 504 | 495 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 586 | 614 | 606 | 610 | 609 | 603 | 591 | 587 | 585 | 579 | 577 | 580 | 577 | 569 | 561 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 240 | 311 | 324 | 329 | 332 | 340 | 338 | 343 | 341 | 347 | 351 | 343 | 325 | 335 | 327 |
| Totaal | 2972 | 2993 | 2920 | 2916 | 2828 | 2739 | 2650 | 2618 | 2537 | 2471 | 2412 | 2338 | 2277 | 2240 | 2160 |
| Laadcapaciteit (1000 ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 10 | 12 | 10 | 9 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 192 | 173 | 169 | 163 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 345 | 329 | 316 | 318 | 299 | 284 | 268 | 260 | 247 | 229 | 218 | 202 | 185 | 179 | 172 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 533 | 515 | 496 | 477 | 464 | 422 | 405 | 393 | 370 | 365 | 349 | 335 | 331 | 317 | 290 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 778 | 750 | 734 | 732 | 710 | 703 | 695 | 675 | 668 | 650 | 635 | 636 | 629 | 619 | 608 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 1242 | 1297 | 1284 | 1296 | 1288 | 1276 | 1250 | 1240 | 1230 | 1220 | 1211 | 1221 | 1203 | 1178 | 1155 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 886 | 1182 | 1224 | 1239 | 1247 | 1278 | 1269 | 1292 | 1285 | 1302 | 1311 | 1279 | 1222 | 1249 | 1217 |
| Totaal | 3783 | 4073 | 4054 | 4061 | 4008 | 3963 | 3887 | 3859 | 3801 | 3766 | 3725 | 3674 | 3570 | 3542 | 3441 |
| Gemiddelde capaciteit (ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 122 | 124 | 112 | 115 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 483 | 482 | 480 | 478 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 409 | 405 | 409 | 405 | 411 | 409 | 413 | 402 | 409 | 408 | 410 | 421 | 407 | 405 | 410 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 811 | 810 | 812 | 811 | 812 | 811 | 812 | 809 | 810 | 810 | 810 | 810 | 812 | 810 | 811 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 1207 | 1209 | 1211 | 1210 | 1208 | 1211 | 1212 | 1214 | 1217 | 1220 | 1221 | 1224 | 1229 | 1229 | 1228 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 2119 | 2113 | 2119 | 2124 | 2114 | 2116 | 2115 | 2113 | 2103 | 2107 | 2099 | 2105 | 2084 | 2071 | 2059 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 3690 | 3800 | 3776 | 3765 | 3755 | 3759 | 3754 | 3766 | 3768 | 3752 | 3735 | 3730 | 3759 | 3727 | 3721 |
| Totaal | 1273 | 1361 | 1388 | 1392 | 1417 | 1447 | 1467 | 1474 | 1498 | 1524 | 1544 | 1571 | 1568 | 1581 | 1593 |
| Vrachtbakken | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aantal schepen | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 113 | 125 | 141 | 160 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 62 | 54 | 56 | 71 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 133 | 145 | 154 | 170 | 157 | 178 | 169 | 158 | 199 | 183 | 204 | 218 | 234 | 257 | 291 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 49 | 47 | 45 | 59 | 54 | 54 | 51 | 56 | 62 | 62 | 73 | 70 | 89 | 101 | 100 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 67 | 71 | 65 | 70 | 68 | 60 | 62 | 61 | 66 | 66 | 69 | 70 | 91 | 93 | 101 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 512 | 535 | 543 | 565 | 574 | 568 | 550 | 560 | 544 | 570 | 562 | 667 | 583 | 575 | 621 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 95 | 91 | 113 | 124 | 133 | 138 | 144 | 151 | 151 | 167 | 165 | 159 | 160 | 204 | 194 |
| Totaal | 856 | 889 | 920 | 988 | 986 | 998 | 976 | 986 | 1022 | 1048 | 1073 | 1184 | 1157 | 1230 | 1307 |
| Laadcapaciteit (1000 ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 8 | 11 | 10 | 12 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 23 | 21 | 21 | 27 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 43 | 47 | 53 | 60 | 55 | 59 | 57 | 57 | 64 | 62 | 60 | 57 | 63 | 66 | 74 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 41 | 39 | 38 | 49 | 45 | 45 | 43 | 47 | 52 | 52 | 61 | 59 | 74 | 84 | 84 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 84 | 90 | 83 | 89 | 85 | 75 | 78 | 77 | 83 | 83 | 88 | 88 | 113 | 118 | 125 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 1282 | 1338 | 1363 | 1424 | 1450 | 1435 | 1396 | 1420 | 1379 | 1445 | 1419 | 1711 | 1478 | 1472 | 1585 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 353 | 336 | 423 | 465 | 495 | 515 | 547 | 570 | 566 | 635 | 617 | 598 | 596 | 788 | 727 |
| Totaal | 1803 | 1851 | 1959 | 2087 | 2131 | 2129 | 2120 | 2170 | 2144 | 2277 | 2244 | 2513 | 2324 | 2528 | 2595 |
| Gemiddelde capaciteit (ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 72 | 88 | 74 | 75 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 373 | 384 | 382 | 379 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 326 | 326 | 344 | 350 | 353 | 333 | 338 | 359 | 322 | 341 | 293 | 259 | 271 | 259 | 253 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 832 | 830 | 840 | 838 | 838 | 836 | 847 | 837 | 837 | 847 | 838 | 850 | 830 | 830 | 843 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 1260 | 1273 | 1272 | 1265 | 1252 | 1243 | 1258 | 1256 | 1255 | 1252 | 1271 | 1262 | 1245 | 1265 | 1239 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 2504 | 2501 | 2510 | 2521 | 2526 | 2527 | 2537 | 2535 | 2534 | 2535 | 2525 | 2565 | 2534 | 2560 | 2552 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 3716 | 3695 | 3746 | 3750 | 3721 | 3731 | 3795 | 3774 | 3749 | 3802 | 3737 | 3761 | 3726 | 3861 | 3746 |
| Totaal | 2107 | 2082 | 2130 | 2112 | 2161 | 2133 | 2173 | 2201 | 2098 | 2173 | 2091 | 2122 | 2009 | 2055 | 1985 |

| Motorvrachtschepen en vrachtbakken | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Aantal schepen | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 196 | 221 | 230 | 239 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 460 | 413 | 408 | 411 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 976 | 957 | 927 | 954 | 884 | 873 | 819 | 805 | 804 | 744 | 737 | 699 | 689 | 698 | 710 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 707 | 683 | 656 | 647 | 626 | 575 | 549 | 541 | 519 | 513 | 504 | 484 | 497 | 492 | 458 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 712 | 691 | 671 | 675 | 656 | 640 | 635 | 617 | 615 | 599 | 589 | 590 | 603 | 597 | 596 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 1098 | 1149 | 1149 | 1175 | 1183 | 1171 | 1141 | 1147 | 1129 | 1149 | 1139 | 1247 | 1160 | 1144 | 1182 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 335 | 402 | 437 | 453 | 465 | 478 | 482 | 494 | 492 | 514 | 516 | 502 | 485 | 539 | 521 |
| Totaal | 3828 | 3882 | 3840 | 3904 | 3814 | 3737 | 3626 | 3604 | 3559 | 3519 | 3485 | 3522 | 3434 | 3470 | 3467 |
| Laadcapaciteit (1000 ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 18 | 23 | 20 | 21 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 215 | 194 | 190 | 189 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 388 | 376 | 369 | 377 | 355 | 344 | 325 | 317 | 311 | 291 | 278 | 259 | 248 | 245 | 245 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 574 | 554 | 534 | 526 | 509 | 468 | 448 | 439 | 422 | 418 | 410 | 395 | 405 | 401 | 374 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 863 | 840 | 817 | 820 | 795 | 777 | 773 | 751 | 733 | 723 | 725 | 743 | 743 | 737 | 733 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 2523 | 2635 | 2647 | 2720 | 2737 | 2711 | 2646 | 2660 | 2609 | 2665 | 2630 | 2931 | 2680 | 2650 | 2740 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 1239 | 1518 | 1647 | 1704 | 1742 | 1793 | 1815 | 1861 | 1851 | 1937 | 1928 | 1877 | 1818 | 2036 | 1943 |
| Totaal | 5587 | 5924 | 6014 | 6147 | 6138 | 6093 | 6007 | 6029 | 5945 | 6044 | 5969 | 6187 | 5894 | 6070 | 6036 |
| Gemiddelde capaciteit (ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 93 | 104 | 89 | 88 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 468 | 469 | 466 | 461 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 398 | 393 | 399 | 395 | 401 | 394 | 397 | 394 | 387 | 391 | 377 | 370 | 360 | 351 | 345 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 812 | 811 | 814 | 813 | 814 | 813 | 816 | 812 | 813 | 814 | 814 | 816 | 815 | 815 | 818 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 1212 | 1215 | 1217 | 1215 | 1212 | 1214 | 1217 | 1218 | 1221 | 1224 | 1227 | 1228 | 1231 | 1234 | 1230 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 2298 | 2293 | 2303 | 2315 | 2314 | 2315 | 2319 | 2319 | 2311 | 2319 | 2309 | 2351 | 2310 | 2317 | 2318 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 3697 | 3776 | 3769 | 3761 | 3745 | 3751 | 3766 | 3768 | 3762 | 3768 | 3736 | 3739 | 3748 | 3778 | 3730 |
| Totaal | 1459 | 1526 | 1566 | 1575 | 1609 | 1630 | 1657 | 1673 | 1670 | 1717 | 1713 | 1757 | 1716 | 1749 | 1741 |

| Motortankschepen | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Aantal schepen | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 113 | 78 | 53 | 41 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 32 | 29 | 24 | 23 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 213 | 225 | 213 | 211 | 194 | 193 | 205 | 191 | 181 | 183 | 184 | 172 | 133 | 104 | 90 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 60 | 62 | 59 | 56 | 53 | 59 | 55 | 53 | 52 | 54 | 51 | 45 | 40 | 38 | 36 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 110 | 102 | 109 | 98 | 99 | 95 | 94 | 91 | 79 | 75 | 69 | 69 | 66 | 68 | 62 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 234 | 259 | 278 | 277 | 274 | 271 | 274 | 271 | 264 | 262 | 259 | 266 | 276 | 291 | |
| Klasse VI: 3000+ ton | 109 | 145 | 184 | 200 | 216 | 221 | 222 | 224 | 223 | 218 | 215 | 219 | 222 | 240 | 240 |
| Totaal | 726 | 793 | 843 | 842 | 836 | 839 | 850 | 830 | 806 | 794 | 781 | 764 | 727 | 726 | 719 |
| Laadcapaciteit (1000 ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 14 | 9 | 6 | 5 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 12 | 11 | 9 | 9 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 57 | 57 | 56 | 53 | 50 | 50 | 52 | 50 | 47 | 45 | 46 | 42 | 36 | 31 | 29 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 49 | 50 | 48 | 46 | 43 | 48 | 45 | 43 | 43 | 44 | 41 | 36 | 32 | 30 | 29 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 141 | 131 | 139 | 126 | 127 | 122 | 121 | 117 | 101 | 96 | 89 | 89 | 85 | 88 | 81 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 503 | 558 | 602 | 606 | 596 | 588 | 597 | 588 | 574 | 567 | 556 | 578 | 602 | 643 | |
| Klasse VI: 3000+ ton | 438 | 603 | 749 | 851 | 912 | 943 | 951 | 980 | 975 | 959 | 948 | 958 | 985 | 1091 | 1090 |
| Totaal | 1187 | 1398 | 1594 | 1682 | 1729 | 1752 | 1765 | 1779 | 1755 | 1718 | 1692 | 1682 | 1717 | 1842 | 1872 |
| Gemiddelde capaciteit (ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 120 | 120 | 119 | 126 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 389 | 391 | 388 | 396 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 267 | 252 | 261 | 252 | 259 | 260 | 252 | 262 | 259 | 243 | 248 | 242 | 269 | 301 | 325 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 810 | 812 | 816 | 816 | 815 | 820 | 819 | 820 | 823 | 822 | 803 | 810 | 807 | 793 | 793 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 1281 | 1280 | 1274 | 1289 | 1287 | 1288 | 1291 | 1290 | 1283 | 1282 | 1294 | 1296 | 1294 | 1288 | 1308 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 2148 | 2154 | 2166 | 2187 | 2175 | 2170 | 2177 | 2172 | 2171 | 2176 | 2166 | 2147 | 2174 | 2181 | 2209 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 4015 | 4157 | 4073 | 4256 | 4224 | 4266 | 4282 | 4374 | 4373 | 4398 | 4411 | 4376 | 4439 | 4546 | 4541 |
| Totaal | 1635 | 1763 | 1891 | 1998 | 2068 | 2088 | 2077 | 2143 | 2177 | 2164 | 2166 | 2201 | 2362 | 2537 | 2603 |

| Tankbakken | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Aantal schepen | | | | | | | | | | | | | | | |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 2 | 1 | 1 | 1 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 3 | 4 | 5 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 5 | 4 | 5 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 17 | 15 | 11 | 11 | 8 | 8 | 9 | 8 | 9 | 8 | 6 | 8 | 8 | 7 | 6 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| Totaal | 29 | 27 | 25 | 21 | 19 | 18 | 21 | 19 | 18 | 17 | 13 | 16 | 14 | 13 | 13 |
| Laadcapaciteit (1000 ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 7 | 6 | 7 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 5 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 37 | 33 | 24 | 25 | 19 | 18 | 20 | 18 | 20 | 18 | 14 | 17 | 20 | 16 | 13 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 7 | 7 | 7 | 11 | 11 | 11 | 15 | 12 | 8 | 9 | 9 | 11 | 12 | 12 | 19 |
| Totaal | 55 | 50 | 43 | 41 | 35 | 36 | 42 | 38 | 34 | 30 | 26 | 31 | 34 | 29 | 33 |
| Gemiddelde capaciteit (ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 5 | 0 | 0 | 0 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | nvt | nvt | nvt | 270 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 0 | 0 | 0 | 39 | 176 | 0 | 300 | 0 | 241 | 0 | 0 | 204 | 0 | 0 | 135 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 954 | 885 | 855 | 812 | 812 | 812 | 841 | 841 | 677 | 735 | 868 | 1000 | nvt | 1000 | 1000 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 1418 | 1435 | 1393 | 1271 | 1271 | 1204 | 1204 | 1238 | 1204 | 1116 | 1174 | 1120 | 1222 | 1217 | nvt |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 2199 | 2201 | 2202 | 2257 | 2350 | 2303 | 2246 | 2276 | 2246 | 2218 | 2252 | 2164 | 2525 | 2224 | 2192 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 3637 | 3637 | 3637 | 3505 | 3505 | 3584 | 3754 | 3952 | 3795 | 4308 | 4413 | 3775 | 3897 | 3903 | 4676 |
| Totaal | 1883 | 1836 | 1710 | 1945 | 1857 | 1979 | 2016 | 1997 | 1877 | 1791 | 2032 | 1960 | 2452 | 2269 | 2548 |

| Motortankschepen en tankbakken | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Aantal schepen | | | | | | | | | | | | | | | |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 115 | 79 | 54 | 42 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 32 | 29 | 24 | 24 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 215 | 227 | 215 | 213 | 197 | 194 | 207 | 192 | 183 | 186 | 185 | 175 | 134 | 105 | 92 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 63 | 66 | 64 | 58 | 55 | 61 | 57 | 55 | 53 | 55 | 53 | 46 | 40 | 39 | 37 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 115 | 106 | 114 | 101 | 102 | 99 | 98 | 96 | 83 | 78 | 71 | 70 | 68 | 69 | 62 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 251 | 274 | 289 | 288 | 282 | 279 | 283 | 279 | 280 | 272 | 268 | 267 | 274 | 283 | 297 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 111 | 147 | 186 | 203 | 219 | 224 | 226 | 227 | 225 | 220 | 217 | 222 | 225 | 243 | 244 |
| Totaal | 755 | 820 | 868 | 863 | 855 | 857 | 871 | 849 | 824 | 811 | 794 | 780 | 741 | 739 | 732 |
| Laadcapaciteit (1000 ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 14 | 9 | 6 | 5 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 12 | 11 | 9 | 9 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 57 | 57 | 56 | 53 | 51 | 50 | 52 | 50 | 47 | 45 | 46 | 42 | 36 | 31 | 30 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 51 | 54 | 52 | 47 | 45 | 50 | 47 | 45 | 43 | 45 | 43 | 37 | 32 | 31 | 30 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 148 | 136 | 146 | 130 | 131 | 127 | 126 | 124 | 106 | 100 | 92 | 91 | 88 | 89 | 81 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 540 | 591 | 626 | 631 | 615 | 606 | 617 | 607 | 609 | 592 | 581 | 573 | 599 | 617 | 656 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 445 | 610 | 757 | 862 | 923 | 953 | 966 | 992 | 983 | 967 | 957 | 970 | 997 | 1103 | 1109 |
| Totaal | 1241 | 1447 | 1637 | 1723 | 1764 | 1787 | 1807 | 1817 | 1788 | 1749 | 1718 | 1713 | 1752 | 1871 | 1905 |
| Gemiddelde capaciteit (ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 118 | 118 | 117 | 123 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 389 | 391 | 388 | 390 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 265 | 249 | 258 | 250 | 257 | 259 | 252 | 260 | 259 | 239 | 247 | 241 | 267 | 298 | 321 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 817 | 816 | 819 | 816 | 815 | 820 | 820 | 821 | 820 | 821 | 806 | 814 | 807 | 798 | 799 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 1287 | 1286 | 1279 | 1289 | 1287 | 1285 | 1288 | 1287 | 1279 | 1276 | 1291 | 1294 | 1292 | 1287 | 1308 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 2152 | 2156 | 2167 | 2189 | 2180 | 2174 | 2179 | 2175 | 2174 | 2177 | 2168 | 2148 | 2185 | 2182 | 2209 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 4008 | 4149 | 4068 | 4245 | 4214 | 4257 | 4272 | 4368 | 4367 | 4397 | 4411 | 4368 | 4432 | 4538 | 4543 |
| Totaal | 1644 | 1765 | 1886 | 1996 | 2064 | 2086 | 2075 | 2140 | 2170 | 2156 | 2164 | 2196 | 2364 | 2532 | 2602 |

| Totaal motorschepen en bakken | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Aantal schepen | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 311 | 300 | 284 | 281 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 492 | 442 | 432 | 435 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 1191 | 1184 | 1142 | 1167 | 1081 | 1067 | 1026 | 997 | 987 | 930 | 922 | 874 | 823 | 803 | 802 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 770 | 749 | 720 | 705 | 681 | 636 | 606 | 596 | 572 | 568 | 557 | 530 | 537 | 531 | 495 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 827 | 797 | 785 | 776 | 758 | 739 | 733 | 713 | 698 | 677 | 660 | 660 | 671 | 666 | 658 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 1349 | 1423 | 1438 | 1463 | 1465 | 1450 | 1424 | 1426 | 1409 | 1421 | 1407 | 1514 | 1434 | 1427 | 1479 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 446 | 549 | 623 | 656 | 684 | 702 | 708 | 721 | 717 | 734 | 733 | 724 | 710 | 782 | 765 |
| Totaal vracht en tankvaart | 4583 | 4702 | 4708 | 4767 | 4669 | 4594 | 4497 | 4453 | 4383 | 4330 | 4279 | 4302 | 4175 | 4209 | 4199 |
| Motorvrachtschepen | 2972 | 2993 | 2920 | 2916 | 2828 | 2739 | 2650 | 2618 | 2537 | 2471 | 2412 | 2338 | 2277 | 2240 | 2160 |
| Vrachtschepen | 856 | 889 | 920 | 988 | 986 | 998 | 976 | 986 | 1022 | 1048 | 1073 | 1184 | 1157 | 1230 | 1307 |
| Motortankschepen | 726 | 793 | 843 | 842 | 836 | 839 | 850 | 830 | 806 | 794 | 781 | 764 | 727 | 726 | 719 |
| Tankbakken | 29 | 27 | 25 | 21 | 19 | 18 | 21 | 19 | 18 | 17 | 13 | 16 | 14 | 13 | 13 |
| Subtotaal | 4583 | 4702 | 4708 | 4767 | 4669 | 4594 | 4497 | 4453 | 4383 | 4330 | 4279 | 4302 | 4175 | 4209 | 4199 |
| Overige schepen (o.a. passagiers) | 707 | 735 | 674 | 735 | 708 | 745 | 733 | 728 | 724 | 728 | 710 | 740 | 693 | 661 | 667 |
| Totaal | 5290 | 5437 | 5382 | 5502 | 5377 | 5339 | 5230 | 5181 | 5107 | 5058 | 4989 | 5042 | 4868 | 4870 | 4866 |
| Aandeel vrachtvaart | 72% | 71% | 71% | 71% | 71% | 70% | 69% | 70% | 70% | 70% | 70% | 70% | 71% | 71% | 71% |
| Aandeel tankvaart | 14% | 15% | 16% | 16% | 16% | 16% | 17% | 16% | 16% | 16% | 16% | 15% | 15% | 15% | 15% |
| Aandeel overig | 13% | 14% | 13% | 13% | 13% | 14% | 14% | 14% | 14% | 14% | 14% | 15% | 14% | 14% | 14% |
| Laadcapaciteit (1000 ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 32 | 32 | 27 | 26 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 228 | 205 | 200 | 199 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 445 | 433 | 425 | 430 | 405 | 394 | 378 | 367 | 359 | 336 | 324 | 301 | 284 | 277 | 275 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 626 | 608 | 586 | 573 | 554 | 518 | 494 | 485 | 466 | 463 | 453 | 432 | 438 | 432 | 404 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 1011 | 976 | 963 | 951 | 927 | 904 | 899 | 875 | 857 | 833 | 814 | 815 | 830 | 826 | 814 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 3063 | 3226 | 3273 | 3350 | 3352 | 3318 | 3263 | 3267 | 3218 | 3257 | 3211 | 3505 | 3279 | 3268 | 3396 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 1684 | 2128 | 2403 | 2566 | 2664 | 2747 | 2781 | 2853 | 2834 | 2904 | 2885 | 2847 | 2815 | 3139 | 3052 |
| Totaal | 6828 | 7371 | 7650 | 7870 | 7903 | 7880 | 7815 | 7846 | 7733 | 7792 | 7687 | 7900 | 7646 | 7941 | 7941 |
| Motorvrachtschepen | 3783 | 4073 | 4054 | 4061 | 4008 | 3963 | 3887 | 3859 | 3801 | 3766 | 3725 | 3674 | 3570 | 3542 | 3441 |
| Vrachtschepen | 1803 | 1851 | 1959 | 2087 | 2131 | 2129 | 2120 | 2170 | 2144 | 2277 | 2244 | 2513 | 2324 | 2528 | 2595 |
| Motortankschepen | 1187 | 1398 | 1594 | 1682 | 1729 | 1752 | 1765 | 1779 | 1755 | 1718 | 1692 | 1682 | 1717 | 1842 | 1872 |
| Tankbakken | 55 | 50 | 43 | 41 | 35 | 36 | 42 | 38 | 34 | 30 | 26 | 31 | 34 | 29 | 33 |
| Subtotaal | 6828 | 7371 | 7650 | 7870 | 7903 | 7880 | 7815 | 7846 | 7733 | 7792 | 7687 | 7900 | 7646 | 7941 | 7941 |
| Overige schepen (o.a. passagiers) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Totaal | 6828 | 7371 | 7650 | 7870 | 7903 | 7880 | 7815 | 7846 | 7733 | 7792 | 7687 | 7900 | 7646 | 7941 | 7941 |
| Aandeel vrachtvaart | 82% | 80% | 79% | 78% | 78% | 77% | 77% | 77% | 77% | 78% | 78% | 78% | 77% | 76% | 76% |
| Aandeel tankvaart | 18% | 20% | 21% | 22% | 22% | 23% | 23% | 23% | 23% | 22% | 22% | 22% | 23% | 24% | 24% |
| Aandeel overig | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Gemiddelde capaciteit (ton) | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Klasse 0: 0 t/m 250 ton | | | | | | | | | | | | 102 | 108 | 94 | 93 |
| Klasse I en II: 250 t/m 650 ton | | | | | | | | | | | | 463 | 464 | 462 | 457 |
| Klasse 0-II: 0 t/m 650 ton | 374 | 366 | 372 | 369 | 375 | 369 | 368 | 368 | 363 | 361 | 351 | 344 | 345 | 344 | 343 |
| Klasse III: 650 t/m 1000 ton | 812 | 812 | 814 | 813 | 814 | 814 | 816 | 813 | 814 | 815 | 814 | 816 | 815 | 813 | 816 |
| Klasse IV: 1000 t/m 1500 ton | 1222 | 1225 | 1226 | 1225 | 1222 | 1224 | 1226 | 1227 | 1228 | 1230 | 1234 | 1235 | 1238 | 1240 | 1237 |
| Klasse V: 1500 t/m 3000 ton | 2271 | 2267 | 2276 | 2290 | 2288 | 2288 | 2291 | 2291 | 2284 | 2292 | 2282 | 2315 | 2286 | 2290 | 2296 |
| Klasse VI: 3000+ ton | 3775 | 3876 | 3858 | 3911 | 3895 | 3913 | 3928 | 3957 | 3952 | 3957 | 3936 | 3932 | 3965 | 4014 | 3989 |
| Totaal | 1490 | 1568 | 1625 | 1651 | 1693 | 1715 | 1738 | 1762 | 1764 | 1800 | 1796 | 1836 | 1831 | 1887 | 1891 |

D Beschikbare data

Over het geheel ontbreekt het in Europa aan een eenduidige dataset van beschikbare en actieve schepen. Ook verschilt de wijze van registratie in Europa per land.

- CBS heeft gegevens beschikbaar voor Nederland op basis van IVS. Op basis hiervan vermeld rapporteert zij aan Eurostat het aantal actieve schepen op Nederlands grondgebied dat in een jaar ten minste 1 keer een meetpunt is gepasseerd (inclusief buitenlandse schepen). Ook rapporteert ze op basis van vergelijkbare gegevens het aantal actieve Nederlandse schepen op Nederlands grondgebied aan de CCR. Dit laatste om dubbeltelling te voorkomen die wel bij Eurostat aanwezig is. Gegevens van IVS dekken overigens het grootste deel van de actieve schepen, maar zijn vermoedelijk niet helemaal volledig omdat niet alle schepen jaarlijks een telpunt passeren.
- Eurostat: rapporteert voor elk land gegevens over de omvang van de binnenvaartvloot op basis van een vrije methodiek. Dit leidt tot dubbeltelling omdat Nederland ook over buitenlandse schepen rapporteert. Beschikbare gegevens in Eurostat hebben betrekking op zelf varende en niet zelf varende schepen naar grootte klasse (<1000 ton, 1000-3000 ton, 3000+ ton) voor alle landen vanaf 1970 in aantallen en tonnen.
- De CCR rapporteert jaarlijks over de samenstelling van de Europese vloot. Ook deze rapportage is niet geheel volledig (zo ontbreken bijvoorbeeld Nederlandse schepen die het hele jaar in het buitenland actief zijn), maar over het geheel gezien zijn de cijfers van de CCR het meest betrouwbaar en compleet. Nadeel is dat de rapportage niet elk jaar dezelfde vorm heeft en niet altijd even volledig is.
- ILT vloot database (niet openbaar): De ILT ziet in Nederland toe op de certificering van binnenvaartschepen. Daarmee hebben zij zicht op verschillende data van de bij hen geregistreerde schepen. RWS heeft een geanonimiseerde 'datadump' van rompafmetingen inclusief ledige diepgang ontvangen van de bij de ILT geregistreerde schepen (peil datum 23-5-2024). Het gaat enkel om schepen gecertificeerd bij de ILT. In Nederland varen ook schepen die in andere landen zijn gecertificeerd.

Beschikbare data kan worden teruggevonden op:

Eurostat:

- [Schepen naar zelfvarend en laadcapaciteit in aantal en tonnen \(IWW_EQ_LOADCAP\) \(1970 +\)](#)
- [Aantal motorschepen en duw/sleepschepen \(IWW_EQ_AGE\)\(1970+\)](#)

CBS StatLine:

- [CBS ongenummerd \(1997-2002\) Geregistreerde en actieve binnenvloot](#)
- [CBS ongenummerd \(vanaf 2012\) Binnenvaartschepen naar laadvermogen](#)

CCR Marktobservatie:

- [CCR Marktobservatie \(2023\) Vlootomvang per land in Europa naar droge en natte lading en duw/sleepvaart.](#)

KBN Analyse:

- Ontwikkeling en samenstelling van de actieve Nederlandse vloot op Nederlands grondgebied, [KBN Nieuwsbrief 2023 - 23 - Koninklijke Binnenvaart Nederland](#), en opgenomen in Bijlage C.