

# Analyse van een Veilige en Vlotte Doorvaart voor Rondvaartboten in Amsterdam

Rapport in opdracht van Amsterdamse rederijen, verenigd  
in de VAR, de VEVAG en de Kooij-groep

Rapportnummer: 2016.MT.8031

April 2016

Opgemaakt door:  
Dr. Ir. H.J. de Koning Gans  
Ir. K. Visser



# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Samenvatting</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Inleiding</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Wetmatigheden tussen lengte, motorvermogen, vaarsnelheid en aantal passagiers</b>	<b>5</b>
3.1	inleiding . . . . .	5
3.1.1	Opmerkingen ten behoeve van tabel 1 . . . . .	6
3.2	Passagierscapaciteit versus lengte . . . . .	6
3.3	Lengte versus snelheid . . . . .	7
3.4	Lengte versus motorvermogen . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Toepassen wetmatigheden op de rondvaartboten</b>	<b>8</b>
4.1	Motorvermogen en energie verbruik per passagiers . . . . .	8
4.2	Golfmakende hinder . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Simulatie manoeuvreer-model</b>	<b>10</b>
5.1	Inleiding . . . . .	10
5.2	Beschrijving van de uitgevoerde manoeuvres . . . . .	11
5.2.1	Breedte-invloed . . . . .	12
5.3	Wendbaarheid. . . . .	13
5.3.1	Definitie wendbaarheid . . . . .	13
5.4	Resultaten van de simulaties en bespreking hiervan . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Ontmoetingen in haakse bochten</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>Ruimtebeslag op de grachten</b>	<b>20</b>
<b>8</b>	<b>Veilige en vlotte doorvaart</b>	<b>20</b>
8.1	Reductie aantal schepen . . . . .	20
<b>9</b>	<b>Emissie en groen varen</b>	<b>21</b>
<b>10</b>	<b>Aanvullende beschouwingen betreffende beleidsmatige overwe- gingen</b>	<b>21</b>
<b>11</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>24</b>
<b>A</b>	<b>Manoeuvreer-model</b>	<b>30</b>

# 1 Samenvatting

In de nota Varen in Amsterdam [1] wordt “lengte” als een criterium gebruikt voor de vlotte en veilige doorvaart van vaartuigen in grachten. In deze nota is de hypothese, dat kortere schepen een vlotte en veilige doorvaart positief beïnvloeden. De motieven achter deze hypothese lijken de aanname, dat kortere schepen in termen van wendbaarheid beter manoeuvreren dan langere schepen, en dat de belasting van de vaarweg groter wordt als langere schepen gebruikt worden.

Amsterdamse reders, verantwoordelijk voor de inzet van rondvaartboten op de Amsterdamse vaarwegen, hebben behoefte geuit om nader onderzoek uit te voeren naar de interpretatie van het criterium “lengte” in relatie tot een vlotte en veilige doorvaart in de grachten, omdat in het licht van die vlotte en veilige doorvaart in de grachten de vraag gesteld kan worden of “wendbaarheid” zich niet veel meer leent als relevant criterium. Tevens hebben de rederijen behoefte aan meer inzicht in het effect van de lengte van een vaartuig op het accommoderen van de transportvraag van een gegeven aantal rondvaartpassagiers: resulteert het verdelen van het passagiersaanbod over een groter aantal kortere schepen niet uiteindelijk in een verhoging van de totale lengte aan vaartuigen in de Amsterdamse vaarwegen?

Daartoe zijn aan de Faculteit Mechanical, Maritime and Materials Engineerings (3ME) van de Technische Universiteit Delft de navolgende onderzoeksvragen gesteld:

- a. Welk effect heeft de lengte van een vaartuig op de totale belasting van de Amsterdamse vaarwegen (bij een gegeven vervoersbehoefte het verschil tussen minder langere boten in vergelijking met meerdere kortere boten)?
- b. Hoe dient men ten aanzien van vaartuigen (op de Amsterdamse grachten) het begrip “wendbaarheid” te definiëren?

In dit rapport worden de invloeden, gevolgen en resultaten beschreven door het invoeren van een maximale lengte van 14 meter van rondvaartschepen in de Amsterdamse grachten. Er is een vergelijkend onderzoek gedaan met schepen van rondom deze 14 meter en een schip van 20 meter lengte. De 20 meter lengte was de huidige standaard en de huidige vloot is voorzien met veel schepen van deze lengte. In het onderzoek zijn de volgende topics meegenomen: veilig en vlot varen, groen varen, golfvorming en de manoeuvreerbaarheid.

Verder zijn manoeuvreersimulaties voor alle beschreven schepen uitgevoerd, waarbij het schip een haakse bocht vaart. Bij deze manoeuvre zijn twee begincondities onderzocht. Als eerste begint men de manoeuvre met een stilliggend schip en de tweede manoeuvre wordt uitgevoerd, waarbij het schip een aanvangsvaardersnelheid heeft van  $2 \frac{m}{s}$ .

Het blijkt dat de onderlinge manoeuvreertijden van de schepen rondom de 14 meter nagenoeg gelijk zijn. De manoeuvreertijd voor het uitvoeren van een haakse bocht van het 20-meter-schip duurt ongeveer een halve seconde langer dan de 14-meter-schepen. Rekening houdend met het feit dat een 20-meter-schip 100 passagiers meeneemt, terwijl een 14-meter-schip slechts 50 passagiers meeneemt, moeten er dus twee manoeuvres worden uitgevoerd door 14-meter-schepen om 100 passagiers te vervoeren. De gecumuleerde manoeuvreertijd van

14-meter-schepen wordt daardoor minstens 2 keer zo groot ten opzichte van de 20-meter-schepen.

Verder blijkt uit dit onderzoek dat als men de schepen van 20 meter vervangt door 14-meter-schepen dat het aantal schepen wordt verdubbeld. Het aantal scheepsontmoetingen is kwadratisch met het aantal schepen en wordt dus drastisch groter. Daardoor wordt de aanvaringskans veel groter, hetgeen een risico is voor het onderwerp veilig en vlot varen. Ook zullen kleinere schepen ervoor zorgen dat er eerder congesties optreden.

Tevens blijkt dat de golfvorming van de 14-meter-schepen groter is dan bij de 20-meter-schepen. Het gevolg hiervan is dat de golfweerstand groter wordt en daardoor onnodig veel energie moet worden opgewekt. Verder geven grotere golven meer hinder en schade aan de oevers en de overige scheepsvaart.

Kleinere schepen hebben meer motorvermogen per passagier nodig. Door het toepassen van kleinere schepen wordt er dus meer energie gevraagd dan bij grotere schepen en, als de energie niet emissievrij opgewekt wordt, ook meer emissie per passagier geproduceerd worden.

Uitgaande van dit onderzoek wordt er geconcludeerd dat in het licht van het onderwerp veilig, vlot en groen varen bij een gegeven transportbehoefte van passagiers 20-meter-schepen betere prestaties opleveren dan 14-meter-schepen. De manoeuvreertijd van een haakse bocht van de 20-meter-schepen is ongeveer een halve seconde langer dan de 14-meter-schepen. De cumuleerde manoeuvreertijd van de 20-meter-schepen blijkt slechts de helft te bedragen ten opzichte van de manoeuvreertijd van de 14-meter-schepen. Zonder wendbaarheidsconcessies wordt het aantal schepen aanzienlijk kleiner en het aantal ontmoetingsmomenten verminderd, hetgeen de vlotte doorvaart bevordert. Voor langere schepen kan dus gesteld worden, dat zij in het licht van de opwekking van golfsystemen en gebruik van vaarwegen, bij een gegeven passagiersaanbod een lagere belasting van de vaarwegen opleveren.

## 2 Inleiding

Uit de nota Varen in Amsterdam [1] wordt “lengte” als een criterium gebruikt voor de vlotte en veilige doorvaart van vaartuigen in grachten. In deze nota is de hypothese, dat kortere schepen een vlotte en veilige doorvaart positief beïnvloeden. De motieven achter deze hypothese lijken de aanname, dat kortere schepen in termen van wendbaarheid beter manoeuvreren dan langere schepen, en dat de belasting van de vaarweg groter wordt als langere schepen gebruikt worden.

Amsterdamse reders, verantwoordelijk voor de inzet van rondvaartboten op de Amsterdamse vaarwegen, hebben behoefte geuit om nader onderzoek uit te voeren naar de interpretatie van het criterium “lengte” in relatie tot een vlotte en veilige doorvaart in de grachten, omdat in het licht van die vlotte en veilige doorvaart in de grachten de vraag gesteld kan worden of “wendbaarheid” zich niet veel meer leent als relevant criterium. Tevens hebben de rederijen behoefte aan meer inzicht in het effect van de lengte van een vaartuig op het accommoderen van de transportvraag van een gegeven aantal rondvaartpassagiers: resulteert het verdelen van het passagiersaanbod over een groter aantal kortere schepen niet uiteindelijk in een verhoging van de totale lengte aan vaartuigen in de Amsterdamse vaarwegen?

Daartoe zijn aan de Faculteit Mechanical, Maritime and Materials Engineering (3ME) van de Technische Universiteit Delft de navolgende onderzoeksvragen gesteld:

- a. Hoe dient men ten aanzien van vaartuigen (op de Amsterdamse grachten) het begrip “wendbaarheid” te definiëren?
- b. Welk effect heeft de lengte van een vaartuig op de totale belasting van de Amsterdamse vaarwegen (bij een gegeven vervoersbehoefte het verschil tussen minder langere boten in vergelijking met meerdere kortere boten)?

In dit rapport worden deze onderzoeksvragen beantwoord. Eerst worden in hoofdstuk 3 en 4 de hydromechanische en logistieke wetmatigheden benoemd die relevant zijn voor de beantwoording van de onderzoeksvragen. Deze worden daarna in hoofdstuk 5 verwerkt in een simulatiemodel, waarin de wendbaarheid van een ontwerp voorspeld kan worden. De ontwerplengtes van de schepen waarop het model wordt toegepast zijn gekozen tegen het licht van de beoogde normlengtes die in de nota Varen in Amsterdam benoemd worden. Er wordt een onderlinge vergelijking gemaakt tussen de schepen van ongeveer  $14m$  ( $13.25m$ ,  $13.75m$  en  $14.25m$ ), om te onderzoeken wat er precies gebeurt bij de grens van  $14m$  en een vergelijking met schepen van  $20m$ , waar de huidige vloot mee vaart. Met deze scheeps lengten worden twee soorten simulaties uitgevoerd:

- een simulatie met een aanvangssnelheid van  $0 \frac{m}{s}$ ;
- en een simulatie met een aanvangssnelheid van  $2 \frac{m}{s}$

Hierbij wordt gekeken naar het groen, veilig en vlot varen, waaronder het opwekken van de benodigde energie (elders opgewekt), die nodig is om schepen voort te stuwten, de toename en/of afname het aantal scheepsontmoetingen en de daarbij horende aanvaringskansen en eventuele congesties.

De resultaten van deze simulaties worden besproken in paragraaf 5.4, waarbij een uitspraak gedaan wordt over de wendbaarheid van de schepen met de

gekozen scheeps lengten en deze vergeleken worden met de huidige standaard, het 20 meter schip.

In de hoofdstukken 6, 7 en 8 worden de resultaten geanalyseerd van de toepassing van de maritieme ruimtebeslag-wetmatigheden op de Amsterdamse vaarwegen in termen van ontmoetingen in haakse bochten (hoofdstuk 6), ruimtebeslag op de grachten (hoofdstuk 7) en veilige en vlotte doorvaart (hoofdstuk 8). In hoofdstuk 9 worden flankerende conclusies getrokken over de effecten van de lengte van het vaartuig op het relatieve energiegebruik per passagier voor de voortstuwing. In hoofdstuk 10 worden de resultaten van het onderzoek tegen het licht gehouden van beleidsmatige overwegingen in de interpretatie van de Europese Dienstenrichtlijn.

Het rapport wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 11.

### **3 Wetmatigheden tussen lengte, motorvermogen, vaarsnelheid en aantal passagiers**

#### **3.1 inleiding**

Om een vergelijkend onderzoek tussen schepen van hetzelfde type, in dit geval rondvaartschepen, met verschillende lengtes of andere parameters uit te voeren, is het wenselijk dat op grond van (fysische) wetmatigheden te doen. Het voordeel hiervan is dat het onderzoek systematisch is en dat men de invloed van deze parameters, die bij een type schip gelden, kan bepalen en beoordelen. Ook krijg men een indruk wat een verandering van een parameter te weeg brengt en wat de gevolgen hiervan zijn. Om te zien welke parameters en wetmatigheden van belang zijn, is er hieronder een aantal wetmatigheden tussen parameters vermeld en besproken.

Voor de afmetingen en andere parameters van schepen, zoals motorvermogen, vaarsnelheid en aantal passagiers, gelden enige wetmatigheden. Deze wetmatigheden zijn min of meer fysisch en worden door het bijhouden van statistieken empirisch bevestigd. Zo blijkt dat grotere schepen meer geïnstalleerd motorvermogen hebben, meer passagiers kunnen vervoeren en over het algemeen met hogere snelheid kunnen varen.

Om een indruk te krijgen welke parameters relevant zijn is er een selectie uit de Amsterdamse rondvaartvloot in tabel 1 weergegeven. Hoe de relaties tussen deze parameters precies in elkaar zitten, wordt in de volgende paragrafen besproken.

Vaartuig Naam	lengte [m]	breedte [m]	diepg. [m]	volume [m <sup>3</sup> ]	# pass. [ ]	roer	snelh. $\frac{km}{h}$	m.verm. [kW]
Barlaeus	20.00	4.25	1.41	66,509	100	azipod	11	55
Flying Dutchman	22.12	3.93	1.12	25,750	100	schottel	14.5	102
Vincent	13.55	3.48	1.03	14,282	48	conv.	12	69
Staets	18.00	3.55			87	azipod	13	25
Theo Kok	13.8	3.25		8,500		conv.		15

Tabel 1: Overzicht van hoofdafmetingen van een selectie uit de Amsterdamse rondvaartschepen.

### 3.1.1 Opmerkingen ten behoeve van tabel 1

In tabel 1 zijn een aantal afkortingen en begrippen gegeven. Deze worden hieronder beschreven:

# pass. : Aantal maximum passagiers.

snelh. : Maximale snelheid.

m.verm. Geïnstalleerd vermogen

roer : type besturing dat is toegepast.

conv. : conventionele roeropstelling waarbij het roer zich achter een vaste schroef bevindt.

schottel, azipod of azimuth: Besturing waarbij de schroef ook als stuurmiddel wordt gebruikt. De gehele unit kan ook om de verticale as draaien, zodat de schroefstraal in de juiste richting kan worden gestroomd en zodoende krijgt het schip een veel betere wendbaarheid. Het blijkt dat de grotere schepen deze besturing hebben, terwijl de kleinere schepen uitgerust zijn met conventionele roeren. Inherent hieraan is dat de wendbaarheid van grotere schepen gegarandeerd blijft ten opzichte van de kleinere schepen.

## 3.2 Passagierscapaciteit versus lengte

Voor kleinere passagiersschepen blijkt dat het aantal maximum passagiers ongeveer proportioneel is met de scheepslengte in het kwadraat. Dit kan men als volgt verklaren. Om de kleine schepen dezelfde vaar- en manoeuvreereigenschappen te laten behouden als de grote schepen wordt de breedte proportioneel kleiner met de lengte. Het (dek)oppervlak neemt dus kwadratisch af met de lengte. Omdat passagiers slechts in een laag/dek worden vervoerd is er dus minder ruimte om de passagier te herbergen. Dit is dus kwadratisch met de lengte. Voor de rondvaartschepen houdt dat in dat een schip met een lengte van 14 meter 50 passagiers kan vervoeren, terwijl een schip van 20 meter lengte 100 passagiers kan transporteren. Uitgaande van deze wetmatigheid heeft men voor het vervoeren van eenzelfde aantal passagiers twee keer zoveel schepen van 14 meter nodig in vergelijking met 20-meter-schepen. Kijkt men naar tabel 1 dan blijkt ook bij de Amsterdamse rondvaartboten dat het aantal maximum passagiers proportioneel is met de lengte in het kwadraat.

### 3.3 Lengte versus snelheid

Het blijkt dat bij bepaalde type schepen er een verband is tussen de scheepsnelheid en de lengte van het schip. Dit verband is min of meer fysisch bepaald door de zwaartekracht en de daarbij horende zwaartekrachtgolven. Bij deze wetmatigheid is eenzelfde golfsysteem, gegenereerd door een varende schip, het kwadraat van de vaarsnelheid proportioneel met de lengte van het schip! In de maritieme techniek wordt deze wetmatigheid gerepresenteerd door het Froude getal. Het Froude getal is als volgt gedefiniëerd:

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

Bij bepaalde type schepen wordt het Froude getal  $F_n$  constant gehouden. Bij dezelfde Froude getallen wordt er eenzelfde golfpatroon gegenereerd om het schip. Gaat men harder varen dan zullen de golven onnodig hoger worden en meer energie gaan vragen om dit golfpatroon te handhaven (zie ook sectie 4.2). Uit de vergelijking (1) kan men de scheepssnelheid-lengte wetmatigheid bepalen:

$$L = V^2 \frac{1}{F_n^2 g} \quad (2)$$

Het Froude getal geeft ook het aantal golven langs het schip weer. Het aantal golven is gelijk aan:

$$n = \frac{1}{2\pi F_n^2} \quad (3)$$

Het Froude getal impliceert dus ook het aantal golven rondom een schip. Het gevolg is dat in het algemeen hetzelfde aantal golven gelijk is voor bepaalde type schepen.

Verder is er nog een relatie tussen de golfsnelheid  $c$  en de lengte van de golf  $\lambda$ :

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (4)$$

Omdat de golven stationair propageren met de scheepsnelheid is golfsnelheid gelijk aan de scheepssnelheid en dus geldt ook dezelfde relatie voor de scheepssnelheid:

$$V = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (5)$$

Of de golflengte kan bepaald worden door:

$$\lambda = \frac{2\pi c^2}{g} = \frac{2\pi V^2}{g} = 2\pi F_n^2 L \quad (6)$$

De voorgestelde maximale snelheid in grachten geldt voor alle schepen; groot of klein. Bij een gelijke snelheid heeft dit een gunstig gevolg voor grotere of langere schepen, want deze veroorzaken bij deze snelheid minder hoge golven dan kleinere schepen. Dit is beschreven in het volgende hoofdstuk.

### 3.4 Lengte versus motorvermogen

Daar de wetmatigheid bestaat tussen snelheid en lengte van een schip, kan men deze ook gebruiken voor het bepalen van het geïnstalleerd/beschikbaar



vermogen. Gebruikmakend van deze wetmatigheid kan men stellen dat het motorvermogen proportioneel is met de macht 3.5 met lengte van het schip. Het blijkt dat er aan deze wetmatigheid in praktijk wordt voldaan en dus ook voor rondvaartboten. Dat houdt onder andere in dat kleinere schepen in absolute zin minder motorvermogen hebben en dat gaat ten koste van de manoeuvreer- en wend-baarheid. Overigens hebben kleinere schepen in relatieve zin wel een hoger vermogen nodig (kW per passagier).

Er is nog een andere wetmatigheid, indien schepen met dezelfde snelheid varen. Dit is bijvoorbeeld bij het handhaven van de maximum snelheid in de grachten van Amsterdam, dan is het gebruikte vermogen kwadratisch met de lengte. Dit geldt alleen als er weinig golfvorming is. Deze wetmatigheid kan men gebruiken om het energiegebruik tussen de schepen te vergelijken.

## 4 Toepassen wetmatigheden op de rondvaartboten

Om een representatief vergelijkingsonderzoek te doen bij rondvaartschepen van verschillende lengtes, wordt gebruik gemaakt van de wetmatigheden die hierboven beschreven zijn. Als een kleiner schip wordt gebruikt wordt deze gedimensioneerd volgens de boven beschreven wetmatigheden en de desbetreffende parameter.

### 4.1 Motorvermogen en energie verbruik per passagiers

In de beschrijving van de wetmatigheden zijn zowel de lengte versus motorvermogen als passagierscapaciteit versus lengte vermeld. Men kan ook hieruit de wetmatigheid tussen gebruikte motorvermogen versus passagier bepalen als functie van de lengte. Omdat de schepen allemaal dezelfde (maximale) snelheid varen blijkt dat het vermogen proportioneel is met het kwadraat van de lengte van het schip.

Door beide wetmatigheden te vergelijken kan men de factor van het benodigde vermogen bepalen. Het blijkt dat de vermogen-passagier-ratio schaalt met 1. Nemen we echter de golfmakende weerstand mee en de wetenschap dat kleinere energie omzeters lagere rendementen hebben, en dat kleinere schepen een iets grotere weerstandscoefficiënt hebben neemt het vermogen per passagier aanzienlijk toe als kleinere schepen worden ingezet bij een gegeven aantal passagiers.

### 4.2 Golfmakende hinder

De gemeente Amsterdam stelt dat golfslag die door grotere vaartuigen wordt veroorzaakt forser is dan van kleinere vaartuigen en meer impact heeft op bijvoorbeeld woonboten.

Deze veronderstelling is niet waar. Kortere schepen hebben bij dezelfde snelheid over het algemeen een veel grotere golfvorming dan grotere schepen. Meer specifiek voor rondvaartschepen kunnen grotere schepen (door hun functie als rondvaartschip) scherper zijn dan kleinere schepen. De golfvorming is onder andere afhankelijk van de snelheid, vorm van het schip, lengte, lengte-breedte-verhouding, lengte-diepgang-verhouding, dwarsdoornede en volheid. De invloed

van golfvorming, die afhankelijk is van deze genoemde parameters, wordt kleiner als het schip groter wordt. In het onderstaande figuur 1 wordt geïllustreerd hoe een klein schip zeer grote golven opwekt.



Figuur 1: Golsysteem van een vrijvarend schip met een lengte van  $\pm 6\text{m}$  en een snelheid van  $\pm 11 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Bron: <http://opduwer.swalker.nl/> & <http://www.modelbouwforum.nl/threads/schaalregels-voor-varende-modellen.79102/>

Figuur 2 geeft een schip weer dat ongeveer twee keer zo lang is, terwijl de snelheid ongeveer hetzelfde is. Hier is te zien dat de golfvorming aanzienlijk verminderd is.

Figuur 3 geeft een schip weer dat ongeveer drie keer zolang als het eerste schip is, terwijl ook deze snelheid ongeveer hetzelfde is. Hier is te zien dat de golfvorming nog meer verminderd is.

Uit de visuele interpretatie blijkt dat juist de golfvorming, bij dezelfde snelheid, afneemt naarmate het schip groter wordt. Ook theoretisch is dit het geval. Uit de plaatjes is op te maken dat er grotere golven worden gegenereerd bij kleinere schepen. Het genereren van grotere golven kost meer energie en deze moet door het motorvermogen van het schip worden opgebracht. Als kleinere schepen dezelfde snelheid varen, moet er dus (relatief) meer motorvermogen worden gebruikt om deze golf te genereren. Dit kost extra energie en dat gaat tegen het belang in van energie zuinig varen. Deze energie wordt elders opgewekt en omdat nu niet alle opgewekte emissie-vrij is, wordt er onnodige emissies gegenereerd. Ook zullen grotere golven hinder en schade veroorzaken aan de kades en de overige (afgemeerde) schepen. Indien mogelijk moet golfvorming vermeden worden. Dit kan gerealiseerd worden door langere schepen in te zetten.



Figuur 2: Golfsysteem van een vrijvarend schip met een lengte van  $\pm 14\text{m}$  en een snelheid van  $\pm 11 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Bron: [www.botentekoop.nl](http://www.botentekoop.nl)

## 5 Simulatie manoeuvreer-model

### 5.1 Inleiding

De manoeuvreerbaarheid van schepen is een vrij algemeen begrip. Omdat er nogal wat verschillende manoeuvres (zoals rechte lijnvaart, uitwijk- draaicirkel-, aanleg-manoeuvere) bestaan, is het niet mogelijk om te zeggen dat het ene schip beter manoeuvreert dan een ander. Zo kan de rechte lijn van een schip beter zijn dan van een ander schip, terwijl het andere schip weer kortere draaicirkels heeft dan het eerste schip. In het algemeen hangt de manoeuvreerbaarheid van schepen af van het evenwicht tussen de romp(vorm) en de stuurmiddelen. De romp afhankelijkheden zijn onder andere lengte, breedte, diepgang, volheid en vorm. Met name de diepgang en diepgang-lengte verhouding hebben de grootste invloed (zie ook appendix A.) Voor de Amsterdamse situatie van rondvaartboten kunnen we het volgende stellen: Bij de Amsterdamse rondvaartschepen hebben langere schepen een relatief geringere diepgang dan kortere schepen en daardoor een betere wendbaarheid dan bij kortere rondvaartschepen.

De afhankelijk stuurmiddelen (zie ook tabel 1 en paragraaf 3.1.1) zijn type roer (conventioneel of azipods), boegschroeven en het daarbij beschikbare vermogen. Juist in de Amsterdamse situatie zijn inmiddels veel stuurconfiguraties met bv azipods bekend waarbij onafhankelijk van de lengte een zeer grote wendbaarheid, zelfs op een positie, gerealiseerd wordt. Ook voor grotere schepen



Figuur 3: Golfsysteem van een vrijvarend schip met een lengte van  $\pm 20\text{m}$  en een snelheid van  $\pm 11 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Bron: [www.botentekoop.nl](http://www.botentekoop.nl)

geldt dat er hoger (manoeuvrer-)vermogen beschikbaar is en daardoor neemt de wendbaarheid alleen maar toe. Vooralsnog kan gesteld worden, dat bij gebruik van adequate stuurmiddelen en het vaststellen van de gunstige relatief lage diepgang het criterium lengte bij langere Amsterdamse rondvaart boten niet relevant voor de wendbaarheid is.

## 5.2 Beschrijving van de uitgevoerde manoeuvres

Om een vergelijkend onderzoek te doen zijn een aantal simulaties uitgevoerd met schepen van verschillende lengtes. De gekozen lengtes zijn (dit in overleg met de opdrachtgever)  $13.25\text{m}$ ,  $13.75\text{m}$ ,  $14.25\text{m}$  en  $20.00\text{m}$ . De daarbij behorende hoofdafmetingen zijn in tabel 2 weergegeven.

Over de diepgang van de schepen worden de volgende overwegingen meegenomen. De diepgang van het 20-meter-schip is relatief hoog, omdat er onder het schip een ruimte voor accu's is gecreëerd. Om een ongunstige (worst case) scenario te genereren is de grootst mogelijke diepgang genomen. Het gevolg hiervan is dat de wendbaarheid slechter is dan bij een ondieper schip.

De 14-meter-schepen hebben een diepgang van 0.99 meter. Deze zal niet afnemen als het schip kleiner wordt. Ten eerste hebben een schepen een kruip-

hoogte nodig, hetgeen de hoogte van de bovenkant bepaalt. Tevens moeten de passagiers kunnen staan en het gevolg is dat de diepgang ongeveer 1 meter wordt. Ten tweede hebben kleinere schepen relatief meer constructiemateriaal en relatief grotere en zwaardere uitrusting nodig, om het schip in takt te houden en te laten functioneren. Het gevolg hiervan is dat het schip relatief wat zwaarder wordt. Omdat de lengte en breedte afnemen, moet men noodgedwongen een grotere relatieve diepgang handhaven, anders zinkt het schip.

Lengte [m]	Breedte [m]	Diepgang [m]	Volume [m <sup>3</sup> ]	Aantal passa. [ ]
20.00	4.25	1.41	66.6	100
14.25	3.75	0.99	29.1	51
13.75	3.60	0.99	27.0	47
13.25	3.45	0.99	24.9	44

Tabel 2: Hoofdafmetingen van de geteste schepen

### 5.2.1 Breedte-invloed

Hoewel in dit rapport de focus niet op de breedte-invloed ligt, zijn er toch relevante opmerkingen over dit onderwerp te maken. Kijkend naar de manoeuvreercoëfficiënten in appendix A, ziet men de afhankelijkheid van de breedte-lengte-verhouding en breedte-diepgang-verhouding. Bij sommige coëfficiënten wordt er een invloed bij opgeteld (plus teken), terwijl bij andere coëfficiënten deze weer kan worden afgetrokken. Dat betekent dat de invloeden van de breedte van het schip voor het manoeuvreren zich min of meer tenietdoen. Daarnaast blijken de extra termen die betrekking hebben op de breedte (veel) kleiner te zijn dan de eerste term. Daardoor kan men de invloed van de breedte buiten beschouwing laten.

Het langste schip is als basis schip gebruikt en de dimensie van de kleinere schepen zijn afgeleid met schaalregels, gebaseerd op de wetmatigheden hierboven besproken, wat gebruikelijk is in het scheepsbouwkundig ontwerp.

De manoeuvreercoëfficiënten zijn volgens Kijima en Clark bepaald. Deze coëfficiënten zijn beschreven in appendix A en kunnen berekend worden met de aldaar beschreven formules.

Het blijkt uit deze vergelijkingen dat de manoeuvreercoëfficiënten (kwadratisch) afhankelijk zijn van de diepgang-lengte-verhouding. Dus voor een kleine diepgang-lengte-verhouding worden de manoeuvreercoëfficiënten (veel) kleiner. Dit heeft een gunstige invloed op de wendbaarheid. Bij grotere of 20-meter-schepen blijkt dat over het algemeen de diepgang-lengte verhouding kleiner is dan bij de kleinere of 14-meter-schepen. Hierdoor zal de wendbaarheid van 20-meter-schepen nauwelijks inboeten ten opzichte van 14-meter-schepen.

De weerstand-coëfficiënt  $X_{uu}$  en de azimuth-propeller-karakteristieken zijn getuned met de proefvaart uitgevoerd met het 20-meter-schip “Vossius”. De “Vossius” wordt als standaard-model voor het 20-meter-schip in de simulaties genomen.

Om te beoordelen hoe goed wendbaar en manoeuvreerbaar een schip is, worden een aantal testen uitgevoerd. Het begrip wendbaarheid is een belangrijk

begrip in dit rapport en daarom wordt dit in de volgende paragraaf gedefinieerd.

### 5.3 Wendbaarheid.

De wendbaarheid van een schip is een onderdeel van de manoeuvreerbaarheid en manoeuvreereigenschappen. De wendbaarheid heeft te maken hoe snel een bepaalde hoekverdraaiing/koersverandering kan worden gerealiseerd. Een absoluut begrip van wendbaarheid bestaat niet, omdat deze niet in een fysische grootte kan worden weergegeven. De tijd die nodig is is afhankelijk van de hoekverdraaiing/koersverandering en beginsnelheid. Verder dient de traagheid van het schip en de weerstand tegen het gieren meegenomen te worden en deze parameters (traagheid en weerstand) beïnvloeden de tijd om de gewenste koersverandering uit te voeren. Zo is voor een kleine koersverandering de traagheid belangrijk, terwijl voor een grote koersverandering de weerstand tegen het gieren belangrijk is. Dit kan dus verschillende uitkomsten geven als men diverse schepen met elkaar vergelijkt. Om toch uitspraken te doen over de wendbaarheid, wordt er binnen dit rapport twee definities gegeven van de wendbaarheid.

#### 5.3.1 Definitie wendbaarheid

De wendbaarheid geeft aan hoe snel een schip voor een bepaalde manoeuvre, waarbij de scheepsbeweging gieren zeker aanwezig moet zijn, kan worden gerealiseerd.

De wendbaarheid, in dit rapport, kan worden gekwantificeerd om de bepaalde tijd die nodig is om een voorgestelde koersverandering vanuit een rechte-lijnvaart te realiseren. Men kan twee typen onderscheiden voor de tijd(smeting) voor de wendbaarheid:

- A.** De tijd die nodig is nadat het commando van het initiëren van de koersverandering tot een percentage (zeg 90% of 95%) van de gewenste koersverandering is gerealiseerd.
- B.** De tijd die nodig vanaf een vooraf opgegeven advance (dat is een afstand vanaf het begin van de meting tot de haakse rechte-lijnvaart, zie ook figuur 6) tot een percentage (zeg 90% of 95%) van de gewenste koersverandering is gerealiseerd.

De definitie van wendbaarheid volgens item **B.** is representatief voor de Amsterdamse rondvaartbranche, om schepen met elkaar te vergelijken, die dezelfde afstand moeten overbruggen.

Een test is de koersverandering van  $90^\circ$  (haakse bocht). Hierbij kunnen meerdere aanvaarmanoeuvres worden onderscheiden. Men kan tijdens het varen gelijk de bocht nemen. Hierbij moet de schipper (ruim) van te voren reeds roer geven. Bij deze aanpak zal het schip al varend  $90^\circ$  van koers veranderen. Bij deze keuze van manoeuvres behoudt het schip dus een voorwaartse snelheid. De aanvangssnelheid bij deze manoeuvres bedraagt  $2\frac{m}{s}$ , hetgeen gelijk is aan  $7.2\frac{km}{h}$ .

Een tweede mogelijkheid is om het schip al stilliggend vanuit deze positie de koersveranderingsmanoeuvre te beginnen. De azimuth-hoek van de roerpropeller is bij aanvang reeds op  $90^\circ$  stuurboord gezet.

Voor deze simulaties zijn 4 verschillende schepen met vier verschillende lengtes gebruikt. Beide manoeuvres zijn gesimuleerd en de trajecten van iedere individuele manoeuvre zijn weergegeven in de figuren 8 tot en met 15. De schepen starten op positie  $x = 0m; y = 0m$ ; en een aanvangskoers  $0^\circ$ . De positie en koers worden om de 5 seconden geplot, zodat men een indruk kan krijgen, hoe snel het schip wendt en waar het schip zich bevindt. De stand van de azimuth-propeller wordt als een streepje achter het schip geplot, zodat men tijdens deze manoeuvre ook een notie heeft van deze actuele azimuth-hoek.

De azimuth-hoek wordt bepaald met een proportionele differentiërende regeling voor alle simulaties. Deze regeling is in het simulatiemodel geïmplementeerd. In werkelijkheid neemt een schipper de verantwoording voor het sturen en aan de hand van zijn ervaring kan hij beter en sneller sturen dan de gebruikte regeling in deze computer simulaties. Dit houdt in dat de totale manoeuvreertijd van deze manoeuvres door een ervaren schipper aanzienlijk korter kan zijn dan weergegeven in deze simulaties.

Alle simulaties zijn uitgevoerd met een schroeftoerental van 60% van het maximale toerental, hetgeen overeenkomt met 21.6% van het maximale vermogen. Er is dus nogal wat marge om het restvermogen van de motor aan te spreken, indien het noodzakelijk is om de manoeuvre tot een goed einde te brengen.

Om te beoordelen hoe goed de manoeuvres zijn uitgevoerd, wordt een tijdsparameter geïntroduceerd. Er wordt gemeten hoelang het duurt voor dat een vooraf bepaalde koershoekverandering is gerealiseerd. Er worden twee criteria opgesteld; een overschrijding van 90% en 95% van de gewenste koershoekverandering. Een verandering van 100% heeft echter geen zin om te meten, omdat regelingen vaak zodanig zijn ingesteld dat de gewenste koers van uit een kant wordt benaderd. Het overschrijden van de gewenste koershoek geeft ook slingergedrag in vaarrichting; hetgeen ook niet gewenst is.

## 5.4 Resultaten van de simulaties en bespreking hiervan

De resultaten van de simulaties zijn weergegeven in figuren 8 tot en met 15. Uit al deze figuren is te zien dat het de azimuth-hoek (= hoek van de voorstuurer) in het begin  $90^\circ$  stuurboord staat. (Het streepje is soms niet te zien, omdat het samenvalt met de spiegel (achterkant) van het schip.) Halverwege de koersverandering draait de azimuth-propeller om de verticale as de andere kant op, om er voor te zorgen dat het schip niet te ver doordraait. Dit wordt stutten genoemd. Het stutten gebeurt vloeiend. Men moet wel in overweging nemen dat de instelling van de azimuth-hoek vloeiend verloopt en bestuurd wordt door een stuurautomaat.

Een ervaren schipper kan de azimuth-hoek langer op  $90^\circ$  stuurboord houden en op het juiste moment te gaan stutten door de azimuth-propeller te verdraaien naar  $90^\circ$  bakboord. De draaibeweging wordt dan sneller te niet gedaan. Het gevolg is dat deze manoeuvre veel sneller kan worden uitgevoerd.

Bij de initiële aanvangssnelheid 0 (stilliggend) blijkt dat alle schepen pivoteren op ongeveer een-derde van het voorschip. Hieruit blijkt dat het manoeuvreergedrag van deze schepen nagenoeg gelijk is.

De tijdstippen van respectievelijke 90% en 95% koersveranderingen zijn weergegeven in tabel 3. Deze zijn ook grafisch uitgezet in de figuren 4 en 5. Figuur 4 geeft een verticale as van 0 tot 24 seconde, terwijl de weergave van figuur 5

de ingezoomde grafiek weergeeft, waarbij de tijdschaal van 14 tot 24 seconden is weergegeven.

Lengte [m]	$u_0 = 0 \frac{m}{s}$		$u_0 = 2 \frac{m}{s}$	
	$T_{90\%}$ [s]	$T_{95\%}$ [s]	$T_{90\%}$ [s]	$T_{95\%}$ [s]
20.00	16.5	21.4	20.6	24.0
14.25	16.2	20.8	18.2	21.4
13.75	16.1	20.8	17.8	21.0
13.25	16.1	20.7	17.3	20.4

Tabel 3: Tijdstippen van overschrijden van respectievelijk 90% en 95% gewenste koersverandering van  $90^\circ$  bij twee verschillende aanvangssnelheden van respectievelijk 0 en  $2 \frac{m}{s}$ .

Het blijkt dat bij initiële vaarsnelheid van  $2 \frac{m}{s}$  het langste schip  $20m$  iets meer tijd nodig heeft (zo'n 2.5 seconden op een totaal van 20 seconden) voor deze manoeuvres dan de kortere schepen  $13.25m$ ,  $13.75m$  en  $14.25m$ . De tijdsverschillen voor koersveranderingen tussen de kleine schepen zijn echter gereduceerd maximaal 1 seconde. Wordt de manoeuvre echter uit stilstand begonnen dan blijkt die zelfs van het langste schip  $20m$  slechts 0.4 seconden en 0.7 seconden, voor respectievelijk de 90% en 95% koersverandering, langer te duren dan het kortste schip.

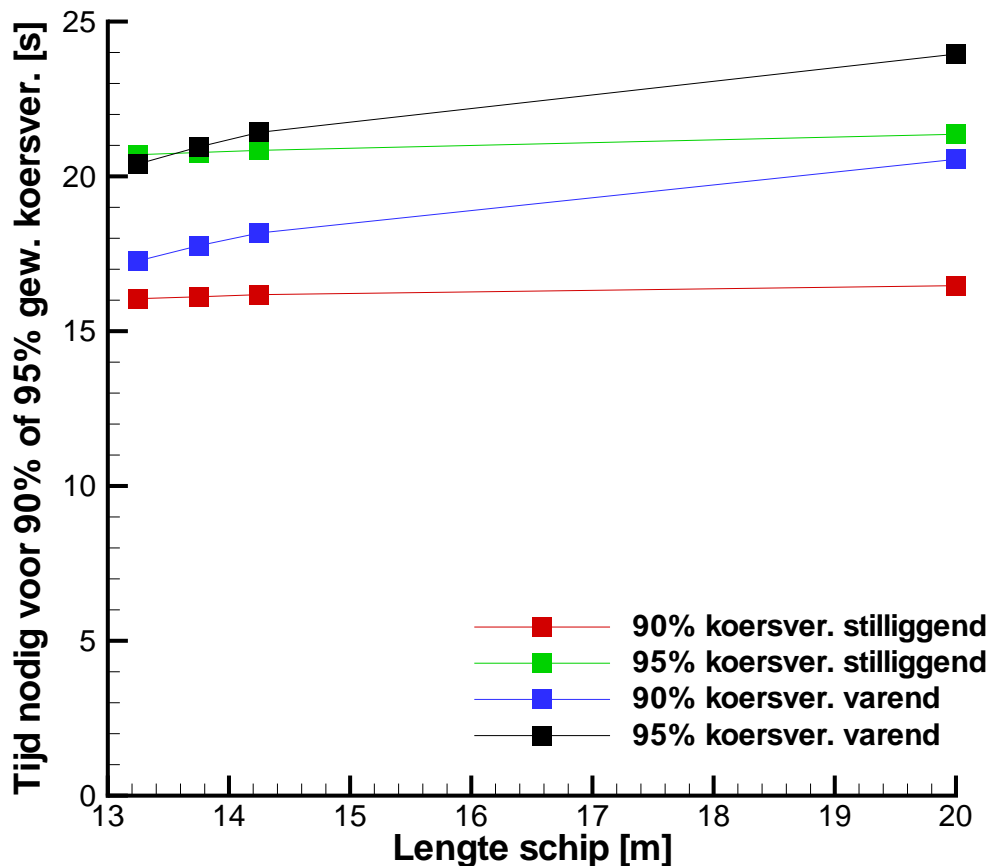
Verder valt er te vermelden dat het grootste schip een grotere “advance” heeft, zie figuur 6. (De advance is de vooruitloop van de nieuwe  $x$ -positie ten opzichte van de begin- $x$ -positie.)

De advance heeft alleen maar een zinvolle betekenis bij een aanwezige voorwaartse snelheid, dus voor deze simulaties zijn alle schepen met een voorwaartse snelheid van  $2 \frac{m}{s}$  gebruikt. De advance van de verschillende schepen is weergegeven in tabel 4.

Het blijkt dat het langste schip de grootste advance heeft. Het schip moet  $33.7 m$  voor aanvang de manoeuvre reeds inzetten. De kortere schepen hebben een kleinere advance van  $29.5 m$ ,  $28.6 m$  en  $27.6 m$  voor respectievelijke lengte van  $14.25m$ ,  $13.75m$  en  $13.25m$ . Dat betekent dat de kleinere schepen de manoeuvre later kunnen inzetten. De kleinere schepen kunnen nog rechtdoor varen terwijl het grote schip de manoeuvre al heeft aangevangen. Door het verschil van de advance van de kleinere schepen te vergelijken met het grootste schip, kan men ook bepalen hoe ver de kleinere nog moeten varen ten opzichte van het grootste schip. De verschillen zijn ook in tabel 4 weergegeven. Het is echter representatiever om schepen met dezelfde advance te vergelijken (inclusief het rechthoekig varen voordat de manoeuvre wordt ingezet). (Dat houdt in dat  $33.7 m$  voor de bocht de manoeuvreertijd begonnen wordt) Alle schepen kunnen een advance van  $33.7 m$  aan, waarbij het grootste schip gelijk de manoeuvre inzet, terwijl de kleinere schepen het verschil met de advance van het grootste schip nog recht doorvaren en daarna de manoeuvre inzetten.

De tijdstippen voordat de manoeuvre ingezet wordt kan men uitrekenen; men weet immers dat de aanvangssnelheid  $2 \frac{m}{s}$  bedraagt. Door de afstand te delen door de snelheid kan men de rechthoekig vaartijd, voordat de manoeuvre begint, bepalen. Deze tijden zijn in de laatste kolom geplaatst.





Figuur 4: Koersoverschrijdingstijden van respectievelijk 90% en 95% van de gewenste koershoek.

Om de totale manoeuvreertijden te bepalen als 33.7 *m* voor de bocht de manoeuvre ingezet wordt, worden de tijden  $T_{90\%}$  en  $T_{95\%}$  gecorrigeerd.

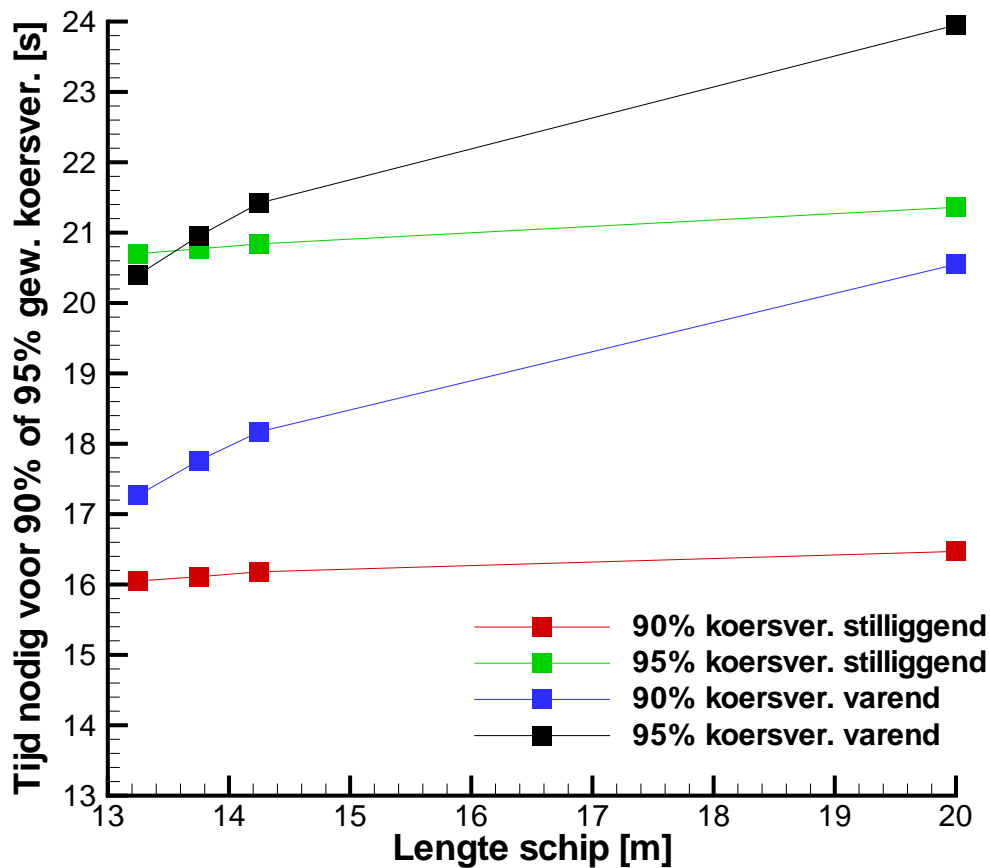
De gecorrigeerde tijden zijn weergegeven in tabel 5 en figuur 7.

Nu blijkt dat de manoeuvreertijd-verschillen tussen het grootste schip en de kleinere schepen aanzienlijk kleiner zijn. De tijdsverschillen bedragen nu 0.3 seconden voor 90% koersverandering en 0.6 seconden voor 95% koersverandering voor het grootste schip ten opzichte van het kleinste schip.

Kijkt men naar de verschillen tussen de kleinere schepen, dan zijn de onderlinge verschillen erg klein; maximaal 0.1 seconden.

Het is dus nogal arbitrair om maximum lengte grens te stellen van 14.0*m*, iets kleinere schepen hebben dezelfde manoeuvreertijd nodig.

Neemt men in acht dat het grootste schip ( $L = 20.0m$ ) 100 passagiers vervoert, terwijl het kleinere schip  $L = 14.0m$  slechts 50 passagiers aan boord heeft

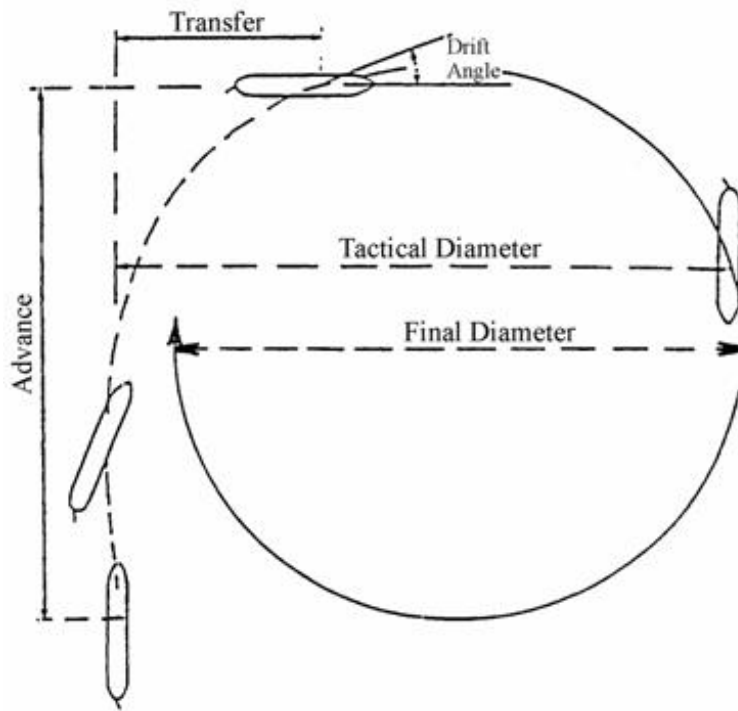


Figuur 5: Koersoverschrijdingstijden van respectievelijk 90% en 95% van de gewenste koershoek.

dan zijn de fracties van seconden die het grootste schip extra nodig heeft te rechtvaardigen. Verder dient men in acht te nemen dat er twee schepen van 14 meter nodig zijn om 100 passagiers te laten rondvaren, terwijl dit aantal passagiers slechts met een schip van 20 meter vervoerd kan worden. De gecumuleerde manoeuvreertijd 14-meter-schepen wordt minstens twee keer zo groot, zeker als men een onderlinge afstand nog in acht neemt.

## 6 Ontmoetingen in haakse bochten

De gemeente Amsterdam gaat er van uit dat kleine(re) schepen elkaar wel in bochten kunnen ontmoeten en passeren. Uit het oogpunt van veilige navigatie is dit echter uitgesloten. De onderlinge (hydromechanische) interactie die schepen op elkaar uit oefenen zijn zo groot dat dit een veilige ontmoetingsmanoeuvre in



Figuur 6: Definitie van advance bij 90° koersverandering.

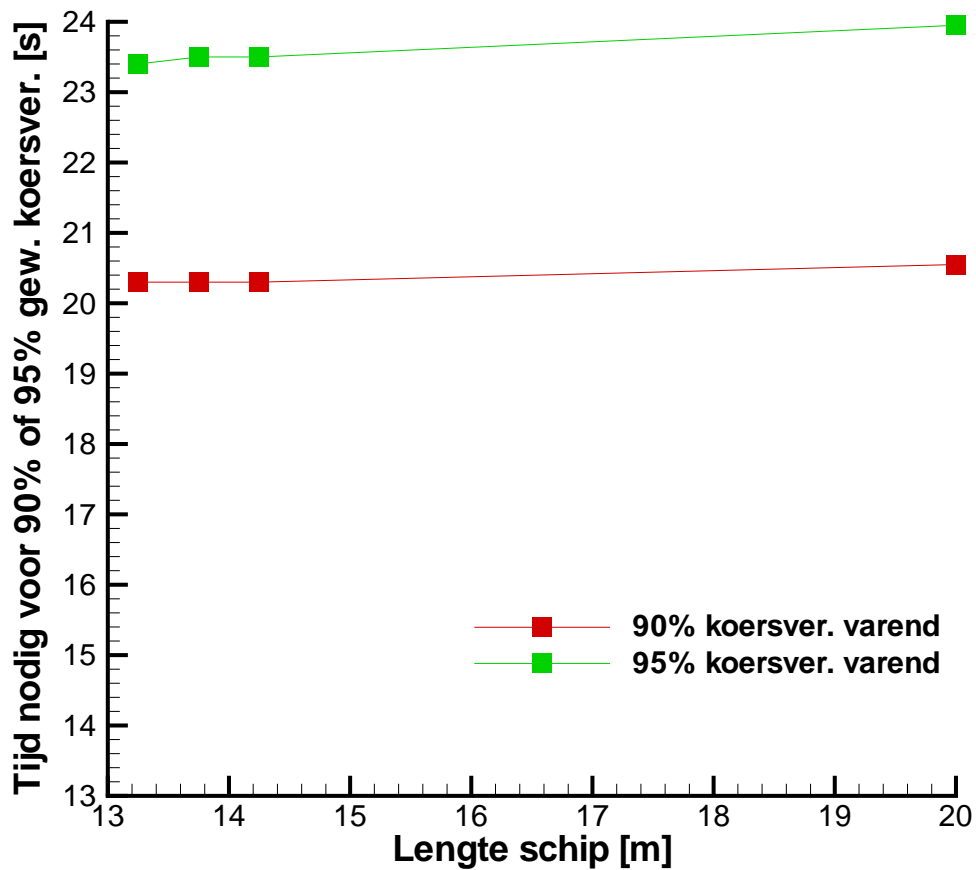
Lengte [m]	advance [m]	verschil advance [m]	tijd [s]
20.00	33.7	0.0	0.0
14.25	29.5	4.2	2.1
13.75	28.6	5.1	2.5
13.25	27.6	6.1	3.0

Tabel 4: De advance van schepen met verschillende lengte, het verschil van de advance t.o.v het langste schip en de extra tijd

de weg staat. Dus het verkleinen van schepen zorgt niet voor een snellere en veiliger doorvaart.

Lengte [m]	$T_{90\%}$ [s]	$T_{95\%}$ [s]
20.00	20.6	24.0
14.25	20.3	23.5
13.75	20.3	23.5
13.25	20.3	23.4

Tabel 5: Tijdstippen van overschrijden van respectievelijk 90% en 95% gewenste koersverandering van  $90^\circ$  bij manoeuvres  $33.7\text{ m}$  aangevangen voor de haakse bocht.



Figuur 7: Koersoverschrijdingstijden van respectievelijk 90% en 95% van de gewenste koershoek bij een advance van  $33.7\text{ m}$ .

## 7 Ruimtebeslag op de grachten

Schepen varend op het water dan wel stilliggend aan de kade hebben een ruimtebeslag. Binnen de huidige Amsterdamse rondvaartvloot zijn 100a140 20-meter-schepen aanwezig. Deze schepen geven, indien ze achter elkaar zijn geplaatst een gezamenlijke lengte van zo'n 2a2.8 km. Wil men dezelfde vervoerscapaciteit handhaven en de maximale scheeps lengte wordt 14.00m dan wordt het aantal schepen verdubbeld (Zie Wetmatigheid Passagierscapaciteit versus lengte). Dat houdt in dat als men de schepen achter elkaar bevinden dat het ruimtebeslag of de gezamenlijke lengte wordt vergroot naar 2.8a4 km. Tijdens operationele omstandigheden vaart een deel van deze vloot terwijl het andere deel aan de kade afgemeerd wordt om de passagiers van en aan boord te gaan. Het gevolg is dat er meer kadelengte (1.4 keer zoveel) moet worden gecreëerd. Dit gaat ten koste van de vrije kade ruimte die nu nog aanwezig is. Ook het ruimtebeslag van de schepen (14m) op het water neemt toe en er is dus minder (vrije) ruimte over voor de overige vaart.

De cijfers worden nog prangender als men een natuurlijke afstand tussen de schepen in acht neemt. Al varend op het water is een afstand tussen de schepen van 10 meter of meer gebruikelijk. Mochten alle schepen zich op het water bevinden dan zullen de 20-meter-schepen een sliert van 3a3.8 km vormen. Voor de 14-meter-schepen wordt de sliert zelf 4.8a6 km lang.

Ook aan kades moet er ruimte tussen de schepen aanwezig zijn. Dit zorgt ervoor dat de kade lengte groter worden om deze tussenruimte te creëren. De gezamenlijke tussenruimte voor de kades zal 2 keer zoveel zijn voor 14-meter-schepen ten opzichte van 20-meter-schepen, zodat de kades onnodig lang worden.

Concluderend: Uit het oogpunt van ruimtebeslag is het aan te bevelen om zo lang mogelijke schepen in te zetten.

## 8 Veilige en vlotte doorvaart

### 8.1 Reductie aantal schepen

Om een snelle en vlotte doorvaart te realiseren, moeten zowel schepen als vaaromgeving worden aangepast voor de desbetreffende situatie. Zo kunnen/moeten schepen worden voorzien zijn met adequate stuurmiddelen.

De omgevingsfactoren worden onder andere bepaald door het aantal scheepsontmoetingen. Om veilig te varen en om congesties te verminderen dan wel te niet te doen dient het aantal scheepsontmoetingen zo klein mogelijk te zijn.

Om dit te realiseren, moeten het vervoersaanbod verdeeld worden over kleiner aantal schepen met een grote(re) afmeting en/of capaciteit.

Veilig en vlot varen impliceert ook onder andere dat scheepsontmoetingen worden gereduceerd. Door schepen groter te maken kunnen er (veel) meer passagiers en/of kan er veel lading per schip worden vervoerd. Het maximale aantal passagiers  $n_{pas}$  voor Amsterdamse rondvaartboten is ongeveer  $n_{pas} = 0.25L^2$  of in woorden het aantal passagiers is gelijk een kwart van de lengte van het schip in het kwadraat. Gaat men uit van de oorspronkelijke maximale lengte van 20m dan kunnen daar 100 personen aan boord plaats nemen, terwijl een schip van 14m lengte slechts 50 personen kan herbergen (zie ook tabel 2 en 1). Het gevolg hiervan is dat er 2 keer zoveel rondvaartboten nodig zijn om de vervoerscapa-

citeit te kunnen voldoen. Het blijkt dat de scheepsontmoetingen kwadratisch zijn met het aantal schepen. Dat houdt in dat bij de kleinere schepen van 14m lengte 4 keer zoveel scheepsontmoetingen zijn als bij schepen met een lengte van 20 m.

Stel als voorbeeld, dat bij 20-meter-schepen 10 onderlinge scheepsontmoetingen zijn, dan zal het aantal onderlinge scheepsontmoetingen naar 40 gaan stijgen voor 14-meter-schepen. Hier uit kan men concluderen dat de kans op aanvaringen en/of congesties sterk toeneemt als men 14-meter-schepen inzet in plaats van 20-meter-schepen.

Het gevolg van het handhaven van grotere schepen is, dat er minder schepen op bepaalde trajecten bevinden. Omdat er minder schepen zijn, wordt de ontmoetingskans en het aantal scheepsontmoetingen aanzienlijk minder. Hierdoor wordt de veiligheid en een vlotte doorvaart vergroot. Uiteraard als schepen groter worden neemt de ruimte om elkaar te passeren enigszins af. De aanvaringskans neemt iets toe. Echter het product van aanvaringskans en het aantal ontmoetingen neemt drastisch af. Het veilige varen wordt dus gestimuleerd door de inzet van grotere schepen. Ook de doorstroom wordt beter als het aantal schepen veel minder is. Dit stimuleert het vlot varen over de waterweg.

## 9 Emissie en groen varen

Ook het milieu heeft baat bij grotere schepen. Ten eerste wordt door het toepassen van grotere schepen, en daardoor meer passagiers en lading, het geïnstalleerd vermogen per vervoerde passagier/eenheid lading minder. Hetzelfde geldt voor de weerstand van het schip. Om dezelfde vervoerscapaciteit te creëren is men gebaat om zo groot mogelijke schepen in te zetten.

Hoewel het streven is om energie alleen om te zetten via groene energie omzetter (windmolens, waterkracht centrales, zonne-energie), is de realiteit dat er ook veel energie kan worden omgezet via centrales die gebruik maken van fossiele brandstoffen. Het milieu is er dus gebaat dat er zo weinig mogelijk energie wordt omgezet. Dat houdt onder ander in dat de gebruiker zo weinig mogelijk energie afneemt. Dit kan gerealiseerd worden door het inzetten van zo groot mogelijke schepen bij een gegeven passagiersaanbod.

Hoewel de gemeente Amsterdam via regelgeving emissie-vrije rondvaartschepen reguleert, moet de gemeente bewust zijn dat energie elders opgewekt mogelijk niet emissie-vrij is. Het is relevant voor de gemeente Amsterdam om hier rekening mee te houden.

## 10 Aanvullende beschouwingen betreffende beleidsmatige overwegingen

De gemeente Amsterdam is van oordeel dat schepen langer dan 14 meter een gevaar vormen voor de vlotte en veilige doorvaart, omdat zij door hun lengte minder wendbaar zouden zijn en bij bochten zouden moeten steken. De gemeente hanteert hiertoe de volgende argumenten:

1. Kortere schepen nemen minder beslag op het water in.
2. Kortere schepen zijn wendbaarder dan grotere schepen.

3. Daardoor zijn grotere schepen minder wendbaar en bedreigen ze de vlotte en veilige doorvaart.
4. Daarom mag voor de schepen groter dan 14 meter een volumebeleid gevoerd worden.

De boven gestelde items worden nu per item behandeld:

### **Kortere schepen nemen minder beslag op het water in**

Deze bewering geldt in het algemeen niet.

Uitgaande van eenzelfde vervoerscapaciteit van personen, kunnen grotere schepen aanzienlijk grotere aantallen passagiers aan boord nemen ten opzichte van kleinere schepen. Voor de specifieke Amsterdamse rondvaarbotenbranche blijken 20-meter-schepen twee keer zoveel passagiers aan boord te kunnen nemen als 14-meter-schepen. (100 passagiers versus 50, zie ook tabel 1 en 2 en hoofdstukken 3 "Wetmatigheden" en 7 "Ruimtebeslag"). Het gevolg is dat er twee keer zoveel 14-meter-schepen nodig zijn om deze passagiers te vervoeren ten opzichte één 20-meter-schip. Het gevolg is dat juist kortere schepen veel **meer** beslag op het water innemen (zie ook 7).

Neemt men dan nog het aantal scheepsontmoetingen in ogenschouw, dan blijkt dat bij 14-meter-schepen 4 keer zoveel ontmoetingen zijn dan bij 20-meter-schepen (zie hoofdstukken 3 en 4). Dit geeft veel meer kans op aanvaringen en congesties (in de Amsterdamse grachten). Dus het handhaven van langere (of 20 meter-) schepen geeft een betere veilige en vlotte doorvaart ten opzichte van kortere (of 14 meter-) schepen.

### **Kortere schepen zijn wendbaarder dan grotere schepen**

Uit dit onderzoek blijkt bij een vergelijking dat een 20-meter-schip nauwelijks meer tijd (maximaal een halve seconde) nodig heeft om een haakse bocht te ronden dan 14-meter-schepen. In dit onderzoek zijn alle schepen voorzien van een azipod-propeller, zowel 20-meter-schepen als 14-meter-schepen. Het blijkt dat een groot deel van de huidige vloot van 20-meter-schepen van azimuth propellers is voorzien en dat deze bij de overige 20-meter-schepen eenvoudig zijn in te bouwen.

In de praktijk echter blijkt dat 14-meter-schepen van een conventioneel roer zijn voorzien (zie tabel 1). Met deze stuuruitvoering is de wendbaarheid aanzienlijk verminderd ten opzichte van schepen voorzien van een azipod-propeller. Daardoor is de wendbaarheid van 20-meter-schepen voorzien van een azipod-propeller beter dan van 14-meter-schepen. Ook voor 20-meter-schepen voorzien van een azipod-propeller geldt dat het steken bij bochten niet voorkomt. De wendbaarheid van deze is zo groot dat deze schepen zelfs om hun eigen as kunnen draaien. Tijdens de meetvaart, die nodig was voor het tunen van de parameters, is gebleken dat het 20-meter-schip geen enkele keer hoefde te steken. Sterker nog de azimuth-hoek van de pod-propeller werd nimmer groter dan  $90^\circ$ , terwijl de maximale uitslag  $120^\circ$  kan zijn. Ook werd er met een 60% van het maximale toerental gevaren, er is dus nogal wat extra (stuur- en motor-)vermogen aanspreekbaar voor de grotere schepen.

Verder hebben kleinere schepen meer last van storingen (wind, stroming en interactie met de overige vaart) en moeten veel meer correcties worden uitgevoerd dan grotere schepen.

Resumerend kan men stellen dat grotere rondvaartschepen, voorzien van een azipod-propeller even of beter wendbaar zijn dan kleinere schepen. Neemt men in acht dat een 20-meter-schip twee keer zoveel passagiers aan boord heeft dan een 14-meter-schip, dan is de tijd nodig om, zeg 100 passagiers, door een haakse bocht te varen voor 14-meter-schepen meer dan twee keer zolang als 20-meter-schepen. (Men moet de tijd die tussenruimte tussen de schepen te overbruggen ook meenemen.)

**Daardoor zijn grotere schepen minder wendbaar en bedreigen ze de vlotte en veilige doorvaart**

Zoals beschreven in bovenstaande items en hoofdstuk 5 en paragraaf 5.4 is de wendbaarheid van 20-meter-schepen nagenoeg gelijk of beter dan van 14-meter-schepen. Ook is een veel betere vlotte en veilige doorvaart te verwachten voor 20-meter-schepen. Het aantal scheepsontmoetingen wordt 4 keer zo klein en het aantal manoeuvres in bochten wordt twee keer zo klein ten opzichte van 14-meter-schepen.

Resumerend kan men zeggen binnen het kader van dit onderzoek dat blijkt dat juist kleinere schepen een vlotte en veilige doorvaart bedreigen.

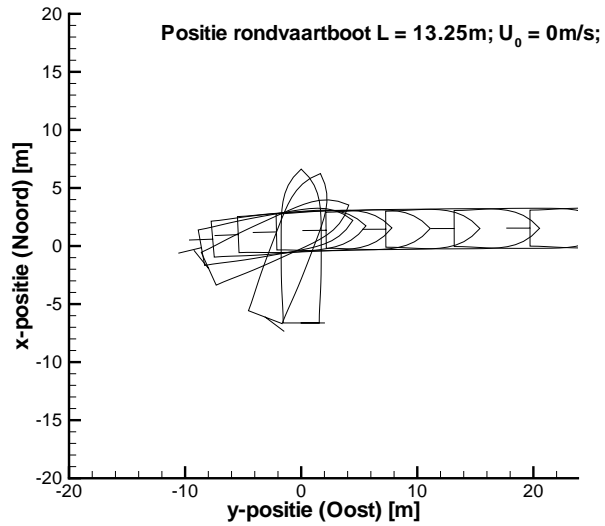
**Daarom mag voor de schepen groter dan 14 meter een volumebeleid gevoerd worden**

Omdat de bovenstaande beweringen volgens dit wetenschappelijk onderzoek tegen worden gesproken, kan geconcludeerd worden dat de gebruikte criteria voor het invoeren van volumebeleid van schepen met een lengte van 14-20 meter niet geldig en/of onjuist zijn.

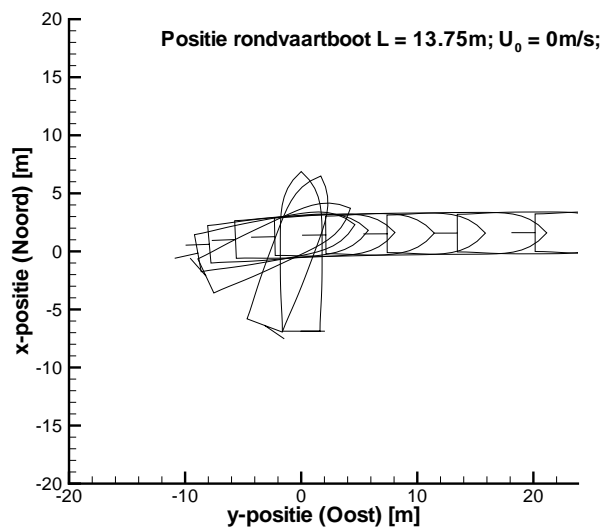


## 11 Conclusies en aanbevelingen

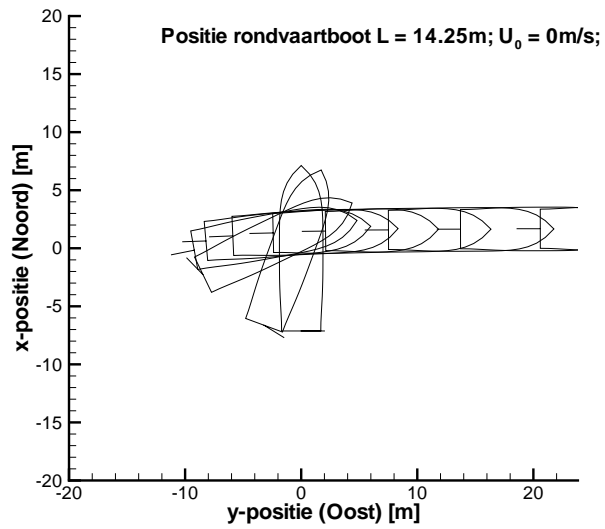
1. Het rapport “ Analyse van een Veilige en Vlotte Doorvaart voor Rondvaartboten in Amsterdam” geeft antwoord op de volgende onderzoeksvragen:
  - a. Hoe dient men ten aanzien van vaartuigen (op de Amsterdamse grachten) het begrip ”wendbaarheid” te definiëren?
  - b. Welk effect heeft de lengte van een vaartuig op de totale belasting van de Amsterdamse vaarwegen (bij een gegeven vervoersbehoefte het verschil tussen minder langere boten in vergelijking met meerdere kortere boten)?
2. Op basis van hydromechanische wetmatigheden is een simulatiemodel opgesteld. Hierin zijn schepen met 4 verschillende lengten getest op hun wendbaarheidsgedrag bij het maken van bochten van negentig graden op Amsterdamse vaarwegen. De onderzochte lengtes zijn 13.25 meter, 13.75 meter, 14.25 meter en 20 meter (de laatste de facto de huidige standaard). Als stuurinstallatie is een azimuth-propeller gebruikt.
3. Uit de modelberekeningen, geverifieerd met een praktijkmeting met een 20 meter rondvaartboot, blijkt dat de koersveranderingstijd tot 95% van de vereiste draaihoek varieert van 20.7 seconde (kortste boot) tot 21.4 seconde (langste boot) bij een aanvangssnelheid van  $0 \frac{m}{s}$ . De variatie bij een aanvangssnelheid van  $2 \frac{m}{s}$  is van 20.4 seconde (kortste boot) tot 24.0 seconde. De verschillende tijdsverschillen tussen de lengtes 13.25 meter, 13.75 meter en 14.25 meter zijn nihil tot enkele tienden van seconden. Als rekening gehouden wordt met het varen van de vereiste advance bij het ingaan van een bocht, dan zijn de verschillen nog kleiner: 23.4 seconden voor de boot van 13.25 meter en 24.0 seconden voor de boot van 20 meter.
4. Het criterium lengte is dus niet relevant voor de wendbaarheid van een schip in de Amsterdamse vaarwegen, gegeven de veel meer relevante beschikbaarheid van een adequate stuurinstallatie en de gunstige diepgang-lengte-verhouding van langere schepen.
5. Flankerend geldt voor langere schepen, dat zij minder golven opwekken, relatief minder lengte per passagier nodig hebben voor een gegeven passagiersaanbod en minder energie per passagier gebruiken voor de voortstuwing. Als de energie-opwekking niet emissieloos is, geldt hierbij ook, dat langere schepen een lagere emissie-uitstoot opleveren per passagier. Voor langere schepen kan dus gesteld worden, dat zij in het licht van de opwekking van golfsystemen en gebruik van vaarwegen, bij een gegeven passagiersaanbod een lagere belasting van de vaarwegen opleveren.



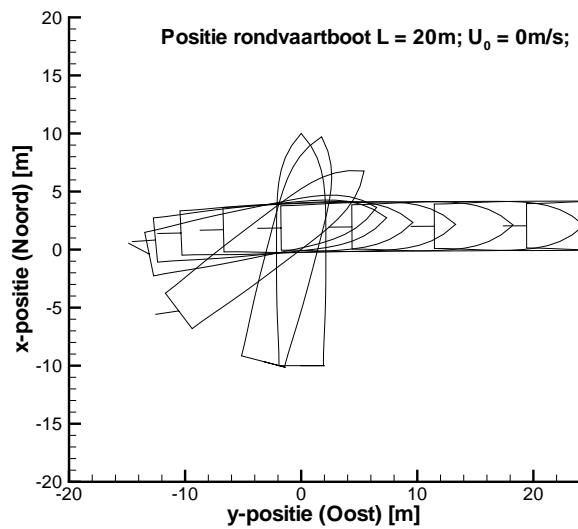
Figuur 8: Koersverandering in de tijd bij initiële snelheid van  $0\frac{m}{s}$  voor een rondvaartboot met een lengte van 13.25m



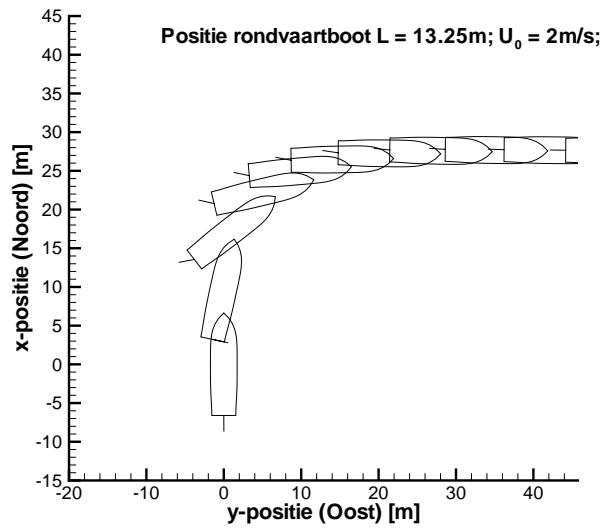
Figuur 9: Koersverandering in de tijd bij initiële snelheid van  $0\frac{m}{s}$  voor een rondvaartboot met een lengte van 13.75m



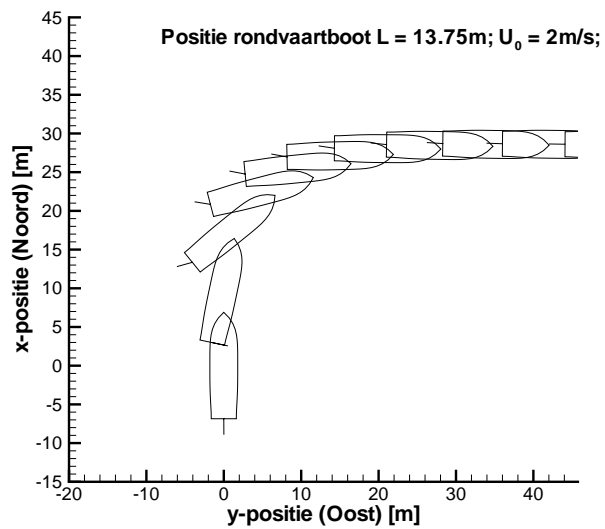
Figuur 10: Koersverandering in de tijd bij initiële snelheid van  $0\frac{m}{s}$  voor een rondvaartboot met een lengte van 14.25m



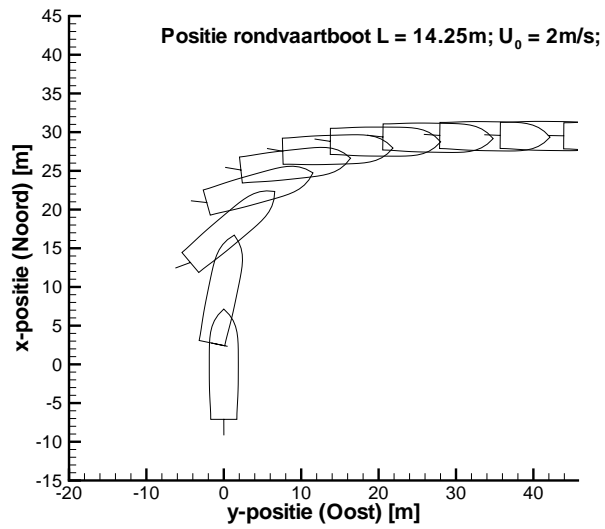
Figuur 11: Koersverandering in de tijd bij initiële snelheid van  $0\frac{m}{s}$  voor een rondvaartboot met een lengte van 20.00m



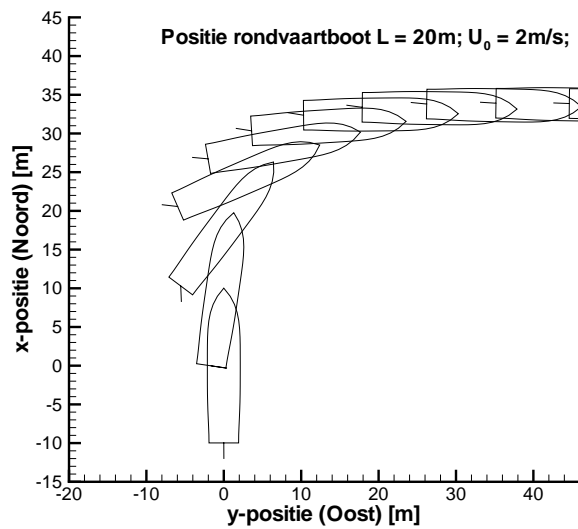
Figuur 12: Koersverandering in de tijd bij initiële snelheid van  $2\frac{m}{s}$  voor een rondvaartboot met een lengte van 13.25m



Figuur 13: Koersverandering in de tijd bij initiële snelheid van  $2\frac{m}{s}$  voor een rondvaartboot met een lengte van 13.75m



Figuur 14: Koersverandering in de tijd bij initiële snelheid van  $2\frac{m}{s}$  voor een rondvaartboot met een lengte van 14.25m



Figuur 15: Koersverandering in de tijd bij initiële snelheid van  $2\frac{m}{s}$  voor een rondvaartboot met een lengte van 20.00m

## Referenties

- [1] Varen in amsterdam 2.1,beleidskader voor het varen en afmeren in en door amsterdam, voor passagiersvervoer en pleziervaart, November 2013.
- [2] V. Bertram. *Practical Ship Hydrodynamics*. Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2012.
- [3] E.V. Lewis, Society of Naval Architects, and Marine Engineers (U.S.). *Principles of naval architecture*. Principles of Naval Architecture. Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1989.

## A Manoeuvreeer-model

Dit hoofdstuk is toegevoegd om het gebruikte manoeuvreermodel te beschrijven. Het is in dit rapport opgenomen om het model te tonen dat de gebruiker gehanteerd heeft en om de berekeningen te kunnen reproduceren voor eventuele herberekeningen.

Het gebruikte model is eenvoudig gehouden, echter dit model wordt gehanteerd om snel de manoeuvreer-coëfficiënten te kunnen bepalen. Om manoeuvres onderling te vergelijken is dit model voldoende adequaat.

De coëfficiënten zijn te vinden in „the Principle of Naval Architecture part 3” [3] bladzijde 198 en 248 en [2] pagina 157 De coëfficiënten zijn uitgedrukt in dimensieloze coëfficiënten en kunnen voor de simulaties dimensievol worden gemaakt.

De dimensieloze coëfficiënten zijn (zie [3], pagina 248) :

$$\begin{aligned}
 Y'_v &= -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left(1. + .16c_b \frac{B}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L}\right)^2\right) \\
 Y'_r &= -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left(0.67 \frac{B}{L} - 0.0033 \left(\frac{B}{T}\right)\right) \\
 N'_v &= -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left(1.1 \frac{B}{L} - 0.041 \frac{B}{T}\right) \\
 N'_r &= -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left(\frac{1}{12} + .017c_b \frac{B}{T} - 0.33 \frac{B}{L}\right)
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 Y'_v &= -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left(1. + 0.40c_b \frac{B}{T}\right) \\
 Y'_r &= -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left(-0.5 + 2.2 \frac{B}{L} - 0.08 \frac{B}{T}\right) \\
 N'_v &= -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left(0.5 + 2.40 \frac{B}{L}\right) \\
 N'_r &= -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left(0.25 + 0.039 \frac{B}{T} - 0.56 \frac{B}{L}\right)
 \end{aligned}$$

Wanneer trim aanwezig is worden de coëfficiënten aangepast. De trim is gedefinieerd als:

$$t = T_{ap} - T_{fp} \quad \text{en de gemiddelde diepgang als:} \quad T = \frac{T_{ap} + T_{fp}}{2} \tag{8}$$

dan wordt de correctie volgens Inoue an Kijima:

$$\begin{aligned}
 Y'_v(t) &= Y'_v(0) \left(1. + 0.67 \frac{t}{T}\right) \\
 Y'_r(t) &= Y'_r(0) \left(1. + 0.80 \frac{t}{T}\right) \\
 N'_v(t) &= N'_v(0) \left(1. - 0.27 \frac{t}{T} \frac{Y'_v(0)}{N'_v(0)}\right) \\
 N'_r(t) &= N'_r(0) \left(1. + 0.30 \frac{t}{T}\right)
 \end{aligned} \tag{9}$$

De dimensieloze parameters en coëfficiënten zijn als volgt bepaald:

$$v' = \frac{v}{U} \tag{10}$$

$$Y'_v = \frac{Y_v}{\frac{\rho}{2} L^2 U} \tag{11}$$

en

$$N'_v = \frac{Y_v}{\frac{\rho}{2} L^3 U} \tag{12}$$

Zoals eerder vermeldt zijn de coëfficiënten volgens ”the Principle of Naval Architecture part 3” uitgedrukt in dimensieloze coëfficiënten. De dimensieloze

coëfficiënten die betrekking hebben op de kinematica, zoals (rotatie-)snelheden en (rotatie-)versnellingen, zijn gedefiniëerd als (zie [3] pagina 198):

$$\begin{aligned} u' &= \frac{u}{u} = 1 & v' &= \frac{v}{u} & r' &= \frac{rL}{u} \\ \dot{u}' &= \frac{\dot{u}L}{u^2} & \dot{v}' &= \frac{\dot{v}L}{u^2} & \dot{r}' &= \frac{rL\dot{u}}{u^2} \end{aligned} \quad (13)$$

De relatie tussen de dimensieloze kracht en de echte (dimensievolle) kracht is:

$$Y' = \frac{Y}{\frac{\rho}{2}L^2u^2} \quad (14)$$

en voor de momenten geldt:

$$N' = \frac{N}{\frac{\rho}{2}L^3U^2} \quad (15)$$

De dimensievolle coëfficiënten kunnen als volgt worden berekend. Eerst wordt het rechterleden van de dimensieloze bewegingsvergelijkingen gegeven (dat zijn de externe krachten die op het schip werken):

$$\begin{aligned} Y' &= Y'_v\dot{v}' + Y'_r\dot{r}' + Y'_v v' + Y'_r r' \\ N' &= N'_v\dot{v}' + N'_r\dot{r}' + N'_v v' + N'_r r' \end{aligned} \quad (16)$$

Beide vergelijkingen (16) kunnen worden vermenigvuldigd met respectievelijk  $\frac{\rho}{2}L^2u^2$  en  $\frac{\rho}{2}L^3u^2$  om de dimensievolle krachten en momenten te verkrijgen. (Zie ook vergelijkingen (14) en (15)).

Merk op dat iedere term in het rechterlid ook vermenigvuldigd dient te worden. De kinematische variabelen (met een accent-teken (')) worden vervangen door de vergelijkingen uit (13).

Vanuit de relaties tussen de dimensieloze en de dimensievolle coëfficiënten worden de volgende coëfficiënten berekend:

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{2}L^2u^2Y'_v v' &= \frac{\rho}{2}L^2uvY'_v = Y_{uv}uv \\ \frac{\rho}{2}L^2u^2Y'_r r' &= \frac{\rho}{2}L^3urY'_r = Y_{ur}ur \\ \frac{\rho}{2}L^2u^2Y'_v\dot{v}' &= \frac{\rho}{2}L^3\dot{v}Y'_v = Y_{\dot{v}}\dot{v} \\ \frac{\rho}{2}L^2u^2Y'_r\dot{r}' &= \frac{\rho}{2}L^4\dot{v}Y'_r = Y_{\dot{r}}\dot{r} \\ \frac{\rho}{2}L^3u^2N'_v v' &= \frac{\rho}{2}L^3uvN'_v = N_{uv}uv \\ \frac{\rho}{2}L^3u^2N'_r r' &= \frac{\rho}{2}L^4urN'_r = N_{ur}ur \\ \frac{\rho}{2}L^3u^2N'_v\dot{v}' &= \frac{\rho}{2}L^4\dot{v}N'_v = N_{\dot{v}}\dot{v} \\ \frac{\rho}{2}L^3u^2N'_r\dot{r}' &= \frac{\rho}{2}L^5\dot{v}N'_r = N_{\dot{r}}\dot{r} \end{aligned} \quad (17)$$

De relaties tussen de dimensieloze and dimensievolle coëfficiënten worden:

$$\begin{aligned} Y_{uv} &= \frac{\rho}{2}L^2Y'_v \\ Y_{ur} &= \frac{\rho}{2}L^3Y'_r \\ Y_{\dot{v}} &= \frac{\rho}{2}L^3Y'_v \\ Y_{\dot{r}} &= \frac{\rho}{2}L^4y'_r \\ N_{uv} &= \frac{\rho}{2}L^3N'_v \\ N_{ur} &= \frac{\rho}{2}L^4N'_r \\ N_{\dot{v}} &= \frac{\rho}{2}L^4N'_v \\ N_{\dot{r}} &= \frac{\rho}{2}L^5y'_r \end{aligned} \quad (18)$$

De dimensievolle vergelijkingen worden nu:

$$\begin{aligned} Y &= Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{uv}uv + Y_{ur}ur \\ N &= N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{uv}uv + N_{ur}ur \end{aligned} \quad (19)$$



De (lineaire) bewegingsvergelijkingen in het platte vlak kunnen worden uitgebreid wanneer de  $X$ -krachten, (dat zijn de krachten in langsrichting,) de Euler bewegings-vergelijkingen en de azimuth propeller invloeden ook zijn inbegrepen:

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} - vr) &= X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{uu}u^2 + X_{vv}v^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 + X_{azi.prop} \\
 m(\dot{v} + ur) &= Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{uv}uv + Y_{ur}ur + Y_{azi.prop} \\
 I_{44}\dot{r} &= N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{uv}uv + N_{ur}ur + N_{azi.prop}
 \end{aligned} \tag{20}$$

De  $X$ -coëfficiënten  $X_{vv}$ ,  $X_{uv}$  en  $X_{ur}$  kunnen berekend worden vanuit de coëfficiënten  $Y_{uv}$ ,  $Y_{ur}$ ,  $N_{uv}$  en  $N_{ur}$  met behulp van de Prandtl-Lanchester theorie (Zie [https://en.wikipedia.org/wiki/Lifting-line\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Lifting-line_theory)). De coëfficiënt  $X_{uu}$  heeft betrekking op de weerstandscurve van het schip. De coëfficiënt  $X_{\dot{u}}$  is de bijdrage van de hydromechanische massa en deze bedraagt ongeveer 15% van de massa van het schip.

Om de vergelijkingen op te lossen zijn, moeten de volgende (aanvangs)parameters bekend zijn:

- $L$  : lengte van het schip [ $m$ ]
- $B$  : breedte van het schip [ $m$ ]
- $T$  : diepgang van het schip [ $m$ ]
- $c_b$ : blokcoëfficiënt van het schip [ ]
- $I_{44}$ : Massa-traagheidsmoment van het schip [ $kg\ m^2$ ]
- $u$ : langssnelheid van het schip [ $\frac{m}{s}$ ]
- $v$ : dwarsnelheid van het schip [ $\frac{m}{s}$ ]
- $r$ : giersnelheid van het schip [ $\frac{rad}{s}$ ]
- $\rho_w$ : soortelijke massa van het water is  $1000.0\frac{kg}{m^3}$