

## Belasting door scheepvaart in Amsterdam-Rijnkanaal

Maatregelen wateroverlast kanalen - SITO Programmasubsidie IenW 2024



**Belasting door scheepvaart in Amsterdam-Rijnkanaal**  
Maatregelen wateroverlast kanalen - SITO Programmasubsidie IenW 2024

**Auteur(s)**

Iris Hartstra

Arne van der Hout

## Belasting door scheepvaart in Amsterdam-Rijnkanaal

Maatregelen wateroverlast kanalen - SITO Programmasubsidie IenW 2024

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	SITO-PS IenW
<b>Referenties</b>	INF14 Maatregelen ter reductie wateroverlast langs kanalen
<b>Trefwoorden</b>	Scheepvaartbelasting, retourstroming, schroefstraalstroming, secundaire golven, AIS data

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	05-12-2025
<b>Projectnummer</b>	11210303-018
<b>Document ID</b>	11210303-018-GEO-0007
<b>Pagina's</b>	51
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	Definitief

### Auteur(s)

	Iris Hartstra Arne van der Hout	

# Samenvatting

Deltares voert binnen het SITO-PS thema infrastructuur onderzoeken uit die oplossingen moeten aandragen voor vraagstukken die optreden bij nieuwe infrastructuur en/of instandhouding van reeds bestaande infrastructuur, waaronder kanalen. Verbredingen en/of verdiepingen van kanalen zoals die in het verleden zijn uitgevoerd om meer scheepvaart en schepen van zwaardere klasse toe te staan, zijn in de toekomst niet zondermeer mogelijk. De beperkte beschikbare ruimte langs kanalen en de invloed die verbreding en verdieping op de omgeving hebben, kan een bezwaar of belemmering inhouden. De invloed op de omgeving kan door aanpassing van kanalen toenemen, o.a. in de vorm van wateroverlast, bijvoorbeeld als het kanaal hoger ligt dan de omgeving. Het is voor de kanaalbeheerder noodzakelijk inzicht te hebben in de mogelijke maatregelen ter verbetering van de kanalen (met reductie van wateroverlast) en de consequenties daarvan om onderbouwde keuzes te kunnen maken. Dit staat centraal in het SITO-PS onderzoek “Maatregelen ter reductie wateroverlast langs kanalen (ARK)” waarbij het Amsterdam-Rijnkanaal tussen Breukelen en Nigtevecht als case wordt gebruikt.

Eén van de uitgangspunten voor de beoordeling van maatregelen zijn de stroomsnelheden die langs de bodem zullen optreden. Deze rapportage onderzoekt op basis van de beschikbare theorieën wat de belasting op de kanaalbodem is die door scheepvaart wordt gegenereerd in het beschouwde projectgebied van het Amsterdam-Rijnkanaal.

Langs het kanaalsegment tussen Nigtevecht en Breukelen is overduidelijk wateroverlast en welvorming geconstateerd, die tot problemen bij landbouw en waterbeheer leiden, en waarvan de verwachting is dat dit door de scheepvaart wordt veroorzaakt. Op basis van beschikbare literatuur en ontwerprichtlijnen zijn inschattingen gemaakt van de door scheepvaart geïnduceerde stromingen op de bodem, zoals retourstroming, schroefstraalstroming en orbitaalstroming van secundaire scheepsgolven. Voor het bepalen van deze stromingswaarden zijn kanaaldoorsnedes van bathymetrie data van dit segment van het kanaal uit 2023 van TAUW als uitgangspunt genomen. Uit deze schattingen blijkt dat de retourstroming veroorzaakt door M8 en M12 schepen veruit de hoogste en daarmee maatgevende stroming is die bodemerosie veroorzaakt.

Aanvullend bepalen we de retourstroming met een hogere nauwkeurigheid door de daadwerkelijke vaarsnelheid en excentriciteit van de M8 en M12 schepen vast te stellen door een analyse van AIS scheepsdata van het jaar 2023 uit te voeren. Uit deze data blijkt dat beide scheepsklassen overwegend excentrisch varen in het Amsterdam-Rijnkanaal, waardoor de retourstromingswaarden voor deze scheepsklassen hoger uitvallen. Uit deze analyse is gebleken dat het aannemelijk is dat de voornaamste erosiegeulen zichtbaar in de kanaaldoorsnedes veroorzaakt zijn door de excentrisch-varende M8 schepen met piekretourstromingswaarden bij de bodem van 2,1 tot 2,3 m/s, alsook door excentrisch-varende M12 schepen met waarden van 2,4 tot 2,9 m/s. Deze maatgevende scheepsgeïnduceerde stromingswaarden vormen de invoerwaarden om de schuifspanning aan de bodem te bepalen (zie Deelproject DP1.2) alsook om de effectiviteit en weerbaarheid van kansrijke maatregelen te duiden (zie Deelproject DP3.1).

Voor vervolgonderzoek stellen we het volgende voor:

1. Testen van bevindingen in praktijk en laboratorium:
  - Het is belangrijk om de bevindingen van deze studie te testen in het veld, in combinatie met laboratorium-schaalproeven. Dit kan bijvoorbeeld als

onderdeel van een pilot om de effectiviteit en weerbaarheid van voorgestelde maatregelen tegen bodemerosie te toetsen.

2. Gebruik en uitbreiding van AIS-data:
  - AIS-data inzetten om scheepspassages in kaart te brengen, aangezien deze de retourstroming significant kunnen versterken.
  - Combinatie van AIS- en IVS-data om ook de diepgang van schepen mee te nemen bij het bepalen van scheepsgeïnduceerde stromingswaarden.
  
3. Integratie met bathymetrie en modellering:
  - De met AIS-data verfijnde stromingswaarden combineren met bathymetrie-data en morfologische modellering met als doel de bodemerosie nauwkeuriger en betrouwbaarder in kaart te brengen.
  - Dit maakt het mogelijk om toekomstvoorspellingen te doen, bijvoorbeeld bij een verwachte toename van grotere schepen in een kanaal of havengebied.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
	<b>Inhoud</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Aanleiding	8
1.2	Doelstelling	9
<b>2</b>	<b>Achtergrondinformatie ARK en scheepsbelasting</b>	<b>11</b>
2.1	Kanaal geometrie (ontwerp)	11
2.2	Omgevingscondities Amsterdam-Rijnkanaal	11
2.3	Scheepvaartbelasting	13
2.3.1	Scheepsgrootte en -snelheid	13
2.3.2	Retourstroming	13
2.3.3	Schroefstraalstroming	14
2.3.4	Secundaire golven	14
<b>3</b>	<b>Berekening stroming door scheepvaart</b>	<b>15</b>
3.1	Schepen	15
3.2	Kanaaldoorsnedes	15
3.2.1	Methode	15
3.2.2	Resultaat	17
3.3	Retourstroming en waterspiegeldaling	17
3.3.1	Methode	17
3.3.2	Resultaten	19
3.4	Schroefstraalstroming	22
3.4.1	Methode	22
3.4.2	Resultaat	23
3.5	Secundaire scheepsgolven	25
3.5.1	Methode	25
3.5.2	Resultaat	25
3.6	Duiding	27
<b>4</b>	<b>AIS data analyse</b>	<b>29</b>
4.1	Classificatie schepen	29
4.2	Intensiteit scheepvaart gedurende het jaar	30
4.3	Verificatie	31
4.3.1	Vaarsnelheid	31
4.3.2	Excentriciteit	32
4.3.3	Retourstroming	37
4.4	Samenvatting	38

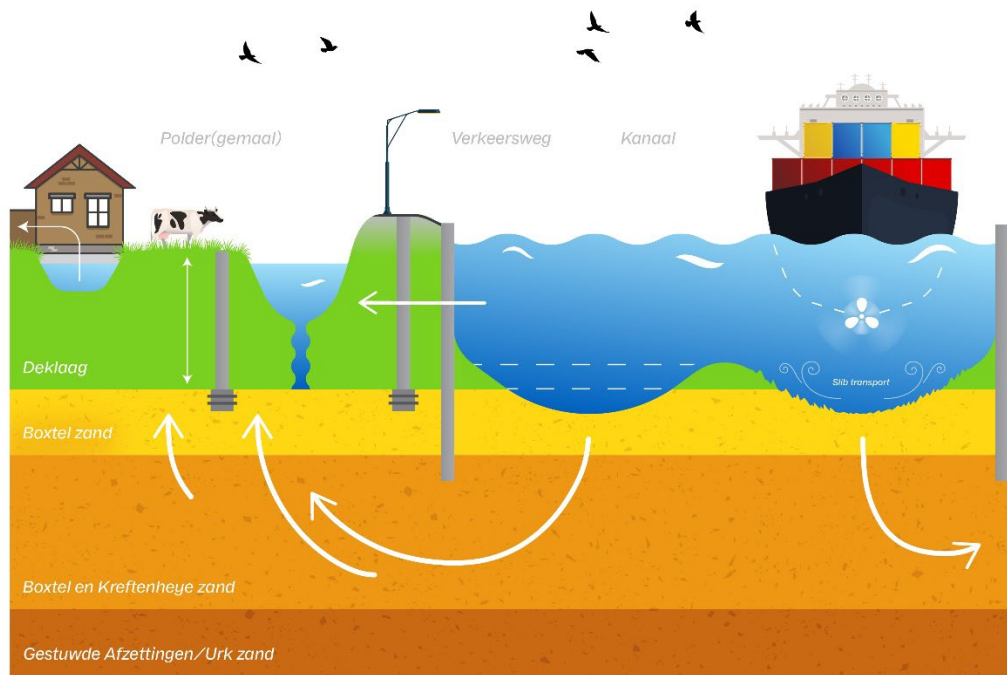
4.5	Duiding	39
<b>5</b>	<b>Conclusie</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>Aanbevelingen</b>	<b>42</b>
	<b>Referenties</b>	<b>43</b>
<b>A</b>	<b>Additionele resultaten</b>	<b>45</b>
A.1	Lage waterstand	45
A.1.1	Retourstroming en waterspiegeldaling	45
A.2	Schroefstraalstroming	46
A.3	Grootste schip	47
A.3.1	Retourstroming	47
<b>B</b>	<b>Literatuur samenvattingen</b>	<b>48</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Deltares voert binnen het thema infrastructuur o.a. onderzoeken uit die oplossingen moeten aandragen voor vraagstukken die optreden bij nieuwe infrastructuur en/of instandhouding van vaarwegeninfrastructuur, meer specifiek kanalen. Verbredingen en/of verdiepingen van kanalen zoals die in het verleden zijn uitgevoerd om meer scheepvaart en schepen van zwaardere klasse toe te staan, zijn in de toekomst niet zondermeer mogelijk. De beperkte beschikbare ruimte langs kanalen en de invloed die verbreding en verdieping op de omgeving hebben, kan een bezwaar of belemmering inhouden. De invloed op de omgeving kan door aanpassing van kanalen toenemen, o.a. in de vorm van wateroverlast, bijvoorbeeld als het kanaal hoger ligt dan de omgeving. Het is voor de kanaalbeheerder noodzakelijk inzicht te hebben in de mogelijke maatregelen ter verbetering van de kanalen (met reductie van wateroverlast) en de consequenties daarvan om onderbouwde keuzes te kunnen maken. Dit staat centraal in het SITO-PS onderzoek “Maatregelen ter reductie wateroverlast langs kanalen (ARK)” waarbij het Amsterdam-Rijn Kanaal tussen Breukelen en Nigtevecht als case wordt gebruikt.

Deze rapportage is een product binnen Deelproject DP1.1 “Kanaal en belasting door scheepvaart” als onderdeel van het systeembegrip (zie Projectplan – SITO Programmasubsidie IenW, 2024) en behandelt specifiek de belasting door scheepvaart op een kanaalbodem. De belasting door scheepvaart neemt toe doordat enerzijds de scheepvaart is toegenomen en anderzijds dit tot benodigde aanpassingen van het kanaal heeft geleid. Deze aanpassingen, denk aan verdieping, kunnen op zichzelf tot extra belasting op de omgeving leiden. De stijghoogte van grondwater in de omgeving van kanalen zal toenemen als bij toenemende diepte van het kanaal de hydraulische weerstand van de lagen onder de kanaalbodem wordt gereduceerd. Dit is zeker het geval als het kanaal wordt verdiept tot in zandige lagen. Door gebruik van relatief grotere schepen neemt bovendien de kans op het ontstaan van erosiegeulen toe. Voor de omgeving betekent ontgroning en lekkage door de kanaalbodem dat de kweldruk toeneemt, met grotere kans op vernatting van de ondergrond en maaiveld of op het ontstaan van wellen. De schematische weergave van het systeem in Figuur 1-1 beschrijft deze problemen: hier is te zien hoe erosiegeulen door de deklaag snijden waardoor het water door de doorlatende zandlagen weg kan sijpelen naar de omringende landbouwgebieden. Het Amsterdam-Rijnkanaal wordt in het gehele programma als case studie gekozen. Langs een deel van dit kanaal is overduidelijk wateroverlast en welvorming geconstateerd (tussen Nigtevecht en Breukelen), die tot problemen bij landbouw en waterbeheer leiden. Om die reden beschouwen we in deze studie alleen deze sectie van het kanaal (zie Figuur 1-2).



Figuur 1-1 Schematische weergave van het bodem- en grondwatersysteem rond het Amsterdam-Rijnkanaal (uit Projectplan – SITO Programmasubsidie IenW, 2024).

## 1.2 Doelstelling

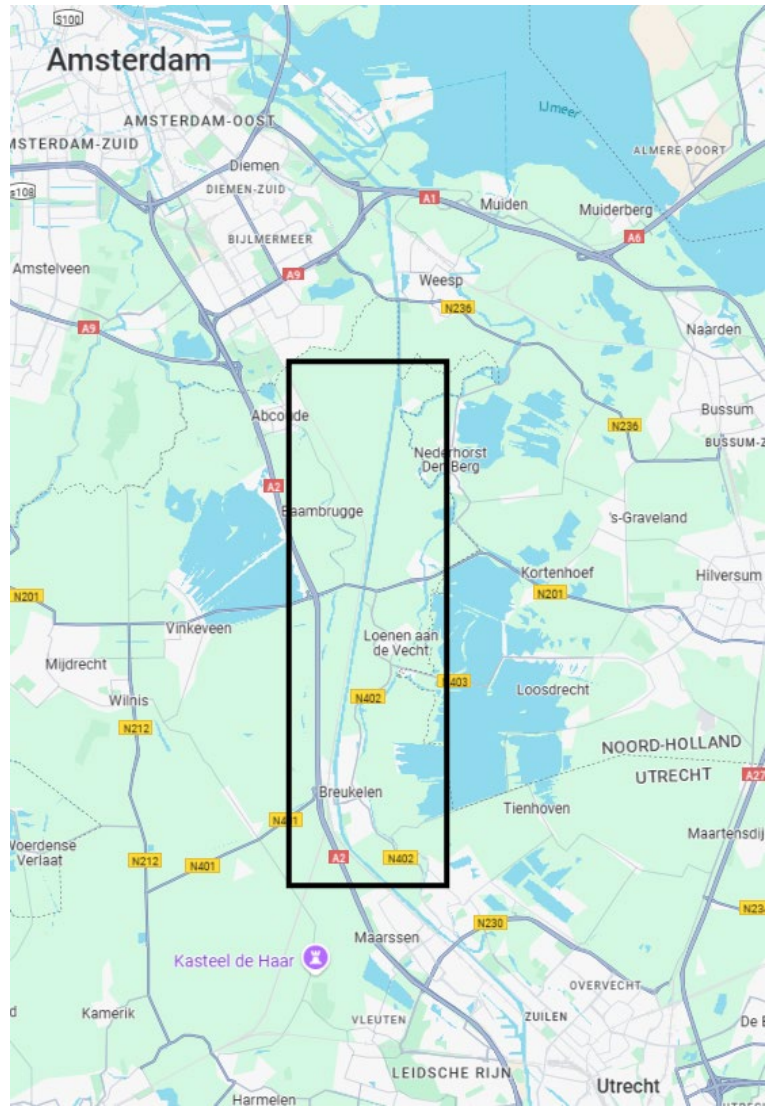
Het doel van deze studie is inzicht te verschaffen in de grootte van de belasting op de kanaalbodem door schepen (o.a. door schroefstraalstroming en retourstroming) om dit als uitgangspunt te nemen voor de relatie met erosie van de kanaalbodem en kansrijkheid van maatregelen. Hiertoe is het zaak voldoende begrip te ontwikkelen over de rol die de belasting door scheepvaart speelt in de erosie van de kanaalbodem in het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) en hoe dit veranderd is sinds voorgaande studies (met name Deltares (2012)). Daartoe stellen we vast welke aspecten een dominant effect op de belasting hebben, o.a. de invloed van:

- Kanaalgeometrie a.d.h.v. bathymetrie-data 2023 aangeleverd door TAUW.
- Scheepsgrootte/scheepssnelheid.
- Omgevingscondities (e.g. variatie waterstand en stroomsnelheid).
- Excentrisch varen/afstand tot de oever.

Op basis van beschikbare literatuur en ontwerprichtlijnen (zie Appendix B) worden orde-grootte inschattingen gemaakt van de belastingen door scheepvaart op de bodem van het ARK. Hierbij moet gedacht worden aan het schatten van o.a.:

- Retourstroming/primaire golfhoogte (waterspiegeldaling),
- Schroefstraalstroming,
- Secundaire golfhoogtes.

Als laatste voeren we een AIS-studie uit om de geschatte stromingswaarden te verifiëren met de daadwerkelijk geregistreerde scheepvaart (e.g. scheepsklasse-distributie, snelheid en excentriciteit) in het Amsterdam-Rijnkanaal.



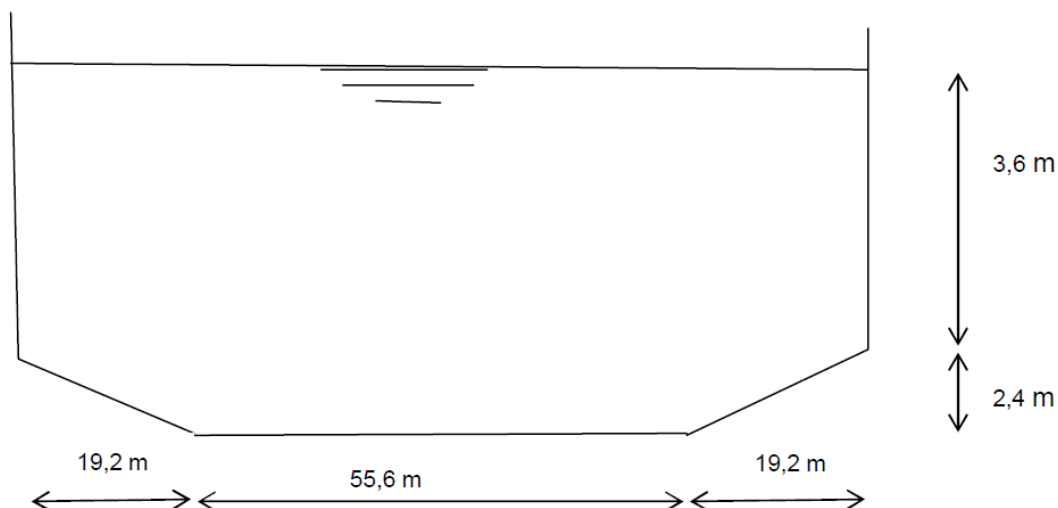
Figuur 1-2 Sectie van het Amsterdam-Rijnkanaal onderzocht in deze studie van Nigtevecht tot Breukelen (Google Maps, 2024).

## 2 Achtergrondinformatie ARK en scheepsbelasting

Er zijn meerdere studies relevant bij het schatten van erosie door stroming aan de bodem door scheepvaartbelasting. Het gaat om literatuur over de eigenschappen/condities van het Amsterdam-Rijnkanaal en literatuur over de impact van scheepvaartbelasting op de bodem. Hieronder geven we een overzicht van de meest relevante studies.

### 2.1 Kanaal geometrie (ontwerp)

De geometrie van de kanaaldoorsnede is een belangrijke invoerwaarde voor het schatten van stroomsnelheden veroorzaakt door de scheepvaart. Het Amsterdam-Rijnkanaal als ontwerp heeft een bakvormig profiel met een breedte op de waterspiegel variërend van 70 tot 120 m en voor de teen van de damwanden onderwatertaluds met een helling 1:8 (Lieveense, 2012). Figuur 2-1 laat een schematische weergave van een kanaaldoorsnede zien uit Deltares (2012) die als maatgevend referentieprofiel gebruikt wordt in de huidige studie (ontwerp profiel A), omdat de breedte van 94 m veelvuldig voorkomt langs het ARK.

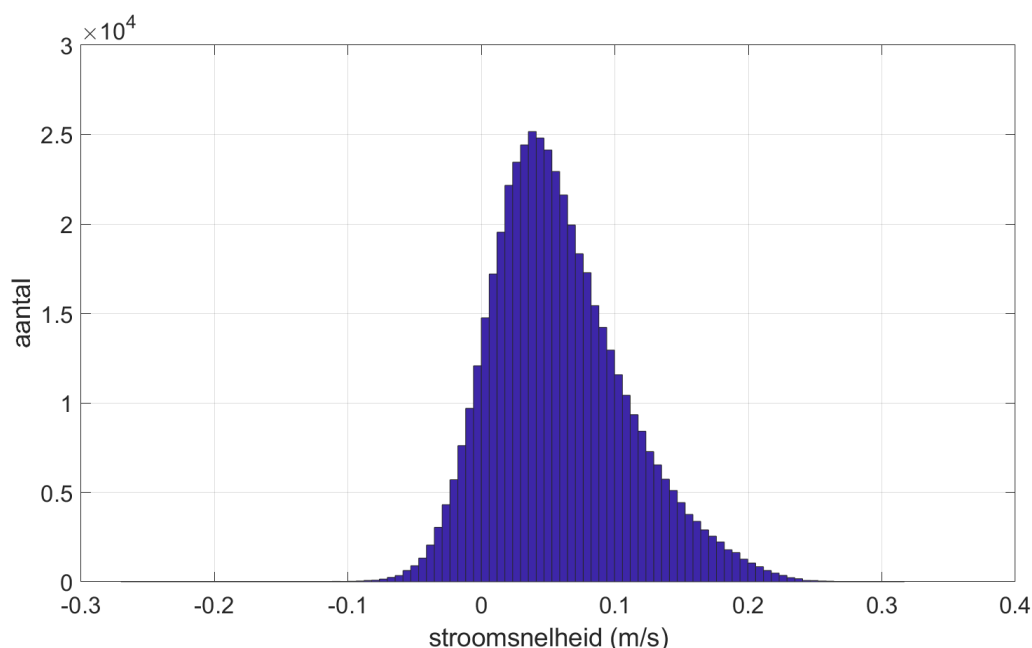


Figuur 2-1 Kanaaldoorsnede (profiel A) die in de huidige studie als maatgevende referentie kanaaldoorsnede van het ARK wordt gebruikt (uit Deltares, 2012).

### 2.2 Omgevingscondities Amsterdam-Rijnkanaal

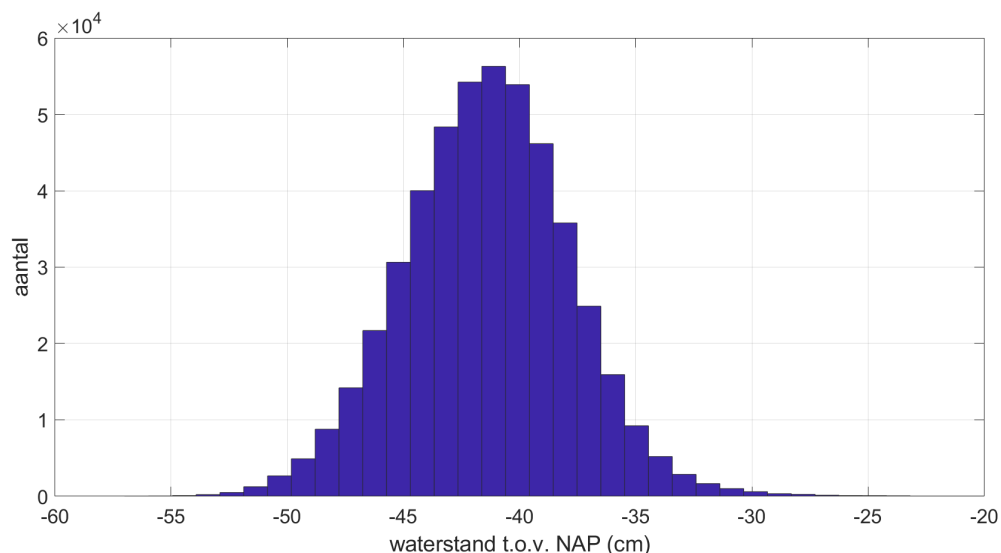
Het Amsterdam-Rijnkanaal verbindt de Amsterdamse haven met het Ruhrgebied en is het drukst bevaren kanaal ter wereld met 100.000 schepen per jaar (website van RWS). Het voor de huidige studie geselecteerde kanaalsegment tussen Nigtevecht en Breukelen bevindt zich tussen twee grote sluizencomplexen: naar de Noordzee bij IJmuiden en richting het zuiden met het Prinses Irene sluizencomplex. Het waterpeil van het ARK wordt mede dankzij deze sluizen op het streefpeil van NAP -40 cm gehouden. Langs het kanaalsegment bevinden zich verder drie grote bruggen: de Liniebrug, Loenerslootsebrug en Breukelerbrug. Aanmeren langs het kanaal is alleen mogelijk aan het begin en eind van het kanaalsegment: bij Nigtevecht en Breukelen. Daarom is de verwachting dat de scheepsgeïnduceerde stromingen in dit kanaalsegment hoofdzakelijk door doorvarende schepen worden veroorzaakt en laten we de invloed van aanmeren en manoeuvres buiten beschouwing. Er zijn weinig data beschikbaar over de precieze samenstelling van de bodem van het ARK, maar in Deltares (2012) is uit eerdere baggerwerkzaamheden afgeleid dat de bodem

grotendeels bedekt is met een sliblaag met een gemiddelde dikte van 20 cm. In Hoogeveen (2024) wordt deze sliblaag nader beschreven aan de hand van data ingewonnen bij het DINOKET: het slib is een holocene klei-veen deklaag die een waterdoorlatende zandlaag bedekt (met uitzondering van de locaties waar het slib is weggebaggerd of geërodeerd). Door schepen omgewoeld slib kan verplaatsen als de stroomsnelheid niet verwaarloosbaar is. In Deltares (2012) wordt uitgegaan van een verwaarloosbare stroomsnelheid in het Amsterdam-Rijnkanaal. Om die reden controleren we dit aan de hand van Rijkswaterstaat (RWS) data: We berekenen de stroomsnelheid in het kanaal a.d.h.v. debietmetingen van oppervlakte water (elke 10 minuten steekbemonstering uit afvoerkromme) van 1 november 2014 tot en met 31 december 2023 voor een kanaaldoorsnede van 558 m<sup>2</sup> (minimum van de kanaaldoorsnedes behandeld in deze studie, zie Figuur 3-1). Dit wijst uit dat de stroomsnelheid in het kanaal varieert tussen -0,27 en +0,32 m/s met een gemiddelde van 0,06 m/s en een standaard deviatie van 0,05 m/s (zie Figuur 2-1). Bij stromingen van 0,06 tot 0,1 m/s zal de bodemschuifspanning zeer laag zijn onder de condities in het ARK (voor een waterdiepte van 6 m en Manning coëfficiënt van 0,015), namelijk rond de 0,01 N/m<sup>2</sup> (Widdows, 2007). Aangezien de kritische schuifspanning van slib rond de 0,3 – 1,0 N/m<sup>2</sup> ligt (Noordhuis en Penning, 2021), gaan we ook in de huidige studie naar hydraulische oorzaken van bodemerosie uit van een verwaarloosbare stroomsnelheid in het kanaal en concentreren we ons uitsluitend op de hydraulische belasting door doorvarende scheepvaart.



*Figuur 2-1 Verdeling van afgeleide metingen in stroomsnelheid in ARK bij meetpunt Weesp West van de periode 1 november 2014 tot en met 31 december 2023 (Rijkswaterstaat Waternet).*

Ook voor het controleren van de variatie van de waterstand in het Amsterdam-Rijnkanaal gebruiken we data van RWS van de periode van 1 november 2014 tot en met 31 december 2023. Analyse van deze data laat zien dat de waterstand varieert tussen NAP -57 cm en NAP -16 cm, waarbij de gemiddelde waterstand NAP -41 cm is met een standaarddeviatie van 3,5 cm (zie Figuur 2-2). In deze studie gaan we uit van een waterstand van NAP -40 cm.



Figuur 2-2 Verdeling van waterstandsmetingen in het ARK bij meetpunt Weesp West van de periode 1 november 2014 tot en met 31 december 2023 (Rijkswaterstaat Waternet).

## 2.3 Scheepvaartbelasting

### 2.3.1 Scheepsgrootte en -snelheid

De grootte van de schepen bepaalt voor een belangrijk deel de diepgang van schepen en de snelheid. In Deltares (2012) worden klassen M8 en M12 als maatgevend genomen. In Ten Hove (2010) worden 5 scheepsklassen als maatgevend beschouwd; naast M8 en M12 ook de tussenliggende M9, M10 en M11. Hun geladen diepgang ligt tussen 3,5 en 3,8 m, waarbij M10 een uitzondering vormt met een diepgang van 4,2 m. De maximaal toegestane scheepsafmeting is 200 m lengte, 22,5 m breedte en 4 m diepgang (zie Binnenvaart Politie Reglement). De maximaal toegestane vaarsnelheid is 18 km/uur (5 m/s) (vastgesteld in Besluit UT-99/14, 19-07-1999). Deze waarden zullen in Hoofdstuk 5 nader bekeken worden aan de hand van AIS data.

### 2.3.2 Retourstroming

Er bestaan uiteenlopende methodes met variërende betrouwbaarheid om de retourstroming te bepalen. In 1949 is de vuistregel ontwikkeld genaamd de methode van Schijf, welke empirisch is afgeleid van veldmetingen (zie Schijf (1949) en hoofdstuk 4 van de Rock Manual, 2007). Met de methode van Schijf wordt een schatting gemaakt van de gemiddelde retourstroming in een kanaal, waarbij is aangenomen dat het kanaal een prismatische vorm heeft. WL | Delft Hydraulics (1986) heeft aangetoond dat de piek retourstroming bij de bodem (onder de boeg van het schip) afgeleid kan worden van de waarde verkregen met de methode van Schijf door een correctiefactor (alpha) van 1,5 – 2,0 toe te passen. Uit de literatuurstudie van Robijns (2014) blijkt een grote spreiding te bestaan in deze correctiefactor, die de piek retourstroming bij de bodem relateert aan de berekende gemiddelde retourstroming volgens de Schijf methode. Verder blijkt de correctiefactor o.a. afhankelijk te zijn van het kanaal of de rivier waarin gemeten is: in het afstudeerwerk van Lenselink (2011) wordt een maximale waarde van 1,31 vastgesteld voor de rivier de Waal terwijl Deltares (2014) een waarde van 1,55 voor het Julianakanaal vindt. Opvallend is dat in de validatie studie van Stolker en Verheij (2006) een spreiding van 1-5 is gevonden voor deze correctiefactor. In dezelfde studie hebben de auteurs drie verschillende laboratorium datasets gebruikt ter validatie van verschillende methodes. De zeer hoge correctiefactor van ~5 voor de methode van Schijf werd gevonden voor een dataset van experimenten in een faciliteit gekenmerkt door een kanaaldoorsnede die de vorm van een perfecte rechte bak heeft en is daarmee weinig representatief voor de huidige studie. Bij een coëfficiënt gekozen

op 1,75 zat de retourstroming bepaald met de methode van Schijf dichterbij de waarden van de andere datasets van experimenten, maar toonde alsnog grote spreiding. In dezelfde studie van Stolker en Verheij (2006) wordt ook de methode van Maynard (Martin en Maynard, 1994) gevalideerd met dezelfde datasets. De methode van Maynard is een analytische methode, die direct de piekretourstroming bij de bodem berekent, waarbij kalibratie van vier verschillende coëfficiënten nodig kan zijn. Deze methode blijkt de stroming te onderschatten en daarom kalibreren de auteurs deze vergelijking opnieuw, wat een beter resultaat geeft. Tot slot, introduceren Stolker en Verheij (2006) een functionele formule die vergelijkbaar is met de methode van Maynard, maar ook de invloed van de ratio tussen het natte oppervlak en de kanaaldoorsnede meeneemt. De opnieuw gekalibreerde methode van Maynard en deze functionele vorm toonden beiden een goede overeenkomst met de velddata, waarbij de opnieuw gekalibreerde eruit sprong als de beste match. Om die reden passen we in de huidige studie deze twee methoden toe om tot een betrouwbare schatting van de retourstroming in het ARK te komen. Daarnaast gebruiken we ook de methode van Schijf met correctiefactor van 2, om vergelijking met andere studies te bevorderen, daar deze methode veelvuldig gebruikt wordt.

### 2.3.3 Schroefstraalstroming

De stroomsnelheid veroorzaakt door de schroefstraal van de hoofdschroef kan geschat worden aan de hand van vuistregels beschreven in Deltares (2012). Met deze formules kan de schroefstroomsnelheid op elk willekeurig punt ten opzichte van de schroef berekend worden. Stroming veroorzaakt door schroefstralen (inclusief schroefstraal turbulentie) wordt in de vaarweg verwaarloosbaar geacht in vergelijking tot de retourstroming (Deltares, 2012). Daarentegen is schroefstraalstroming bij lig- of aanlegplaatsen de voornaamste oorzaak van bodemerosie (RDV Nota, 1985). Hawkswood (2016) onderzoekt de erosie bij aanlegplaatsen veroorzaakt door de invloed van schroefstralen tijdens het af- of aanmeren. In de huidige studie beschouwen we alleen de schroefstraalstroming veroorzaakt door de hoofdschroeven van varende schepen, omdat de aanmeerplekken zich alleen aan de twee uiteinden van het geselecteerde kanaalsegment bevinden (bij Nigtevecht en Breukelen). Een uitdaging bij het bepalen van de maximale schroefstraalstroming bij de bodem zit in het corrigeren voor de vaarsnelheid van het schip zelf. Om die reden gebruiken we zowel de methode zoals beschreven in Deltares (2012) als de methode uiteengezet in de BAW (2010), die op een andere manier voor de vaarsnelheid corrigeert.

### 2.3.4 Secundaire golven

Varende schepen creëren transversale en longitudinale golven, die samen door interferentie zogeheten secundaire scheepsgolven genereren. Het stromingseffect van de orbitaalsnelheid van secundaire scheepsgolven op de bodem is vergelijkbaar met het effect van windgolven. Daarom gebruiken we in deze studie dezelfde formules om de orbitaalsnelheid bij de bodem te bepalen (zie hoofdstuk 4 uit de Rock Manual (2007) en WL | Delft Hydraulics 1986). Deltares (2012) rapporteert dat golfhoogten van 0,5 tot 0,75 m veel voorkomen, maar dat maxima van 1 m ook mogelijk zijn in extreme gevallen in het Amsterdam-Rijnkanaal. Stroomsnelheden veroorzaakt door secundaire golven worden in die studie buiten beschouwing gehouden. In de huidige studie (Sectie 3.5) verifiëren we deze aanname.

## 3 Berekening stroming door scheepvaart

We berekenen de retourstroming, waterspiegeldaling, schroefstraalstroming en secundaire scheepsgolven voor verschillende scheepsklassen en kanaaldoorsnedes geselecteerd langs het ARK.

### 3.1 Schepen

In lijn met eerdere studies, zoals Deltares (2012), selecteren we de M8 en M12 als maatgevende scheepsklassen, waarvan M12 het grootste type is. Tabel 3-1 geeft de karakteristieken weer van deze scheepsklassen.

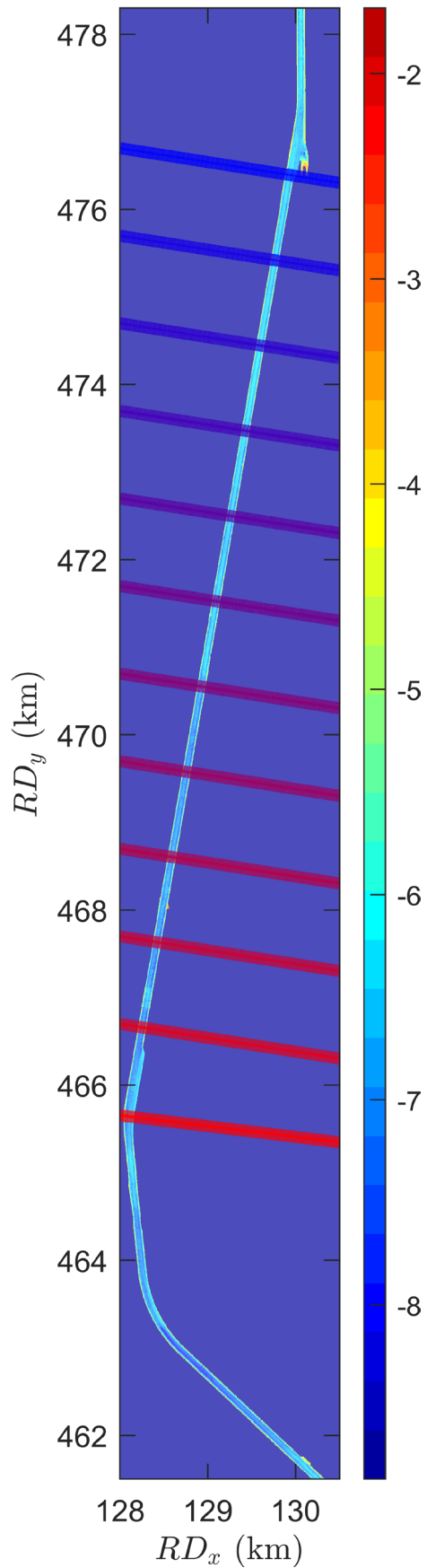
Tabel 3-1 Karakteristieken van scheepsklassen M8 en M12 (Richtlijnen Vaarwegen 2020)

	M8	M12
Lengte (m)	110	135
Breedte (m)	11,4	17
Diepgang geladen schip (m)	3,5	4,0
Diepgang ongeladen schip (m)	1,8	2,0
Max. vermogen (kW)	1700	2800
Diameter propeller (m)	2,0	2,3

### 3.2 Kanaaldoorsnedes

#### 3.2.1 Methode

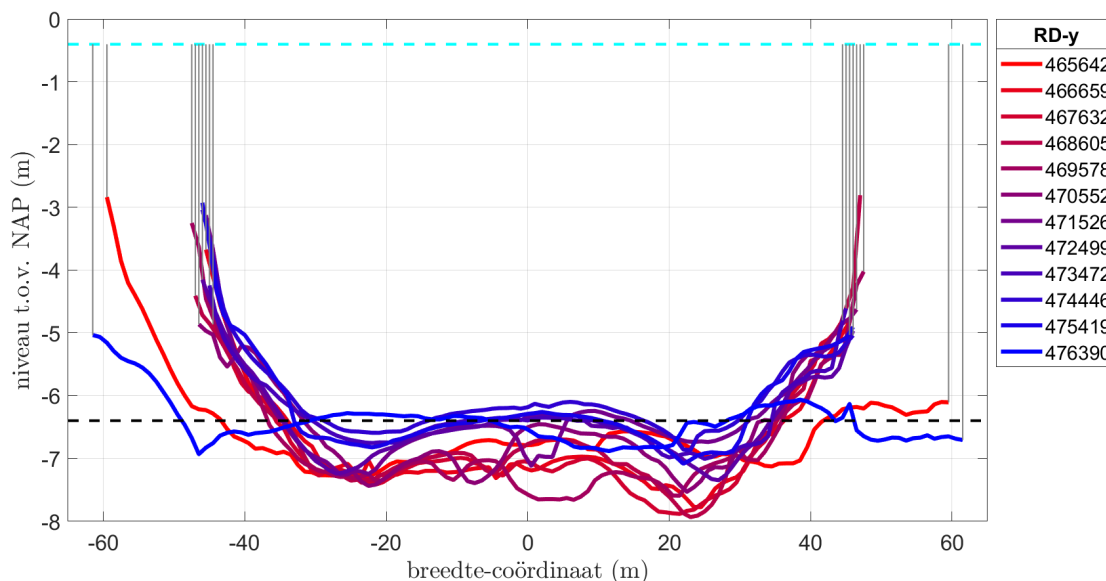
Om werkelijke profielen te kunnen gebruiken, selecteren we 12 doorsnedes van de bathymetrie data uit 2023 van het Amsterdam-Rijnkanaal (aangeleverd door TAUW in Rijksdriehoekskoördinaten, zie Hoogeveen (2024) voor meer informatie). Om een globaal beeld te krijgen over de lengte van het geselecteerde kanaalsegment tussen Nigtevecht en Breukelen, beschouwen we voor elke kilometer een kanaaldoorsnede. Deze doorsnedes zijn haaks op de kanaal-as georiënteerd en door middel van 2D interpolatie verkregen. We verwijzen in deze studie naar de kanaaldoorsnedes met de  $RD_y$  coördinaat van de locatie van elke doorsnede langs de kanaal-as.



*Figuur 3-1 Bathymetriekaart uit 2023 van het ARK (aangeleverd door TAUW) met de voor deze studie geselecteerde locaties van de 12 kanaaldoorsnedes. De kleurschaal geeft diepte in meters t.o.v. NAP aan.*

### 3.2.2 Resultaat

In Figuur 3-2 zijn de dieptes van de kanaaldoorsnedes weergegeven zoals geselecteerd voor deze studie in de overzichtskaart van Figuur 3-1. We nemen aan dat de verticale damwanden aan weerszijde van het kanaal zich direct daar bevinden waar de bathymetrie data ophoudt, zoals de grijze verticale lijnen in de figuur weergeven.



Figuur 3-2 Bodemniveau t.o.v. NAP van de 12 kanaaldoorsnedes in Figuur 3-1, waarbij de legenda de lijnkleur en RD-y coördinaat van de kanaal-as van de doorsnede aangeeft. De grijze verticale lijnen geven de geschatte begrenzing door de damwand aan. Het nominale waterniveau van NAP -40 cm en het bodemniveau van het ontwerp profiel A (Figuur 2-1) zijn, respectievelijk, met een lichtblauwe en zwarte onderbroken lijn aangegeven. Negatieve breedte coördinaten geven de westkant van het kanaal aan, de positieve de oostkant.

## 3.3 Retourstroming en waterspiegeldaling

### 3.3.1 Methode

We berekenen de piekretourstroming bij de bodem voor scheepsklassen M8 en M12. We passen hiervoor de methode van Schijf toe zoals omschreven in hoofdstuk 4 van de Rock Manual (2007) alsook de twee methodes uit Stolker en Verheij (2006), namelijk de functionele methode en de opnieuw gekalibreerde methode van Maynard. Voor deze berekeningen gebruiken we het daadwerkelijke oppervlak van elk van de kanaaldwarsdoorsnedes die zijn verkregen uit de bathymetrie data van TAUW (zie Figuur 3-2) door het gebied. Het kanaaldoorsnede oppervlak  $A_c$  wordt bepaald door het oppervlak te berekenen dat begrensd wordt door de kanaaldwarsdoorsnede zoals gemeten door TAUW (rood-blauw gekleurde lijnen), de verticale damwanden (grijze lijnen) en de gemiddelde waterstand van NAP -40 cm (lichtblauwe stippellijn). De gemiddelde waterdiepte,  $\bar{h}$ , wordt berekend door het oppervlak door de breedte van de kanaaldoorsnede,  $b_w$ , te delen:

$$\bar{h} = \frac{A_c}{b_w}$$

Vervolgens berekenen we de daadwerkelijke retourstroming door de onderstaande vergelijkingen iteratief op te lossen (methode van Schijf):

$$F_L = \left( \frac{2}{3} \left( 1 - \left( \frac{A_m}{A_c} \right) + \frac{1}{2} F_L^2 \right) \right)^{3/2}$$

Waar  $A_m$  de natte doorsnede van het schip betreft, en  $F_L$  als invoerwaarde dient om de grenssnelheid geldend in een kanaal te bepalen volgens de methode van Schijf:

$$V_{L,Schijf} = F_L * \sqrt{g * \bar{h}}$$

De grenssnelheid geldend in diep water, waar de scheeps lengte,  $L_s$ , maatgevend is:

$$V_{L,deep} = \sqrt{\frac{g L_s}{2\pi}}$$

De grenssnelheid geldend in ondiep water, waar de golfsnelheid maatgevend is:

$$V_{L,ondiep} = \sqrt{g \bar{h}}$$

De grenssnelheid die wij nodig hebben is het minimum van deze voorgaande drie snelheden. In de scenario's van de huidige studie geldt dat de grenssnelheid van Schijf het kleinst is en geldt daarom als grenssnelheid:

$$V_L = V_{L,Schijf}$$

De vaarsnelheid volgt door het toepassen van coëfficiënt  $f_v$ :

$$V_s = f_v V_L$$

De coëfficiënt duidt de lading van het schip aan ( $f_v = 0,75$  voor geladen en  $f_v = 0,9$  voor ongeladen). Wij kiezen  $f_v = 0,85$  als conservatieve waarde voor geladen en  $0,9$  voor ongeladen schepen. De coëfficiënt bepaalt ook de waarde voor de coëfficiënt  $\alpha_s$ , de factor om het effect van de vaarsnelheid relatief t.o.v. de grenssnelheid uit te drukken:

$$\alpha_s = 1,4 - 0,4 f_v$$

De kanaaldoorsnede-oppervlakte-gemiddelde retourstroming ( $U_R$ ) en de waterspiegeldaling ( $dh$ ) kunnen nu bepaald worden door de volgende twee gekoppelde vergelijkingen iteratief op te lossen:

$$A_c^* = A_c - A_m - b_w dh$$

$$dh = \frac{V_s^2}{2g} \left( \alpha_s \left( \frac{A_c}{A_c^*} \right)^2 - 1 \right)$$

$$U_R = V_s \left( \frac{A_c}{A_c^*} - 1 \right)$$

Waar  $A_c^*$  de kanaaldoorsnede oppervlakte is minus de natte doorsnede van het schip en gecorrigeerd voor de waterspiegeldaling. WL | Delft Hydraulics (1986) bepaalt de piek retourstroming bij de bodem ( $U_{RB}$ ) als volgt:

$$U_{RB,Schijf} = (1,5 \text{ tot } 2)U_R$$

Om conservatief te zijn houden we voor de correctiefactor 2 aan in de huidige studie:

$$U_{RB,Schijf} = 2U_R$$

Een alternatief is de methode die hier eerder is genoemd in sectie 2.3.2 van Maynard (Martin & Maynard, 1994; Stolker en Verheij, 2006 (vergelijking 1)):

$$U_{RB,May,ongekalibreerd} = 0,16V_s \left(\frac{B_s}{\bar{h}}\right)^{0,54} \left(\frac{T}{\bar{h}}\right)^{0,68}$$

Waar  $B_s$  de scheepsbreedte is en  $T$  de diepgang. Deze methode is in Stolker en Verheij (2006) (zie vergelijking 17 in die studie) opnieuw gekalibreerd aan de hand van drie laboratorium veldtests:

$$U_{RB,May} = 1,07V_s \left(\frac{B_s}{\bar{h}}\right)^{0,08} \left(\frac{T}{\bar{h}}\right)^{1,82}$$

Deze opnieuw gekalibreerde methode van Maynard gaf in die studie de beste resultaten. Ook de functionele vorm genoemd in Sectie 2.3.2 en geïntroduceerd in Stolker en Verheij (2006) (vergelijking 16), waarbij additioneel de afhankelijkheid van de boeg-snelheid van de  $A_c/A_m$  ratio is meegenomen, gaf goede resultaten:

$$U_{RB,func} = U_R \left( 1 + 0,041 \left(\frac{\bar{h} - T}{\bar{h}}\right)^{-1,52} \left(\frac{V_s - V_r}{\sqrt{g(\bar{h} - T)}}\right)^{-1,07} \left(\frac{A_c}{A_m}\right)^{0,81} \right)$$

Waar  $V_r$  de stroomsnelheid in het kanaal is, die we voor deze studie op nul zetten.

In deze sectie beschouwen we alleen niet-excentrisch varende schepen. Excentrisch varende schepen zullen apart behandeld worden in Hoofdstuk 4. Voor excentrisch varende schepen is de volgende correctie nodig:

$$U_{RB,func,exc} = U_{RB,func} \left( 1 + y \frac{\bar{h}}{A_c} \right)$$

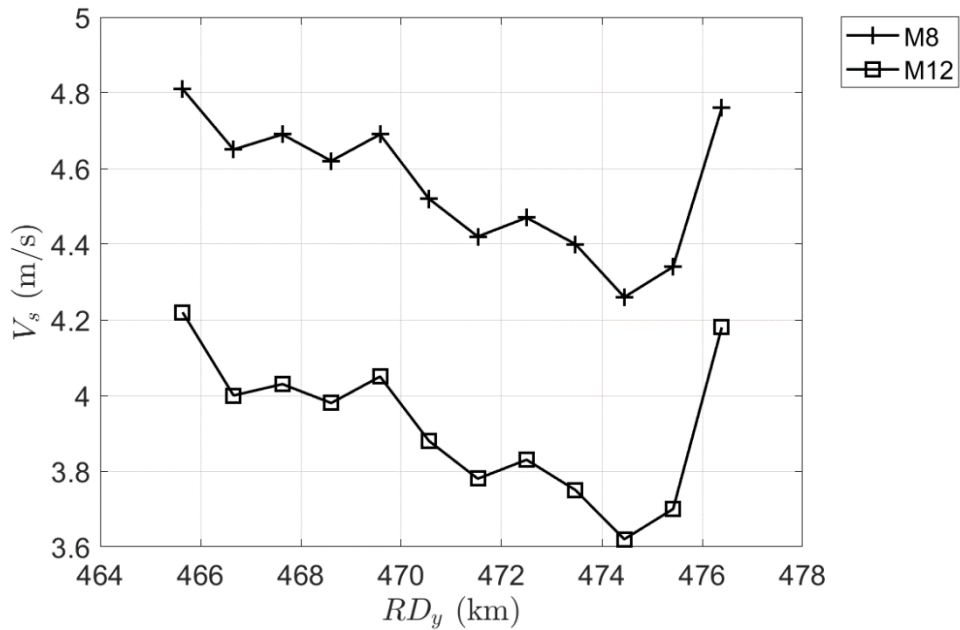
waar  $y$  de absolute waarde van de positie van het schip t.o.v. de kanaal-as is.

### 3.3.2 Resultaten

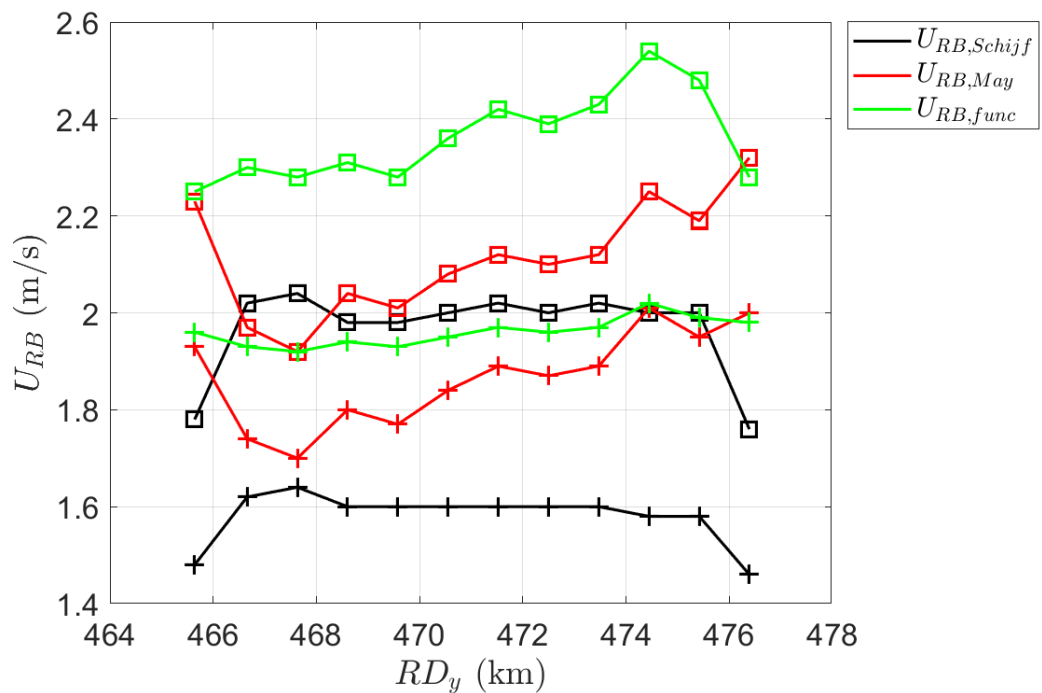
We passen de volgende methodes toe op elk van de 12 doorsnedes voor de twee scheepsklassen M8 en M12:

- Methode van Schijf met correctiefactor 2 toegepast:  $U_{RB,Schijf}$ .
- Opnieuw gekalibreerde methode van Maynard (vergelijking 17 uit Stolker en Verheij, 2006):  $U_{RB,May}$ .
- Functionele methode (vergelijking 16 uit Stolker en Verheij, 2006):  $U_{RB,func}$ .

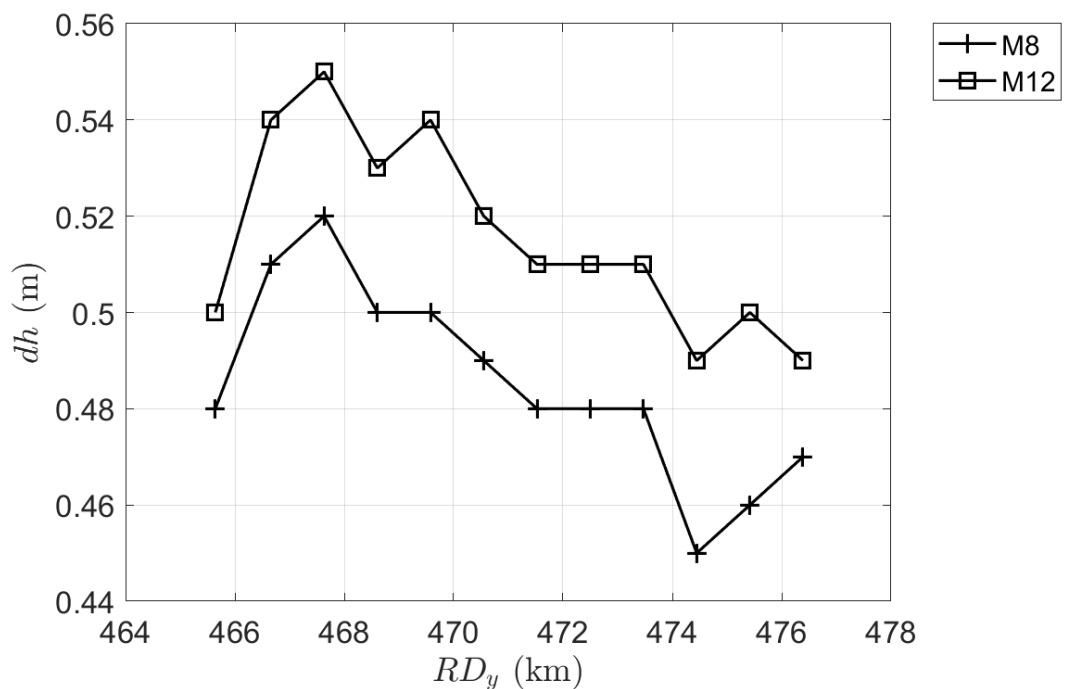
Voor de Maynard en functionele methode gebruiken we de grenssnelheid berekend volgens de methode van Schijf en die staat weergegeven in Figuur 3-3. De hieruit resulterende piekretourstromingswaarden bij de bodem voor geladen schepen zijn weergegeven in Figuur 3-4 en de waterspiegeldaling in Figuur 3-5. Voor ongeladen schepen kiezen we  $f_v = 0,9$  en de ledige diepgang zoals aangegeven in Tabel 3-1, wat een maximum piekretourstroming bij de bodem van 1,78 m/s oplevert. Aangezien deze waarde aanzienlijk lager is dan het maximum gevonden voor geladen schepen, laten we het scenario voor ongeladen schepen verder buiten beschouwing. In Appendix A zijn resultaten voor de retourstroming te zien voor de laagst gemeten waterstand alsook voor het grootste scheepsformaat dat is toegestaan op het ARK. Gezien deze conservatieve omstandigheden beperkt effect hebben op de retourstroming en bovendien nauwelijks voorkomen, nemen we deze resultaten verder niet in beschouwing.



Figuur 3-3 Grenssnelheid voor scheepsklassen M8 (+) en M12 (□) voor elk van de 12 kanaaldoorsnedes berekend met de methode van Schijf.



Figuur 3-4 Piekretourstroming bij de bodem voor scheepsklassen M8 (+) en M12 (□) voor de 12 kanaaldoorsneden berekend met de drie beschreven methoden, voor geladen schepen en waterstand van NAP -0,40 m.



Figuur 3-5 Waterspiegeldaling in meters voor scheepsklassen M8 (+) en M12 (□) voor de 12 kanaaldoorsneden berekend met de methode van Schijf.

In Figuur 3-4 is te zien dat de grotere M12 schepen een significant hogere retourstroming veroorzaken dan de kleinere M8 schepen. Dit is naar verwachting, omdat grotere schepen immers een groter dwarsoppervlak van het kanaal innemen. Verder is te zien dat de

retourstroming lager wordt voor de grotere kanaaldoorsnedes. Neem bijvoorbeeld de duidelijk lagere stroomsnelheden bij Nigtevecht en Breukelen, waar het kanaal breder is. Dit effect is niet zichtbaar voor de Maynard methode, wat te verklaren is door het feit dat deze methode niet het oppervlak van de kanaaldoorsnede meeneemt in de berekening. Verder valt op dat de Maynard methode en de functionele methode conservatiever (hoger) uitvallen dan de methode van Schijf. Tot slot zien we in Figuur 3-5 dat de waterspiegeldaling zoals verwacht overwegend groter is voor M12 schepen en dat deze voor beide schepen hoger is voor de kleinere kanaaldoorsnedes. Een kleine dip is te zien bij doorsnede RD<sub>y</sub> 474 km omdat deze de kleinste kanaaldoorsnede betreft waardoor hier de laagste vaarsnelheid is bepaald met de methode van Schijf (Figuur 3-3).

## 3.4 Schroefstraalstroming

### 3.4.1 Methode

We passen voor de berekening van de schroefstraalstroming de methode toe zoals omschreven in hoofdstuk 4 van de Rock Manual (2007). Dit is dezelfde methode als toegepast in Deltares (2012).

De afstand tussen de onderkant van het schip en de propeller-as is gelijk aan:

$$z_{prop} = 0,5D_p$$

Waar  $D_p$  de daadwerkelijke diameter van de propeller is (zie Tabel 3-1). De verticale afstand tussen de schroefas en de bodem is:

$$z_p = h - T + z_{prop}$$

Waar  $T$  de diepgang van het schip is en  $h$  de maximale waterdiepte (of de diepte langs de vaargeul) die gebaseerd is op de nominale waterstand (NAP -40 cm). Gebruikmakend van de scheepsgegevens uit Tabel 3-1 kan de uitstroomsnelheid bij de schroef in  $m/s$  als volgt berekend worden:

$$U_0 = 1,15 \left( \frac{\eta P}{\rho_w D_0^2} \right)^{1/3}$$

Waarbij  $D_0$  de effectieve diameter van de propeller is (in deze studie stellen we deze gelijk aan  $D_p$  volgens de PIANC richtlijn (2015) voor M8 en M12 schepen, die een straalbuis propeller hebben),  $\rho_w$  de waterdichtheid ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $P$  het vermogen in  $W$  (zie Tabel 3-1) en we nemen het rendement  $\eta$  gelijk aan 0,7. Langs de propeller-as  $x$  is de schroefstraalstroming:

$$U_{as} = 2,8U_0 \frac{D_0}{x}$$

Hiermee kan vervolgens de uitstroomsnelheid aan de bodem berekend worden in het geval dat het schip stil ligt:

$$U_{stil} = U_{as} \exp\left(-\frac{15,4r^2}{x^2}\right)$$

Waarbij  $r$  de afstand loodrecht op de  $x$ -as is. Voor de huidige studie willen we alleen de maximale uitstroomsnelheid aan de bodem weten, welke voor een stilliggend schip gelijk is aan (zie Deltares (2012) voor details afleiding):

$$U_{b,max,0} = 0,3U_0 \frac{D_0}{z_p}$$

Wanneer we uitgaan van twee schroeven, wordt dit:

$$U_{b,max,0,2schroeven} = \sqrt{2}U_{b,max,0}$$

De maximale uitstroomsnelheid aan de bodem voor een varend schip met twee schroeven komt door substitutie uit op:

$$U_{b,max,v} = U_{b,max,0,2schroeven} - 0,5V_s$$

Waarbij we het tegengestelde effect van de vaarsnelheid gecorrigeerd hebben met een empirisch vastgestelde factor van 0,5 (in lijn met Deltares, 2012).  $U_{b,max,v}$  is de waarde waarmee we de resultaten hieronder berekenen voor de twee scheepsklassen. Daarnaast laten we ook ter vergelijking de resultaten zien, waarbij we de methode toepassen beschreven in BAW (2010) (formule 5-104) om de maximale uitstroomsnelheid aan de bodem voor een varend schip met twee schroeven te berekenen. Deze methode corrigeert op een andere manier voor de vaarsnelheid, die mogelijk betrouwbaarder is omdat, in plaats van een empirische correctiefactor, hierbij de verhouding tussen de vaarsnelheid en de uitstroomsnelheid wordt meegenomen:

$$U_{b,max,v} = U_{b,max,0,2schroeven} \left(1 - \frac{V_s}{U_{0J}}\right)$$

Waar  $U_{0J}$  de uitstroomsnelheid is (voor een positieve ratio tussen de vaarsnelheid en de propeller draaisnelheid, de propeller voortstuwingsratio:  $J$ ), die voor straalbuis propellers afgeschat kan worden met formule 5-84 uit BAW (2010):

$$U_{0J} = U_0 + \frac{1}{3} \frac{V_A^2}{U_0}$$

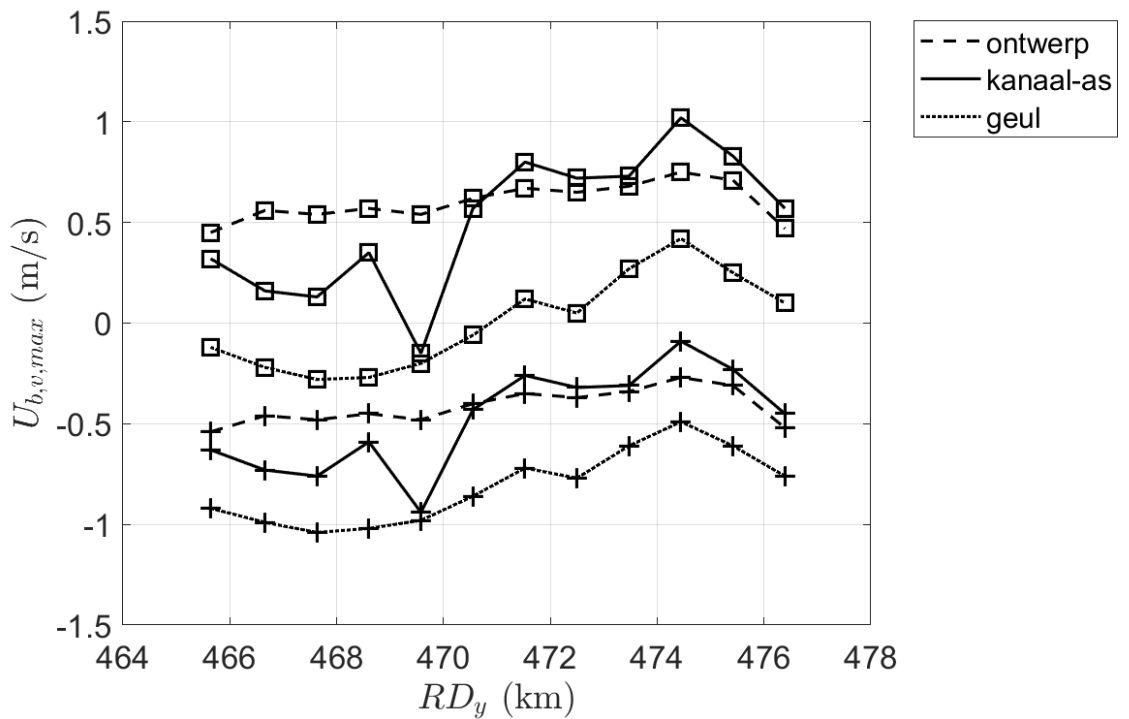
$$V_A = 0,7V_s$$

### 3.4.2 Resultaat

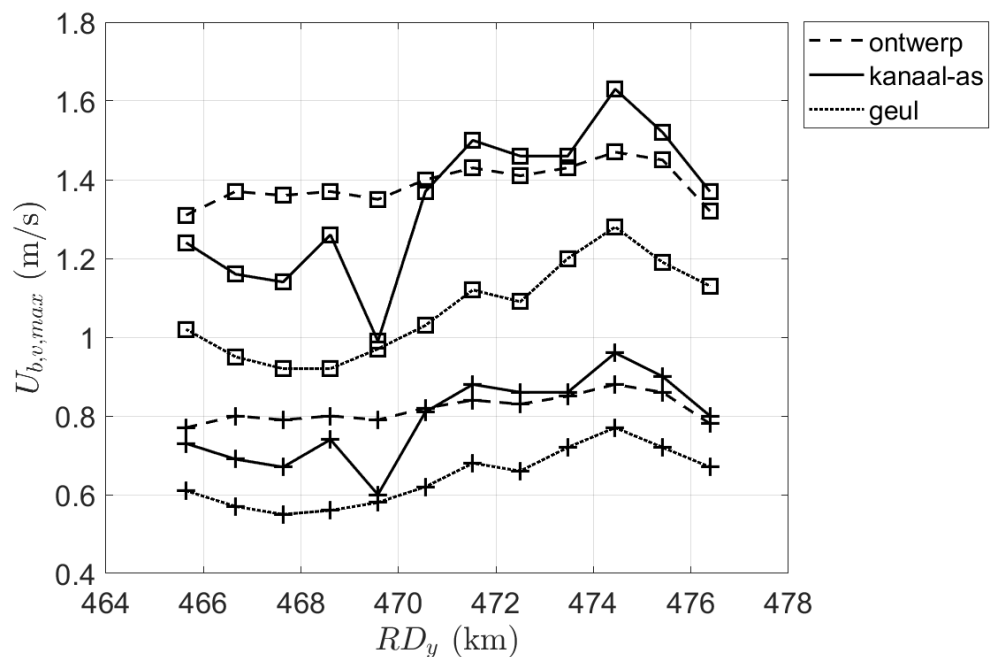
Om inzicht in de spreiding van de schroefstraalstroming te krijgen voeren we dezelfde berekening voor drie verschillende bodemniveaus uit (zie Figuur 3-6):

- Ontwerpwaterdiepte van 6 m (gebaseerd op ontwerpprofiel A).
- Minimale waterdiepte bij de kanaal-as.
- Maximale waterdiepte bij de diepste geul.

De schroefstraalstroming bepaald met de formule voor varende schepen uit BAW (2010) is weergegeven in Figuur 3-7. In Appendix A herhalen we de schroefstraalstromingsberekening voor de laagst gemeten waterstand uit de afgelopen 10 jaar van het ARK. Aangezien deze waterstand nauwelijks voorkomt, nemen we deze resultaten verder niet in beschouwing.



Figuur 3-6 Maximale schroefstraalstroming voor varend schip  $U_{b,v,max}$  met twee schroeven bij de bodem voor scheepsklassen M8 (+) en M12 ( $\square$ ) voor de 12 kanaaldoorsnedes met een vermogensrendement van 70%. Hierbij zijn de ontwerpwaterdiepte (ontwerp), minimale waterdiepte (kanaal-as) en de maximale waterdiepte (geul) als uitgangspunten genomen.



Figuur 3-7 Idem Figuur 3-6, maar dan met de methode volgens BAW (2010) (formule 5.99).

In beide figuren is te zien dat de schroefstraalstroming hoger is voor kleinere waterdieptes, zoals verwacht omdat dan immers minder ruimte aanwezig is tussen de schroef en de bodem. Verder valt op dat de methode om voor vaarsnelheid te corrigeren zoals gedaan in

BAW (2010) waarden geeft die meer dan 0,5 - 1 m/s hoger zijn dan met de methode van Deltares (2012). Vooralsnog zijn ook de hoogste schroefstraalstromingswaarden gevonden met BAW (2010) lager dan de waarden gevonden voor de retourstroming, en daardoor minder maatgevend als oorzaak voor de bodemerosie in het kanaal.

## 3.5 Secundaire scheepsgolven

Zoals eerder toegelicht in Sectie 2.3.4, creëren varende schepen transversale en longitudinale golven die samen door interferentie zogeheten secundaire scheepsgolven genereren. Gezien het effect van secundaire scheepsgolven op de bodem vergelijkbaar is met het effect van windgolven, kunnen windgolfvergelijkingen als basis gebruikt worden (zie hoofdstuk 4 van de Rock Manual).

### 3.5.1 Methode

Voor de berekening van de golfhoogte, lengte en periode van secundaire scheepsgolven in diep water gebruiken we de formules zoals omschreven in hoofdstuk 4 van de Rock Manual (2007) alsook WL | Delft Hydraulics (1986). Deze formules zijn geldig voor toepassing in deze studie, omdat de golflengte kleiner is dan de helft van de ontwerpwaterdiepte en aan de voorwaarde  $\frac{V_s}{\sqrt{gh_A}} < 0,8$  is voldaan. Allereerst berekenen we de afstand van het schip tot aan de oever als volgt:

$$y_s = 0,5b_w - B_s - y$$

Waarbij  $y$  de relatieve positie van het schip ten opzichte van de middenlijn van het kanaal is. Deze nemen we als een kwart van de kanaalbreedte aan (precies tussen de oever en de kanaal-as), maar kan met AIS data nader bepaald worden (zie Hoofdstuk 4). Omdat de kanaalbreedte varieert langs de lengte van het ARK, is  $y_s$  niet constant. De hoogte van secundaire scheepsgolven wordt als volgt berekend:

$$H_i = 1,2\alpha_i \bar{h} \left(\frac{y_s}{h_A}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{V_s^4}{(gh_A)^2}$$

waar  $\alpha_i$  een coëfficiënt is afhankelijk van de scheepsklasse (hier gelijkgesteld aan 1) en  $h_A$  de ontwerpwaterdiepte van profiel A uit Deltares (2012). De golflengte is niet direct afhankelijk van de waterdiepte:

$$L_i = \frac{4,2V_s^2}{g}$$

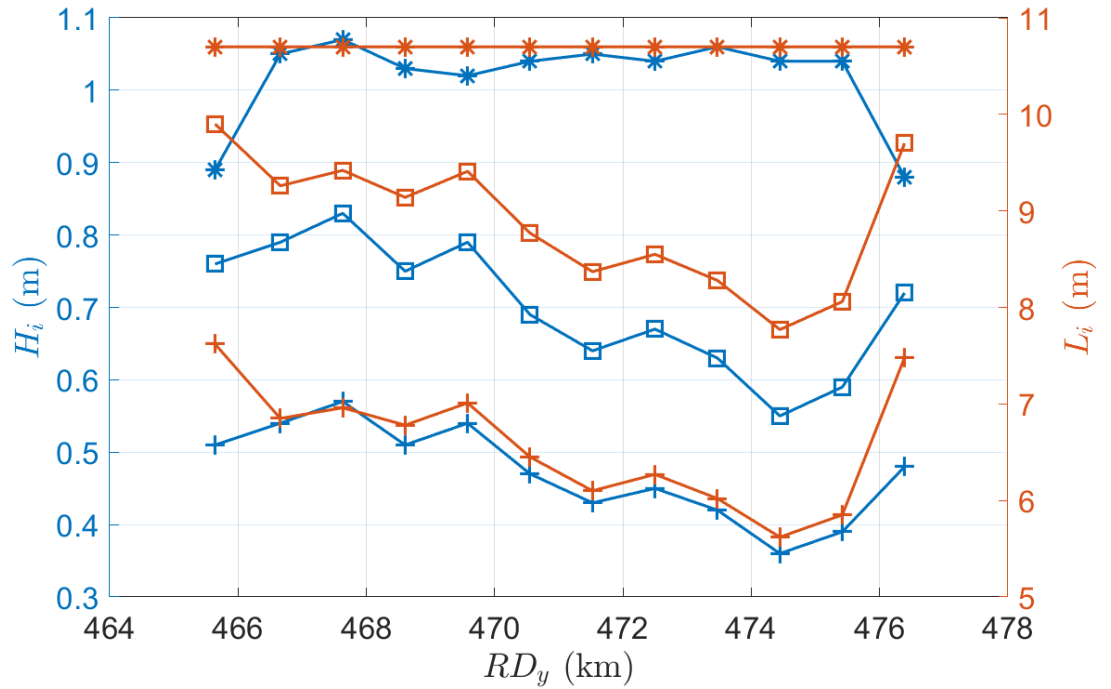
Dit geldt ook voor de golfperiode:

$$T_i = \frac{5,1V_s}{g}$$

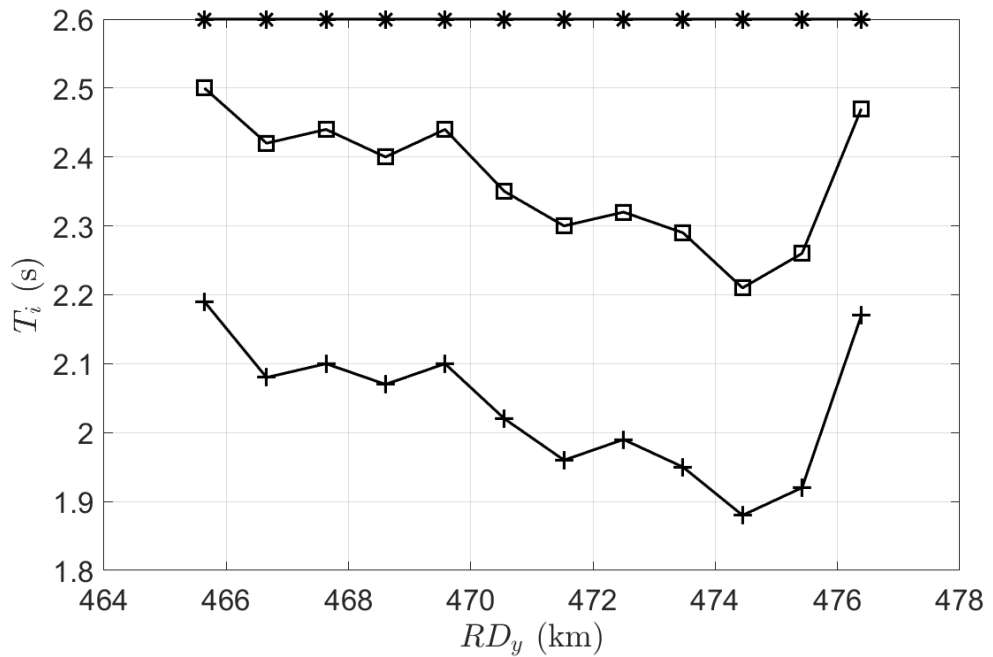
### 3.5.2 Resultaat

Figuur 3-8 geeft de resultaten van de golfhoogte en -lengte, en Figuur 3-9 de golfperiode van secundaire scheepsgolven gegenereerd door M8 en M12 type schepen voor de 12 geselecteerde profielen van het Amsterdam-Rijnkanaal, waarbij we aannemen dat de schepen precies tussen de oever en de kanaal-as varen. Nu is het zo dat juist kleinere schepen vaak grotere secundaire scheepsgolven kunnen veroorzaken, simpelweg omdat deze op de maximaal toegestane snelheid varen. Om die reden staan in de figuren ook de golfwaardes voor een M8 schip varende met maximaal toegestane snelheid  $V_s = 5$  m/s (18

km/uur) weergegeven. We merken daarbij op dat dit resultaat niet varieert met de doorsnede doordat de snelheid constant op 5 m/s gehouden wordt.



Figuur 3-8 Golfhoogte (blauw, linker y-as) en golflengte (oranje, rechter y-as) van secundaire scheepsgolven voor scheepsklassen M8 (+) en M12 ( $\square$ ), en M8 schip varend met de maximaal toegestane snelheid van 5 m/s (\*) voor de 12 kanaaldoorsnedes.



Figuur 3-9 Golfperiode van secundaire scheepsgolven voor scheepsklassen M8 (+) en M12 ( $\square$ ), en M8 varend met de maximaal toegestane snelheid van 5 m/s (\*) voor de 12 kanaaldoorsnedes.

We gebruiken de gevonden waarden voor de golfhoogte, -lengte en -periode om de maximale orbitaalsnelheid bij de bodem te berekenen. Deze kan berekend worden met behulp van de volgende formules 5.4.7 en 5.4.8 uit Holthuijsen (2006):

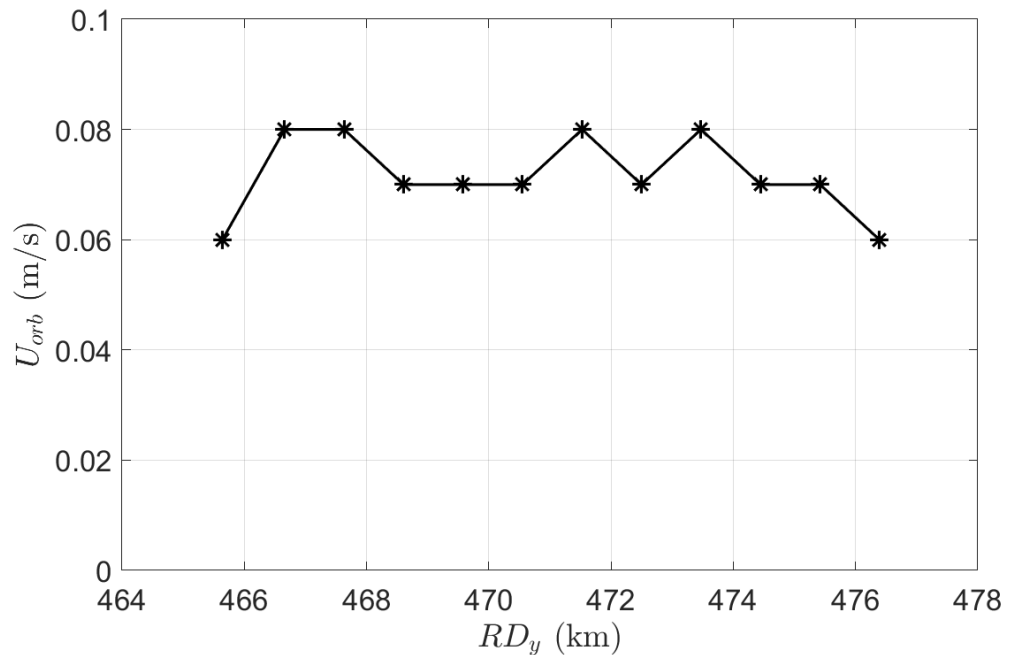
$$U_x = \omega \frac{H_i \cosh[kh_A(h_A + z)]}{2 \sinh(kh_A)}$$

$$U_z = \omega \frac{H_i \sinh[k(h_A + z)]}{2 \sinh(kh_A)}$$

Met het golfgetal:

$$k = \frac{2\pi}{L_i}$$

Hier geldt dat  $z$  gelijk is aan 0 aan het waterniveau en negatief gedefinieerd is naar beneden wijzend. Daarmee geldt dat bij de bodem  $z = -h_A$  voor ontwerpwaterdiepte  $h_A$ , waardoor  $U_z$  automatisch naar nul gaat bij de bodem. Hiermee geldt voor de totale orbitaalsnelheid bij de bodem:  $U_{orb} = U_x$ . Voor een M8 schip dat met de maximale snelheid van 5 m/s vaart, en uitgaande van de ontwerpwaterdiepte van 6 m (profiel A), is de maximale orbitaalsnelheid slechts 0,09 m/s en daarmee verwaarloosbaar (zie Figuur 3-10). Dit is in lijn met de verwachting, omdat het scenario geen ondiep water betreft ( $\tanh(kh_A) \approx 1$ ), en omdat het overeenkomt met de aanname van Deltares (2012).



Figuur 3-10 Orbitaalsnelheid bij de bodem voor M8 schepen die met de maximaal toegestane snelheid van 5 m/s varen, waarbij de ontwerpwaterdiepte 6 m is aangenomen.

### 3.6 Duiding

In deze sectie zetten we de verschillende snelheden aan de bodem, geïnduceerd door de scheepvaart naast elkaar, afgeleid voor de 12 kanaaldoorsnedes. Voor de piekretourstroming bij de bodem kiezen we de functionele methode als meest realistisch. Deze gaf goede resultaten in de validatie van Stolker en Verheij (2006) en neemt, anders dan de methode van Maynard, de ware kanaaldoorsnede in beschouwing. Voor de schroefstraalstroming nemen we de waarden verkregen voor de waterdiepte bij de kanaal-as, geul en de ontwerpdiepte in beschouwing. Bij de bepaling en duiding van deze waarden zijn de

omgevingscondities van het ARK van een periode van iets meer dan 10 jaar meegenomen (Tabel 3-2). De scheepsgeïnduceerde stromingswaarden in deze studie, vastgesteld voor de M8 scheepsklasse staan weergegeven in Tabel 3-3, waarbij de orbitaalsnelheid is toegevoegd voor schepen die de maximaal toegestane snelheid van 18 km/uur (5 m/s) varen. Tabel 3-4 toont de minimale, gemiddelde en maximum waarden voor de M12 scheepsklasse in het ARK afgeleid voor de 12 geselecteerde kanaaldoorsnedes. Hier is de orbitaalsnelheid toegevoegd voor M12 schepen die met de vaarsnelheid bepaald volgens de Schijf methode varen. De waarden in deze tabellen voor M12 schepen laten zien dat de piekretourstroming bij de bodem maatgevend is voor het bepalen van de dominante stroming bij de bodem met een gemiddelde bepaald over de 12 kanaaldoorsnedes van 2,4 m/s en een maximum van 2,5 m/s. De gemiddelde en maximale retourstroming van M8 schepen valt lager uit, met 2,0 m/s, maar is mogelijk belangrijker, omdat M8 schepen veel meer voorkomen op het ARK (zie ook Hoofdstuk 4).

Ter vergelijking met Deltares (2012): in die studie is voor een M12 schip een schroefstraalstroming vastgesteld van 0,4 m/s voor de ontwerpdiepte. Deze waarde komt overeen met de gemiddelde waarde voor M12 schepen gevonden in de huidige studie (zie Tabel 3-4). Voor de piek retourstroming bij de bodem voor een excentrisch-varend M12 schip is in Deltares (2012) een waarde van 2,6 m/s gevonden voor de ontwerpdiepte, wat 0,2 m/s hoger is dan het gemiddelde gevonden voor niet-excentrisch varende M12 schepen in deze studie (zie Tabel 3-4). Daarbij merken we op dat we bij het bepalen van de retourstroming in dit hoofdstuk geen rekening hebben gehouden met excentriciteit, die we, samen met onder andere de daadwerkelijke vaarsnelheid, door middel van een AIS data analyse nader zullen bepalen in Hoofdstuk 4.

Tabel 3-2 Omgevingscondities ARK in de periode van 1 november 2014 tot en met 31 december 2023.

	minimum	gemiddelde	maximum
<b>Stroomsnelheid (m/s)</b>	-0,27	0,06	0,32
<b>Waterhoogte (m)</b>	NAP -0,57	NAP -0,41	NAP +0,16

Tabel 3-3 Maatgevende stromingswaarden voor M8 schepen afgeleid van de 12 geselecteerde kanaaldoorsnedes van het Amsterdam-Rijnkanaal. NB: de orbitaalsnelheid geldt hier voor de maximaal toegestane vaarsnelheid van 18 km/uur (5 m/s).

Stroomsnelheden in m/s	minimum	gemiddelde	maximum
<b>Piekretourstroming bij bodem</b>	1,9	2,0	2,0
<b>Schroefstraalstroming</b>	-1,0	-0,6	-0,1
<b>Schroefstraalstroming (BAW)</b>	0,6	0,8	1,0
<b>Orbitaalsnelheid</b>	<0.1	<0.1	<0.1

Tabel 3-4 Maatgevende stromingswaarden voor M12 schepen afgeleid van de 12 geselecteerde kanaaldoorsnedes van het Amsterdam-Rijnkanaal.

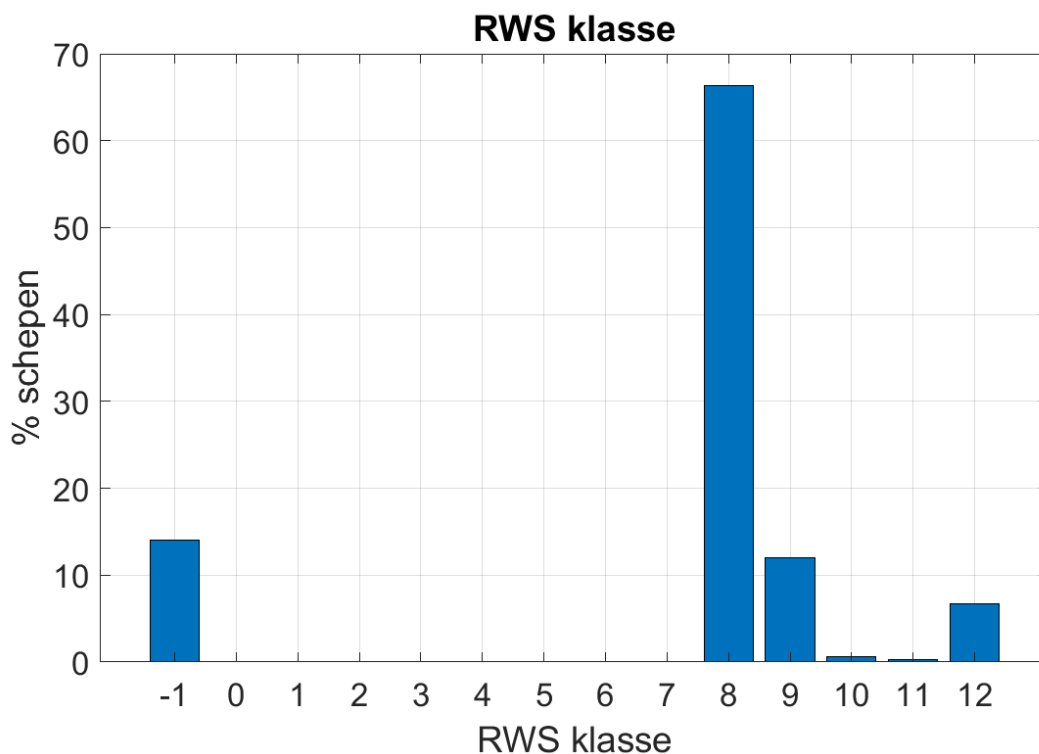
Stroomsnelheden in m/s	minimum	gemiddelde	maximum
<b>Piekretourstroming bij bodem</b>	2,3	2,4	2,5
<b>Schroefstraalstroming</b>	-0,3	0,4	1,0
<b>Schroefstraalstroming (BAW)</b>	0,9	1,3	1,6
<b>Orbitaalsnelheid</b>	<0,1	<0,1	<0,1

## 4 AIS data analyse

Naar aanleiding van de bevindingen uit de literatuur en achtergrondstudie voeren we een AIS data analyse studie uit. Hierbij concentreren we ons met name op het bepalen van de meest voorkomende en grootste scheepsklassen, om van deze de daadwerkelijke vaarsnelheid en de excentriciteit te bepalen t.b.v. het nauwkeuriger bepalen van de eerder geschatte retourstroming. De geanonimiseerde AIS dataset is door RWS geleverd voor de coördinaten (lat, lon) (52.300504, 4.991957) en (52.138518, 5.045060), wat het kanaalsegment van Nigtevecht tot en met Breukelen omvat, van de periode 1 januari 2023 tot en met 31 december 2023. Een aanzienlijk deel van deze dataset bestaat uit stilliggende schepen. Aangezien we in deze studie de focus alleen leggen op bodemerosie veroorzaakt door varende schepen en het in dit deel van het kanaal voornamelijk gaat om doorgaande scheepvaart, laten we aanmerende of manoeuvrerende schepen hier buiten beschouwing door schepen weg te laten die langzamer dan 0,3 km/uur varen.

### 4.1 Classificatie schepen

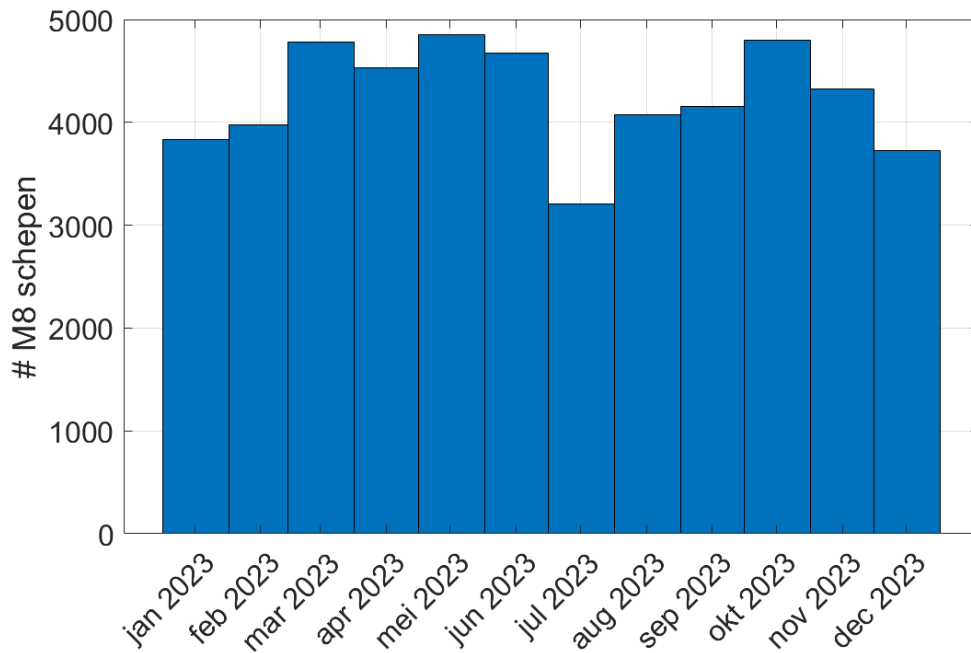
We classificeren de varende schepen aan de hand van de geregistreerde lengte en breedte naar de RWS-klasse zoals beschreven in tabel 8 uit de Richtlijnen Vaarwegen RWS (2020). Hierbij nemen we diepgang niet in beschouwing, omdat deze waarde minder betrouwbaar geregistreerd wordt in de AIS data. In lijn met Deltares (2012), laten we in deze studie duwstellen en koppelverbanden buiten beschouwing. In het resterende onderzoek beschouwen we alleen de scheepsklassen M8 en M12, omdat M8 het meest voorkomt (66%) en M12 de grootste scheepsklasse is in deze dataset (zie Figuur 4-1).



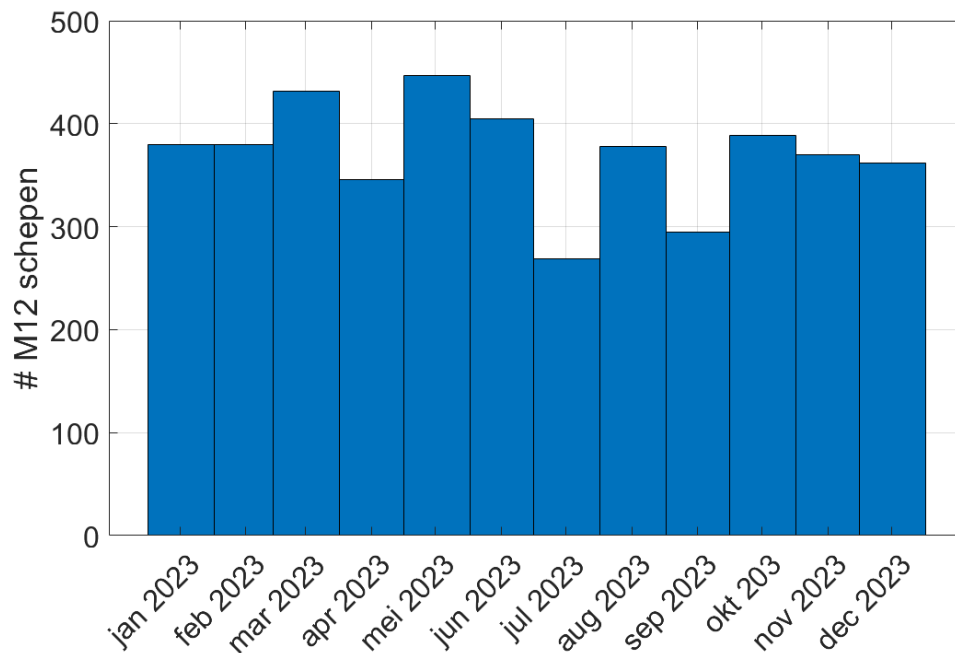
*Figuur 4-1 RWS classificatie verdeling voor alle varende motorschepen (>0,3 km/uur) van de AIS dataset. Groepering -1 bevat de schepen die met hun geregistreerde lengte en breedte maat niet binnen een RWS-klasse passen.*

## 4.2 Intensiteit scheepvaart gedurende het jaar

We maken gebruik van de AIS-data om te bepalen of er sprake is van een seizoensinvloed in de kanaalbelasting door het aantal schepen dat het kanaal is gepasseerd per maand te kwantificeren. In totaal hebben 73541 schepen het beschouwde kanaalsegment gepasseerd in 2023. In onderstaande histogrammen is de scheepsintensiteit per maand voor zowel de M8 als de M12 scheepsklasse weergegeven (Figuur 4-2 en Figuur 4-3). Deze resultaten laten zien dat de vaartintensiteit voor beide scheepsklassen relatief constant is gedurende het jaar. Alleen in de maand juli is een dip waarneembaar, die verklaard wordt door het ontbreken van AIS-data waarnemingen voor de periode van 30 juni tot 11 juli in de aangeleverde dataset.



Figuur 4-2 Aantal M8 schepen dat het kanaalsegment is gepasseerd per maand in 2023.



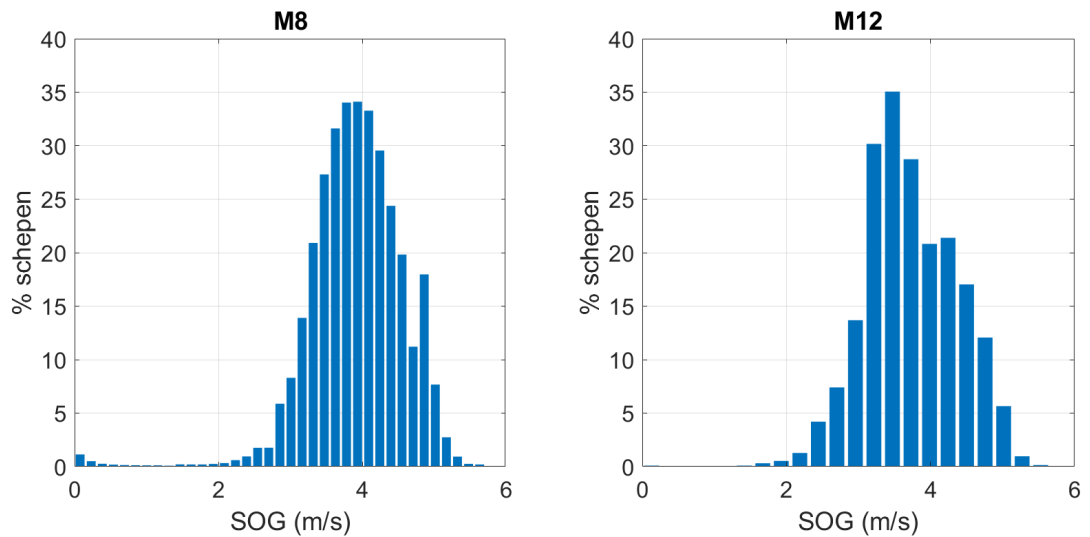
Figuur 4-3 Aantal M12 schepen dat het kanaalsegment is gepasseerd per maand in 2023.

### 4.3 Verificatie

We gebruiken de AIS data om de eerder berekende vaarsnelheid en retourstroming bepaald in Hoofdstuk 3 te controleren. We kijken hiervoor specifiek naar de daadwerkelijke vaarsnelheid en de excentriciteit afzonderlijk voor scheepsklassen M8 en M12.

#### 4.3.1 Vaarsnelheid

In de AIS data is de vaarsnelheid geregistreerd als SOG (*speed over ground*) in knopen. Figuur 4-4 geeft de distributie van de AIS-geregistreerde vaarsnelheid in m/s weer voor afzonderlijk de M8 en M12 schepen. Hier is te zien dat M8 schepen inderdaad harder varen dan M12. In Tabel 4-1 geven we de mediaan weer van de vaarsnelheid over de 12 kanaaldoorsnedes, die in Hoofdstuk 3 conservatief geschat was d.m.v.  $0,85 * V_{L,schijf}$  (zie Figuur 3-3). Deze conservatieve schatting blijkt zoals verwacht inderdaad wat hoger te liggen dan de mediane snelheid die uit de AIS data volgt voor M8 en M12 schepen (respectievelijk 15% en 8% hoger). Deze mediane vaarsnelheden uit de AIS-data zullen we gebruiken voor de herberekening van de retourstroming in Sectie 4.3.3.



Figuur 4-4 Distributie van vaarsnelheid (SOG) in m/s voor M8 (links) en M12 (rechts) schepen in de AIS data.

Tabel 4-1 Vaarsnelheid van scheepsklassen M8 en M12 geschat met Schijf alsook uit AIS data.

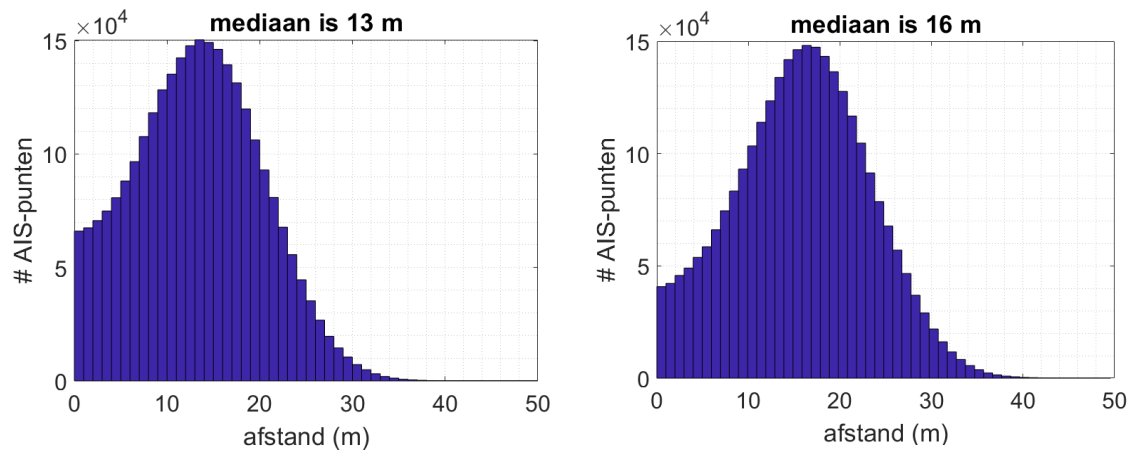
Vaarsnelheid (m/s)	M8	M12
Mediaan van $0,85 * V_{L,Schijf}$	4,57	3,93
Mediaan uit AIS-data	3,96	3,65
90 <sup>ste</sup> percentiel uit AIS-data	4,73	4,58

### 4.3.2 Excentriciteit

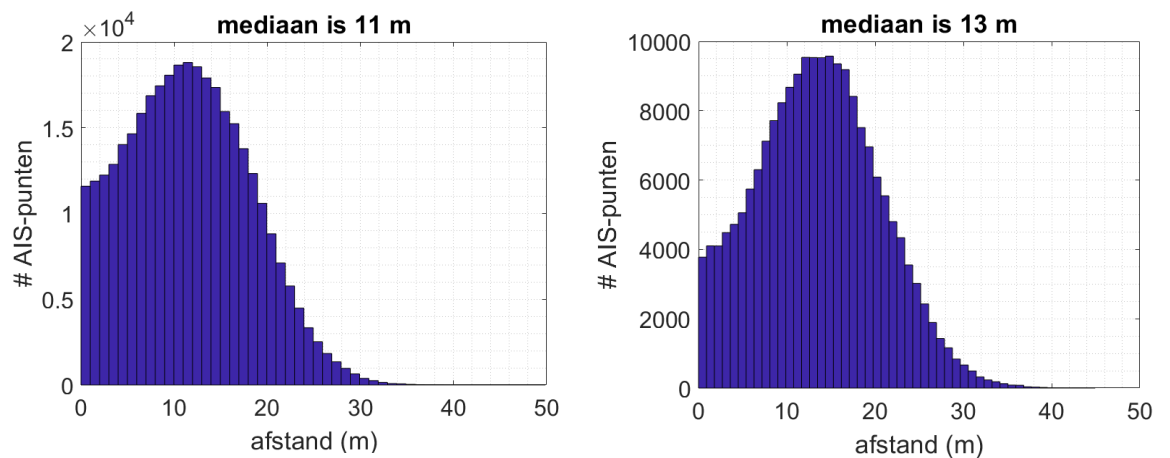
De excentriciteit wordt bepaald door de mate waarin een schip uit het midden vaart ten opzichte van de representatieve breedte van het kanaal. Voor het bepalen van de excentriciteit voor scheepsklassen M8 en M12, selecteren we de volgende twee subsets uit de AIS data:

1. M8 schepen met een vaarsnelheid boven de mediane snelheid van M8 (3,96 m/s).
2. M12 schepen met een vaarsnelheid boven de mediane snelheid van M12 (3,65 m/s).

We kiezen ervoor om schepen varende boven hun mediane snelheid te selecteren voor de subsets, omdat de langzamer varende schepen vanwege de lagere retourstroming weinig maatgevend voor bodemerrosie zijn. We bepalen de absolute afstand ( $y$ ) van elk AIS-meetpunt tot de middenas van het kanaal om een representatieve mediane waarde van de excentriciteit te bepalen voor de noordwaarts en zuidwaarts varende schepen (zie Figuur 4-5 en Figuur 4-6). De AIS dataset geeft geen informatie over de relatieve positie van de AIS transponder ten opzichte van het schip. We maken daarom de aanname dat het AIS meetpunt overeenkomt met de middenas van het schip. Voor het definiëren van de kanaal-as, schematiseren we eerst de westelijke en oostelijke oever van het rechte segment tussen Breukelen en Nigtevecht door twee rechte lijnsegmenten. De kanaal-as definiëren we als de middenlijn van deze twee geschematiseerde oever-zijden (zie Figuur 4-7). Vervolgens maken we een onderscheid tussen zuidwaarts- en noordwaarts-varende schepen. In Figuur 4-8 geeft de kleurenschaal de koers in graden aan van de M8 schepen varende met een snelheid boven de mediaan. Dit toont aan dat M8 schepen rechts aanhouden: de westelijke baan vaart zuidwaarts en de oostelijke baan vaart noordwaarts. Figuur 4-9 laat hetzelfde zien voor M12 schepen.

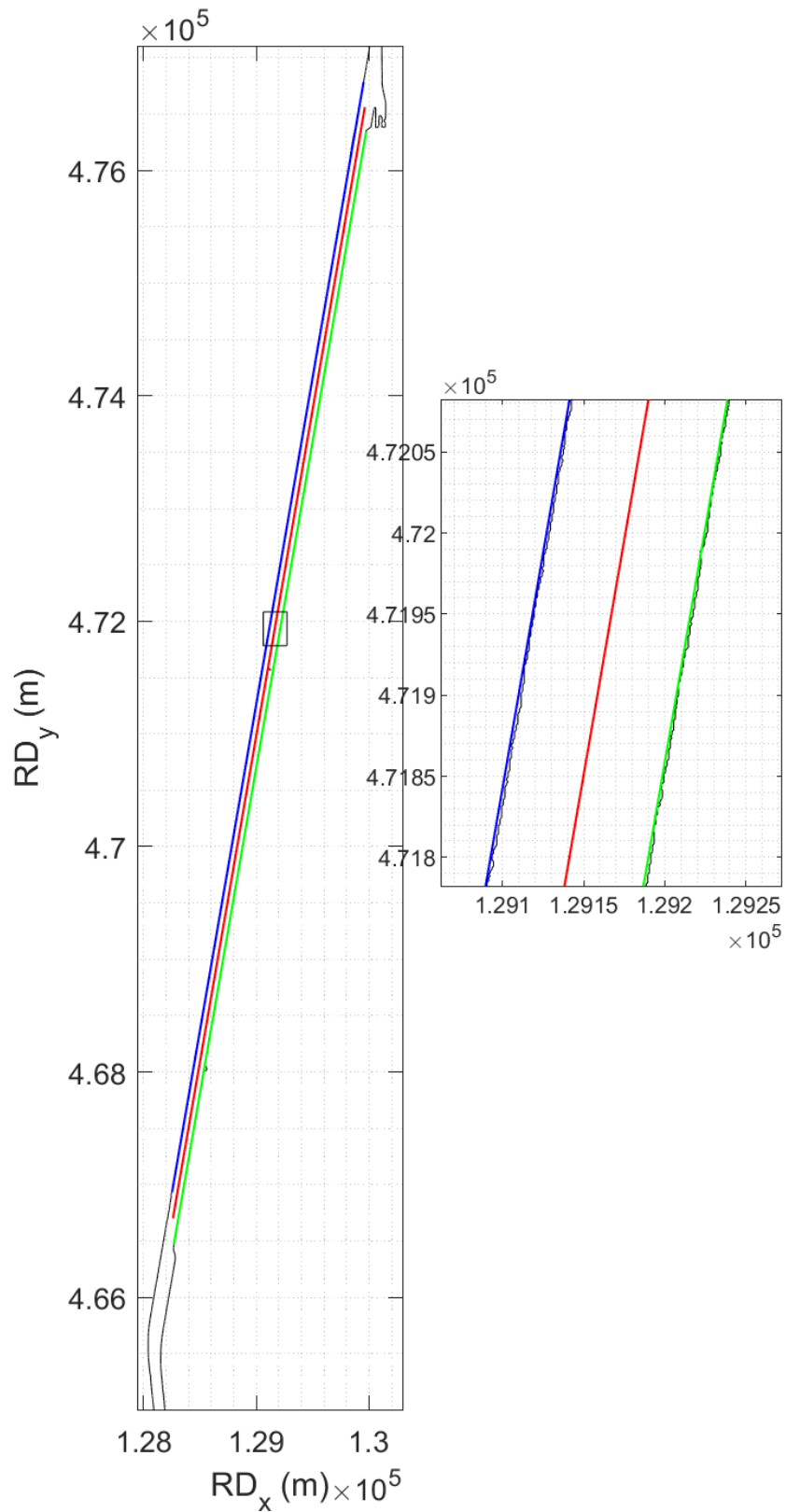


*Figuur 4-5* Verdeling van de absolute afstand tot de geschematiseerde kanaal-as ( $y$ ) in *Figuur 4-7* voor zuidwaarts (links) en noordwaarts (rechts) varende M8 schepen, waarbij de mediane afstand bovenaan elk histogram is weergegeven.

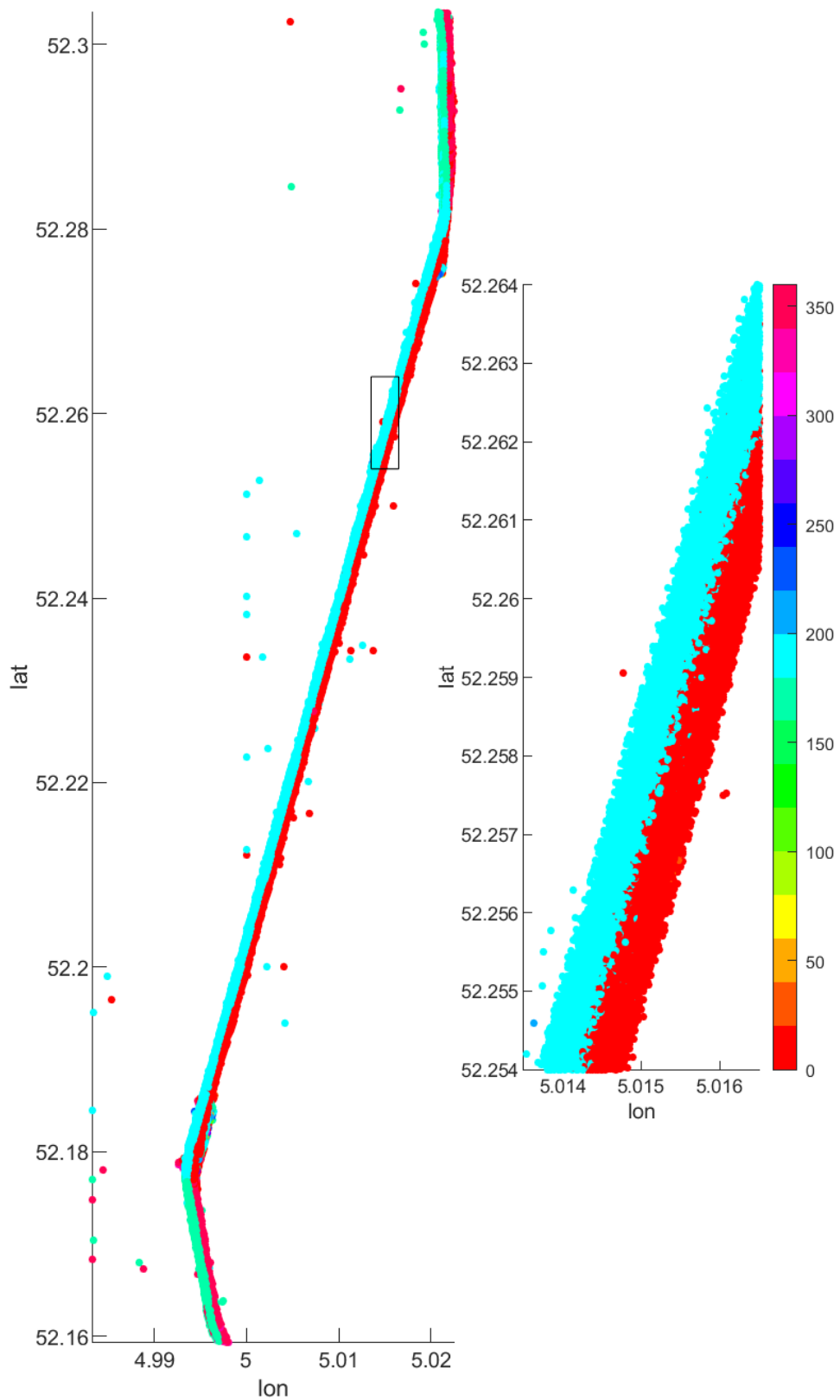


*Figuur 4-6* Verdeling van de absolute afstand tot de geschematiseerde kanaal-as ( $y$ ) in *Figuur 4-7* voor zuidwaarts (links) en noordwaarts (rechts) varende M12 schepen, waarbij de mediane afstand bovenaan elk histogram is weergegeven.

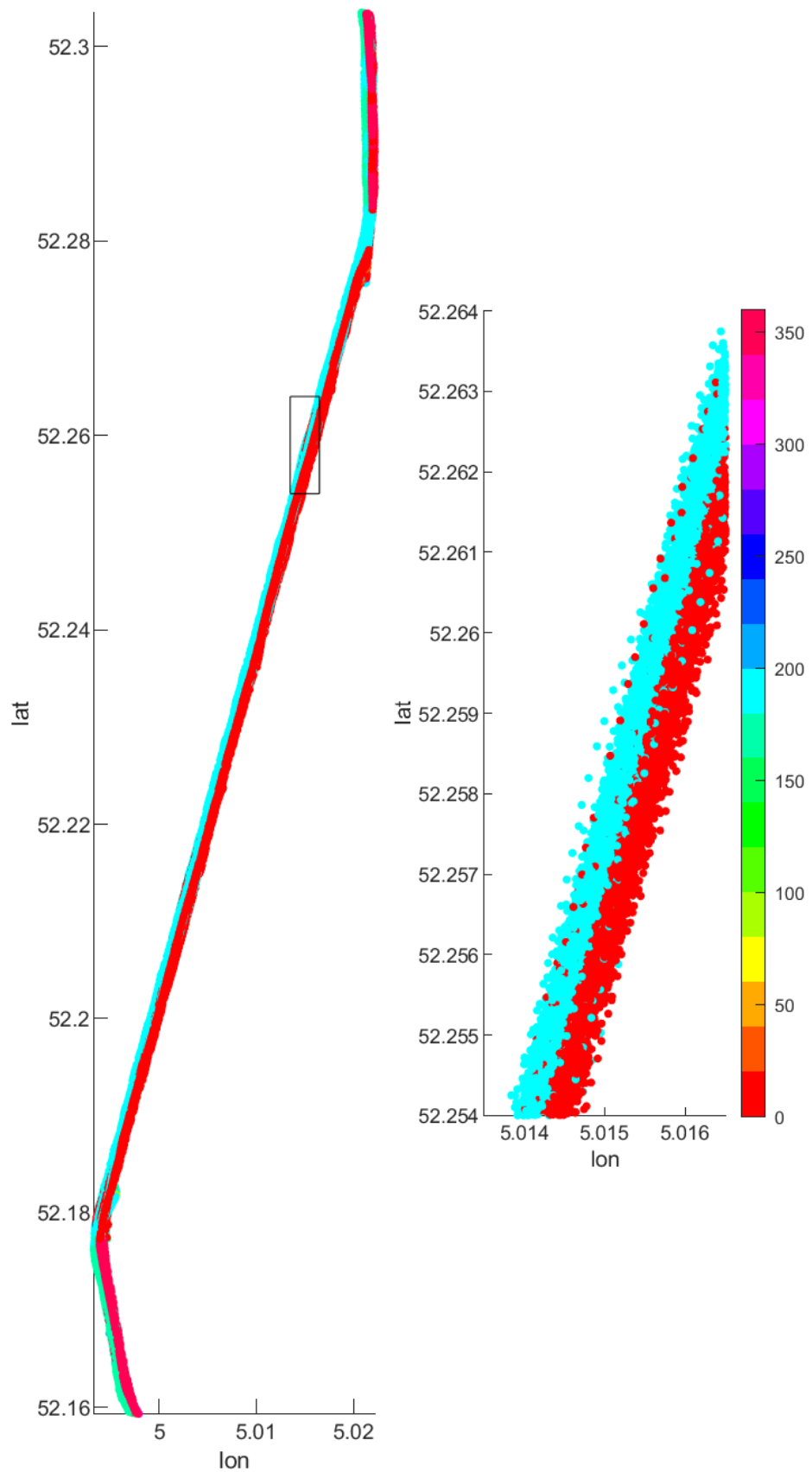
Uit de resultaten in *Figuur 4-5* volgt een mediane absolute afstand tot de geschematiseerde kanaal-as ( $y$ ) van ongeveer 13 m voor zuidwaarts varende M8 schepen en 16 m voor noordwaarts varende M8 schepen. Voor M12 schepen zijn deze waarden 11 m en 13 m, respectievelijk (*Figuur 4-6*). Dat M12 schepen minder excentrisch (minder ver uit de as) varen, komt waarschijnlijk doordat M12 schepen breder zijn en daardoor minder dicht bij de oever varen dan M8 schepen.



*Figuur 4-7 Schematisering van de kanaal-as (rood): we gebruiken de contour van de oevers van het ARK uit de bathymetrie data van TAUW (zwart) om de west (blauw) en oost (groen) oever van het rechte segment tussen Breukelen en Nigtevecht te schematiseren door twee rechte lijn segmenten, waarbij de kanaal-as langs de middenlijn loopt. Het zwarte kader geeft de uitvergroting weer.*



*Figuur 4-8 De eerste 300 scheepstracks van scheepsklasse M8 waarbij de kleurschaal de koers in graden weergeeft (0 graden is noordwaarts, 180 graden zuidwaarts), met uitvergroting van het zwarte kader.*



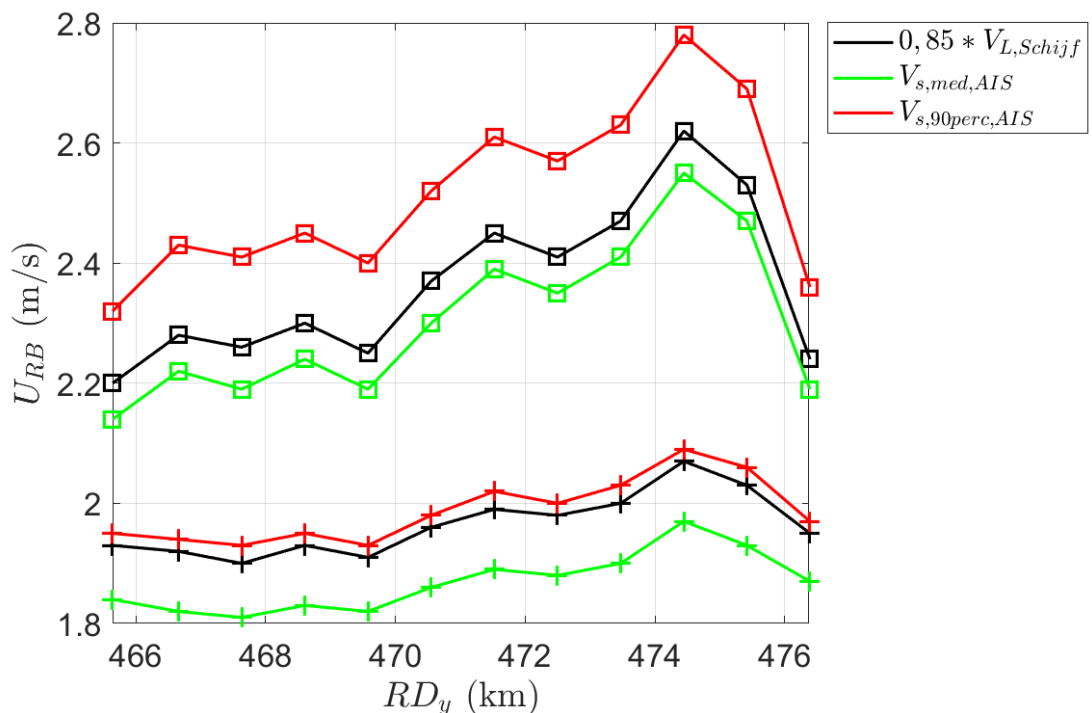
*Figuur 4-9 De eerste 300 scheepstracks van scheepsklasse M12 waarbij de kleurschaal de koers in graden weergeeft (0 graden is noordwaarts, 180 graden zuidwaarts), met uitvergroting van het zwarte kader.*

### 4.3.3 Retourstroming

We berekenen de piekretourstroming bij de bodem opnieuw om het effect van de bevindingen uit de AIS-data te bepalen. Hiervoor gebruiken we alleen de functionele methode ( $U_{RB,func}$  uit sectie 3.3.1), omdat we deze methode het meest dicht bij de waarheid achten, en nemen daarbij een constante vaarsnelheid aan voor elk van de 12 kanaaldoorsnedes:

- Mediane vaarsnelheid van  $0,85 * V_{L,Schijf}$  uit Hoofdstuk 3.
- Mediane vaarsnelheid volgens de AIS-data per scheepsklasse.
- 90<sup>ste</sup> percentiel vaarsnelheid volgens de AIS-data per scheepsklasse.

Figuur 4-10 laat het effect van deze drie verschillende vaarsnelheden zien op de retourstroming voor elk van de 12 kanaaldoorsnedes. We wijzen er op dat de resultaten verkregen met de methode van Schijf in Hoofdstuk 3 (zie Figuur 3-4) niet precies hetzelfde zijn als die in Figuur 4-10, omdat in Hoofdstuk 3 de met Schijf bepaalde vaarsnelheid varieert langs het kanaal terwijl we hier een constante vaarsnelheid aannemen (gelijk aan de mediaan van diezelfde vaarsnelheden uit Hoofdstuk 3). In de resultaten is te zien dat de daadwerkelijke (lagere) mediane vaarsnelheid volgens de AIS-data zorgt voor een lagere retourstroming dan volgens Schijf (verschil tussen grafieken  $V_{s,med,AIS}$  en  $0,85 * V_{L,Schijf}$  is  $\sim 0,05 - 0,1$  m/s). Het valt op dat de retourstroming bepaald met de hogere vaarsnelheid ( $V_{s,90perc,AIS}$ ) voor M12 schepen zeker  $\sim 0,2$  m/s hoger uitvalt dan  $V_{s,med,AIS}$ , terwijl dit voor M8 schepen een verhoging geeft van slechts  $\sim 0,02$  m/s. Dit geeft aan dat verschillen in vaarsnelheid een groter effect hebben op de retourstroming in het geval van de grotere M12 schepen dan de M8 schepen.



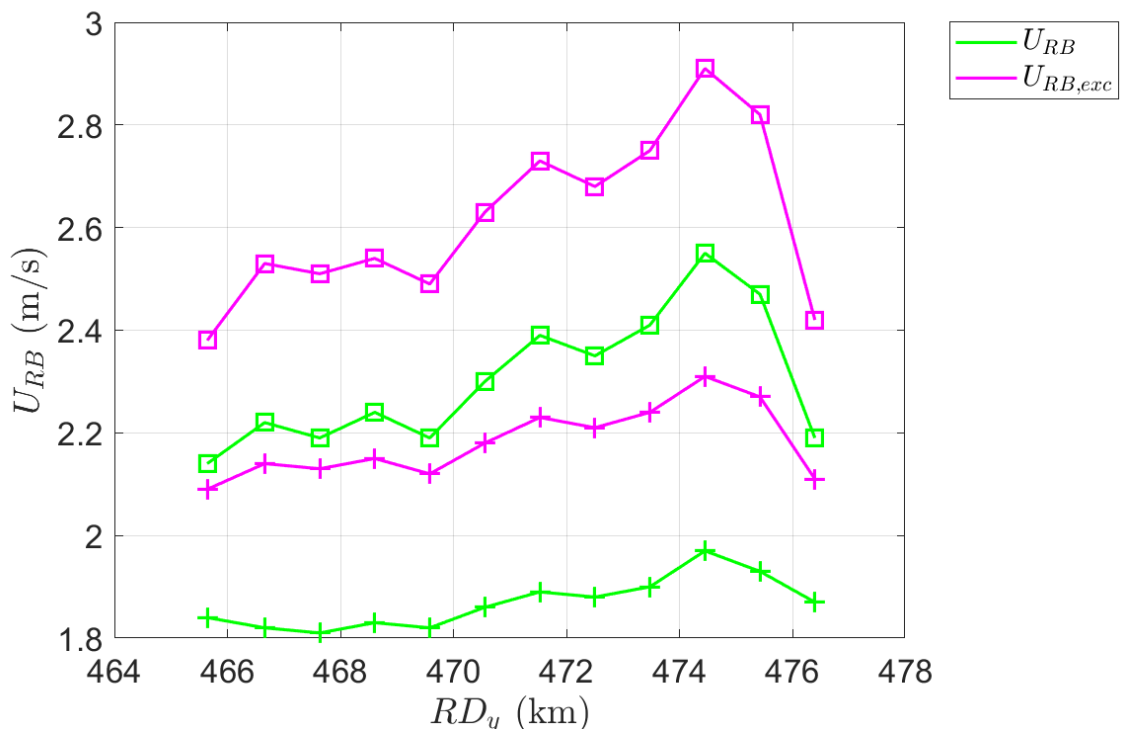
Figuur 4-10 Vergelijkbaar met Figuur 3-4, met hier de piek retourstroming bij de bodem volgens de functionele methode herberekend voor scheepsklassen M8 (+) en M12 (□), waarbij de vaarsnelheid constant gehouden is voor elk van de 12 kanaaldoorsnedes.

Vervolgens berekenen we wat het effect is van de uit de AIS-data bepaalde excentriciteit op de retourstroming, waarbij we de mediane vaarsnelheid voor M8 en M12 schepen uit de AIS data aannemen voor elke kanaaldoorsnede. Door de grootste van de twee mediane absolute

afstanden tot de kanaal-as ( $y$ ) voor de twee zuid- en noordgaande banen te kiezen (16 m voor M8 en 13 m voor M12, zie Figuur 4-5 en Figuur 4-6), bepalen we de maximum piek retourstroming bij de bodem voor elk van de 12 kanaaldoorsnedes. Hiervoor gebruiken we vergelijking 4.175 uit de Rock Manual, die voor de excentriciteit corrigeert:

$$U_{RB,func,exc} = U_{RB,func} \left( 1 + y \frac{\bar{h}}{A_c} \right)$$

Waar  $y$  de absolute afstand tot de kanaal-as is en  $\frac{\bar{h}}{A_c}$  de reciproke van de representatieve kanaalbreedte. Figuur 4-11 geeft het effect van de mediane excentriciteit weer op de retourstroming van de M8 en M12 schepen: voor beide scheepsklassen zorgt dit voor een verhoging van de retourstroming met  $\sim 0,3$  m/s t.o.v. de waarden gevonden in Hoofdstuk 3 (waar excentriciteit niet was meegenomen). Indien we in plaats van de mediane excentriciteit zouden kiezen voor de 90<sup>ste</sup> percentiel (de 90<sup>ste</sup> percentiel kanaal-as afstand is 25 m voor M8 en 23 m voor M12 schepen), resulteert dat in een verhoging van de retourstroming van  $\sim 0,5$  m/s voor M8 schepen en  $\sim 0,6$  m/s voor M12 schepen.



Figuur 4-11 Vergelijking tussen de piek retourstroming bij de bodem volgens de functionele methode met (magenta) en zonder excentriciteit (groen, die hetzelfde zijn als de groene lijnen in Figuur 4-10 zoals bepaald voor scheepsklassen M8 (+) en M12 (□), waarbij de vaarsnelheid voor alle kanaaldoorsnedes gelijk gehouden is aan de mediane vaarsnelheid uit de AIS-data voor beide scheepsklassen.

#### 4.4 Samenvatting

Voor klasse M8 en M12 schepen is de mediane vaarsnelheid volgens de AIS data wat lager dan de conservatieve schatting uit Hoofdstuk 3 ( $0,85 * V_{L,Schiff}$ ), en daarmee is de retourstroming berekend met de AIS-vaarsnelheid door middel van de functionele methode ongeveer 0,1 m/s lager (zie Tabel 4-2). Voor M8 schepen is de  $0,85 * V_{L,Schiff}$ -vaarsnelheid meer vergelijkbaar met de 90<sup>ste</sup> percentiel van de werkelijke vaarsnelheid volgens de AIS data. Daarmee laten de bevindingen uit de AIS data zien dat de conservatieve schatting uit

Hoofdstuk 3 wat aan de hoge kant is gebleken. Voor beide scheepsklassen is het effect van excentriciteit zoals bepaald uit de AIS-data op de retourstroming significant, met een toename van 0,3 m/s voor de retourstroming voor zowel M8 schepen (Tabel 4-2) als voor M12 schepen (zie Tabel 4-3). De piek retourstroming bij de bodem door excentrisch-varende M8 schepen is tussen de 2,1 en 2,3 m/s. Voor excentrisch-varende M12 schepen vinden we dat de piek retourstroming bij de bodem tussen de 2,4 en 2,9 m/s ligt, wat in overeenstemming is met de bevindingen van Deltares (2012): zij vonden met hun numerieke simulatie (gecombineerd met de methode van Schijf) voor een enkel excentrisch-varend M12 schip in kanaaldoorsnede met Profiel A een waarde van 2,6 m/s.

*Tabel 4-2 Piek retourstroming bij de bodem,  $U_{RB}$  in m/s voor M8 schepen bepaald met de functionele methode voor de 12 geselecteerde kanaaldoorsnedes van het Amsterdam-Rijnkanaal berekend met constante mediane vaarsnelheid  $0,85 * V_{L,Schijf}$ , alsook met de constante mediane en 90<sup>ste</sup> percentiel vaarsnelheid uit de AIS data. De laatste rij geeft de retourstroming bij excentriciteit bepaald uit AIS data varend met hun mediane vaarsnelheid.*

Scenario's	Minimum	Gemiddeld	Maximum
$0,85 * V_{L,Schijf}$	1,9	2,0	2,1
$V_{s,90perc,AIS}$	1,9	2,0	2,1
$V_{s,med,AIS}$	1,8	1,9	2,0
$V_{s,med,AIS}$ met excentriciteit	2,1	2,2	2,3

*Tabel 4-3 Piek retourstroming bij de bodem,  $U_{RB}$  in m/s voor M12 schepen bepaald met de functionele methode voor de 12 geselecteerde kanaaldoorsnedes van het Amsterdam-Rijnkanaal berekend met constante mediane  $0,85 * V_{L,Schijf}$ , alsook met de constante mediane en 90<sup>ste</sup> percentiel vaarsnelheid uit de AIS data. De laatste rij geeft de retourstroming bij maximale excentriciteit bepaald uit AIS data varend met hun mediane vaarsnelheid.*

Scenario's	Minimum	Gemiddeld	Maximum
$0,85 * V_{L,Schijf}$	2,2	2,4	2,6
$V_{s,90perc,AIS}$	2,3	2,5	2,8
$V_{s,med,AIS}$	2,1	2,3	2,6
$V_{s,med,AIS}$ met excentriciteit	2,4	2,6	2,9

## 4.5 Duiding

Van de verschillende scheepsgeïnduceerde stromingen onderzocht in deze studie, is gevonden dat de piekretourstroming bij de bodem veroorzaakt door excentrisch-varende M8 en M12 schepen het hoogste is. Over het gehele kanaalsegment, bevinden de erosiegeulen zich hoofdzakelijk in een gebied dat zich spant over 15-25 m afstand van de middenas (zie bathymetrie doorsnedes in Figuur 3-2). De piekretourstroming is het hoogst onder het schip (Deltares, 2012). Door de breedte van M8 en M12 schepen uit Tabel 3-1 en hun mediane afstand tot de geschematiseerde middenas (zie sectie 4.3.2) als uitgangspunt te nemen, bepalen we het gebied ten opzichte van de middenas voor zuidwaarts- en noordwaarts-varende schepen waarover de retourstroming het hoogst is. We gaan in deze analyse uit van dezelfde aanname als in sectie 4.3.2: dat het AIS meetpunt samenvalt met de middenas van het schip. Hieruit volgt dat voor M8 schepen de onderkant van het schip voor zuidwaartse schepen voornamelijk op 8 – 19 m van de middenas zit. Voor noordwaartse schepen komt dit op 11 – 22 m uit. Voor M12 schepen zijn deze waarden 3 – 20 m en 5 – 22 m, respectievelijk (zie Tabel 4-4). Deze zones overlappen deels met de zone van de erosiegeulen. Daarmee is het aannemelijk dat de erosiegeulen veroorzaakt zijn door de retourstroming gegenereerd

door de excentrisch-varende M8 en M12 schepen in zowel de zuidwaartse als noordwaartse scheepsbaan.

*Tabel 4-4 Bepaling van de gebiedspanne van onderkant schip tot de middenas voor scheepsklassen M8 en M12, waarbij de helft van de breedte van het schip (Tabel 3-1) en de mediane afstand tot de middenas (sectie 4.3.2) bij elkaar zijn opgeteld.*

<b>Scheepsklasse, vaartrichting</b>	<b>Mediane afstand y tot middenas (m)</b>	<b>Breedte schip (m)</b>	<b>Gebied onder schip, afstand tot middenas (m)</b>
<b>M8, zuidwaarts</b>	13	11,4	7 - 19
<b>M8, noordwaarts</b>	16	11,4	10 - 22
<b>M12, zuidwaarts</b>	11	17	3 - 20
<b>M12, noordwaarts</b>	13	17	5 - 22

## 5 Conclusie

In deze studie hebben we op basis van beschikbare literatuur inschattingen gemaakt van de belastingen door geïnduceerde stromingen door scheepvaart op de bodem van het Amsterdam-Rijnkanaal. Hiervoor zijn retourstroming, schroefstraalstroming en orbitaalstroming door secundaire scheepsgolven in beschouwing genomen. Uit de schattingen blijkt dat de waarde van de piek retourstroming bij de bodem ( $U_{RB}$ ) veruit de hoogste en daarmee maatgevende scheepsgeïnduceerde stroming is die bodemerosie vermoedelijk veroorzaakt. De conservatieve schatting van de vaarsnelheid lag zoals verwacht wat hoger dan de vaarsnelheden bepaald uit AIS-data voor M8 en M12 schepen, maar dit gaf geen significant hogere retourstroming bij de bodem (maximaal 0,1 m/s hoger). De AIS-data zijn in deze studie verder gebruikt om de excentriciteit van de M8 als M12 schepen nauwkeurig te bepalen. Hieruit bleek dat beide scheepsklassen overwegend excentrisch varen. Deze excentriciteit leidt tot een hogere piekretourstroming bij de bodem. Uit de analyse en daaruit volgende duiding (zie Sectie 4.5) is gebleken dat het aannemelijk is dat de voornaamste erosiegeulen zichtbaar in de kanaaldoorsnedes veroorzaakt zijn door de excentrisch-varende M8 schepen met piekretourstromingswaarden bij de bodem van 2,1 tot 2,3 m/s (gemiddeld 2,2 m/s), alsook door excentrisch-varende M12 schepen waarden van 2,4 tot 2,9 m/s (gemiddeld 2,6 m/s). Deltares (2012) vond met hun numerieke simulatie voor een enkel excentrische-varend M12 schip in kanaaldoorsnede met Profiel A een waarde van 2,6 m/s voor de piek retourstroming bij de bodem (d.w.z. onder het schip), welke in overeenstemming is met de waarden gevonden voor excentrisch-varende M12 schepen in het huidige onderzoek. Deze maatgevende scheepsgeïnduceerde stromingswaarden vormen de invoerwaarden om de schuifspanning aan de bodem te bepalen (zie Deelproject DP1.2) alsook om de effectiviteit en weerbaarheid van kansrijke maatregelen te duiden (zie Deelproject DP3.1).

## 6 Aanbevelingen

We stellen voorop dat het belangrijk is om de bevindingen van deze studie te testen op zowel veld als op laboratorium schaal, bij voorkeur gecombineerd met een numerieke 'digital twin' zoals CFD (*computational fluid dynamics*) modellering. Het is met name belangrijk om de scheepsgeïnduceerde stromingen te meten tijdens een pilot studie van de voorgestelde maatregelen (zie Deelproject DP3.1) om de kanaalerosie te beteugelen. Dit is in de eerste plaats nodig omdat de vuistregels die in dit onderzoek zijn gebruikt om de stroomsnelheden te bepalen geen rekening houden met turbulentie. Een veldmeting is daarentegen wel geschikt om het effect van turbulentie uit te wijzen. In de tweede plaats maakt een veldmeting het mogelijk om met hoge betrouwbaarheid de effectiviteit en weerbaarheid van de maatregelen te toetsen. We wijzen erop dat ten tijde van schrijven een veldmeting gedurende een maand op één locatie in het Amsterdam-Rijnkanaal is uitgevoerd en gerapporteerd in Deltares (2025).

Deze studie heeft aangetoond dat inzet van AIS data een waardevolle toevoeging is voor het verkleinen van de onzekerheid in de invoerwaardes waarmee scheepsgeïnduceerde stromingen berekend worden, zoals retourstroming. We stellen voor om voor bredere toepassingen (behalve kanalen ook rivieren en havens) deze AIS-geïnformeerde stromingen te combineren met bathymetrie data en morfologische modellering om zo door scheepsbelasting veroorzaakte bodemerrosie nauwkeuriger en betrouwbaarder in kaart te kunnen brengen. Door ontwikkeling van erosiegeulen in (historische) bathymetrie data te relateren aan de scheepstracks uit AIS data, kan bepaald worden welke scheepvaart in het verleden het meest belastend is geweest voor de bodem. Door de excentriciteit en vaarsnelheid per scheepsklasse uit de AIS data als invoerwaarden voor morfologische modellen aan te leveren kan de bodemerrosie over een volledig gebied in kaart gebracht worden. Hiermee is het ook mogelijk om toekomstvoorspellingen te doen indien er bijvoorbeeld een toename verwacht wordt van relatief grotere schepen in een willekeurig gegeven kanaal of havengebied.

Verder bevelen we aan om de AIS data in een vervolgstudie te gebruiken om scheepspassages (inhalen of oplopen) in kaart te brengen, omdat dit invloed heeft op de retourstroming die daardoor nog hoger wordt. Tijdens inhaalacties kan de belasting van het kanaal extra hoog zijn, omdat er immers twee schepen naast elkaar varen, waarvan in elk geval één met een zeer hoge excentriciteit en hogere vaarsnelheid. Het in kaart brengen van het aantal inhaalacties met behulp van AIS data kan op verschillende manieren: door selectie van noordwaarts varende schepen die zich aan de westwaartse kant bevinden en andersom. Anderzijds is het mogelijk om schepen in kaart te brengen die op hetzelfde tijdstip parallel aan elkaar varen.

Tot slot wijzen we erop dat een tekortkoming van AIS data is dat de diepgang van schepen niet goed wordt geregistreerd. Deze informatie is van belang voor het nauwkeurig bepalen van de retourstroming en schroefstraalstroming. Daar diepgang wel goed wordt geregistreerd in IVS data bevelen we aan om in een vervolgstudie dit type data te combineren met de AIS data, zoals ook opvolgend ten tijde van schrijven is uitgevoerd ter ondersteuning van de veldmeting (Deltares, 2025).

# Referenties

- BAW Code of Practice (2010). Principles for the Design of Bank and Bottom Protection for Inland Waterways (GBB). Bundesanstalt für Wasserbau.
- Binnenvaart Politie Reglement: <https://statics.teams.cdn.office.net/evergreen-assets/safelinks/1/atp-safelinks.html>.
- Deltares (2011). Containervaart op de Gouwe: belasting op oevers en bodem.
- Deltares (2012). Onderzoek Bodemerrosie Amsterdam-Rijnkanaal. 1205317-000-ZWS-0007, 14 februari 2012.
- Deltares (2014). Stabiliteitsproeven Julianakanaal. Analyse meetresultaten. Deltares Rapport 1210294-000.
- Deltares (2025). Analyse metingen Amsterdam-Rijnkanaal. Ref: 11211511-026-GEO-0001
- Das, S.N., Das, S.K. & Kariya, J.N. (2012). Simulation of Return Flow in Restricted Navigation Channel for Barge-tow Movements. The Open Ocean Engineering Journal. 5. 34-46. 10.2174/1874835X01205010034.
- Hawkswood, M., Flierman, M., De Haan, R., King, M. and Groom, J. (2016). Propellor action and berth scour protection. PIANC-COPEDEC IX, Rio de Janeiro, Brasil.
- Holthuijsen, L. (2006). Waves in Oceanic and Coastal Waters.
- Hoogeveen, A. (2024): ARK wellen systeembegrip – kanaalbodem. Kenmerk R001-1295699JWI-V01, 27 juni 2024.
- Hove, D. ten (2010): Scheepskarakteristieken van nieuwe grote schepen, MARIN, rapport 24032.600/2, Wageningen.
- Lievense, L. (2010): Nieuw dwarsprofiel voor het Amsterdam-Rijnkanaal, TU Delft, afstudeerverslag.
- Manaois, J.R. (2011). Pumpjets in de binnenvaart. TU Delft, afstudeerverslag.
- Noordhuis, R. & Penning, E. (2021). Factsheet: Windwerking in meren: effecten en maatregelen. Notitie Kennisimpuls Waterkwaliteit.
- PIANC Richtlijnen (2015).
- Pillarczyk, K.W. (1990). Coastal Protection. Proc. of a short course, published by A.A.Balkema, Rotterdam.
- Rijkswaterstaat Waternet: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterdata-en-waterberichtgeving/waterdata>.
- Richtlijnen Vaarwegen Rijkswaterstaat (2020).

- Raes, L., Elskens, F., Römisch, K., and Sas, M. (1996): The effects of ship propellers on bottom velocities and on scour near berths and protection methods using thin flexible revetments. Proc. 11th Intern. Harbour Congress, Antwerp, June 1996.
- RDV Nota (1985). Schroefstraalerosie bij aanlegplaatsen langs het Amsterdam-Rijnkanaal.
- Rock Manual (2007). The use of rock in hydraulic engineering.
- Robijns, T. (2014). Flow beneath inland navigation vessels.
- Schijf, J.B. Protection of embankments and bed in inland and maritime waters, and in overflows or weirs. 1949 PIANC <https://resolver.tudelft.nl/uuid:e0a52ec1-b6d3-475d-b50c-80e6c6e2fe0e>.
- Stolker, C. en Verheij, H. (2006). Ship-induced water motions beneath the ship's hull. In: 31st PIANC conference, Estoril, Portugal 2006. 328.
- Widdows, J., Friend, P.L., Bale, A.J., Brinsley, M.D., Pope, N.D., Thompson, C.E.L. (2007). Inter-comparison between five devices for determining erodability of intertidal sediments, Continental Shelf Research, Volume 27, Issue 8, 1174-1189, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.10.006>.
- Waterloopkundig Laboratorium / Delft Hydraulics Laboratory (1986). Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen. Sekundaire scheepsgolven en hun effect op de stabiliteit van talusbekledingen. Verslag modelonderzoek M 1115 deel VI.

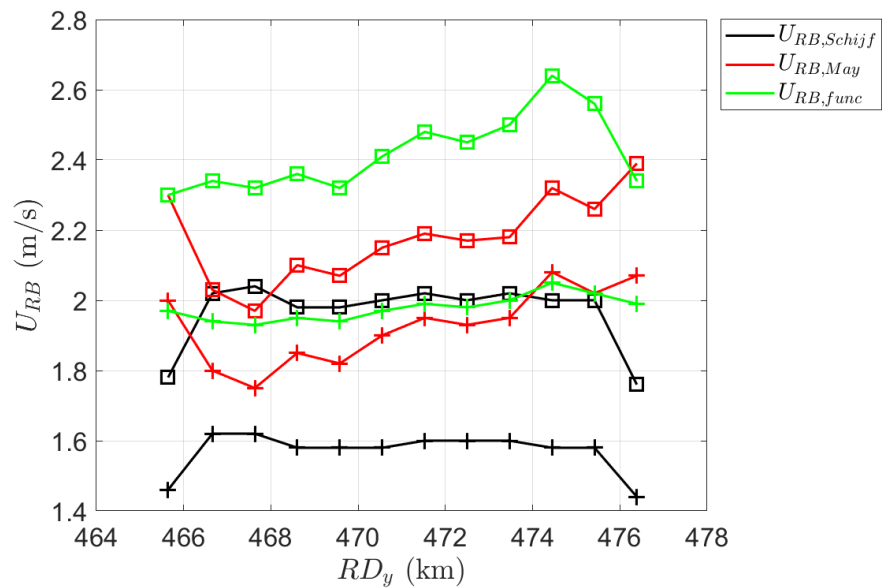
# A      Additionele resultaten

Hier geven we een schatting van de verschillende door scheepsbelasting geïnduceerde stromingen voor extreme gevallen, te weten een zeer lage waterstand en het grootst toegestane schip.

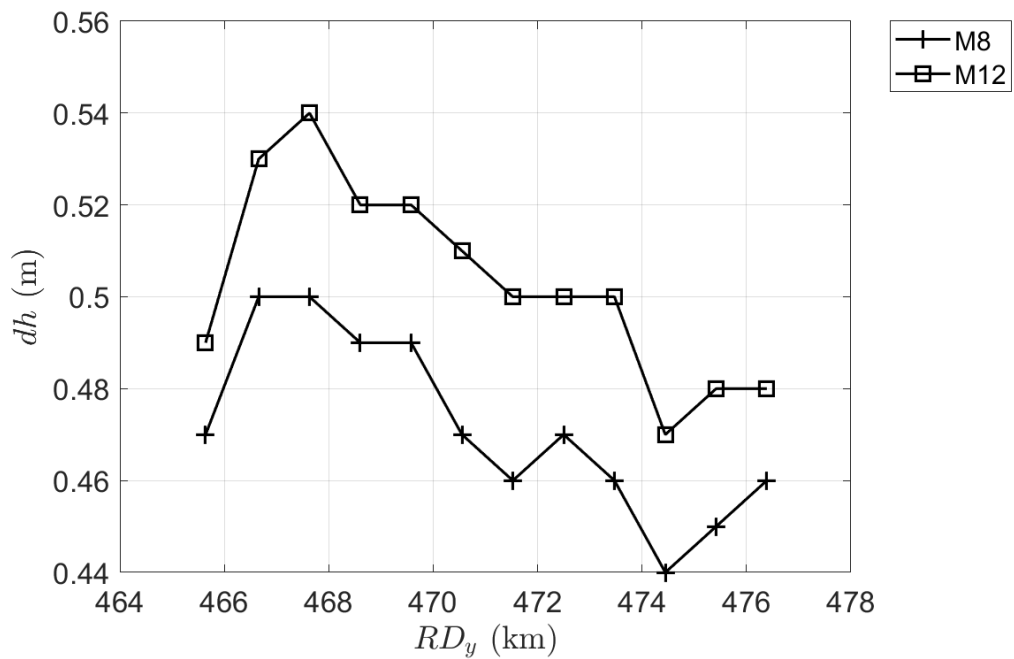
## A.1      Lage waterstand

We berekenen de retour- en schroefstraalstroming en de waterspiegeldaling voor de laagst gemeten waterstand in de laatste 10 jaar: NAP -0,57 m.

### A.1.1      Retourstroming en waterspiegeldaling

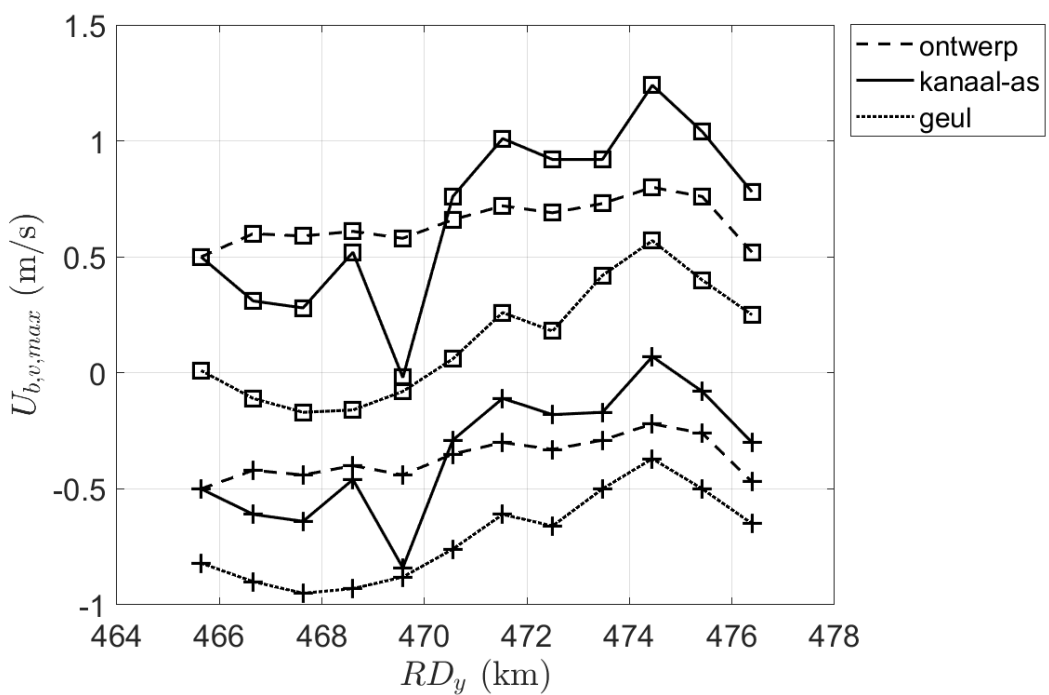


Figuur A-1 Idem aan Figuur 3-4, retourstroming voor waterstand NAP -0,57 m.

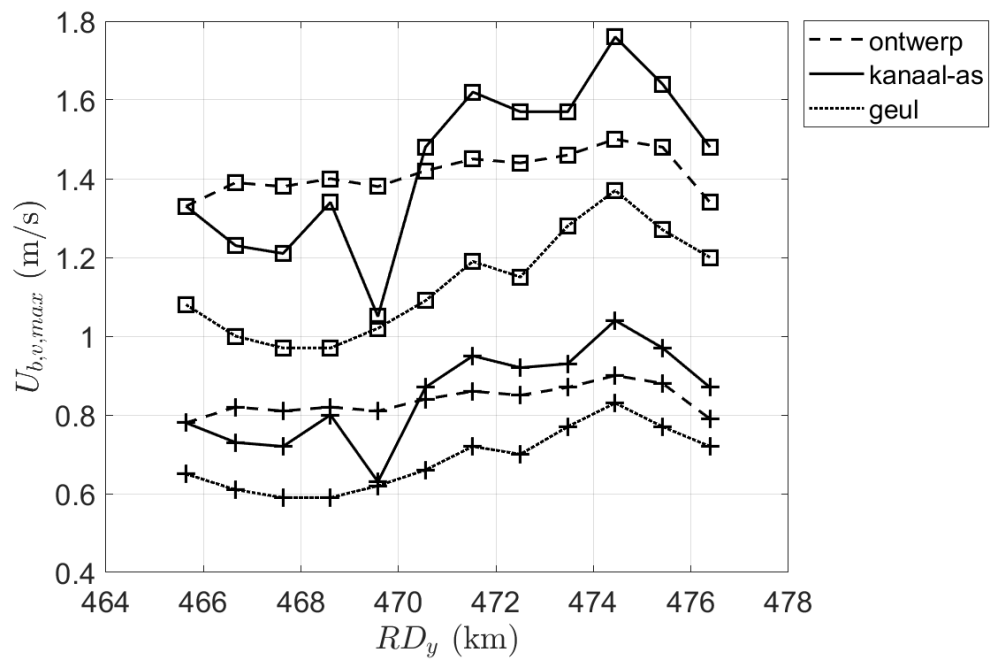


Figuur A-2 Idem aan Figuur 3-5, waterspiegeldaling voor waterstand NAP -0,57 m.

## A.2 Schroefstraalstroming



Figuur A-3 Idem aan Figuur 3-6, voor lage waterstand NAP -0,57 m.

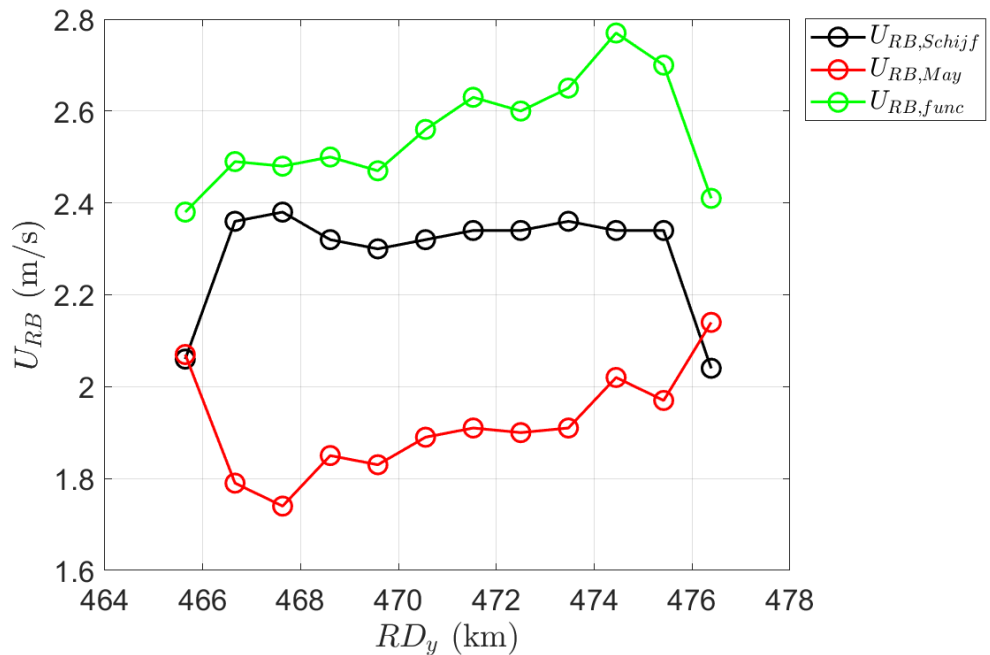


Figuur A-4 Idem aan Figuur 3-7, voor lage waterstand NAP -0,57 m.

### A.3 Grootste schip

De maximaal toegestane lengte, breedte en diepgang voor schepen in het ARK zijn: 200 m, 23,5 m en 4 m (zie het Binnenvaart Politie Reglement). We herhalen de berekening van de retourstroming voor deze scheepsgrootte hier.

#### A.3.1 Retourstroming



Figuur A-5 Idem aan Figuur 3-4, maar dan voor maximaal toegestane scheepsgrootte.

## B Literatuur samenvattingen

**Stolker, C. en H. Verheij. 2006. Ship-induced water motions beneath the ship's hull. In: 31st PIANC conference, Estoril, Portugal 2006. 328**

In deze studie zijn verschillende analytische formules voor de berekening van de retourstroming gevalideerd. Daarbij is een nieuwe numeriek-iteratieve methode gebaseerd op de fysica van het probleem geïntroduceerd. Voor de validatie van de verschillende formules wordt experimentele data gebruikt. Opvallend is dat voor de vuistregel van WL | Delft Hydraulics, de auteurs een spreiding van 1 - 5 in de correctie factor alfa i.p.v. de aangenomen 1 - 2. Alhoewel de numeriek-iteratieve methode het meest accuraat wordt bevonden, is het advies om de formule van Maynard te gebruiken, omdat dit minder gebruikersintensief is. Verder is de conclusie dat de erosie van het kanaal behalve nadelige gevolgen ook voordelig kan zijn ten aanzien van de verminderde noodzaak te baggeren.

**Robijns, T. (2014). Flow beneath inland navigation vessels.**

In deze studie is een analytisch model ontwikkeld om de retourstroming tussen de boeg van een schip en de kanaalbodem te berekenen. Uit de literatuurstudie van Robijns 2014 blijkt een grote spreiding te bestaan in de correctie factor (alfa), die de piek retourstroming relateert aan de berekende gemiddelde retourstroming van de Schijf methode. Bijvoorbeeld: Lenselink 2011 vindt een waarde van 1,46, terwijl Stolker et al. 2006 een spreiding van 1 tot 5 vindt.

**Schroevers, R., Verheij, H., Berends, K., Vermaas, T. (2014) Stabiliteitsproeven Julianakanaal. Analyse meetresultaten. Deltares Rapport 1210294-000**

Stabiliteitsproeven en stroomsnelheidsmetingen onder een schip op twee trajecten in het Julianakanaal. Theoretische retourstroming wordt berekend met formules uit de Rock Manual gebaseerd op de 1D methode volgens Schijf. Bij vergelijking van de piek retourstroming en de berekende gemiddelde retourstroming kan een waarde van alfa = 1,55 worden afgeleid, wat overeenkomt met de vastgestelde alfa-waarden voor het Julianakanaal. Dit komt overeen met de bevindingen van WL | Delft Hydraulics in 1986 (waarde van 1,5 tot 2).

**Lievense, L. (2010): Nieuw dwarsprofiel voor het Amsterdam-Rijnkanaal TU Delft, afstudeerverslag**

Dit onderzoek levert de ontwikkeling van een nieuw dwarsprofiel in het Amsterdam-Rijnkanaal met stabiele oevers waarbij rekening gehouden wordt met toekomstige ontwikkelingen, duurzaamheid en recreatie. Hierbij zorgt dit ontwerp dat het kanaal goed bevaarbaar blijft en de stabiliteit van de oevers wordt gewaarborgd. Deze opdracht volgt uit de trend van toenemende scheepvaartbelasting alsook de belasting veroorzaakt door de verdieping van het kanaal. Uit dit onderzoek blijkt onder andere dat de retourstromingswaarden maatgevend lijken te zijn als wordt uitgegaan van varende schepen, zeker wanneer deze dicht langs de oever varen.

**Verheij, H.J., 2012: Onderzoek Bodemerosie Amsterdam-Rijnkanaal. 1205317-000-ZWS-0007, 14 februari 2012,**

M8 en M12 scheepsklassen zijn als maatgevend gekozen. Hiervan is M12 de grootste en komt M8 het meest voor. Verwacht wordt dat de M12 in de toekomst meer zal voorkomen. Informatie over de schroef zijn uit Verheij 2010 gehaald. Op het Amsterdam-Rijnkanaal geldt een wettelijk maximaal toegelaten vaarsnelheid van 18 km/uur. De scheepvaartbelasting betreft retourstromingswaarden, boeg- en hekgolven, en schroefstraal snelheden. Hiervan zijn retourstromingswaarden als maatgevend aangemerkt. Retourstroming kan bepaald worden door de methode van Schijf te gebruiken en een correctie factor van 1.5 – 2 toe te

passen (Stolker en Verheij, 2006). Verder is de belasting op de bodem en oever onderzocht door de stroomsnelheid daar als gevolg van de schroefstralen te bepalen. Bij varende schepen kan de schroefstraalstroming verwaarloosd worden ten opzichte van retourstromingswaarden. Deze studie beschrijft specifiek over de scheepvaart: Het Amsterdam-Rijnkanaal is een van de drukst bevaren kanalen van Nederland. Het is een CEMT klasse VI vaarweg en dat betekent dat duwstellen, koppelverbanden en Rijnmax-schepen er varen. Uit de scheepvaartellingen van RWS blijkt dat het Groot Rijnschip, RWS-klasse M8, het meest voorkomt: 19500 schepen, ofwel 25% in 2008, en dat aantal zal groeien bij het economische GE scenario naar 56000 schepen in 2040, ofwel 42%. Het Rijnmax-schip, RWS klasse M12, maakt 1% van de vloot uit, ofwel: 770 schepen, in 2008, en groeit bij het GE scenario naar 3440 schepen in 2040 met 2,5% per jaar. De gegevens voor hoofd- en boegschroeven zijn ontleend aan een analyse door Verheij (2010) van enkele studies door Marin (ten Hove, 2008; ten Hove, 2010). Niet in beschouwing genomen zijn duwstellen en koppelverbanden, omdat zij ofwel gering in aantal zijn of sterk lijken op een M12 schip wat betreft grootspant oppervlak. Op het Amsterdam-Rijnkanaal is vaak sprake van elkaar oplopende schepen. Het opgelopen schip vaart dan op korte afstand van de damwand. Uit een enquête is gebleken dat de schepen tijdens de oploopmanoeuvre hun boegschroeven niet gebruiken (Manaois, 2011).

### **Schroefstraalerosie bij aanlegplaatsen langs het Amsterdam-Rijnkanaal. RDV Nota 1985**

Beschrijft bodemerosie bij aanlegplaatsen door schroefstraalstroming in het ARK en doet aanbevelingen om deze erosie te herstellen.

### **Rolien van der Mark en Henk Verheij 2011. Containervaart op de Gouwe: belasting op oevers en bodem.**

Berekeningen om te controleren of de belasting gelijk blijft bij gebruik van een groter schip (de Gouwenaar) dan normaliter toegestaan is op de Gouwe. Stroomsnelheden in de retourstroom en schroefstralen zijn berekend. Kans op erosie van het onderwatertalud voor de damwand kan wel optreden voor zowel de huidige als de Gouwenaar. Voor retourstroming wordt de methode van Schijf gebruikt.

### **Martin Hawkswood, Mirjam Flierman, Raphael De Haan, Matthew King and Josh Groom. PROPELLER ACTION AND BERTH SCOUR PROTECTION. PIANC-COPEDEC IX, 2016, Rio de Janeiro, Brasil.**

Deze studie beschrijft de bodemerosie veroorzaakt door schroefstraalstroming tijdens het afmeren.

### **Das, S. & Das, Samir & Kariya, J.. (2012). Simulation of Return Flow in Restricted Navigation Channel for Barge-tow Movements. The Open Ocean Engineering Journal. 5. 34-46. 10.2174/1874835X01205010034.**

Deze studie berekent de retourstroming met OpenFOAM based CFD software en vergelijkt de resultaten met veldmetingen van de Illinois Rivier. Het betreft barge-tow in de sub-kritische range.

### **PIANC richtlijnen 2015**

Beschrijft methoden om schroefstraalstroming te berekenen. Geen informatie over retourstroming.

### **Richtlijn Ontwerp Waterbouw (2018)**

Schroefstralen, maar ook retourstroomberekening volgens de methode van Schijf. Zie voor retourstroom: B019 en B020. Op basis van Pilarczyk notatie aanhouden conform formule 5.219 uit de Rock Manual.

**Duitse versie BAW (2010)**

(Duitse versie van de Nederlandse Richtlijn Waterbouw beschrijft schroefstraalstroming.

**Rock Manual (2007)**

Retourstroming (p. 436), secundaire scheepsgolven (p. 440) en schroefstraalstroming (p. 440)

**Hove, D. ten (2010): *Scheepskarakteristieken van nieuwe grote schepen*, MARIN, rapport 24032.600/2, Wageningen.**

Scheepsklassen M8 – M12 worden als maatgevend beschouwd. Hun diepgang terwijl geladen ligt tussen 3.5 en 3.8 m, waarbij M10 een uitzondering vormt met een diepgang van 4.2 m.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)