

**Stabiliteitsproeven
Julianakanaal 2014**

Analyse meetresultaten



Stabiliteitsproeven Julianakanaal 2014

Analyse meetresultaten

Rinus Schroevers
Henk Verheij
Koen Berends
Tommer Vermaas

1210294-000

Titel
Stabiliteitsproeven Julianakanaal 2014

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1210294-000	1210294-000-ZWS-0018	55

Trefwoorden
Bodemerosie, scheepvaart, prototypeproeven, Julianakanaal.

Samenvatting

Het Julianakanaal wordt verbreed en verdiept in het kader van een opwaardering van de vaarweg. Het kanaal ligt in ophoging en is daarom voorzien van een waterremmende laag. De waterremmende laag bestaat uit 40 cm grind op 60 cm klei. Op een aantal trajecten is de verruiming van het kanaal gerealiseerd door een deel van de grindlaag weg te baggeren tot *minimaal* 10 cm over blijft. Om duidelijkheid te verkrijgen over de sterkte van de resterende bodem voor in de toekomst optredende stroomsnelheden door scheepvaart zijn in juli 2014 in-situ proeven uitgevoerd. Daarbij is een diep afgeladen (3,5 m) duwcombinatie op vol vermogen door een deel van het kanaal gevaren. Op basis van een analyse van de waarnemingen van bodemligging en stroomsnelheden onder de schepen en vergelijking met relevante literatuur worden de volgende conclusies getrokken:

De bodem blijkt niet stabiel, want na circa 60 vaarten met de duwcombinatie is de bodem in het midden van het Julianakanaal verdiept met circa 6 cm, waarbij materiaal vanuit het midden van het kanaal verplaatst is naar opzij. Hiermee lijkt de bodem relatief snel te eroderen en een afname naar een evenwichtssituatie was tijdens de proef niet waarneembaar.

Van toekomstige diepgeladen scheepvaart wordt verwacht dat deze een vergelijkbare belasting kan veroorzaken als waargenomen in deze proef (gem 1,3 m/s retourstroming met pieken tot 1,5 m/s). Daarom wordt op basis van de verwachte scheepvaart-intensiteit, van 1500 schepen per jaar van klasse Va bij een diepgang van 3,5 meter, een erosie van de grindlaag voorspeld die lokaal kan oplopen tot 50 cm per jaar als schepen in 1 lijn varen. Dit is zorgelijk, omdat de grindlaag op een aantal trajecten slechts circa 10 cm dik is. De daar onderliggende kleilaag zal dan snel bloot komen te liggen en gaan eroderen.

Deltares adviseert daarom om tot een overzicht te komen van mogelijke beheersmaatregelen variërend van snelheidsbeperking tot het aanpassen van de bodemverdediging. De bandbreedte op de prognose is echter zodanig dat het bepalen van de juiste beheersmaatregelen lastig zal zijn. Daarom adviseert Deltares tevens om onderzoek uit te voeren om de onzekerheden in de prognose te verkleinen, zoals het bepalen van intensiteit en vaarsnelheid van het huidige scheepvaart verkeer.

Referenties

Offerte-aanvraag d.d. 8 juli 2014 onder zaaknummer 31096424; Opdracht d.d. 18 juli 2014 op basis van Deltares offerte 1210294-000-ZWS-0002-vj d.d. 16 juli 2014; 1210294-000-ZWS-0015-r-Stabiliteitsproef bodem Julianakanaal waarnemingsverslag.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Jan. 2015	Rinus Schroevers		Rolien van der Mark		Gerard Blom	
		Henk Verheij					
		Koen Berends					
		Tommer Vermaas					

Status
definitief

Titel

Stabiliteitsproeven Julianakanaal 2014

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Water,
Verkeer en Leefomgeving

Project

1210294-000

Kenmerk

1210294-000-ZWS-0018

Pagina's

59

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Korte beschrijving van de meetlocatie en meetcampagne	3
2.1 Meetlocatie	3
2.2 Bodemgesteldheid op de meetlocatie	3
2.3 Uitvoering proef met de duwcombinatie	5
2.4 Uitvoering bodem en stroomsnelheidsmetingen en waterstanden	6
3 Theorie scheepsgeïnduceerde stroomsnelheden en bodemerrosie	9
3.1 Theoretische stroomsnelheden agv scheepsbeweging	9
3.1.1 Snelheden onder en rond het schip	9
3.1.2 Berekening van de theoretische retourstroom	10
3.1.3 Berekening van de <i>maximale</i> retourstroom	11
3.1.4 Ontwikkeling grenslagen	12
3.1.5 Snelheden in de schroefstraal	13
3.2 Kritieke stroomsnelheid voor het grind/klei mengsel	14
3.3 Erosie door retourstroming	14
4 Verwerking metingen en analyse	17
4.1 Verwerking van de stroomsnelheidsmetingen per passage	17
4.1.1 Vergelijking van gemeten en theoretische retourstroom	23
4.1.2 Vergelijken gemeten pieksnelheden met laboratorium metingen	27
4.2 Analyse bodemligging en bodemstabiliteit	30
4.2.1 Algemeen beeld van de verandering in bodemligging tijdens de proeven	30
4.2.2 Erosiesnelheid bepaald uit de metingen	31
4.3 Toetsing erosie aan theorie	34
4.4 Prognose toekomstige bodemontwikkeling	35
4.5 Doorkijk naar beheersmaatregelen	39
5 Conclusies en aanbevelingen	41
6 Literatuur	43
Bijlage(n)	
A Verschilkaart bodem voor en na baggerwerkzaamheden	45
B Sporen in de bodem	47
C Tabel met gegevens per passage	51

1 Inleiding

Het Julianakanaal wordt verbreed en verdiept in het kader van een opwaardering van de vaarweg. Het kanaal ligt in ophoging en is daarom voorzien van een waterremmende laag. Op een aantal trajecten zal de verruiming van het kanaal worden gerealiseerd door het te verdiepen en daartoe zal een nieuwe waterremmende laag worden aangebracht. Op andere trajecten kan worden volstaan met baggeren, waarbij het uitgangspunt is dat de waterremmende laag in tact blijft. De waterremmende laag bestaat uit 40 cm grind op 60 cm klei. Het grind is over een deel van het kanaal weggebaggerd en zal op meer plaatsen worden weggebaggerd. Daarbij is er van uitgegaan dat er een resterende laagdikte van minimaal 10 cm moet zijn en dat de kleilaag niet aangetast mag worden¹. Eerder is geconstateerd door de aannemer (de Vries en van de Wiel) dat in de huidige omstandigheden het grind niet stabiel lijkt bij de optredende stroomsnelheden door scheepvaart (mondelijke mededeling ondersteund door enkele bodemopnamen, zie als voorbeeld bijlage B). Nu de bovenlaag van het grind is weggebaggerd is de vraag hoe sterk het resterende klei-grind mengsel is. Naar verwachting is de ondergrens voor de kritische stroomsnelheid 1,5 m/s². Dit lijkt onvoldoende voor de verwachte stroomsnelheden bij de toekomstige, grotere schepen waar op voorhand wordt uitgegaan van stroomsnelheden in de retourstroming van 2,5 m/s.

Het bovenstaande heeft geresulteerd in de volgende twee vragen:

1. Is de resterende bodem bestaande uit een klei-grindmengsel bestand tegen de toekomstige scheepvaart?
2. Hoe snel gaat een eventuele erosie in relatie tot toekomstige scheepspassages?

Afgeleide vragen zijn:

3. Welke stroomsnelheden treden op onder schepen?
4. Wat is de kritische stroomsnelheid van een grind-klei mengsel zoals aanwezig in het Julianakanaal?

De antwoorden op deze vragen bepalen of het noodzakelijk is - en zo ja binnen welke termijn - de bodem te versterken c.q. te verbeteren door alsnog een nieuwe waterremmende laag aan te brengen.

De doelstelling van de proeven is:

Het doen van een uitspraak over de erosiebestendigheid van de bodem van het Julianakanaal met een predictie van de periode waarna de schade kritiek wordt op basis van het te verwachten aantal scheepspassages.

Het bovenstaande is aanleiding voor RWS geweest om opdracht te verstrekken voor het doen van stabiliteitsproeven en stroomsnelheidsmetingen onder een schip op twee trajecten in het Julianakanaal. De proeven zijn uitgevoerd in de periode 21 t/m 31 juli 2014. Dit rapport

¹ Inmiddels blijkt dat op sommige plaatsen het klei al voor het baggeren bloot ligt en het is onbekend of deze laag inmiddels als enigszins geërodeerd is (bron RWS).

² Klei heeft een sterkte die varieert van 0,5 tot 1,5 m/s afhankelijk van de klei kwaliteit. De sterkte van grind hangt af van de diameter van het grind. In maart 2014 heeft een expertsessie plaatsgevonden waarbij het getal van 1,5 m/s kwam boven drijven als kritische waarde voor het klei/grind mengsel. De waarde is dus niet gebaseerd op proeven.

bevat de analyse van de metingen van de meetcampagne. Details over de meetcampagne en de organisatie rondom de proeven is vastgelegd in “1210294-000-ZWS-0015-r-Stabiliteitsproef bodem Julianakanaal_waarnemingsverslag”.

RWS heeft daarbij de volgende verwachtingen geuit ten aanzien van dit analyserapport:

- 1 Bevestiging dan wel ontkennen van het hebben van een probleem (bodem sterkte en duurzaamheid) op de beproefde locatie.
- 2 Beoordeling van hoe groot het probleem is (verwachte duurzaamheid/erosie) obv alle beschikbare data, maar wetende dat de data niet uitputtend is, ook inbreng van expert judgement.
- 3 Probleembeschrijving van beproefde locatie met doorkijk naar overige locaties.
- 4 Mogelijke beheersmaatregelen (denk aan snelheidsbeperkingen, handhaven, monitoring en interventie).
- 5 Mogelijke beheersmaatregelen als in technische oplossingen (niveau schetsontwerp/denkrichtingen) met kosten indicatie.

De punten 4 en 5 vallen buiten de huidige opdracht aan Deltares, maar er zijn aanbevelingen gedaan om deze punten te adresseren.

Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een korte beschrijving van de meetlocatie en de uitgevoerde proeven.
Hoofdstuk 3 bevat enige theorie ten aanzien van scheepsgeïnduceerde stroming en stromingsgeïnduceerde erosie.
Hoofdstuk 4 bevat de analyse van de waarnemingen en een vergelijking met theoretisch te verwachten resultaten.
In hoofdstuk 5 worden conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

Dit rapport is opgesteld door drs. Rinus Schroevers, ir. Henk Verheij, ir. Koen Berends en ir. Tommer Vermaas en getoetst door dr.ir. Rolien van der Mark. Thijs Robijns heeft daarnaast de nodige inbreng gehad vanuit zijn masters werk en Maarten van der Wal als inhoudelijke sparringpartner.

Rinus Schroevers heeft de projectleiding verzorgd van de uitvoering van de proeven, de analyse en de rapportage.

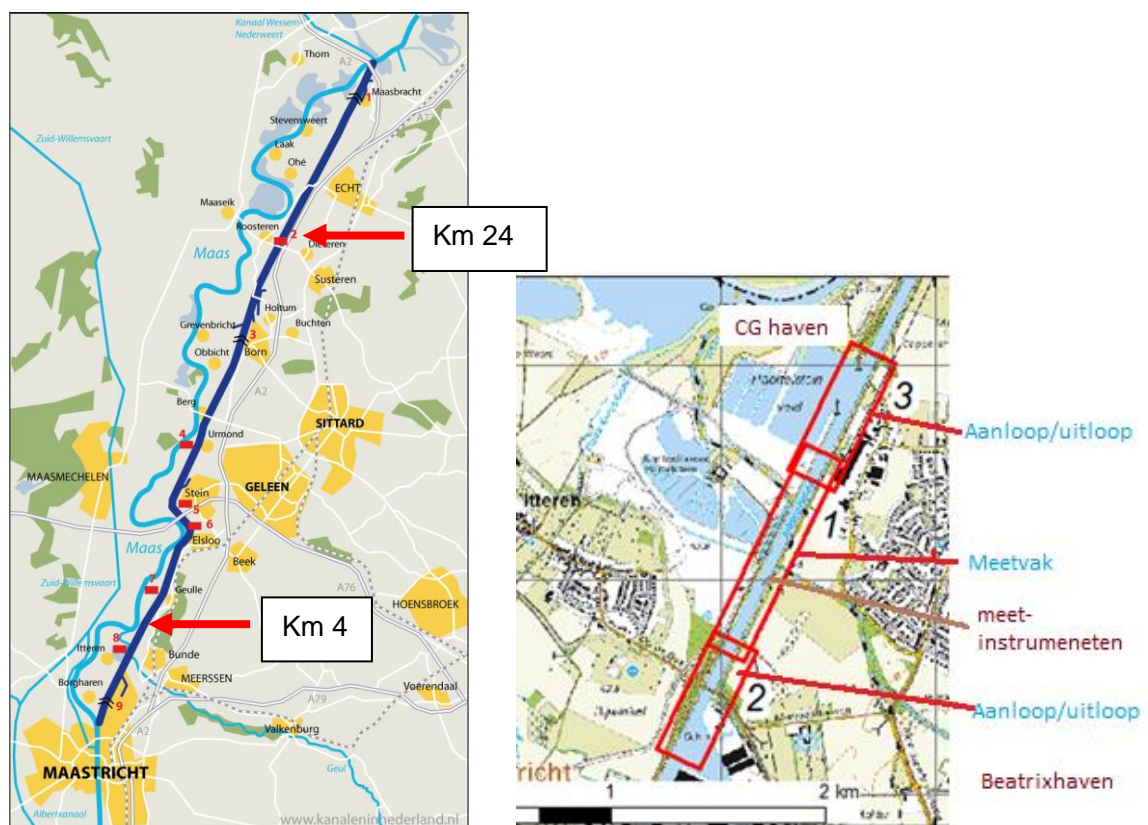
Het werk is uitgevoerd in opdracht van het agentschap Rijkswaterstaat van het ministerie van Infrastructuur en Milieu. De projectleiding bij RWS was in handen van ing. Kor van den Hoek van de dienst Grote Projecten en Onderhoud.

2 Korte beschrijving van de meetlocatie en meetcampagne

2.1 Meetlocatie

Bij de voorbereiding van de proeven zijn metingen in twee trajecten in het Julianakanaal gepland, te weten, meetvak 1 van km 3,5-4,5 en meetvak 2 van km 24-25 (zie Figuur 2.1). Elk meettraject zou daarbij ongeveer 700 m lang moeten zijn met aansluitend een aanloopstuk van minimaal 1000 m en een uitloopstuk van minimaal 500 m.

In de periode 21 t/m 31 juli 2014 zijn metingen uitgevoerd in een iets aangepast traject rond km 4. Het gehele traject liep van de Beatrixhaven op **km 2,7** tot aan de CG haven op **km 4,6**. Het meetvak liep van **km 3,3 tot km 4,1** met een aanloop en uitloop aan beide zijden van ongeveer 500 meter. Gezien de resultaten zijn er geen proeven op het tweede traject uitgevoerd.



Figuur 2.1 Links situering van de beoogde proeflocaties in het Julianakanaal. Rechts uiteindelijke meetlocatie.

2.2 Bodemgesteldheid op de meetlocatie

De samenstelling van de bodem en de waterremmende laag is over het kanaal inhomogeen. Met name de dikte van de laag grind en de hoeveelheid menging met klei en andere materialen verschilt sterk. Zelfs over het korte traject van km 3 en 4 was er duidelijk variatie vóór aanvang van de baggerwerkzaamheden [1][2], variërend van slib tot matig grof grind. Uit de lodingen die Deltares heeft gekregen van voor de baggerwerkzaamheden (september 2013) en na de baggerwerkzaamheden (juni 2014) blijkt dat in dit traject bij km 4 ongeveer

15 cm materiaal is verwijderd (zie bijlage A). Lokaal zou daardoor de grindlaag nog tussen de 10 en 30 cm dik moeten zijn (mondelinge informatie van RWS en onderstaande tabel). Uit een bodemonmonster genomen tijdens de meetcampagne bleek dat op de locatie van de meetapparatuur de grindlaag in ieder geval 20 cm dik is. De D_{50} van het materiaal was 12 mm en de D_{90} was 32 mm.

DTM in de tabel is het niveau tot waarop gebaggerd zou moeten zijn. In dit geval +27,8 m+NAP.

Tabel 1: Gegevens

Monsterpunt	Ligging bovenzijde kleilaag t.o.v. NAP	Ligging bovenzijde kleilaag t.o.v. DTM	Opmerkingen
KM-BM-01	-	minimaal -2,10 m	Mijnstee tot 2,1 m-DTM, geen klei aangetroffen
KM-BM-02	+27,00 m	-0,80 m	-
KM-BM-03	+27,50 m	-0,30 m	Bovenzijde waterbodembodem boven DTM gelegen
KM-BM-04	+27,35 m	-0,45 m	-
KM-BM-05	+27,25 m	-0,55 m	-
KM-BM-06	+27,20 m	-0,60 m	-
KM-BM-07	+27,10 m	-0,70 m	-
KM-BM-08	+27,35 m	-0,45 m	Geen grindlaag aangetroffen
KM-BM-09	+27,10 m	-0,70 m	-

Voorgeschiedenis:

Aanslibbing en baggerwerkzaamheden

Tot nog toe was het systeem redelijk in evenwicht. Scheepvaart bracht het bodemmateriaal licht in beweging en in suspensie wat zorgde voor sedimenttransport naar het noorden. Vanuit het zuiden is echter ook aanvoer geweest van slib naar het kanaal via de sluizen bij Limmel. Er is meer aanvoer geweest dan afvoer wat valt te herleiden uit het wegbaggeren van gemiddeld 10 cm slib in de afgelopen 7 jaar (bron: Theo de Meijer en Menno Kamp RWS). Er zijn geen ondersteunende gegevens ontvangen die dit bevestigen). Dit slib verdichtte ook de bodem en maakte de ondergrond beter waterremmend.

De laatste baggerwerkzaamheden (voor de werkzaamheden in 2014) hebben plaatsgevonden in 2009 (bron Menno Kamp RWS). Daarbij is gebaggerd in een aantal bochten, rondom en in de aanloop naar de sluizen en een aantal zijhavens (overzicht baggerlocaties Impuls 2, 2008). Volgens deze documentatie zijn er geen werkzaamheden uitgevoerd in het traject waar nu de proeven zijn uitgevoerd.

(Meer gegevens over baggerlocaties, volumes en bodemligging hebben we niet ontvangen).

Effect van scheepvaart op de bodem

De lading van De Vries & Van der Wiel van 17-09-2013 op het traject bij km 4 van voor de baggerwerkzaamheden vertoont patronen die wellicht zijn toe te schrijven aan scheepvaart (bijlage B). Er zijn twee uithollingen waar te nemen in de lengterichting aan weerszijden van het kanaal. Dit zou typisch zijn voor scheepvaart en ook typisch voor het kanaal vóór de baggerwerkzaamheden (uitspraak Theo de Meijer RWS). Het hoogteverschil van de vormen is tussen de 5 en 10 cm. Een andere lading van De Vries & Van der Wiel tussen km 0 en 0,85

laat lokaal sporen zien waar de bodem wat hoger lag dan in de omgeving (verondiepingen) oplopend van 15 tot 50 cm (Bijlage B).

2.3 Uitvoering proef met de duwcombinatie

De verandering in bodemligging en stroomsnelheden die ontstaan als gevolg van de passage van een schip (een duwcombinatie van een duwbak met een duwboot) zijn bepaald door over de meetlocatie te varen met een vaarsnelheid van maximaal 8 km per uur (2,2 m/s). Het schip voer op vol vermogen van de CG haven naar de Beatrixhaven en terug. Het schip keerde in de havens. De duwcombinatie die is gebruikt voor de belastingsproeven bestond uit de duwboot Sandra F en de duwbak Wiljaco F12 van de firma Fransbergen BV (Figuur 2.2). De aflaaddiepte is representatief voor de toekomstige aflaaddiepte, het vermogen van de duwboot is echter aanzienlijk kleiner dan de in de toekomst verwachte scheepvaart. De duwbakcombinatie voer gemiddeld met 1,9 m/s wat gelijk staat aan 65% van de snelheidslimiet (2,9 m/s), terwijl 75 tot 85% in de toekomst zeker haalbaar is. Met de duwcombinatie zijn 59 vaarten uitgevoerd over het meetvak. De diepgang van de duwbak bedroeg op één meetdag 3,0 meter en op 4 meetdagen 3,5 meter.

Daarnaast is aan regulier passerende scheepvaart zo nu en dan gevraagd sneller te varen. De gegevens van deze vaarten zijn zo goed mogelijk genoteerd en de optredende stroomsnelheden zijn gemeten.

Tabel 2.1 Gegevens van duwboot en duwbak.

Sandra F	Duwboot	25,65 x 6,26 x 2,63 m	EU 2323527		980 pk
Wiljaco F12	Duwbak	110 x 11,4 m	EU 2315958	3400 ton bij aflaaddiepte van 3,0 m	



Figuur 2.2 Duwcombinatie Sandra F en Wiljaco F12 afgeladen tot 3,5 m.

2.4 Uitvoering bodem en stroomsnelheidsmetingen en waterstanden

De uitgevoerde metingen bestonden uit meting van de bodemligging in het gehele meetvak en stroomsnelheid op 2 vaste punten waar het schip overheen voer.

Metingen bodemligging

De bodem van het hele meetvak is gemonitord door een peilschip uitgerust met een multibeam-echolood met een onzekerheid van ongeveer 3,5 cm per vak van 0,5 bij 0,5 meter. Na elke meetdag is bepaald of er bodeminstabiliteit is opgetreden door bodemverschilkaarten te maken. Bodempeilingen zijn ook uitgevoerd op de locaties waar het meetschip start en stopt om eventuele erosie door de schroefstraal vast te stellen. Er zijn 19 peilingen uitgevoerd en een controle peiling (Tabel 2.2). De peilingen zijn uitgevoerd in een 0,5 bij 0,5 meter raster. De data is aan het eind van iedere dag verwerkt tot gevalideerde hoogtebestanden en verschilkaarten.

Tabel 2.2 Bodempeilingen uitgevoerd door IGL.

<u>22-07-2014</u>	<u>23-07-2014</u>	<u>28-07-2014</u>	<u>29-07-2014</u>	<u>30-07-2014</u>
1: 7.55 - 9.15	1: 10.05 - 11.30	1: 8.15 - 10.00	1: 8.20 - 9.20	1: 8.10 - 9.10
2: 11.30 - 12.30	2: 12.00 - 13.00	2: 12.45 - 13.55	2: 12.55 - 14.20	2: 10.15 - 12.10
3: 12.45 - 14.00	3: 13.10 - 14.00	3: 17.10 - 18.10	3: 16.50 - 18.05	3: 13.15 - 14.20
4: 14.35 - 15.45	4: 14.10 - 15.20			4: 16.30 - 18.00
5: 15.50 - 17.10		Controlevlak 1 : 9.40 - 9.47		
		Controlevlak 2 : 9.48 - 9.55		

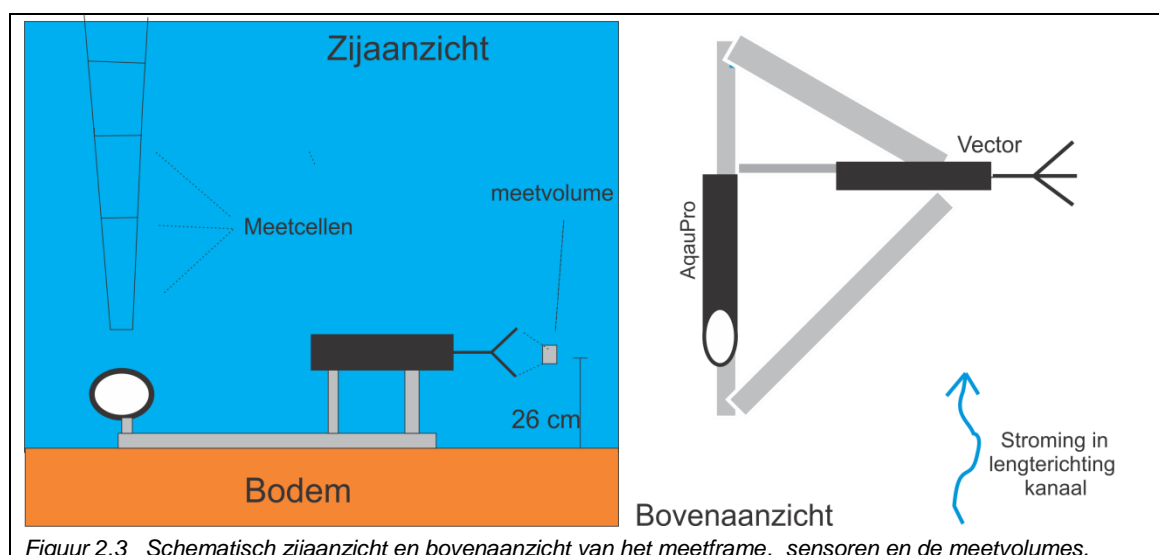
Metingen stroomsnelheden

Tijdens het experiment was de waterkolom gemiddeld 5 meter ten opzichte van de bodem. De duwbak was afgeladen tot 3 of 3,5 meter, waarbij de duwbakcombinatie een inzinking vertoonde van ongeveer 20 à 30 cm. De resterende kielspeling was daarmee slechts 1,2 tot 1,7 meter. Binnen deze ruimte moesten stroomsnelheden gemeten worden. Tijdens nagenoeg alle meetvaarten zijn de stroomsnelheden gemeten onder het schip met stroommeters die geplaatst waren op de bodem van het kanaal.

Eén snelheidsmeter (Nortek Vector) mat de stroomsnelheden op een punt 26 cm boven de bodem, met een frequentie van 2 Hz en een onzekerheid van 1 cm/s. De stroomsnelheden zijn beschikbaar in de x, y, z componenten zoals gemeten door de vector stroomsnelheidsmeter. Deze snelheden zijn omgerekend naar componenten in de lengte en dwarsrichting van het kanaal.

De andere stroomsnelheidsmeter (Nortek AquaPro) mat de stroomsnelheden met een frequentie van 1 Hz in een profiel van de bodem tot aan het oppervlak. Alleen de cellen van 38 tot 98 cm (3 cellen van 20 cm) boven de bodem bleken bruikbaar bij passage van de duwbak. Deze metingen hadden een onzekerheid van minimaal 15 cm/s. Door een middeling van de snelheid over de 3 cellen en/of een gehele scheepspassage leverde dit nog kwalitatief bruikbare informatie op.

De stroommeters lagen 2 meter naar het westen ten opzichte van het midden van het kanaal.

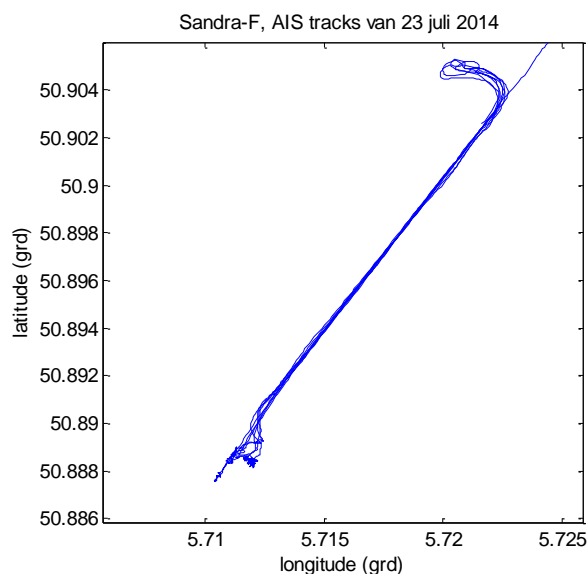


Sediment in suspensie

Na iedere vaart vertroebelde het water wat duidt op materiaal in suspensie door de vaarten. Deze vertroebeling nam ook verder toe na iedere opvolgende vaart. Deze vertroebeling was niet alleen zichtbaar, maar ook meetbaar door de akoestische stroomapparatuur (door een toenemende reflectie van het uitgezonden meetsignaal).

Vaarsnelheid en positie schepen

De vaarsnelheid van het schip is bepaald aan de hand van het navigatiesysteem aan boord van het schip. Deze is voldoende nauwkeurig, maximaal $\pm 0,2$ km/uur. Voor de positie van de schepen is AIS informatie opgevraagd. Dit is relevant omdat van het links, rechts of door het midden varen een aanzienlijk verschil wordt verwacht voor de locatie van de piek van de stroming en daarmee de erosie. AIS informatie is te laat en maar deels in een bruikbaar format beschikbaar gekomen om uitgebreid te analyseren. In Figuur 2.4 zijn de "tracks" van de Sandra-F weergegeven van 23 juli 2014. Daarin is het keren in de CG-haven en de Beatrix-haven te zien.



Figuur 2.4 Tracks van de Sandra-F op 23 juli, verkregen uit AIS

Waterstanden in kanaalpand

De waterstanden in het kanaalpand zijn verkregen van de RWS dienst Centrale Informatievoorziening (CIV) voor het landelijk meetpunt bij de brug van Bunde. De waterstand in het kanaal is iedere tien minuten beschikbaar (gemiddeld over tien minuten). De waterstand in het kanaal is tijdens de proeven gemiddeld 44,10 m +NAP geweest met een variatie van 10 cm. Op 30 juli is de waterstand gedaald tot 43,85 m + NAP. De variatie van de waterstand in het kanaal wordt veroorzaakt door het gebruik van de sluisen bij Limmel stroomopwaarts en Born stroomafwaarts. De debieten door het kanaal waren niet beschikbaar vanwege het onderhoud aan het debietmeetpunt bij Bunde tijdens de meetcampagne. De natte doorsnede ter hoogte van de meetlocatie was gemiddeld 175 m² (geschat aan de hand van de gemeten profielen en de gemiddelde waterstand).

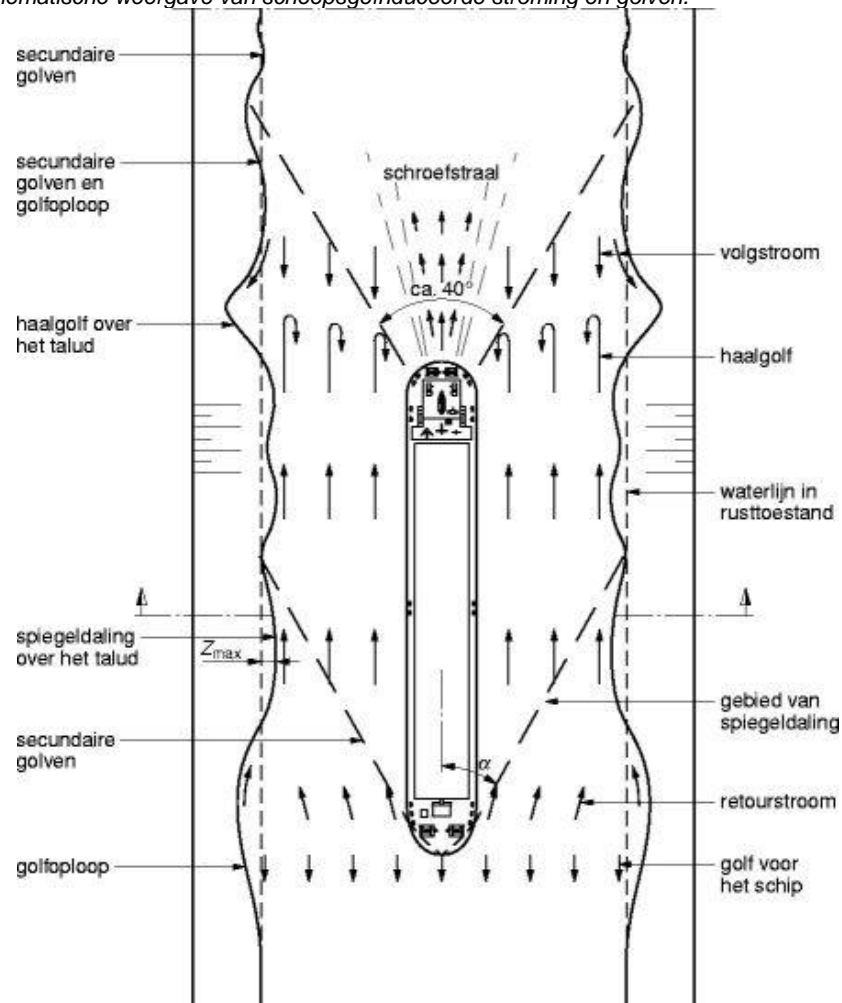
3 Theorie scheepsgeïnduceerde stroomsnelheden en bodemerrosie

3.1 Theoretische stroomsnelheden agv scheepsbeweging

3.1.1 Snelheden onder en rond het schip

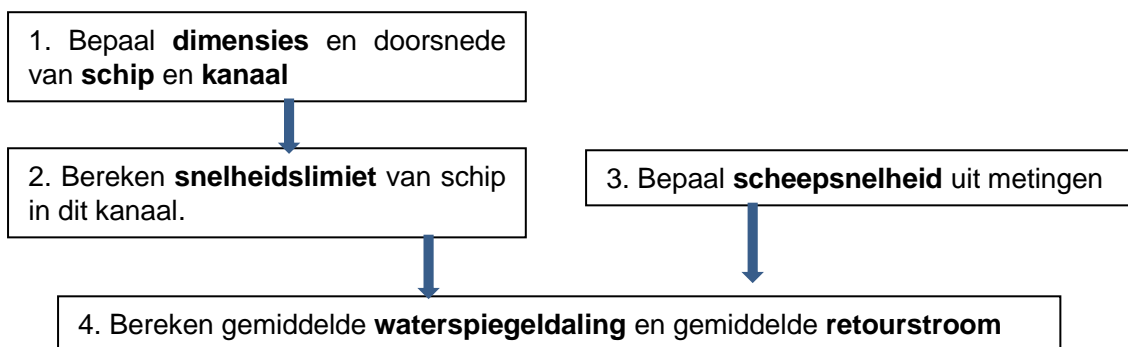
De scheepsgeïnduceerde stromingen en golven rond een schip zijn schematisch weergegeven in Figuur 3.1. Het schip duwt het water opzij en onder zich door waardoor een stroming naar het achterschip ontstaat, de retourstroom. Op basis van drukmetingen tijdens laboratoriummetingen wordt aangenomen dat de stroomsnelheid onder het schip over het algemeen een factor 1,5 tot 2 hoger is dan de over de doorsnede gemiddelde stroomsnelheid naast het schip (M1111 deel XIX). Het water stroomt vervolgens achter het schip weer terug, de volgstroom. Recht achter het schip is het effect van de schroef waarneembaar als schroefstraal. Op grotere afstand achter het schip zijn transversale golven waarneembaar. Deze golven behoren tot het systeem van secundaire golven en hebben dezelfde voortplantingsrichting als de vaarrichting van het schip.

Figuur 3.1 Schematische weergave van scheepsgeïnduceerde stroming en golven.



3.1.2 Berekening van de theoretische retourstroom

Berekenen van de theoretische retourstroomsnelheid wordt gedaan met de formules 4.167 – 4.174 uit de Rock Manual (CUR/CIRIA/CETMEF, Gouda, 2007). Deze zijn gebaseerd op de eendimensionale methode volgens Schijf. Dit gaat als volgt:



1. De dimensies van het schip en kanaal

De dimensies van het schip worden bepaald uit de lengte, breedte en de diepgang. De dimensies van de natte doorsnede van het kanaal worden bepaald aan de hand van de bathymetrie en de gemeten waterstand.

2. Snelheidslimiet van het schip V_L

De snelheidslimiet wordt op 3 manieren berekend. De laagst gevonden waarde wordt gebruikt voor verdere berekeningen:

$$V_L = F_L \sqrt{g A_c / B_w} \quad (3.1)$$

$$\text{waarbij } F_L = \left[\frac{2}{3} \left(1 - \frac{A_m}{A_c} + 0.5 F_L \right) \right]^{3/2}$$

$$V_L = (g L_s / 2\pi)^{1/2} \quad (3.2)$$

$$V_L = (gh)^{1/2} \quad (3.3)$$

3. Scheepsnelheid V_s

De scheepsnelheid wordt direct afgelezen uit de log-bestanden gebaseerd op de navigatiesystemen van de schepen. Tevens wordt de verhouding f_v bepaald tussen V_L en V_s

$$f_v = V_s / V_L \quad (3.4)$$

In de praktijk is deze waarde voor geladen schepen rond de 0,75. Voor het schip gebruikt in de proef lag deze waarde rond de 0,65.

4. Waterspiegeldaling Δh en retourstroom U_r

De waterspiegeldaling Δh wordt als volgt berekend

$$\Delta h = \frac{V_s}{2g} [\alpha_s (A_c / A_c^*) - 1] \quad (3.5)$$

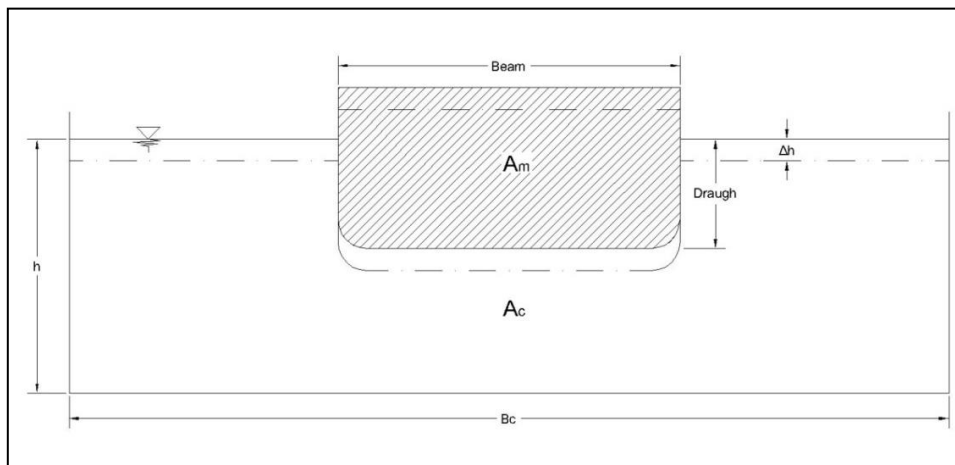
Omdat A_c^* afhankelijk is van Δh moet de formule iteratief opgelost worden.

Vervolgens kan de gemiddelde retourstroom U_r worden bepaald als:

$$U_r = V_s \left(\frac{A_c}{A_c^*} - 1 \right) \quad (3.6)$$

met:

A_c	=	natte kanaaldoorsnede in onverstoorde situatie (m^2)
A_m	=	midscheepse doorsnede van het schip onder de waterspiegel (m^2)
A_c^*	=	natte kanaaldoorsnede in de verstoorde situatie. Dit is A_c gecorrigeerd voor de aanwezigheid van het schip (A_m) en waterspiegeldaling.
Bw	=	kanaal breedte op de waterlijn (m)
α_s	=	empirische correctiefactor voor relatieve snelheid ten opzichte van het maximum $\alpha_s = 1.4 - 0.4 f_v$
g	=	gravitatie constante (m/s^2)
h	=	waterdiepte (m)
Δh	=	waterspiegeldaling (m)
Ls	=	Lengte schip (m)
Vs	=	gemeten scheepssnelheid (m/s)
VI	=	Limietsnelheid (m/s)
Ur	=	Retourstroomsnelheid (m/s)
y	=	afstand van zijkant van het schip naar de oever



Figuur 3.2 Weergave van de doorsnede en de waterspiegeldaling in een rechthoekig kanaal.

3.1.3 Berekening van de maximale retourstroom

Voor de bepaling van de belasting van de bodem van het kanaal is een berekening van de maximale retourstroomsnelheid onder de kiel van een schip noodzakelijk. In het verleden zijn bij Deltares modelmetingen gedaan naar de scheepsgeïnduceerde waterbeweging, het zogenaamde M1115 onderzoek (WL|Delft Hydraulics, 1984). Dit heeft geresulteerd in de volgende relatie voor de maximale retourstroomsnelheid onder de kiel van een schip:

$$U_{Rmax} = \alpha \cdot U_R \quad (3.7)$$

Hierin is de maximale retourstroomsnelheid via de coëfficiënt α gerelateerd aan een doorsnede gemiddelde retourstroomsnelheid U_r , zoals berekend in de vorige paragraaf. Voor de waarde van de coëfficiënt is afgeleid: $\alpha \approx 1.5 - 2$. Stolker et al. (2006)[10] hebben na aanvullend onderzoek een waarde voorgesteld van $\alpha \approx 1 - 5$. Recent is door Lenselink (2011) [11] in het kader van een afstudeeronderzoek op basis van modelproeven een waarde van $\alpha \approx 1.46$ bepaald.

3.1.4 Ontwikkeling grenslagen

De vorm van het stroomprofiel onder de kiel van het schip is niet constant over de lengte van het schip. Direct bij de boeg zal een nagenoeg recht profiel ontstaan dat scherp afloopt aan de bodem en aan de scheepshuid. Daarna zullen zich aan de bodem en onder de kiel twee grenslagen ontwikkelen. Deze grenslagen worden dikker vanaf de boeg van het schip. In deze grenslaag heeft het stroomprofiel een logaritmische vorm. Voor een hydraulisch ruwe bodem is de groei van de grenslaag (δ_{bodem}) aan de bodem als functie van de afstand vanaf de boeg van het schip te schatten als (M1115):

$$\delta_{bodem} = K_s 10^{\left(\frac{1}{3,96 \sqrt{c_f}} - 1,907 \right)} \quad (3.8)$$

waarin

$$c_f = (3,47 + 0,707 \ln L/K_s)^{-2,56} \quad (3.9)$$

en

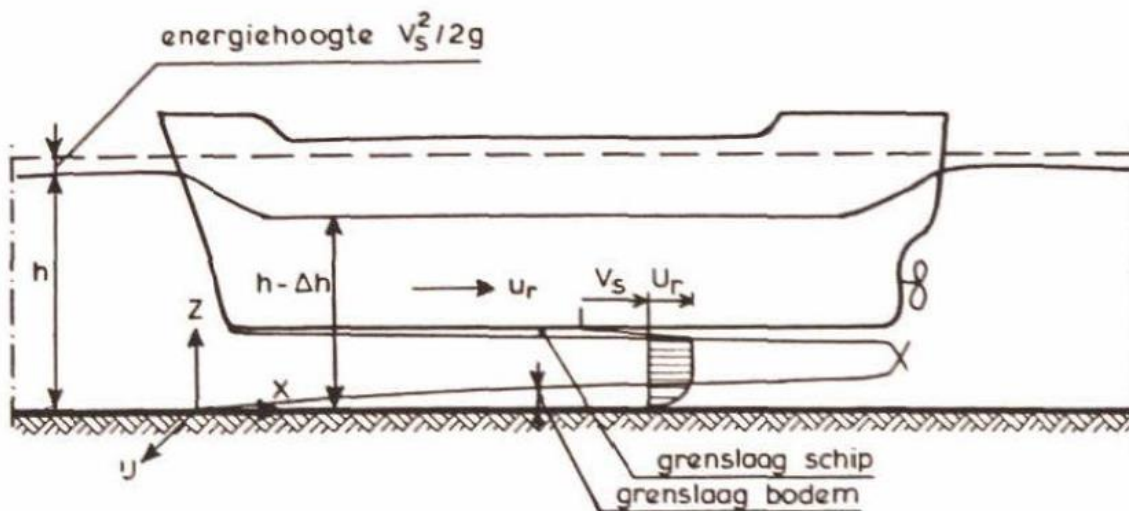
c_f = schuifspanningscoëfficiënt

L = relatieve afstand tot de boeg van het schip, loopweglengte genaamd; $L = \frac{U_r}{V_s + U_r}$

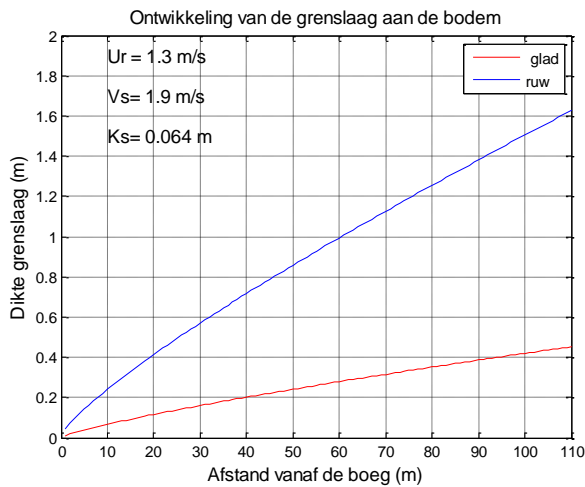
x = de afstand vanaf de boeg van het schip

K_s = equivalente korrelgrootte (hier benaderd door $2 \times D_{90}$ van de korrelgrootteverdeling)

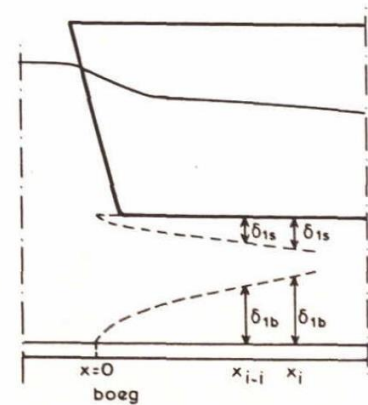
In Figuur 3.4 is de groei van de grenslaag aan de bodem (δ_{bodem}) benaderd voor een situatie uit de proef ($U_r = 1,3$ m/s, $V_s = 1,9$ m/s en $K_s = 0,064$ m). Daarbij is te zien dat de grenslaag aan de bodem al oploopt tot een meter halverwege de passage van het schip. Deze vorming van grenslagen moeten in acht genomen worden bij de interpretatie van metingen onder de kiel van het schip.



Figuur 3.3 Schematische weergave van de ontwikkeling van een grenslaag aan de bodem van het kanaal en vlak onder het schip.

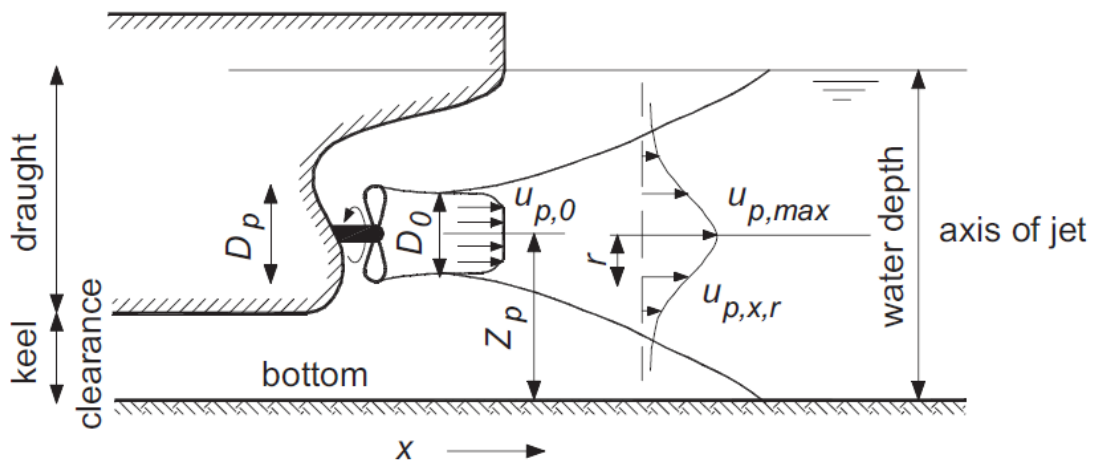


Figuur 3.4 Ontwikkeling van de grenslaag aan de bodem



Figuur 3.5 Grenslagen aan de bodem en schip.

3.1.5 Snelheden in de schroefstraat



Figuur 3.6 Schematische weergave van de schroefstraat

De metingen vertonen bij de duwbak geen duidelijke schroefstraat. Dit is in overeenstemming met de verwachting. De afstand schroef-kanaalbodem is relatief groot waardoor de snelheid bij de bodem sterk afneemt. Bovendien speelt een rol dat de vaarsnelheid hoog is en dat heeft een sterk reducerende werking op de schroefstraalsnelheid. Daarnaast heeft de meting niet exact in het midden van het schip plaatsgevonden, maar iets opzij, waardoor wederom niet het maximum van de schroefstraat is bemonsterd.

Om bovenstaande redenen is afgezien van het berekenen van schroefstraalsnelheden. In de Rock Manual worden de formules 4.187 – 4.190 gepresenteerd voor stilliggende schepen; voor varende schepen geldt aanvullend $U_{varend} = U_{stilliggend} - 0,5 \cdot V_s$.

3.2 Kritieke stroomsnelheid voor het grind/klei mengsel

De bodem van het Julianakanaal bestaat uit een grind/klei mengsel. Er zijn geen sterke bepalingen gedaan van het bodemmateriaal. Wel is uit een genomen monster van het bodemmateriaal de diameter van het grind bepaald. De karakteristieke waarde blijkt $D_{50} = 12$ mm. De sortering is visueel geschat 0 - 40 mm.

Met bijvoorbeeld de Izbash formule (zie Rock Manual, formule 5.226) kan een toelaatbare stroomsnelheid worden berekend:

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{2}{k_t^2} \Delta D_{50} \quad (3.10)$$

Uitgaande van $D_{50} = 12$ mm en een waarde voor de turbulentiefactor van 1,4 is dan een toelaatbare maximale stroomsnelheid van ongeveer 0,75 m/s te berekenen en dat is dus ruim lager dan de verwachte snelheden. Op basis daarvan moet worden geconcludeerd dat het grind onder de belastingen optredend tijdens de proeven met de duwbakcombinatie dus niet stabiel is. Hetzelfde geldt voor de grotere schepen die zijn gevraagd harder te varen, ook dan zijn de stroomsnelheden hoger dan de toelaatbare stroomsnelheid. Verder wordt het waarschijnlijk geacht dat ook bij een deel van de huidige scheepvaart, zelfs als deze relatief langzaam vaart met bijvoorbeeld een vaarsnelheid van orde 75% van de grenssnelheid, de geïnduceerde stroomsnelheden bij de bodem al hoger zijn dan de toelaatbare. Dit leidt dan tot bodemerosie en dat strookt met de eerdere waarnemingen daarvan in december 2013 van De Vries & Van der Wiel naar aanleiding waarvan RWS heeft besloten een onderzoek in te stellen wat uiteindelijk heeft geleid tot de proeven die in juli 2014 zijn uitgevoerd.

Over de sterkte van de klei is niets te zeggen, maar die kan stabiel zijn bij 0,75 m/s. Dat hangt sterk af van of de klei gestructureerd is, of er micro-biota in de klei voorkomen, et cetera. Over het algemeen is klei echter niet stabiel bij stroomsnelheden groter dan 1,5 m/s.

De combinatie klei-grind kan als deze goed gemengd is mogelijk hogere stroomsnelheden weerstaan. Kleideeltjes kunnen een kittende werking hebben waardoor het grind niet meer als afzonderlijke korrels maar als een conglomeraat van korrels functioneert. In hoeverre dit optreedt is onbekend, maar het wordt voor de bovenlaag niet waarschijnlijk geacht gezien de eerdere erosie waarnemingen van De Vries & Van der Wiel.

Op basis van literatuur is onderzocht of pantsering/armouring kan optreden. Armouring of pantsering is het effect dat de kleine fractie uitspoelt uit de bovenlaag waardoor een bovenlaag ontstaat die grover is en dus weerstand zou kunnen bieden aan een hogere kritische snelheid. Uit laboratorium proeven in het kader van de Oosterscheldewerken [6][7] met grind is gebleken dat dit effect de kritische snelheid niet aanzienlijk verhoogt en voor deze analyse verwaarloosbaar is.

3.3 Erosie door retourstroming

De erosie door retourstroming kan worden bepaald door (Hoffmans en Verheij, 1997):

$$\frac{z_m}{h} = \sqrt{\frac{t}{t_1}} \quad \text{of} \quad \frac{z_m}{h} = \sqrt{\frac{(\alpha U - U_c)^4 t}{K h^2 \Delta^{1,7}}} \quad \text{of} \quad z_m = (\alpha U - U_c)^2 \sqrt{\frac{t}{K \Delta^{1,7}}} \quad (3.11)$$

met

$$U = U_r + U_i \quad (3.12)$$

Hierin is h de waterdiepte (m), K ($= 330$ uren m^2/s^4) is een ontgrondingsconstante, r_0 ($= 0,1$) is de relatieve (dieptegemiddelde) turbulentie-intensiteit (-), t is de tijd, t_1 is de karakteristieke tijd waarin $z_m = h$, U is de maximale stroomsnelheid (m/s), U_c is de kritische stroomsnelheid (m/s), U_i is de spuitstroomsnelheid (m/s), U_r is de retour stroomsnelheid (m/s), z_m is de erosie, (m), α ($= 1,5 + 5r_0 = 2$) is de turbulentie-coëfficiënt en Δ ($= 1,65$) is de relatieve dichtheid (-). N.B. de tijden t en t_1 hebben de dimensie van uur. De tijdsduur (dt) per scheepsbeweging wordt benaderd door

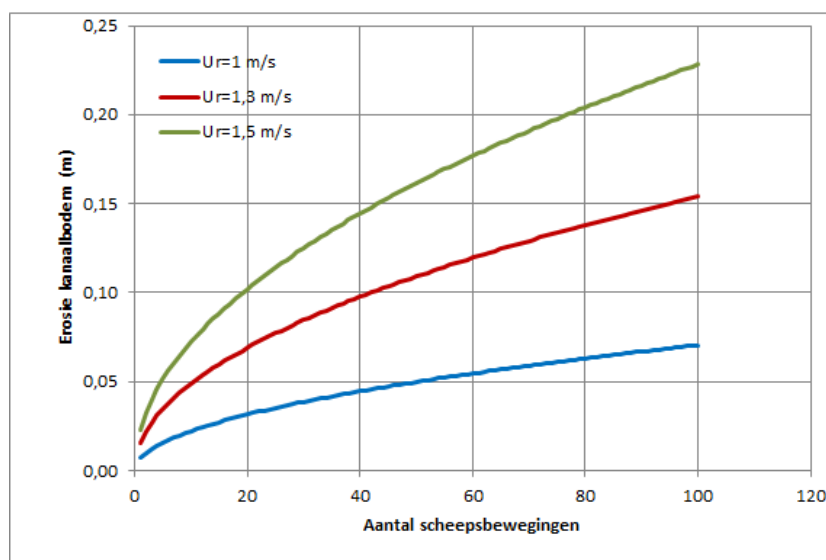
$$dt = \frac{L}{V_s} \quad (3.13)$$

waarin L is de scheepslengte en V_s is de vaarsnelheid. Hieruit volgt dat na N scheepsbewegingen de erosiediepte voor de bodemverdediging volgt uit:

$$z_m = (\alpha U - U_c)^2 \sqrt{\frac{Ndt}{K\Delta^{1,7}}} \quad (3.14)$$

Opmerking: Vergelijking (3.10) is afgeleid voor de ontwikkeling in de tijd van de groei van een ontgrondingskuil. Hier is geen sprake van een kuil, maar meer van spoorvorming, dat wil zeggen een in de tijd afnemende daling van de bodem over een beperkte breedte. Het erosieproces is echter wel vergelijkbaar en daarom als indicatie van te verwachten bodemdaling bruikbaar. Echter, in het model zit niet een eventuele opvulling van het spoor door verplaatst bodemmateriaal door een schip dat naast het spoor vaart. Het model geeft dus een bovengrens van wat in de praktijk verwacht mag worden.

Figuur 3.7 geeft de erosie als functie van de scheepsintensiteit bij de gemiddeld optredende maximale retourstroomsnelheid van $U_r = 1,0, 1,3$ en $1,5$ m/s en een kritieke stroomsnelheid van $U_c = 0,75$ m/s.



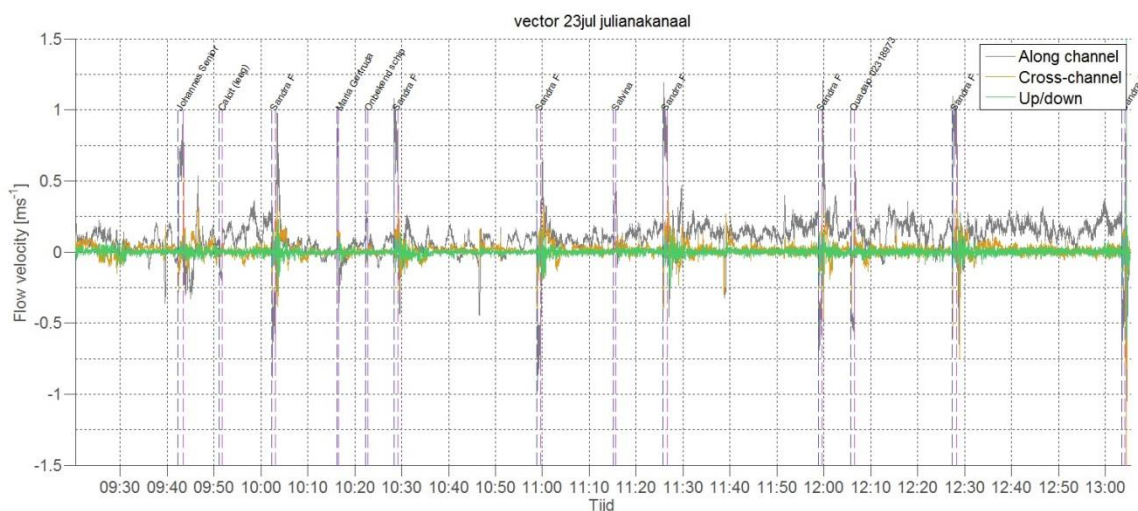
Figuur 3.7 Erosiediepte kanaalbodem als functie van het aantal scheepsbewegingen bij een retourstroom van 1,0/1,3/1,5 m/s en een kritieke stroomsnelheid van 0,75 m/s.

De bodem is zeer waarschijnlijk bij de huidige scheepvaart al niet stabiel, maar erosie zal slechts incidenteel optreden, omdat het aandeel grote schepen varende met maximale snelheid beperkt is. Daarnaast varen deze schepen niet allemaal over een zelfde lijn, wat eveneens het effect beperkt. De snelheid van de erosie bij de huidige scheepvaart is dus waarschijnlijk minder dan weergegeven in de figuur.

4 Verwerking metingen en analyse

4.1 Verwerking van de stroomsnelheidsmetingen per passage

Voor elke dag zijn de passages van de schepen – bijgehouden in het meetlogboek – naast de snelheidsmetingen gelegd. Hierdoor kon het tijdstip van passage van het schip over het meetinstrument nauwkeurig worden bepaald en in verband worden gebracht met gemeten pieken in de stroomsnelheden (zie Figuur 4.1). De tijdstippen van passages waren goed af te leiden uit de stroomsnelheden, deze zijn zo nodig gecorrigeerd ten opzichte van het scheepslog.



Figuur 4.1 Snelheden in de langsricting (along channel) en dwarsricting (cross channel) van het kanaal gemeten 26 cm boven de bodem.

Een beter beeld van wat er gebeurt tijdens een passage kan verkregen worden door in te zoomen op de passage van enkele schepen. Figuur 4.2 laat de snelheden zien bij de passage van de Sandra F met de duwbak. In deze passage vaart de combinatie met 7,5 km/h in opwaartse ricting en is de diepgang 3,5 m.

De snelheden in Figuur 4.2 laten een karakteristiek verloop zien van de stroming bij een duwbak combinatie. In het begin ziet men de achtergrond stroming in het kanaal van 0,25 m/s (naar het noorden). Op 11:44:50 begint de retourstroom onder de duwbak, waarbij vrijwel direct ook water opzij wordt gestuwd (piek in Cross channel-ricting). De resulterende stroomsnelheid piekt op 1,26 m/s onder een zijwaartse hoekverdraaiing. Let wel dat het schip tegen de dominante stroomricting invaart, de relatieve retourstroom is dus nog hoger.

Na de piek is retourstroom tegengesteld aan de vaarricting en neemt af tot 0,25 m/s. Na de passage (11:45:40) keert de stroming om en wordt tevens naar het midden gerict. Dit is de volgstroom. De pieksnelheden van de volgstroom zijn in dit geval van dezelfde orde als de piek van de retourstroom. Daarna volgt een enigszins turbulent stromingsveld. Dit is het gecombineerde effect van de schroefstraal, de volgstroom en de transversale golven achter het schip.

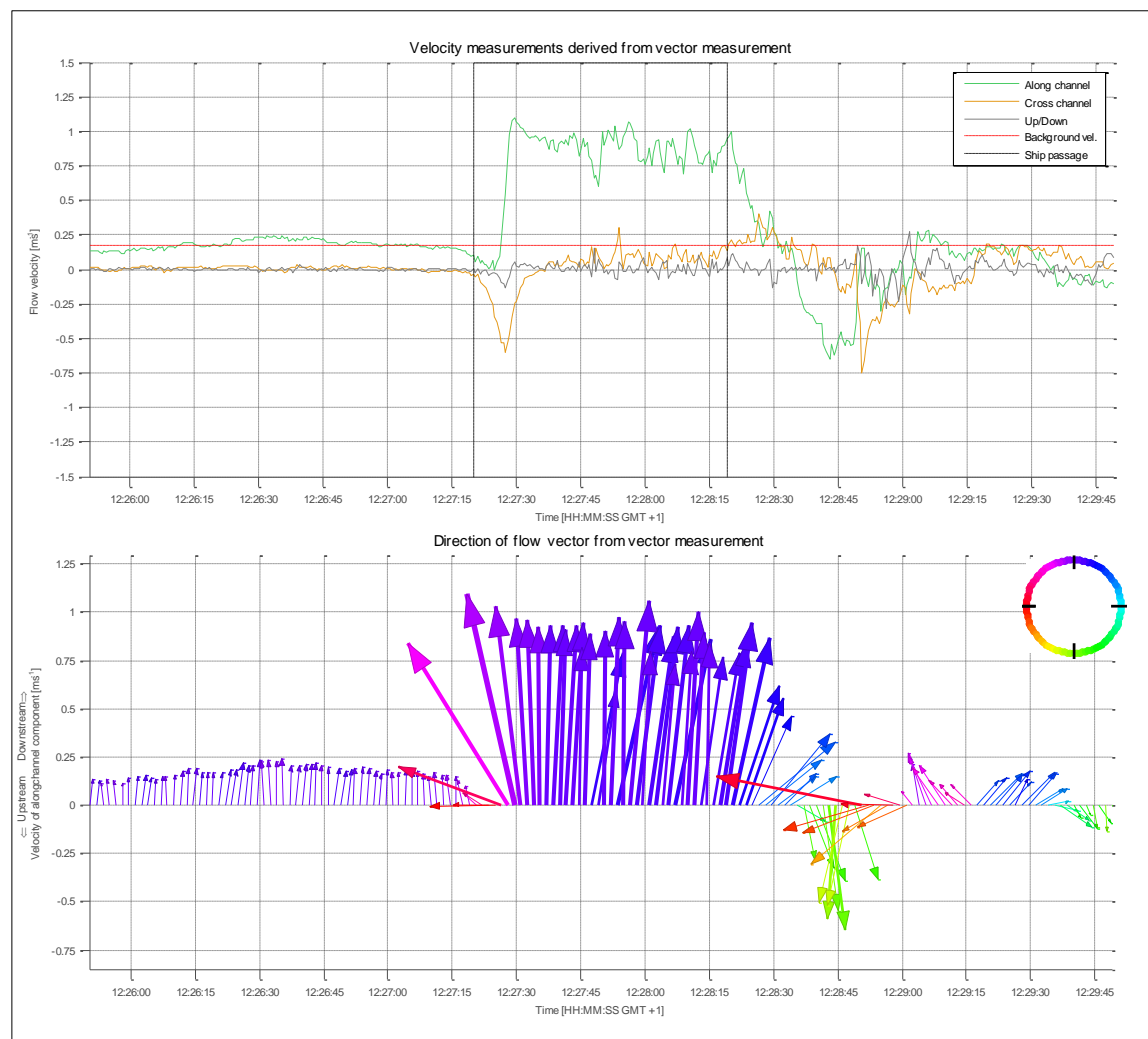
De onzekerheid in de meting is zeer klein en de variaties zijn dus werkelijke variaties in de stroming en niet te wijten aan een meetonzekerheid.



Figuur 4.2 De snelheden op 26 cm boven de bodem bij passage van de Sandra F op 28 juli om 11:45 bij een aflaaddiepte van 3,5 meter. Boven: presentatie in snelheidscomponenten dwars op en in de lengterichting van het kanaal. Onder: presentatie in stromingsvectoren.

In Figuur 4.3 zijn wederom de stromingen weergegeven tijdens de passage van de Sandra F, maar dan bij een kleinere aflaaddiepte. Deze figuur laat een afwijkend beeld zien van de stroming ten opzichte van de aflaaddiepte van 3,5 meter. De stroming blijft bijna constant (lichte afname) over de hele duur van de passage. Dit is het typische stromingsbeeld dat we zien voor alle passages met een aflaaddiepte van 3,0 meter, dus ook voor andere schepen dan de Sandra F.

Het verschil tussen het al dan niet sterk afnemen van de stroming tijdens de passage (groene lijn in Figuur 4.2 en Figuur 4.3) wordt veroorzaakt door de grotere diepgang van de duwbak in combinatie met de hoogte van het meetinstrument. Door de grotere diepgang wordt onder de duwbak meer water zijwaarts afgevoerd dan bij de normale aflaaddiepte van 3 m. Daarnaast ontwikkelt zich vanaf de boeg van het schip aan de bodem een grenslaag die dikker zal zijn bij een kleinere kielspeling (zoals geïllustreerd in Figuur 3.3). Omdat de meting slechts op 26 cm boven de bodem plaats vindt is het niet uitgesloten dat de meting beïnvloed wordt door de vorming van de grenslaag. Dit is gecontroleerd aan de hand van het andere meetinstrument.



Figuur 4.3 De snelheden op 26 cm boven de bodem bij passage van de Sandra F op 23 juli om bij een afluaddiepte van 3,0 meter. Boven: presentatie in snelheidscomponenten dwars op en in de lengterichting van het kanaal. Onder presentatie in stromingsvectoren.

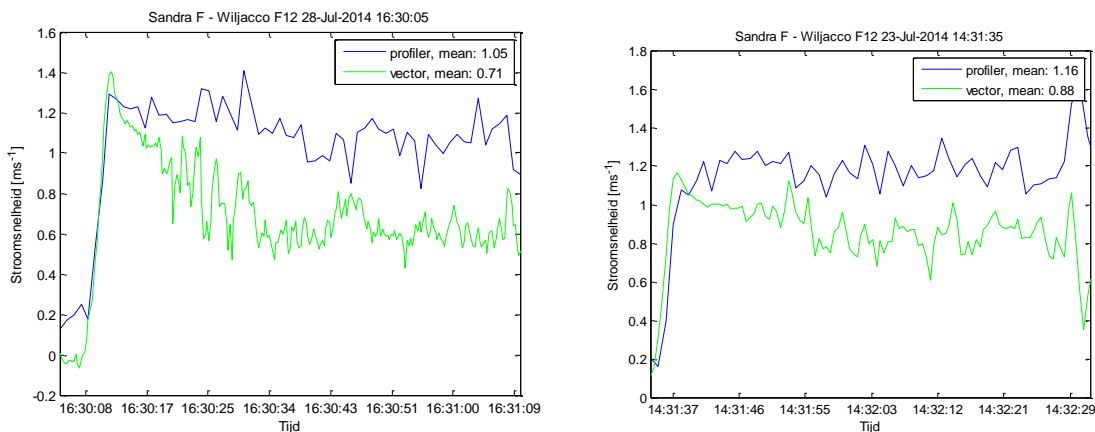
In figuur 3.6a en b zijn 2 passages van de Sandra F weergegeven met de snelheid gemeten op 26 cm hoogte (vector) en de snelheid gemeten en gemiddeld over een kolom van 38 tot 98 cm boven de bodem. Daarbij vallen 3 zaken op:

- De gemeten piekstroming aan het begin van de passage is op 26 cm gelijk aan de stroming hoger in de waterkolom.
- De stroming aan de bodem neemt echter af terwijl dat voor hoger in de waterkolom niet geldt.
- De stroming op 26 cm hoogte neemt veel sterker af bij de afluaddiepte van 3,5 meter dan bij een afluaddiepte van 3,0 meter.

Let wel: de meting hoger in de waterkolom is zelfs na middeling niet nauwkeurig (onzekerheid $\epsilon > 0,1$ m/s).

Deze constatering kloppen met het feit dat er zich aan de bodem een grenslaag ontwikkelt die groeit en de stroming op 26 cm zal doen afnemen. Volgens de relatie weergegeven in Figuur 3.4 zal de meting al na 20 meter vanaf de boeg in de grenslaag komen te liggen. De

gemiddelde stroming onder het schip is nagenoeg stabiel tijdens de passage, en gemiddeld over de hele passage ongeveer 1,3 tot 1,5 maal groter dan gemeten op 26 cm hoogte.



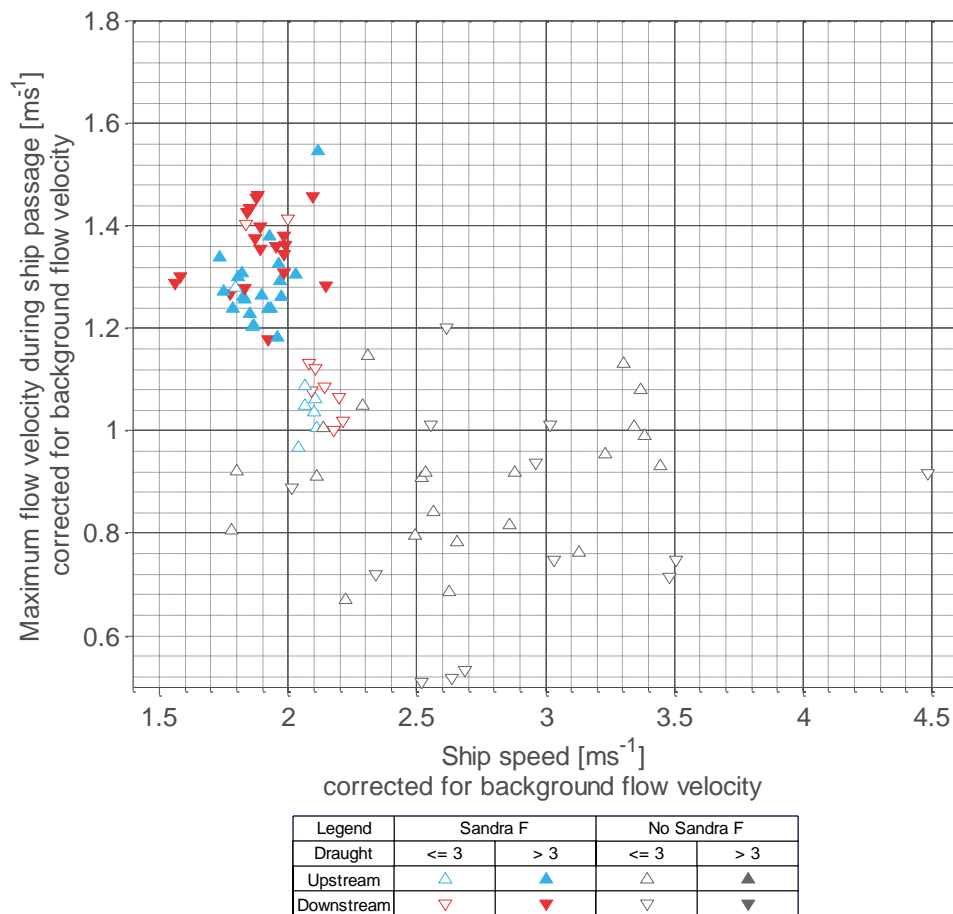
Figuur 4.4 De stroming tijdens 2 passages van de Sandra-F gemeten op 26 cm (groen) en 38 tot 98 cm (blauw) boven de bodem. Links een aflaaddiepte van 3,5 meter en rechts een aflaaddiepte van 3 meter.

Zoals hiervoor beschreven is voor 107 scheepspassages een schatting gemaakt van onder andere de maximale retourstroming (de lengte van de grootste vector en de maximale volgroom tijdens de passage. Dit zijn de stromingen zoals ze in het kanaal ontstaan en de bodem in beweging kunnen brengen. Daarnaast zijn deze waarden gecorrigeerd voor de achtergrondstroming om de stromingen rond het schip t.o.v. het water te berekenen. Deze waarden zijn de stromingen alsof het schip door een kanaal zonder stroming vaart en zijn te vergelijken met theoretische waarden voor retourstroming. De achtergrondstroming is bepaald door de stroming te middelen over een minuut voor de passage van het schip. Zie enkele voorbeeld resultaten in Tabel 4.1 en de volledige tabel in bijlage C.

Tabel 4.1 Voorbeeld getallen gegevens per passage.

Dag	Tijd	Schip	Lengte [m]	Breedte [m]	Diepgang [m]	Snelheid [km/h]	Maximale retourstroom [m/s]
23-07	10:02	Sandra F	110	11,4	3	8,3	0,91
28-07	11:44	Sandra F	110	11,4	3,5	7,5	1,26
29-07	14:56	Faraday	110	11,45	2,6	8,5	0,93
29-07	12:22	Westenwind	105	10	3	8,5	0,91
29-07	13:22	Combination	110	11,5	3	8,2	1,05
30-07	12:25	Jill F	48	7	2,5	11,8	1,18
30-07	14:08	Sandra F	110	11,4	3,5	7,2	1,25
30-07	16:36	Mover	88,2	11,47	3	7,8	0,66

Om de metingen goed te kunnen vergelijken met de theorie zijn de scheepssnelheden en retourstromen gecorrigeerd voor de heersende achtergrondstroming.



Figuur 4.5 Geïnduceerde stroming als functie van de vaarsnelheid, gecorrigeerd voor de achtergrondstroming. De rode markeringen geven aan dat het schip stroomafwaarts heeft gevaren en de blauwe stroomopwaarts. De open markeringen geven aan dat het schip een diepgang had van 3 m of minder en de gesloten met 3,5 m.

Retourstroom versus vaarsnelheid

In Figuur 4.5 is de maximaal opgewekte retourstroming door de schepen uitgezet tegen de vaarsnelheid, waarbij beide zijn gecorrigeerd voor de achtergrondstroming. (Schepen met een retourstroming lager dan 0,5 m/s zijn niet verwerkt.) De figuur laat globaal geen relatie zien tussen vaarsnelheid en opgewekte stroming. Dat heeft te maken met het feit dat het zowel kleine als grote schepen betreft met een verschillende aflaaddiepte die soms geladen en soms ongeladen zijn. Daarnaast zijn niet alle schepen door het midden gevaren, waardoor de retourstroom niet de retourstroom niet altijd onder het schip gemeten is (bij de Sandra F is dit wel het geval omdat deze altijd door het midden voer).

De scheepsnelheid van de Sandra F bij een aflaaddiepte van 3,5 meter varieert tussen 1,7 en 2,0 m/s. De opgewekte maximale stroming is gemiddeld 1,3 m/s (range 1,2 tot 1,5 m/s) (zie Figuur 4.5).

Voor de Sandra F zijn er twee groepen data waarbij een significant verschil te zien is in de opgewekte stroming en vaarsnelheid. De groep met lagere vaarsnelheden en een hoge retourstroomsnelheid komt overeen met een aflaaddiepte van 3,5 meter en de groep data

met hogere vaarsnelheden en lagere retourstroomsnelheden komt overeen met de Sandra F die afgeladen zijn op 3 meter, wat klopt met de theorie.

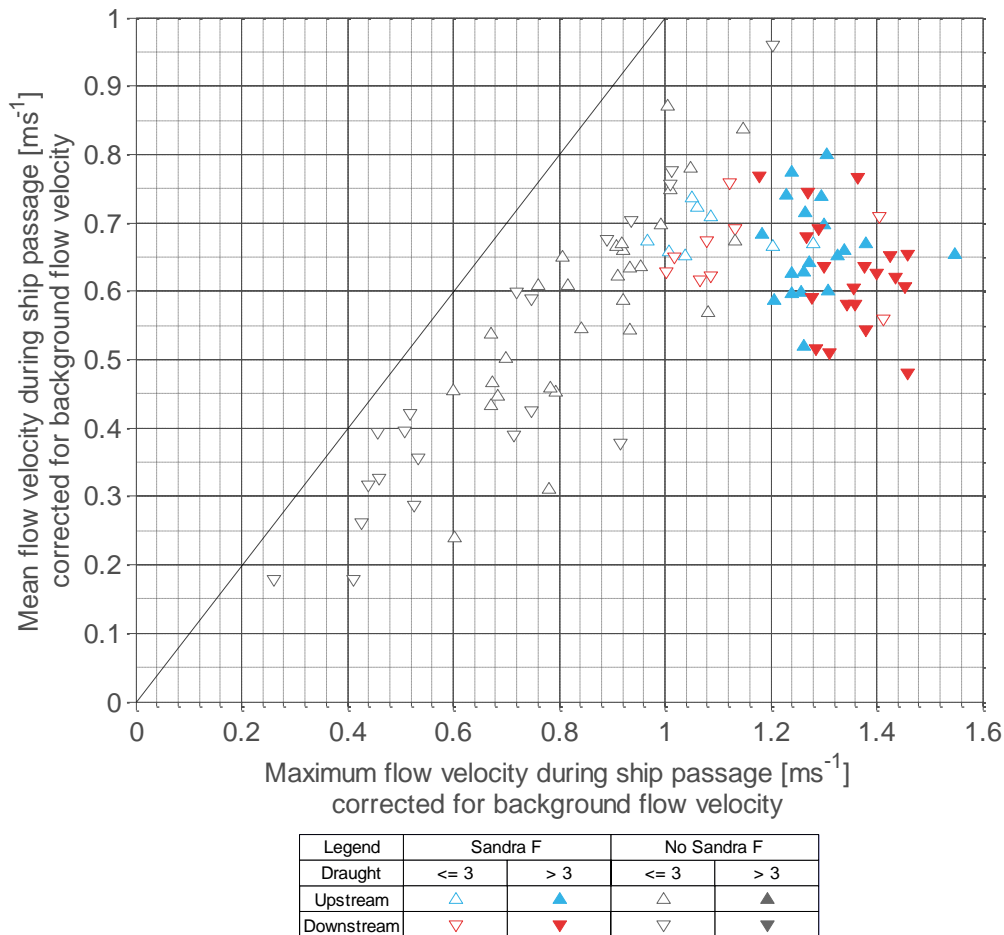
Hogere retourstroom bij Sandra F

In Figuur 4.5 is eveneens te zien dat de stroming opgewekt door de duwcombinatie bij een aflaaddiepte van 3 meter in de bovenste regionen ligt ten opzichte van de andere schepen. Dit terwijl de snelheid van de Sandra F lager was dan veel van de andere schepen die soms een snelheid haalden oplopend tot 90% van de grenssnelheid. Dit heeft zeer waarschijnlijk te maken met de andere vorm van de boeg: motorschepen hebben een veel meer gestroomlijnde boeg waardoor meer water al bij de boeg opzij wordt geduwd terwijl bij de duwbakken meer water onder het schip door gaat en dit leidt tot hogere stroomsnelheden. Dit is conform recente modelmetingen in het laboratorium bij Deltares [12].

De metingen van de retourstroom van de Sandra F bij de aflaaddiepte van 3 meter geeft echter wel een maatstaaf voor de belasting door stroming onder de huidige omstandigheden. Dit geeft vertrouwen dat de proef met de aflaaddiepte van 3,5 meter ook een maatstaaf is voor de toekomstige scheepvaart.

Gemiddelde retourstroom versus piek retourstroom

De verhouding tussen maximale gemeten stroming en gemiddeld gemeten stroming dicht bij de bodem is voor de meeste schepen ongeveer 1:1,3, maar voor de duwbak combinatie 1:2,4; zie Figuur 4.6. Dit wordt veroorzaakt door de vorm van de boeg van de duwbak die veel minder gestroomlijnd is dan die van een gewoon motorschip.



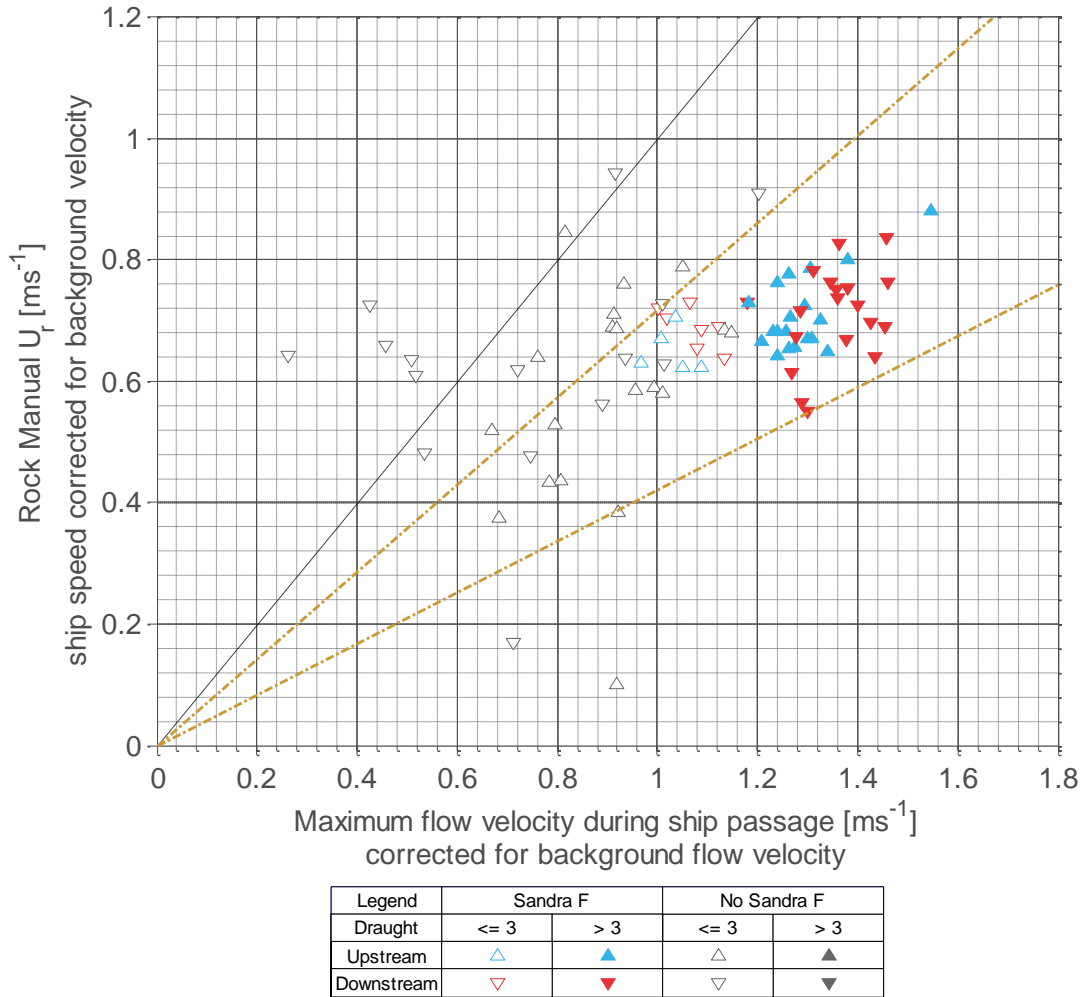
Figuur 4.6 Verhouding tussen de maximaal gemeten stroming en de gemiddelde gemeten stroming nabij de bodem over de scheepspassage.

4.1.1 Vergelijking van gemeten en theoretische retourstroom

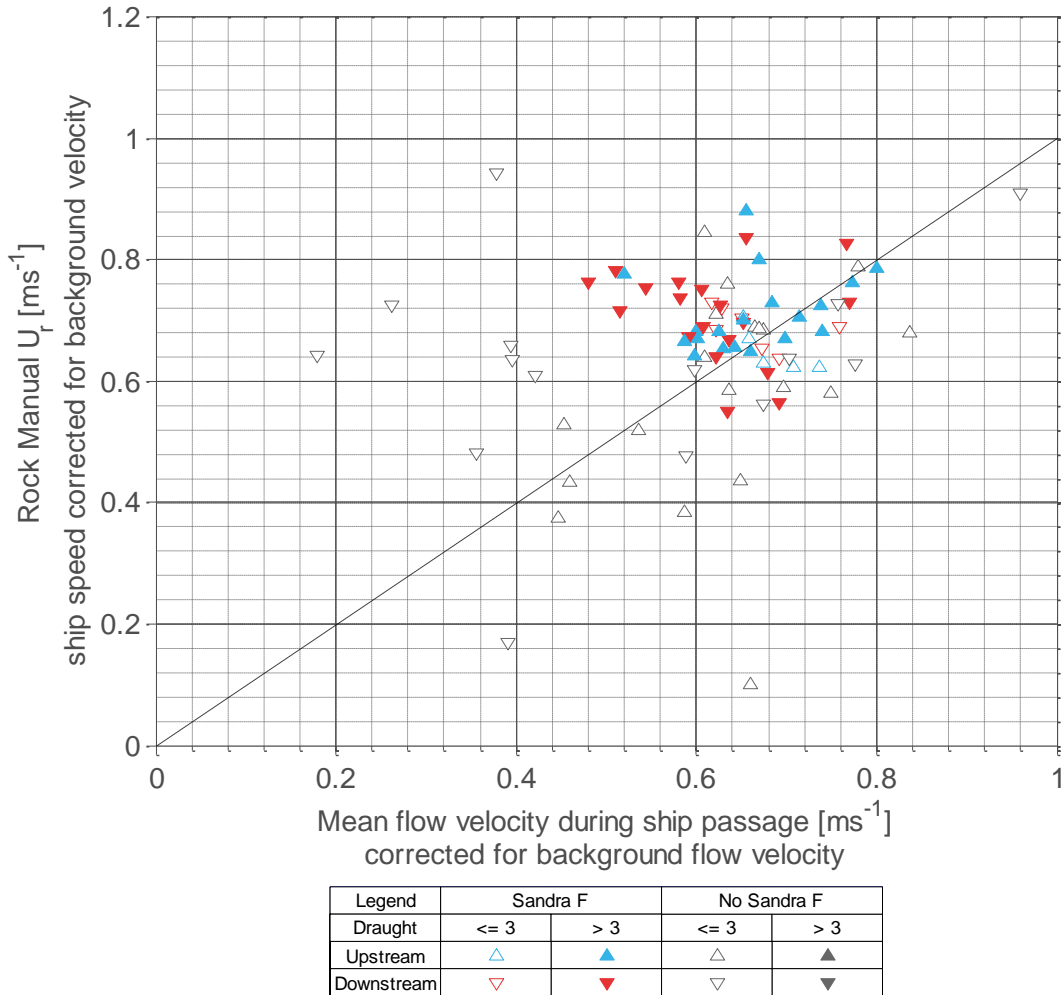
In Figuur 4.6 is een vergelijking gemaakt tussen de gemeten pieken van de retourstroom met de gemiddelde retourstroming berekend met de formules uit de Rock Manual. Alle pieken van de retourstroming van de reguliere schepen liggen tussen de 0,4 en 4 maal de gemiddelde berekende retourstroming. De gemiddelde waarde is daarbij ongeveer 1,3. Voor de duwcombinatie liggen alle pieken tussen 1,4 en 2,3 maal de berekende gemiddelde retourstroming. Het gemiddelde voor een aflaaddiepte van 3 meter ligt rond 1,6 en met een aflaaddiepte van 3,5 meter op 1,8. Beide waarden liggen binnen het eerder gevonden bereik van 1,4 tot 2 zoals genoemd in paragraaf 3.1.3. Voor duwbakken mag een hogere waarde worden verwacht dan voor andere schepen gegeven de boegvorm.

$$\text{Aflaaddiepte 3 m} \rightarrow U_{Rmax} = 1,6 \cdot U_R$$

$$\text{Aflaaddiepte 3,5 m} \rightarrow U_{Rmax} = 1,8 \cdot U_R$$



Figuur 4.10 De maximale retourstroom veroorzaakt door de duwcombinatie en de overige schepen afgeleid uit de metingen en vergeleken met de theoretische waarde. De lijnen zijn de verhoudingen 1 op 1, 1 op 1,4 en 1 op 2,3.

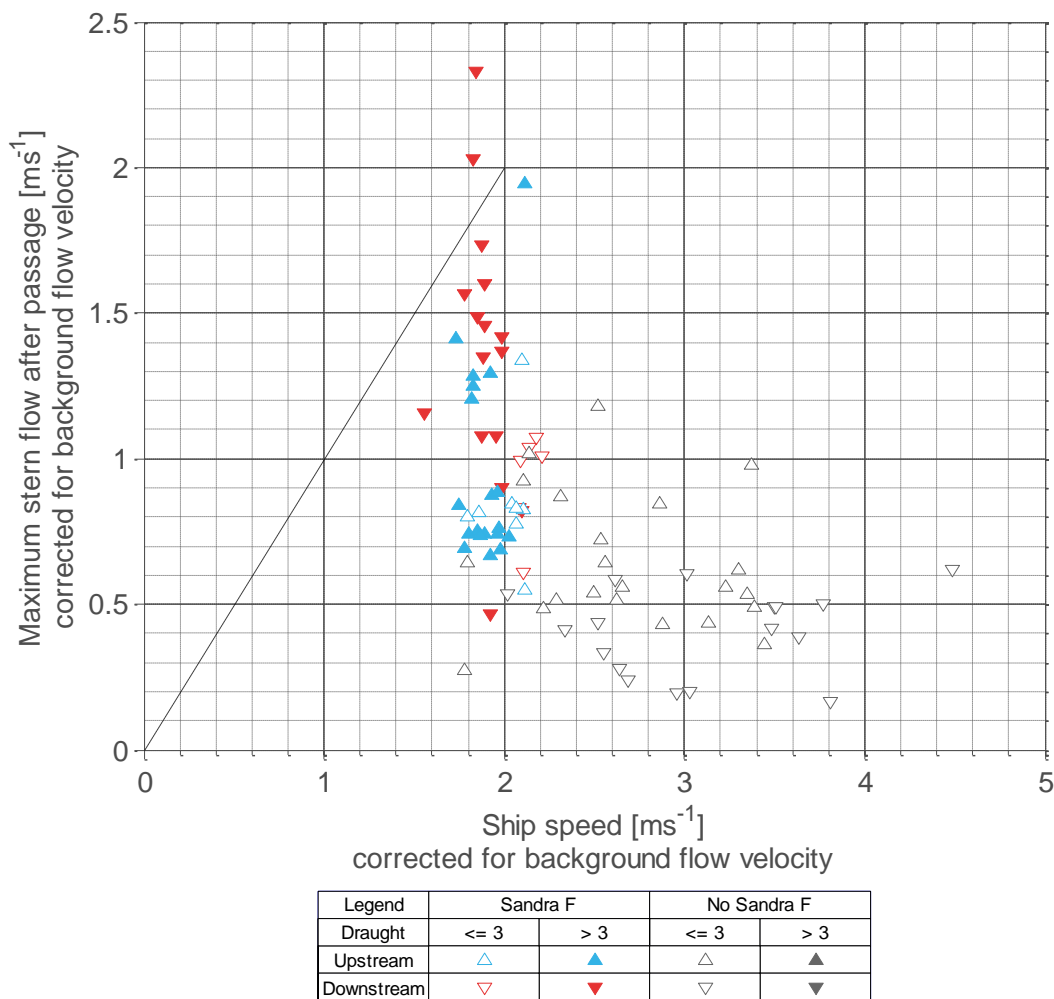


Figuur 4.7 De gemeten retourstroom gemiddeld over de passage uitgezet tegen de theoretische gemiddelde retourstroom over de hele kanaaldoorsnede.

De gemeten retourstroom nabij de bodem *gemiddeld* over de passage is iets lager (gemiddelde verhouding van 0,9) dan de theoretische gemiddelde retourstroom over de hele kanaaldoorsnede, zie Figuur 4.7. Dit is niet conform de verwachting dat de gemiddelde snelheid onder het schip groter is dan de theoretische gemiddelde retourstroom over de hele kanaaldoorsnede. Dit heeft te maken met de al eerder genoemde ontwikkeling van een grenslaag aan de bodem tijdens de passage waardoor de gemeten gemiddelde snelheid vlak boven de bodem wordt beïnvloed. Als wordt gecorrigeerd met de factor 1,5 die is vastgesteld voor het verschil tussen de snelheid op 26 cm hoogte en de laag daarboven, dan is er geen sprake van een verhouding van 0,9 maar van 1,35 en voldoen de resultaten aan de verwachting.

Volgstroom

Figuur 3.13 geeft de maximale volgstroom zoals die is gemeten voor de verschillende schepen als functie van de vaarsnelheid. Zoals is te zien varieert deze sterk van 0,2 tot bijna 2,5 m/s. Er is geen directe relatie te zien met de vaarsnelheid of een andere parameter. Nadere analyse is daarom nog niet uitgevoerd.

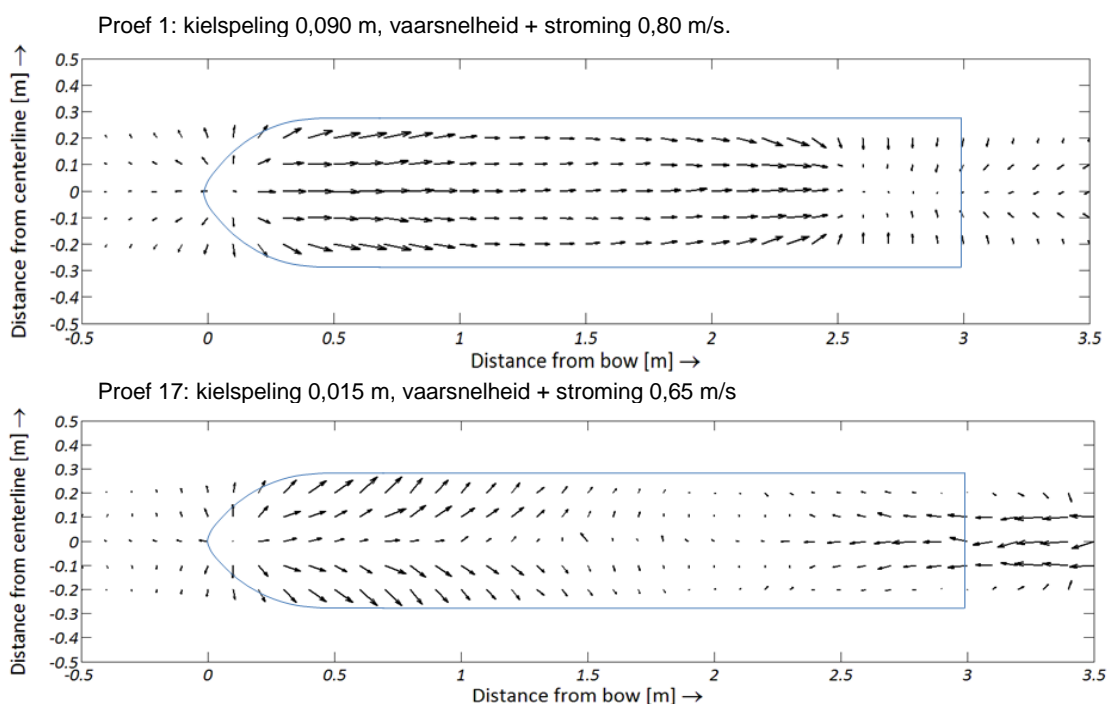


Figuur 4.8 De gemeten maximale volgstroom uitgezet tegen vaarsnelheid.

4.1.2 Vergelijken gemeten pieksnelheden met laboratorium metingen

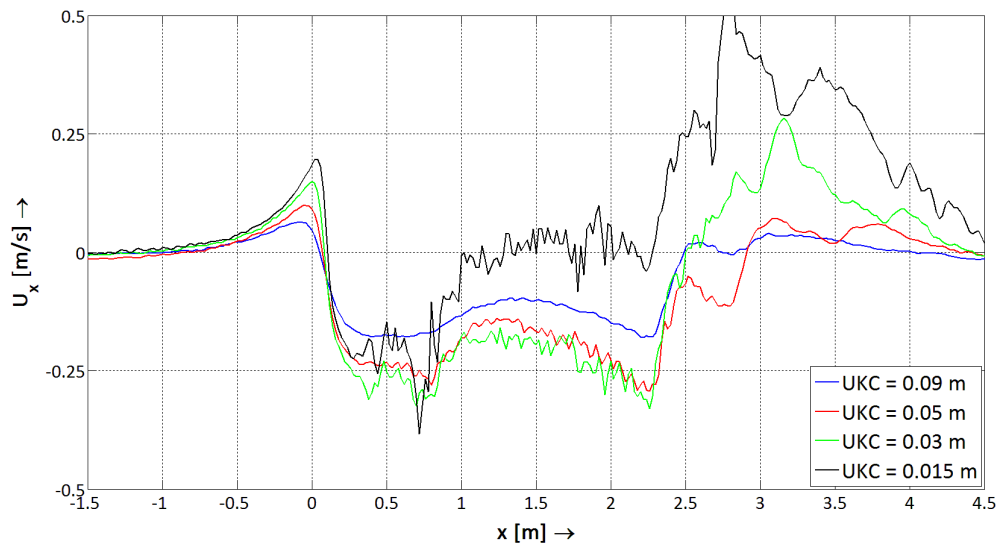
In 2014 is in het kader van het KPP project Duurzame Vaarweg opnieuw modelonderzoek gedaan naar de waterbeweging onder varende schepen (Robijns, 2014)[12]. Er zijn proeven uitgevoerd met een conventioneel binnenvaartschip en met een duwbakcombinatie met verschillende kielspelingen. De analyse van dit onderzoek is nog niet afgerond, maar de eerste resultaten stemmen overeen met resultaten van de proeven in het Julianakanaal. Enkele resultaten zullen hieronder worden vermeld. De lengteschaal van de proeven was 30.

De modelresultaten laten kwalitatief een verschillend stroombeeld zien onder een schip bij een verschillende kielspeling, zie Figuur 4.9, zoals ook in het Julianakanaal is geconstateerd. Duidelijk blijkt dat bij een geringe kielspeling van 0,015 m (model) de stroming naar de zijkanten van het schip wordt afgevoerd. Bij een kielspeling van 0,09 m is er tot bij het achterschip een stroming te onderkennen.

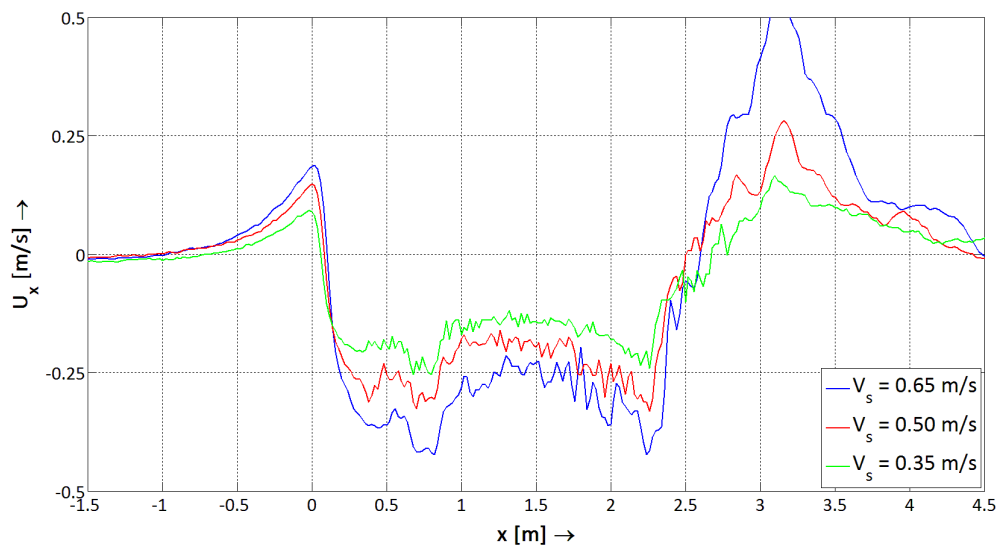


Figuur 4.9 Stroombeelden onder een schip bij verschillende kielspelingen (modelmaten).

In Figuur 4.10 en Figuur 4.11 wordt het verloop van de stroomsnelheden in langsrichting getoond als functie van de kielspeling en als functie van de vaarsnelheid. In Figuur 4.10 is de afname bij het hek van het schip bij afnemende kielspeling te zien. Figuur 4.11 laat zien dat het stroombeeld bij grotere kielspeling gelijk blijft bij verschillende vaarsnelheden maar dat de maximale stroomsnelheid onder het schip toeneemt bij toenemende vaarsnelheid.

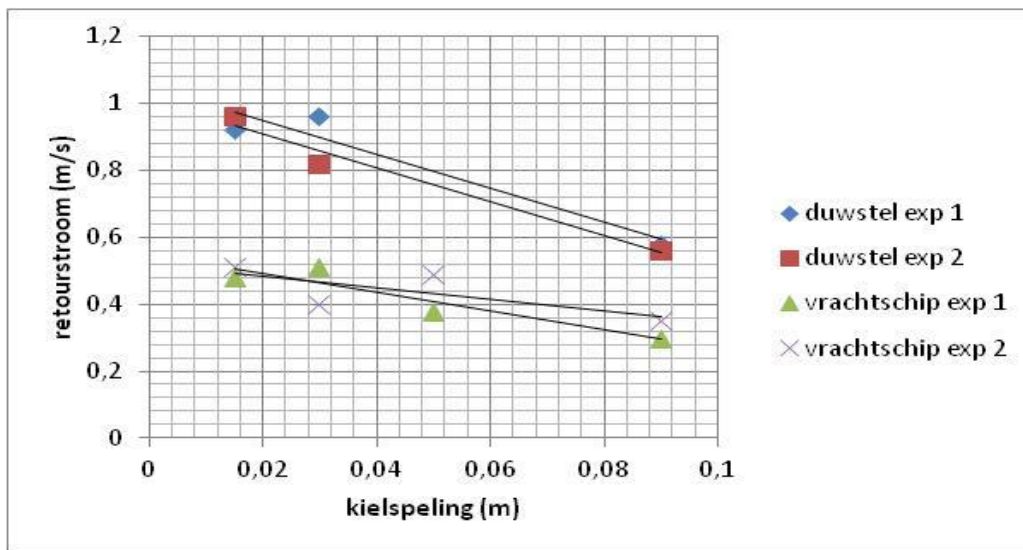


Figuur 4.10 Stroombeelden onder een schip bij verschillende kielspelingen (EMS2, $V_s = 0.50$ m/s, $U_0 = -0.05$ m/s en $h=0.30$ m).



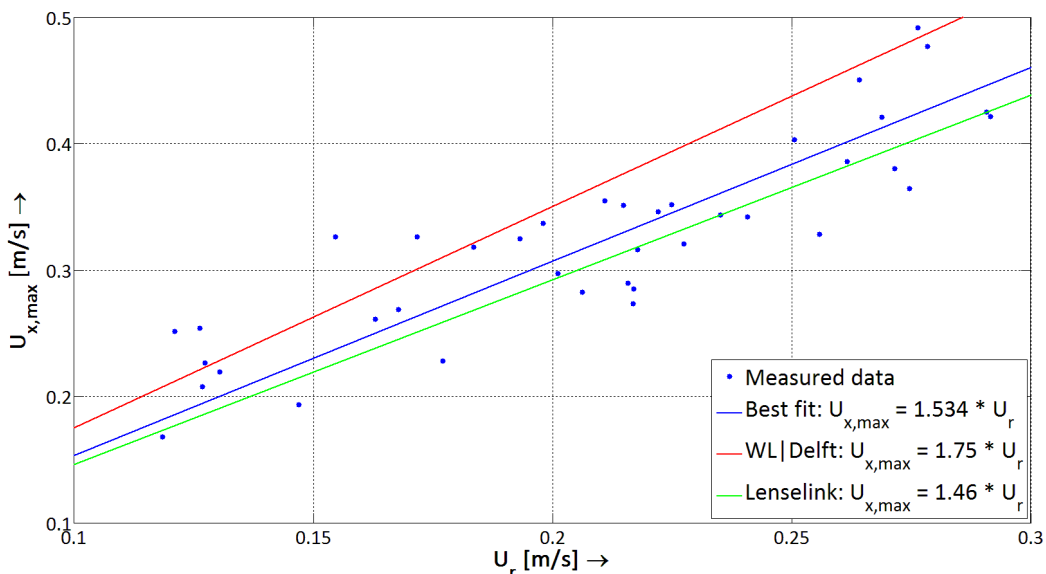
Figuur 4.11 Stroombeelden onder een schip bij verschillende vaarsnelheden (EMS2, $UKC = 0.03$ m, $U_0 = -0.05$ m/s en $h=0.30$ m).

De resultaten van de verschillende metingen kunnen met elkaar worden vergeleken. Figuur 4.12 geeft de maximale retourstroomsnelheden als functie van de kielspeling voor vrachtschepen en duwbakkonvoeien. Zoals verwacht genereren duwstollen aanzienlijk hogere stroomsnelheden dan conventionele motorschepen. Dit wordt veroorzaakt door de andere boegvorm die bij een motorvrachtschip veel gestroomlijnder is dan bij een duwbak.



Figuur 4.12 Maximale stroomsnelheden onder een schip als functie van de kielspeling.

De recente modelresultaten zijn gebruikt om bestaande formules voor het voorspellen van de stroomsnelheid onder een schip te toetsen. Figuur 4.13 laat het verband zien tussen gemeten maximale retourstroomsnelheid en de berekende gemiddelde retourstroomsnelheid over de kanaaldwarsdoorsnede voor een conventioneel vrachtschip. Uit de proeven kan een waarde worden afgeleid van $\alpha = 1.55$ in formule 3.7. Als deze waarde wordt vergeleken met de waarden voor het Julianakanaal (0,4 tot 4, met een gemiddelde van 1,3 voor reguliere vrachtschepen) dan kan worden geconstateerd dat dit binnen de marges goed overeenkomt.



Figuur 4.13 U_r versus $U_{x,max}$ voor conventionele schepen

Voor duwbakcombinaties is de analyse nog niet afgerond, maar uit Figuur 4.12 kan worden afgeleid dat de stroomsnelheden bij deze schepen bij kleine kielspelingen (kleiner dan 0,03 m) veel hoger zijn dan bij vrachtschepen. Nu is een kielspeling van 0,03 m in model gelijk aan 0,9 m in prototype en dat is ongeveer van vergelijkbare orde als de kielspeling in het Julianakanaal. Uit voorlopige analyses van de modelmetingen voor de duwbakcombinatie komen waarden voor α van orde 2,5 à 3. Dit moet worden vergeleken met de range voor de

Sandra zoals gepresenteerd in Figuur 3.10: $\alpha = 1,4$ à $2,3$. Ook hier lijkt dus overeenstemming te zijn, maar wel moet worden bedacht dat bij de modelmetingen waarschijnlijk te hoge waarden zijn gemeten, omdat de grenslagen langs schip en bodem elkaar raakten en daardoor een verstoring optreedt van het stroombeeld wat in werkelijkheid niet zal optreden.

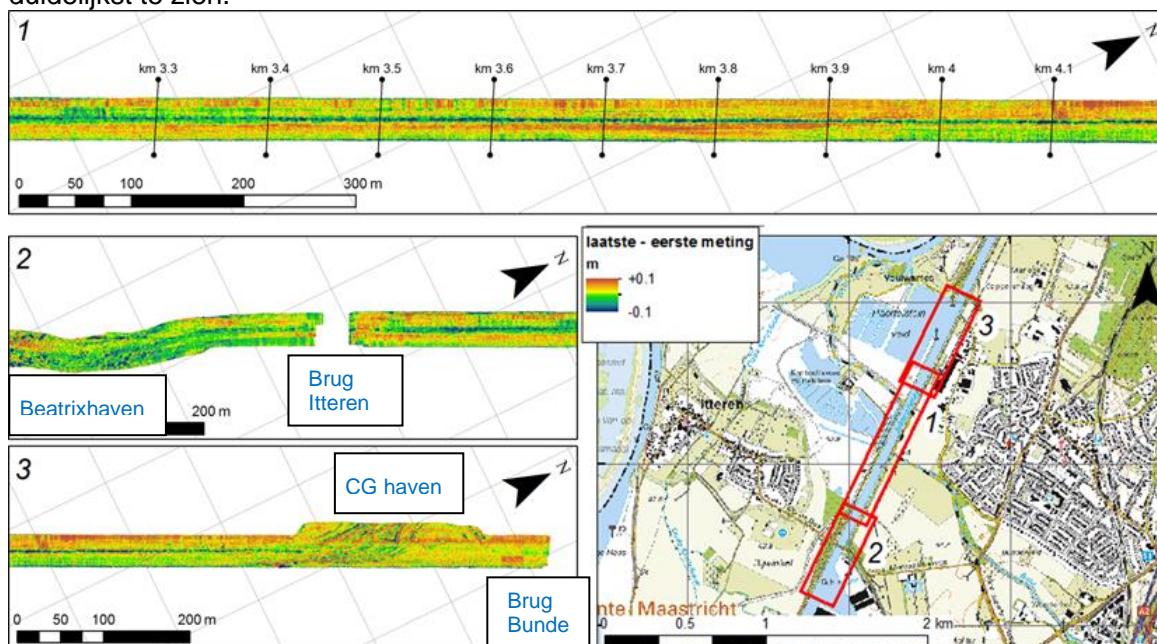
Zoals al vermeld is het modelonderzoek nog niet afgerond en nog onderwerp van verdere analyse om invloeden als de kielspeling en de natuurlijke stroomsnelheid te verdisconteren.

4.2 Analyse bodemligging en bodemstabiliteit

4.2.1 Algemeen beeld van de verandering in bodemligging tijdens de proeven

De verandering in bodemligging gedurende de proef is duidelijk te zien in het verschil tussen de eerste en laatste meting (Figuur 4.14). Hierin is te zien dat in het midden van het kanaal een smalle strook dieper is geworden en de stroken ernaast ondieper. Beide zijkanten laten ook een smalle strook met lichte erosie zien. Het midden van het kanaal is gemiddeld ruim 5 cm dieper geworden. De delen net naast het midden zijn tussen de 5 en 10 cm ondieper geworden. Verder naar de zijkanten van het kanaal wordt deze toename minder om bijna gelijk te blijven aan de oever en wordt aan één van de zijkanten licht negatief.

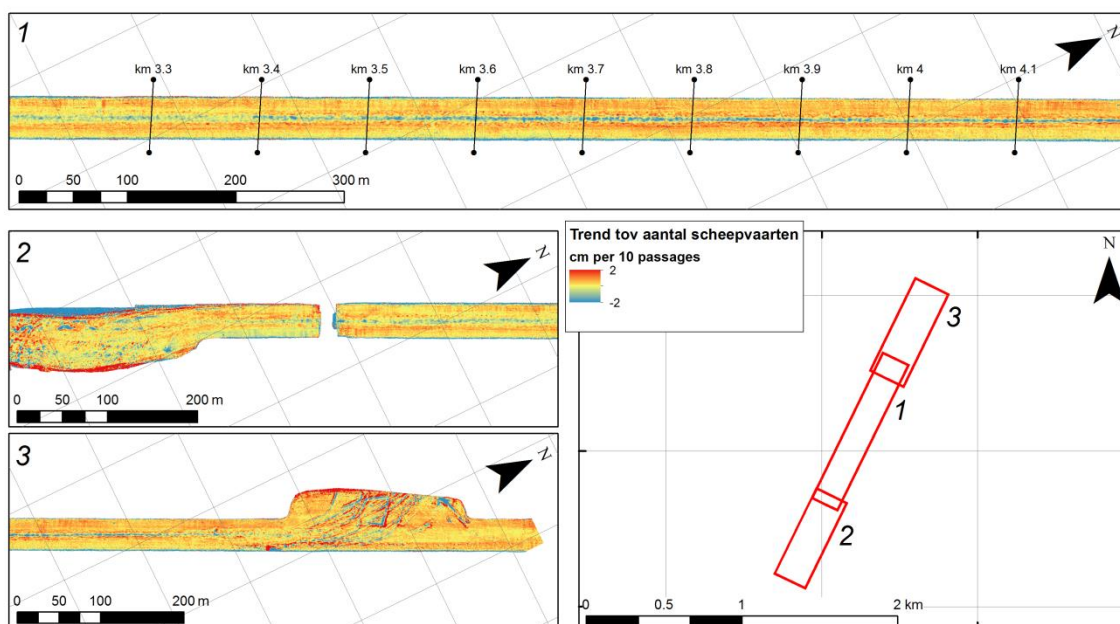
Het draaien van de duwbakcombinatie in de haven ging gepaard met veel geweld. De schroefstraal heeft de bodem van de beide havens omgewoeld. Op de plaats waar het schip uit de werkhaven het kanaal indraaide, zijn ook duidelijk sporen te zien die schuin het kanaal in lopen (kaart 3 in Figuur 4.14). In de CG haven zijn in de bodem (waar een laag sediment ligt vanwege de baggerwerkzaamheden) de sporen van het vertrekken van de duwbboot het duidelijkst te zien.



Figuur 4.14 Verskil in bodemhoogte (de eenheid kleurenschaal is meter) tussen eerste en laatste meting, dieper geworden gebieden zijn negatief, ondieper geworden gebieden zijn positief.

4.2.2 Erosiesnelheid bepaald uit de metingen

Het algemene beeld komt duidelijker naar voren door een lineaire trend te berekenen voor ieder meetvakje als functie van het aantal vaarten met de duwbakcombinatie. De berekende trend van de bodemligging over de meetperiode als functie van het aantal vaarten is weergegeven in Figuur 4.15. De trend in de figuur is weergegeven als de gemiddelde trend per 10 passages (alleen de passages waarbij een retourstroom oprad van meer dan 0,75 m/s). De trend in het midden van de vaargeul ter hoogte van het meetvak van 3,3 tot 4,2 km varieert van 0 cm tot maximaal 2 cm daling per 10 vaarten.



Figuur 4.15 Trend van de bodemligging over de meetperiode als functie van het aantal vaarten. De trend is weergegeven als de gemiddelde trend per 10 passages.

Voor een nauwkeurigere trendberekening en controle of de trend op verschillende delen van het kanaal hetzelfde is, is voor zes deelgebieden het volume van het sediment bepaald. Twee delen van het kanaal zijn in drie vakken ingedeeld: een middenvak en twee vakken direct daarnaast (Figuur 4.16). De grenzen zijn bepaald op basis van de kaart van de lineaire trend. Het volume van elk deelgebied is vervolgens berekend ten opzichte van het volume in de eerste lading. In Figuur 4.17 en Figuur 4.18 is de trend weergegeven per deelgebied ten opzichte van de bodemligging aan het begin van de proef; de eerste als functie van de tijd en de tweede als functie van het aantal geregistreerde passages met een retourstroom boven de 0,75 cm/s.

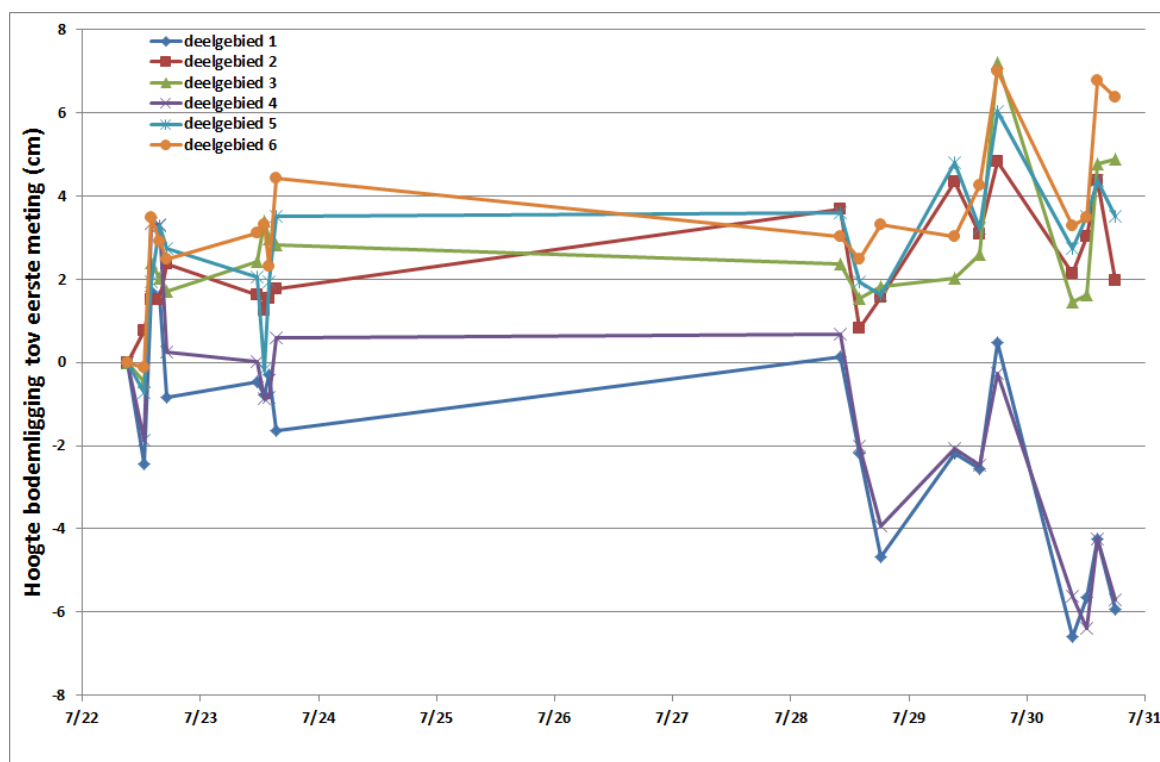
In Figuur 4.17 is te zien dat er bodemmetingen hebben plaatsgevonden op 22, 23, 28,29 en 30 juli. Tussen 24 en 28 juli hebben geen proeven en metingen plaatsgevonden.

In de eerste dagen is er sprake van kleine variaties in de orde van de meetruis (0,6 cm) en er lijkt geen echte trend te herkennen. Alleen kan geconstateerd worden dat de bodemligging in de deelgebieden 2, 3, 5 en 6 iets is opgelopen (2 cm). In de laatste 3 dagen is duidelijk afname in de twee middenvakken te zien (deelgebieden 1 en 4) die uitmondt in een erosie van ongeveer 6 ± 1 cm. Tevens is een verdere toename te zien in de deelgebieden 2, 3, 5 en 6.

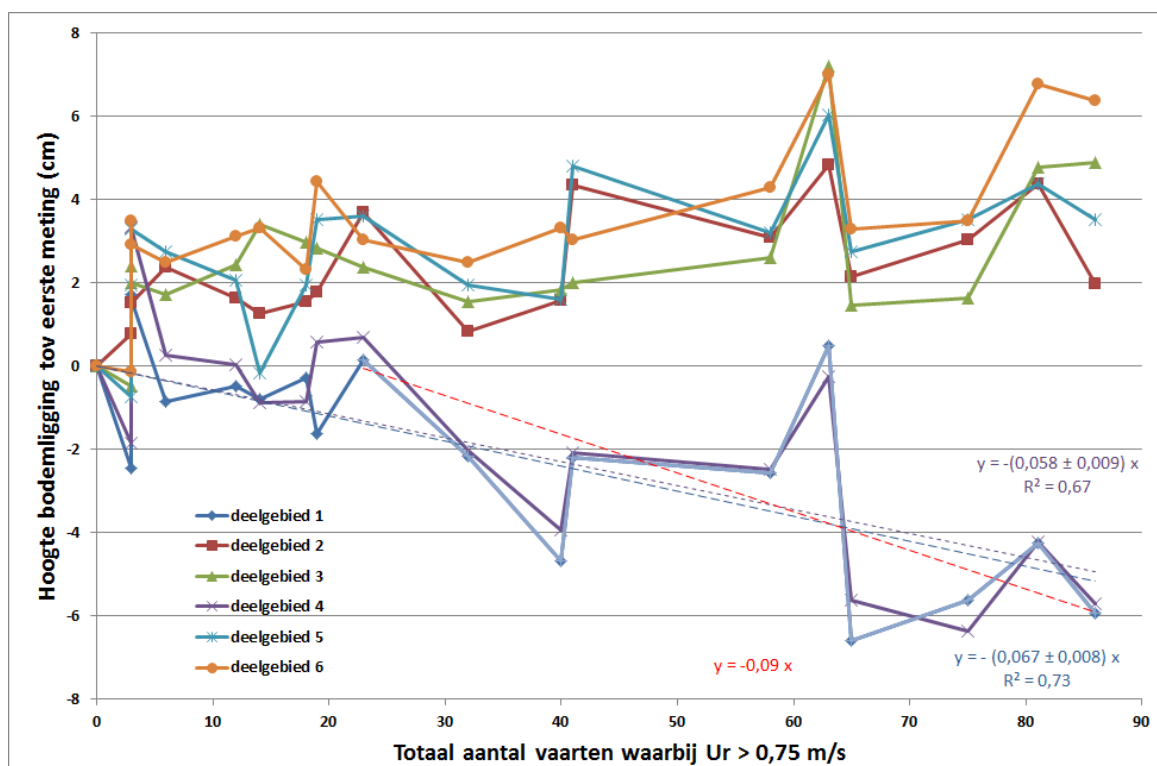
In Figuur 4.18 is de bodemligging weergegeven als functie van het aantal geregistreerde scheepspassages (waarbij een retourstroom optrad van meer dan 0,75 m/s). Daarin is de trend bepaald over de hele meetperiode en over de laatste 3 dagen. De erosie in de deelgebieden 1 en 4 is respectievelijk $0,06 \pm 0,01$ cm en $0,07 \pm 0,01$ cm per passerende vaart. De onzekerheid in de trend is 15%. Een deel van deze onzekerheid (4%) is te wijten aan de onzekerheid in de loding. De neergaande trend toont nog geen afname van de erosiesnelheid. Als we de trend alleen voor de laatste 3 dagen beschouwen is deze $0,09 \pm 0,017$ cm per passerende vaart.

In de eerste meetdagen heeft meer scheepvaart plaatsgevonden dan in de laatste meetdagen. Het is mogelijk dat deze scheepvaart, die meer aan de zijanten van het kanaal vaart, enige transport heeft veroorzaakt dat het effect van de duwbak iets heeft genivelleerd.

Van de vier vakken waarin sedimentatie optreedt (deelgebieden 2, 3, 5 en 6), is het toegenomen volume groter dan de afname in de middenvakken. Dit verschil wordt waarschijnlijk veroorzaakt door aanvoer vanaf de zijanten van het kanaal deze vakken in, en doordat het materiaal minder dicht gepakt is bij sedimentatie.



Figuur 4.17 Ontwikkeling van erosie en sedimentatie per deelgebied als functie van de tijd, zie Figuur 4.16 voor de ligging van de deelgebieden.



Figuur 4.18 Ontwikkeling erosie of aangroei in cm per deelgebied. Zie Figuur 4.16 voor de ligging van de deelgebieden. De stippellijnen geven de trendlijnen voor de deelgebieden waar erosie optrad en de rode stippellijn is de trend over de laatste dagen.

4.3 Toetsing erosie aan theorie

In paragraaf 3.3 werd een indicatie gegeven voor de erosie die verwacht kan worden berekend met de formule van Hoffmans en Verheij [9]. Deze formule is ook toegepast op de 85 scheepspassages die gelogd zijn (waarvan 60 van de Sandra F) in de meetperiode die voldoende stroming genereerden om een effect op de bodem te hebben.

De berekening van de cumulatieve erosie is weergegeven in Figuur 4.19 samen met de werkelijk gemeten erosie in het midden van het kanaal. Voor 85 passages volgt dat de theoretisch verwachte erosie ongeveer 11 cm bedraagt en dit is 50% hoger dan de gemeten 6 cm erosie over de meetperiode. Het grootste deel van deze discrepantie komt doordat de theoretische berekening niet helemaal correct is doorgevoerd in de analyse. De hoge retourstroom brengt het grind weliswaar in beweging, maar als die beweging in de lengterichting van het kanaal is levert dat geen netto erosie op, er wordt alleen grind heen en weer verplaatst door opeenvolgende passages. Alleen de zijwaartse beweging levert uiteindelijk de vorming van een geul op. Dat betekent dat voor de theoretische berekening van de erosie ook de stroomrichting en de daaruit volgende transportrichting en transport lengtes in overweging zouden moeten worden genomen. Dit voerde te ver voor de huidige analyse. Vooralsnog overschat de berekening wat er in werkelijkheid gebeurt en is daarom uit gegaan van een correctie van 50%.

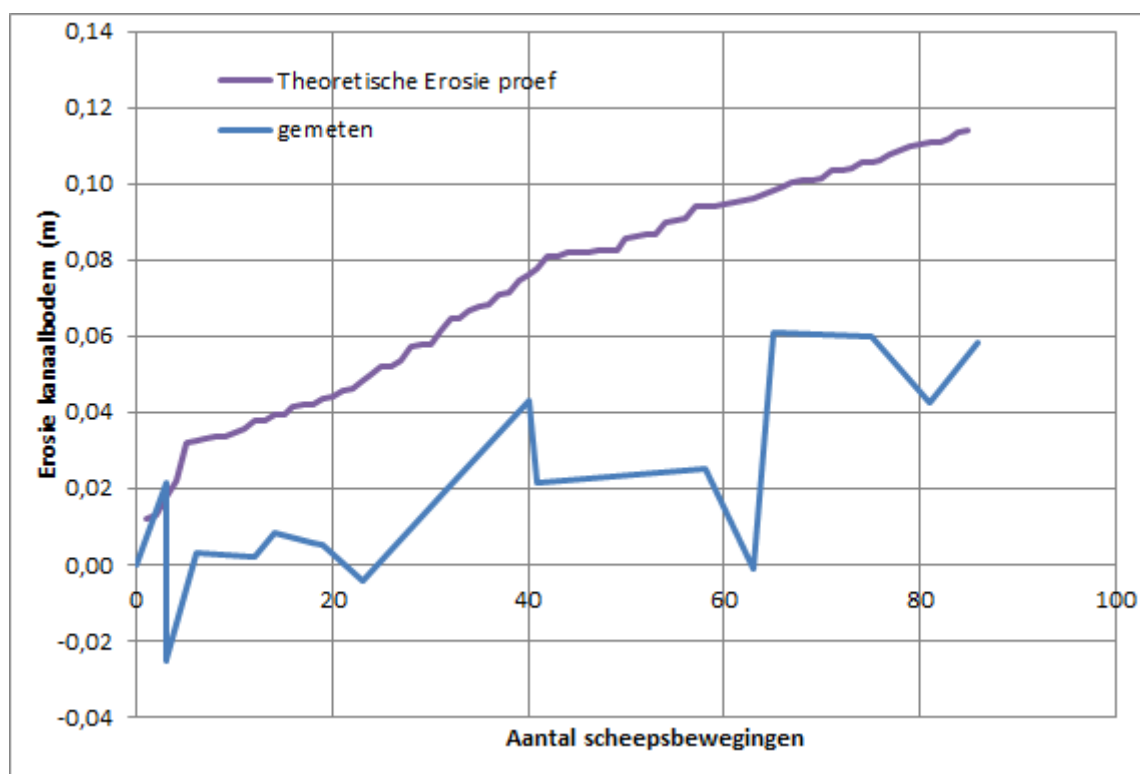
Of deze factor ook toepasbaar is voor klei is onzeker. In tegenstelling tot grind verandert bij klei het materiaal van een samengepakte massa in kleinere deeltjes. Deze deeltjes blijven daardoor makkelijker in suspensie dan grind en de transportafstanden zullen dan ook groter

zijn. Daarnaast kan het zijn dat het klei materiaal lang genoeg in suspensie blijft om verder verspreid te worden door de schroefstraal.

Deze analyse heeft nog twee bijkomende onzekerheden:

- 1 Niet alle scheepspassages tijdens de hele periode van het experiment zijn gelogd en gemeten. Er zijn meer schepen gepasseerd en de berekende erosie zou daarmee hoger uitvallen.
- 2 Anderzijds wordt er in deze berekening vanuit gegaan dat de erosie toeneemt met het aantal passages (aannahme dat alle schepen dezelfde track varen). In werkelijkheid heeft de Sandra F in het midden gevaren en zullen andere schepen meer hun kant hebben gehouden. Dit kan de erosie veroorzaakt door de Sandra F enigszins teniet doen.

Met deze kanttekeningen blijkt de orde van grootte echter overeen te komen.



Figuur 4.19 Theoretische en gemeten erosiediepte kanaalbodem als functie van het aantal scheepsbewegingen (De theoretische waarde is berekend op basis van de gemeten piekretourstroom en kritische stroomsnelheid van 0,75 m/s).

4.4 Prognose toekomstige bodemontwikkeling

Op basis van de formules uit paragraaf 3.3 en de vergelijking tussen gemeten en berekende bodemerosie kunnen ook prognoses worden gemaakt. Een prognose voor de situatie dat het kanaal nog niet is opgeleverd, dus schepen met maximale diepgang van 3,0 m, en een prognose voor de situatie na oplevering met schepen met een diepgang van 3,5 m.

Uitgangspunt hiervoor is het aantal schepen dat wordt verwacht. Cijfers hierover zijn beschikbaar gesteld voor zowel de huidige situatie als voor toekomstige economische

ontwikkelingen volgens het GE en RC scenario. Er zal onderscheid worden gemaakt in klasse IV schepen (diepgang maximaal 3,0 m) en klasse Va (diepgang tot 3,5 m). In onderstaande tabel staan de verwachte aantallen schepen voor de sluisen Limmel en Born. Opgemerkt wordt dat het aantal schepen voor kleinere scheepsklassen vrijwel gelijk blijft of afneemt.

scheepsklasse	Huidige situatie	2020 RC	2020 GE
Klasse IV	3000 - 4500	2700 - 4300	3300 - 5300
Klasse Va	1000 - 2000 *)	1600 - 2300	2700 - 4100
totaal	4000 - 6500	4300 - 6600	6000 - 9400

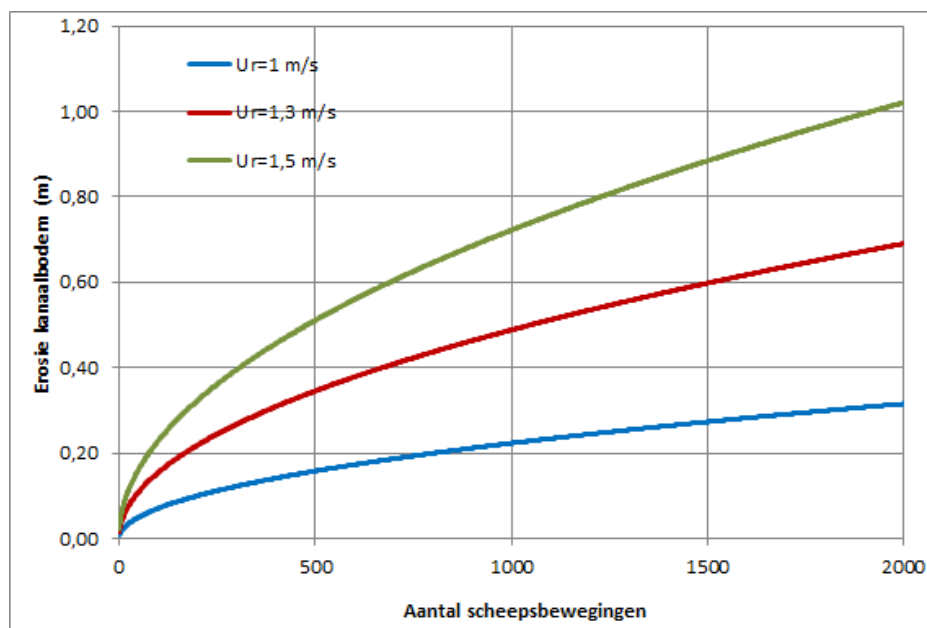
*) Klasse Va schepen maken nu ook gebruik van het Julianakanaal, maar varen dan met een diepgang van 3,0 m.

Uit de cijfers blijkt dat bij RC in 2020 het totaal aantal schepen vrijwel gelijk blijft : orde 4000 à 6500 per jaar (ongeveer 10 per dag), maar dat voor scenario GE er een toename is van het aantal schepen tot 6000 à 9000 (toename 50%). Dit houdt vooral verband met de toename van het aantal klasse Va schepen, wat logisch is omdat het Julianakanaal voor deze klasse wordt aangepast. Verder moet worden aangetekend dat bij het RC scenario het vrachtvolume gelijk blijft, maar dat de doorgaande trend naar grotere schepen mogelijk leidt tot minder schepen (bron Theo de Meijer). Daarnaast moet worden opgemerkt dat de scheepvaartintensiteit niet gelijk is op de diverse trajecten. Er is veel bestemmingsverkeer vanuit het noorden naar de havens van Born en Stein. Vanuit zuidelijke richting is er nauwelijks vracht voor Born, maar wel voor Stein (bron Theo de Meijer).

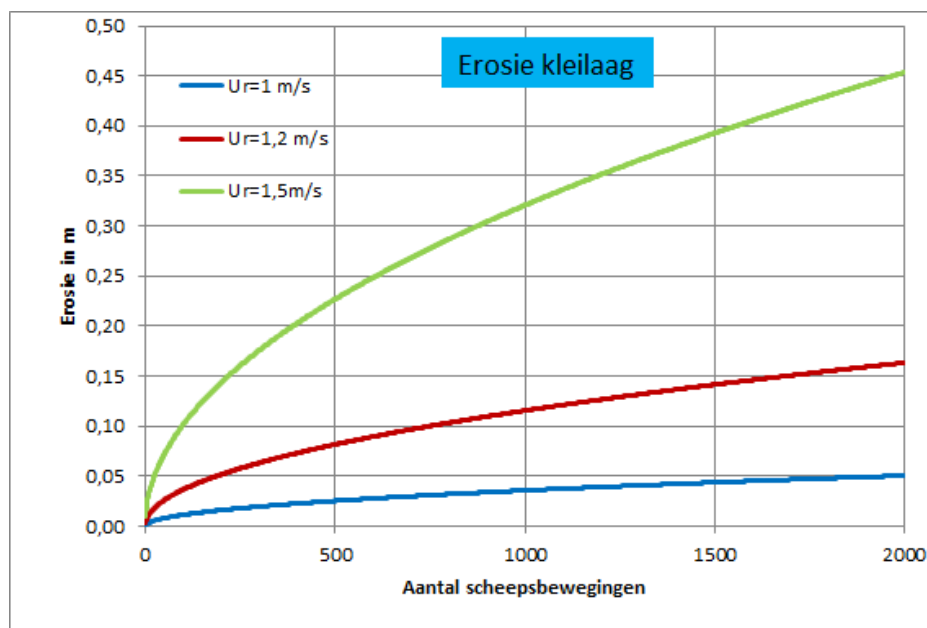
Prognose huidige situatie

Op grond van het bovenstaande is een schatting gemaakt van de erosie in de huidige situatie, dus alleen schepen met een diepgang van 3,0 m. Hierbij is uitgegaan van 1000 schepen die een retourstroomsnelheid onder het schip opwekken van ongeveer 1,0 m/s, en over dezelfde lijn varen. Uit de berekeningen blijkt dat een erosie van de grindlaag van orde 0,20 m per jaar zal optreden (zie Figuur 4.20, let op, de schaal loopt door tot 2000 scheepsbewegingen). Op basis van de eerdere vergelijking van theorie met meetresultaten kan dit 50% lager liggen. Maar een belangrijke conclusie is dat dus ook bij de huidige scheepvaart erosie van de grindlaag zal optreden, wat al was geconstateerd.

Voor de locaties waar de kleilaag bloot ligt of bloot komt te liggen is ook berekend of deze zal eroderen. Dit op basis van de door de experts genoemde kritische snelheid van 1,5 m/s. In Figuur 4.21 is de erosie weergegeven als functie van de scheepsbewegingen bij verschillende stromingsbelasting. Bij een retourstroom van 1,0 m/s kan deze bij 1000 schepen per jaar enkele centimeters per jaar eroderen. Bij een kleine grindlaag op de klei kan dit door een schurend effect van het grind zelfs worden versneld. Op dit moment is niet bekend, van locaties waar het klei bloot ligt, of deze erosie ook werkelijk al is opgetreden.



Figuur 4.20 Erosiediepte van de grindlaag als functie van het aantal scheepsbewegingen bij een retourstroom van 1,0/ 1,2 /1,5 m/s en een kritische stroomsnelheid van 0,75 m/s.



Figuur 4.21 Erosiediepte van de kleilaag als functie van het aantal scheepsbewegingen bij een retourstroom van 1,0/ 1,2 /1,5 m/s en een kritische stroomsnelheid van 1,5 m/s.

Prognose dieper geladen scheepvaart

Een zelfde analyse kan worden gedaan voor de toekomstige situatie met schepen met een grotere diepgang. Het is echter niet waarschijnlijk dat het groeiende scenario en daarmee de toename van hoeveelheid bulkvracht zal gaan plaatsvinden. Tevens houdt een grotere diepgang in dat meer vracht per schip vervoerd kan worden waardoor het aantal schepen bij gelijkblijvende hoeveelheden bulk zal afnemen. Als voorbeeld wordt hier uitgegaan van 1500 schepen (lichte groei). Uitgangspunt daarbij is dat de belasting uit de proef (U_r gem 1,2 -1,5 m/s) maatgevend is voor wat we in de toekomst kunnen verwachten. De conclusie die uit

Figuur 4.20 getrokken kan worden is dat de bodemerosie dan zal oplopen tot 0,6- 0,9 m per jaar. Wordt dit weer gecorrigeerd voor de mogelijke overschatting van 50% dan komen we op een erosie variërend van 0,3 tot 0,45 m per jaar. Als vervolgens de kleilaag bloot komt te liggen zal ook deze gaan eroderen en wel met 0,15 tot 0,4 m per jaar (Figuur 4.21). Als ook deze waarde gecorrigeerd mag worden met 50% dan komen we op een erosie van 0,07 tot 0,2 m per jaar.

Daarbij zullen verschillen optreden per sectie van het Julianakanaal. Daar waar de waterweg smal is, zoals in het proefvak, zullen diepgeladen schepen het midden gaan zoeken en minder diepgeladen schepen meer hun kant houden. Daar zal zich dus minder snel een spoor vormen, doordat die bewegingen elkaar enigszins opheffen. In het meest gunstige geval zullen deze bewegingen elkaar zelfs geheel opheffen en zal geen erosie plaatsvinden.

In bredere delen zullen zowel diepgeladen als minder diepgeladen schepen hetzelfde pad volgen. Daar zullen de effecten bij elkaar opgeteld kunnen worden en zal de gegeven prognose van de erosie van de grindlaag gehaald worden. Dat houdt in dat binnen twee jaar geulen tot op de kleilaag ontstaan, waarna erosie van de kleilaag met minimaal 7 cm per jaar zal plaatsvinden.

Onzekerheden in de prognose

Voor de prognose zijn in de voorgaande paragrafen een aantal onzekerheden benoemd die hier nog eens op een rijtje gezet zijn:

- De prognose hangt sterk af van de aantallen verwachte scheepvaart.
- De prognose hangt sterk af van de verwachte retourstroom, die weer afhangt van de verwachte scheepssnelheden.
- De prognose van de erosie van zowel de klei als grindlaag hangt af van de samenstelling van het materiaal. Daar is van bekend dat deze sterk verschilt over het kanaal en soms zijn de gegevens uit verschillende bronnen niet met elkaar in overeenstemming.
- Niet alle delen van het kanaal krijgen dezelfde hoeveelheid scheepvaart te verwerken.
- Effecten van schepen die kant houden en in het midden varen zijn tegengesteld en zijn niet exact bekend.
- De eenvoudige berekening die nu is gehanteerd voor de erosie van het grind houdt op dit moment geen rekening met veranderende richting van de retourstroming en geeft daardoor een overschatting van een factor 2 in vergelijking tot wat gemeten is in proef. Deze factor 2 is gehanteerd voor de prognose van de erosie van het grind en het klei, maar het is mogelijk dat deze factor aangepast zou moeten worden voor klei.

De bandbreedte op de prognose is door deze onzekerheden vrij ruim. Daardoor is het nemen van beheersmaatregelen (die worden benoemd in de volgende paragraaf) ook lastig.

Zonder verder theoretisch onderzoek is die bandbreedte wel te verkleinen. Dit kan door het registreren van de vaarsnelheden van de huidige scheepvaart (waaruit ook conclusies zijn te halen over de toekomst), het opstellen van een realistisch scenario over het aantal verwachte schepen (gebaseerd op de verwachtingen van de hoeveelheid bulktransport en bestemming) en het bepalen van de werkelijke samenstelling van de bodem.

Daarnaast zou door een herberekening van de verwachte erosie op basis van transportrichting en transportlengtes een nauwkeurigere vergelijking gemaakt kunnen worden met de resultaten van de proef.

Wat in ieder geval zeker is, is dat er relatief snel verdieping is opgetreden als gevolg van de proef en dat zonder beheersmaatregel de diepgeladen scheepvaart in de toekomst retoursnelheden zal veroorzaken die in dezelfde orde liggen als in deze proef zijn opgewekt.

4.5 Doorkijk naar beheersmaatregelen

Omdat de stroomsnelheden in de uitgevoerde proef realistisch worden geacht voor wat in de toekomst kan optreden, zal er erosie gaan optreden als er geen maatregelen genomen worden. Het tempo van de erosie is niet exact bekend, maar is grofweg geschat op basis van de in de vorige twee paragrafen gehanteerde methode. Deze schattingen kunnen nauwkeuriger worden door betere informatie over de verwachte scheepvaart en de verwachte vaarsnelheid van de scheepvaart.

Het uitdenken van benodigde beheersmaatregelen is geen onderdeel van deze studie, maar wordt wel aanbevolen als vervolg, maar men moet daarbij denken aan de volgende overwegingen:

Mocht men voorlopig nog niet willen ingrijpen dan is een voor de hand liggende beheersmaatregel het opleggen van een snelheidsbeperking daar waar de verwachte invloed van de schepen het grootst is. Die zal vrij strikt moeten zijn en ook goed gehandhaafd moeten worden, want die snelheid zal zeker onder de 7 km/uur moeten liggen voor diep-afgeladen vaart.

Een minder rigoureuze aanpak is om geen snelheidsbeperking op te leggen en de ligging van de bodem continue te monitoren. Dit is echter een vrij risicovolle aanpak, want als er erosie optreedt kan het snel plaatsvinden en is interventie snel noodzakelijk.

Een veilige optie is om nu al een interventie te plegen en de kanaal bodem zodanig aan te passen dat deze bestand is tegen de verhoogde belasting die in de toekomst gaat optreden. Daarbij kan onder andere gedacht worden aan het afgraven van de grindlaag en het aanbrengen van bentoniet matten, het aanbrengen van geotextiel en breuksteen of het impregneren van de bodem.

Voor het nader beschouwen van het effect van beheersmaatregelen en/of benodigde ingrepen zou een nadere studie gedaan kunnen worden bestaande uit de volgende onderdelen:

- Het bepalen van intensiteit, vaarsnelheid, trajecten en positie in de vaarweg van het huidige scheepvaart verkeer.
- Het bepalen van de effectiviteit van het reduceren van de vaarsnelheid voor de stabiliteit van de kanaalbodem.
- Bepalen van de gevolgen voor de bodemstabiliteit van het, incidenteel dan wel veelvuldig, overschrijden van een maximum vaarsnelheid,
- Een inventarisatie van mogelijke interventies als de bodemstabiliteit in gevaar komt.
- Inventariseren van mogelijke constructieve maatregelen om de bodemstabiliteit te kunnen garanderen. Deze maatregelen kunnen tot op een conceptueel niveau worden uitgewerkt. De kosten van verschillende constructieve maatregelen kunnen kwalitatief worden bepaald indien voldoende gegevens beschikbaar zijn.

Als de intensiteit, vaarsnelheid, trajecten en positie in de vaarweg van het huidige scheepvaart verkeer beschikbaar komen (te verkrijgen uit AIS gegevens) dan is in principe op

basis van rekenregels, en de in dit experiment gevonden resultaten, de belasting door scheepvaart op ieder willekeurig punt van de Juliana kanaal te schatten (zie bijvoorbeeld [13]). De aanvullende informatie die daar dan nog bij nodig is zijn de afmetingen van het kanaal, de bathymetrie voor ieder punt van het kanaal en de gemeten afvoer door het kanaal (meetpunt Bunde).

Vanwege de haast die men heeft met het verkrijgen van de antwoorden op deze vragen zal dit ook deels op basis van expertbijeenkomsten kunnen plaatsvinden.

5 Conclusies en aanbevelingen

Doel van de proeven was antwoord te krijgen op de volgende twee vragen:

1. *Is de resterende (na baggeren tot gewenst profiel) bodem bestaande uit een klei-grindmengsel bestand tegen de toekomstige scheepvaart?*
2. *Hoe snel gaat een eventuele erosie in relatie tot toekomstige scheepspassages?*

Daartoe zijn in de periode 21 juli tot en met 31 juli 2014 ongeveer 60 meetvaarten in het Julianakanaal uitgevoerd met een enkelbaks duwstel afgeladen tot 3,0 of 3,5 m diepgang bij een snelheid van maximaal 8 km per uur op de locatie km 3,3 tot km 4,1. Op basis van een analyse van de waarnemingen en vergelijking met relevante literatuur worden de volgende conclusies getrokken:

- De bodem blijkt niet stabiel, want na circa 60 vaarten is de bodem in het midden van het Julianakanaal verdiept met circa 6 cm waarbij materiaal vanuit het midden van het kanaal verplaatst is naar opzij.
- De snelheid van eroderen bedraagt ongeveer 1 cm per 10 vaarten; hiermee lijkt de bodem relatief snel te eroderen.
- De resultaten lijken ook een doorgaande trend in de bodemerosie weer te geven, want een afname naar een evenwichtssituatie is niet waarneembaar. Dit is zorgelijk omdat de grindlaag ter plekke slechts circa 30 cm dik is en de daar onderliggende kleilaag circa 60 cm dik is.

De oorzaak is gelegen in de ongunstige combinatie van belasting en sterkte: een gemiddelde maximale stroomsnelheid onder de duwbak van ongeveer 1,3 m/s en dat is hoger dan de kritische stroomsnelheid voor het grind/klei mengsel van ongeveer 0,75 m/s. Daarbij moet worden bedacht dat de duwbakcombinatie gemiddeld voer met een snelheid (1,9 m/s) gelijk aan slechts 65% van de snelheidslimiet (2,9 m/s), terwijl 75% in de toekomst zeker realistisch is. De stroomsnelheden die zijn opgetreden onder het schip lijken wel een realistische weergave van de snelheden die in de toekomst zouden kunnen optreden.

Prognose

Tot nog toe was het bodemprofiel redelijk in evenwicht. Scheepvaart bracht het bodemmateriaal licht in beweging en in suspensie wat zorgde voor sedimenttransport naar het noorden. Vanuit het zuiden is echter ook aanvoer geweest van slib naar het kanaal via de sluizen bij Limmel. De aanvoer was echter groter dan de afvoer.

De tijdens de proef geregistreeerde bodemverplaatsing is echter zodanig dat een grotere erosie en afvoer van materiaal (het systeem uit richting het noorden) kan worden verwacht en lokaal zelfs het bloot komen van de kleilaag. Bij de grotere diepgang, zoals die verwacht wordt voor de toekomst, is het systeem niet langer stabiel.

Hoe lang het zal duren voordat er werkelijk problemen zullen ontstaan is op basis van de onzekerheden in de trendanalyse niet nauwkeurig af te leiden. Een korte analyse uitgaande van een groeiende hoeveelheid transport, waarbij 1500 schepen per jaar een

retourstroomsnelheid tot 1,5 m/s zullen leveren leidt tot een geschatte bodemerrosie die kan oplopen tot 0,5 m per jaar. .

Daarbij zullen verschillen optreden per sectie van het Julianakanaal. Daar waar de waterweg smal is, zoals in het proefvak, zullen diepgeladen schepen het midden gaan zoeken en minder diepgeladen schepen meer hun kant houden. Daar zal zich dus minder snel een spoor vormen, doordat die bewegingen elkaar enigszins opheffen. In het meest gunstige geval zullen deze bewegingen elkaar zelfs geheel opheffen en zal geen erosie plaatsvinden.

In bredere delen zullen zowel diepgeladen als minder diepgeladen schepen hetzelfde pad volgen. Daar zullen de effecten bij elkaar opgeteld kunnen worden en zal de gegeven prognose van de erosie van de grindlaag gehaald worden. Maar aangezien de grindlaag varieert tussen 20-40 cm Dat houdt in dat binnen twee jaar geulen tot op de kleilaag ontstaan, waarna erosie van de kleilaag zal plaatsvinden.

Samengevat: er is nu geen probleem, maar in de toekomst wel vanwege grotere dieper geladen schepen met meer vermogen die daardoor een hogere belasting veroorzaken.

Aanbevelingen

Om binnen afzienbare tijd goed onderbouwde aanbevelingen te kunnen doen ten aanzien van de meest geschikte beheersmaatregelen is het gewenst in 2015 de bandbreedte op de prognose te verkleinen en een aantal zaken nader te onderzoeken.

Voor het nader beschouwen van beheersmaatregelen en/of benodigde ingrepen adviseert Deltares om een nadere studie uit te voeren bestaande uit de volgende onderdelen:

- Het bepalen van intensiteit, vaarsnelheid, trajecten en positie in de vaarweg van het huidige scheepvaart verkeer (te verkrijgen uit AIS data) en de resultaten hiervan extrapoleren naar de toekomstige situatie met grotere schepen.
- Nader analyseren van de AIS data; met behulp van de hier gepresenteerde theorie kan onderscheid gemaakt worden tussen de verschillende trajecten van het kanaal.
- Beter bepalen van de bodemsamenstelling en dikte van het bestaande kleipakket (er zijn mogelijk locaties waar de laag al minder dik is dan gewenst).
- Monitoren van de bodemligging.
- Het bepalen van de effectiviteit van het reduceren van de vaarsnelheid voor de stabiliteit van de kanaalbodem.
- Bepalen van de gevolgen voor de bodemstabiliteit van het incidenteel dan wel veelvuldig overschrijden van een maximum vaarsnelheid.
- Een inventarisatie van mogelijke interventies als de bodemstabiliteit in gevaar komt.
- Inventariseren van mogelijke constructieve maatregelen om de bodemstabiliteit te kunnen garanderen. Deze maatregelen kunnen tot op een conceptueel niveau worden uitgewerkt. De kosten van verschillende constructieve maatregelen kunnen kwalitatief worden bepaald indien voldoende gegevens beschikbaar zijn.

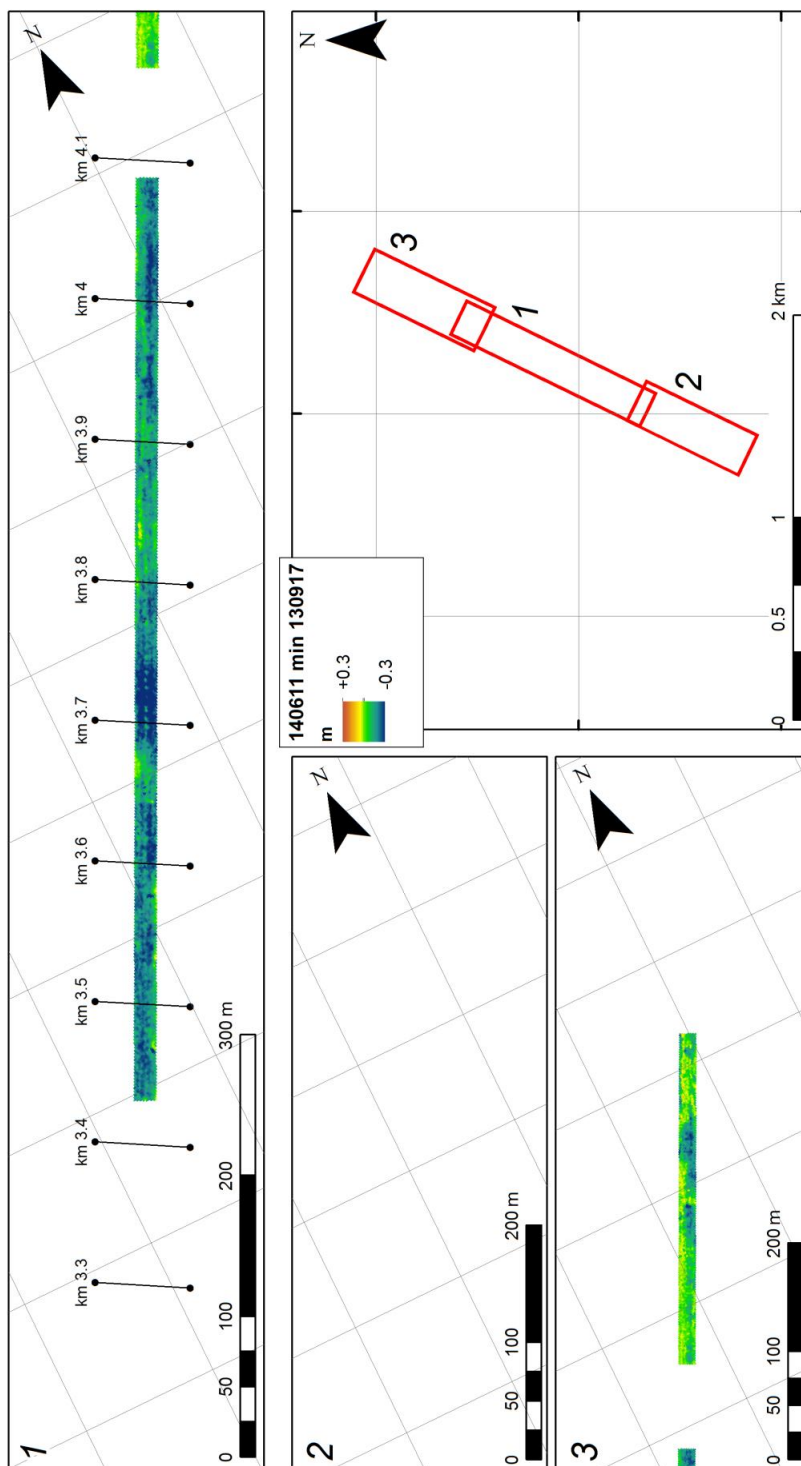
Deltares adviseert om de prioritering in het verkrijgen van de antwoorden op deze vragen voor te leggen aan een expertgroep uit het vakgebied. Deze bijeenkomst vindt dan bij voorkeur vroeg in 2015 plaats.

6 Literatuur

- [1] De Kleine et. al., Geofysisch onderzoek Julianakanaal, Deltares rapport 1202392_006, 2011.
- [2] BO-Ma aanvullend onderzoek hapjes - bemonstering w-rem lg DEF, memo de Vries & van de Wiel, 21 februari 2014.
- [3] 4839-TM-TEK-030_Overzichtstekening_grindproblematiek_deelgebied_km_0.0_-_km_0.85, de Vries en van de Wiel, 2014.
- [4] Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen, technische aanbevelingen voor oeververdedigingen van losgestorte en gezette steen, samenvattend verslag, M1115 deel XIX, WL Delft Hydraulics, 1988.
- [5] Rock Manual, CUR/CIRIA/CETMEF C683, Gouda, 2007.
- [6] Stroombestendigheid c.q. pantsereffekt zeegrond 0,3-32 mm opgebouwd vlgs Fullerkromme, Project 0005-SMM, Rijkswaterstaat Deltadienst WW, ONW-R-78082, 1978.
- [7] Stroombestendigheid c.q. pantsereffekt steenachtig materiaal 0,2-200 mm opgebouwd vlgs Fullerkromme, Project 0005-SMM, Rijkswaterstaat Deltadienst WW, ONW-R-78079, 1978.
- [8] M1111 deel XIX
- [9] Hoffmans, G.J.C.M. en H.J. Verheij, Scour manual, ISBN 90 5410 6735, A.A.Balkema, Rotterdam, 1997.
- [10] Stolker, C. and H.J. Verheij, Ship-induced water motions beneath the ship's hull, 31th International Navigation Congress PIANC, Estoril, Portugal, 2006.
- [11] Lenselink, R.J., Interaction between loaded barges and bed material, MSc thesis, TU Delft, Delft, 2011.
- [12] Robijns, T., 'Flow beneath inland navigation vessels', MSc thesis, TU Delft, 2014.
- [13] Rahmada, A. (2014), The use of AIS data to derive a ship-induced wave climat, UNESCO_IHE, MSc Thesis WSE-HECEPD-14.01, 2014

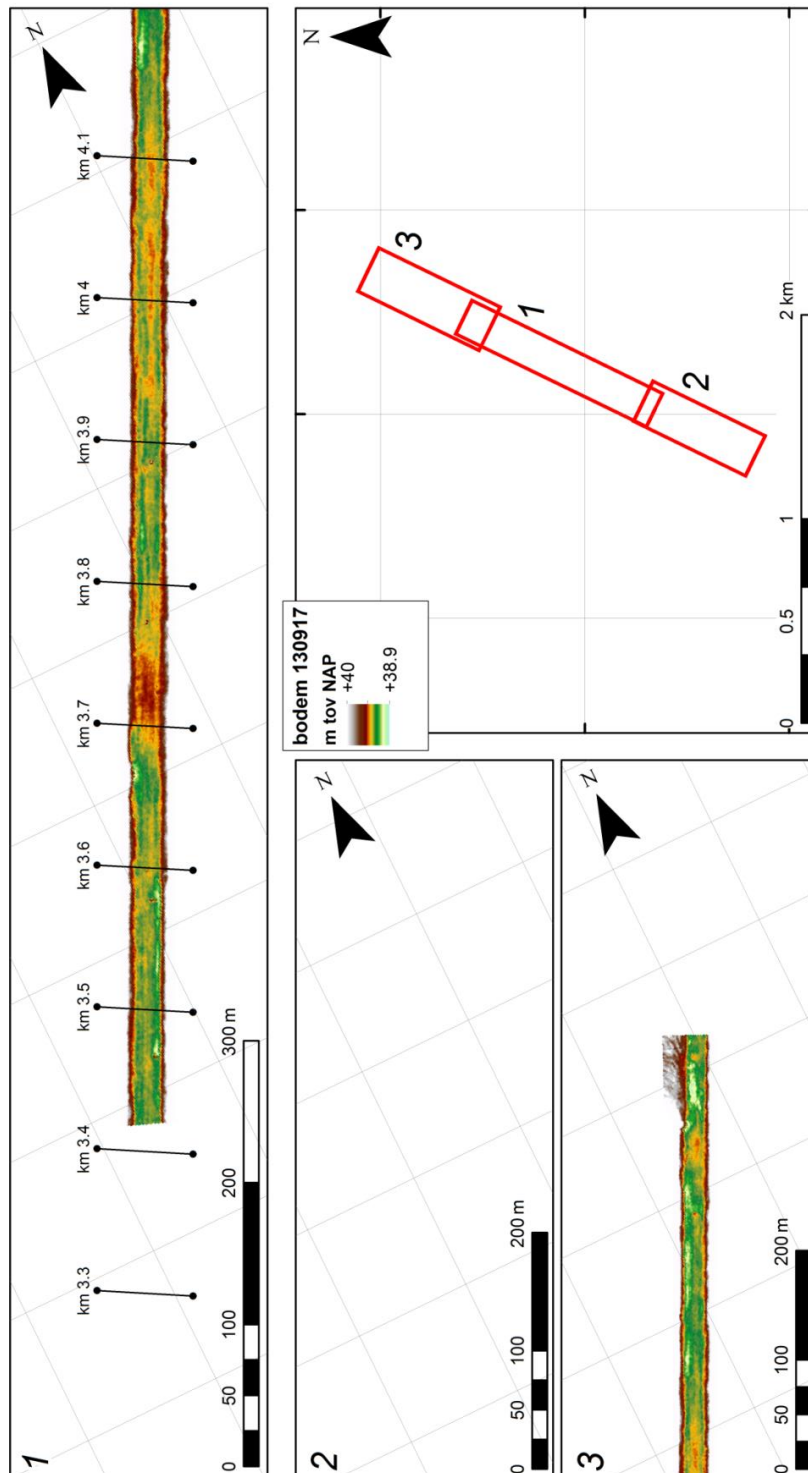
A Verschilkaart bodem voor en na baggerwerkzaamheden

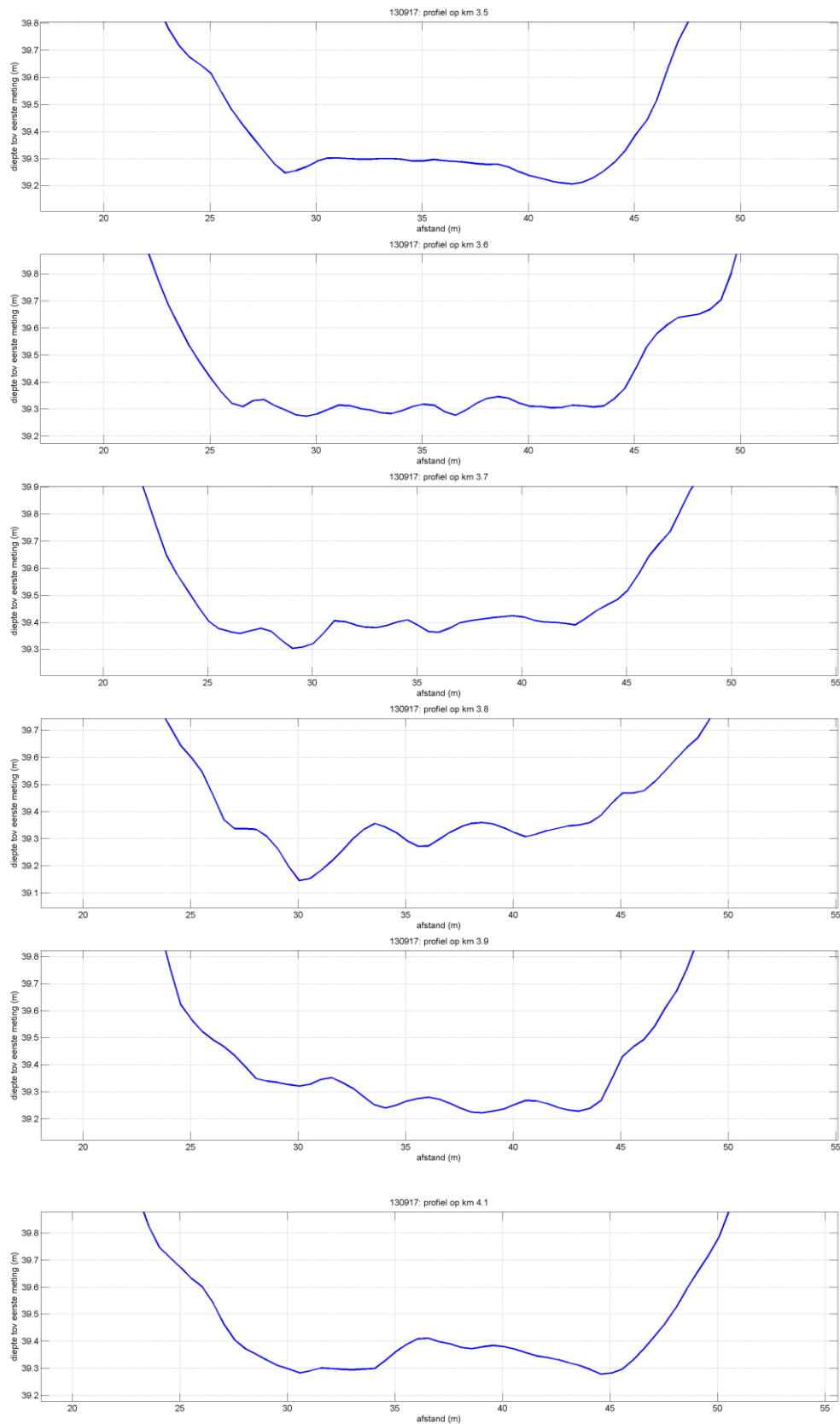
Gem verschil in deze loding: -0.15 m Totaal verschil: -2370 m³



B Sporen in de bodem

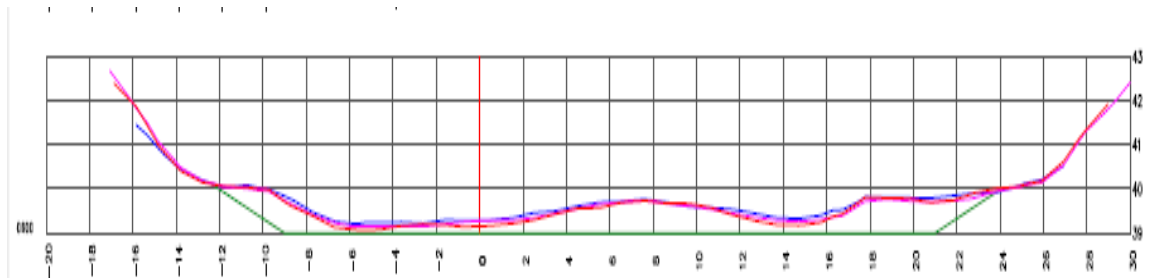
Onderstaand een aantal figuren van de bodemligging in het proefvak zoals gemeten op 17 september 2013. In dit vak zijn erosie sporen van scheepvaart te zien.





Figuur B.1 Doorsnedes over het proef van ,5 tot en met 4,1 km.

Sporen in een verondieping op km 0.2.



Figuur B.2 Geulen in een verondieping (voor de baggerwerkzaamheden van 2014). Rood en blauw: lodingen van RWS en van De Vries & Van der Wiel. Groen het geplande profiel na baggeren.

C Tabel met gegevens per passage

passagetijd	Naam schip	Richting Stroom Op of Af waarts	Lengte- L (m)	Breedte B (m)	Diepgang D (m)	Vaarsnelheid Vs (km/uur)	vaarsnelheid – cor ³ Vs* (km/u)	piek snelheid passage U _{max} (m/s)	piek snelheid cor U _{max} *(m/s)	UR rockmanual (m/s)	maximale volgstream cor U _{vmax} *(m/s)
22-Jul-2014 15:47:43	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	8,3	7,5	1,26	1,46	0,84	0,82
22-Jul-2014 16:23:43	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	5,9	6,5	1,45	1,30	0,67	0,74
22-Jul-2014 16:44:25	Zeeland	Af	110	11,4	3	9,8	9,4	1,09	1,20	0,91	0,58
23-Jul-2014 09:42:20	Johannes Senior	-	135	11,4	3	7,6	-	0,91	0,91	-	0,92
23-Jul-2014 10:02:20	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3	8,3	7,5	0,91	1,13	0,64	0,83
23-Jul-2014 10:16:13	Maria Gertruda	-	57	7	0,8	10,4	-	0,91	0,92	-	0,43
23-Jul-2014 10:28:20	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3	7,25	7,6	1,10	1,01	0,67	0,55
23-Jul-2014 10:58:49	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3	8	7,6	1,01	1,12	0,69	0,61
23-Jul-2014 11:25:43	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3	7	7,6	1,22	1,06	-	0,83
23-Jul-2014 11:58:45	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3	8,3	7,5	0,87	1,08	0,65	0,99
23-Jul-2014 12:05:50	Quadajo	Af	109	9,5	3	9	8,4	0,56	0,72	0,62	0,41
23-Jul-2014 12:27:20	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3	6,7	7,3	1,13	0,97	0,63	0,85
23-Jul-2014 13:03:25	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3	8,7	7,9	0,85	1,07	0,73	5,15
23-Jul-2014 13:28:45	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3	7	7,4	1,21	1,09	0,62	0,83
23-Jul-2014 13:39:25	Eemspoort	-	77	9	-	-	-	0,83	0,67	-	0,15
23-Jul-2014 13:57:15	Laura	Op	96	11	2,4	9,7	10,3	0,98	0,82	0,85	0,85
23-Jul-2014 14:05:55	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3	8,7	7,8	0,77	1,00	0,72	1,07
23-Jul-2014 14:31:35	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3	6,9	7,4	1,20	1,05	0,62	0,78

³ Cor staat voor gecorrigeerd voor de achtergrondstroming in het kanaal.

passagetijd	Naam schip	Op /Af	L (m)	B (m)	D (m)	Vs (km/uur)	Vs* (km/u)	Urmax (m/s)	Urmax *(m/s)	Ur (m/s)	Rock	Uvmax*(m/s)
23-Jul-2014 15:03:20	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3	8,7	8,0	0,84	1,02	0,70		1,01
23-Jul-2014 15:28:45	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3	6,9	7,6	1,22	1,04	0,71		1,34
23-Jul-2014 15:59:00	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3	8,3	7,7	0,93	1,09	0,68		1,04
28-Jul-2014 09:57:55	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	6,5	6,2	1,26	1,34	0,65		1,41
28-Jul-2014 10:34:05	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	7,6	7,0	1,22	1,36	0,74		1,08
28-Jul-2014 11:07:15	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	6,5	6,6	1,28	1,26	0,68		1,28
28-Jul-2014 11:10:55	Jill F	Op	45	8	2,5	11	11,3	0,84	0,76	0,64		0,44
28-Jul-2014 11:44:45	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	7,5	6,8	1,18	1,36	0,75		1,46
28-Jul-2014 12:13:50	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	6,1	6,6	1,39	1,26	0,65		1,25
28-Jul-2014 12:29:25	Intermezzo	-	-	-	-	-	-	0,60	0,80	-		0,14
28-Jul-2014 12:47:25	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	7,6	6,9	1,03	1,18	0,73		0,46
28-Jul-2014 13:08:40	Jill F	Op	48	7	2,4	11,6	12,2	1,15	0,99	0,59		0,49
28-Jul-2014 13:15:40	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	6,1	5,7	1,42	1,30	0,55		6,51
28-Jul-2014 13:48:15	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	7,2	7,6	1,44	1,55	0,88		1,95
28-Jul-2014 14:11:48	Salve	Af	85	9,5	3	9,6	9,2	0,90	1,01	0,63		0,34
28-Jul-2014 14:20:28	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	6,5	6,4	1,29	1,27	0,62		1,56
28-Jul-2014 14:56:15	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	6,9	7,3	1,22	1,31	0,79		0,73
28-Jul-2014 15:19:42	Jill F met volle bak	Op	48	7	2,4	11,9	12,0	1,05	1,01	0,58		0,53
28-Jul-2014 15:24:35	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	5,9	5,6	1,37	1,29	0,57		1,16
28-Jul-2014 15:59:45	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	8	7,2	1,16	1,36	0,83		0,90
28-Jul-2014 16:30:05	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	6,1	6,6	1,43	1,31	0,67		1,21
28-Jul-2014 16:41:10	Zora	-	85	8	3	8,5	-	0,74	0,79	-		0,54
28-Jul-2014 17:04:22	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	7,05	6,7	1,31	1,38	0,67		1,08
29-Jul-2014 09:02:35	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	6,8	6,8	1,27	1,27	0,71		0,74
29-Jul-2014 09:34:42	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	6,5	6,6	1,47	1,43	0,70		2,33

passagetijd	Naam schip	Op /Af	L (m)	B (m)	D (m)	Vs (km/uur)	Vs* (km/u)	Urmax (m/s)	Urmax *(m/s)	Ur (m/s)	Rock	Uvmax*(m/s)
29-Jul-2014 09:51:25	Archimedes	Op	-	-	3	7,8	7,7	0,97	1,01	-	-	1,02
29-Jul-2014 10:00:50	Laguz	Op	110	10,5	3	-	-	0,84	0,70	-	-	0,75
29-Jul-2014 10:04:10	Charles Eugene	Op	80	10	3	6,9	6,4	0,67	0,81	0,44	-	0,27
29-Jul-2014 10:07:23	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	6,9	6,7	1,19	1,23	0,68	-	0,75
29-Jul-2014 10:31:43	Nirwana	Af	110	10,4	-	10,9	10,9	0,75	0,75	-	-	0,20
29-Jul-2014 10:42:04	Aquality	Af	80	8,2	2,5	11,3	10,7	0,76	0,94	0,64	-	0,19
29-Jul-2014 10:45:40	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	-	7,5	6,6	1,16	1,40	-	-	5,95
29-Jul-2014 10:57:55	Jill F met lege bak	Af	48	7	2,5	14	13,6	0,31	0,43	0,72	-	0,50
29-Jul-2014 10:59:15	Calcit	Af	69	27	-	14	13,7	0,39	0,46	-	-	0,17
29-Jul-2014 11:14:47	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	5,6	6,3	1,44	1,27	0,66	-	0,84
29-Jul-2014 11:38:33	Jill F met volle bak	Op	48	7	2,5	11,5	11,9	1,24	1,13	0,69	-	0,62
29-Jul-2014 12:00:25	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	-	-	1,05	1,27	-	-	1,55
29-Jul-2014 12:22:32	Westenwind	-	105	10	3	8,5	-	1,07	0,91	-	-	1,18
29-Jul-2014 12:30:35	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	5,7	6,4	1,43	1,24	0,64	-	0,69
29-Jul-2014 13:02:50	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	7,8	7,1	1,20	1,38	0,75	-	1,42
29-Jul-2014 13:22:10	Combination	Op	110	11,5	3	8	8,2	1,11	1,05	0,79	-	0,52
29-Jul-2014 13:25:30	Asana	Op	85	9,5	2,5	8	8,0	0,67	0,67	0,52	-	0,48
29-Jul-2014 13:36:15	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	6,5	6,9	1,50	1,38	0,80	-	1,30
29-Jul-2014 13:49:43	Jill F met volle bak	-	48	7	2,5	9	-	0,94	0,78	-	-	0,56
29-Jul-2014 14:09:45	Confiance	-	50	6	2,5	8,7	-	0,89	0,68	-	-	0,52
29-Jul-2014 14:19:00	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	7,8	7,1	1,17	1,34	0,76	-	1,37
29-Jul-2014 14:45:30	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	7,2	7,1	1,15	1,18	0,73	-	0,74
29-Jul-2014 14:54:15	Jill F met lege bak	Af	48	7	2,5	13	12,6	0,35	0,46	0,66	-	0,49
29-Jul-2014 14:56:55	Faraday	Op	110	11,5	2,6	8,5	9,1	1,09	0,92	0,69	-	0,72
29-Jul-2014 15:17:20	Sympharosa	Op	72	7	2,6	-	-	0,75	0,60	-	-	0,48

passagetijd	Naam schip	Op /Af	L (m)	B (m)	D (m)	Vs (km/uur)	Vs* (km/u)	Urmax (m/s)	Urmax *(m/s)	Ur (m/s)	Rock	Uvmax*(m/s)
29-Jul-2014 15:26:05	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	7,4	6,6	1,06	1,28	0,67		2,03
29-Jul-2014 15:53:05	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	7	7,1	1,33	1,29	0,73		0,76
29-Jul-2014 15:56:25	Jill F met volle bak	Op	48	7	2,5	-	-	0,86	0,78	-		0,41
29-Jul-2014 16:08:25	Dragon	Af	67	8,2	3	9,6	9,1	0,36	0,51	0,63		0,44
30-Jul-2014 08:24:00	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	7,2	7,0	1,17	1,24	0,76		0,88
30-Jul-2014 08:36:20	Jill F met lege bak	Af	48	7	2,5	13,4	13,1	0,18	0,26	0,64		0,39
30-Jul-2014 09:00:25	Leny	Af	-	-	1	-	-	0,43	0,53	-		0,15
30-Jul-2014 09:04:50	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	7,2	6,8	1,33	1,45	0,69		1,74
30-Jul-2014 09:31:45	Sandra F - Wiljacco F12	-	110	11,4	-	6,5	-	1,26	1,20	-		0,81
30-Jul-2014 09:53:28	Delta	Op	86	8,5	3	6	6,5	1,05	0,92	0,38		0,64
30-Jul-2014 09:57:37	Jill F met volle bak	Op	48	7	2,5	11	11,6	1,12	0,95	0,59		0,56
30-Jul-2014 10:11:37	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	8	7,1	1,07	1,31	0,78		5,78
30-Jul-2014 10:32:15	Challenger	Op	110	11,5	-	-	-	0,97	0,93	-		0,31
30-Jul-2014 10:43:35	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	-	5,9	6,5	1,42	1,28	-		0,80
30-Jul-2014 10:52:10	Blacklock	Op	86	9,5	-	8,5	9,2	0,96	0,84	-		0,64
30-Jul-2014 11:04:35	Brava	Af	67	8,2	2,6	-	-	0,30	0,44	-		0,24
30-Jul-2014 11:12:20	Jill F leeg	Op	48	7	-	-	-	0,71	0,60	-		0,21
30-Jul-2014 11:22:43	Conatus	Op	60	7	-	-	-	0,85	0,67	-		0,36
30-Jul-2014 11:32:18	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	-	8,1	7,2	1,16	1,41	-		6,41
30-Jul-2014 11:54:07	Pandora	Af	85	9,5	2,3	10,2	9,5	0,37	0,52	0,61		0,28
30-Jul-2014 11:56:18	Falkland	Af	55	7,2	1,8	13,5	12,6	0,50	0,75	0,48		0,49
30-Jul-2014 12:08:55	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	6,5	6,9	1,35	1,24	0,68		0,67
30-Jul-2014 12:25:50	Jill F Volle bak	Op	-	-	2,5	11,8	12,1	1,04	1,08	-		0,98
30-Jul-2014 12:44:15	Esperanza	Op	110	11,5	3	8	8,3	1,23	1,15	0,68		0,87
30-Jul-2014 13:01:15	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	7,2	6,8	1,30	1,40	0,72		1,60

passagetijd	Naam schip	Op /Af	L (m)	B (m)	D (m)	Vs (km/uur)	Vs* (km/u)	Urmax (m/s)	Urmax *(m/s)	Ur (m/s)	Rock	Uvmax*(m/s)
30-Jul-2014 13:32:15	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	6,9	7,1	1,36	1,33	0,70		0,88
30-Jul-2014 13:43:05	Jill F	Af	48	7	-	-	-	0,41	0,41	-		0,15
30-Jul-2014 14:08:00	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	7,2	6,7	1,29	1,43	0,64		1,48
30-Jul-2014 14:19:30	Nil Desperandum	Af	85	8,2	2,8	10,6	10,9	1,08	1,01	0,73		0,61
30-Jul-2014 14:43:10	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	7,3	7,1	1,21	1,26	0,78		0,69
30-Jul-2014 14:58:05	JillF met volle bak	Op	48	7	2,5	11,9	12,4	1,07	0,93	0,76		0,36
30-Jul-2014 15:14:10	Sombra	Af	110	11	1,5	10	9,7	0,44	0,53	0,48		0,24
30-Jul-2014 15:19:35	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	7,2	6,8	1,34	1,46	0,76		1,35
30-Jul-2014 15:48:42	Sandra F - Wiljacco F12	Op	110	11,4	3,5	6,1	6,7	1,37	1,21	0,67		0,74
30-Jul-2014 16:01:00	Dirk Sr	Af	108	11,4	1	13,5	12,5	0,45	0,71	0,17		0,42
30-Jul-2014 16:05:30	Jill F met lege bak	Af	38	8	2,9	17	16,2	0,68	0,92	0,94		0,62
30-Jul-2014 16:28:15	Sandra F - Wiljacco F12	Af	110	11,4	3,5	8,5	7,7	1,08	1,28	0,72		6,27
30-Jul-2014 16:36:44	Duwbak Mover 1	Af	88,2	11,5	3	7,8	7,3	0,74	0,89	0,56		0,54

