

Erosie van het slik van Bath

Onderzoek naar de drijvende kracht achter erosie



Erosie van het slik van Bath

Onderzoek naar de drijvende kracht achter erosie

Bas Huisman
Rinus Schroevers
Maarten van der Wal

1200633-001

Titel

Erosie van het slik van Bath

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat - waterdienst1200633-001

Project

Kenmerk

1200633-001-ZWS-0004

Pagina's

57

Trefwoorden

Nauw van Bath, Scheepsgolven, Morfologie, Slik, Bodemschuifspanning.

Samenvatting

In dit rapport is onderzoek gedaan naar de relatieve invloed van scheepsgolven op de hydraulische belasting van het slik bij Bath. De aanleiding hiervoor is dat het slik aan de Noordzijde van het Nauw van Bath al enige jaren geleidelijk erodeert. Eén van de aspecten die hierop van invloed zou kunnen zijn is de belasting op het slik door scheepsgolven. Andere processen die mogelijk een rol spelen, zijn de belasting door getijstroming en het verminderen van de weerstand van het slik tegen erosie door het uitspoelen van slib uit het sediment.

Ten behoeve van het onderzoek naar de invloed van scheepsgolven op de belastingen van het slik bij Bath is een meetcampagne verricht. Deze is door Nortek [5] in 2010 uitgevoerd en opgeleverd. Tijdens de meetcampagne zijn de hydraulische condities op twee locaties op het slik gemeten over een periode van ruim een maand. Tevens is informatie over de scheepspassages in deze periode gezocht. Nortek heeft de gemeten scheepsgolven voor 62 van de scheepspassages bij Bath in detail geanalyseerd. De analyse in dit rapport richt zich met name op de gemeten hydraulische omstandigheden en de geanalyseerde scheepsgolven tijdens de 62 scheepspassages. Daarnaast is ook de weerstand van de bodem tegen erosie kort beschouwd.

Concluderend kan gesteld worden dat het deel van het scheepvaartverkeer met een lengte van 80 meter of meer de bodemschuifspanningen op het slik in het Nauw van Bath tijdelijk aanzienlijk vergroot ten opzichte van de autonome situatie met getij en windgolven. Vergroting van de bodemschuifspanningen resulteert in het algemeen in extra erosie. Daarom is het aannemelijk dat scheepsgolven een bijdrage leveren aan de erosie van het slik. Bij het ontwikkelen van maatregelen ter bescherming van het slik in het Nauw van Bath tegen erosie, wordt aanbevolen om rekening te houden met deze bijdrage van scheepsgolven.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	dec. 2010	B.J.A. Huisman		ir. J.G. de Ronde		dr.ir. A.G. Segeren	
		drs. M. Schroevers					
		ir. M. van der Wal					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Onderzoek naar erosie bij Bath	1
1.2 Leeswijzer	2
1.3 Auteurs	2
2 Ontstaan en hypothese voor erosie	3
2.1 Introductie	3
2.2 Historische ontwikkeling van het Nauw van Bath	3
2.2.1 Dynamiek van het geulenstelsel	3
2.2.2 Ontwikkeling van het slik na het vastleggen van de geulwand	4
2.3 Mogelijk relevante drijvende krachten erosie	8
2.3.1 Sediment transport	8
2.3.2 Hypothesen voor erosie van het slik	9
2.3.3 Beschrijving belastingen en bodem	9
3 Meetcampagne	15
3.1 Introductie	15
3.2 Meetcampagne	15
3.3 Resultaten	17
4 Analyse beschikbare data	21
4.1 Introductie	21
4.2 Hydraulische condities	21
4.3 Schepen	24
4.3.1 Histogrammen schepen	24
4.4 Scheepsgolven	25
4.4.1 Meetgegevens scheepsgolven	25
4.4.2 Interpretatie meetgegevens	25
4.4.3 Relatie tussen karakteristieken van schepen en scheepsgolven	27
5 Analyse oorzaken erosie	31
5.1 Introductie	31
5.2 Aanpak belastingen	31
5.3 Berekende belastingen en weerstand tegen erosie	32
5.3.1 Weerstand tegen erosie	32
5.3.2 Belastingen door omgevingscondities	33
5.3.3 Belastingen door scheepsgolven	35
5.4 Invloed scheepsgolven	37
5.5 Kans van optreden	38
6 Conclusies en aanbevelingen	41
6.1 Conclusies	41
6.2 Aanbevelingen	43
7 Literatuur	45

Bijlage(n)

A Berekening bodemschuifspanning	A-1
B Berekende bodemschuifspanningen	B-5
C Ruimtelijke stroomsnelheidsmetingen op het Slik van Bath 29 juli 2010	C-11
D Overzicht bodemsamenstelling van het slik bij Bath	D-1

1 Inleiding

1.1 Onderzoek naar erosie bij Bath

In het tracébesluit bij de derde verdieping van de Westerschelde is het nemen van maatregelen ter bescherming van het slik bij Bath in de Westerschelde opgenomen. Eén van de gebieden die genoemd wordt is het slik bij Bath. In het verleden heeft hier veel erosie van het slik plaats gevonden omdat de bocht langzaam landwaarts migreerde. Doormiddel van een geulwandverdediging over 2 kilometer die in 1997 is aangelegd, is de landwaartse migratie van de geul gestopt. De erosie van de bovenzijde van het slik is in de jaren daarna echter door gegaan. Over een breedte van 100 á 150 meter en een lengte van 2 kilometer is een laag van 1,5 á 2 meter van het slik verdwenen.

Figuur 1.1 Studiegebied en meetlocatie.



Door provincie Zeeland (SVASEK rapport [2]) is onderzocht wat gedaan kan worden om de invloed van getijstrooming op de erosie van het slik te beperken. Het is echter mogelijk dat ook scheepsgolven een rol spelen bij de erosie van het slik. Een maatregel alleen gericht op het reduceren van de strooming zou dan mogelijk niet het gewenste effect hebben. In Hoofdstuk 2 wordt uitgebreider ingegaan op de historische ontwikkeling, drijvende krachten en hypothesen voor het ontstaan van de erosie van het slik. In dit rapport wordt daarbij met name aandacht besteed aan de hypothese dat de scheepsgolven in combinatie met getij de erosie op het slik beïnvloeden. Om deze hypothesen te kunnen toetsen is in samenwerking met Rijkswaterstaat Dienst Zeeland een meetprogramma opgestart waarin de golven en strooming op het slik worden gemeten. De gemeten hydraulische belastingen als gevolg van scheepsgolven zijn tevens geanalyseerd.

1.2 Leeswijzer

Achtereenvolgens wordt in dit rapport inhoudelijk ingegaan op de volgende onderwerpen:

- Historische ontwikkeling van het Nauw van Bath én de mogelijke oorzaken voor de erosie (Hoofdstuk 2).
- Opzet en uitvoering van de meetcampagne (Hoofdstuk 3) en de analyse van de meetresultaten (Hoofdstuk 4).
- Analyse van de oorzaken van de erosie (Hoofdstuk 5).
- Conclusies en aanbevelingen voortkomende uit de analyses in dit rapport (Hoofdstuk 6).

Dit rapport is het eindrapport van het project “Opstellen meetplan en analyse bij Bath” waarvan de opdracht is verstrekt onder zaaknummer 31019298.

1.3 Auteurs

Dit rapport is opgesteld door Rinus Schroevers, Maarten van der Wal en Bas Huisman en binnen Deltares door John de Ronde becommentarieerd. Namens de opdrachtgever, Rijkswaterstaat Waterdienst, heeft Herman Mulder het project begeleid en becommentarieerd. Namens RWS Zeeland heeft Gert-Jan Liek het project begeleid.

De metingen met vaste instrumenten op het slik van Bath zijn uitgevoerd door Nortek BV in opdracht van Deltares (zie rapportage Nortek [5]). Daarnaast hebben aanvullende metingen plaatsgevonden van de bodemligging en stroomsnelheden door de meetadviesdienst van Rijkswaterstaat Dienst Zeeland.

2 Ontstaan en hypothese voor erosie

2.1 Introductie

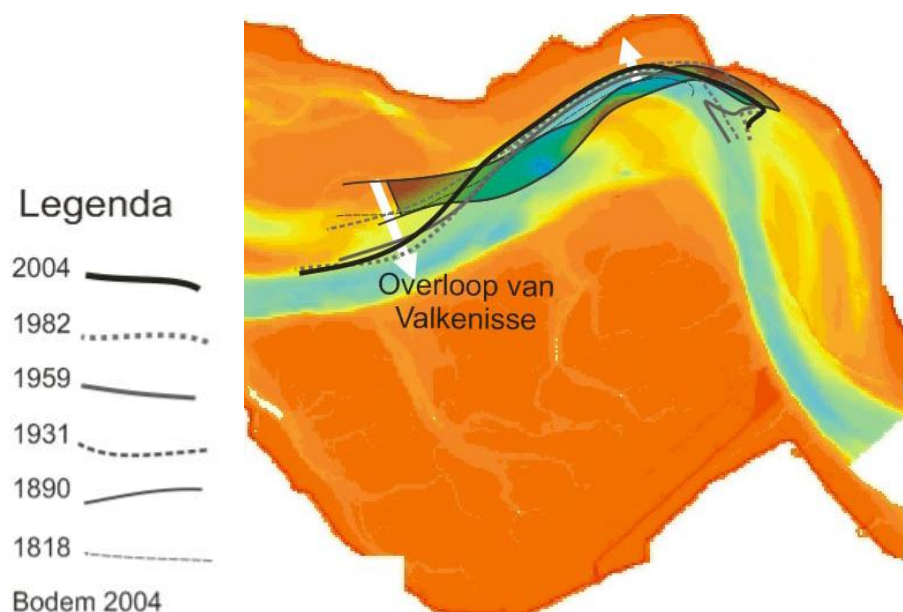
In dit hoofdstuk wordt verkort weergegeven hoe de historische ontwikkeling van het Nauw van Bath heeft plaats gevonden (Paragraaf 2.2). Met name wordt aandacht besteedt aan de geulwandering als gevolg van de ontwikkeling van de geul aan de Noordzijde van het nauw van Bath in de afgelopen 10 jaar. Hiervoor is gebruik gemaakt van informatie die beschikbaar is gekomen vanuit de morfologische analyses in het kader van het MER van de 3^{de} verdieping van de Westerschelde.

In het MER is echter geen aandacht geweest voor de (veranderende) scheepvaart als bron van morfologische veranderingen. De mogelijkerwijs relevante drijvende krachten achter de erosie van het slik (inclusief scheepsgeïnduceerde golven) worden daarom in Paragraaf 2.3 beschreven. Hier worden ook de hypothesen voor de drijvende krachten achter de erosie van het slik bij Bath benoemd.

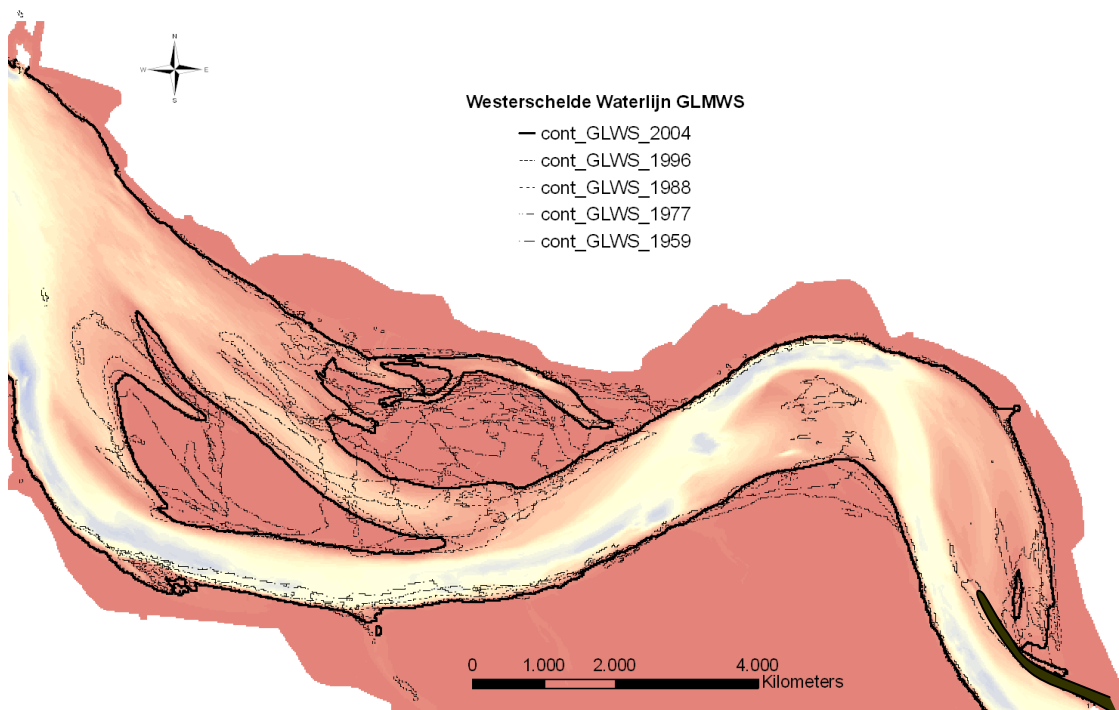
2.2 Historische ontwikkeling van het Nauw van Bath

2.2.1 Dynamiek van het geulensysteem

De Westerschelde is een dynamisch systeem, waarbij de vorm van het estuarium continu veranderd. Natuurlijke veranderingen van het estuarium zijn over het algemeen processen met zeer lange periodes van tientallen tot honderden jaren. De geul ter hoogte van het Nauw van Bath heeft de neiging gehad om zich steeds verder naar het noorden te verschuiven (zie Figuur 2.1). De geul is over de laatste 200 jaar in het Nauw van Bath ongeveer 200 meter opgeschoven naar het noordwesten.



Figuur 2.1 Langjarige ontwikkeling van de geulwand in het Nauw van Bath (op basis van gegevens van RWS Zeeland).



Figuur 2.2 Recente dynamiek in de geulen vaan het Nauw van Bath (op basis van gegevens van RWS Zeeland).

Op Belgisch grondgebied zijn in de jaren zestig twee geleidedammen aangelegd om de toegang tot de grote zeesluis te verbeteren. De meest benedenstroomse geleide dam is in Figuur 2.2 te geschetst. De bochtstraal van het Nauw van Bath is na de aanleg van de dammen in België ongeveer gehalveerd.

2.2.2 Ontwikkeling van het slik na het vastleggen van de geulwand

In de huidige situatie is het slik vanaf de vaargeul tot de dijk te verdelen in 3 delen:

- de strook langs de vaargeul van ongeveer 100 m breed die geërodeerd is tot op het veen,
- de strook van 100 tot 300 meter waar nog wel een laag zand/slib op het veen ligt die nu onderhevig is aan erosie en
- het laatste stuk tot aan de dijk is (nog) niet onderhevig aan erosie en is deels schor.

De situatie bij laagwater is te zien in Figuur 2.3, waar het slik en schor geheel is drooggefallen. De kruin van de geulwandverdediging is bij laagwater nog juist zichtbaar. Een lage dam loopt van de zeedijk tot aan de geulwandverdediging. Een detail van deze dam is in Figuur 2.4 te zien. Ten tijde van de foto bleek dat het slik ten oosten van de dam enkele decimeters lager ligt dan het slik ten westen van de dam. De kleinste afstand tussen de betonning van de vaargeul en de kruin van de geulwandverdediging is ongeveer 30 m. In het smalste deel van de vaargeul is de maximale afstand tot de betonning aan de overzijde slechts 350 meter.



Figuur 2.3 Geulwandverdediging Nauw van Bath.

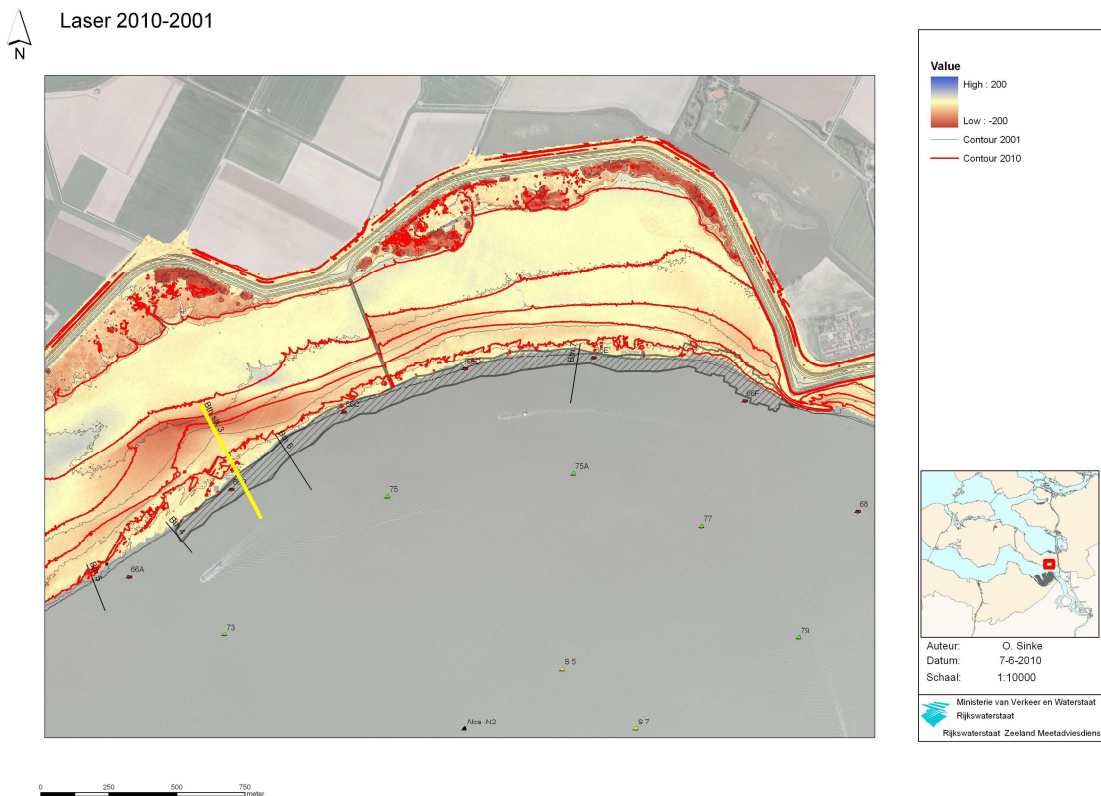
De rode lijn is de grens tot waar het veen aan het oppervlak gekomen is. De zwarte lijn is de kruin van de geulwandverdediging. Het donkere gebied is het schor. De lichte lijn is de verdediging van de zeedijk. De lichtere gebieden in het slik zijn schelpenbanken.



Figuur 2.4 Bestaande lage dam of krib op het slik op 28 april 2009.
Foto: Maarten van der Wal

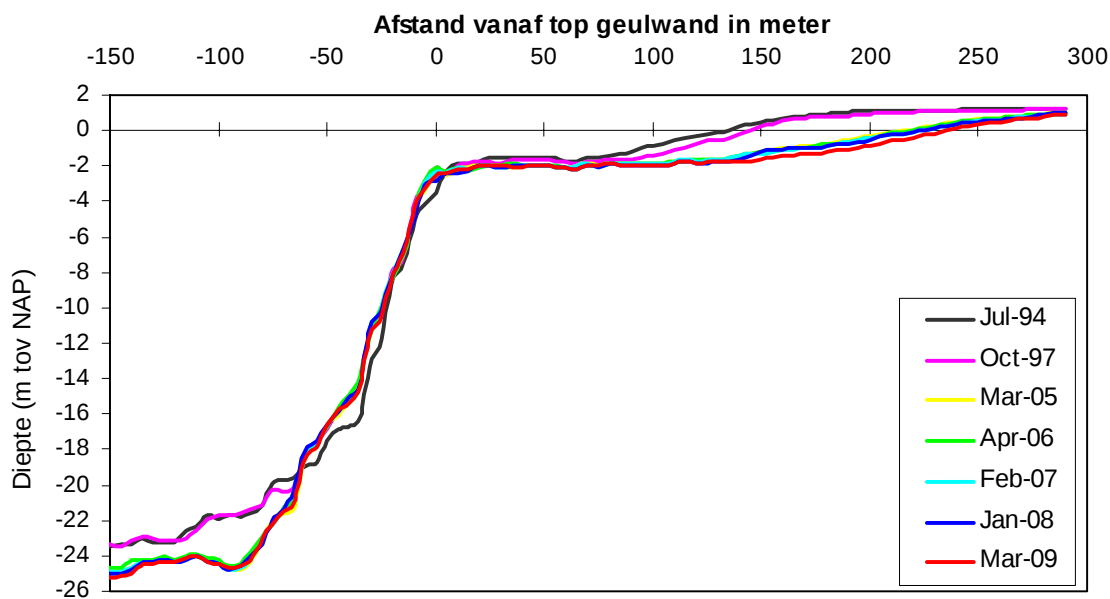
In Figuur 2.5, zijn raaien getrokken over de delen van de geul en het slik, die de laatste 9 jaar het meest geërodeerd zijn. In Figuur 2.6 en Figuur 2.7 is de bodemligging over de raai Bath slik 3 weergegeven in verschillende jaren. Dit is de raai waarop de meetinstrumenten zijn geplaatst. In de figuur is te zien dat de eerste 130 a 150 meter inmiddels is geërodeerd tot op het veen en niet “snel” meer verder erodeert. Niet alle erosie is na het vastleggen van de geulwand ontstaan, een deel van het veen lag bloot en de lodingen van 1994 en 1997 laten zien dat ook toen de erosie voortschreed. Verder van de geul treedt nog steeds erosie op. Dit is nog beter te zien in de verschilkaart van de laseraltimetrie metingen van 2009 en 2010 (zie Figuur 2.8).

Het algemene beeld is dat de huidige erosie van het slik ten oosten van de strekdam bijna tot stilstand is gekomen, maar aan de westzijde gestaag door gaat.

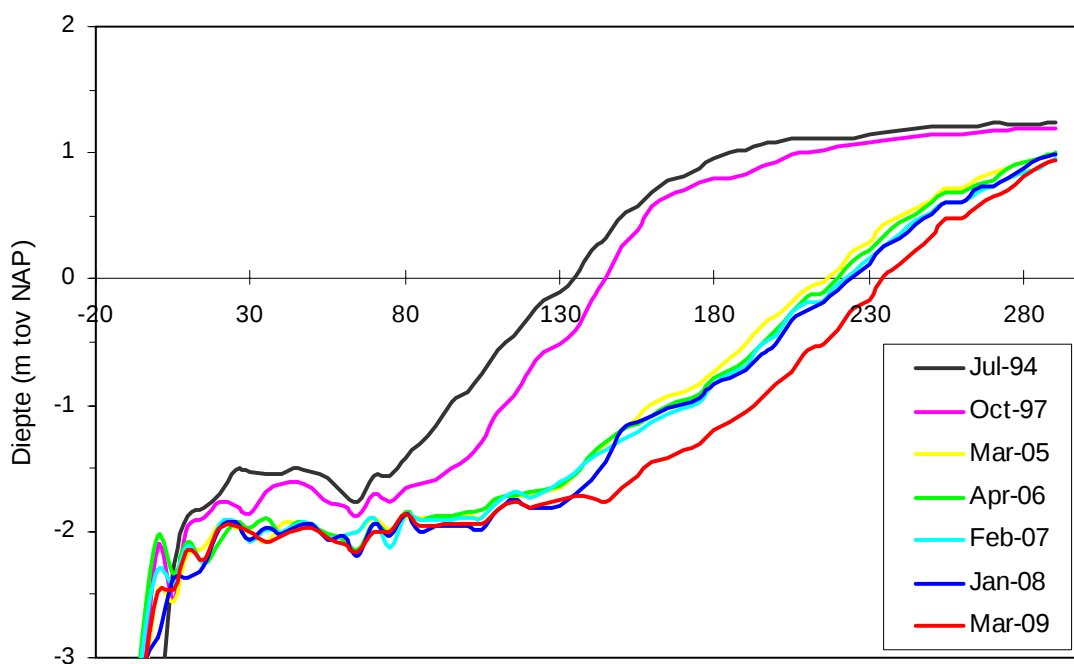


Figuur 2.5 Erosie en sedimentatie over de laatste 9 jaar, 2001-2010.

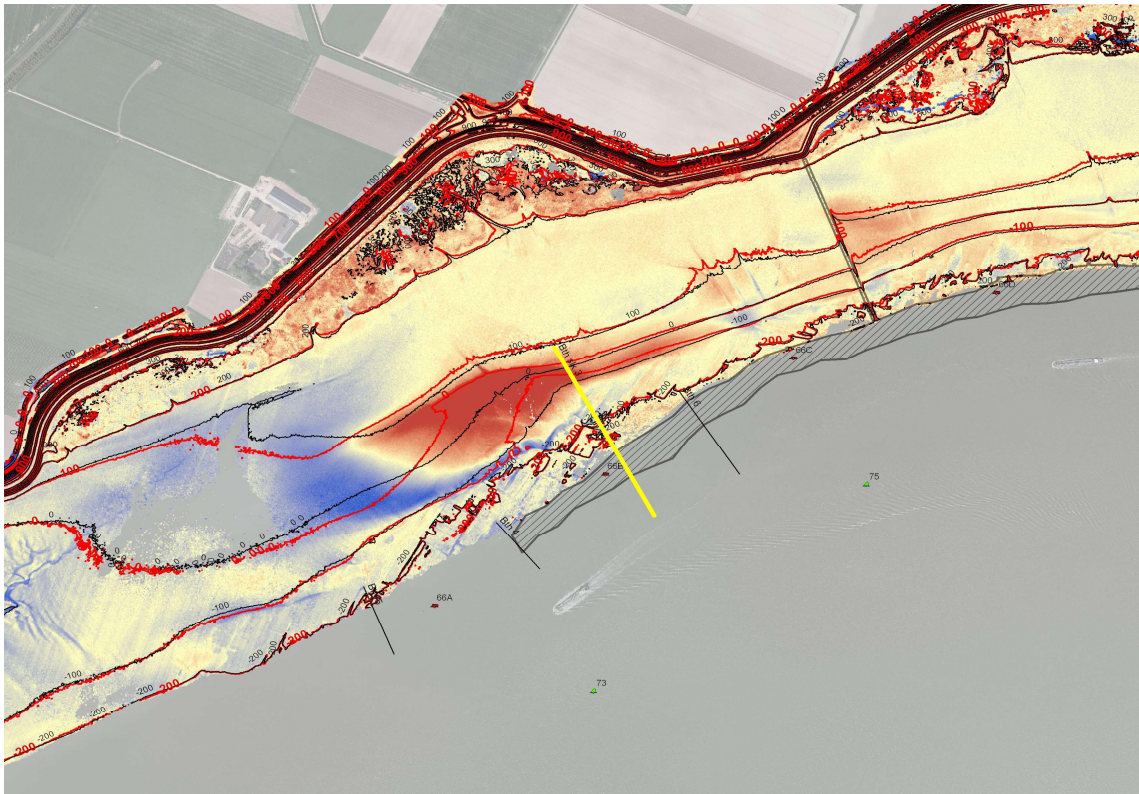
Het gearceerde gebied is de projectie van de bestektekening van de geulwandverdediging en de tegelijkertijd geconstrueerde krib. De gele lijn is raai 3 waarop de metingen hebben plaats gevonden. De dieptecontouren in 2001 en 2010 worden respectievelijk met grijze en rode lijnen weergegeven.



Figuur 2.6 Erosie van de bovenlaag van het schor van Bath in de loop van 15 jaar (geul aan linkerzijde figuur voor $x < 0$ en slik aan rechterzijde van figuur vanaf $x = 0$).



Figuur 2.7 Detailfiguur van de ligging van het slik over de raai Bath Slik 3 in de loop van 15 jaar vanaf de bovenzijde van de geulwandverdediging (links in figuur).



Figuur 2.8 Erosie en sedimentatie in een periode van 1 jaar, 2009-2010. De maximale erosie (in rood) op het slik is 100 cm en de maximale sedimentatie (blauw) is 25 cm. Opgemerkt wordt dat de Laser data van 2010 nog niet is goedgekeurd. Duidelijk is echter dat er aanzienlijke erosie plaats vindt.

2.3 Mogelijk relevante drijvende krachten erosie

2.3.1 Sediment transport

Het transport van sediment hangt zowel af van het type sediment als van de hydraulische condities (stroming dicht bij de bodem door getij en golven). De hydraulische condities zorgen voor een belasting op de bodem (bodemschuifspanning) waardoor sediment wordt opgewoeld en meegenomen. De bodem bepaalt de weerstand voor de erosie (kritische bodemschuifspanning). Als deze wordt overschreden dan zal sediment worden meegenomen door de stroming. Dit kan zowel rollend over de bodem als suspensief in de waterkolom. Opgemerkt wordt dat zanderig en slibbig materiaal aanmerkelijk makkelijker erodeert dan cohesief materiaal (zoals klei of veen).

Naar mate er meer sediment in de waterkolom aanwezig is, kan er een evenwicht ontstaan tussen het sediment dat opgewoeld wordt en het sediment dat bezinkt. Erosie zal dan ook optreden op plaatsen waar het water relatief 'schoon' is (weinig sediment bevat) ten opzichte van de capaciteit om sediment te transporteren (de lokaal aanwezige hydraulische belasting). De oorzaak van de erosie kan ook gezocht worden in een tekort in de aanvoer van (fijn) sediment. In dit rapport wordt echter niet naar dit evenwicht in het transport van sediment gekeken. Uitgangspunt is dat er erosie plaats vindt, wat een tekort aan aanvoer betekent. Als er tekort is aan aanvoer van zand dan worden de belastingen de belangrijkste factor voor de erosie. Dit onderzoek richt zich daarom vooral op de belastingen die hier de grootste bijdrage aan leveren.

2.3.2 Hypothesen voor erosie van het slik

De volgende hypothesen voor de drijvende kracht achter de erosie van het slik bij Bath kunnen naar voren worden gebracht.

- 1 De erosie wordt veroorzaakt door het getijwerking en wind golven
- 2 De erosie en sedimentatie worden veroorzaakt door getijwerking én scheepsgolven

De nadruk ligt in deze studie vooral op de belastingen door getij en scheepsgolven. Bij beide hypothesen is het getij in hoofdzaak verantwoordelijk voor het transport van het sediment. Als gevolg van de wind- of scheepsgolven kan er echter meer materiaal opgewoeld worden, waardoor de hoeveelheid sediment in suspensie groter is (en als gevolg ook het transport). Slib kan daarbij over een grote afstand getransporteerd worden terwijl de zandfractie een kleine afstand aflegt voordat deze weer sedimenteert.

Het verschil tussen hypothese 1 en 2 heeft dus betrekking op de relatieve invloed van scheepsgolven op het transport. Om dit te kunnen beoordelen worden de belastingen op de bodem van de slikken bij Bath onderzocht voor situaties met getij, windgolven en scheepsgolven. Om deze hypothesen te kunnen toetsen is in samenwerking met Rijkswaterstaat Dienst Zeeland is een meetprogramma opgestart waarin de golven op het slik worden gemeten (Hoofdstuk 4). De meetgegevens zijn door Deltares geanalyseerd en de gevonden hydraulische belastingen en de meest waarschijnlijke oorzaken daarvan beschreven (Hoofdstuk 0).

Naast de belastingen speelt het proces van erosie van de bodem hierbij ook een rol. Mogelijk wordt de erosie veroorzaakt door het uitspoelen van fijn slib uit de bodem. Dit proces wordt in dit rapport echter niet in detail beschouwd, aangezien dit niet de kern van de studie betrof. Wel wordt op basis van beschikbare bodemgegevens beschouwd of de uitspoeling van slib tot een aanzienlijke bodemdaling kan leiden (Hoofdstuk 0).

2.3.3 Beschrijving belastingen en bodem

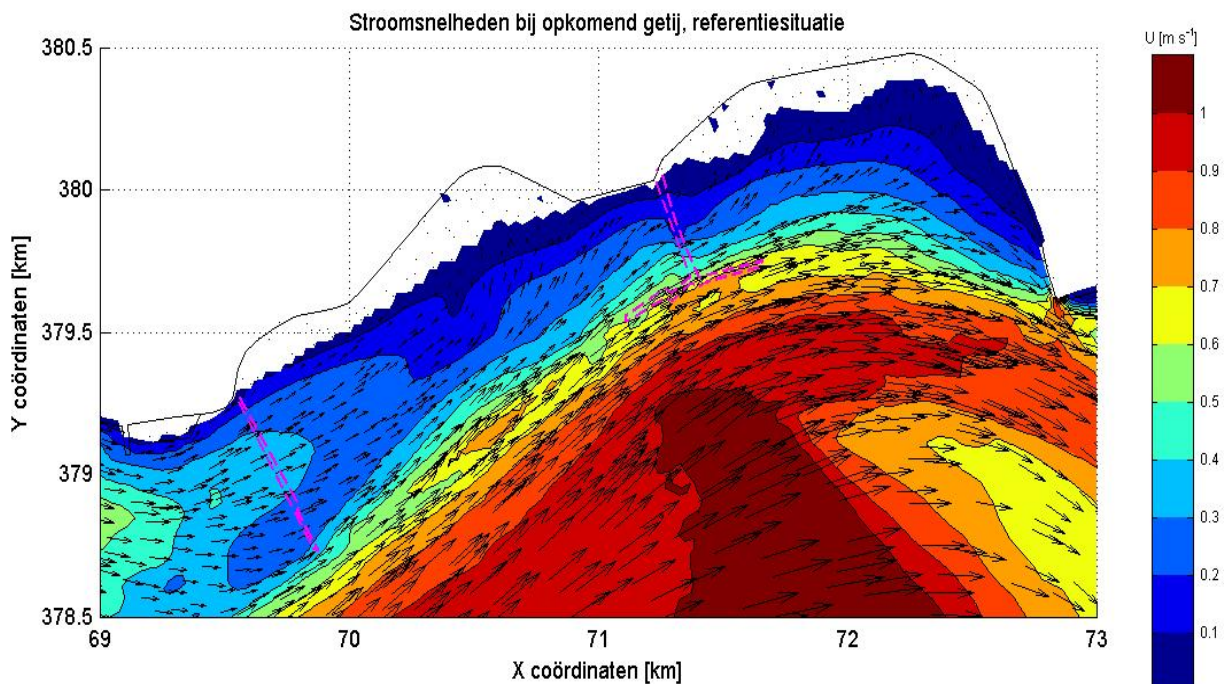
De drijvende krachten die potentieel verantwoordelijk kunnen zijn voor de erosie van het slik bij Bath worden in deze paragraaf meer in detail beschreven. Tevens wordt aandacht besteed aan de weerstand tegen erosie. Achtereenvolgens wordt informatie gegeven over:

- Getijstroming
- Windgolven
- Scheepsgolven
- Bodem

Getijstroming

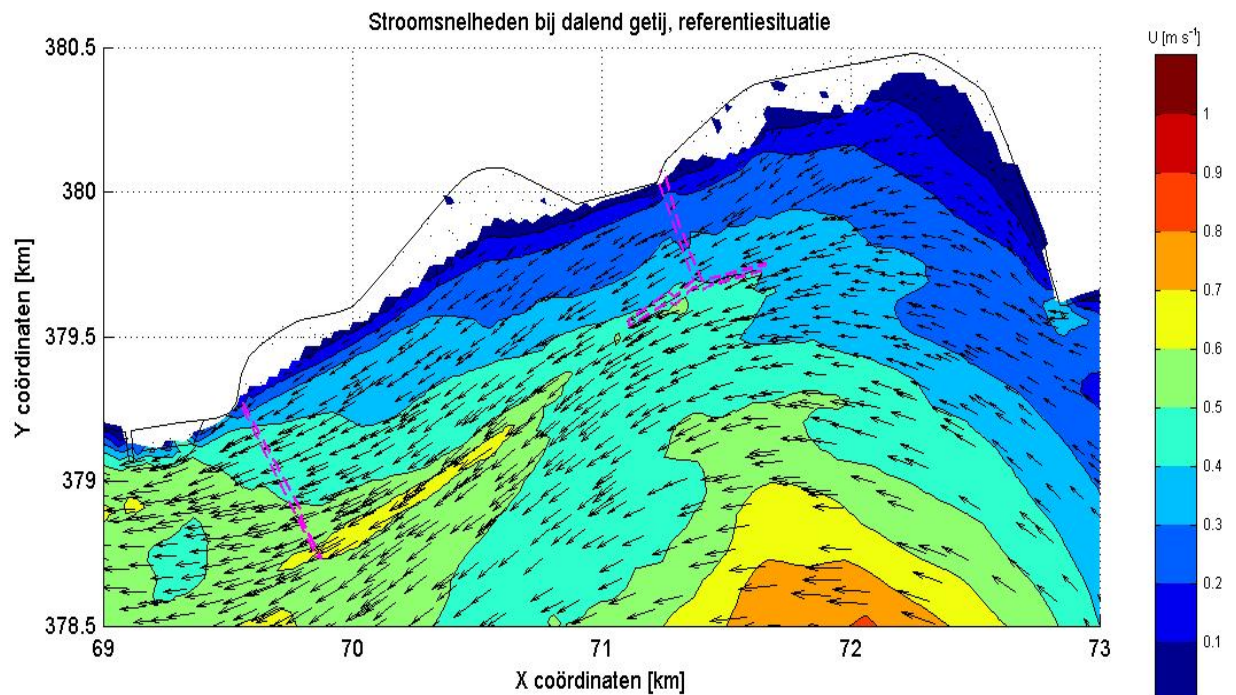
Getijstroming op zich zorgt voor transport van sediment over grotere afstanden. De invloed op de bodem is afhankelijk van de waterdiepte, stroomsnelheid en de bodemruwheid. Voor het beschouwde slik zijn de lokale stroomsnelheden zeer sterk afhankelijk van de waterdiepte en de fase van het getij. In combinatie met golven is de opwoeling van sediment aanzienlijk groter dan door alleen stroming en zal meer lokaal aan de rand van het slik erosie optreden (omdat de golven hier nog het hoogst zijn). Opgemerkt wordt dat ook een stroming kan ontstaan als gevolg van windopzet en windgolven op het slik.

De stroomsnelheden op het slik bij Bath zijn berekend met een rekenmodel¹ (zie Figuur 2.9 en Figuur 2.10). Daaruit blijkt dat de grootste stroomsnelheden optreden op het slik bij afgaand springtij. De stroomsnelheden variëren over het slik van ongeveer 0,5 m/s bij de kruin van de geulwandverdediging tot ongeveer 0,1 cm/s aan de teen van de dijk. De hoofdrichting van de stroming over het slik is min of meer parallel aan de hoofdgeul (west-oost stroming bij vloed of oost-west stroming bij eb). In de praktijk blijken vergelijkbare stroomsnelheden niet alleen bij springtij te ontstaan, maar ook na of tijdens een storm waarbij het water in de Westerschelde wordt opgestuwd.



Figuur 2.9 Diepte gemiddelde stroomsnelheden over het slik in het Nauw van Bath bij opkomend tij. De berekening is voor de huidige situatie zonder maatregelen. De mogelijke maatregel bestaande uit twee kribben is in de figuur geprojecteerd (Svasek, lit2).

1. Dit zijn berekeningen die provincie Zeeland voor dit gebied door ingenieursbureau Svasek heeft laten uitwerken voor een situatie van een slik met kribben (lit 2). Het idee achter deze studie was het ontwerpen van een maatregel waarbij de voorwaarden voor de gewenste habitat op thans ecologisch weinig waardevolle plekken (zoals veenbanken en (erosie)gebieden in de oeverzone) worden gecreëerd. De met het rekenmodel Finel berekende stroomsnelheden zijn uit dit rapport overgenomen. Opgemerkt wordt dat met een rekenmodel de stroomrichtingen en stroomsnelheden in ondiep water (dus boven het slik en het schor) niet altijd nauwkeurig worden berekend.



Figuur 2.10 Diepte gemiddelde stroomsnelheden over het slik in het Nauw van Bath bij afgaand tij. De berekening is voor de huidige situatie zonder maatregelen. De maatregel bestaat uit twee kribben die in de figuur zijn geprojecteerd (Svasek, lit. 2).

Windgolven

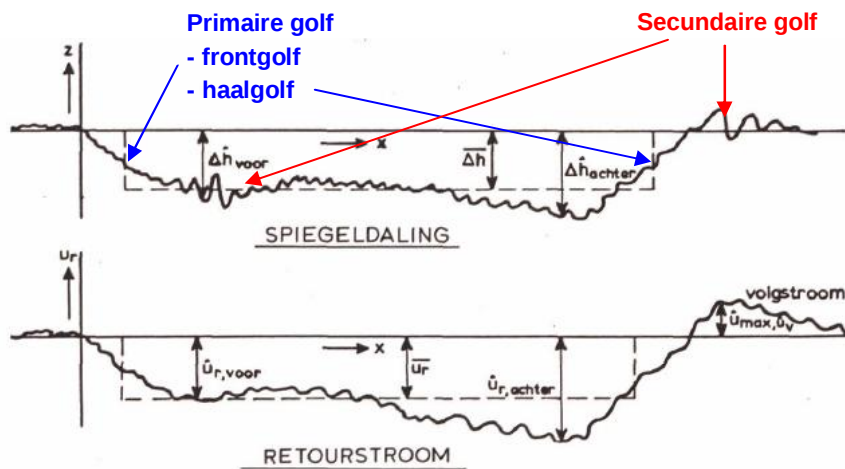
Sedimenttransport door niet-brekende golven kan worden gekarakteriseerd door de stroomsnelheden van de orbitaalbeweging dicht bij de bodem. Deze zorgen voor een repeterende tijdelijke verhoging van de bodemschuifspanningen. In principe kunnen de stroomsnelheden in de orbitaalbeweging met golftheorie worden berekend aan de hand van de golfhoogte, golfperiode en waterdiepte.

Het nauw van Bath ligt zo ver landinwaarts dat er bijna geen effect is van golven die indringen vanaf de Noordzee. Daardoor zijn alleen golven aanwezig die lokaal zijn opgewekt. Deze zijn veel lager en korter dan de deininggolven op de Noordzee. De hoogste en langste windgolven ontstaan bij de grootste strijklengte van de wind. Dat is voor het Nauw van Bath bij zuidwesten wind. Deze golven hebben met name invloed als de waterdiepte niet te groot is.

Scheepsgolven

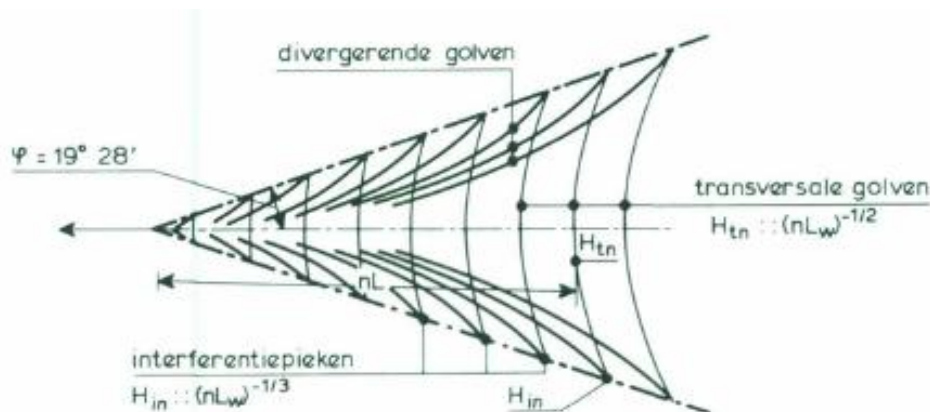
De scheepsgolven bestaan uit een primaire scheepsgolf, secundaire scheepsgolven, een schroefstraal en soms uit translatiegolven voor en achter het schip (zie Figuur 2.11).

De primaire scheepsgolf bestaat uit een retourstroom, waterspiegeldaling en een haalgolf met een taludvolgstroom. De secundaire scheepsgolven bestaan uit divergerende golven, transversale golven en interferentiepieken. In speciale situaties kunnen de interferentiepieken bij de oever samenvallen met de haalgolf.



Figuur 2.11 Schema van de primaire scheepsgolf.

De waterspiegeldaling en de haalgolf kunnen zich vanaf de kruin van de geulwandverdediging uitbreiden. Dit veroorzaakt een extra stroming waardoor de belasting op het slik groter is.



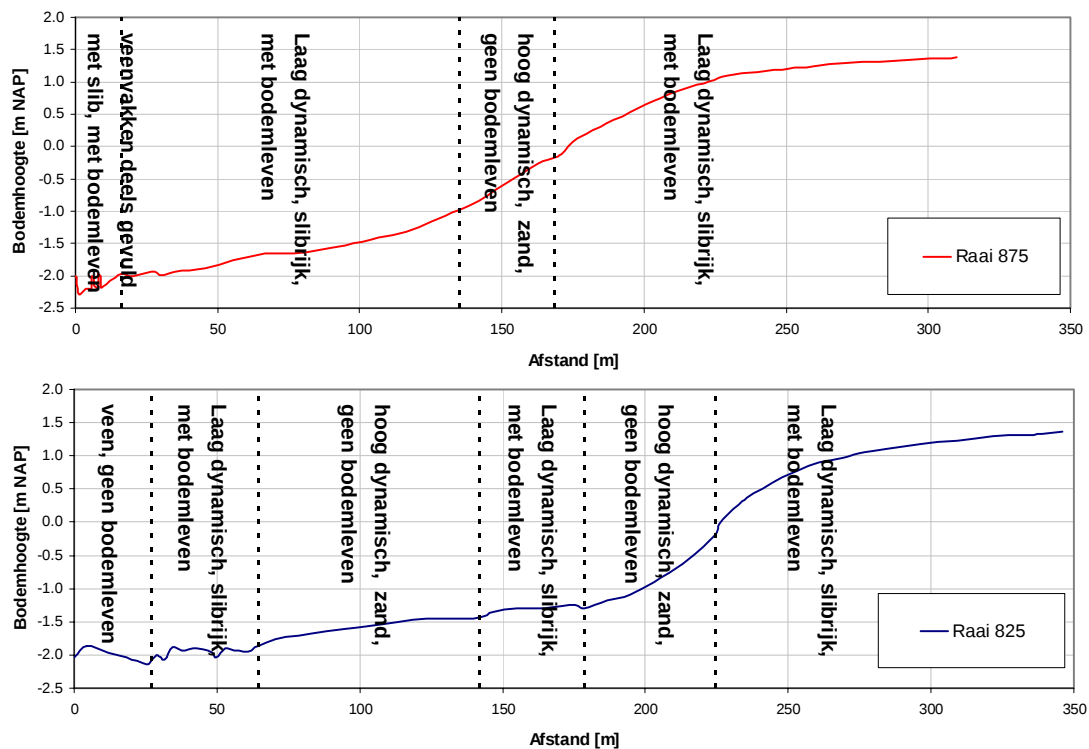
golfsysteem, veroorzaakt door een bewegende drukpiek op diep water

Figuur 2.12 Schema van de secundaire scheepsgolven.

De interferentiepieken (zie Figuur 2.12) zijn het belangrijkste onderdeel van de secundaire scheepsgolven (in relatie tot erosie van slikken). Interferentiepieken kunnen zich ver over het slik voortplanten. Bij Bath komen de schepen zeer dicht langs het slik en de golven planten zich daar voort tot aan het schor dat 400 tot 500 m van de rand van geulwandverdediging ligt (veldwaarneming april 2009). De golfperiode en hoogte van deze interferentiepieken is sterk afhankelijk van de scheepssnelheid. Hiervoor bestaan rekenregels, maar of deze valide zijn in het Nauw van Bath en de schepen die daar varen is de vraag. Dit hangt samen met de hoge snelheden waarmee de schepen door het nauw varen, 10 tot 12 knopen is eerder regel dan uitzondering. Opgemerkt wordt dat secundaire scheepsgolven zowel aan de voorzijde (boeg) als aan de achterzijde (hek) van een schip worden opgewekt. Vaak is dan ook sprake van twee groepen met interferentiegolven.

Bodem

Tijdens laag water zijn twee raaien op enkele tientallen meters van de meetinstrumenten ingemeten, waarbij tevens de samenstelling van de bodem is beoordeeld (zie Figuur 2.13). Hieruit komt naar voren dat de bodem op het slik bestaat uit veen, zand en slib.



Figuur 2.13 Ingemeten raaien en karakterisering van bodem (Rijkswaterstaat – Directie Zeeland).

Veen, zand en slib hebben een zeer verschillende weerstand tegen erosie. Veen erodeert veel langzamer dan zand en slib. Verder kan gesteld worden dat een bodem bestaande uit een combinatie van zand en slib beter bestand is tegen erosie dan een bodem met alleen zand of alleen slib.

3 Meetcampagne

3.1 Introductie

Dit hoofdstuk beschrijft globaal de meetcampagne op het slik bij Bath. Paragraaf 3.2 beschrijft de opzet van de campagne. Deze beschrijving is gebaseerd op het meetrapport 'Golf- en Stroomsnelheidsmetingen op het Slik van Bath, Juni en Juli 2010' (Nortek, 2010). In Paragraaf 3.3 worden de resultaten van de meetcampagne beschreven.

3.2 Meetcampagne

In de bocht van de Westerschelde ter hoogte van Bath zijn op het Slik op twee plaatsten metingen van stroming, golven en waterstand verricht in de periode van 14 juni 2010 tot 30 juli 2010. De ene locatie bevindt zich aan het begin van het slik net landwaarts van de geulwandverdediging. Hier is een AWAC meetinstrument geplaatst (zie Figuur 3.1). De andere locatie bevindt zich bovenaan de helling van het eroderende deel van het slik. Hier is een ADV (Acoustic Doppler Velocimetry, zie Figuur 3.2) meetinstrument geplaatst om de stroming te meten en een druk sensor voor een extra meting van de golven. In de rest van dit rapport worden deze ADV en druksensor als 'Vector' benoemd.



Figuur 3.1 AWAC (referentie: Nortek, 2010).



Figuur 3.2 VECTOR (midden ADV en rechts achter paal de druk sensor) (referentie: Nortek, 2010).

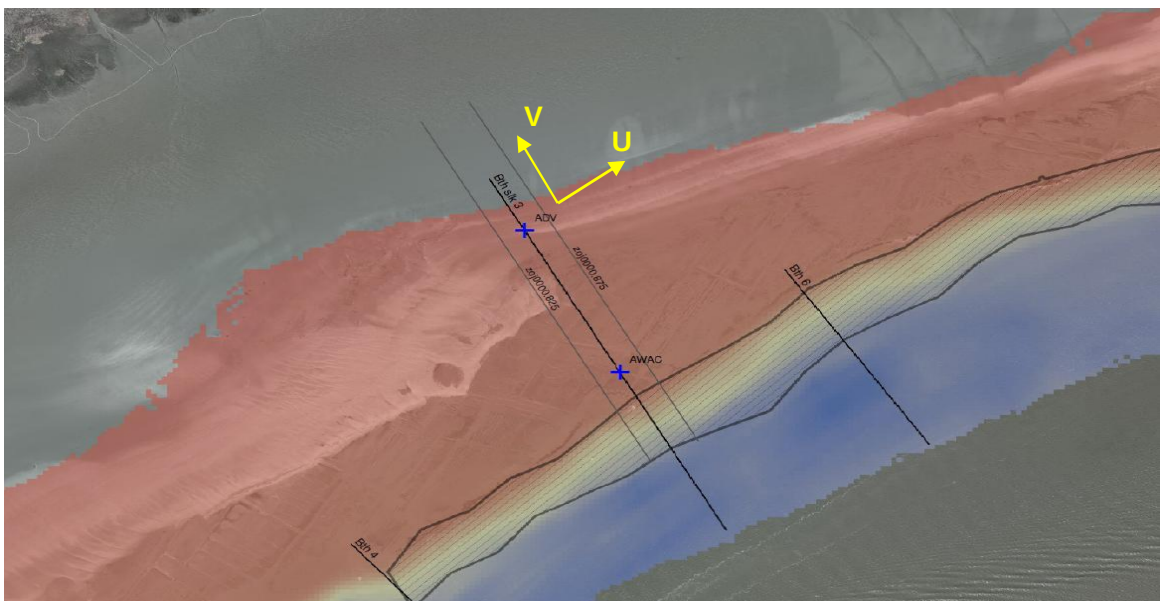
De bodem bij de AWAC en de Vector is door het veldmeetdienst van Rijkswaterstaat Dienst Zeeland gekarakteriseerd als respectievelijk 'veenvakken deels gevuld met slib met bodemleven' bij de AWAC en 'hoog dynamisch – zand - geen bodemleven' bij de Vector. In

Tabel 3.1 worden de locaties van de meetinstrumenten weergegeven.

Tabel 3.1 Coördinaten van instrumenten (referentie: Nortek, 2010).

	Oost [m RD]	Noord [m RD]	Verticale positie sensor [m NAP]	Positie maaiveld [m NAP]
Vector meet volume	70705.2	379519.0	-0.28	-0.79
Vector druk sensor	70704.4	379520.0	-0.40	-0.76
AWAC transducent	70798.6	379363.1	-1.83	-1.97

In de metingen zijn de stroomsnelheden ontbonden in een richting parallel aan de vaargeul (u-richting) en dwars op de vaargeul (v-richting). Dit wordt in Figuur 3.3 geïllustreerd.



Figuur 3.3 Locatie van de meetpunten op het slik (AWAC en ADV) (referentie: Nortek, 2010).

Door Rijkswaterstaat Dienst Zeeland is op 29 juli een validatie meetcampagne uitgevoerd, waarbij de stroomsnelheden vanaf een schip zijn gemeten over een dwarsraai van het slik. Deze metingen zijn uitgevoerd om te controleren of de gemeten stroomsnelheden bij de AWAC en de Vector representatief zijn voor hun omgeving (verwerkte gegevens zijn nog niet opgeleverd).

De meetcampagne omvatte behalve het meten van hydrodynamische parameters ook nog de volgende aspecten:

- Herleiden van karakteristieke parameters van de scheepsgolven uit de metingen.
- Het aanleveren van klimatologische data (wind data van het KNMI).
- Het aanleveren van hydrodynamische data bij het meetpunt Bath (RWS data).
- Het aanleveren van gegevens over passerende schepen (IVS database).

3.3 Resultaten

De gemeten golf- en stroomsnelheden zijn digitaal beschikbaar gesteld door Nortek [5]. In Tabel 3.2 wordt het gemiddelde en de standaardafwijking weergegeven van de gemeten windgolven en stroomsnelheden tijdens de meetcampagne.

Tabel 3.2 Statistische eigenschappen golfparameters en stroomsnelheden (Nortek, 2010).

Tabel 3.1: Statistische Eigenschappen Golfparameters en Stroomsnelheden¹⁾.

	Symbool	Eenheid	AWAC ³⁾		Vector ³⁾		Rijkswaterstaat ³⁾	
			gemiddeld	maximum	gemiddeld	maximum	gemiddeld	maximum
Golfperiode²⁾	T_p	[s]	3.0 ± 1.1	10.0	3.8 ± 0.9	9.7	3.0 ± 1.5	33.3
	T_{m01}		2.3 ± 0.5	7.5	3.3 ± 0.5	6.3	3.6 ± 0.5	7.6
	T_{m02}		2.1 ± 0.4	6.7	2.9 ± 0.5	5.5	2.0 ± 0.3	7.1
Golfhoogte²⁾	H_{m0}	[m]	0.1 ± 0.1	1.0	0.0 ± 0.0	0.2	0.1 ± 0.1	0.6
	$H_{1/3}$		0.1 ± 0.3	1.1	n.v.t.		0.1 ± 0.1	0.6
Stroomsnelheden²⁾	u	[m/s]	0 ± 0	-1.6 / 1.4	-0.1 ± 0.1	-1.6 / 1.6	n.v.t.	
	v		0 ± 0.1	-1.9 / 1.1	-0.1 ± 0.1	-1.2 / 1.8		
	z		0 ± 0	-0.4 / 0.4	0 ± 0	-0.3 / 0.4		
Waterstand⁴⁾	h	[m] NAP	1.3 ± 1.1	3.6	1.9 ± 0.8	3.4	0.1 ± 1.6	3.4

Noot 1) Waarden zijn berekend met de data gepresenteerd in Bijlage I.

Noot 2) Waarden bestaan uit een gemiddelde plus of min een standaardafwijking.

Noot 3) Meetperiode 29 juni tot 30 juli.

Noot 4) Voor de AWAC en de Vector wordt de ondergrens bepaald door de hoogte ligging van de instrumenten.

De eigenschappen van alle schepen die in de meetperiode waarin beide instrumenten geïnstalleerd waren (29 juni 2010 tot 30 juli 2010) zijn langs gekomen worden in Tabel 3.3 samengevat. De klasse met de schepen tot 100 meter bestaat uit 20 door Nortek geselecteerde schepen. De twee andere klassen bestaan uit 21 door Nortek geselecteerde schepen.

Tabel 3.3 Statistische eigenschappen totale populatie (Nortek, 2010).

Tabel 3.2: Statistische Eigenschappen Totale Populatie¹⁾.

	< 100 m	100 m – 200 m	> 250 m
Gemiddelde Lengte	86 ± 16	147 ± 31	296 ± 29
Gemiddelde Breedte	13 ± 3	23 ± 5	37 ± 6
Gemiddelde Diepgang	5 ± 1	7 ± 2	12 ± 1
Gemiddelde Snelheid	12 ± 3	13 ± 3	14 ± 2
Meest Voorkomend Type	Vrachtschip Algemeen	Containerschip	Containerschip
Totale Populatie²⁾	718	1117	229

Noot 1) Waarden bestaan uit een gemiddelde plus of min een standaardafwijking.

Noot 2) Alleen zeevaart klasse is meegenomen in deze beschouwing.

De eigenschappen van de scheepsgolven zijn door Nortek geanalyseerd voor 62 scheepspassages. De scheepspassages zijn zodanig geselecteerd dat er een gelijk aantal (ongeveer twintig) schepen in elk van de lengte klassen is.. De statistische eigenschappen van deze schepen worden in Tabel 3.4 weergegeven. Merk op dat de geselecteerde schepen net iets groter zijn én sneller varen dan gemiddeld voor de schepen in de beschouwde klassen.

Tabel 3.4 Statistische eigenschappen geselecteerde scheepspassages (Nortek, 2010).

Tabel 3.3: Statistische Eigenschappen Geselecteerde Scheepspassages¹⁾.

	< 100 m	100 m – 200 m	> 250 m
Gemiddelde Lengte	91 ± 6	167 ± 25	314 ± 29
Gemiddelde Breedte	14 ± 1	26 ± 4	39 ± 6
Gemiddelde Diepgang	5 ± 1	8 ± 2	12 ± 1
Gemiddelde Snelheid	13 ± 2	16 ± 3	14 ± 2
Meest Voorkomend Type	Goederenschip	Goederenschip	Containerschip
Totale Populatie²⁾	20	21	21

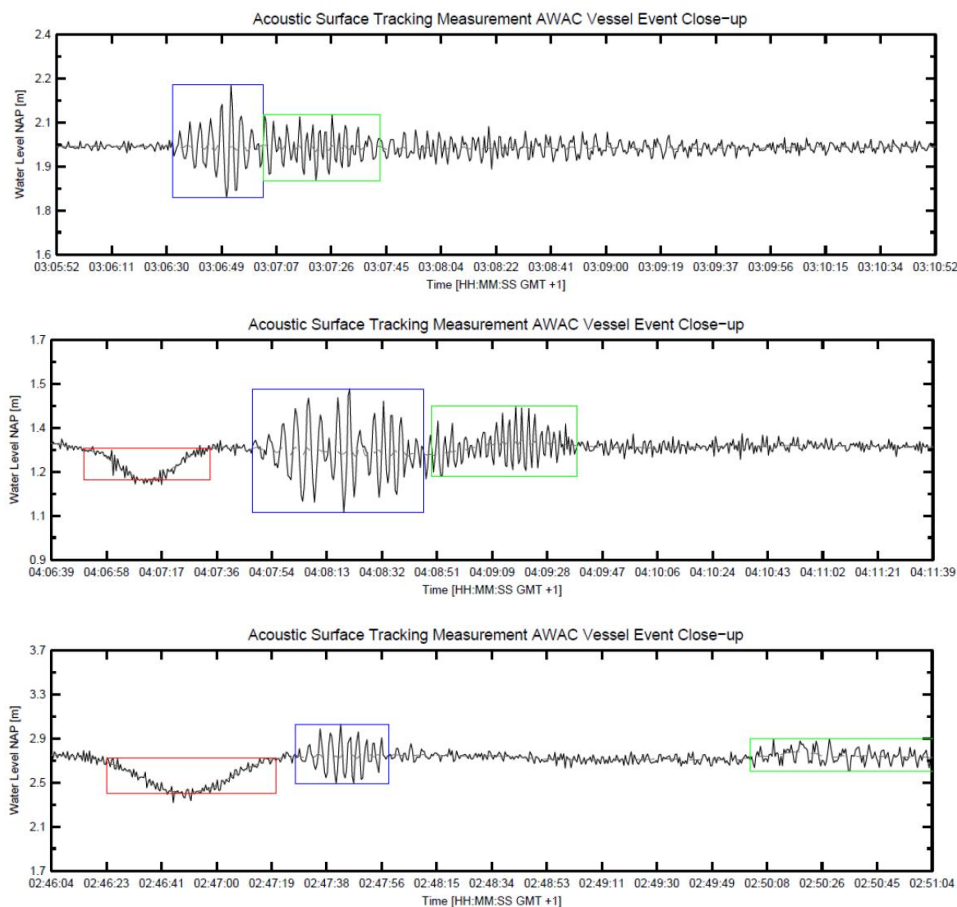
Noot 1) Waarden bestaan uit een gemiddelde plus of min een standaardafwijking.

Noot 2) Alleen zeevaart klasse is meegenomen in deze beschouwing.

De eigenschappen van de scheepsgolven bij Bath kunnen gekarakteriseerd worden middels drie fases van de scheepsgolven:

- Waterstandsaling, verder aangeduid als “Primary”.
- Boeggolf, verder aangeduid als “Secondary 1”.
- Hekgolf, verder aangeduid als “Secondary 2”.

Voor elk van de geselecteerde scheepspassages is de periode en hoogte bepaald van deze drie fases. De hoogten zijn bepaald door het minimum en maximum te nemen binnen de periode waarin het fenomeen voorkomt. Bij de waterstandsaling is hier een convolutie filter van twintig data punten voor gebruikt om invloeden van windgolven niet mee te nemen. De periode van de waterstandsaling wordt hier gedefinieerd als het begin van de daling tot het moment van een maximum na de daling. Doordat de waterstandsaling soms kleiner is dan een paar centimeter, is de bepaalde duur van daling in die gevallen niet meer dan een ruwe schatting. De perioden van de boeg- en hekgolf worden bepaald door in het energie spectrum van de de boeg- of hekgolf de eerste piek uit te rekenen met een periode kleiner dan 10 seconden. Door deze ondergrens te hanteren wordt vermeden dat ongewild de duur van de waterstandsaling wordt verward met de perioden van de boeg- en hekgolf. Het begin en het einde van de boeg- en hekgolf worden visueel bepaald.



Figuur 3.4 Primaire en secundaire scheepsgolven in de gemeten golfsignalen voor drie lengte klassen van schepen (Boven : $L_{\text{schip}} < 100\text{m}$. Midden : $100\text{m} < L_{\text{schip}} < 200\text{m}$. Onder : $L_{\text{schip}} > 250\text{m}$). Het rode vak omvat de primaire golf en het blauwe en groene vak de secundaire golven (boeg- en hekgolf).

De eigenschappen van de scheepsgolven zijn door Nortek (2010) bepaald voor 62 geselecteerde schepen. In Tabel 3.5 worden de eigenschappen van de scheepsgolven voor elk van de drie lengte klassen weergegeven (gemiddelde waarde en de standaardafwijking). Tevens worden de gemeten minimale en maximale stroomsnelheden in drie richtingen weergegeven (u is parallel aan de geul, v loodrecht op de geul en z de snelheid in de verticaal).

Tabel 3.5 Statistische eigenschappen scheepvaart golfkarakteristieken
(referentie: Nortek, 2010).

		< 100 m		100 m – 200 m		> 250 m	
		AWAC	Vector	AWAC	Vector	AWAC	Vector
T_{primary}	[s]	14.85 ± 17.82	13.08 ± 17.00	40.48 ± 10.41	40.60 ± 7.31	64.81 ± 11.51	64.36 ± 12.60
H_{primary}	[m]	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.10 ± 0.06	0.10 ± 0.06	0.27 ± 0.10	0.34 ± 0.17
$T_{\text{secondary 1}}$	[s]	3.36 ± 0.61	3.62 ± 0.50	4.32 ± 0.95	4.45 ± 0.94	2.93 ± 0.53	3.36 ± 0.65
$H_{\text{secondary 1}}$	[m]	0.36 ± 0.14	0.14 ± 0.06	0.51 ± 0.12	0.24 ± 0.08	0.53 ± 0.17	0.24 ± 0.12
$T_{\text{secondary 2}}$	[s]	3.26 ± 1.04	3.78 ± 0.75	3.72 ± 1.46	3.98 ± 1.38	2.84 ± 0.81	3.74 ± 1.09
$H_{\text{secondary 2}}$	[m]	0.23 ± 0.06	0.10 ± 0.03	0.30 ± 0.10	0.14 ± 0.06	0.28 ± 0.08	0.13 ± 0.06
$u_{\text{s max}}^{2)}$	[m/s]	0.45 ± 0.15	0.13 ± 0.04	0.43 ± 0.11	0.16 ± 0.07	0.59 ± 0.18	0.53 ± 0.31
$u_{\text{s min}}^{2)}$		-0.45 ± 0.13	-0.10 ± 0.04	-0.41 ± 0.11	-0.15 ± 0.06	-0.48 ± 0.18	-0.42 ± 0.27
$v_{\text{s max}}^{2)}$		0.44 ± 0.12	0.16 ± 0.05	0.40 ± 0.12	0.28 ± 0.11	0.53 ± 0.22	0.41 ± 0.24
$v_{\text{s min}}^{2)}$		-0.42 ± 0.13	-0.16 ± 0.06	-0.43 ± 0.11	-0.26 ± 0.11	-0.60 ± 0.25	-0.48 ± 0.24
$z_{\text{s max}}^{2)}$		0.15 ± 0.05	0.03 ± 0.03	0.14 ± 0.03	0.03 ± 0.04	0.14 ± 0.04	0.08 ± 0.07
$z_{\text{s min}}^{2)}$		-0.12 ± 0.04	-0.03 ± 0.04	-0.12 ± 0.05	-0.05 ± 0.05	-0.14 ± 0.07	-0.08 ± 0.06

Noot 1) Waarden bestaan uit een gemiddelde plus of min een standaardafwijking.

Noot 2) Waarden zijn bepaald door de het gemiddelde van de burst af te trekken van de minima en de maxima in de burst.

4 Analyse beschikbare data

4.1 Introductie

In dit hoofdstuk wordt de beschikbare data geanalyseerd. Dit betreft een beschouwing van de optredende hydraulische condities tijdens de meetcampagne en de representativiteit hiervan (Paragraaf 4.2). Tevens wordt gekeken of de karakteristieken van de 62 geselecteerde schepen (afmetingen en snelheid) representatief zijn voor de karakteristieken van alle tijdens de meetcampagne gepasseerde schepen (Paragraaf 4.3). Tenslotte beschrijft Paragraaf 4.4 de optredende scheepsgolven tijdens de meetcampagne op basis van de gemeten stroming en golven bij de 62 geselecteerde scheepspassages.

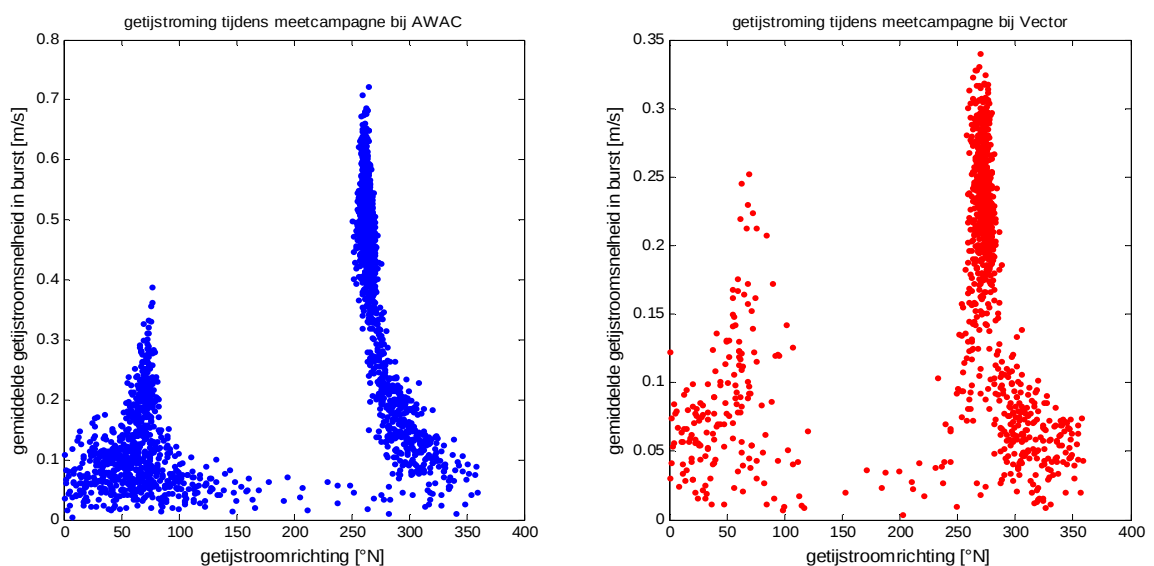
4.2 Hydraulische condities

In deze paragraaf wordt geïnventariseerd wat de hydraulische condities (als gevolg van getij en windgolven) waren voor de beschouwde meetperiode. Achtereenvolgens wordt het volgende beschouwd:

- Globaal beeld van hydraulische condities tijdens de meetcampagne.
- representativiteit van de condities bij de 62 geselecteerde scheepspassages (62x 17 minuten data) voor de hydraulische condities tijdens de gehele meetcampagne (periode van 14 juni 2010 tot en met 30 juli 2010).
- representativiteit van de meetcampagne voor langjarige hydraulische omstandigheden.

Globaal beeld hydraulische condities tijdens meetcampagne

De stroomsnelheden als gevolg van getij waren bij de AWAC in de orde van 0 tot 0.7 m/s en bij de Vector tussen de 0 en de 0.34 m/s (zie Figuur 4.1). In Figuur 4.1 wordt de gemiddelde stroming tijdens elk van de 17 minuten bursts tijdens de meetcampagne voor beide locaties weergegeven. Opgemerkt wordt dat de invloed van schepen op de gemiddelde stroomsnelheden hier nog in zit, maar verwacht wordt dat deze invloed klein is.



Figuur 4.1 Gemiddelde getijstroming en richting bij Vector en AWAC gedurende meetcampagne (richting waarheen water stroomt; 90°N is naar het oosten).

Uit de metingen op het slik bij het nauw van Bath komt naar voren dat de stroomsnelheden duidelijk asymmetrisch zijn over het getij. Dit komt overeen met de modeluitkomsten van SVASEK (zie Figuur 2.9 en Figuur 2.10) en wordt dus bevestigd in de metingen. Vlak achter de geulwandverdediging (locatie AWAC) is de maximale stroming ten gevolge van het getij in westelijke richting aanzienlijk groter dan in oostelijke richting. Op 230 meter van de geulwandverdediging (locatie Vector) is de maximale stroming in westelijke richting ook groter dan in oostelijke richting en komt een stroming in westelijke richting aanzienlijk meer voor. Blijkbaar is de waterstand nog te laag tijdens opkomend tij (stroming uit het Westen) om invloed te hebben bij de Vector.

Representativiteit van condities tijdens 62 scheepspassages voor meetcampagne

De omgevingsvariabelen kunnen in een beperkte set condities worden vervat door de hydraulische omstandigheden tijdens een burst (i.e. 17 minuten meting) te classificeren op basis van de gemiddelde waterstand (door getij), stroomsnelheid (als gevolg van getij) en golfhoogte (windgolven). Ten behoeve hiervan zijn de volgende klassen toegepast:

- Waterstand
 - lage waterstand : < 0.5 m NAP,
 - gemiddelde waterstand : 0.5 tot 2 m NAP
 - hoge waterstand : > 2 m NAP)
- Stroomsnelheid
 - lage stroomsnelheid : < 0.3 m/s
 - hoge stroomsnelheid : > 0.3 m/s
- Golfhoogte windgolven
 - lage golven : < 0.3 m
 - hoge golven : > 0.3 m

Elk van de gemeten bursts (tijdens de 46 dagen durende meetcampagne) wordt dus in één van de 12 resulterende klassen meegeteld (3 waterstandsklassen x 2 stroomsnelheidsklassen x 2 golfhoogteklassen). Dit resulteert voor de AWAC en de Vector in een beperkt aantal condities (zie Tabel 4.1 en Tabel 4.2). Merk op dat een aantal combinaties van hydraulische condities bij de Vector niet voorkomt (zoals hoge golven of stroomsnelheden bij laag water). De golven zijn dan beperkt door de waterdiepte.

Ook de relatieve duur van de condities is bepaald door het aantal bursts binnen een bepaalde klasse te tellen. Op deze manier krijgen we een beeld van het voorkomen van specifieke hydraulische omstandigheden. Als vergelijking wordt ook de relatieve duur van hydraulische condities tijdens de gehele meetcampagne tijdens de 62 geselecteerde scheepspassages weergegeven.

Tabel 4.1 Classificatie van omgevingscondities op 230m van geulwandverdediging (bij AWAC).

Conditie	Parameters voor totale meetcampagne (46 dagen)						62 schepen*
	Waterniveau [m]	Stroom- snelheid [m/s]	Golfhoogte [m]	Golfperiode [s]	Gebeurte- nissen [#]	Duur [%]	Duur [%]
1 **	-0.2	0.07	0.1	3.1	370	18.5%	9.7%
2	0.0	0.07	0.3	4.7	3	0.2%	0.0%
3	-0.1	0.55	0.1	3.6	279	14.0%	3.2%
4	0.2	0.59	0.3	3.6	3	0.2%	0.0%
5	1.2	0.16	0.1	3.0	303	15.2%	24.2%
6	0.8	0.12	0.8	7.0	3	0.2%	0.0%
7	1.2	0.47	0.1	2.9	398	19.9%	30.6%
8	1.2	0.53	0.4	3.2	13	0.7%	1.6%
9	2.6	0.16	0.1	2.8	516	25.9%	25.8%
10	3.0	0.20	0.4	3.2	9	0.5%	1.6%
11	2.3	0.40	0.1	2.8	90	4.5%	3.2%
12	2.4	0.45	0.3	2.6	9	0.5%	0.0%

* Voorkomen van hydraulische condities bij de 62 geselecteerde scheepspassages

** Conditie 1 voor de AWAC kan bijvoorbeeld gekarakteriseerd worden als 'lage waterstand, met lage stroomsnelheid en lage golfhoogte' wat bij 370 bursts het geval was (dat is 18.5% van de tijd). De gemiddelde golfhoogte voor alle bursts in klasse 1 was 0.1m en de gemiddelde periode 3.14 seconde. Deze conditie komt relatief minder voor bij de 62 geselecteerde schepen dan tijdens de totale meetcampagne.

Tabel 4.2 Classificatie van omgevingscondities op 230m van geulwandverdediging (bij Vector).

Conditie	Parameters voor totale meetcampagne (46 dagen)						62 schepen*
	Waterniveau [m NAP]	Stroom- snelheid [m/s]	Golfhoogte [m]	Golfperiode [s]	Gebeurte- nissen [#]	Duur [%]	Duur [%]
1	0.16	0.11	0.06	3.69	246	21.8%	14.5%
2	1.25	0.17	0.05	3.87	476	42.2%	54.8%
3	1.36	0.31	0.05	3.96	27	2.4%	4.8%
4	2.45	0.19	0.03	3.80	370	32.8%	25.8%
5	2.69	0.31	0.04	3.84	9	0.8%	0.0%

* Voorkomen van hydraulische condities bij de 62 geselecteerde scheepspassages.

De hydraulische condities tijdens de 62 geselecteerde scheepspassages komen in redelijke mate overeen met de condities tijdens de gehele meetcampagne (vergelijk duur voor 62 schepen en tijdens hele meetcampagne). Alleen condities met laag water (waterstand lager dan NAP-0.5m) komen aanzienlijk minder voor bij de 62 scheepspassages. De reden hiervoor is dat minder goed gemeten kan worden bij waterstanden onder NAP-0.5m.

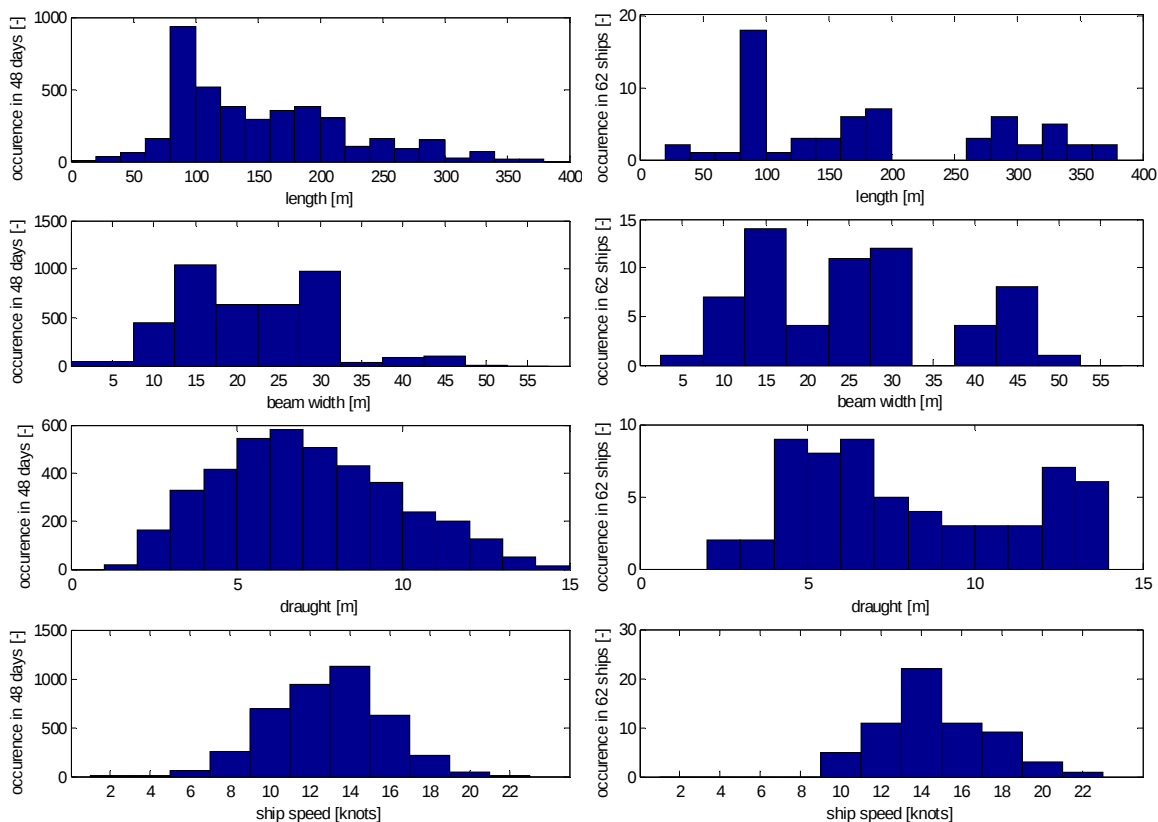
Representativiteit van de meetcampagne voor langjarige hydraulische omstandigheden

Verondersteld wordt dat de stromingscondities tijdens de meetcampagne redelijk representatief zijn voor de lange termijn, omdat de campagne langer is dan een springtijdoodtij cyclus. Voor de golven is dit echter niet zo vanzelfsprekend, aangezien er gemeten is in de zomerperiode bij lage windsnelheden. Verwacht mag worden dat het golfklimaat tijdens de meetcampagne iets rustiger was dan gemiddeld.

4.3 Schepen

4.3.1 Histogrammen schepen

Om te beoordelen of de 62 geselecteerde schepen representatief zijn voor de schepen op Westerschelde zijn de eigenschappen van deze schepen vergeleken met de eigenschappen van de schepen die in de gehele meetperiode zijn gepasseerd (periode van 14 juni 2010 tot en met 30 juli 2010). De verdeling van de afmetingen en snelheid van de schepen wordt grafisch weergegeven in Figuur 4.2. Hiervoor zijn de geïnventariseerde scheepsdata (IVS data) van Nortek (2010) gebruikt. Opgemerkt dient te worden dat bepaalde schepen in deze periode meerdere malen langs het meetpunt zijn gevaren en daarom ook meerdere malen zijn meegenomen in deze analyse.

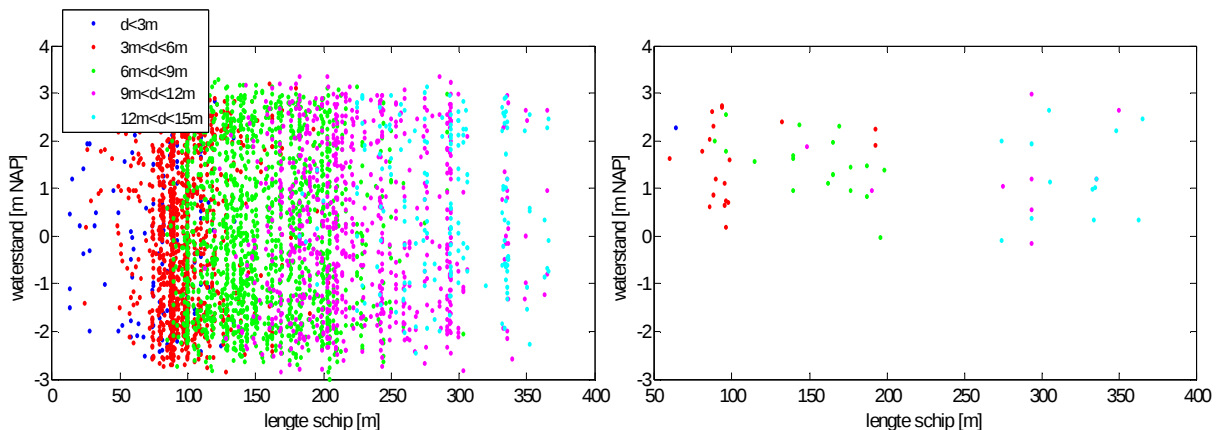


Figuur 4.2 Verdeling van de afmetingen van de schepen die bij Bath passeerden tijdens de volledige meetcampagne (links) en voor de 62 geselecteerde scheepspassages (rechts).

Over de gehele meetcampagne is er een vrij gelijkmatige verdeling van de eigenschappen van de schepen te zien. Alleen de schepen met een breedte van 32 meter zijn opvallend veel vertegenwoordigd. Deze schepen hebben de breedte van een Panamax klasse schip (kleiner dan 32,3 meter). Als alleen naar de 62 geselecteerde schepen wordt gekeken dan valt op dat deze 62 schepen de uitersten van lengte, breedte en diepgang vrij goed worden meegenomen. Er is echter wel een oververtegenwoordiging van relatief grote schepen ($L > 300$ m, $B > 40$ m en $D > 12$ m). Dit is echter nuttig omdat voor deze schepen de grootste scheepsgolven worden verwacht.

Ook de snelheid van de 62 geselecteerde schepen is gemiddeld iets hoger dan voor de totale set met schepen die tijdens de meetcampagne zijn gepasseerd. Merk op dat de schepen met een lengte tussen de 200 en 250 meter ontbreken, omdat hiervoor geen klasse is gedefinieerd. De uitersten van de verdeling worden echter voldoende gedekt, waardoor dit geen effect heeft op de representativiteit van de 62 scheepspassages.

Beschouwd is ook of de schepen specifiek tijdens bepaalde waterstanden varen (Figuur 4.3). Uit deze figuur komt naar voren dat de scheepspassages tijdens de meetcampagne vrij gelijkmatig verdeeld lijken te zijn over de verschillende optredende waterstanden (linker figuur). Dit betekent dat de grote schepen niet alleen bij hoog water passeren, zoals vooraf werd aangenomen. De 62 geselecteerde schepen passeren het slik bij Bath allemaal tijdens een waterstand van tenminste NAP-0.5m (rechter figuur). Dit is logisch omdat de AWAC en Vector bij lagere waterstanden niet kunnen meten. De waterstanden tussen NAP-2m en NAP-0.5m zijn potentieel echter wel interessant voor de belastingen op het slik ter plaatse van de AWAC.



Figuur 4.3 *Lengte en diepgang van passerende schepen bij Bath uitgezet tegen de lokale waterstand bij meetpunt Bath tijdens de meetcampagne. Alle schepen die gepasseerd zijn staan in de linker figuur en de 62 geselecteerde scheepspassages staan in de rechter figuur.*

4.4 Scheepsgolven

4.4.1 Meetgegevens scheepsgolven

In deze paragraaf wordt toegelicht welke aspecten opvallen in de 62 meetsignalen met scheepsgolven (Paragraaf 4.4.2). Tevens is gezocht naar relaties tussen afmetingen en snelheid van schepen en de optredende scheepsgolven (Paragraaf 4.4.3).

4.4.2 Interpretatie meetgegevens

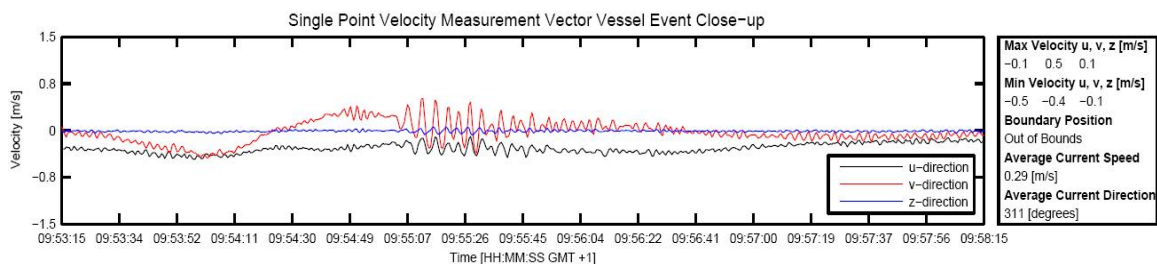
Uit de gemeten golven bij de AWAC (30 meter van geulwandverdediging) en de VECTOR (230 meter van geulwandverdediging) is door Nortek afgeleid wat de eigenschappen van de primaire en secundaire golven zijn. Tevens kunnen uit de metingen andere aspecten worden afgeleid die van invloed kunnen zijn voor de erosie in het gebied. De volgende aspecten worden onderscheiden:

- Eigenschappen primaire golven.
- Eigenschappen secundaire golven.
- Optreden van 'bores' (steil golffront).
- Stroming langs het kanaal als gevolg van de primaire golven.

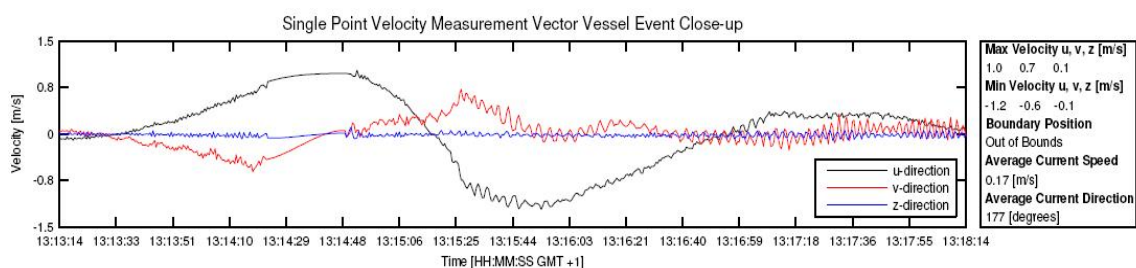
De primaire golven van schepen zijn eigenlijk alleen van significante grootte voor grotere schepen met een grotere lengte dan 150 meter. De periode van de primaire golf verandert vrijwel niet over het slik. Schepen tot 100 meter hebben vrijwel geen primaire golf ($< 0,05$ m). Schepen tussen de 100 en 200 meter hebben een primaire golf die varieert tussen 0 en 0,30 meter en heeft een periode van ongeveer 40 seconde. De hoogste primaire golven horen bij de langste schepen in deze klasse (orde 190 meter) met een behoorlijke diepgang (diepgang ≥ 9 m). De gemeten grotere schepen (lengte > 250 m) hebben een primaire golf die varieert tussen 0.1 en 0.8 meter.

De secundaire golven (boeg- en hekgolf) van de 62 geselecteerde schepen zijn bij vrijwel alle schepen aanwezig. De eigenschappen van deze secundaire golven zijn afhankelijk van de scheepssnelheid en de afmetingen/vorm van het schip. Qua golfhoogte zijn de secundaire golven voor de drie lengte klassen vergelijkbaar (variërend tussen 0.1 en 1 meter). De golfperiode is voor de grotere schepen echter groter (volgens $v = \sqrt{g\lambda/2\pi}$), waardoor de secundaire golf van een groot schip verder doordringt over het slik. De golflengte van de boeg- en de hekgolf verandert over het slik. Bij de Vector zijn de hoogte en periode van de secundaire golven daarom te relateren aan de afmetingen en snelheid van het schip. In het vervolg van deze studie wordt enkel de boeggolf ($H_{\text{secundair},1}$) beschouwd, omdat deze in vrijwel alle gevallen groter is dan de hekgolf ($H_{\text{secundair},2}$).

Voor een paar van de (grotere) schepen is er naast de primaire golf dwars op de vaarrichting (in v-richting) ook een primaire golf parallel aan de vaarrichting (in u-richting). Een situatie met én zonder deze stroming parallel aan de vaarrichting wordt in Figuur 4.4 en Figuur 4.5 weergegeven.

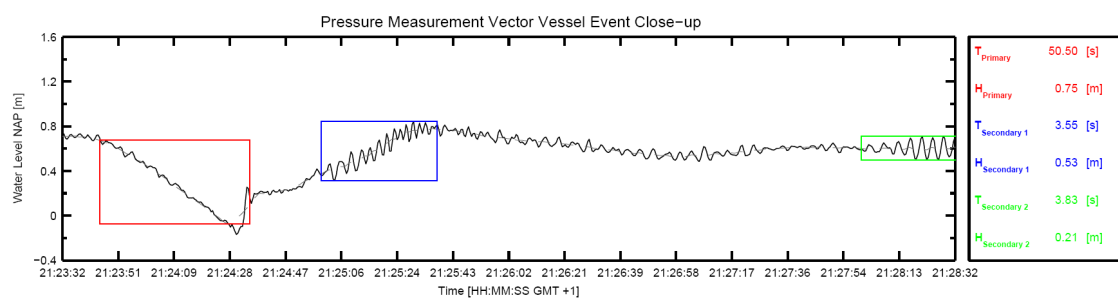


Figuur 4.4 Stroming bij Vector tijdens passeren van schip zonder significant effect op stroming parallel aan de vaargeul (u-richting). Dit geldt voor de meeste schepen die korter dan 200 meter zijn.



Figuur 4.5 Stroming bij Vector tijdens passeren van schip met significant effect op stroming parallel aan de vaargeul (u-richting). Dit geldt voor de meeste schepen die langer dan 250 meter zijn.

Ter plaatse van de Vector werd bij een aantal grote schepen een 'bore' (zeer steil golffront) waargenomen (zie Figuur 4.6). Een 'bore' is een golf met een steil golffront en hoge turbulentie die zich met hoge snelheid over het slik verplaatst. Dit verschijnsel kan optreden bij zeer lange golven als de golfhoogte over waterdiepte verhouding (H_s/d) groter is dan 0.15 en is in de metingen in vrijwel alle gevallen waargenomen als de H_s/d verhouding groter is dan 0.2. Bij de AWAC is geen echte 'bore' waargenomen, omdat de AWAC niet meer kan meten bij de waterstanden waarop op deze locatie een 'bore' valt te verwachten (AWAC kan slechts meten als er een minimale waterdiepte van 1.5 meter is). Het wordt echter verwacht dat er wel een bore kan optreden bij de AWAC als de waterstand lager is. Het is echter mogelijk dat ook op het slik dicht bij de geulwandverdediging een 'bore' kan optreden.



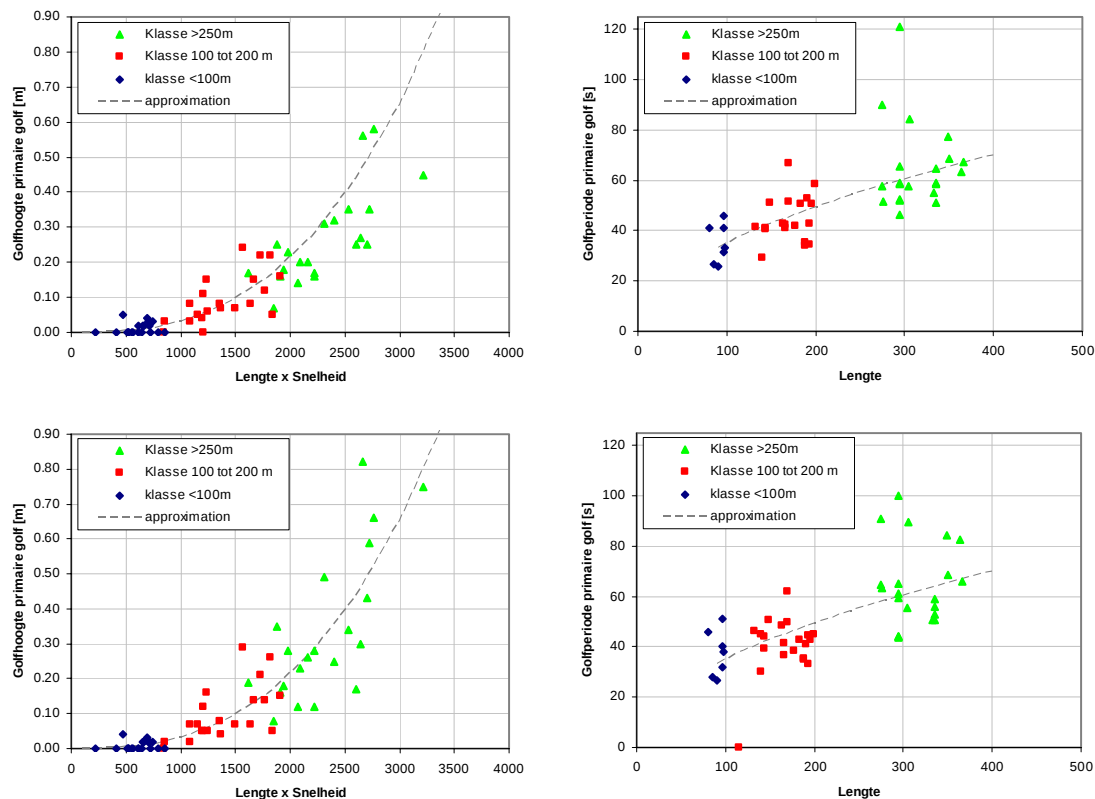
Figuur 4.6 Optreden van Bore na waterstandsval door primaire golf.

4.4.3 Relatie tussen karakteristieken van schepen en scheepsgolven

In deze paragrafen wordt de relatie tussen de karakteristieken en de scheepsgolven als gevolg van deze schepen beschouwd. Belangrijke karakteristieken van de schepen zijn afmetingen (lengte, breedte en diepgang) en snelheid. Deze relaties geven een algemene indruk van de parameters die een rol spelen bij het ontstaan van deze golven. De relaties zijn alleen geldig voor dit gebied, aangezien de vorm van de vaargeul, de route van het schip en de lokale stroming een belangrijke rol spelen. Opgemerkt dient te worden dat de afmetingen van het schip (lengte, breedte en diepgang) niet onafhankelijk van elkaar zijn, en een relatie met de lengte impliciet ook een indirecte relatie is met de andere afmetingen van het schip.

Als eerste is gezocht naar een relatie tussen de gemeten primaire golven en de karakteristieken van de passerende schepen (zie Figuur 4.7). De beste relatie met de hoogte van de primaire golf werd gevonden (middels een iteratieve analyse) door deze te koppelen met de lengte en de snelheid van het schip. Voor de golfperiode werd de meeste correlatie met de lengte van het schip gevonden. Dit zijn geen generieke relaties, maar impliceren wel dat deze parameters relevant zijn voor primaire golven.

Uit de vergelijking van de primaire golven bij de AWAC en de Vector komt naar voren dat de golfhoogte en golfperiode redelijk vergelijkbaar zijn. In een aantal gevallen is er sprake van shoaling (korter worden van de golflengte) waardoor de golven bij de Vector hoger zijn dan bij de AWAC.

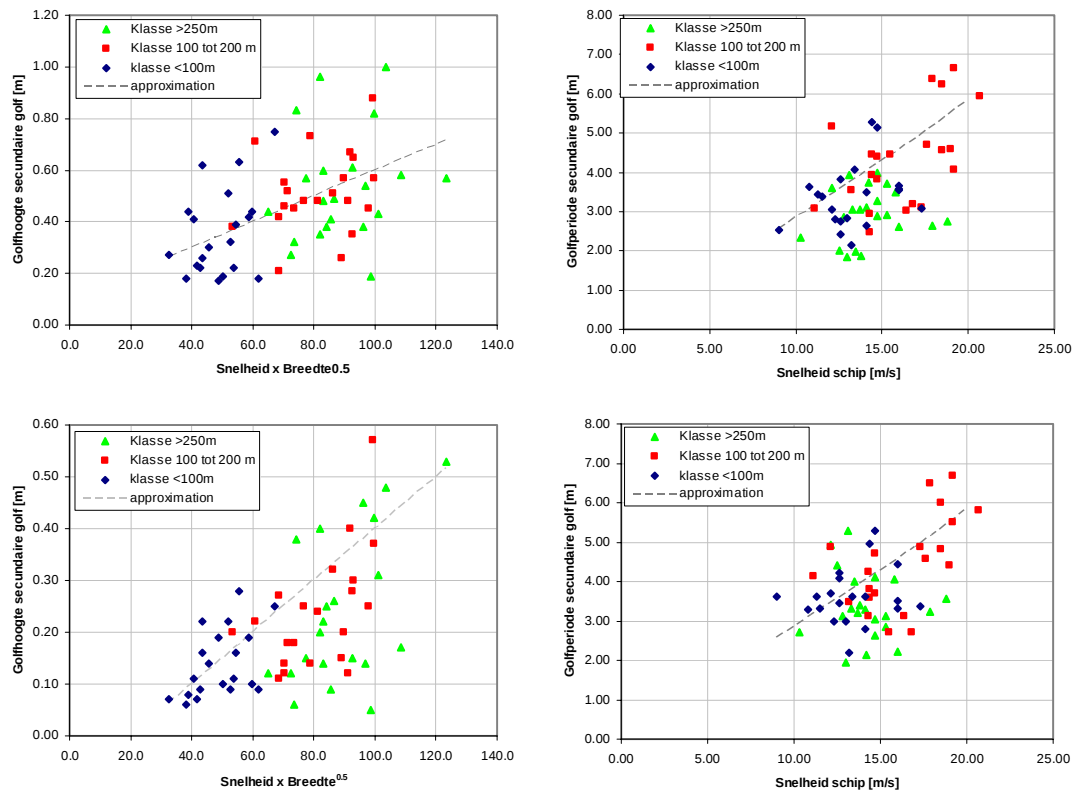


Figuur 4.7 Primaire scheepsgolven in de gemeten golfsignalen voor de 62 geselecteerde schepen (boven: AWAC; onder: Vector). Grize lijn geeft de trendlijn door de data voor de golp hoogte van de secundaire golf in de linker figuren en de benaderde theoretische golpperiode in de rechter figuren.

De relatie tussen de gemeten secundaire golven en de karakteristieken van de passerende schepen is veel minder eenduidig dan voor de primaire golven (zie Figuur 4.8). De golp hoogte bij de AWAC is hoger dan bij de Vector. De golpperiode kan theoretisch worden bepaald met behulp van de een formulering voor transversale golven ($V_s = \sqrt{gL/2\pi}$). Uitgaande van diep water golven ($L=gT^2/2\pi$) kan de golpperiode dan geschat worden met vergelijking 3.1. In Figuur 4.8 is de theoretische golpperiode bij een hoek van 30° weergegeven.

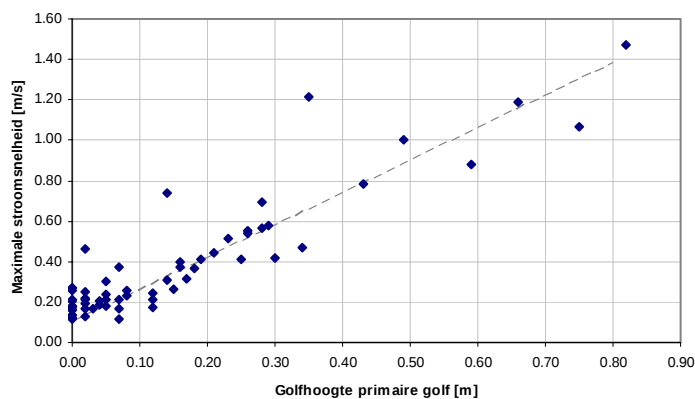
$$T_{\text{sec}} = \cos(\theta) \cdot 2\pi \cdot V_s / g \quad (3.1)$$

T_{sec}	Periode secundaire golf [m]
V_s	Vaarsnelheid schip [m/s]
θ	Hoek van de golf ten opzichte van vaargeul [rad]
g	Zwaartekracht versnelling [m/s^2]



Figuur 4.8 Secundaire scheepsgolven in de gemeten golfsignalen voor de 62 geselecteerde schepen (boven: AWAC; onder: Vector). Grijs lijn geeft trendlijn door data.

Naast de primaire en secundaire golf kan ook de invloed van de haalgolf worden ingeschat door de maximale stroomsnelheid tijdens een burst (17 minuten meting met scheepsgolf) mee te nemen. Deze kunnen bij de Vector (waar de getijsnelheden minder groot zijn dan bij de AWAC) in redelijke mate gerelateerd worden aan de primaire golf (zie Figuur 4.9). Verondersteld wordt daarom dat de maximale momentane stroomsnelheid bij de grotere schepen in deze meetreeks een gevolg is van de primaire golf.



Figuur 4.9 Maximum stroomsnelheid als functie van de golthoogte van de primaire golf (in burst van 17 minuten bij de vector).

5 Analyse oorzaken erosie

5.1 Introductie

In de inleiding zijn twee hypothesen gegeven voor de dominante belasting die de erosie van het slik bij Bath kan veroorzaken. De eerste hypothese is dat het getij in combinatie met windgolven invloed heeft op de erosie van het slik. De tweede hypothese is een combinatie tussen getijstroming en scheepsgolven. Om te onderzoeken welke van deze hypothesen voor de belasting op het slik het meest waarschijnlijk is, wordt in dit hoofdstuk de relatieve invloed van scheepsgolven onderzocht. De weerstand van de bodem tegen erosie speelt in beide gevallen een rol en wordt in de afweging meegenomen. De volgende twee stappen worden in dit rapport uitgewerkt.

- Wat is de potentie voor erosie door scheepsgolven?
- Hoe relevant is de invloed van scheepsgolven als gekeken wordt naar de kans van optreden van scheepsgolven?

Allereerst wordt de aanpak van het onderzoek naar de potentie voor erosie door scheepsgolven uitgewerkt (Paragraaf 5.2). Paragraaf 5.3 beschrijft dan de berekeningen van de bodemschuifspanningen voor verschillende scenario's. Deze worden in Paragraaf 5.4 beoordeeld. In Paragraaf 5.5 wordt op een eenvoudige manier geschat wat de kans van voorkomen is van scheepspassages waarbij een significante belasting op het slik van Bath kan ontstaan.

5.2 Aanpak belastingen

Bij de analyse van de relatieve invloed van de belastingen door scheepsgolven worden de volgende aspecten meegenomen:

- De omgevingscondities, zoals waterstand, getijstroming en windgolven (referentie).
- Invloed van verschillende fases van scheepsgolf.
- Scenario met reductie van getijstroming door strekdammen.

Omgevingscondities

Om op een goede manier de invloed van scheepsgolven te kunnen beschouwen dient rekening gehouden te worden met de omgevingscondities (waterstand, stroming en windgolven). Naast de situatie met alleen getijstroming wordt daarom ook een combinatie van getijstroming met de windgolven beschouwd. Aangenomen is hierbij dat de golven die uit de 17 minuten bursts zijn bepaald een goede representatie zijn van de windgolven (dus weinig invloed van scheepsgolven op de golfkarakteristieken van elke burst). Dit is gecontroleerd door een aantal bursts met scheepspassages visueel te beoordelen.

Fases van scheepsgolven

De fases van de scheepsgolven (primaire en de secundaire golf) komen niet gelijktijdig aan op het slik en worden daarom afzonderlijk beschouwd. Er wordt daarom zowel een situatie met een primaire golf als een situatie met een secundaire golf onderzocht. Verwacht wordt dat dit een ondergrens is voor de actuele situatie, aangezien de geschematiseerde golf waarschijnlijk een veel gelijkmatiger verloop heeft in de tijd dan dat in werkelijkheid het geval is, waardoor de berekende schuifspanningen lager zijn.

Daarnaast is het mogelijk om iets over de invloed van de primaire golven te zeggen op basis van de gemeten maximale stroomsnelheden, aangezien deze aan elkaar gerelateerd zijn (zie Paragraaf 4.4.3). Opgemerkt dient echter te worden dat de berekende bodemschuifspanningen op basis van de maximale stroomsnelheid slechts een indicatie van de gemiddelde bodemschuifspanning geven, omdat er tijdens een golf niet voldoende tijd is om een volgroeide grenslaag te vormen.

Scenario met reductie stroming door strekdammen

Het is mogelijk dat de getijstroming op het slik in de toekomst aanzienlijk wordt verminderd door de aanleg van strekdammen op het slik. In het meest extreme geval zou dit betekenen dat de getijstroming bij de twee beschouwde locaties vrijwel geheel verdwijnt. Om de gevoeligheid voor de invloed van scheepvaart in dit scenario te beoordelen wordt daarom ook een situatie beschouwd met alleen de scheepsgolven (zonder getij). Opgemerkt wordt dat dit een hypothetische situatie is, aangezien het niet mogelijk is om de stroomsnelheden volledig te reduceren.

Voor elk van de situaties worden de belastingen beoordeeld door de optredende bodemschuifspanningen te vergelijken met de autonome situatie. Samenvattend zijn de optredende bodemschuifspanningen voor de volgende situaties beschouwd.

- Belastingen door omgevingscondities:
 - Situatie met alleen getijstroming.
 - Situatie met windgolven en getijstroming.
- Belastingen door scheepsgolven:
 - Primaire scheepsgolven (zowel in combinatie met getij als zonder getij).
 - Secundaire scheepsgolven (zowel in combinatie met getij als zonder getij).
 - Gemeten maximale stroomsnelheden tijdens scheepspassages.

In Paragraaf 5.3 worden de belastingen voor elk van deze situaties berekend. Tevens wordt de invloed hiervan beoordeeld.

5.3 Berekende belastingen en weerstand tegen erosie

5.3.1 Weerstand tegen erosie

Lokale schuifspanningen kunnen erosie veroorzaken als de kritische bodemschuifspanningen van de bodem worden overschreden. Deze kritische bodemschuifspanningen verschillen afhankelijk van het type sediment dat lokaal aanwezig is. In Tabel 5.1 worden typische waarden voor de bodemschuifspanningen weergegeven voor verschillende typen sediment. Uitgangspunt hierbij is de grens van bewegen van het sediment.

Naast de grens voor bewegen kan echter ook de grens voor suspensief transport ($\theta_{crit,sus}$) worden beschouwd. Deze grens geeft een indruk bij welke belastingen het sediment suspensief wordt getransporteerd, waardoor het grotere afstanden kan afleggen. Deze grens ligt voor grover zand aanzienlijk hoger dan de grens van bewegen. De formuleringen van, Van Rijn (1993) geven hiervoor een goede benadering.

Tabel 5.1 Kritische bodemschuifspanning [N/m^2] voor verschillende typen sediment.

Sediment	Kritische bodemschuifspanning (τ_{crit} [N/m^2])		
	Begin van bewegen (oordeel expert)	Begin van bewegen Shields (1936)	Grens suspensief transport Van Rijn (1993)
zand			
Zand ($D_{50} = 100 \mu m$) *	0.1 – 0.2	0.14	0.13
Zand ($D_{50} = 250 \mu m$) *	0.15 – 0.25	0.19	0.5
Zand ($D_{50} = 400 \mu m$) *	0.2 – 0.3	0.23	0.7
Zand met 50% slib (ongeconsolideerd) **	0.3 – 0.8	-	-
Zand met 50% slib (geconsolideerd) **	0.5 – 1.0	-	-

* De bodem gedraagt zich min of meer als een zandige bodem zolang het slibpercentage kleiner is dan 30%

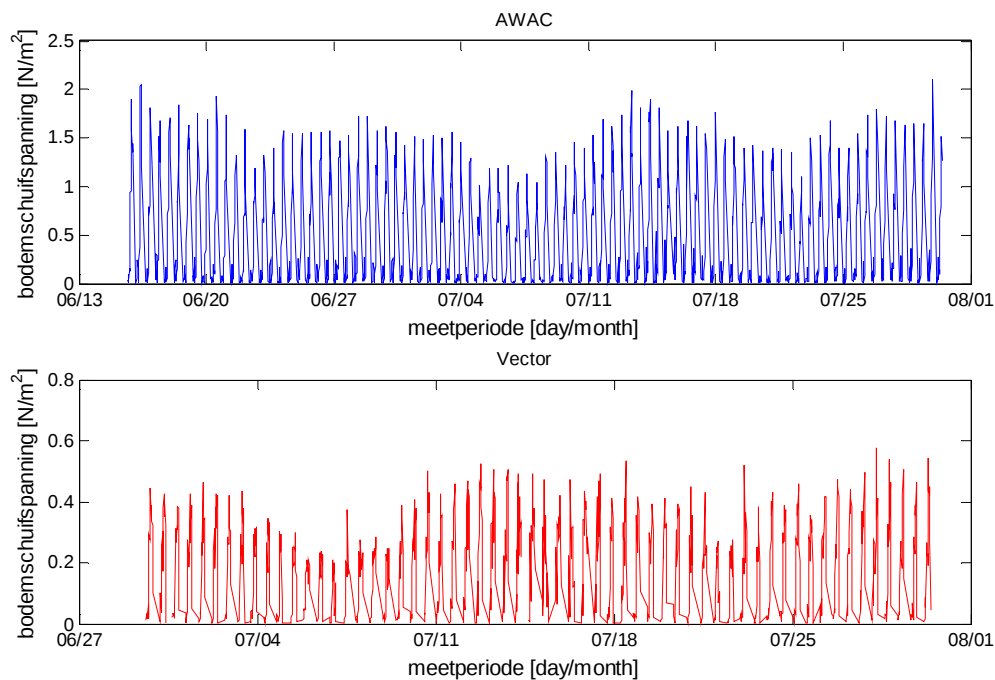
** Het is onwaarschijnlijk dat het slib op het slik geconsolideerd is. De grenzen zijn geschat op basis van expert beoordeling door een specialist.

Ter plaatse van de AWAC (NAP -2m) bevindt zich een vak met veen en slib, terwijl de bodem bij de Vector (op NAP -0.8m) voornamelijk uit fijn zand bestaat (zie ook Paragraaf 2.3.3). Een eerste grove schatting van de kritische bodemschuifspanningen bij de AWAC is dat bij een belasting groter dan 0.3 tot 0.8 N/m^2 erosie van het slibrijke materiaal kan ontstaan. Het veen zal hierdoor meer onbeschermd zijn, waardoor het veen een groter deel van de hydraulische belasting te verwerken krijgt. Bij de Vector kunnen bodemschuifspanningen boven de 0.1 tot 0.2 N/m^2 al tot suspensie van het materiaal leiden. Deze kentallen dienen echter geverifieerd te worden met laboratoriumproeven op basis van samples van het lokale bodemmateriaal.

Uit Tabel 5.1 komt ook naar voren dat een combinatie van slib en zand meer weerstand heeft tegen erosie dan alleen zand. Ook op het slik bij Bath vindt de meeste erosie plaats op het zandige deel van het slik (waar de Vector stond). Het is mogelijk dat de gevoeligheid voor erosie van de (zandige) bodem op deze locatie een gevolg is van het uitspoelen van fijn slib uit de bodem. Dit kan verschillende oorzaken hebben, zoals een kleinere aanvoer van slib of een toename van de belastingen op het slik. Opgemerkt wordt dat de uitspoeling van slib uit de bodem in dit rapport niet verder uitgewerkt is, maar zeker een proces is dat invloed kan hebben op de morfologische ontwikkeling van het slik. Door het systeem van de haalgolf geïnduceerde golven (volgstream die lokaal op een talud zorgt voor het weglopen van water en een golfvront dat dit zeer snel vult) kunnen de grondwaterstroming en de belasting op de bodem waarschijnlijk sterk beïnvloeden. En zodoende een relevante invloed hebben op de uitspoeling van slib uit de bodem. Dit zijn zeer lange scheepsgolven die kunnen ontstaan als schepen de vernauwing bij Bath invaren.

5.3.2 Belastingen door omgevingscondities

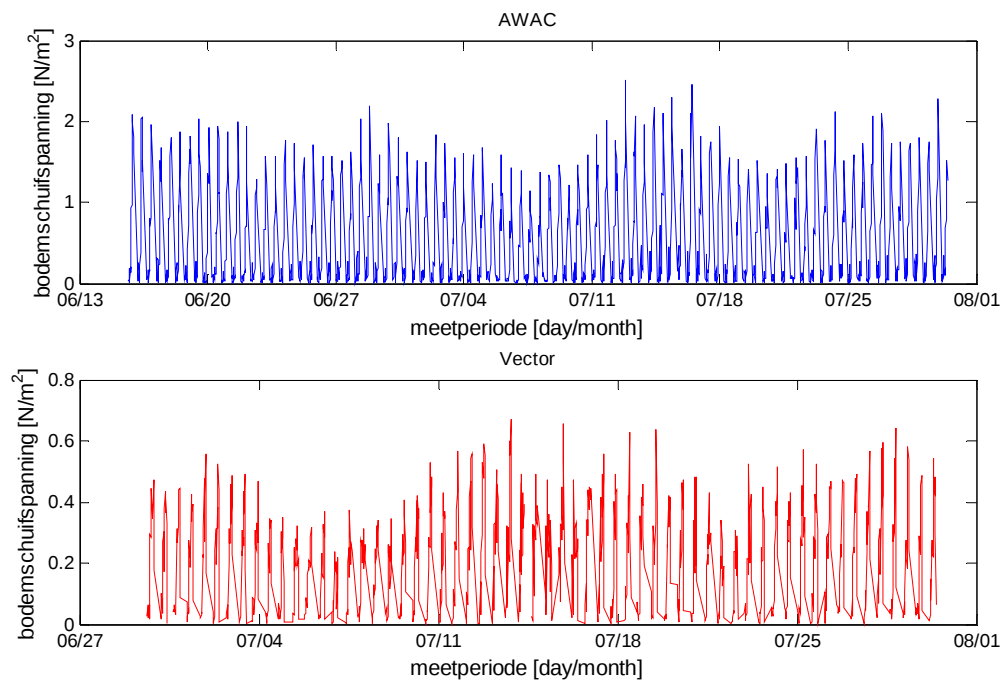
De belasting op de bodem als gevolg van getijstroming is berekend voor de hele meetperiode tijdens de meetcampagne. Figuur 5.1 presenteert de bodemschuifspanningen als gevolg van getij bij de AWAC en Vector voor de gehele meetcampagne. In Appendix A worden de formuleringen voor de berekening van de bodemschuifspanningen toegelicht.



Figuur 5.1 Berekende bodemschuifspanningen gedurende meetcampagne voor de situatie met alleen getij.

Uit Figuur 5.1 komt naar voren dat de bodemschuifspanning (tijdens de meetcampagne) voor een situatie met alleen getij pieken tot een hoogte van 2 N/m^2 bij de AWAC en tot 0.5 N/m^2 bij de Vector. Geconcludeerd kan worden dat de belasting bij de AWAC niet hoog genoeg is om het veen (snel) te eroderen, maar voldoende om gedurende een deel van het getij het slib te kunnen suspenderen. Verder zijn de piekbelastingen bij de Vector groot genoeg om gedurende bepaalde fasen van het getij erosie van een zandige bodem te veroorzaken.

Als referentie kan ook de situatie met getijstroming en windgolven worden beschouwd. Aangenomen is dat de gemeten golfhoogten (per burst) niet significant beïnvloed worden door de scheepsgolven, wat zo lijkt te zijn voor de meeste bursts. De belastingen voor de situatie met getijstroming en windgolven worden in Figuur 5.2 weergegeven. De belastingen bij de AWAC blijken beperkt hoger te zijn (tot 2.5 N/m^2) dan voor alleen getijstroming. Bij de Vector is sprake van een toename van de piekbelastingen tot ruim 0.6 N/m^2 . Een bodemschuifspanning van 0.2 N/m^2 als gevolg van getij en windgolven wordt bij de Vector ongeveer een kwart van de tijd overschreden. Bij de AWAC wordt een bodemschuifspanning van 0.4 N/m^2 ongeveer een kwart van de tijd overschreden.



Figuur 5.2 Berekende bodemschuifspanningen gedurende meetcampagne voor de situatie met getij en windgolven.

5.3.3 Belastingen door scheepsgolven

Om de bijdrage van scheepsgolven aan de belasting op het slik te kunnen beoordelen zijn de belastingen op de bodem tijdens de 62 geselecteerde scheepspassages berekend. Dit is zowel uitgevoerd voor de situatie met een combinatie van getijstroming en scheepsgolven als voor de situatie met alleen de scheepsgolven (uitgaande van beperking van getijstroming). Ter referentie zijn ook de bodemschuifspanningen als gevolg van de omgevingscondities (getijstroming of getijstroming met windgolven) berekend. Dit resulteert in een groot aantal berekende schuifspanningen die in Appendix B in tabellen worden gepresenteerd.

Om een overzicht te krijgen van de berekende bodemschuifspanningen zijn deze gemiddeld voor elk van de in de klasse voorkomende situaties. De resulterende 'gemiddelde schuifspanningen' zijn vanzelfsprekend geen fysisch relevante grootheid meer (aangezien ze gemiddeld zijn voor verschillende typen schepen en omgevingscondities) maar geven wel een aardige indruk van de vergroting van de gemiddelde bodemschuifspanning tijdens het passeren van een schip (zie Tabel 5.2 en Tabel 5.3). De bodemschuifspanning kan echter alleen berekend worden als sprake is van stroming die continue in één richting staat, en is daarom niet bepaald voor de situatie met alleen golven én niet voor de gemeten maximale stroomsnelheid tijdens een scheepspassage (aangezien dit een tijdelijke maximale stroomsnelheid is). Opgemerkt wordt dat de berekende gemiddelde bodemschuifspanningen per klasse enkel voor de hydraulische situaties in dezelfde klasse vergeleken kunnen worden, maar niet met de andere scheepsklassen. De reden hiervoor is dat de getijstroomsnelheden voor de scheepspassages verschilden per klasse. De gemiddelde getijstroomsnelheid voor de geselecteerde scheepspassages van schepen tot 100 meter was bijvoorbeeld hoger dan bij de andere klassen.

Tabel 5.2 *Schipklasse gemiddelde bodemschuifspanning [N/m^2] bij AWAC voor 62 geselecteerde scheepspassages.*

Ship class			scheepsgolf + getij		
	getij	getij + windgolf	scheepsgolf	primaire scheepsgolf 1	secundaire scheepsgolf 2
< 100 m	0.5	0.5	0.5	0.7	0.6
100-200 m	0.3	0.4	0.3	0.5	0.4
> 250 m	0.3	0.4	0.4	0.6	0.5

Tabel 5.3 *Schipklasse gemiddelde bodemschuifspanning [N/m^2] bij Vector voor 62 geselecteerde scheepspassages.*

Ship class			scheepsgolf + getij		
	getij	getij + windgolf	scheepsgolf	primaire scheepsgolf 1	secundaire scheepsgolf 2
< 100 m	0.2	0.3	0.2	0.4	0.3
100-200 m	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
> 250 m	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3

Uit Tabel 5.2 en Tabel 5.3 komt naar voren dat de gemiddelde belastingen op de bodem het meest toenemen als gevolg van de secundaire golven die van de boeg van een schip komen. Als individueel naar de 62 scheepspassages wordt gekeken (zie Appendix B), dan valt op dat (zowel bij de AWAC als de Vector) de gemiddelde belasting op de bodem 1 á 2 keer de belasting in de referentie situatie is (getij + windgolven).

In bovenstaande tabellen worden echter alleen de over de tijd gemiddelde bodemschuifspanningen beschouwd, terwijl de maximale bodemschuifspanningen tijdens een golf aanzienlijk groter kunnen worden dan de gemiddelde bodemschuifspanning. Dit resulteert (tijdelijk) in een aanzienlijk grotere belasting op de bodem. Deze maximale bodemschuifspanningen geven een goede indicatie van de mobiliteit en transportcapaciteit van het sediment. De berekende maximale momentane bodemschuifspanningen voor elk van de 62 scheepspassages worden in Appendix B gegeven. In Tabel 5.4 en Tabel 5.5 worden de over de schipklasse gemiddelde maximale momentane bodemschuifspanning weergegeven. Ook de situatie met alleen scheepsgolven en met een maximale stroomsnelheid tijdens een burst is meegenomen.

Tabel 5.4 Schipklasse gemiddelde maximale momentane bodemschuifspanning [N/m^2] bij AWAC voor 62 geselecteerde scheepspassages.

Ship class			scheepsgolf + getij				alleen scheepsgolf		
	getij	getij + windgolf	primaire scheepsgolf	secundaire scheepsgolf 1	secundaire scheepsgolf 2	max. stroomsnel- heid (totaal)	primaire scheepsgolf	secundaire scheepsgolf 1	secundaire scheepsgolf 2
< 100 m	0.5	1.0	0.5	3.7	1.8	2.7	0.0	3.0	1.2
100-200 m	0.3	1.2	0.6	6.1	2.3	2.3	0.3	5.6	1.9
> 250 m	0.3	1.4	1.5	6.0	2.2	3.7	1.0	5.5	1.7

Tabel 5.5 Schipklasse gemiddelde maximale momentane bodemschuifspanning [N/m^2] bij Vector voor 62 geselecteerde scheepspassages.

Ship class			scheepsgolf + getij				alleen scheepsgolf		
	getij	getij + windgolf	primaire scheepsgolf	secundaire scheepsgolf 1	secundaire scheepsgolf 2	max. stroomsnel- heid (totaal)	primaire scheepsgolf	secundaire scheepsgolf 1	secundaire scheepsgolf 2
< 100 m	0.2	0.6	0.3	2.1	1.3	0.6	0.0	1.7	1.0
100-200 m	0.1	0.6	0.7	4.1	1.8	0.8	0.5	3.8	1.6
> 250 m	0.2	0.6	3.0	5.8	2.8	3.4	2.7	5.5	2.6

Uit Tabel 5.4 en Tabel 5.5 komt naar voren dat de maximale bodemschuifspanningen tijdens scheepsgolven aanzienlijk groter kunnen zijn dan in de referentie situatie. Als naar alle scheepspassages in Tabel B.3 en B.4 (Appendix B) wordt gekeken dan blijken de maximale momentane bodemschuifspanningen, zowel bij de AWAC als bij de Vector, gemiddeld 7 à 8 keer zo groot te zijn als in de referentie situatie. In sommige situaties zelfs 40 keer zo groot. Verder wordt opgemerkt dat de maximale bodemschuifspanningen zonder getijstroming iets kleiner, maar van dezelfde orde, zijn als voor de situatie met getijstroming.

5.4 Invloed scheepsgolven

Uit de berekende bodemschuifspanningen komt naar voren dat de secundaire scheepsgolven bij vrijwel alle 62 scheepspassages zorgden voor een matige tot zeer grote verhoging van de belasting op het slik (ten opzichte van de referentie situatie met getij en windgolven). Dit betreft dan met name een toename van de (tijdelijk optredende) maximale momentane schuifspanningen als gevolg van de orbitaalbeweging van de golven.

De invloed van de secundaire scheepsgolven was voor de kleine schepen (kleiner dan 100 meter) van de 62 geselecteerde scheepspassages echter veel beperkter dan voor de grotere schepen. Bij de kleine schepen hadden vooral de relatief snel varende schepen een significante invloed op de belasting op het slik. In het algemeen kan gesteld worden dat de snelheid van het vaartuig een duidelijke invloed heeft op de scheepsgolven en de resulterende bodemschuifspanningen.

Voor de middelgrote tot grote schepen (groter dan 150 meter) hebben ook de primaire scheepsgolven een significante invloed op de belasting op het slik. De hoogte van de primaire golf van deze schepen kan zeer verschillend zijn en de invloed op de lokale belastingen kan daarom variëren van een beperkte verhoging (minder dan een verdubbeling) tot een zeer grote vergroting van de maximale bodemschuifspanningen.

Uit de berekeningen komt naar voren dat de secundaire golven relatief gezien een grotere invloed hebben op de bodemschuifspanningen dan de primaire golven. Hierbij dient echter opgemerkt te worden dat de invloed van primaire golven op de bodemschuifspanningen in de huidige aanpak mogelijk wordt onderschat. Aangezien de haalgolf ('bore' met een steil golffront) die kan ontstaan als gevolg van de primaire golf niet wordt meegenomen.

Verder wordt verwacht dat de invloed van scheepsgolven op de momentane bodemschuifspanning bij de AWAC relatief minder groot is dan bij de Vector, aangezien de belastingen als gevolg van getij en windgolven hier al aanzienlijk zijn. Dit is met name zichtbaar voor de grotere schepen bij de Vector.

Ook als getijstroming niet wordt meegenomen, zijn de maximale bodemschuifspanningen van dezelfde orde (iets kleiner) dan in de situatie met getijstroming. Verwacht wordt daarom dat de opwoeling van de bodem tijdens scheepspassages ook in de situatie met weinig getij groot kan zijn. Of er sedimenttransport optreedt hangt af van de door schepen geïnduceerde stroming en de mate waarin de getijstroomsnelheden zijn gereduceerd. Belangrijk onderscheid tussen de scheepsgolven en de getijstroming is dat de getijstroming hoofdzakelijk parallel aan de vaargeul loopt, terwijl de scheepsgolven ook zorgen voor een stroming dwars op de geul. Door de scheepsgolven kan dus stroming uit meerdere richtingen komen.

5.5 Kans van optreden

Ook als de invloed van stroming door scheepsgolven op de bodem significant is tijdens het passeren van een schip wil dit nog niet zeggen dat de invloed op de erosie van het slik groot is. Dit hangt ook af van de frequentie van voorkomen van deze gebeurtenissen.

De duur van voorkomen van een significante golfbelasting door scheepspassages is ingeschat door de periode van een gemiddelde primaire en secundaire golf te vermenigvuldigen met het aantal maal dat een schip is gepasseerd tijdens de beschouwde periode van IVS schipobservaties. Hierbij is het volgende aangenomen:

- Dat alle schepen groter dan 80 meter kunnen zorgen voor een significante belasting op het slik. Bij de 62 geselecteerde schepen bleek dit voor vrijwel alle schepen groter dan 80 meter het geval te zijn (ook bij hoge waterstanden).
- Dat elk schip zowel een boeg als een hekgolf heeft van 10 golven die een significant effect hebben op de belasting op het slik. De periode van deze secundaire golven wordt geschat op 3.5 seconde.
- Schepen groter dan 150 meter één primaire golf hebben die invloed heeft op het slik. De gemiddelde periode van de primaire golf is 40 seconde.
- Verondersteld is dat het aantal scheepspassages tijdens de meetcampagne van 46.7 dagen representatief is voor de lokale scheepspassages. Tijdens de meetcampagne waren 3749 van de 4001 schepen langer dan 80 meter. Er zijn 1751 schepen langer dan 150 meter gepasseerd.

- De waterstand is 10% van de tijd te laag is (onder NAP-2m) om te zorgen voor invloed bij de AWAC. De waterstand is 35% van de tijd te laag (onder NAP-0.8m) om te zorgen voor invloed van schepen bij de Vector.
- Ook als de belasting door scheepsgolven op de bodem (opwoeling) groot is, dienen de stroomsnelheden voldoende groot te zijn om ook voor transport van het opgewoelde sediment te zorgen. Dit is in de berekening meegenomen door van het volgende uit te gaan:
 - Een aanzienlijke scheepsgeïnduceerde stroming wordt verwacht worden tijdens scheepspassages waarbij een primaire golf ontstaat (1751 scheepspassages).
 - Tijdens de overige scheepspassages (zonder primaire golf) wordt er vanuit gegaan dat er weinig transport is bij stroomsnelheden lager dan 0.1 m/s. Dit is bij de AWAC en Vector respectievelijk het geval in 25% en 33% van de tijd.

Op basis van bovenstaande aannames kan de volgende schatting worden gemaakt voor de duur van de significante scheepsbelasting tijdens de 46.7 dagen durende periode van IVS schipobservaties:

Tabel 5.6 *Inschatting duur van significante scheepsbelasting op het slik.*

	AWAC	Vector
Scheepspassages met primaire golf		
- Geschatte duur primaire golf	0.8 dagen (=40 x 1751)	
- Geschatte duur secundaire golf	1.4 dagen (=20 x 3.5 x 1751)	
Scheepspassages zonder primaire golf		
- Geschatte duur secundaire golf	1.6 dagen (=20 x 3.5 x (3759-1751))	
Reductie kans van voorkomen door lage waterstand	-10%	-35%
Reductie kans door lage stroomsnelheid getij (<0.1 m/s) (alleen scheepspassages zonder primaire golf)	-25%	-33%
Geschatte totale duur van voorkomen significante scheepsbelasting	3.1 dagen	2.2 dagen
Voorkomen significante belasting [%]	6.6%	4.6%

Uit Tabel 5.6 komt naar voren dat significante scheepsgolven bij de AWAC ongeveer 6 á 7% van de tijd kunnen voorkomen. Bij de Vector is dit orde 4 á 5% van de tijd. Verwacht wordt dat dit voldoende is om een significante invloed uit te oefenen op de morfologie van het slik.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In dit rapport is onderzoek gedaan naar de relatieve invloed van scheepsgolven op de hydraulische belasting van het slik bij Bath. De aanleiding hiervoor is dat het slik aan de Noordzijde van het Nauw van Bath al enige jaren geleidelijk erodeert. Eén van de aspecten die hierop van invloed zou kunnen zijn is de belasting op het slik door scheepsgolven. Andere processen die mogelijk een rol spelen zijn de belasting door getijstroming en het verminderen van de weerstand van het slik tegen erosie door het uitspoelen van slib uit het sediment.

Ten behoeve van het onderzoek naar de invloed van scheepsgolven op de belastingen van het slik bij Bath is een meetcampagne verricht. Deze is door Nortek [5] in 2010 uitgevoerd en opgeleverd. Tijdens de meetcampagne zijn de hydraulische condities op twee locaties op het slik gemeten over een periode van ruim een maand. Tevens is informatie verzameld over de scheepspassages in deze periode. Nortek heeft de gemeten scheepsgolven voor 62 van de scheepspassages bij Bath in detail geanalyseerd. De analyse in dit rapport richt zich met name op de gemeten hydraulische omstandigheden en de geanalyseerde scheepsgolven tijdens de 62 scheepspassages. Conclusies kunnen getrokken worden over:

- De weerstand van de bodem tegen erosie.
- De belastingen op de bodem.
- Duur van voorkomen van scheepsbelastingen.
- Representativiteit van de beschouwde 62 scheepspassages.

Weerstand tegen erosie

De meeste erosie op het slik bij Bath vindt plaats op het zandige deel van het slik. De weerstand tegen erosie is hier kleiner dan in de gebieden met veen of een combinatie van slib met zand. Het is mogelijk dat de gevoeligheid voor erosie van de (zandige) bodem een gevolg is van het uitspoelen van fijn slib uit de bodem. Dit kan verschillende oorzaken hebben, zoals een kleinere aanvoer van slib of een toename van de belastingen op het slik. Geconcludeerd wordt dat uitspoeling van slib uit de bodem een proces is dat mogelijk invloed kan hebben op de morfologische ontwikkeling van het slik.

Belastingen op de bodem

De impact van hydraulische belastingen op de bodem is allereerst bepaald voor de referentie situatie met alleen getijstroming en windgolven. Daarna is het effect van de scheepsgolven op de bodem beschouwd voor de 62 geselecteerde scheepspassages. Ten behoeve hiervan zijn de bodemschuifspanningen als gevolg van de belastingen berekend. Uit de berekende bodemschuifspanningen kan het volgende afgeleid worden:

- De belastingen op het slik als gevolg van getij en windgolven (referentiesituatie) zijn gedurende een deel van de getijcyclus groot genoeg zijn om de weerstand tegen erosie van het zand (bij de Vector) en de combinatie van zand en slib (bij de AWAC) te overwinnen. De getijstroomsnelheden zijn echter niet groot genoeg voor een snelle erosie van het veen.
- Voor vrijwel alle 62 scheepspassages zorgden de secundaire scheepsgolven voor een matige tot zeer grote verhoging van de belasting op het slik (ten opzichte van de referentie situatie met getij en windgolven).

- De invloed van de secundaire scheepsgolven was voor de kleine schepen (kleiner dan 100 meter) van de 62 geselecteerde scheepspassages echter veel beperkter dan voor de grotere schepen. Bij de kleine schepen hadden vooral de relatief snel varende schepen een significante invloed op de belasting op het slik. In het algemeen kan gesteld worden dat de snelheid van het vaartuig een duidelijke invloed heeft op de scheepsgolven en de resulterende bodemschuifspanningen.
- Voor de middelgrote tot grote schepen (groter dan 150 meter) hebben ook de primaire scheepsgolven een significante invloed op de belasting op het slik. De hoogte van de primaire golf van deze schepen kan zeer verschillend zijn en de invloed op de lokale belastingen kan daarom variëren van een beperkte verhoging (minder dan een verdubbeling) tot een zeer grote vergroting van de maximale bodemschuifspanningen.
- Uit de berekeningen komt naar voren dat de secundaire golven relatief gezien een grotere invloed hebben op de bodemschuifspanningen dan de primaire golven. Hierbij dient echter opgemerkt te worden dat de invloed van primaire golven op de bodemschuifspanningen in de huidige aanpak mogelijk wordt onderschat. Aangezien de haalgolf ('bore' met een steil golffront) die kan ontstaan als gevolg van de primaire golf niet wordt meegenomen.
- Ook als getijstroming niet wordt meegenomen, zijn de maximale bodemschuifspanningen van dezelfde orde (iets kleiner) dan in de situatie met getijstroming. Verwacht wordt daarom dat de opwoeling van de bodem tijdens scheepspassages ook in de situatie met weinig getij groot kan zijn.

Concluderend kan gesteld worden dat het deel van het scheepvaartverkeer met een lengte van 80 meter of meer de bodemschuifspanningen op het slik in het Nauw van Bath tijdelijk aanzienlijk vergroot ten opzichte van de autonome situatie met getij en windgolven. Vergroting van de bodemschuifspanningen resulteert in het algemeen in extra erosie. Daarom is het aannemelijk dat scheepsgolven een bijdrage leveren aan de erosie van het slik. Verwacht wordt dat dit effect het sterkst is op de rand van het hoge deel van het slik (bij de Vector), aangezien de belastingen als gevolg van getij en windgolven op het lagere deel van het slik (bij de AWAC) normaal al groot zijn (grotere stroomsnelheden van het getij dan bij Vector). Voor de morfologie zou dit kunnen betekenen dat de combinatie van getij en scheepsgolven dominant is op het hoge deel van het slik (bij de Vector) waardoor erosie kan optreden óf versneld wordt. De belasting door getij en windgolven kan als gevolg van de bodemdaling toenemen en de erosie zodoende bespoedigen, waardoor het slik erodeert tot aan de relatief vaste veenlaag.

Bij het ontwikkelen van maatregelen ter bescherming van het slik in het Nauw van Bath tegen erosie, wordt aanbevolen om rekening te houden met deze bijdrage van scheepsgolven. Belangrijk is dat door de scheepsgolven, stroming uit meerdere richtingen komen (niet hoofdzakelijk parallel aan de vaargeul).

Duur van voorkomen van scheepsbelastingen

Ook als de invloed van stroming door scheepsgolven op de bodem significant is tijdens het passeren van een schip wil dit nog niet zeggen dat de invloed op de erosie van het slik groot is. Dit hangt ook af van de frequentie van voorkomen van deze gebeurtenissen. De duur van voorkomen van een significante golfbelasting door scheepspassages is geschat door de periode van een gemiddelde primaire en secundaire golf te vermenigvuldigen met het aantal maal dat een schip is gepasseerd tijdens de beschouwde periode van IVS schipobservaties (Paragraaf 5.5). Uit deze analyse komt naar voren dat de significante scheepsgolven bij de AWAC ongeveer 6 á 7% van de tijd kunnen voorkomen.

Bij de Vector is dit orde 4 á 5% van de tijd. Verwacht wordt dat dit voldoende is om een significante invloed uit te oefenen op de morfologie van het slik.

Representativiteit van de 62 scheepspassages

Met betrekking tot de representativiteit van de 62 beschouwde scheepspassages en de condities tijdens de meetcampagne geldt (zie Hoofdstuk 4):

- De afmetingen van de beschouwde 62 schepen omvatten de scheepstypen redelijk goed.
- De snelheid van de vaartuigen was hoger dan het gemiddelde van de scheepspassages gedurende de meetcampagne.
- Hydraulische condities tijdens de bursts waren behoorlijk representatief voor de condities tijdens de gehele meetcampagne.
- De golfcondities tijdens de gehele meetcampagne zijn waarschijnlijk minder zwaar dan gemiddeld voor een langere periode (metingen in zomer met weinig wind). Er is ook niet gemeten in een extreme storm.
- De gemeten stromingen zijn niet representatief voor het hele slik. Op basis van de modelberekeningen van SVASEK en de gemeten ADCP raaien kan wel een schatting gemaakt worden voor de rest van het slik.

6.2 Aanbevelingen

Op basis van de resultaten van dit onderzoek worden in deze paragraaf aanbevelingen gedaan voor vervolg stappen en nader onderzoek. Allereerst zijn er de aanbevelingen die betrekking hebben op de vraag die voorligt met betrekking tot de erosie van het slik bij het Nauw van Bath:

- Om een goed beeld te krijgen waar erosie van het slik plaats kan vinden, dient onderzocht te worden waar de gradienten in sediment transport (verschil in aanvoer en afvoer van sediment) zich bevinden. Hiervoor is een ruimtelijk beeld van de sedimenttransporten nodig, wat met een morfologisch gebiedsmodel kan worden bereikt. Bijvoorkeur wordt ook het effect van windgolven op de opwoeling van de bodem meegenomen. Om de invloed van scheepsgolven in een situatie met weinig getijstroming te kunnen beoordelen dient een nadere inschatting gemaakt te worden van de scheepsgeïnduceerde stroomsnelheden. Door de complexiteit van een modelanalyse van scheepsgeïnduceerde stroming verdient het aanbeveling dit effect te beoordelen op basis van een expert inschatting.
- Het uitspoelen van slib uit het sediment kan de weerstand van het slik tegen erosie mogelijk verminderen. Een nadere beschouwing is nodig als meer informatie over dit proces vereist is. Hierbij is van belang wat de invloed is van het vastleggen van de geulwandverdediging én de verdieping van de Westerschelde op de aanvoer van sediment op het slik. Tevens kan beschouwd worden wat de invloed is van scheepsbelastingen door het systeem van de haalgolf (volgstream die lokaal op een talud zorgt voor het weglopen van water en een golffront dat dit zeer snel vult) op de uitspoeling van sediment.

De beschikbare set meetdata bij het Nauw van Bath is kwalitatief zeer goed. Vanuit wetenschappelijk oogpunt is het daarom relevant om onderzoek te doen naar de volgende zaken:

- Relaties van scheepsgolven (primaire, secundaire en haalgolven) met eigenschappen van schepen én omgevingscondities (stroming en bodemvorm) kunnen onderzocht worden op basis van de beschikbare meetdata van de scheepspassages. Op basis van de gevonden relaties kunnen de effecten van scheepsgolven beter gekwantificeerd worden.
- Het ontstaan en de voortplanting van haalgolven kunnen onderzocht worden door gebruik te maken van 2DH Boussinesq modellen. Hieruit zijn regels af te leiden waarmee op basis van geometrie van de vaarweg en scheepseigenschappen meer te zeggen is over het ontstaan en de verplaatsing van haalgolven.

7 Literatuur

1. Hoffmanns, van der Wal et al, 2008. Geulwandverdediging Westerschelde, RWS WD rapport 2008.03
2. SVASEK hydraulics, 2008. Buitendijks natuurherstel Westerschelde.
3. Van der Kaa, 1974. Taludverdediging Nauw van Bath, aanval door waterbeweging tengevolge van scheepvaart, WL rapport R840, 1974.
4. Schroevers, van der Wal, 2009. Meetplan Bath, Schroevers, van der Wal Deltares rapport 1200633-000-ZWS-0005, 2009.
5. Nortek BV, 2010. Golf- en Stroomsnelheidsmetingen op het Slik van Bath, Juni en Juli 2010, P10050, Revisie 3, 2010.
6. GUO, 2002. Simple and explicit solution of wave dispersion equation. Coastal Engineering Volume 45, Issue 2, April 2002, Pages 71-74.

A Berekening bodemschuifspanning

Constanten en parameters:

Om de bodemschuifspanningen te berekenen zijn de volgende, per berekening variërende, parameters als invoer gebruikt.

- Waterstand;
- Stroomsnelheid;
- Golfhoogte;
- Golfperiode.

Een aantal constanten is in elk van deze formuleringen gebruikt. Opgemerkt dient te worden dat de mediane korrel diameter (D_{50}) en de ruwheidsfactor van het sediment (R_{fac}) niet van invloed zijn op de resultaten omdat de ruwheidshoogte van de bodemvormen (R_{CW}) groter is dan de ruwheid door het sediment.

$$\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3, \quad \rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$T_{deg} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$D_{50} = 200 \text{ } \mu\text{m}$$

$$R_{fac} = 5$$

$$R_{CW} = 0.05 \text{ m}$$

$$f_{w_{max}} = 0.3$$

$$\alpha_C = 0, \quad \alpha_W = 0$$

Golf- en stromingsparameters:

De frequentie van de golf.

$$\omega = 2\pi / T_p \tag{A.1}$$

De horizontale orbitaalsnelheden bij de bodem en aan het oppervlak worden berekend met behulp van de formulering van GUO [6]. Deze formulering benaderd de dispersierelatie voor de golven en sluit aan op de bekende diep en ondiep water formulering voor de golflengte.

$$kh = \frac{\omega^2 h_w}{9.81} \cdot \left(1 - \exp \left(- \left(\omega \sqrt{\frac{h_w}{9.81}} \right)^{2.5} \right) \right)^{-0.4} \tag{A.2}$$

De horizontale orbitaalsnelheden bij de bodem en aan het oppervlak worden op basis van lineaire theorie als volgt berekend:

$$U_{W,surface} = 0.5 \cdot \omega \cdot H_s \cdot \left(\frac{\cosh(kh)}{\sinh(kh)} \right) \tag{A.3}$$

$$U_{W,bed} = 0.5 \cdot \omega \cdot H_s \cdot \left(\frac{\cosh(0)}{\sinh(kh)} \right) \quad (A.4)$$

De amplitude van de horizontale excursie van de golfbeweging bij de bodem wordt als volgt berekend:

$$A_{W,bed} = \frac{U_{W,bed} \cdot T_P}{2\pi} \quad (A.5)$$

Bodemschuifspanning door golven:

De bodemruwheid wordt bepaald door de ruwheid van het sediment en van de bodemvorm te combineren. De ruwheid van de bodemvorm is in dit geval dominant.

$$K_W = R_{fac} \cdot D50 + R_{CW} \quad (A.6)$$

De frictiecoëfficiënt voor golven volgt uit:

$$f_W = \min \left(f_{W_{max}}, 0.237 \left(\frac{A_{W,bed}}{K_W} \right)^{-0.52} \right) \quad (A.7)$$

De gemiddelde en maximale momentane bodemschuifspanning als gevolg van golven volgen uit:

$$\tau_W = 0.25 \cdot \rho_W \cdot f_W \cdot U_{W,bed}^2 \quad (A.8)$$

$$\tau_{W,t} = 2 \cdot \tau_W \quad (A.9)$$

Bodemschuifspanning door stroming:

De bodemruwheid wordt bepaald door de ruwheid van het sediment en van de bodemvorm te combineren. De ruwheid van de bodemvorm is in dit geval dominant.

$$K_C = R_{fac} \cdot D50 + R_{CW} \quad (A.10)$$

De frictiecoëfficiënt voor stroming volgt uit:

$$f_C = 0.24 \left(\log \left(\frac{12 \cdot h_W}{K_C} \right) \right)^{-2} \quad (A.11)$$

De bodemschuifspanning als gevolg van stroming volgt uit:

$$\tau_C = 0.125 \cdot \rho_W \cdot f_C \cdot U_C^2 \quad (A.12)$$

Bodemschuifspanning door golven en stroming:

De gecombineerde bodemschuifspanning voor golven en stroming volgt uit:

$$\tau_{CW} = \tau_C + 1.2 \cdot \tau_C \left(\frac{\tau_{W,t}}{\tau_C + \tau_{W,t}} \right)^{3.2} \quad (\text{A.13})$$

De gecombineerde maximale momentane bodemschuifspanning voor golven en stroming volgt uit:

$$\tau_{CW,max} = \sqrt{\tau_{CW}^2 + \tau_{W,t}^2 + 2 \cdot \tau_{W,t} \tau_{CW} \cdot \cos(\alpha_C - \alpha_W)} \quad (\text{A.14})$$

Kritische bodemschuifspanning:

Op basis van de mediane korreldiameter (D_{50}), de soortelijke massa van het water (ρ_W) en sediment (ρ_S) en de kinematische viscositeit (η) wordt de dimensieloze korreldiameter bepaald (D_*).

$$D_* = D_{50} \cdot (9.81 \cdot (\rho_S - \rho_W) \cdot \rho_W^{-1} \cdot \eta^{-2})^{1/3} \quad (\text{A.15})$$

Met behulp van een shields diagram voor zand kan de kritische shields parameter (θ_{crit}) bepaald worden voor de grens van bewegen.

$$\text{Als } D_* < 10 \quad \theta_{crit} = \frac{0.3}{1 + 1.2 \cdot D_*} + 0.055(1 - e^{-0.02 \cdot D_*}) \quad (\text{A.16})$$

$$\text{Als } D_* \geq 10 \quad \theta_{crit} = \frac{0.24}{D_*} + 0.055(1 - e^{-0.02 \cdot D_*}) \quad (\text{A.17})$$

Naast de grens voor bewegen kan ook de grens voor suspensief transport ($\theta_{crit,sus}$) worden beschouwd. Van Rijn (1993) geeft hiervoor een benadering. Deze grens ligt voor grover zand aanzienlijk hoger dan de grens van bewegen.

$$\text{Als } D_* < 10 \quad \theta_{crit,sus} = \frac{16}{D_*^2} \frac{w_s^2}{g \cdot D_{50} \cdot (\rho_S - \rho_W) / \rho_W} \quad (\text{A.18})$$

$$\text{Als } D_* \geq 10 \quad \theta_{crit,sus} = 0.16 \frac{w_s^2}{g \cdot D_{50} \cdot (\rho_S - \rho_W) / \rho_W} \quad (\text{A.19})$$

Deze kritische mobility parameters (θ_{crit}) kunnen omgerekend worden naar een kritische bodemschuifspanning:

$$\tau_{crit} = \theta_{crit} (\rho_S - \rho_W) \cdot g \cdot D_{50} \quad (\text{A.20})$$

Gemiddelde stroomsnelheid:

De stroomsnelheid (u) op een bepaalde hoogte in het snelheidsprofiel kan bepaald worden met 'The law of the wall' als uitgegaan wordt van een logaritmisch snelheidsprofiel.

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \log \frac{y}{y_0} \quad (\text{A.21})$$

Hierin is κ de Kármán constante ($\kappa \approx 0.41$), u_* de dimensieloze schuifspanningssnelheid, y de hoogte in het snelheidsprofiel en y_0 de ruwheidslengte van de bodem. Voor hydraulisch ruwe stroming is deze $y_0 = k_s/30$, waarbij k_s de ruwheidshoogte van de bodem is (uitgegaan wordt van $k_s = 0.05$ m). De dimensieloze schuifspanningssnelheid kan worden afgeschat met de formule van Chezy.

$$u_* = \frac{\sqrt{g}}{C} \bar{u} \quad (\text{A.22})$$

Hierin is g de gravitatieversnelling, C de Chezy ruwheid en $\bar{u}$ de gemiddelde stroomsnelheid. De meetsensor van de Vector ligt dicht bij de bodem, waardoor de gemeten stroomsnelheid (bij hoge waterstanden) zou kunnen afwijken van de werkelijk opgetreden gemiddelde stroomsnelheid. De gemiddelde stroomsnelheid bij de Vector kan worden geschat door de formulering A.19 toe te passen voor de verticale locatie van het meetinstrument en op de verticale locatie waar de snelheid gelijk is aan de gemiddelde snelheid ($z_{\text{avg}} = z_{\text{max}}/\exp$).

$$\frac{u_{\text{avg}}}{u_{\text{meas}}} = \frac{LN(z_{\text{max}}/(\exp(1) \cdot z_0))}{LN(z_{\text{meas}}/z_0)} \quad (\text{A.23})$$

De gemeten getijstroomsnelheid is voor de 62 scheepspassages bij hoge waterstand maximaal 20% naar boven en bij lage waterstand maximaal 10% naar onder bijgesteld.

B Berekende bodemschuifspanningen

AWAC

Tabel B.1

Gemiddelde bodemschuifspanning [N/m^2] bij de AWAC
(voor de 62 geselecteerde scheepspassages).

								scheepsgolf + getij					alleen scheepsgolf								
						getij + windgolf		primaire scheepsgolf		secundaire scheepsgolf 1		secundaire scheepsgolf 2		max. stroomsnelheid (totaal)		primaire scheepsgolf		secundaire scheepsgolf 1		secundaire scheepsgolf 2	
awac						getij															
L [m] B [m] D [m] [kn] bore						Mean bed shear stress (τ [N/m2])															
STOLT DIPPER	96	15	7	13.4		0.06	0.11	0.06	0.14	0.13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OMEGAGAS	96	14	5	14.4		0.07	0.14	0.08	0.16	0.16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
STELLA LYRA	96	15	5	13.0		0.02	0.04	0.02	0.04	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DELTAGAS	88	14	5	16.0		0.08	0.08	0.08	0.17	0.16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
STOLT KITTIWAKE	96	15	5	17.3		0.50	0.84	0.50	1.02	0.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UNION ELISABETH	89	12	3	12.3		0.05	0.08	0.05	0.11	0.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
STATSRAAD LEHMKUHL	98	13	6	12.1		1.01	1.16	1.01	1.69	1.13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VERDI	94	13	4	12.6		0.27	0.33	0.27	0.35	0.42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VERDI	94	13	4	10.8		0.07	0.07	0.07	0.15	0.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UNION 5	32	10	N/A	13.2		1.50	1.50	1.50	1.59	1.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MITTELPLATE	86	12	4	12.6		0.70	0.73	0.70	0.96	0.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MITTELPLATE	86	12	4	16.0		1.09	1.27	1.09	2.02	1.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
STOLT TERN	96	15	6	14.1		0.13	0.19	0.13	0.26	0.24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DUTCH ENGINEER	81	15	6	12.6		0.64	0.64	0.64	0.65	0.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CLEARWATER	80	11	3	11.5		0.64	0.64	0.64	0.79	0.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CLIPPER SUND	89	13	6	11.3		0.60	0.60	0.60	0.98	0.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GRETA KOSAN	98	16	5	14.7		0.13	0.22	0.13	0.27	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
COSTANZA WONSILD	90	14	5	14.1		0.87	0.88	0.87	1.18	0.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CLIPPER CULLIN	96	15	6	16.0		1.02	1.02	1.02	1.22	1.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WILSON BLYTH	88	13	6	9.0		0.23	0.24	0.23	0.26	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
INDEPENDENCE II	199	32	8	12.1		0.53	0.58	0.57	0.99	0.93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FINNPULP	188	27	6	17.3	S	0.63	0.65	0.69	1.15	0.87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EDDYSTONE	193	25	6	18.5		0.11	0.16	0.11	0.22	0.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MISIDA	166	23	7	20.7		0.10	0.20	0.16	0.22	0.22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EDDYSTONE	193	26	6	19.2		0.03	0.06	0.06	0.06	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
JANA	140	22	7	19.0		0.77	0.91	0.77	1.18	0.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GRAND BENELUX	177	31	9	16.4		0.48	0.63	0.49	0.91	0.49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EKFJORD	144	23	7	14.7		0.04	0.08	0.07	0.09	0.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NCC RABIGH	183	32	9	14.4		0.15	0.23	0.17	0.31	0.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BW HEDDA	170	27	11	13.2		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GREAT SWAN	170	25	7	14.3		0.59	0.60	0.60	0.93	0.69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
STAR BEST	163	26	8	14.4		0.19	0.29	0.24	0.40	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ELBFEEDEER	140	22	8	16.8		1.05	1.53	1.05	1.86	1.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FINNPULP	188	27	6	17.9		0.05	0.12	0.11	0.12	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

SICHEM IRIS	115	18	7	14.3		0.14	0.22	0.14	0.28	0.14	-	-	-	-
GRANDE NAPOLI	196	31	9	15.5		0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	-	-	-	-
MISIDA	166	23	7	19.2		0.04	0.08	0.06	0.09	0.09	-	-	-	-
JO EIK	149	23	10	11.1		0.54	0.59	0.54	0.86	0.83	-	-	-	-
CMA CGM COMOE	191	29	11	18.5		0.05	0.11	0.10	0.11	0.11	-	-	-	-
SIRRAH	132	19	6	17.6		0.17	0.27	0.17	0.35	0.35	-	-	-	-
HANSE COURAGE	144	23	8	14.7		0.13	0.13	0.13	0.27	0.25	-	-	-	-
MSC TANZANIA	294	32	13	15.3		0.05	0.10	0.10	0.11	0.10	-	-	-	-
MSC MARIA ELENA	336	46	11	12.1		0.57	0.75	0.65	1.17	0.75	-	-	-	-
APL ARABIA	294	32	12	13.7		0.18	0.23	0.23	0.36	0.28	-	-	-	-
AL RAYYAN	276	32	10	13.0		0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	-	-	-	-
MSC DISCOVERY	275	40	13	13.5		0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	-	-	-	-
MSC INGRID	294	32	13	12.8		0.04	0.07	0.07	0.08	0.08	-	-	-	-
HAMMERSMITH BRIDGE	336	46	13	16.0	S	0.38	0.44	0.70	0.71	0.62	-	-	-	-
MSC BEATRICE	366	51	13	13.8		0.05	0.05	0.10	0.05	0.05	-	-	-	-
MSC MADELEINE	349	43	12	14.1		0.13	0.15	0.23	0.26	0.13	-	-	-	-
MSC HIGHNESS	275	40	14	13.3		0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	-	-	-	-
YM UTILITY	333	43	12	18.8	S	1.12	1.37	1.52	1.93	1.73	-	-	-	-
MAYSSAN	306	40	13	10.3		0.21	0.22	0.28	0.38	0.28	-	-	-	-
TORONTO EXPRESS	294	32	10	17.9		1.17	1.40	1.33	1.85	1.91	-	-	-	-
COSCO TAICANG	350	46	11	14.7		0.27	0.38	0.38	0.55	0.43	-	-	-	-
MSC FRANCESCA	364	46	14	14.2	L	0.02	0.04	0.04	0.04	0.03	-	-	-	-
MAERSK SAVANNAH	335	43	12	15.8		0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	-	-	-	-
BREMEN EXPRESS	336	43	13	12.5	S	0.86	0.95	0.93	0.93	1.38	-	-	-	-
JAZAN	305	40	13	15.3		0.05	0.10	0.11	0.11	0.11	-	-	-	-
TOKYO EXPRESS	294	32	12	14.7		0.02	0.05	0.05	0.05	0.05	-	-	-	-
HS LIVINGSTONE	294	32	10	13.1		1.05	1.19	1.15	2.05	1.20	-	-	-	-
MARGRIT RICKMERS	294	32	12	14.7		0.08	0.12	0.12	0.15	0.14	-	-	-	-

Tabel B.2 Maximale momentane bodemschuifspanning $[N/m^2]$ bij de AWAC
(voor de 62 geselecteerde scheepspassages)

						scheepsgolf + getij						alleen scheepsgolf		
awac						getij		primaire scheepsgolf	secundaire scheepsgolf 1	secundaire scheepsgolf 2	max. stroomsnelheid (totaal)	primaire scheepsgolf	secundaire scheepsgolf 1	secundaire scheepsgolf 2
	L [m]	B [m]	D [m]	[kn]	bore									
STOLT DIPPER	96	15	7	13.4		0.06	0.47	0.08	4.00	1.26	0.82	0.02	3.86	1.13
OMEGAGAS	96	14	5	14.4		0.07	0.76	0.11	2.51	2.51	2.79	0.03	2.36	2.35
STELLA LYRA	96	15	5	13.0		0.02	0.26	0.02	1.79	2.30	2.82	0.00	1.74	2.25
DELTAGAS	88	14	5	16.0		0.08	0.08	0.08	2.92	1.64	0.89	0.00	2.76	1.48
STOLT KITTIWAKE	96	15	5	17.3		0.50	3.40	0.50	12.00	2.47	4.68	0.00	10.98	1.70
UNION ELISABETH	89	12	3	12.3		0.05	0.27	0.05	1.42	0.87	2.35	0.00	1.30	0.77
STATSRAAD LEHMKUHL	98	13	6	12.1		1.01	2.25	1.01	6.94	2.09	2.98	0.00	5.24	0.96
VERDI	94	13	4	12.6		0.27	0.68	0.29	0.82	1.36	1.65	0.02	0.47	0.94
VERDI	94	13	4	10.8		0.07	0.07	0.07	2.40	0.07	0.86	0.00	2.25	0.00
UNION 5	32	10	N/A	13.2		1.50	1.81	1.50	2.58	2.34	6.39	0.00	0.99	0.78
MITTELPLATE	86	12	4	12.6		0.70	1.10	0.70	2.54	2.74	2.46	0.00	1.58	1.75

MITTELPLATE	86	12	4	16.0		1.09	2.59	1.15	11.89	4.51	5.91	0.06	9.87	2.95
STOLT TERN	96	15	6	14.1		0.13	0.54	0.19	3.00	1.36	1.17	0.06	2.74	1.13
DUTCH ENGINEER	81	15	6	12.6		0.64	0.68	0.64	0.86	0.64	2.91	0.00	0.21	0.00
CLEARWATER	80	11	3	11.5		0.64	0.68	0.73	1.75	0.64	2.91	0.09	0.96	0.00
CLIPPER SUND	89	13	6	11.3		0.60	0.74	0.60	3.77	0.73	2.23	0.00	2.79	0.13
GRETA KOSAN	98	16	5	14.7		0.13	0.93	0.18	6.00	3.40	3.08	0.05	5.73	3.14
COSTANZA WONSILD	90	14	5	14.1		0.87	1.12	0.90	3.08	1.63	3.29	0.03	1.90	0.69
CLIPPER CUILLIN	96	15	6	16.0		1.02	1.22	1.02	2.57	1.47	3.60	0.00	1.34	0.42
WILSON BLYTH	88	13	6	9.0		0.23	0.31	0.23	0.45	1.73	1.18	0.00	0.19	1.33
INDEPENDENCE II	199	32	8	12.1		0.53	1.01	0.97	5.92	4.30	2.55	0.39	4.93	3.37
FINNPULP	188	27	6	17.3	S	0.63	0.95	1.21	6.35	2.39	2.43	0.52	5.20	1.51
EDDYSTONE	193	25	6	18.5		0.11	0.47	0.19	3.17	1.59	1.20	0.08	2.95	1.38
MISIDA	166	23	7	20.7		0.10	1.66	0.49	14.69	4.56	1.45	0.34	14.46	4.34
EDDYSTONE	193	26	6	19.2		0.03	1.20	0.55	4.59	3.33	0.90	0.50	4.53	3.27
JANA	140	22	7	19.0		0.77	1.90	0.97	3.83	1.15	2.65	0.20	2.66	0.36
GRAND BENELUX	177	31	9	16.4		0.48	1.53	0.65	5.77	0.65	1.97	0.17	4.87	0.16
EKFJORD	144	23	7	14.7		0.04	0.38	0.22	4.35	1.75	0.76	0.15	4.25	1.66
NCC RABIGH	183	32	9	14.4		0.15	0.72	0.33	5.02	0.44	1.49	0.16	4.71	0.25
BW HEDDA	170	27	11	13.2		0.00	0.39	0.11	2.73	0.11	2.49	0.10	2.72	0.11
GREAT SWAN	170	25	7	14.3		0.59	0.76	0.69	3.16	1.37	2.24	0.09	2.23	0.68
STAR BEST	163	26	8	14.4		0.19	0.87	0.55	6.01	0.63	5.31	0.30	5.60	0.38
ELBFEEDER	140	22	8	16.8		1.05	4.53	1.05	9.00	7.36	3.88	0.00	7.14	5.59
FINNPULP	188	27	6	17.9	S	0.05	2.30	1.09	10.48	2.95	4.22	0.98	10.36	2.83
SICHEM IRIS	115	18	7	14.3		0.14	0.81	0.14	3.55	0.19	1.46	0.00	3.27	0.05
GRANDE NAPOLI	196	31	9	15.5	L	0.02	1.29	1.19	9.89	1.91	3.89	1.15	9.85	1.87
MISIDA	166	23	7	19.2		0.04	0.81	0.23	7.56	2.60	1.00	0.17	7.47	2.52
JO EIK	149	23	10	11.1		0.54	1.00	0.58	3.03	2.65	2.13	0.04	2.17	1.83
CMA CGM COMOE	191	29	11	18.5	S	0.05	1.52	0.90	8.78	2.06	2.95	0.80	8.67	1.96
SIRRAH	132	19	6	17.6		0.17	0.98	0.23	4.55	3.72	1.35	0.05	4.20	3.37
HANSE COURAGE	144	23	8	14.7		0.13	0.13	0.17	4.94	1.89	1.40	0.04	4.67	1.65
MSC TANZANIA	294	32	13	15.3	S	0.05	1.38	1.04	7.37	1.42	9.54	0.94	7.26	1.32
MSC MARIA ELENA	336	46	11	12.1		0.57	1.83	1.26	15.47	1.89	2.68	0.61	14.30	1.13
APL ARABIA	294	32	12	13.7		0.18	0.54	0.52	3.17	0.92	1.69	0.29	2.81	0.64
AL RAYYAN	276	32	10	13.0		0.78	0.79	0.93	0.92	0.78	2.84	0.15	0.13	0.00
MSC DISCOVERY	275	40	13	13.5		0.01	0.09	0.39	0.06	0.01	0.86	0.37	0.05	0.00
MSC INGRID	294	32	13	12.8		0.04	0.51	0.55	1.00	3.75	0.83	0.48	0.92	3.67
HAMMERSMITH BRIDGE	336	46	13	16.0	L	0.38	0.86	3.91	4.38	2.30	4.18	3.21	3.67	1.68
MSC BEATRICE	366	51	13	13.8		0.05	0.05	0.73	0.05	0.08	0.87	0.63	0.00	0.03
MSC MADELEINE	349	43	12	14.1	S	0.13	0.29	1.22	3.62	0.13	3.06	1.00	3.36	0.00
MSC HIGHNESS	275	40	14	13.3		0.01	1.30	1.01	6.57	3.13	4.08	0.99	6.55	3.12
YM UTILITY	333	43	12	18.8	L	1.12	3.00	3.98	8.38	5.75	8.33	2.46	6.45	4.02
MAYSSAN	306	40	13	10.3		0.21	0.31	0.68	1.94	0.72	2.22	0.40	1.56	0.44
TORONTO EXPRESS	294	32	10	17.9	L	1.17	2.96	2.52	6.45	7.29	6.78	1.19	4.60	5.37
COSCO TAICANG	350	46	11	14.7		0.27	1.07	1.05	7.78	1.52	1.63	0.67	7.23	1.09
MSC FRANCESCA	364	46	14	14.2	L	0.02	0.84	3.24	5.21	0.43	8.42	3.21	5.17	0.39
MAERSK SAVANNAH	335	43	12	15.8	L	0.01	8.65	1.83	24.07	4.54	6.77	1.80	24.05	4.52
BREMEN EXPRESS	336	43	13	12.5	L	0.86	1.69	1.58	1.59	5.05	2.81	0.65	0.66	3.67
JAZAN	305	40	13	15.3		0.05	0.68	1.05	1.79	1.97	1.25	0.94	1.68	1.86
TOKYO EXPRESS	294	32	12	14.7	L	0.02	0.43	0.75	9.62	0.73	2.50	0.70	9.57	0.69
HS LIVINGSTONE	294	32	10	13.1		1.05	2.26	1.98	15.53	2.29	4.59	0.83	13.48	1.09
MARGRIT RICKMERS	294	32	12	14.7		0.08	0.37	0.43	1.77	0.76	1.15	0.31	1.61	0.62

VECTOR

Tabel B.3 Gemiddelde bodemschuifspanning [N/m²] bij de Vector
(voor de 62 geselecteerde scheepspassages).

								scheepsgolf + getij					alleen scheepsgolf		
vector						getij		primaire scheepsgolf	secundaire scheepsgolf 1	secundaire scheepsgolf 2	max. stroomsnelheid (totaal)	primaire scheepsgolf	secundaire scheepsgolf 1	secundaire scheepsgolf 2	
	L [m]	B [m]	D [m]	[kn]	bore	Mean bed shear stress (τ [N/m2])									
STOLT DIPPER	96	15	7	13.4		0.22	0.22	0.22	0.40	0.31	-	-	-	-	
OMEGAGAS	96	14	5	14.4		0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	-	-	-	-	
STELLA LYRA	96	15	5	13.0		0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	-	-	-	-	
DELTAGAS	88	14	5	16.0		0.22	0.22	0.22	0.32	0.39	-	-	-	-	
STOLT KITTIWAKE	96	15	5	17.3		0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	-	-	-	-	
UNION ELISABETH	89	12	3	12.3		0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	-	-	-	-	
STATSRAAD LEHMKUHL	98	13	6	12.1		0.47	0.59	0.47	0.81	0.73	-	-	-	-	
VERDI	94	13	4	12.6		0.27	0.27	0.27	0.39	0.33	-	-	-	-	
VERDI	94	13	4	10.8		0.27	0.27	0.27	0.30	0.28	-	-	-	-	
UNION 5	32	10	N/A	13.2		0.22	0.31	0.22	0.34	0.35	-	-	-	-	
MITTELPLATE	86	12	4	12.6		0.31	0.32	0.31	0.50	0.50	-	-	-	-	
MITTELPLATE	86	12	4	16.0		0.39	0.57	0.39	0.78	0.72	-	-	-	-	
STOLT TERN	96	15	6	14.1		0.03	0.05	0.04	0.06	0.06	-	-	-	-	
DUTCH ENGINEER	81	15	6	12.6		0.40	0.41	0.40	0.68	0.46	-	-	-	-	
CLEARWATER	80	11	3	11.5		0.40	0.41	0.40	0.44	0.40	-	-	-	-	
CLIPPER SUND	89	13	6	11.3		0.52	0.52	0.52	0.64	0.63	-	-	-	-	
GRETA KOSAN	98	16	5	14.7		0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	-	-	-	-	
COSTANZA WONSILD	90	14	5	14.1		0.38	0.39	0.38	0.52	0.39	-	-	-	-	
CLIPPER CUILLIN	96	15	6	16.0		0.41	0.44	0.41	0.57	0.46	-	-	-	-	
WILSON BLYTH	88	13	6	9.0		0.25	0.25	0.25	0.29	0.35	-	-	-	-	
INDEPENDENCE II	199	32	8	12.1		0.27	0.33	0.38	0.53	0.53	-	-	-	-	
FINNPULP	188	27	6	17.3	S	0.26	0.28	0.37	0.49	0.39	-	-	-	-	
EDDYSTONE	193	25	6	18.5		0.18	0.20	0.19	0.36	0.30	-	-	-	-	
MISIDA	166	23	7	20.7		0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	-	-	-	-	
EDDYSTONE	193	26	6	19.2		0.03	0.05	0.05	0.06	0.06	-	-	-	-	
JANA	140	22	7	19.0		0.15	0.23	0.16	0.29	0.27	-	-	-	-	
GRAND BENELUX	177	31	9	16.4		0.17	0.24	0.21	0.32	0.26	-	-	-	-	
EKFJORD	144	23	7	14.7		0.23	0.24	0.25	0.36	0.33	-	-	-	-	
NCC RABIGH	183	32	9	14.4		0.04	0.06	0.06	0.08	0.06	-	-	-	-	
BW HEDDA	170	27	11	13.2		0.04	0.07	0.08	0.09	0.08	-	-	-	-	
GREAT SWAN	170	25	7	14.3		0.24	0.24	0.24	0.42	0.34	-	-	-	-	
STAR BEST	163	26	8	14.4		0.10	0.11	0.16	0.20	0.13	-	-	-	-	
ELBFEEDE	140	22	8	16.8		0.05	0.11	0.07	0.11	0.11	-	-	-	-	
FINNPULP	188	27	6	17.9	S	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	-	-	-	-	
SICHEM IRIS	115	18	7	14.3		0.02	0.03	0.02	0.04	0.04	-	-	-	-	
GRANDE NAPOLI	196	31	9	15.5	L	0.06	0.13	0.14	0.14	0.14	-	-	-	-	
MISIDA	166	23	7	19.2		0.04	0.08	0.07	0.09	0.09	-	-	-	-	
JO EIK	149	23	10	11.1		0.40	0.43	0.40	0.67	0.47	-	-	-	-	

CMA CGM COMOE	191	29	11	18.5	S	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	-	-	-	-
SIRRAH	132	19	6	17.6		0.28	0.29	0.28	0.51	0.41	-	-	-	-
HANSE COURAGE	144	23	8	14.7		0.06	0.11	0.07	0.13	0.11	-	-	-	-
MSC TANZANIA	294	32	13	15.3	S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-
MSC MARIA ELENA	336	46	11	12.1		0.37	0.41	0.55	0.75	0.44	-	-	-	-
APL ARABIA	294	32	12	13.7		0.26	0.26	0.30	0.40	0.30	-	-	-	-
AL RAYYAN	276	32	10	13.0		0.27	0.28	0.30	0.28	0.27	-	-	-	-
MSC DISCOVERY	275	40	13	13.5		0.06	0.09	0.10	0.11	0.09	-	-	-	-
MSC INGRID	294	32	13	12.8		0.14	0.15	0.23	0.24	0.26	-	-	-	-
HAMMERSMITH BRIDGE	336	46	13	16.0	L	0.16	0.22	0.34	0.30	0.31	-	-	-	-
MSC BEATRICE	366	51	13	13.8		0.24	0.24	0.31	0.25	0.33	-	-	-	-
MSC MADELEINE	349	43	12	14.1	S	0.03	0.04	0.07	0.07	0.07	-	-	-	-
MSC HIGHNESS	275	40	14	13.3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-
YM UTILITY	333	43	12	18.8	L	0.35	0.56	0.72	0.75	0.68	-	-	-	-
MAYSSAN	306	40	13	10.3		0.05	0.06	0.09	0.10	0.06	-	-	-	-
TORONTO EXPRESS	294	32	10	17.9	L	0.23	0.37	0.47	0.48	0.47	-	-	-	-
COSCO TAICANG	350	46	11	14.7		0.19	0.22	0.32	0.39	0.33	-	-	-	-
MSC FRANCESCA	364	46	14	14.2	L	0.03	0.06	0.06	0.06	0.06	-	-	-	-
MAERSK SAVANNAH	335	43	12	15.8	L	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	-	-	-	-
BREMEN EXPRESS	336	43	13	12.5	L	0.31	0.41	0.52	0.60	0.56	-	-	-	-
JAZAN	305	40	13	15.3		0.23	0.24	0.36	0.33	0.39	-	-	-	-
TOKYO EXPRESS	294	32	12	14.7	L	0.03	0.06	0.06	0.06	0.06	-	-	-	-
HS LIVINGSTONE	294	32	10	13.1		0.47	0.56	0.73	0.93	0.60	-	-	-	-
MARGRIT RICKMERS	294	32	12	14.7		0.22	0.22	0.26	0.30	0.24	-	-	-	-

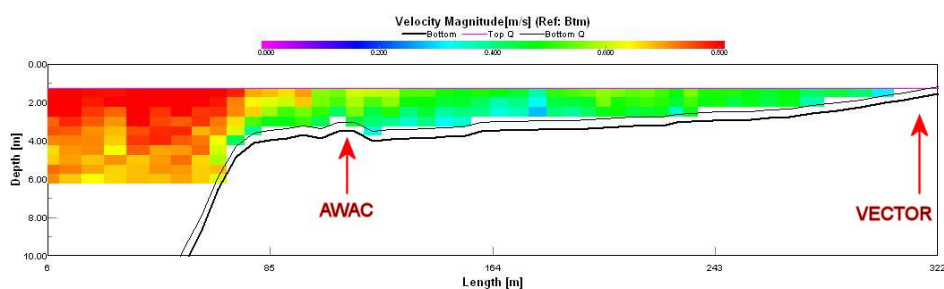
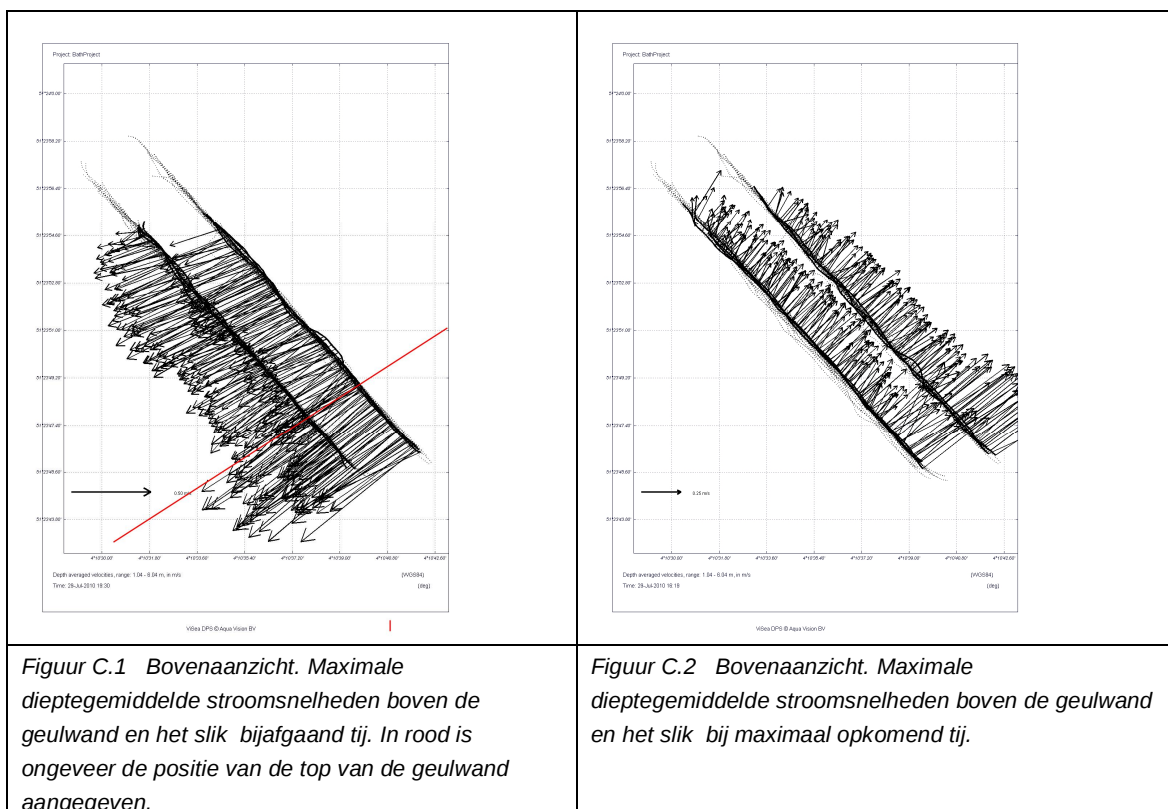
Tabel B.4 Maximale momentane bodemschuifspanning [N/m^2] bij de Vector
(voor de 62 geselecteerde scheepspassages).

								scheepsgolf + getij				alleen scheepsgolf		
vector						getij + windgolf		primaire scheepsgolf	secundaire scheepsgolf 1	secundaire scheepsgolf 2	max. stroomsnelheid (totaal)	primaire scheepsgolf	secundaire scheepsgolf 1	secundaire scheepsgolf 2
	L [m]	B [m]	D [m]	[kn]	bore	Max. bed shear stress (τ [N/m2])								
STOLT DIPPER	96	15	7	13.4		0.22	0.28	0.24	2.03	0.89	0.68	0.02	1.63	0.57
OMEGAGAS	96	14	5	14.4		0.01	0.36	0.07	1.62	1.38	0.33	0.05	1.60	1.36
STELLA LYRA	96	15	5	13.0		0.00	0.11	0.00	2.14	1.81	0.15	0.00	2.13	1.80
DELTAGAS	88	14	5	16.0		0.22	0.27	0.22	0.99	1.85	0.49	0.00	0.66	1.46
STOLT KITTIWAKE	96	15	5	17.3		0.01	1.17	0.01	5.37	2.04	0.60	0.00	5.35	2.02
UNION ELISABETH	89	12	3	12.3		0.01	0.24	0.01	1.01	0.33	0.22	0.00	0.99	0.31
STATSRAAD LEHMKUHL	98	13	6	12.1		0.47	1.34	0.47	3.66	2.51	0.90	0.00	2.84	1.78
VERDI	94	13	4	12.6		0.27	0.31	0.27	1.14	0.70	0.56	0.00	0.75	0.37
VERDI	94	13	4	10.8		0.27	0.29	0.27	0.50	0.36	0.41	0.00	0.21	0.09
UNION 5	32	10	N/A	13.2		0.22	0.92	0.22	1.18	1.32	0.47	0.00	0.84	0.97
MITTELPLATE	86	12	4	12.6		0.31	0.47	0.31	1.87	1.77	0.57	0.00	1.37	1.28
MITTELPLATE	86	12	4	16.0		0.39	1.65	0.44	7.00	3.97	1.95	0.05	6.23	3.26
STOLT TERN	96	15	6	14.1		0.03	0.16	0.08	1.50	0.98	0.18	0.05	1.44	0.92
DUTCH ENGINEER	81	15	6	12.6		0.40	0.57	0.40	2.92	0.88	0.77	0.00	2.24	0.42
CLEARWATER	80	11	3	11.5		0.40	0.57	0.49	0.76	0.45	0.77	0.08	0.32	0.05

CLIPPER SUND	89	13	6	11.3		0.52	0.56	0.52	1.43	1.34	0.83	0.00	0.79	0.72
GRETA KOSAN	98	16	5	14.7		0.01	0.29	0.07	3.15	1.06	0.49	0.04	3.12	1.03
COSTANZA WONSILD	90	14	5	14.1		0.38	0.59	0.43	1.40	0.59	0.97	0.05	0.88	0.20
CLIPPER CUILLIN	96	15	6	16.0		0.41	0.75	0.41	1.54	0.84	0.63	0.00	0.97	0.38
WILSON BLYTH	88	13	6	9.0		0.25	0.33	0.25	0.58	0.97	0.38	0.00	0.29	0.62
INDEPENDENCE II	199	32	8	12.1		0.27	0.71	1.09	4.68	4.61	0.76	0.71	4.15	4.08
FINNPULP	188	27	6	17.3	S	0.26	0.46	1.04	3.17	1.21	0.94	0.67	2.68	0.83
EDDYSTONE	193	25	6	18.5		0.18	0.34	0.28	3.37	1.15	0.48	0.10	3.01	0.85
MISIDA	166	23	7	20.7		0.01	0.69	0.66	12.02	7.06	2.02	0.65	12.00	7.05
EDDYSTONE	193	26	6	19.2		0.03	0.29	0.67	2.77	0.99	0.41	0.62	2.71	0.93
JANA	140	22	7	19.0		0.15	0.76	0.29	2.37	1.40	0.46	0.13	2.08	1.13
GRAND BENELUX	177	31	9	16.4		0.17	0.62	0.48	1.83	0.83	0.89	0.27	1.51	0.57
EKFJORD	144	23	7	14.7		0.23	0.37	0.41	1.19	0.97	0.42	0.17	0.83	0.64
NCC RABIGH	183	32	9	14.4		0.04	0.23	0.30	3.05	0.21	0.52	0.24	2.97	0.15
BW HEDDA	170	27	11	13.2		0.04	0.41	0.45	3.03	1.33	0.35	0.38	2.94	1.25
GREAT SWAN	170	25	7	14.3		0.24	0.33	0.34	1.95	0.98	0.42	0.09	1.53	0.64
STAR BEST	163	26	8	14.4		0.10	0.21	0.65	2.76	0.32	0.61	0.49	2.56	0.19
ELBFEEDER	140	22	8	16.8		0.05	0.95	0.19	1.21	2.40	0.53	0.12	1.10	2.29
FINNPULP	188	27	6	17.9	S	0.01	1.13	1.44	5.47	1.26	0.95	1.42	5.45	1.24
SICHEM IRIS	115	18	7	14.3		0.02	0.17	0.02	2.66	1.67	0.36	0.00	2.62	1.64
GRANDE NAPOLI	196	31	9	15.5	L	0.06	1.13	3.40	12.56	4.59	3.09	3.27	12.42	4.45
MISIDA	166	23	7	19.2		0.04	0.54	0.25	6.10	1.65	0.78	0.19	6.01	1.56
JO EIK	149	23	10	11.1		0.40	0.73	0.42	2.84	0.99	0.70	0.03	2.17	0.52
CMA CGM COMOE	191	29	11	18.5	S	0.01	0.85	1.85	8.26	2.63	1.06	1.83	8.24	2.61
SIRRAH	132	19	6	17.6		0.28	0.47	0.37	2.92	1.23	0.58	0.09	2.41	0.83
HANSE COURAGE	144	23	8	14.7		0.06	0.42	0.10	1.41	0.47	0.40	0.03	1.27	0.36
MSC TANZANIA	294	32	13	15.3	S	0.00	0.92	3.44	6.05	2.25	5.97	3.44	6.05	2.25
MSC MARIA ELENA	336	46	11	12.1		0.37	0.73	1.66	8.38	0.93	1.65	1.11	7.62	0.48
APL ARABIA	294	32	12	13.7		0.26	0.34	0.61	1.33	0.61	0.63	0.30	0.93	0.30
AL RAYYAN	276	32	10	13.0		0.27	0.42	0.54	0.41	0.34	0.78	0.24	0.13	0.07
MSC DISCOVERY	275	40	13	13.5		0.06	0.35	0.56	0.66	0.33	0.34	0.46	0.56	0.24
MSC INGRID	294	32	13	12.8		0.14	0.26	0.82	1.00	1.46	0.61	0.59	0.76	1.20
HAMMERSMITH BRIDGE	336	46	13	16.0	L	0.16	0.59	6.03	1.62	2.16	9.83	5.69	1.33	1.85
MSC BEATRICE	366	51	13	13.8		0.24	0.25	0.78	0.37	0.90	0.73	0.46	0.12	0.57
MSC MADELEINE	349	43	12	14.1	S	0.03	0.10	1.27	1.06	0.95	1.32	1.20	0.98	0.88
MSC HIGHNESS	275	40	14	13.3		0.00	0.55	3.84	11.77	20.46	10.40	3.83	11.77	20.45
YM UTILITY	333	43	12	18.8	L	0.35	1.96	9.71	17.98	5.04	6.53	8.98	17.23	4.36
MAYSSAN	306	40	13	10.3		0.05	0.13	0.76	1.20	0.13	1.08	0.67	1.10	0.07
TORONTO EXPRESS	294	32	10	17.9	L	0.23	1.36	5.31	9.76	6.93	4.28	4.85	9.28	6.46
COSCO TAICANG	350	46	11	14.7		0.19	0.46	1.31	4.83	1.53	0.98	0.99	4.44	1.19
MSC FRANCESCA	364	46	14	14.2	L	0.03	0.57	8.52	11.89	0.78	13.10	8.45	11.83	0.73
MAERSK SAVANNAH	335	43	12	15.8	L	0.02	0.81	7.89	19.79	5.27	5.15	7.84	19.75	5.22
BREMEN EXPRESS	336	43	13	12.5	L	0.31	1.01	2.11	4.17	2.84	2.13	1.59	3.57	2.28
JAZAN	305	40	13	15.3		0.23	0.36	1.20	0.94	1.51	0.89	0.84	0.61	1.13
TOKYO EXPRESS	294	32	12	14.7	L	0.03	0.96	4.02	10.09	3.55	2.54	3.96	10.03	3.49
HS LIVINGSTONE	294	32	10	13.1		0.47	1.17	2.55	8.56	1.43	2.30	1.82	7.63	0.83
MARGRIT RICKMERS	294	32	12	14.7		0.22	0.28	0.51	0.77	0.43	0.42	0.25	0.48	0.19

C Ruimtelijke stroomsnelheidsmetingen op het Slik van Bath 29 juli 2010

Op 29 juli 2010 zijn vanaf een meetschip uitgerust met een ADCP metingen uitgevoerd. De metingen geven inzicht in de ruimtelijke variabiliteit van de stroming op het slik, maar zijn niet in detail verwerkt of geanalyseerd. De figuren tonen de maximale dieptegemiddelde stromingen die zijn gemeten tijdens afgaand en opkomend tij. De metingen tonen dezelfde hogere stroomsnelheden bij afgaand tij die ook in de metingen van de Vector en AWAC te zien zijn. De metingen laten ook zien dat de dieptegemiddelde stroomsnelheid niet homogeen afloopt naar het ondieper gedeelte. Bij afgaand tij er is een dip van 20 % in de stroomsnelheden op ongeveer 100 meter van de geulwand (dit is consistent over meerdere metingen bij afgaand tij) en bij opkomend tij zijn de stroomsnelheden vlak achter de geulwand juist iets lager dan 100 meter vanaf de geulwand.



Figuur C.3 Maximale Stroomsnelheden boven de geulwand en het slik bij opkomend tij. Met de locaties van de meetapparatuur.

D Overzicht bodemsamenstelling van het slik bij Bath

