

**Sardijngeul- grote
scheepsgolven op het
Badstrand te Vlissingen,
bureaustudie**



**Sardijngeul- grote scheepsgolven
op het Badstrand te Vlissingen,
bureaustudie**

M. van der Wal
A. van der Hout
T. Jongeling

1203778-000

Titel

Sardijngeul- grote scheepsgolven op het Badstrand

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Waterdienst 1203778-000

Project**Kenmerk**

1203778-000-ZWS-0007-vj87

Pagina's**Trefwoorden**

Strand, scheepsgolven, TRITON, translatiegolven

Samenvatting

Bij Vlissingen vormt de Sardijngeul een smalle vaarweg die dicht langs het strand ligt. Af en toe treden grote golven op die door langsvarende schepen worden opgewekt. Deze golven veroorzaken hinder voor badgasten op het strand.

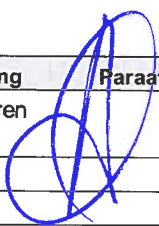
Ter voorbereiding van veldmetingen in de Sardijngeul van de golven opgewekt door langsvarende schepen is een bureaustudie naar deze verschijnselen uitgevoerd. Dit rapport is het verslag van die bureaustudie, die door Rijkswaterstaat Zeeland in overleg met de Waterdienst is opgedragen.

In het kader van deze bureaustudie zijn enkele verkennende berekeningen naar de optredende verschijnselen uitgevoerd. De resultaten van berekeningen met het golfmodel TRITON zijn aansprekend. Hieruit blijkt onder andere dat de vorm van het strandprofiel en de grootte van de primaire scheepsgolf van grote invloed zijn op de hinder. Verwacht wordt dat ook de waterstand van grote invloed is. Bij het voorbereiden van de veldmetingen is van deze resultaten gebruik gemaakt.

De primaire scheepsgolf wordt onder andere beïnvloed door het vaargedrag van een schip en door veranderingen in het dwarsprofiel van de vaarweg (c.q. vernauwingen). Daardoor worden translatiegolven opgewekt, die de primaire scheepsgolf kunnen vergroten en verminderen.

Referenties

opdrachtbrief met referentie RWSWD-2010/3703 d.d. 18 november 2010.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.	december 2010	M. van der Wal		E. Mosselman		A.G. Segeren	
		A. van der Hout					
		T. Jongeling					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Probleemstelling	3
1.2 De reeds genomen maatregelen	4
1.3 Doelstelling van de bureaustudie	8
1.4 Aanpak van de bureaustudie	8
2 Beschrijving van de verschijnselen	11
2.1 Inleiding	11
2.2 Onbegrensd vaarwater met een eenparige vaarsnelheid	11
2.3 Begrensd vaarwater met een eenparige vaarsnelheid	12
2.4 Secundaire scheepsgolven	13
2.5 Begrensd vaarwater met discontinuïteiten	14
2.6 De kritische snelheden van een schip	16
3 Het effect van het aanpassen van de helling van het strand	17
3.1 TRITON model	17
3.1.1 Golfbreken	18
3.1.2 Golfoploop	18
3.2 Modelopzet	19
3.2.1 Bodemprofielen	19
3.2.2 Algemene opzet	19
3.2.3 Golfkarakteristiek van het passerende schip	21
3.3 Resultaten	22
3.3.1 Verschillende bodemprofielen	23
3.3.2 Effect van bodemwrijving	27
3.3.3 Golfbreken	28
3.4 Conclusies	29
4 Effect van het passeren van een discontinuïteit in de vaarweg	31
4.1 Berekening primaire scheepsgolf	31
4.2 Doel van de berekeningen met het rekenprogramma WAROS	32
4.3 Relevante schepen	33
4.4 Het vaarwegmodel	33
4.5 Uitgevoerde berekeningen	35
4.6 Resultaten van de WAROS-berekeningen (ongeschaald)	36
4.6.1 De effecten bij het binnenvaren van een vernauwing in de vaargeul	36
4.6.2 De effecten van versnellen of vertragen van het schip	38
4.6.3 De effecten van waterdieptevariatie	40
4.6.4 De effecten van een minder sterke, geleidelijker vernauwing van de vaargeul	41
4.6.5 De effecten van tegenstroming of meestroming in de vaargeul	42
4.6.6 Conclusies uit de WAROS-berekeningen	44
4.7 Betekenis van de WAROS berekeningen voor de werkelijke situatie	45
5 Samenvatting en mogelijke maatregelen	47
5.1 Samenvatting uitgevoerde berekeningen en toepassing van de resultaten	47
5.2 Vertaling van de resultaten naar maatregelen voor het beheer Badstrand	52
5.2.1 Inleiding	52

5.2.2	Het huidige onderhoud van de Sardijngeul	52
5.2.3	Het huidige onderhoud van het Badstrand	53
5.2.4	Analyse dwarsprofielen	53
5.2.5	Richtlijn	54
5.2.6	Aanvullende maatregelen	54
5.2.7	Aanbeveling	55
5.3	Vertaling van de resultaten naar maatregelen voor het scheepvaartverkeer	58
6	Conclusies en aanbevelingen	61
6.1	Conclusies	61
6.2	Aanbevelingen	62
7	Referenties	65
 Bijlagen		
A	Bijlage A Gezamenlijke Bekendmaking 03-2010 van de Gemeenschappelijke Nautische Autoriteit	67
B	Bodemligging Badstrand	B-1
C	Informatie over methode Schijf	C-1
C.1	Inleiding	C-1
C.2	Theorie	C-2
C.3	Toepassing van de methode	C-4
C.4	Referenties	C-6

1 Inleiding

In de zomer van 2010 hebben strandgasten op het Badstrand bij Vlissingen hinder ondervonden van grote golven, die door langsvarende schepen werden opgewekt en die op het strand een plotselinge en onverwachte waterbeweging met brekende golven veroorzaakte. De Rijkswaterstaat, Waterdienst heeft Deltares verzocht een bureaustudie naar de verschijnselen rondom het optreden van grote scheepsgolven in de Sardijngeul vanaf het bolwerk De Leugenaar te Vlissingen uit te voeren (offerte nr. 1203778-000-ZWS-0003-ha d.d. 5 november 2010, opdrachtbrief met referentie RWS/WD-2010/3703 d.d. 18 november 2010).

Tijdens een overleg op 15 september 2010 in het Schelde Coördinatie Centrum met deelnemers van SCC, RWS, Loodswezen en Deltares is de mogelijke preventie van en het optreden van grote scheepsgolven op het strand naast de Sardijngeul vanaf het bolwerk De Leugenaar, dat aan de boulevard van Vlissingen is gelegen, besproken aan de hand van een voorstel door Deltares. Het voorstel is om de golven die door een passerend, uitvarend schip worden opgewekt te meten met een meetinstrument of meerdere meetinstrumenten voor het begin van het problematische deel van Oostgat, namelijk de Sardijngeul, vanaf De Leugenaar. Van zee binnenkomende schepen lijken minder hinder te veroorzaken. In het geval dat een te grote golf wordt gemeten, wordt dit direct aan het desbetreffende schip en het Schelde Coördinatie Centrum doorgegeven. Het desbetreffende schip kan dan direct zijn vaarsnelheid verminderen.

Ter verificatie en ter ondersteuning van een waarschuwingssysteem worden de golven ter plaatse van de probleemgebieden eveneens gemeten, ter hoogte van de vaarwegmarkering dan wel het strand. De voordelen van deze metingen zijn:

- Alleen van schepen, waarvan vrij zeker verwacht wordt dat ze te grote golven zullen opwekken, wordt daarna de vaarsnelheid beperkt.
- Met het registreren van scheepsgolven wordt bekend hoe groot die golven zijn en na verloop van tijd kunnen de criteria voor grote scheepsgolven worden aangescherpt en daarmee neemt de kans op hinder voor strandgasten in de loop van de tijd af.

Inmiddels is het veroorzaken van een zogenaamde vloedgolf in de Gezamenlijke Bekendmaking 003-2010 van de Gemeenschappelijke Nautische Autoriteit strafbaar gesteld, zie bijlage A voor de tekst van die bekendmaking. Ook is in het Scheepvaart Reglement Westerschelde, SRW '90 artikel 56 een soortgelijke bepaling opgenomen. Dus het is ook voor schippers en reders van belang om inzicht te hebben in de door hen veroorzaakte overlast en, nog belangrijker, hoe ze die kunnen voorkomen.

Uit de discussie over het voorstel van Deltares bleek dat deze grote scheepsgolven waarschijnlijk door verschillende parameters worden bepaald. Enkele van die parameters zijn door het nemen van maatregelen te beïnvloeden en daarmee kan de mate van hinder worden gereduceerd. De betrokken instanties zullen samen de verschillende maatregelen moeten afwegen om tot een keuze te komen.

Andere parameters zijn niet met maatregelen te beïnvloeden, maar wel te monitoren, bijvoorbeeld de waterstand in de Sardijngeul, die als een van nature gegeven parameter kan worden beschouwd.

De bureaustudie is gericht op het inventariseren van beïnvloedbare parameters welke de grootte van de scheepsgolven op het strand bepalen. De volgende aspecten gerelateerd aan die parameters, zijn tijdens het overleg op 15 september als mogelijk relevante effecten geïnventariseerd

- Het effect van de snelheid en de vaarrichting van een passerend schip.
- Het effect van de positie van een schip in een vaarweg.
- Het effect van het versnellen en vertragen van een schip.
- Het effect van het invaren van een vernauwing (plunjereffect).
- Het effect van het uitzetten van het schroefvermogen.
- Het effect van de dimensie, vorm en diepgang van het schip.
- Het effect van het verbreden van de inloop van de Sardijngeul.
- Het effect van het aanpassen van de helling van de oever (het strand).

De huidige beschikbare kennis om deze effecten in de situatie van de Sardijngeul te bepalen is verkend. Hierbij ligt de nadruk op beschikbare rekenmodellen, rekenregels en hun beperkingen bij een toepassing in een situatie, die in de Sardijngeul kan optreden.

Leeswijzer

De waterbeweging rondom een schip is in hoofdstuk 2 beschreven. Daarbij is speciale aandacht voor de waterbeweging rondom een schip dat in een smalle vaargeul langs het strand vaart.

De hoofdstukken 3 en 4 hebben een theoretisch karakter, omdat daar resultaten van rekenmodellen worden behandeld. De lezer, die niet geïnteresseerd is in de theoretische aspecten van rekenmodellen, kan deze hoofdstukken overslaan en verder gaan in hoofdstuk 5, waarin ook een samenvatting wordt gegeven van de resultaten van hoofdstukken 3 en 4.

Het effect van het aanpassen van de helling van het dwarsprofiel van het strand op de waterspiegeldaling en de golfoploop op het strand is met enkele berekeningen met het golfmodel TRITON verkend (hoofdstuk 3).

Het effect van het invaren van een vernauwing (plunjereffect) en het effect van het versnellen en vertragen van een schip zijn in hoofdstuk 4 behandeld aan de hand van de uitkomsten van berekeningen met het WAROS-model. Het effect van het verbreden van de Inloop van de Sardijngeul is niet afzonderlijk behandeld. Het effect van het uitzetten van het schroefvermogen valt onder de behandeling van het effect van het versnellen en vertragen van een schip.

Een volgende stap is de vertaling van de resultaten van hoofdstukken 3 en 4 naar maatregelen (hoofdstuk 5). Een samenvatting met conclusies en aanbevelingen uit deze bureaustudie staat in hoofdstuk 6. In de samenvatting zijn de resultaten uit de voorgaande hoofdstukken op de situatie van de Sardijngeul toegepast.

Deze bureaustudie is uitgevoerd door ir. M. van der Wal (projectleider), ir. A. van der Hout (berekeningen met het golfmodel TRITON, hoofdstuk 3), ir. T. Jongeling (berekeningen met WAROS, hoofdstuk 4, en een bijdrage aan de beschrijving van de verschijnselen, hoofdstuk 2). Namens de opdrachtgever heeft ing. D. van Maldegem van Rijkswaterstaat Zeeland het project begeleid.

1.1 Probleemstelling

In de zomer van 2010 hebben strandgasten tussen Vlissingen en Zoutelande hinder ondervonden van grote golven, die door een langsvarend schip werden opgewekt en op het strand braken. Daarbij vielen op zondagmiddag 4 juli, rond 17:30 uur een aantal gewonden op het Badstrand (zie Provinciale Zeeuwse Courant webartikel 22 juli 2010 en een artikel in Trouw 23 juli 2010 en het Youtube filmpje <http://www.youtube.com/watch?v=9-H9Jn3SY6A>). Het Badstrand voor de boulevard van Vlissingen is langs de vrij smalle Sardijngeul gelegen, zie de bathymetrie in figuur 1.1. Het verschijnsel treedt vrij regelmatig op, maar alleen als er strandgasten zijn worden die golven als hinderlijk ervaren. De strandwachten hebben de incidenten in Tabel 1.1 met grote scheepsgolven op het strand in 2009 en 2010 geregistreerd. Bij deze incidenten hebben overwegend kinderen lichte verwondingen opgelopen.

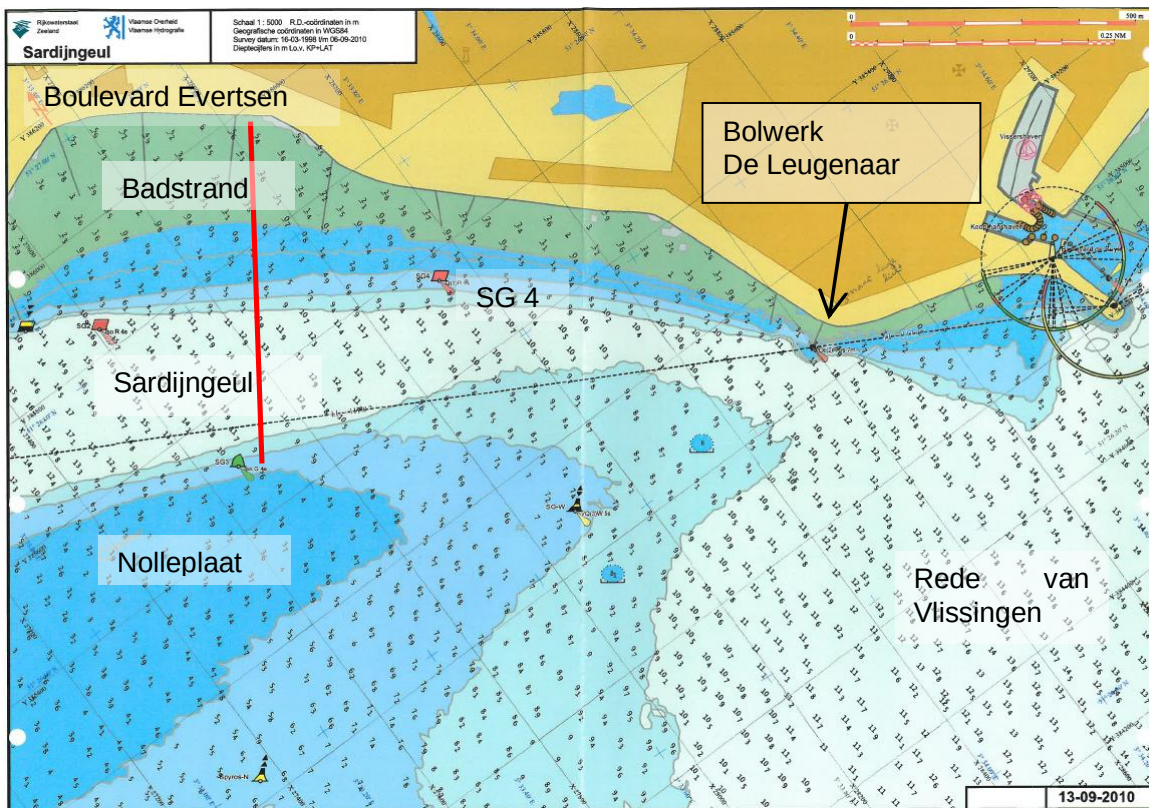
Datum	Type schip	Water-stand	Diep-gang	Leng-te	Breedte	Vaarsnel-heid bij De Leugenaar	Vaarsnelheid bij Badstrand
		m NAP	m	m	m	knopen	knopen
25-Jun-09	Container	+2.19	9.8	203	25	10.9	11.6
04-Aug-09	Container	+0.35	8.6	149	22	15.6	15.6
04-Aug-09	Tanker	-0.63	6.3	120	17	14.8	14.8
04-Jul-10	Tanker	-1.26	6.5	178	28	13.1	13.0
18-Jul-10	Container	-1.20	7.2	185	25	14.4	14.4
20-Jul-10	Container	-1.30	7.5	149	22	10.8	12.5

Tabel 1.1 Gegevens van scheepspasages waarbij in 2009 en 2010 op het strand hinder voor badgasten ontstond.

Vroeger kwam overwegend de lokale bevolking op het strand en zij waren op de hoogte van het verschijnsel en hielden daar rekening mee. Tegenwoordig komt een aanzienlijk deel van de strandgasten van verre en zijn zij niet bekend met dit verschijnsel. Daardoor ontstaan nu soms gevaarlijke situaties en zijn er maatregelen nodig.

Het verschijnsel treedt op meerdere plaatsen tussen Vlissingen en Westkapelle op, zie bijvoorbeeld het incident bij Zoutelande (Deltares, M. van der Wal, 2009). Als maatregel om de hinder door zo een incident te verminderen is de OG8 boei in 2006/2007 56 m westwaarts verlegd. Uit een recent gesprek tussen de burgemeester van Veere en Rijkswaterstaat blijkt dat sinds het verleggen van de betoning zich daar geen incidenten meer hebben voorgedaan.

Nabij platen in de Westerschelde zijn verschillende gevallen van een grote scheepsgolf bekend. Er zijn ook meldingen van strandvissers die 's nachts door een hinderlijke scheepsgolf zijn verrast. Schippers en loodsen melden dat een hinderlijke golf op het strand ver achter het schip optreedt en vanaf de brug niet of moeilijk is te zien. Op de brug van het schip merkt men niet dat het schip een hinderlijke golf op het strand veroorzaakt.



Figuur 1.1 Bathymetrie van de Sardijngeul voor de boulevard van Vlissingen.

Opgemerkt wordt dat de bathymetrie in figuur 1.1 uit peilingen op verschillende tijdstippen is samengesteld. Het Badstrand is in maart 2008 ingemeten en de Sardijngeul in september 2010. De rode lijn in figuur 1.1 is ongeveer de lijn waarin op 18 februari 2011 veldmetingen zijn verricht.

1.2 De reeds genomen maatregelen

Praktijkervaring, ondersteund door een bureaustudie van Deltares (Deltares, M. van der Wal, 2009), leert dat de volgende twee maatregelen effectief kunnen zijn om het optreden van grote scheepsgolven te voorkomen:

- De afstand tussen een schip en het strand vergroten en
- De vaarsnelheid van een schip reduceren.

De afgelopen jaren heeft dit geleid tot de uitvoering van enkele maatregelen. Bijvoorbeeld de afstand tussen schip en strand is bij Zoutelande vergroot door de boeienlijn van de vaargeul in het Oostgat zover mogelijk van het strand te leggen. Tevens is geadviseerd de vaarsnelheid te verlagen tot maximum 12 knopen (zie Deltares, M. van der Wal, 2009). Deze verlaging van de geadviseerde vaarsnelheid is een tijdelijke maatregel geweest. Daarnaast zijn er verschillende maatregelen genomen om schepen, loodsen, strandwachten en strandgasten te informeren en te waarschuwen.

Zodra een schip dat mogelijk een grote scheepsgolf zou kunnen veroorzaken in aantocht is, geeft het Schelde Coördinatie Centrum tijdig een waarschuwing aan de strandpost op het Badstrand. Zodoende heeft de strandwacht nog voldoende gelegenheid de badgasten te informeren en kleine kinderen uit het water te halen. Als strandwachten gaan fluiten dan dienen strandgasten extra alert te zijn, omdat een grote scheepsgolf kort hierop het strand zal overspoelen.

Het Schelde Coördinatie Centrum kan echter op een radarbeeld niet zien of een schip een grote scheepsgolf veroorzaakt. Bij het geven van waarschuwingen baseert men zich op ervaringen in het verleden met bepaalde typen schepen. De adviezen van het Schelde Coördinatie Centrum zijn gericht op het hanteren van goed zeemanschap.



Figuur 1.2 Onthulling van een waarschuwingsbord op het strand bij Vlissingen op 11 december 2003 en een nieuw geplaatst bord in december 2010.

Sinds december 2010 zijn twee extra waarschuwingsborden bij het Vlissingse strand geplaatst, zie figuur 1.2. De linker foto uit 2003 is van de internetsite van de gemeente Vlissingen gekopieerd. De borden staan onder andere bij de twee trappen naar het strand en waarschuwen strandbezoekers voor onverwachte “vloedgolven” veroorzaakt door de scheepvaart. In totaal staan er vier borden. Opgemerkt wordt dat de gemeente Vlissingen spreekt over “vloedgolven” en dat dezelfde golven in deze bureaustudie grote scheepsgolven worden genoemd.

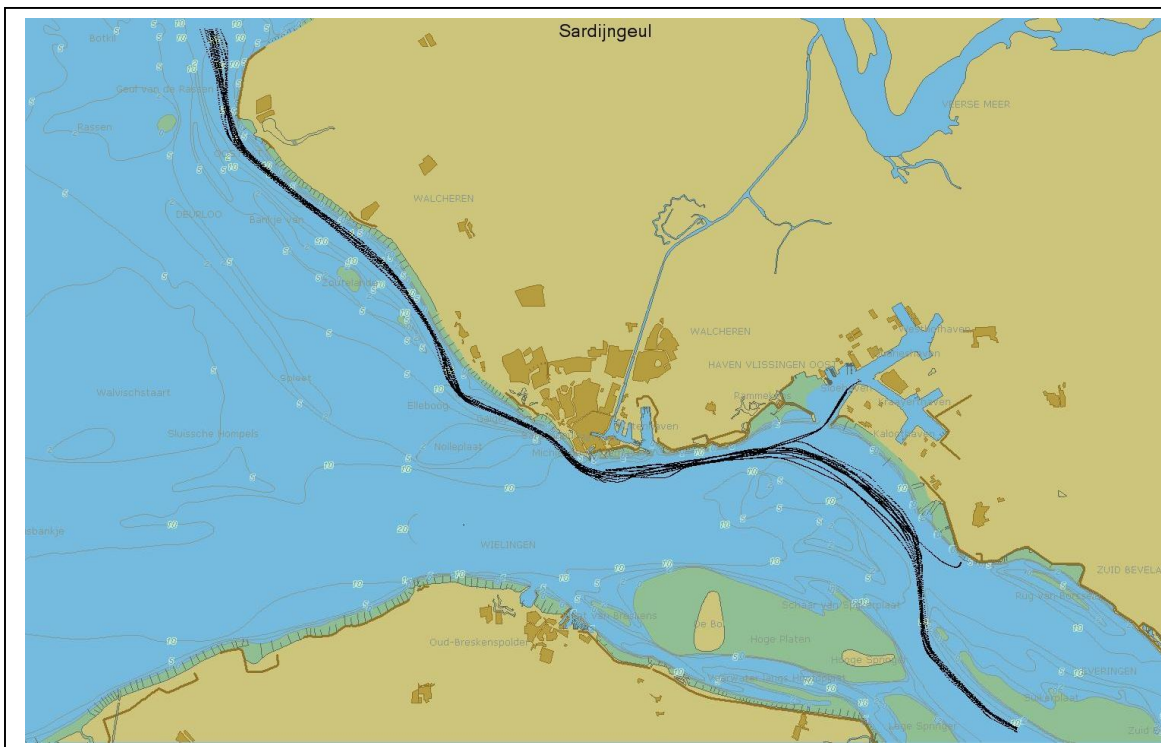
De nu lopende discussie richt zich enerzijds op het verder beperken van de maximum toegestane vaarsnelheid, en anderzijds het beter naleven van de al bestaande regels betreffende de maximum vaarsnelheid. Een verdere beperking van de maximum vaarsnelheid zou voor alle schepen moeten gaan gelden. Het beperken van die maximum snelheid is een effectieve maatregel, maar er zijn ook andere factoren die een belangrijke rol spelen in het wel of niet optreden van grote golven op het strand. Dat is bijvoorbeeld de lengte en de vorm van een schip. Verschillende schepen zullen bij dezelfde vaarsnelheid en in vergelijkbare omstandigheden verschillende golven opwekken. In de praktijk worden daarom zogenaamde risicoschepen onderscheiden. Dat zijn schepen die in het verleden grote golven hebben veroorzaakt. De opdrachtgever heeft enkele gegevens over deze risicoschepen verstrekt: de lengte varieert van 169 tot 207 m, een breedte van 25,3 tot 32,2 m en een maximum diepgang van 7,4 tot 12,2 m, zie tabel 1.2. Enkele van deze schepen varen meerdere keren per maand door de Sardijngeul.

Uit deze tabel blijkt dat voornamelijk van grote en middelgrote zeeschepen bekend is dat zij hinder kunnen veroorzaken. Kleine zeeschepen, zoals coasters, ontbreken in de tabel.

Tabel 1.2 Kenmerken van enkele risicoschepen

Lengte (m)	Breedte (m)	Maximum diepgang (m)	Laadvermogen DWT (ton)
169	27,2	9,0	15.950
178	28,2	11,0	32.480
183	32,2	12,2	46.733
184	25,3	9,8	17.000
200	26,5	7,4	8.850
205	25,8	8,5	18.250
205	25,8	8,4	-
207	29,8	11,4	33.900

De route die de schepen in de vaargeul volgen, wordt sinds 2006 door het AIS geregistreerd, zie voorbeeld in figuur 1.3.

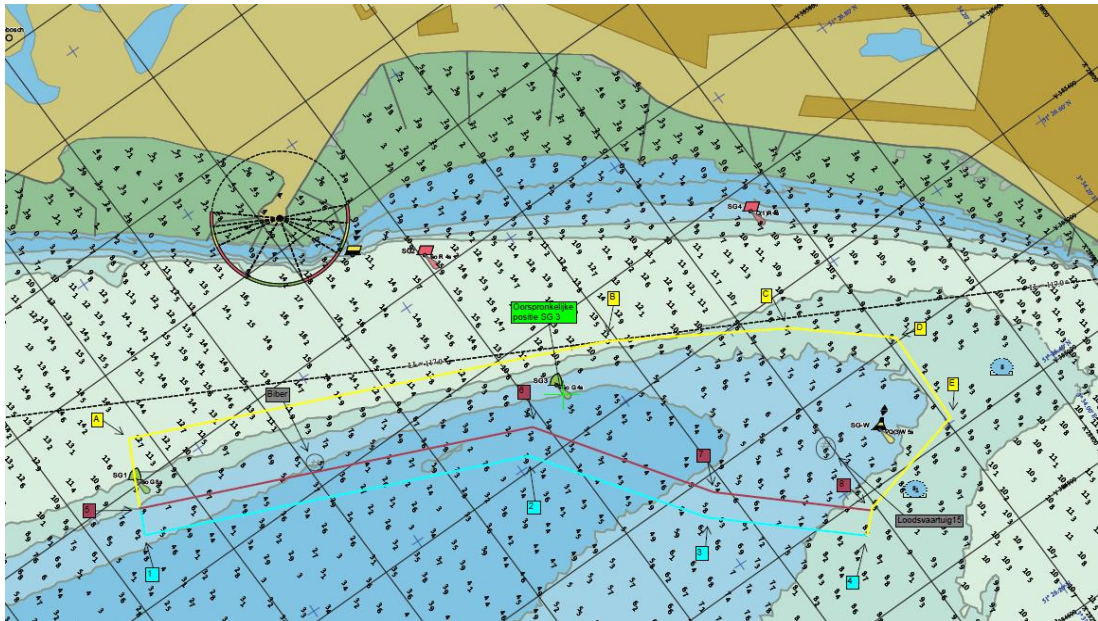


Figuur 1.3 Voorbeeld van de geregistreerde vaarroutes van schepen in de Sardijngeul.

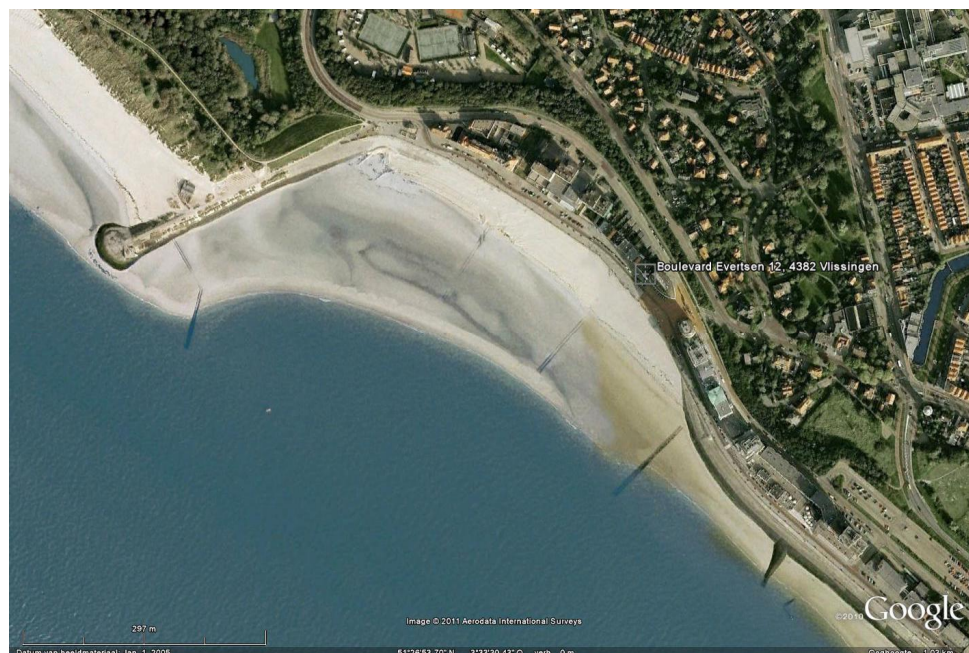
De Nolleplaat grenst aan de Sardijngeul (zie figuren 1.1 en 1.3). De punt van de Nolleplaat is aan de oostzijde zodanig aangezand dat het hinder oplevert voor het scheepvaartverkeer in de Sardijngeul. Daarom is in een deel van deze punt van 22 november tot 6 december 2010 250.000 m³ gebaggerd voor een deel als onderhoudsbaggerwerk en voor een deel als verruiming van de vaarweg. Het baggervak is in figuur 1.4 aangegeven. Daardoor ontstaat een verwijding van de invaart voor uitgaande schepen. Dat kan invloed hebben op het scheepvaartgedrag en op de kans van voorkomen van grote scheepsgolven op het strand.

Door morfologische veranderingen in de Sardijngeul kan de hinder door grote scheepsgolven in de tijd per locatie variëren.

Figuur 1.1 geeft een indruk van de ligging van het Badstrand. Deze ligging is in Bijlage B meer in detail zijn te zien in enkele in 2009 gemeten dwarsprofielen. Enkele jaren geleden is op het Badstrand een zandsuppletie uitgevoerd. Deze suppletie is te zien op Google Earth luchtfoto van januari 2005 in figuur 1.5.



Figuur 1.4 Baggervak op de punt van de Nolleplaat: het baggervak wordt begrensd door de gele/blauwe/rode lijnen.



Figuur 1.5 Luchtfoto van het Badstrand in 2005 (bron Google Earth).

1.3 Doelstelling van de bureaustudie

De doelstelling van de bureaustudie bestaat uit de volgende delen:

- Vergroten van het inzicht in de relevantie van de verschillende effecten genoemd in de voorgaande paragrafen voor de situatie van het Badstrand langs de Sardijngeul te Vlissingen. Van de inventarisatie van mogelijk relevante effecten tijdens het overleg op 15 september 2010 zijn de volgende effecten in deze bureaustudie nader uitgewerkt:
 - Het effect van het invaren van een vernauwing (plunjereffect) en de combinatie van het invaren van een vernauwing met het variëren van het motorvermogen voor, tijdens en na het passeren van een vernauwing en met de invloed van getijstroming.
 - Het effect van het aanpassen van de helling van het strand.
 - De invloed van de vaarsnelheid en de dimensie en diepgang van een schip is in een bijlage C beknopt behandeld.

De overige effecten, die tijdens het overleg zijn genoemd, zijn in deze bureaustudie niet behandeld.

- Een verkenning van de beschikbare kennis om de verschillende effecten in de situatie van de Sardijngeul te kunnen kwantificeren.

Beperkingen in de beschikbare kennis en inzicht kunnen door het verrichten van veldmetingen geheel of gedeeltelijk worden aangevuld. De resultaten van de bureaustudie zijn gebruikt bij de voorbereiding van veldmetingen bij het Badstrand te Vlissingen in de periode januari tot maart 2011.

Opgemerkt wordt dat hoewel de bureaustudie nadrukkelijk gericht is op de situatie van het Badstrand te Vlissingen, verwacht mag worden dat de resultaten in meer of mindere mate ook van toepassing zijn op andere stranden tussen Vlissingen en Westkapelle.

1.4 Aanpak van de bureaustudie

In de verkenning van de beschikbare kennis zijn rekenmodellen geïnventariseerd waarmee de volgende effecten in de situatie van de Sardijngeul geheel of gedeeltelijk kunnen worden gesimuleerd. Daarbij zijn deze effecten in drie groepen verdeeld.

Groep 1:

Tot groep 1 wordt slechts één effect gerekend:

- Het effect van het aanpassen van de helling van de oever (het strand). Dit effect kan het meest eenvoudig worden onderzocht in een situatie van een schip dat met een constante snelheid in een rechte vaarbaan vaart in een prismatische vaarweg met aan één zijde een strandprofiel.

De randvoorwaarde voor een dergelijke berekening bestaat uit waterbeweging rondom het schip. Deze kan met het dieptegemiddelde modelsysteem RAPID van het Marin worden berekend. Een beperking van dat modelsysteem is dat het loslaatverschijnselen bij het hek van een schip en de schroefstraal niet kan berekenen (Verheij et al, december 2001). In voorgaande studies is de uitvoer van RAPID nabij de oever met succes als invoer voor TRITON gebruikt, zie bijvoorbeeld (Groeneweg, oktober 2001). In TRITON wordt de dieptegemiddelde waterbeweging nabij het strand berekend.

Het combineren van beide modelsystemen leidt echter tot vrij kostbare simulaties. Er is behoefte aan een eenvoudiger manier om, op basis van enkele dominante parameters, een voorspelling te maken van de vorm en diepte van de spiegeldaling die als randvoorwaarde kan worden gebruikt voor de berekening met TRITON.

In de situatie van de Sardijngemaal is het RAPID model vervangen door een kunstmatig invoersignaal voor TRITON. Dit kunstmatige signaal is uit veldmetingen op het slik bij Bath bepaald (Huisman, Schroevers en van der Wal, 2010). Deze benadering is in hoofdstuk 3 toegepast. De uit te voeren metingen in de Sardijngemaal zullen aanvullende informatie opleveren.

Groep 2:

Groep 2 bestaat uit een combinatie van de volgende vier effecten:

- Het effect van het versnellen en vertragen van een schip.
- Het effect van het uitzetten van het schroefvermogen.
- Het effect van het invaren van een vernauwing (plunjereffect).
- Het effect van het verbreden van de Inloop van de Sardijngemaal.

Deze effecten kunnen het meest eenvoudig worden gesimuleerd in een situatie van een schip dat met een variabele snelheid in een rechte vaarbaan vaart in een vaarweg met een constante of een variabele dwarsdoorsnede. Er zijn nog geen 2D of 3D modelsystemen beschikbaar die voor de situatie van een varend schip de waterbeweging goed berekenen. Wel zijn met DELFT3D enkele verkennende berekeningen van de waterbeweging rondom een varend schip uitgevoerd met redelijke resultaten.

De genoemde effecten kunnen ook met een 1D WAROS-model van Deltares worden gesimuleerd. Echter, de sterke schematisatie van varende schepen in de Sardijngemaal in een 1D model levert vaarweggemiddelde resultaten. Op basis van expert judgement kunnen de resultaten van een geschematiseerde situatie naar de werkelijke situatie worden vertaald. Deze benadering is in hoofdstuk 4 toegepast.

Groep 3:

Groep 3 bestaat uit een combinatie van twee effecten:

- Het effect van de grootte, vorm en diepgang van een schip.
- Het effect van de positie van een schip in een vaarweg.

Deze effecten kunnen het meest eenvoudig worden gesimuleerd in een situatie van een schip dat met een constante snelheid in een rechte vaarbaan vaart in een vaarweg met een constante dwarsdoorsnede.

Het effect van de grootte, vorm en diepgang van een schip op de scheepsgeïnduceerde waterbeweging kan met het RAPID-model van het Marin worden gesimuleerd, als het schip op onbeperkt breed en onbeperkt diep water vaart. In de Sardijngemaal wordt niet helemaal aan deze voorwaarde voldaan. Sterk geschematiseerd kan met een 1D rekenmodel Dipro van Deltares wel de invloed van breedte, lengte en diepgang van een schip worden bepaald. Maar in de Sardijngemaal wordt niet aan de voorwaarden voor een 1D schematisatie voldaan.

Het effect van de positie van een schip in een vaarweg kan met de onder groep 1 beschreven combinatie van RAPID en TRITON worden bepaald. Hier is het niet mogelijk om RAPID-uitvoer te vervangen door een kunstmatige scheepsrandvoorwaarde in TRITON omdat er geen geschikte monitoringsresultaten beschikbaar zijn.

Sterk geschematiseerd kan met een 1D rekenmodel DIPRO van Deltares of met het programma CRESS van het IHE, TUD, RWS, Royal Haskoning wel de invloed van de positie van een schip in de vaarweg worden bepaald. Maar in de Sardijngemaal wordt niet aan de voorwaarden voor een 1D schematisatie voldaan. In beide programma's is het toepassingsgebied zo beperkt dat ze niet zonder kunstgreep (zoals bij WAROS-toepassing is gedaan) kunnen worden toegepast. Een aanzet voor deze benadering is in bijlage B opgenomen.

2 Beschrijving van de verschijnselen

2.1 Inleiding

In een algemene beschrijving van de verschijnselen in de omstroming van een varend schip worden de volgende aspecten onderscheiden:

- Onbegrensd vaarwater met een eenparige vaarsnelheid.
- Begrensd vaarwater met een eenparige vaarsnelheid.
- Secundaire scheepsgolven.
- Begrensd vaarwater met discontinuïteiten.
- De kritische snelheden van een schip.

Deze aspecten worden in de volgende paragrafen behandeld.

2.2 Onbegrensd vaarwater met een eenparige vaarsnelheid

Door een varend schip worden stromingen en golven opgewekt. Dit systeem van stromingen en golven, dat met het schip meebeweegt, is wat betreft verschijningsvorm en intensiteit sterk afhankelijk van de waterdiepte (in verband met de voortplantingssnelheid van golven) en van de 'natte doorsnede' van de vaarweg (in verband met de omstroming rond het schip). Een schip veroorzaakt met een constante vaarsnelheid in een beperkt vaarwater een karakteristieke waterbeweging, zie schets van een bovenaanzicht in figuur 2.1:

- Een primaire scheepsgolf bestaande uit een boeggolf, een retourstroom en een waterspiegeldaling, een haalgolf of hekgolf, een volgstroom achter het schip en een taludvolgstroom.
- De secundaire scheepsgolven die bestaan uit divergerende golven, transversale golven en interferentiepieken.
- Een schroefstraal en
- In het geval dat het dwarsprofiel van het vaarwater niet constant is, dan kunnen translatiegolven worden opgewekt.

Het primaire verschijnsel bestaat uit het verdringen van water aan de voorzijde van het bewegende schip gevolgd door afstromen naar een gebied achter het schip. Het water aan de voorzijde moet vanuit stilstand worden versneld; de hiervoor benodigde kracht wordt door de schroef van het schip geleverd. Het schip stuwt het water in een ruim gebied voor de boeg enigszins op, waardoor daar de drukverhoging ontstaat die nodig is om het water in beweging te brengen. Vervolgens stroomt het versnellende water langs beide zijanten en de onderzijde van het schip naar achteren. In het gebied met stroming naast en onder het schip heerst een lagere druk en zakt de waterspiegel; daardoor kan het schip enigszins inzinken of vertrimd raken. Bij afstromen verbreedt het stromingsveld zich in de richting dwars op het schip, waardoor de retourstroomsnelheid weer afneemt en de waterspiegeldaling geringer wordt. Achter het schip komt het stromende water tenslotte weer tot stilstand en herstelt de waterspiegel zich. De stromingsvertraging vindt plaats in een flink gebied achter het schip. De toestroming van water naar het gebied direct achter het schip wordt in grote mate beïnvloed door het aanzuigende effect van de scheepsschroef.

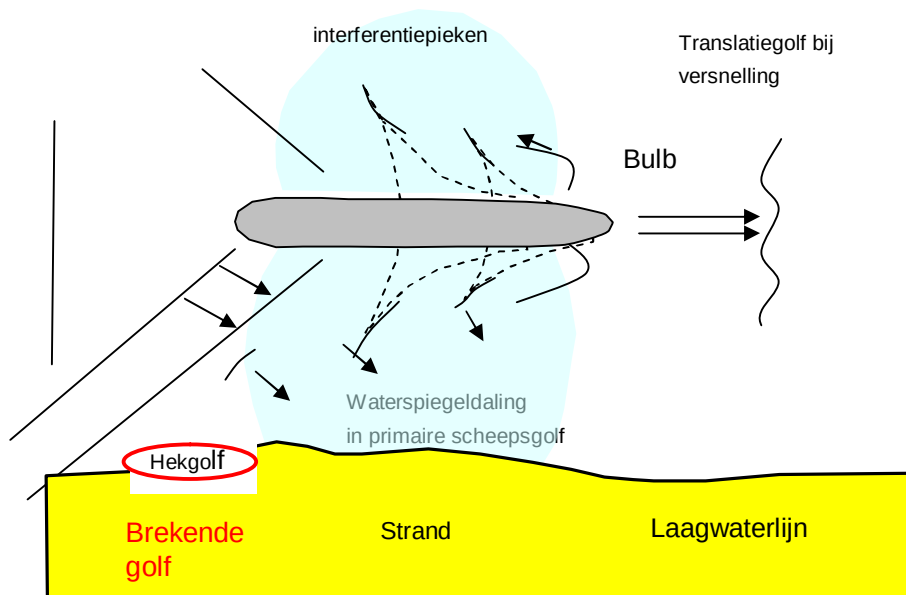
Het bovenbeschreven stromingsverschijnsel, ook wel aangeduid met primaire golf, doet zich het sterkst voor in de directe nabijheid van het schip, maar is, zij het zwakker, ook op grotere afstand merkbaar, bijvoorbeeld in de vorm van een haalgolf langs een oever.

2.3 Begrensd vaarwater met een eenparige vaarsnelheid

Wanneer schepen door een begrensde vaargeul varen, bijvoorbeeld in de Sardijngeul bij het bolwerk De Leugenaar, is de natte doorsnede voor retourstroming ingeperkt, en zal de retourstroomsnelheid bij een zelfde vaarsnelheid hoger zijn dan in ruim water. Het water vóór het schip zal daarom vanuit stilstand sterker worden versneld. Hiervoor is nodig dat het water in het gebied voor het schip iets hoger wordt opgestuwd. Schepen zullen bij varen door een begrensd vaarwater aldus meer weerstand ondervinden dan bij varen in diep, ruim water, bijvoorbeeld midden op de Wielingen. Bij het varen van een schip door een vaarweg met zekere natte doorsnede A_c is de verhouding A_m/A_c (met A_m = doorsnede van het schip ter plaatse van het grootspan) van belang. Immers hoe groter deze verhoudingswaarde (hoe groter het schip t.o.v. de vaarweg), hoe groter de opstuwing voor het schip, hoe groter de retourstroomsnelheid (de snelheid van het water naast en onder het schip) en hoe sterker de waterspiegeldaling naast het schip (bij een zekere vaste vaarsnelheid V_s van het schip).

In de Sardijngeul is de vaarbaan van een schip niet recht, maar een opeenvolging van drie bochten, zie enkele vaarbanen in figuur 1.3 Bij het varen door een bocht in de vaarweg verandert het krachterevenwicht op het schip. De waterspiegeldaling aan stuurboord en aan bakboord passen zich daarbij aan. Voor de bestuurbaarheid van het schip is voldoende kracht op het roer gewenst tijdens het varen door een bocht.

In de Sardijngeul treden ontmoetingen van schepen op en worden schepen opgelopen. Bij ontmoetingen van schepen, die in een tegengestelde richting in een vaargeul varen, treedt een complexe interactie op, waarbij de waterspiegeldaling kan afnemen. Echter bij oplopen van schepen versterken de primaire scheepsgolven elkaar. In die situatie kan een extreme waterspiegeldaling optreden als het opgelopen schip geen vaarsnelheid vermindert. De interferentiepieken van beide schepen kunnen tijdens het oplopen samenvallen waardoor langs het strand kortstondig een grotere interferentiepiek optreedt.

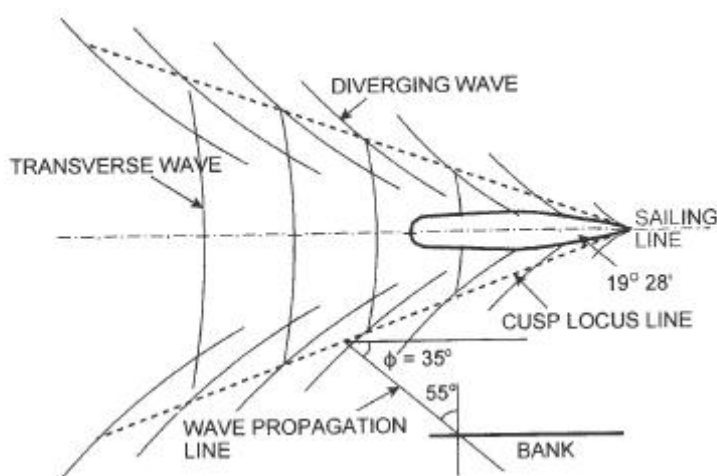


Figuur 2.1 Plattegrond met een principe schets van de relevante scheepsgolven.

2.4 Secundaire scheepsgolven

Gekoppeld aan de primaire stromingsverschijnselen ontstaat vanaf de boeg van het schip een regelmatig patroon van naar beide zijden divergerende secundaire golven, zie een principe schets van het secundaire golfsysteem in figuur 2.2 volgens (Schiereck, 2001 pp 214): Achter het schip ontstaat eveneens een patroon van regelmatige golven (mits de vaarsnelheid van het schip niet te hoog is); deze transversale golven volgen het schip op een constante afstand en interfereren met de divergerende golven vanaf de boeg. De lijn door de interferentietoppen wordt in het Engels de 'cusp line' genoemd. Op enige afstand van het schip, buiten de directe invloedssfeer van het stromingsveld, raken de golven vrij en hun gedrag kan dan met de korte-golftheorie worden beschreven. Bij oevers, verondiepingen, havens e.d. vertonen deze vrije golven dan de bekende reflectie-, diffractie- en refractieverschijnselen. De secundaire scheepsgolven worden ook wel aangeduid met Kelvin-scheepsgolven (genoemd naar Lord Kelvin, die deze golven in het begin van de 19^e eeuw heeft bestudeerd).

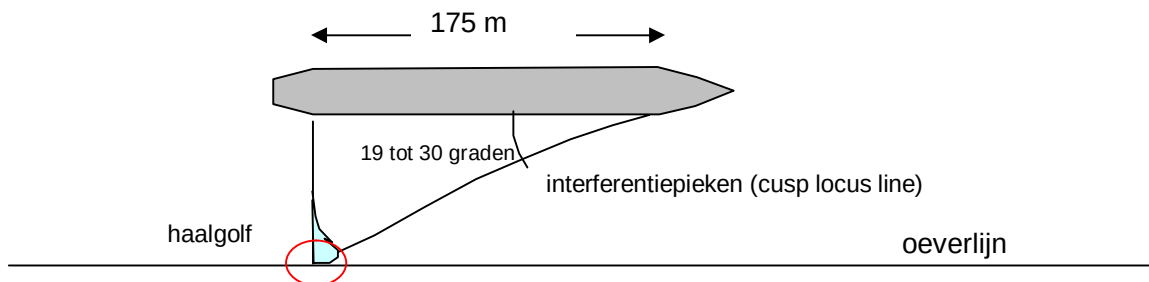
De golfhoogte van de interferentiepieken is in sterke mate afhankelijk van de vaarsnelheid, en van de scheepsvorm en afmetingen. De golfhoogte bij de oever neemt maar langzaam af door verder van de oever te gaan varen. De hoek van 19 graden in figuur 2.2 neemt iets toe bij een toename van de vaarsnelheid.



Figuur 2.2 Principe schets van het secundaire golfsysteem volgens Kelvin.

Aan het einde van de waterspiegeldalingskuil wordt het drooggevalen strand opgevuld door de haalgolf gevolgd door een taludvolgstroom. In het algemeen treedt de grootste hoogte van de haalgolf op nabij het laagste deel van het drooggevalen strand. De *haalgolfhoogte* is in sterke mate afhankelijk van de vaarsnelheid en van de taludhelling van het dwarsprofiel van de vaarweg (van der Wal, 2009). De grootte van de op het strand optredende golf is het resultaat van de volgende verschijnselen:

- De waterspiegeldaling in de primaire scheepsgolf.
- Een haalgolf en een taludvolgstroom.
- De secundaire scheepsgolven die bij de voorschouder van het schip worden opgewekt, kunnen bij de oever samenvallen met de haalgolf aan het einde van de spiegeldalingskuil. Een kleine afstand tussen de zijkant van het schip en het strand kan leiden tot een interferentie van de haalgolf met de secundaire scheepsgolven, zie figuur 2.3.



Figuur 2.3 Schets van het samenvallen van de haalgolf en de interferentiepieken.

In een situatie van een schip met een constante vaarsnelheid in een prismatische vaarweg kan de hinder op het strand door een primaire scheepsgolf of door een combinatie van een primaire en de secundaire scheepsgolven zijn veroorzaakt. Op voorhand kan de invloed van de secundaire scheepsgolven niet worden verwaarloosd (van der Wal, 2009).

2.5 Begrensd vaarwater met discontinuïteiten

Bij veranderingen in de natte doorsnede van een vaargeul zal de omstroming rond het varende schip zich aanpassen. Vooral bij vrij plotselinge vernauwingen of verwijdingen ontstaan daardoor translatiegolven. Door middel van translatiegolven wordt effectief water verplaatst. Dit is nodig omdat bij invaren van bijvoorbeeld een vernauwing niet onmiddellijk de evenwichtssituatie wordt bereikt. Door het schip wordt tijdelijk meer water aan de voorzijde verdrongen dan er langs en onder het schip afstroomt; het teveel aan water loopt in de vorm van een positieve translatiegolf van de voorzijde van het schip weg. Aan de achterzijde van het schip is er tijdelijk een tekort aan toestromend water; dit vertaalt zich in een negatieve translatiegolf die vanaf de achterzijde van het schip wegloopt. Wanneer het motorvermogen van het schip in deze situatie constant wordt gehouden ontstaat na enige tijd een nieuwe evenwichtssituatie, waarbij de waterspiegel voor het schip wat sterker is opgestuwd dan voor het invaren van de vernauwing en waarbij tevens de waterspiegel naast het schip sterker is verlaagd. Doordat het schip nu meer weerstand ondervindt, zal de vaarsnelheid zijn afgenomen, zie figuur 2.4 met de gedetailleerde schematisatie van de waterbeweging. Deze figuur komt uit een rapport waarin de ontwikkeling van waterbewegingsmodel WAROS is beschreven (Vrijer, 1985). In dat rapport zijn alle parameters uit die figuur gedefinieerd en toegelicht. De positieve translatiegolf plant zich met een grote snelheid voor het schip uit en de negatieve golf loopt vanaf de boeg tegen de vaarrichting in. Daarbij worden de waterspiegeldaling naast het schip versterkt met z_n en z_n' in figuur 2.4. De loodsen noemen deze verschijnselen in de Sardijngeul het plunjereffect.

Deze translatiegolven kunnen zich over grote afstanden voortplanten. Voorts kunnen negatieve translatiegolven die door andere schepen in de vaarweg zijn opgewekt, de waterspiegeldaling naast het schip versterken. Af en toe versterken verschillende translatiegolven elkaar en kan een extreme situatie ontstaan.

Translatiegolven kunnen ook worden opgewekt wanneer het schip door opvoeren of terugnemen van het toerental van de schroef versnelt of vertraagt. Translatiegolven zijn een extra fenomeen in het geheel van scheepsgeïnduceerde waterbewegingen.

Opgemerkt wordt dat in de uitzonderlijke situatie dat een schip gesleept wordt, het gesleepte schip ook translatiegolven opwekt. In de Sardijngeul komen weinig gesleepte schepen voor.

2.6 De kritische snelheden van een schip

De aard van de door schepen opgewekte golven wordt onder andere door de vaarsnelheid, de lengte van het schip en de waterdiepte bepaald. Een varend schip heeft namelijk te maken met twee kritische snelheden:

- De rompsnelheid is aan de lengte van het schip gerelateerd. Het praktische effect van de rompsnelheid is dat, afgezien van planerende schepen en draagvleugelboten, voor het bereiken van een hoge vaarsnelheid een minimale scheepslengte benodigd is.
- De diepte-kritische snelheid of ook wel grenssnelheid genoemd, is gelinkt aan de maximale retourstroomdebiet bepaald door het vaarwegdwarsprofiel in ondiepe en smalle vaarwegen en de lokale waterdiepte in brede vaarwegen.

In deze situatie speelt eigenlijk alleen de diepte-kritische snelheid een rol.

Gaan we uit van een *vaste waterstand* voor het schip dan zal in de vaarweg rond het schip het grootst mogelijke retourstroomdebiet ontstaan op het moment dat de toestand van kritische stroming (schietend water) wordt bereikt. De snelheid waarmee het schip dan vaart wordt de grenssnelheid genoemd. Wanneer de waterstandsverlaging naast het schip groter zou zijn (superkritische stroming), zou het water sneller stromen maar dit zou geen groter debiet opleveren (en dus geen hogere vaarsnelheid).

De weerstand die het schip ondervindt, neemt sterk toe met toenemende vaarsnelheid, voornamelijk doordat het waterstandsverschil tussen de waterstand voor en naast een schip groter wordt en het schip dieper inzinkt of sterker vertrimd raakt. Dit is de reden waarom schepen in de praktijk nauwelijks de grenssnelheid kunnen bereiken in een begrensd vaarwegdwarsprofiel. In de Sardijngeul zullen zeeschepen nooit de grenssnelheid kunnen bereiken, maar de genoemde tendens dat de weerstand toeneemt met een toenemende vaarsnelheid ervaren alle zeeschepen in de Sardijngeul.

3 Het effect van het aanpassen van de helling van het strand

Om de invloed van het aanpassen van de oeverhelling in kaart te brengen zijn verkennende berekeningen uitgevoerd met het golfvoortplantingsmodel TRITON. Deze berekeningen hebben als doel om het probleem van golfoploop op een strand inzichtelijk te maken en om te verkennen of het optredende fenomeen voldoende nauwkeurig te simuleren is met een numeriek golfmodel als TRITON. Het wordt benadrukt dat de resultaten van de simulaties nog niet gebruikt kunnen worden om de werkelijke golfoploop op het strand te kwantificeren. In de simulaties is uitgegaan van een sterk geschematiseerde bodemligging ten opzichte van de werkelijke situatie.

In deze berekeningen zijn de volgende situaties gesimuleerd:

- 1 passerend representatief schip;
- 3 strandprofielen;
- 1 waterstand.

De opzet van het gebruikte golfvoortplantingsmodel TRITON is in paragraaf 3.1 beschreven. Een gedetailleerde beschrijving van de uitgevoerde simulaties en de modelopzet is gegeven in paragraaf 3.2. De resultaten van de simulaties worden gepresenteerd in paragraaf 3.3. De conclusies voor invloed van de bodemhelling op het optreden van grote scheepsgolven op het strand, zijn beschreven in paragraaf 3.4.

3.1 TRITON model

TRITON is een golfmodel van het type Boussinesq dat door Deltares is ontwikkeld (Borsboom et al., 2000). Het is een 2D tijdsdomein model dat refractie, diffractie, golfopsteiling en niet-lineaire golfinteracties kan simuleren. TRITON is ontwikkeld met het doel om te beschikken over een relatief efficiënt Boussinesq-type-model met redelijke nauwkeurigheid voor kustwaterbouwkundige toepassingen. Het model wordt voornamelijk gebruikt om golfvoortplanting in havens te simuleren, maar ook scheepsgeïnduceerde golven zijn in het verleden gesimuleerd (Doorn et al., 2002).

Boussinesq-type golfmodellen zijn gebaseerd op de aanname van incompressibele en stroming met een constante dichtheid. Onder de aanname van irrotationele stroming in de twee horizontale richtingen (geen recirculatie in het verticale vlak), kan het verticale stromingsprofiel worden beschreven door een serie-expansie in verticale richting. Dit zorgt ervoor dat de verticale dimensie kan worden geëlimineerd uit de modelvergelijkingen, waardoor driedimensionale stromingsproblemen kunnen worden teruggebracht naar een tweedimensionaal vraagstuk. Dit zorgt voor een aanzienlijke winst in rekentijd.

Het voordeel van een tijdsdomeinmodel is dat ook niet-lineaire processen zoals golfbreken en golfoploop te simuleren zijn. Beide fenomenen worden verondersteld van belang te zijn in de huidige studie. In de volgende twee paragrafen wordt een korte beschrijving gegeven van hoe beide processen gemodelleerd worden.

3.1.1 Golfbreken

In Boussinesq-type-modellen is het niet mogelijk om het brekingsproces van een golf in detail te simuleren. Om het complexe brekingsproces te simuleren zijn meer geavanceerde (en rekentijd intensievere!) volledig driedimensionale stromingsmodellen met een vrijevloeistofoppervlak nodig. Echter, het is wel mogelijk om het *effect* van golfbreken te modelleren in TRITON.

Het golfbrekingsmodel dat is toegepast in de huidige simulaties is beschreven door Borsboom et al. (2001). Het principe van het golfbrekingsmodel komt erop neer dat energieverlies (dissipatie) door golfbreken en de afname van de golfhoogte worden meegenomen in de modelvergelijkingen. De gebruikte methode zorgt voor energiedissipatie met behoud van impuls, zoals verwacht mag worden op grond van de natuurwetten. In de visualisatie van de resultaten zijn de gebieden waar energiedissipatie door golfbreken (en dus afname van golfhoogte) plaatsvindt wit gekleurd.

3.1.2 Golfoploop

Om het effect van golfoploop op het strand te simuleren is gebruik gemaakt van de droogvalprocedure die is geïmplementeerd in TRITON. Deze droogvalprocedure is gebaseerd op het principe van artificiële porositeit. In de modelschematisatie wordt de “harde” bodem vervangen door een bodem die licht poreus is. Dit zorgt ervoor dat water aanwezig is in het hele domein en dat de modelvergelijkingen daarom voor het hele domein gelden (ook op het normaal gesproken droge strand dus).

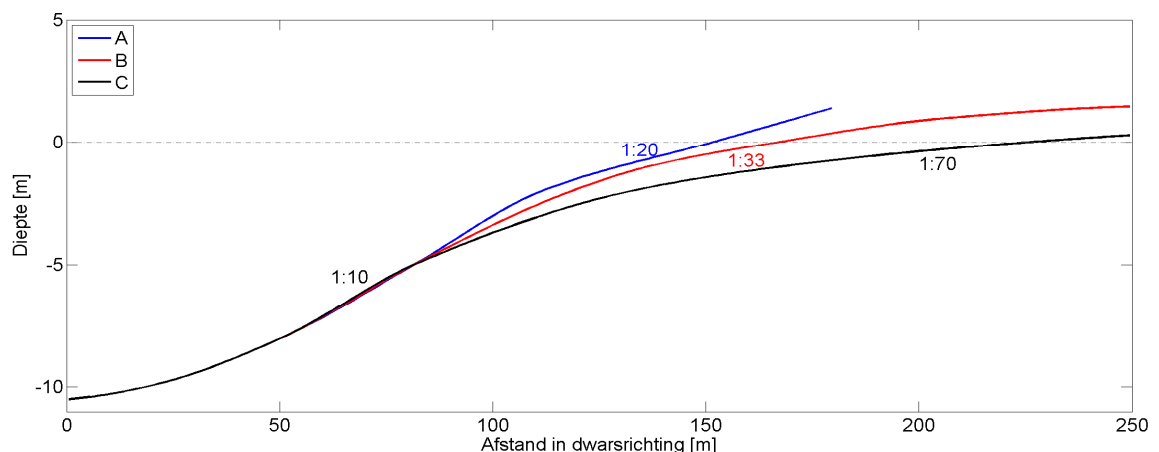
Het mag duidelijk zijn dat de verstoring die optreedt door de ondoorlaatbare bodem te vervangen door een poreuze, verwaarloosbaar klein moet zijn. Meer precies, de hoeveelheid water in en de stroming door de poreuze bodem moeten voldoende klein zijn. Voor meer informatie over de achtergrond, motivatie en details van de procedure verwijzen we naar Borsboom (2005).

De mate van porositeit van de bodem in TRITON wordt bepaald door een door de gebruiker op te geven coëfficiënt voor artificiële bodemwrijving (C_{art}). De waarde van deze coëfficiënt zal de mate van golfoploop op het strand beïnvloeden. In deze fase van de studie is de coëfficiënt C_{art} nog niet gekalibreerd, aangezien het in deze fase om verkennende berekeningen gaat om het principe te demonstreren. Bij het vergelijken van de resultaten moet er rekening mee worden gehouden dat voor steilere strandprofielen andere waarden voor C_{art} zijn gekozen dan voor de flauwere profielen, om de hogere stroomsnelheden op de steilere hellingen te beperken. Voor het kwantificeren van golfoploop op het strand is een uitgebreidere studie naar de gevoeligheid van het gebruikte golfoploopmodel vereist, waarbij metingen als validatie kunnen dienen.

3.2 Modelopzet

3.2.1 Bodemprofielen

In deze studie is in langsrichting (in de vaarrichting van het schip) de bodem uniform aangenomen. In dwarsrichting zijn drie verschillende bodemprofielen onderzocht. Het huidige bodemprofiel nabij de voorziene meetlocatie op het badstand bij boei SG4 is als uitgangspunt genomen. Strandprofiel B is hier een geschematiseerde versie van, zie rode lijn in figuur 3.1. Verder is er één steiler strandprofiel (A) en een profiel met een flauwere helling (C) onderzocht. De helling op het strand van profiel A is ongeveer 1:20, van profiel B ongeveer 1:33 en van profiel C ongeveer 1:70. De geschematiseerde bodemprofielen zijn in Figuur 3.3.1 weergegeven. Alle simulaties zijn uitgevoerd met een waterstand van 0 m, wat gelijk is aan LAT (Laagste Astronomisch Tij). Bij Vlissingen is het LAT = -2,67 m + NAP. Er is gekozen om enkele berekeningen uit te voeren met dezelfde waterstand, eenzelfde vaarsnelheid van een bepaald schip en met drie verschillende strandprofielen. Het verdient aanbeveling extra berekeningen uit te voeren met variërende waterstanden.

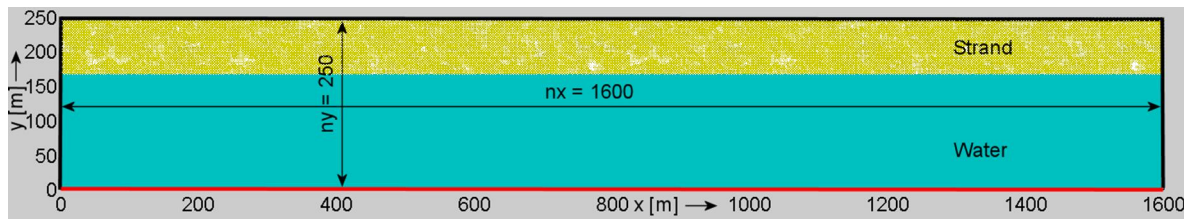


Figuur 3.3.1 Geschematiseerde bodemprofielen (horizontale en verticale assen zijn op verschillende schaal)

3.2.2 Algemene opzet

In deze studie is voor elk van de drie beschouwde bodemprofielen een aparte modelschematisatie gemaakt. Voor alle schematisaties is de lengte van het gemodelleerde domein (in de vaarrichting) ongeveer 10 representatieve scheepslengtes: 1600 m. In de breedte loopt het gemodelleerde gebied van ongeveer de boeienlijn van de Sardijngeul tot op het strand. De breedte van het domein is 250 m voor schematisatie B en C. Voor schematisatie A is het domein smaller (180 m), aangezien dit strandprofiel steiler is. Alle berekening in deze studie zijn gemaakt met versie 1.18.0.6a van TRITON.

In Figuur 3.3.2 is de modelopzet geschematiseerd weergegeven voor run B; run A is op dezelfde manier opgezet, alleen met 180 cellen in de breedte. De zwarte randen van het domein zijn gesloten randen die volledig reflecteren. De rode rand is de inkomende golfstrand, waar het golfsignaal van een passerend schip wordt opgelegd als randvoorwaarde. De inkomendegolfstrand (ongeveer ten hoogte van de boeienlijn van de Sardijngeul) bevindt zich op 61,5 m uit de middellijn van de vaarweg en heeft een diepte van 10,5 m. In paragraaf 4.3 wordt een beschrijving gegeven van het golfsignaal dat wordt opgelegd op deze rand. Dit is een golfsignaal, gecreëerd door een voorbijvarend schip, dat representatief is voor deze locatie en diepte.



Figuur 3.3.2 Voorbeeld van modelschematisatie B, met het aantal cellen in x- en y-richting (n_x , n_y).

In alle schematisaties hebben de roostercellen een afmeting van 1 m x 1 m. Als vuistregel wordt een minimum van 20 roostercellen per golflengte aangehouden. Voor de primaire golf wordt ruim aan deze voorwaarde voldaan. In het diepste gedeelte van het domein (10,5 m) betekent deze vuistregel dat golven met een golfperiode¹ van 3,5 s of hoger nauwkeurig kunnen worden gesimuleerd. Voor golven met kortere golfperiodes zijn niet alleen de roostercellen relatief groot, maar is het water ook relatief diep. De modelvergelijkingen van Boussinesq-type-modellen zijn namelijk nauwkeurig tot een beperkte verhouding tussen waterdiepte en golflengte. Dit betekent dat de secundaire scheepsgolven iets minder nauwkeurig gesimuleerd worden dan de primaire golf: de secundaire golfsnelheid kan iets hoger zijn dan de werkelijke golfsnelheid en de golven kunnen iets sneller in hoogte afnemen door grotere numerieke dissipatie.

In het ondiepere gedeelte richting het strand zullen golflengtes afnemen door het opstelen van de golven. Om dit opstelen, maar ook ander niet-lineaire processen zoals golfbreken en golfloop, zo nauwkeurig mogelijk te kunnen modelleren is een zo fijn mogelijk grid gewenst. De rekentijd voor de huidige schematisaties is ongeveer 24 uur, met een tijdstap van 0,1 s. Het verder verfijnen van het grid brengt al snel een onacceptabele vergroting van de rekentijd met zich mee, aangezien een fijner grid ook een kleinere tijdstap vereist volgens het courant-criterium: $c\Delta t (1/\Delta x + 1/\Delta y) < 2.78$, waarin c de golfsnelheid is en Δt de tijdstap.

Zoals vermeld, wordt de mate en vorm van golfloop onder andere bepaald door de porositeit die wordt gekozen om golfloop te modelleren en tevens door de fysieke ruwheid van de bodem. Voor de runs met de drie verschillende bodemprofielen is in het gehele domein een Chézywaarde van $65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ aangenomen voor bodemwrijving. Om het effect van bodemruwheid inzichtelijk te maken zijn er drie runs uitgevoerd waarin de waarden voor fysieke en artificiële bodemwrijving zijn gevarieerd.

In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de runs die zijn uitgevoerd in deze studie. Hierin is ook de waarde van de coëfficiënt voor artificiële bodemwrijving C_{art} (zie voor meer toelichting ook paragraaf 3.3.2) en de Chézycoëfficiënt voor fysieke bodemwrijving gespecificeerd voor elke run. Een lagere waarde voor de wrijvingscoëfficiënt is equivalent aan een grotere ruwheid van de bodem. Het effect van bodemwrijving wordt in paragraaf 3.3.2 beschreven.

¹ Golfperiode T en golflengte L zijn aan elkaar gerelateerd door de dispersierelatie: $\omega^2 = gk \tanh(kh)$ waarin $\omega = 2\pi / T$, $k = 2\pi / L$, g = zwaartekrachtversnelling en h = waterdiepte.

Tabel 3.1 Overzicht van de uitgevoerde simulaties.

	Profiel	Lengte [m]	Breedte [m]	Chézy-coëfficiënt [m ^{1/2} /s]	C _{art} [m ^{1/2} /s]
Variatie in bodemprofiel					
Run 1	A	1600	180	65	5
Run 2	B	1600	250	65	35
Run 3	C	1600	250	65	40
Variatie in bodemwrijving					
Run 4	B	1600	250	65	20
Run 5	B	1600	250	65	5

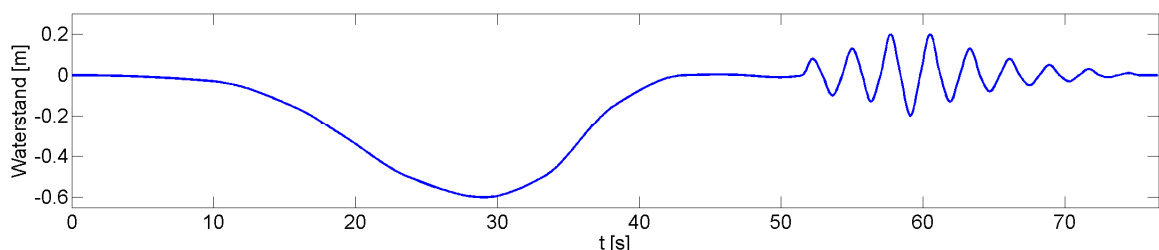
3.2.3 Golfkarakteristiek van het passerende schip

TRITON is een golfvoortplantingsmodel waarbij voor elke tijdsstap een waterstand langs de rand van het domein wordt gespecificeerd, welke vervolgens door het model wordt voortgeplant door het domein. In TRITON is het niet mogelijk om een passerend schip zelf te simuleren. Om het effect van een passerend schip toch te kunnen modeleren, wordt het golfveld dat door een varende schip wordt geïnduceerd op de rand van het TRITONDomein opgelegd. Dit golfveld kan zowel in de tijd als in de ruimte variabel zijn. Het golfpatroon dat door een varende schip wordt gecreëerd kan worden bepaald door voor dit doel ontwikkelde numerieke modellen of worden afgeleid uit metingen. In deze studie is er voor gekozen om een golfsignaal te bepalen op basis van een gemeten waterstandregistratie.

Aangezien er geen metingen in de Sardijngeul ter beschikking staan, is ervoor gekozen om een artificieel golfsignaal te reconstrueren dat verwacht kan worden als gevolg van een passerend schip in de Sardijngeul. Er is bij de modelstudie uitgegaan van een gemeten waterstandsignaal tijdens de passage van de Jazan in het Nauw van Bath, zie (Huisman Schroevers en van der Wal, 2010 en Nortek, 2010). Die gemeten tijdsregistratie van de waterstand is met de energiemethode volgens Schijf (zie bijlage C) zodanig aangepast dat het representatief is voor de situatie in de Sardijngeul. Deze randvoorwaarde is aan de hand van de veldmetingen in de Sardijngeul geevalueerd.

Het waterstandsignaal dat is gereconstrueerd voor deze studie is geplot in Figuur 3.3.3. Dit signaal is representatief voor een schip dat vaart met een snelheid van 12 kn (≈6 m/s) met de volgende afmetingen:

- Lengte = 140 m
- Breedte = 20 m
- Diepgang = 9 m



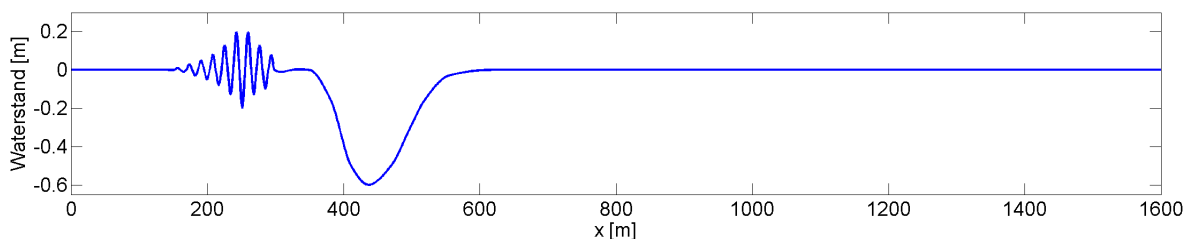
Figuur 3.3.3 Tijdsregistratie van de gereconstrueerde waterstand als gevolg van een passerend schip.

In dit signaal is de spiegeldalingskuil of primaire verstoring te herkennen in de eerste 45 s. Dit wordt gevolgd door de kortere wash- of secundaire golven. Dit zijn de divergerende en transversale golven die het zogenaamde Kelvin-golfpatroon vormen (zie Figuur 2.2). Het TRITON-model is hoofdzakelijk opgezet om de primaire verstoring zo goed mogelijk weer te geven. Het effect van de secundaire golven wordt ook meegenomen in de simulaties, maar gezien de verhouding tussen waterdiepte en golflengte en de gekozen celafmetingen van het model zullen deze golven minder nauwkeurig gesimuleerd worden dan de primaire verstoring.

Het gereconstrueerde golfsignaal is een tijdsrealisatie van de waterstand op één locatie. Voor de tweedimensionale simulaties hebben we een beschrijving van de waterbeweging langs de rand van het gehele domein nodig. Om de variatie van waterstand in de ruimte te kunnen reconstrueren is het volgende aangenomen:

- Het passerende schip vaart met constante snelheid (12 kn $\sim$ 6 m/s).
- Het golfpatroon van het passerende schip is stationair; dat wil zeggen het golfpatroon ten opzichte van het schip verandert niet in de tijd.
- De vaarweg is symmetrisch ten opzichte van de rand van de inkomende golf.

De derde aanname houdt in dat in de reconstructie van het golfpatroon niet expliciet rekening is gehouden met dwarsscheepse stroming als gevolg van het excentrisch varen in de vaarweg en de asymmetrie van de vaarweg zelf. In een verkenning kan deze aanname worden geaccepteerd. Op basis van de drie bovengenoemde aannames is het tijdssignaal van Figuur 3.3.3 voor elke cel langs de rand van het TRITON domein zodanig in de tijd te verschoven dat er een ruimtelijk golfsignaal ontstaat dat representatief is voor een schip dat met 6 m/s passeert. In Figuur 3.4 is dit golfsignaal geplot voor een willekeurig tijdstip.



Figuur 3.4 Waterstand opgelegd langs de rand van het domein op $t=150$ s.

3.3 Resultaten

Hieronder worden de resultaten van de TRITON-simulaties gepresenteerd. Voor elke simulatie is er een bovenaanzicht van de wateroppervlakte-uitwijking en van de horizontale stroomsnelheden gepresenteerd. Tevens is er een driedimensionale weergave van de resultaten geplot om het principe van de golfploop inzichtelijk te maken. In dit rapport zijn opnamen van één specifieke tijdstap gepresenteerd, wat in principe voldoende inzicht geeft, aangezien het golfpatroon stationair is ten opzichte van het schip. Animaties van de resultaten zijn beschikbaar op Cd-rom.

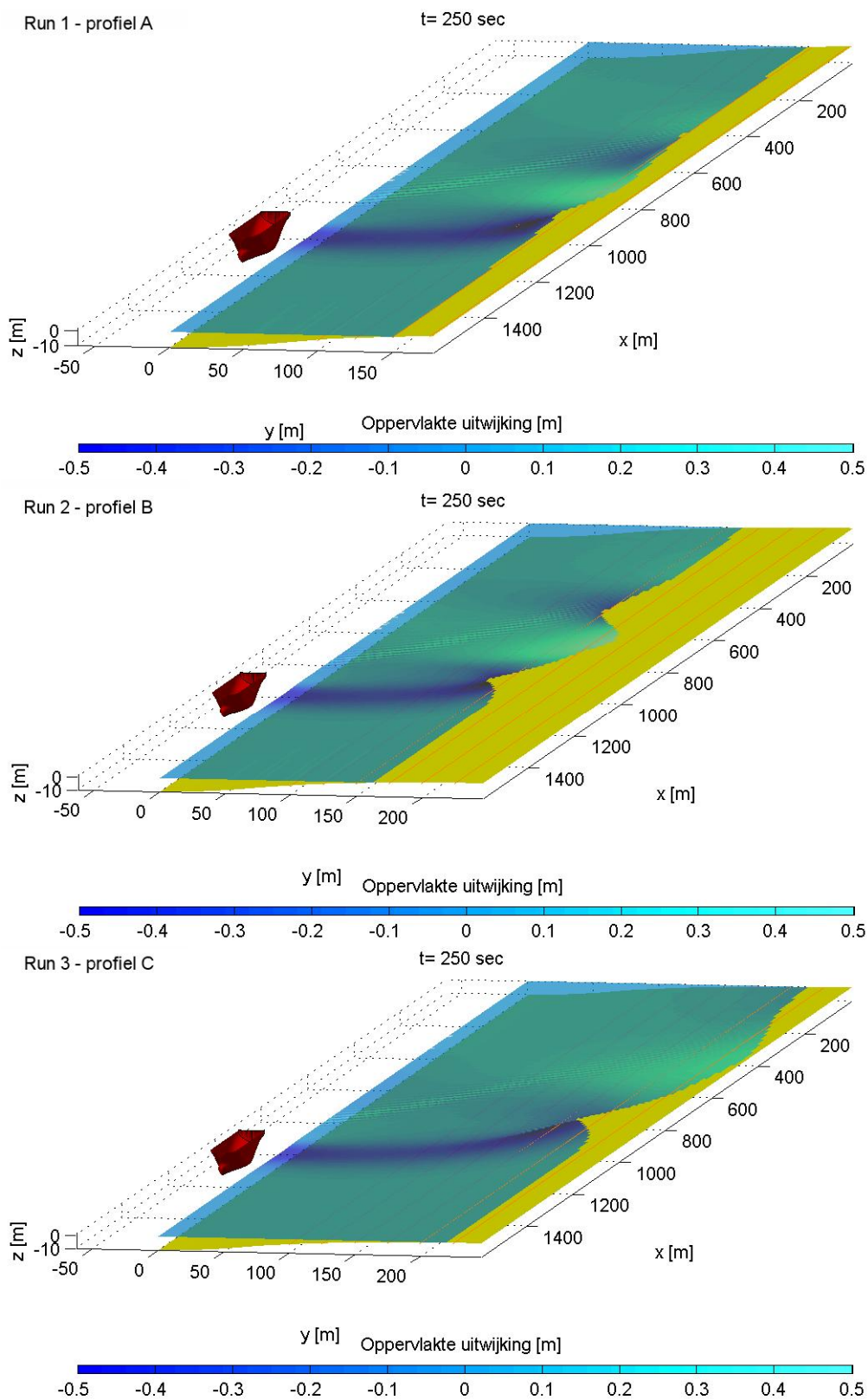
In de onderstaande figuren is een schip geplot met de aangenomen representatieve afmetingen (zie paragraaf 3.3) voor visualisatiedoeleinden. De locatie van het schip is geschat, aangezien de locatie van het schip ten opzichte van het gereconstrueerde golfsignaal niet exact bekend is. Er is aangenomen dat het schip midden tussen de boeienlijn ($y = 0$ m) en het midden van de vaarweg ($y = -61,5$ m) vaart.

3.3.1 Verschillende bodemprofielen

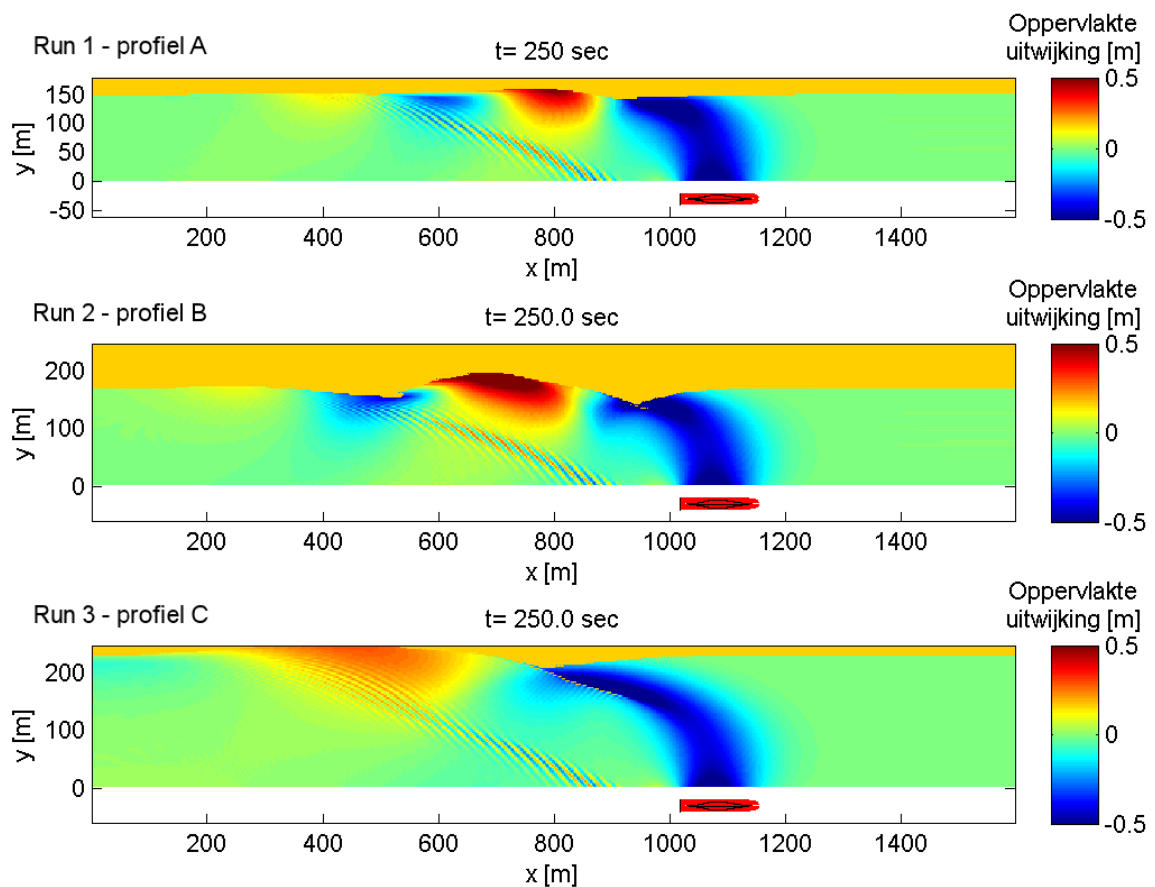
Om de dimensies van het golfoploopproces voor de drie geselecteerde bodemprofielen (A, B en C) te illustreren zijn driedimensionale visualisaties geplot in Figuur 3.5. In deze figuren is om de 25 m een oranje lijn op het strand geplot als referentie. Een bovenaanzicht van het domein is geplot in Figuur 3.6, waarin de wateroppervlakteuitwijking met een kleurschaal is weergegeven.

Het beeld van de golfoploop in de simulaties komt overeen met de beschrijvingen van het verschijnsel ter plaatse van de Sardijngeul. Het water trekt zich terug van het strand, nadat een schip gepasseerd is. In horizontale richting kan de breedte waarover het water zich terugtrekt vrij groot zijn (tientallen meters), terwijl in verticale richting de hoogte van de scheepsgolf nauwelijks zichtbaar is (orde halve meter). Uit de simulaties blijkt dat de afstand tussen het gepasseerde schip en de plek waar de terugloop van het water maximaal is verschilt per bodemprofiel. Voor profiel C is dit ongeveer anderhalve scheeps lengte en voor profiel A een halve scheeps lengte. Dit is te verklaren uit het feit dat de maximale snelheid waarmee een golf loopt gerelateerd is aan de waterdiepte.

Als het water maximaal van het strand is weggetrokken, wordt de ontstane ruimte weer opgevuld door water dat het strand oploopt. Voor iemand die op het strand staat lijkt deze golf schuin van zee en de zijkant te komen. Het water loopt verder het strand op dan de initiële waterlijn. Dit kan potentieel overlast veroorzaken voor badgasten die dit niet verwachten. In de simulaties wordt het golf front van de oplopende golf niet stijl genoeg om te breken. In paragraaf 3.3 zal nader naar de oorzaak hiervoor gekeken worden, omdat dit wel in werkelijkheid is waargenomen.



Figuur 3.5 Driedimensionale visualisatie van de golfoploop op het strand. De afstand tussen de oranje lijnen is 25 m.



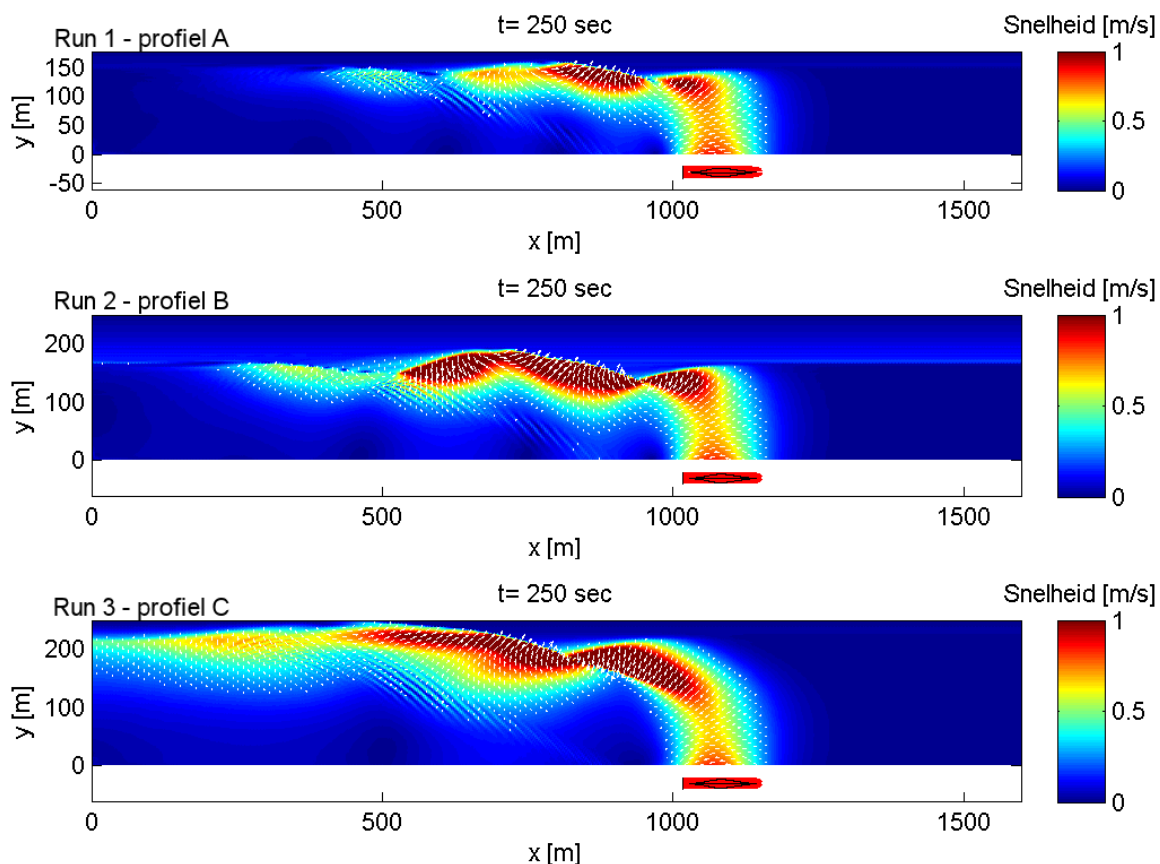
Figuur 3.6 Bovenaanzicht van de wateroppervlakteuitwijking voor de drie bodemprofielen.

De simulaties laten zien dat de op- en afloop van de golf hoofdzakelijk wordt veroorzaakt door de primaire verstoring (spiegeldalingskuil) van het schip. De lokale maximum diepte van de spiegeldalingskuil neemt in eerste instantie af met een toenemende afstand loodrecht op de vaarbaan van het schip. Echter, door het ondieper worden van het water neemt de golfhoogte vervolgens weer toe. Door de geringer wordende waterdiepte neemt ook de snelheid waarmee de golf zich voortplant af, waardoor de golf op een gegeven diepte het schip niet meer kan bijhouden. Dit verklaart de vorm van de spiegeldalingskuil en het achterlopen van de waterdaling op het strand ten opzichte van de positie van het schip. Het is te verwachten dat voor een hogere scheepsnelheid de afstand tussen het schip en het effect op het strand zal toenemen.

De secundaire golven bereiken het strand pas nadat de grootse verstoring op het strand gepasseerd is. Om de overlast op het strand zoveel mogelijk te beperken, moet de focus dus liggen op het beperken van de primaire golfverstoring van de passerende schepen. Het is echter denkbaar dat in specifieke situaties (combinatie van o.a. afstand van schip tot het strand, bodemhelling en scheepsnelheid) de secundaire golven en de primaire golf kunnen interfereren ter hoogte van het strand, waardoor de overlast versterkt kan worden.

Het verschil in golfoploop tussen de drie strandprofielen wordt duidelijk uit Figuur 3.5 en Figuur 3.6. Hoe flauwer het talud, des te groter de waterstandvariatie in horizontale richting. Niet alleen in dwarsrichting is dit effect groter, maar ook in langsrichting is de verstoring op het strand langgerechter voor het flauwere talud. Het is echter nog niet mogelijk om de golfoploop voor de verschillende strandprofielen kwantitatief met elkaar te vergelijken, omdat de ruwheid van het strand varieert per run. Een gevoeligheidsanalyse naar de invloed van deze ruwheid op golfoploop is beschreven in de volgende paragraaf.

De snelheden waarmee het water van het strand af en weer het strand op lopen kunnen in de huidige simulaties vrij groot worden, met maxima tot 2 m/s. In Figuur 3.7 zijn de snelheidsvelden, geïnduceerd door het voorbijvarende schip, geplot voor de drie bodemprofielen. Voor het flauwste talud is het gebied waar hoge snelheden optreden het langst.

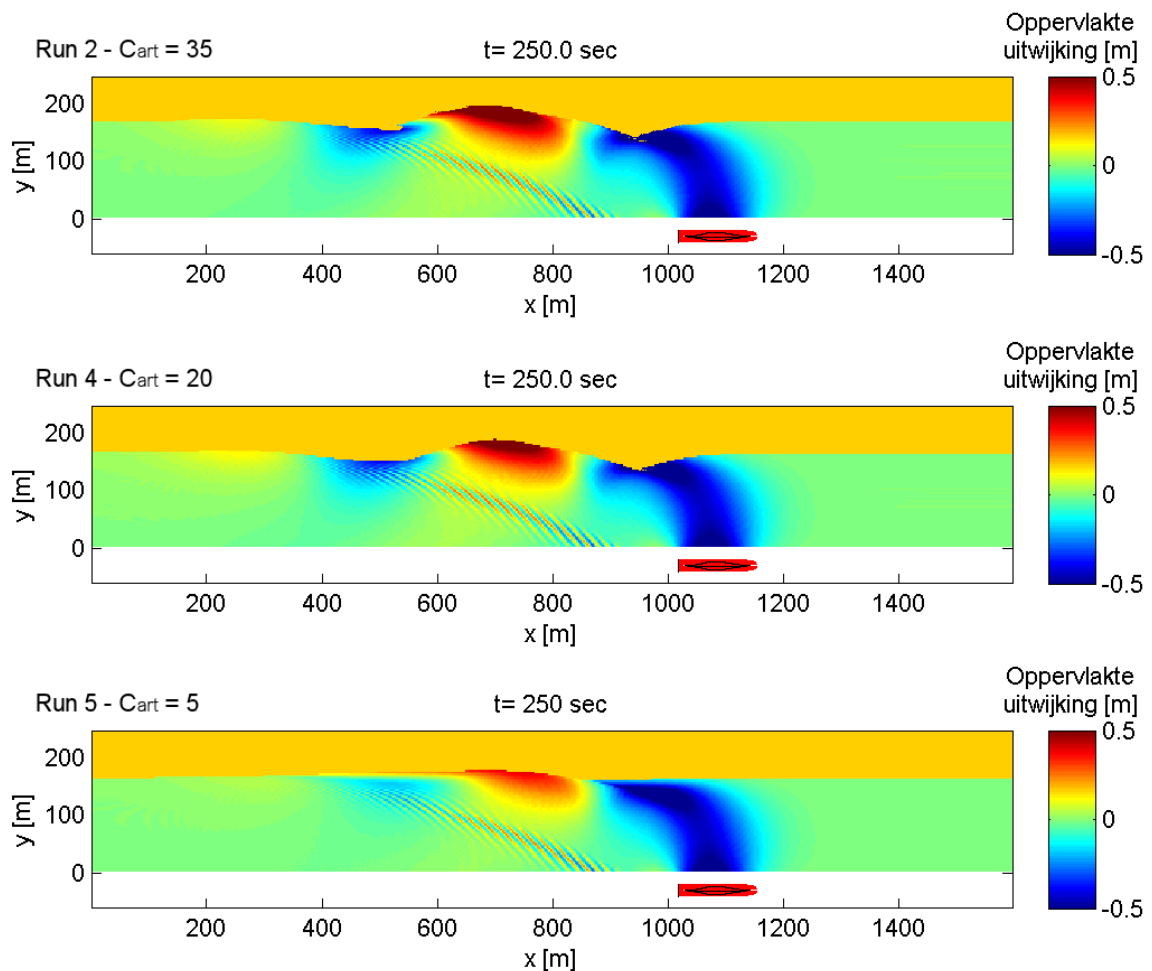


Figuur 3.7 Opnamen van de snelheidsvelden voor de drie verschillende bodemprofielen.

Het wordt benadrukt dat de gerepresenteerde resultaten nog niet gekalibreerd zijn en dat de mate van golfoploop en de optredende snelheden gezien moeten worden als een eerste benadering. Wel kan geconcludeerd worden dat, afgaande op beschrijvingen van het optredende verschijnsel, het proces van golfoploop op het strand als gevolg van passerende schepen realistisch lijkt te worden weergegeven.

3.3.2 Effect van bodemwrijving

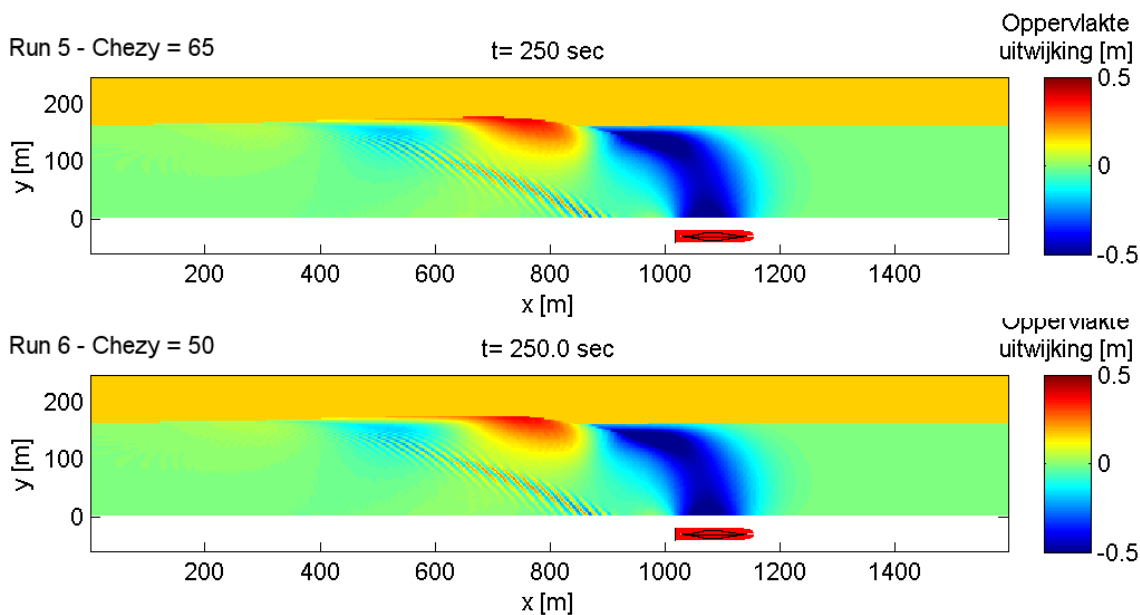
Bodemwrijving is in TRITON gemodelleerd met behulp van een Chézycoëfficiënt voor het hele domein en met C_{art} voor golfoploop op het strand. Voor beide coëfficiënten geldt: hoe lager de waarde, hoe ruwer de bodem is en hoe meer energie er wordt gedissipeerd als gevolg van wrijving. Om meer inzicht te krijgen in de gevoeligheid van golfoploop als functie van de gekozen artificiële wrijving, zijn voor bodemprofiel B enkele simulaties gedaan met andere waarden voor de artificiële wrijvingscoëfficiënt C_{art} . Deze artificiële bodemwrijving heeft alleen effect in gebieden waar het waterdiepte klein is (orde centimeters) en is dus alleen van invloed op het strand waar golfoploop een rol speelt. Het globale golfpatroon in de rest van het domein wordt niet beïnvloed door een andere waarde van C_{art} . De golfoploop voor deze runs is geplot in Figuur 3.8. De fysieke bodemwrijving voor deze runs is gemodelleerd met Chézy = $65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, wat gelijk staat aan een vrij gladde bodem.



Figuur 3.8 Invloed van de waarde van C_{art} op golfoploop.

Zoals verwacht is de golfoploop het grootst voor de schematisatie met het gladste strand. Het verschil tussen Run 2 ($C_{ar} = 35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) en Run 4 ($C_{art} = 20 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) is echter vrij klein. Pas voor Run 5, met een heel ruw strand (en een lage waarde van $C_{art} = 5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$), is de energiedissipatie zo groot dat de golfoploop op het strand minimaal wordt. Let wel dat in deze fase van de studie het nog niet mogelijk is om een schatting te geven van wat de meest realistische waarde voor C_{art} is. Dit is onder andere afhankelijk van de bodemhelling. Het kan zo zijn dat een steile helling met een lage waarde voor C_{art} en een flauwe helling met een hoge waarde voor C_{art} in werkelijkheid representatief zijn voor een even glad strand. Om golfoploop in een vervolgstudie te kunnen kwantificeren met TRITON moet het toegepaste golfoploopmodel zorgvuldig gekalibreerd worden met metingen.

Tevens is er ook gekeken naar het effect van de fysieke bodemwrijving in het hele domein op het globale golfbeeld. Run 5 en Run 6 zijn hiervoor met elkaar vergeleken. De resultaten voor beide runs zijn geplot in Figuur 3.9. Hierin is te zien dat het effect van een ruwere bodem (Chézy = $50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) minimaal is. Dit is ook te verwachten, aangezien we golfvoortplanting over een relatief korte afstand beschouwen.



Figuur 3.9 Invloed van de Chézywaarde op golfoploop.

3.3.3 Golfbreken

Het is opvallend dat in alle simulaties de golven die het strand oplopen niet steil genoeg worden om te breken. In realiteit zijn brekende golven op het strand namelijk wel waargenomen. Voor het afwezig zijn van brekende golven in de simulaties kunnen een aantal verklaringen zijn. Het kan zijn dat het geschematiseerde bodemprofiel en het gekozen golfsignaal in realiteit ook geen brekende golven opleveren. Om dit te verifiëren zou de werkelijke driedimensionale bathymetrie en een plaatselijk gemeten golfsignaal van een passerend schip, waarbij golfbreken op het strand is opgetreden, gemodelleerd kunnen worden in TRITON.

Het is echter waarschijnlijk dat in de huidige simulaties het golfoploop- en golfbrekningsmodel met de gekozen roosterresolutie het complexe golfopsteilingsproces niet in voldoende detail hebben kunnen weergeven. Om dit proces in meer detail te simuleren is een hogere roosterresolutie ter hoogte van de waterlijn benodigd. In de voor deze studie uitgevoerde simulaties (waarbij een roosterresolutie van 1 m al aan de hoge kant is voor het hele domein) is niet voor een hogere roosterresolutie gekozen met het oog op de benodigde rekentijd. In een eventueel vervolgstadium kunnen meer gedetailleerde berekeningen voor een deel van het domein worden uitgevoerd. Voor deze berekeningen is tevens meer informatie nodig over de werkelijke ruwheid van het strand ter kalibratie van het golfoploopmodel.

3.4 Conclusies

Enkele verkennende berekeningen van een schip varende in de Sardijngeul zijn met het model TRITON uitgevoerd, waarin de situatie sterk geschematiseerd is weergegeven. De uitgevoerde simulaties leiden tot de volgende inzichten:

1. De karakteristiek van de gesimuleerde golfoploop komt overeen met wat is waargenomen op het strand. Het water trekt zich terug van het strand *nadat* een schip is gepasseerd, waarna het strand zich deels vanaf de zijkant weer opvult. De golfoploop als gevolg van het passerende schip komt hoger dan de initiële waterlijn.
2. De primaire verstoring van het schip (spiegeldalingskuil) is een dominante factor voor wat betreft de grote scheepsgolven op het strand. Deze kan versterkt worden door samenvallen met de interferentiepieken met de haalgolf.
3. De helling van het strand is een belangrijke beperkt beïnvloedbare parameter die de waterspiegeldaling en de golfoploop op het strand mede bepaalt, zowel in dwars- als in langsrichting.
4. De waterstand is ook een belangrijke parameter die de waterspiegeldaling en de golfoploop op het strand mede bepaalt. Deze parameter is echter niet beïnvloedbaar.

Conclusies met betrekking tot het golfmodel TRITON:

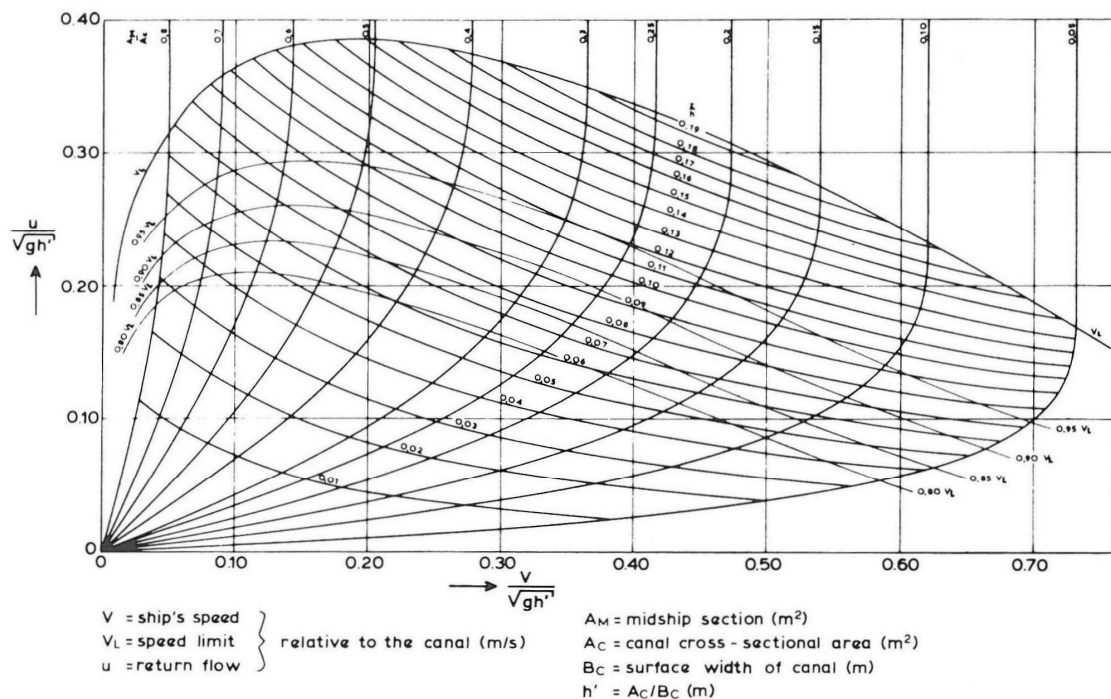
- De berekeningen laten zien dat het mogelijk is om golfoploop op het strand als gevolg van een passerend schip te modelleren met het golfmodel TRITON voor een willekeurig bodemprofiel
- In de huidige simulaties worden de golven die het strand oplopen niet steil genoeg om te breken. Om het complexe proces van golfopsteiling en golfbreking in meer detail te kunnen simuleren is een hogere roosterresolutie ter hoogte van de waterlijn vereist.
- Het model zal ook betrouwbare kwantitatieve resultaten kunnen berekenen als het model aan veldwaarnemingen kan worden gekalibreerd.

4 Effect van het passeren van een discontinuïteit in de vaarweg

4.1 Berekening primaire scheepsgolf

In een begrensde vaarweg zonder discontinuïteiten (dus een vaarweg met een prismatisch dwarsprofiel) kunnen de waterspiegel, de retourstroomsnelheid en de grensvaarsnelheid V_L op eenvoudige wijze, door middel van een eendimensionale benadering, worden uitgerekend met behulp van de vergelijkingen voor het behoud van energie en het behoud van massa. Deze werkwijze is door Schijf en Jansen [Schijf en Jansen, 1953] toegepast op schepen die varen in een prismatische vaarweg met rechthoekige doorsnede. De resultaten zijn verwerkt in diagrammen, waarin als functie van relevante grootheden zoals vaarwegdoorsnede, scheepsdoorsnede, en waterdiepte de grenssnelheid kan worden afgelezen (zie voorbeeld in Figuur 4.1). Deze werkwijze kan ook eenvoudig op een vaarweg met een trapeziumvormig dwarsprofiel worden toegepast, zie de uitwerking in Bijlage B.

Bij toenemende waarde van het quotiënt A_m/A_c en toenemende breedte van de vaargeul neemt de validiteit van de eendimensionale benadering evenwel af; in breed water gaan driedimensionale stromingseffecten een te grote rol spelen. De diagrammen van Schijf en Jansen zijn daarom slechts beperkt toepasbaar (in het diagram van Figuur 4.1 geldt een kleinste A_m/A_c verhouding van 0,05).



Figuur 4.1 Vaarsnelheiddiagram volgens [Schijf en Jansen, 1953].

4.2 Doel van de berekeningen met het rekenprogramma WAROS

Het rekenprogramma WAROS [Waterloopkundig Laboratorium, 1992] is ontwikkeld voor situaties waarbij schepen een vernauwing in de vaarweg passeren, of een schutsluis in- of uitvaren. Kenmerkend voor deze situaties is dat de doorsnede van de vaarweg al dan niet geleidelijk verandert. De verandering van het vaarwegprofiel heeft tot gevolg dat de retourstroming rond het schip verandert waardoor translatiegolven worden opgewekt. Dit heeft invloed op het vaargedrag van het schip. WAROS berekent de veranderingen in de retourstroming en de daarmee gepaard gaande translatiegolven en berekent tevens het effect hiervan op de vaarsnelheid en de verticale positie van het schip (inzinking en vertrimming). Uit de verticale positie van het schip kan tevens de kielspeling ter plaatse van bijvoorbeeld een sluisdrempel worden afgeleid. Het secundaire scheepsgolfpatroon speelt in WAROS geen rol.

WAROS gaat uit van een rechte vaarbaan en van een symmetrische dwarsdoorsnede ten opzichte van de vaarlijn. De dwarsdoorsnede mag geleidelijk of sprongsgewijs veranderen (bijvoorbeeld zoals bij het in- of uitvaren van een schutsluis), en er kunnen zijtaluds met onderwaterbermen worden toegepast. Het bodemniveau mag in langsrichting worden gevarieerd, waardoor bijvoorbeeld ook drempels bij de ingang van een sluis mogelijk zijn. Er mag voorts een constante stroming in langsrichting aanwezig zijn.

De berekening is gebaseerd op de eendimensionale Navier-Stokesvergelijking. In rekenpunten worden de impulsbalans en de continuïteitsbalans opgesteld. Dit levert in de rekenpunten waarden op voor de dwarsdoorsnede-gemiddelde retourstroombeweging en de breedtegemiddelde waterspiegelbeweging. Het scheepsgedrag wordt beschreven met de bewegingsvergelijkingen voor schrikken (horizontale translatie in langsrichting), dompen (verticale translatie) en stampen (rotatie in verticaal langsvlak). De van belang zijnde invoergrootheden zijn de vaarbaangeometrie, de scheepsafmetingen, het aangewend motorvermogen en de omzetting naar stuwkracht, en de hydraulische randvoorwaarden.

De situatie van de Sardijngeul lijkt niet op een recht prismatische vaarweg en ook is de breedte-diepteverhouding groter dan wenselijk is voor een eendimensionale rekenaanpak. Niettemin zijn WAROS-berekeningen wel nuttig omdat er inzicht mee kan worden verkregen in translatiegolf-effecten bij invaren in het vernauwde deel van de Sardijngeul, in de toename van de opstuwing voor het schip en de waterspiegelafzinking naast het schip, en in het gevolg van dit alles voor de vaarsnelheid van het schip.

In de schepenbibliotheek van het rekenprogramma WAROS zijn gevalideerde binnenvaartschepen beschikbaar, geen grote zeegaande schepen. Daarom worden berekeningen gemaakt voor een verkleinde situatie. De berekeningsresultaten kunnen dan nadien, net als bij een schaalmodel, worden vertaald naar de werkelijke situatie.

Het doel van de berekeningen met het programma WAROS wordt nu omschreven als:

het verkrijgen van inzicht in

- De effecten bij het binnenvaren van een vernauwing in de vaargeul.
- De effecten van versnellen of vertragen van het schip.
- De effecten van waterdieptevariatie.
- De effecten van een minder sterke, geleidelijker vernauwing van de vaargeul.
- De effecten van tegenstroming of meestroming in de vaargeul.

4.3 Relevante schepen

Bekend is welke schepen flinke golfverschijnselen kunnen geven op het strand bij Vlissingen. Eén van die schepen, dat tevens frequent door de Sardijngemaal vaart, is de Frisia Wissmar. Dit containerschip heeft de volgende afmetingen: lengte 200 m, breedte 30 m en diepgang 8 m (geladen). Het schip heeft een motorvermogen van 21700 kW en een maximale snelheid op diep water van 18 knopen (ca. 9,2 m/s). In de WAROS-berekeningen zal dit schip worden gerepresenteerd door een Groot Rijnschip met karakteristieke afmetingen: lengte 110 m, breedte 11,4 m, en diepgang 3,7 m (geladen). Een Groot Rijnschip heeft een motorvermogen van 1200 kW à 1500 kW; in de WAROS-berekeningen wordt uitgegaan van een vermogen van 1365 kW. Gezien deze maatverhoudingen geldt een lengteschaalfactor van ca. 2,5. Een containerschip heeft een andere vorm dan een binnenvaartschip. Dit verschil komt tot uiting in de blokcoëfficiënt.

De blokcoëfficiënt of volheidscoëfficiënt (C_b of δ) van een schip geeft de verhouding weer tussen het volume (V) van het onderwaterschip en die van het rechthoekige blok waarin het onderwaterschip precies past. Dit rechthoekige blok heeft dus de afmetingen van lengte tussen de loodlijnen L_{sl} * breedte B_s * diepgang T_s :

$$C_b = \delta = \frac{V}{L_s \cdot B_s \cdot T_s} \quad (4.1)$$

Een schip met een kleine blokcoëfficiënt is een slank schip, hoewel de prismatische coëfficiënt daar een betere maat voor is. Snelle schepen hebben in het algemeen een kleine blokcoëfficiënt. De volledige vorm van een schip ligt vast in het lijnenplan. Gebruikelijke waarden voor de blokcoëfficiënt van verschillende scheepstypen staan in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Enkele typische waarden van de blokcoëfficiënt van verschillende zeegaande scheepstypen.

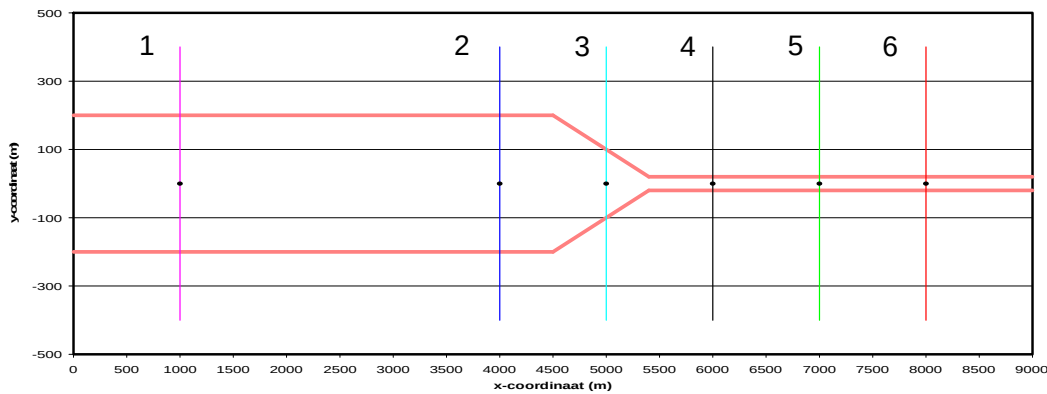
Tabel 4.1 Blokcoëfficiënt van verschillende scheepstypen.

Type	C_b
Tanker	0,80 - 0,90
Vrachtschip	0,70 - 0,80
Containerschip	0,65 - 0,75
Koelschip	0,60 - 0,70
Fregat	0,5 - 0,6

Een Groot-Rijnschip heeft een hoge blokcoëfficiënt (0,85 tot 0,90) in vergelijking met de blokcoëfficiënt van een containerschip. Dit verschil heeft een invloed op de omstroming van beide scheepstypen.

4.4 Het vaarwegmodel

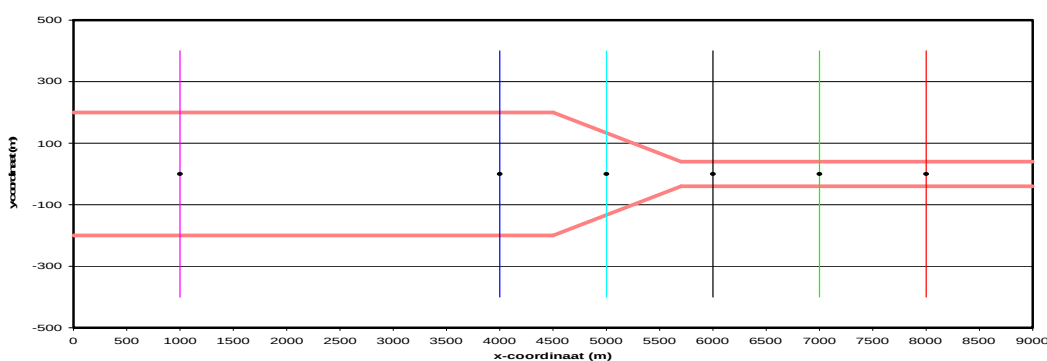
Voor het vergroten van het inzicht in de in paragraaf 4.2 genoemde effecten zijn enkele berekeningen uitgevoerd met een zo eenvoudig mogelijk gehouden vaarwegmodel: de bodem is geheel vlak en horizontaal, en de zijbegrenzingsen bestaan uit verticale wanden. Het model (model A) is in Figuur 4.2 in bovenaanzicht weergegeven. Let wel: de lengteschaal van de tekening (x-coördinaat) wijkt af van de breedteschaal (y-coördinaat).



Figuur 4.2 Vaarwegmodel A met raaien waar de breedtegemiddelde waterspiegelbeweging en de doorsnede-gemiddelde stroomsnelheid is berekend (nb.: lengteschaal afwijkend van breedteschaal).

De bodem van het model ligt op -5,5 m + NAP, de waterspiegel bevindt zich in de meeste berekeningen op 0,0 m + NAP. Deze waterstand is 2,67 m hoger dan de waterstand waarbij de Triton berekeningen zijn uitgevoerd. Omdat het model een schaalmodel is met een lengteschaalfactor van 2,5 heeft dit verschil in waterstand geen gevolgen voor de resultaten. Het wijde deel van de vaargeul heeft een breedte van 400 m, het smalle deel een breedte van 40 m. De overgang vindt plaats vanaf $x = 4500$ m tot $x = 5400$ m (verloop zijanten onder 1:5). In zes verschillende dwarsraaien (zie Figuur 4.2) worden de resultaten van berekening van de breedtegemiddelde waterspiegelbeweging gepresenteerd. Uitgaande van een lengteschaalfactor $n_L = 2,5$ zijn de maten van model A respectievelijk: breedte wijde deel 1000 m, breedte nauwe deel 100 m, en bodemligging -13,75 m + NAP. Dit is een extreme vernauwing vanaf de Rede van Vlissingen naar de Sardijngeul. Deze situatie is als een bovengrens te beschouwen van de mogelijke optredende vernauwingen.

Er is een variant doorgerekend met minder sterke vernauwing van de 400 m brede vaargeul (model B, zie Figuur 4.3). De breedte van het nauwe deel bedraagt hier 80 m. De overgang van het wijde deel naar het nauwe deel vindt plaats tussen $x = 4500$ m en $x = 5700$ m (verloop zijanten onder 1:7,5). De bodem ligt weer op -5,5 m + NAP, en de waterspiegel bevindt zich op 0,0 m + NAP. Omgerekend met een lengteschaalfactor $n_L = 2,5$ zijn de maten van model B respectievelijk: breedte wijde deel 1000 m, breedte nauwe deel 200 m, en bodemligging -13,75 m + NAP. Deze situatie is globaal vergelijkbaar met de vernauwing van de Rede van Vlissingen naar de Sardijngeul bij een lage waterstand.



Figuur 4.3 Vaarwegmodel B met raaien waar de breedtegemiddelde waterspiegelbeweging en de doorsnede-gemiddelde stroomsnelheid is berekend (nb.: lengteschaal afwijkend van breedteschaal)

Bij beide modellen geldt dat de linkerrand een zogenaamde debietrand is (geen doorvoer aan water op deze rand) en de rechterrand een reflectievrije rand (translatiegolven kunnen vrij het nauwe deel van de vaargeul uitlopen).

4.5 Uitgevoerde berekeningen

Met het rekenprogramma WAROS zijn negen berekeningen uitgevoerd. Een overzicht van de toegepaste vaarprogramma's is in Tabel 4.1 gegeven en Tabel 4.2 geeft een overzicht van de uitgevoerde berekeningen.

Tabel 4.1 Overzicht van toegepaste vaarprogramma's

Vaarprogramma I		Vaarprogramma II		Vaarprogramma III		Vaarprogramma IV	
x-hek schip (m)	toegepast vermogen (% max. vermogen)	x-hek schip (m)	toegepast vermogen (% max. vermogen)	x-hek schip (m)	toegepast vermogen (% max. vermogen)	x-hek schip (m)	toegepast vermogen (% max. vermogen)
1	5	1	5	1	5	1	5
250	15	250	15	250	15	250	15
750	30	750	30	750	30	750	30
> 750	30	> 1500	60	> 2500	15	> 5500	60

De in Tabel 4.1 aangegeven motorvermogens betreffen een percentage van het maximale (opgestelde) vermogen van het schip. Dit maximale vermogen bedraagt voor het Groot Rijnschip 1365 kW. De coördinaat x_{hek} geeft de positie van het hek van het schip aan op het moment dat het motorvermogen wordt veranderd. Bij alle berekeningen wordt eerst het schip in het eerste deel van het wijde vaarweggedeelte op gang gebracht (het motorvermogen wordt daarbij in stappen opgevoerd tot 30% van het maximale vermogen). Daarna wordt het motorvermogen gelijk gehouden (vaarprogramma I), verhoogd tot 60% (vaarprogramma II), of weer verlaagd tot 15% (vaarprogramma III). In vaarprogramma IV wordt het motorvermogen tot 60% opgevoerd op het moment dat het schip zich al in het nauwe deel van de vaarweg bevindt.

Tabel 4.2 geeft een overzicht van de uitgevoerde berekeningen. De tabel laat de doorgerekende combinaties van vaargeulconfiguratie, waterdiepte, stroomsnelheid en vaarprogramma zien. De opgegeven stroomsnelheid geldt voor het nauwe deel van de vaargeul. Bij alle berekeningen geldt dat het schip vanuit het wijde deel van de vaargeul de vernauwing in vaart.

Tabel 4.2 Overzicht van uitgevoerde berekeningen.

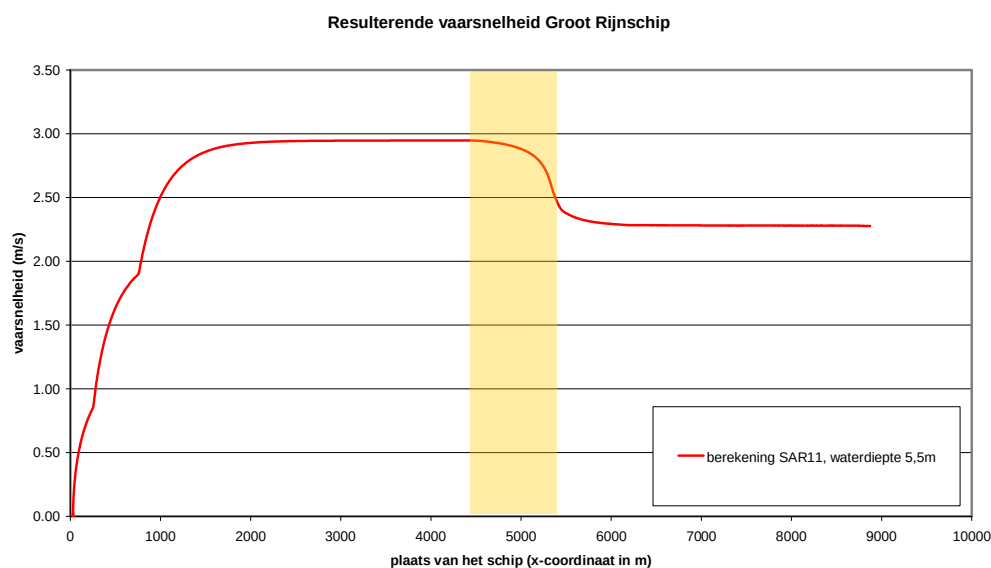
Berekening	Vaargeul lay-out	Waterdiepte (m)	Stroomsnelheid (m/s)	Vaarprogramma
SAR11	model A	5,5	0	I
SAR12	model A	5,5	0	II
SAR13	model A	5,5	0	III
SAR14	model A	4,5	0	I
SAR15	model A	6,5	0	I
SAR16	model A	5,5	0	IV
SAR17	model B	5,5	0	I
SAR18	model A	5,5	-1,0	I
SAR19	model A	5,5	1,0	I

4.6 Resultaten van de WAROS-berekeningen (ongeschaald)

In deze paragraaf worden de resultaten van de WAROS-berekeningen besproken. Deze resultaten zijn nog zonder opschaling naar de werkelijke situatie van de Sardijneul. In Paragraaf 4.8 wordt besproken wat deze berekeningsresultaten voor de werkelijke situatie zouden kunnen betekenen.

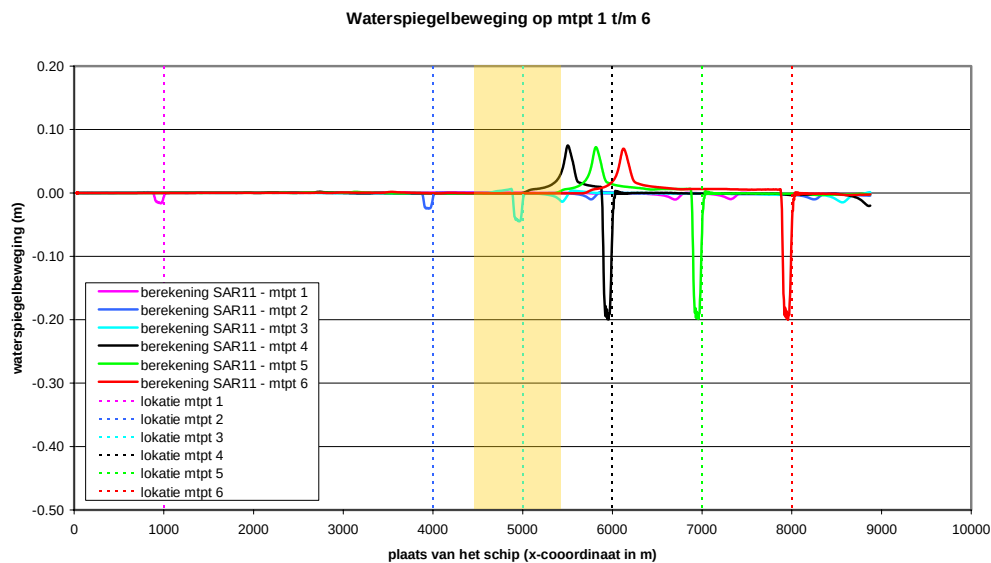
4.6.1 De effecten bij het binnenvaren van een vernauwing in de vaargeul

In Figuur 4.4 is voor berekening SAR11 de vaarsnelheid van het Groot Rijnschip weergegeven als functie van de plaats van het schip in de vaarbaan. In die figuur is het oranje vlak de locatie van de vernauwing van de vaarweg.

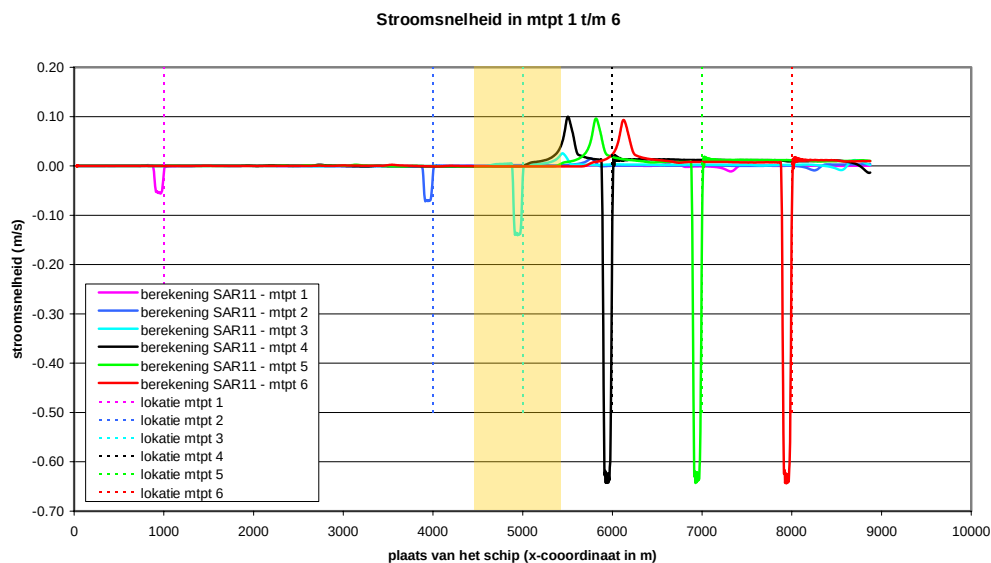


Figuur 4.4 Resulterende vaarsnelheid Groot Rijnschip als functie van de plaats van het schip.

Het schip wordt vanuit stilstand versneld (volgens vaarprogramma I) en bereikt na ca. 2500 m zijn evenwichtssnelheid van bijna 3 m/s. Vanaf het moment dat het schip de 'trechter' in vaart ondervindt het meer weerstand en neemt de vaarsnelheid af (het motorvermogen blijft hetzelfde). In het nauwe deel van de vaarbaan is de snelheid gereduceerd tot 2,3 m/s. De Figuren 4.5 en 4.6 laten zien hoe de waterspiegel en de stroomsnelheid variëren in de vaste 'meetpunten' 1 tot en met 6 als gevolg van het bewegen van het schip; de positie van deze meetpunten is door middel van een stippellijn aangegeven (zie ook Figuur 4.2). In de figuren beweegt het schip van links naar rechts, en de grafieken geven voor de vaste meetpunten aan wat op die locaties gebeurt.



Figuur 4.5 Breedtegemiddelde waterspiegelbeweging in meetpunten 1 t/m 6 als functie van de plaats van het schip.



Figuur 4.6 Doorsnede-gemiddelde stroomsnelheid in meetpunten 1 t/m 6 als functie van de plaats van het schip.

Het blijkt nu dat bij varen in het wijde deel van de vaargeul slechts een geringe waterspiegeldaling ontstaat en een geringe retourstroomsnelheid. Bij het invaren van de vernauwing nemen zowel de waterspiegeldaling als de retourstroomsnelheid toe tot een evenwichtswaarde in het vernauwde deel van -0,20 m respectievelijk -0,65 m/s. Duidelijk zichtbaar is ook dat er voor het schip uit een positieve translatiegolf (golfhoogte ca. 0,07 m) gaat lopen vanaf het moment van invaren in het vernauwde deel. Deze golf bereikt de meetpunten op meetlocaties 6000 m, 7000 m en 8000 m ruim voordat het schip daar passeert. Achter het schip lopen ook translatiegolven weg, maar deze zijn nauwelijks zichtbaar in het brede deel van de vaarweg. De voortplantingssnelheid van de positieve translatiegolf in het nauwe deel bedraagt ca. 7,3 m/s (deze waarde is niet in de figuren af te lezen, maar volgt uit de tijdreeksen). Dit komt overeen met de theoretische translatiegolfsnelheid die kan worden berekend met:

$$c = u + \sqrt{gh} \quad (4.2)$$

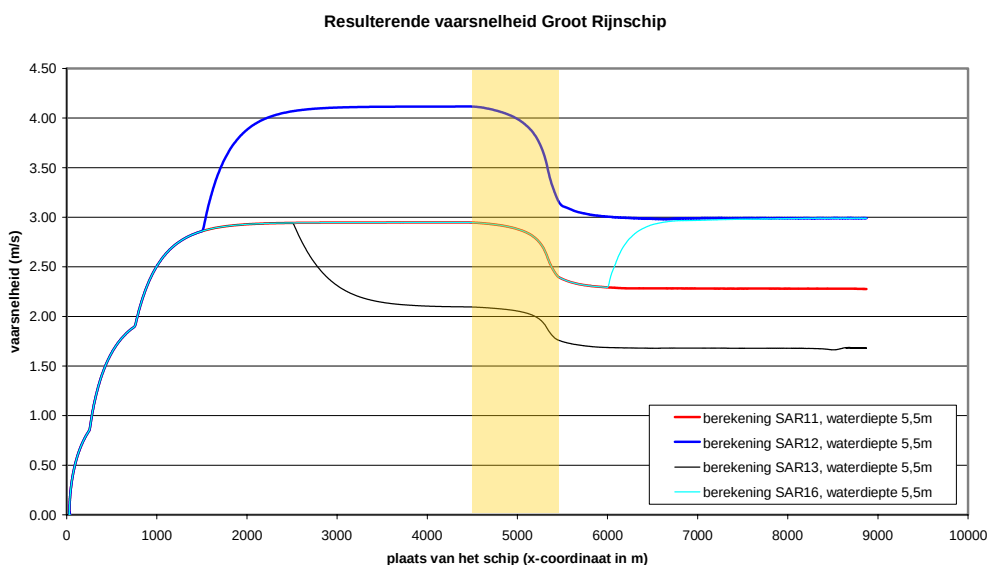
met:

- c = voortplantingssnelheid (m/s)
- u = doorsnede-gemiddelde stroomsnelheid in de vaargeul (m/s); hier 0 m/s
- h = waterdiepte (m)
- g = zwaartekrachtsversnelling (m/s²)

In Figuur 4.5 is ook te zien dat in het nauwe deel van de vaargeul, na het passeren van de translatiegolf, er voor het schip een lichte opstuwing bestaat. De vorm van de vernauwing heeft invloed op de vorm van de translatiegolf.

4.6.2 De effecten van versnellen of vertragen van het schip

Voor berekeningen SA11, SAR12, SAR13 en SAR16 is in Figuur 4.7 de resulterende vaarsnelheid weergegeven van het Groot Rijnschip. De verschillen tussen de curves zijn het gevolg van de verschillen in vaarprogramma (zie het overzicht in Tabellen 4.2 en 4.1).



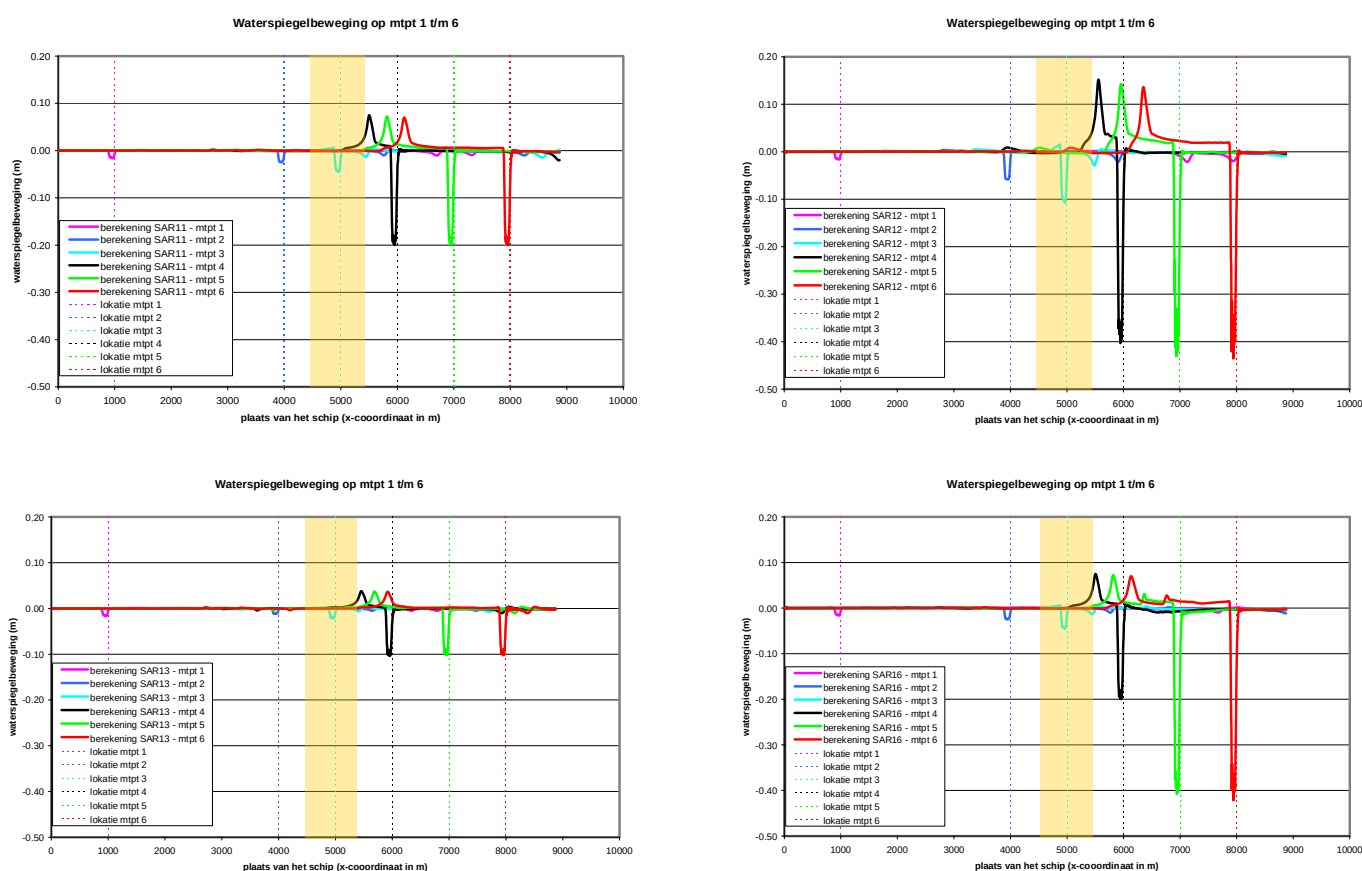
Figuur 4.7 Resulterende vaarsnelheid Groot Rijnschip als functie van de plaats van het schip voor verschillende vaarprogramma's.

In berekening SAR11 (rode lijn) wordt na het bereiken van de evenwichtsvaarsnelheid in het wijde deel van de vaargeul geen verandering aangebracht in het aangewend motorvermogen, in berekening SAR12 (donkerblauwe lijn) wordt het vermogen opgevoerd en vaart het schip met grotere snelheid de vernauwing in, in berekening SAR13 (zwarte lijn) wordt het vermogen teruggenomen waardoor de snelheid flink is afgenomen op het moment van invaren van de vernauwing, en in berekening SAR16 (lichtblauwe lijn) tenslotte wordt het vermogen opgevoerd nadat het schip zich al in de vernauwing bevindt. Het schip bereikt bij deze laatste berekening dezelfde evenwichtsvaarsnelheid in de vernauwing als bij berekening SAR 12, namelijk 3,0 m/s.

De snelheid waarmee het schip de vernauwing in vaart is duidelijk van invloed op de hoogte van de translatiegolf die voor het schip wegloopt, zo blijkt uit de grafieken van de breedtegemiddelde waterspiegelbeweging in meetpunten 1 t/m 6, weergegeven in Figuur 4.8.

De translatiegolfhoogte heeft een waarde van 0,15 m bij een invaarsnelheid van 4,1 m/s, een waarde van 0,07 m bij een invaarsnelheid van bijna 3,0 m/s, en een waarde van 0,03 m bij een invaarsnelheid van 2,1 m/s.

De opstuwing vóór het schip (na het passeren van de translatiegolf) is het sterkst bij de hoogste vaarsnelheid in de vernauwing; daarbij zijn ook de waterspiegeldaling en de retourstroomsnelheid het grootst. De opstuwing bij deze hoogste evenwichtsvaarsnelheid van 3,0 m/s (berekening SAR 12) bedraagt bijna 0,02 m, en de waterspiegeldaling naast het schip bedraagt daarbij ca. 0,4 m (alles breedtegemiddeld). De doorsnede-gemiddelde retourstroomsnelheid heeft een waarde van ca. 0,95 m/s (deze waarde is niet in Figuur 4.8 af te lezen, maar volgt uit de tijdreeksen).

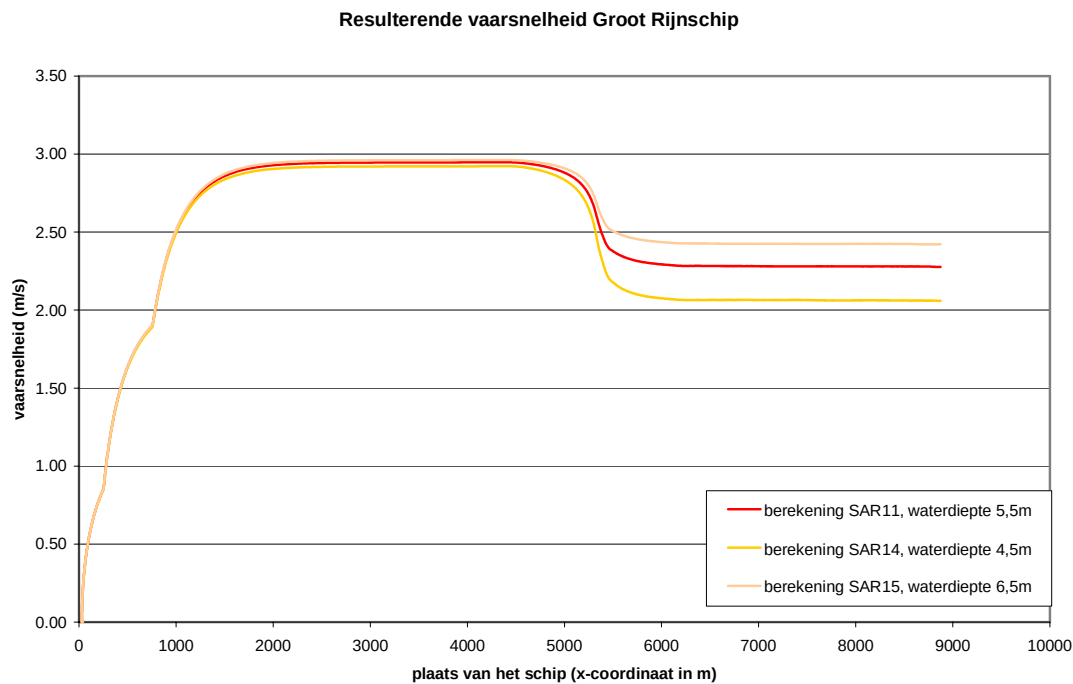


Figuur 4.8 Breedtegemiddelde waterspiegelbeweging in meetpunten 1 t/m 6 als functie van de plaats van het schip bij ber. SAR11 (links boven), ber. SAR12 (rechts boven), ber. SAR13 (links onder, en ber. SAR16 (rechts onder), oranje geeft de locatie van de vernauwing weer.

Een vergelijking tussen ber. SAR12 en ber. SAR16 maakt duidelijk dat versnellen van het schip vóór het invaren van de vernauwing een hogere translatiegolf veroorzaakt dan versnellen van het schip in de vernauwing, maar de stationaire evenwichtssituatie in de vernauwing is gelijk (wat betreft vaarsnelheid, opstuwing, waterspiegelfazinking, en retourstroomsnelheid). Op het moment dat het schip in het nauwe deel van de vaargeul versnelt (berekening. SAR 16) ontstaat er een tweede translatiegolf.

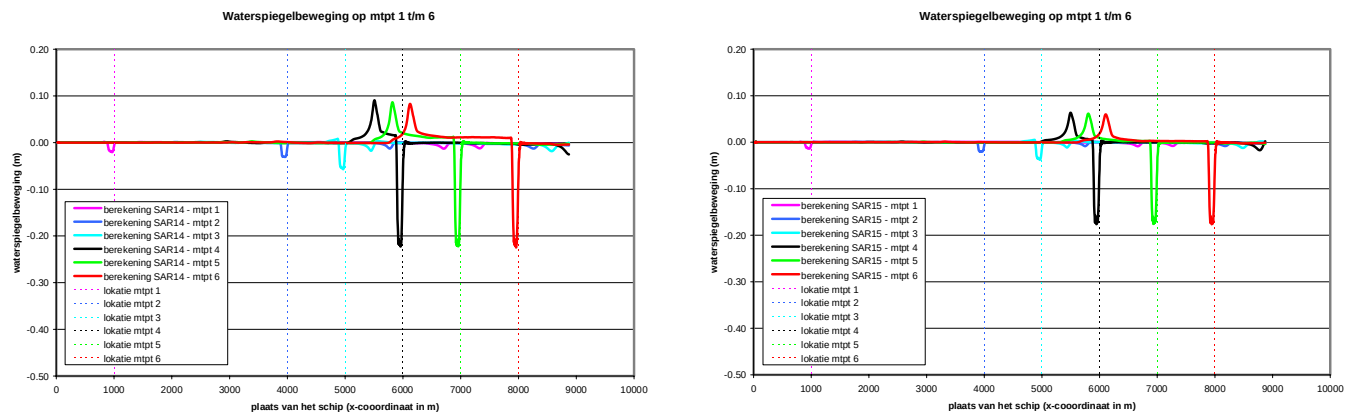
4.6.3 De effecten van waterdieptevariatie

In berekeningen SAR14 en SAR15 is achtereenvolgens het effect van een 1,0 m lagere en een 1,0 m hogere waterstand nagegaan. In SAR14 is de waterdiepte 4,5 m en in SAR15 6,5 m. Bij beide berekeningen is vaarprogramma I toegepast (zie Tabellen 4.2 en 4.1). Vergeleken wordt met berekening SAR11, met een waterdiepte van 5,5 m. De resulterende vaarsnelheid van het Groot Rijnschip is voor de drie gevallen in Figuur 4.9 weergegeven.



Figuur 4.9 Resulterende vaarsnelheid Groot Rijnschip als functie van de plaats van het schip voor verschillende waterdieptes.

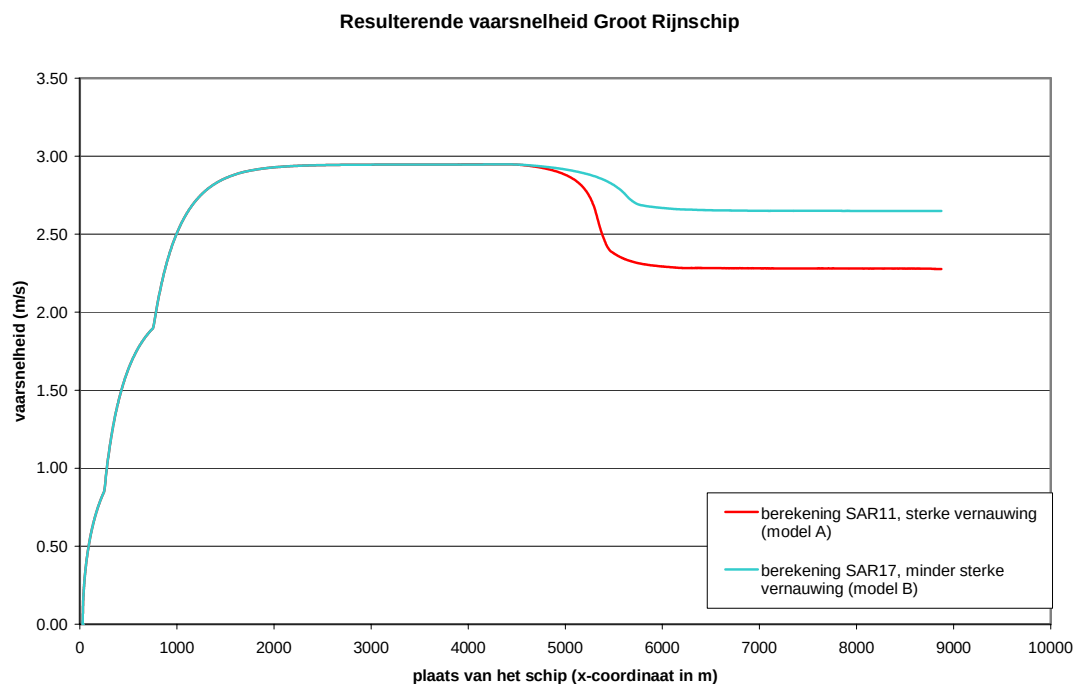
De grafiek laat zien dat de evenwichtsvaarsnelheid lager is naarmate de diepte van de vaarweg geringer is; dit geldt in het bijzonder voor het nauwe deel van de vaarweg. De hoogte van de translatiegolf die voor het schip uit loopt in het nauwe deel van de vaarweg, is duidelijk hoger bij ondieper water dan bij dieper water, zie Figuur 4.10 en Figuur 4.8 (berekening SAR11, grafiek links boven). De voortplantingssnelheid is in ondieper water lager, zoals ook blijkt wanneer formule (4.1) wordt toegepast.



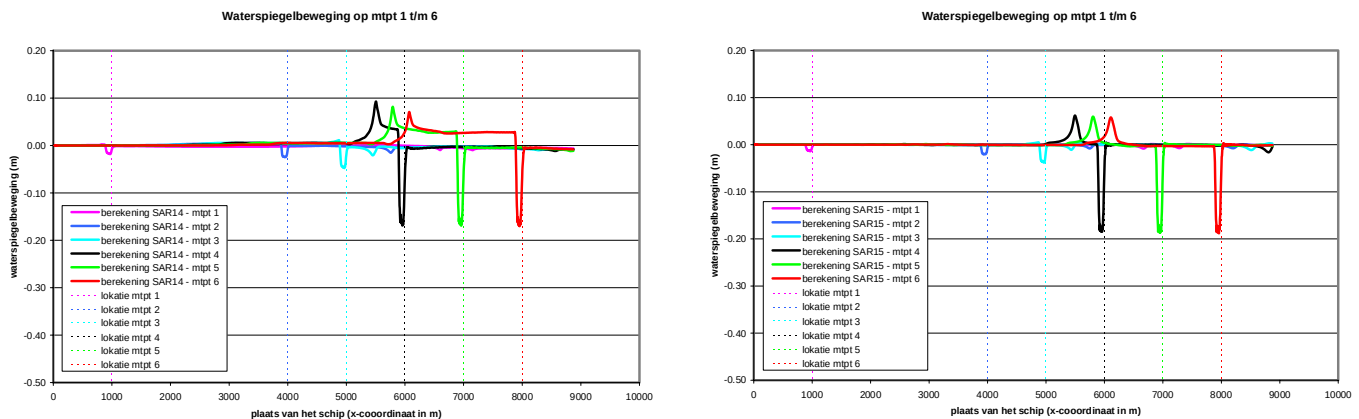
Figuur 4.10 Breedte-gemiddelde waterspiegelbeweging in meetpunten 1 t/m 6 als functie van de plaats van het schip bij berekening SAR14 (links) en berekening SAR15 (rechts).

Markant is voorts dat de opstuwing voor het schip in het nauwe deel van de vaarweg bij ondieper water aanzienlijk hoger is (in berekening SAR 14 bijna 0,01 m) dan bij dieper water (in berekening SAR 15 bijna verwaarloosbaar).

4.6.4 De effecten van een minder sterke, geleidelijker vernauwing van de vaargeul Nagegaan is wat het effect is van een minder sterke, en een geleidelijker vernauwing van de vaarweg. Daartoe is berekening SAR11 (met vaarprogramma I, lay-out van model A, Figuur 4.2) herhaald met de lay-out van model B (zie Figuur 4.3); dit is berekening SAR17. In Figuur 4.11 wordt de resulterende vaarsnelheid van het Groot Rijnschip getoond bij de twee vaargeulconfiguraties. Duidelijk blijkt dat een minder sterke vernauwing (model B) leidt tot een minder sterke afremming van het schip bij invaren in het vernauwde gedeelte.



Figuur 4.11 Resulterende vaarsnelheid Groot Rijnschip als functie van de plaats van het schip, voor twee vaargeulconfiguraties: model A (sterke vernauwing) en model B (minder sterke vernauwing).

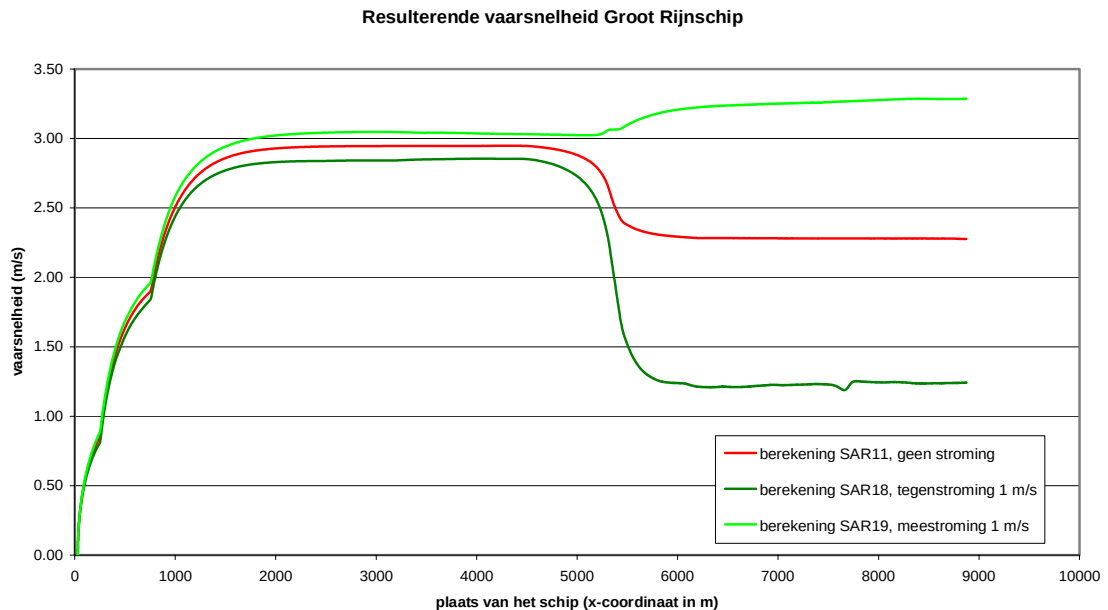


Figuur 4.12 Breedtegemiddelde waterspiegelbeweging in meetpunten 1 t/m 6 als functie van de plaats van het schip bij berekening SAR11- model A (links) en berekening SAR17- model B (rechts).

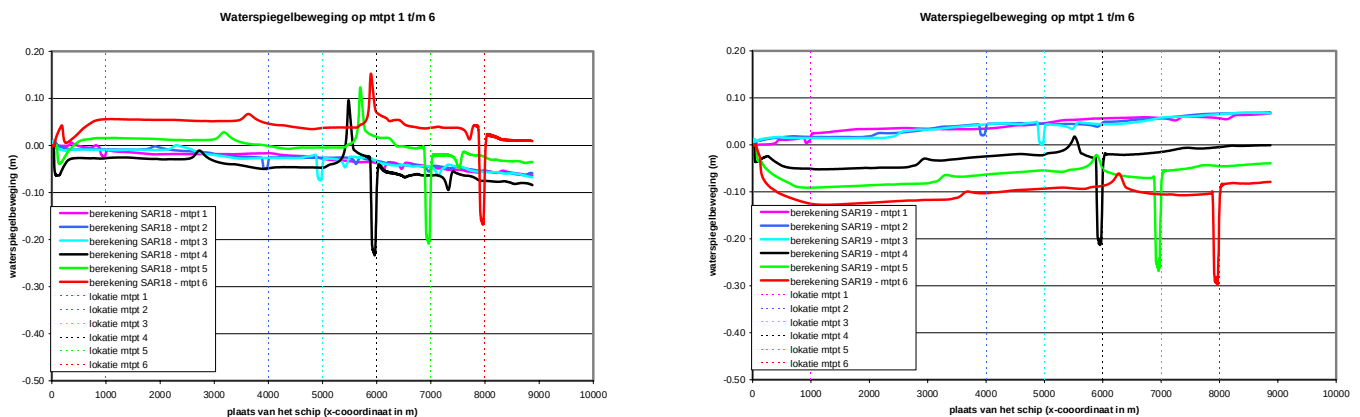
Voorts blijkt uit Figuur 4.12 dat de hoogte van de translatiegolf die voor het schip weg loopt geringer is bij een minder sterke vernauwing (bij ongeveer gelijke invaarsnelheid). Ook wordt er vrijwel geen water meer opgestuwd voor het schip in het nauwe vaardeel bij een minder sterke vernauwing. De waterspiegelafzinking naast het schip is in beide berekeningen ongeveer gelijk, maar hier speelt nu in mee dat de vaarsnelheid van het schip in het geval van een minder sterke vernauwing hoger blijft in het nauwe vaardeel.

4.6.5 De effecten van tegenstroming of meestroming in de vaargeul

Als laatste is onderzocht wat het effect is wanneer een tegenstroming of meestroming in de vaargeul aanwezig is. Daartoe zijn berekeningen SAR18 en SAR19 (zie Tabel 4.2) gemaakt, met respectievelijk een tegenstroom van -1 m/s en een meestroom van 1 m/s (geldig in het nauwe deel van de vaargeul). De uitkomsten worden vergeleken met de overeenkomstige situatie zonder stroming (berekening. SAR11). Uit Figuur 4.13 blijkt dat de tegenstroming, bij inzet van hetzelfde motorvermogen, een flinke reductie in vaarsnelheid veroorzaakt vergeleken met de situatie zonder stroming. In het nauwe deel van de vaargeul is deze reductie vrijwel gelijk aan de tegenstroomsnelheid van 1 m/s. Bij meestroming van 1 m/s neemt de vaarsnelheid in het nauwe deel van de vaargeul vrijwel met een zelfde waarde toe.



Figuur 4.13 Resulterende vaarsnelheid Groot Rijnschip als functie van de plaats van het schip, in geval van stil water, meestrooming en tegenstrooming.



Figuur 4.14 Breedtegemiddelde waterspiegelbeweging in meetpunten 1 t/m 6 als functie van de plaats van het schip bij 1 m/s tegenstrooming (links) en 1 m/s meestrooming (rechts).

Figuur 4.14 toont de breedtegemiddelde waterspiegelbeweging. De linker grafiek betreft berekening SAR18 met tegenstrooming, de rechter grafiek berekening SAR19 met meestrooming. Het verhang in het modelgebied is af te lezen door te kijken naar het momentane verschil (dus bij één vaarwegpositie x) tussen de verschillende 'meetlijnen'. Dit verhang ligt in de orde van grootte van 8 cm over een lengte van 2000 m (1:25000) in het nauwe deel van de vaargeul. Als bodemruwheid is een waarde $k = 0,01$ m ingevoerd in de berekeningen. Deze bodemruwheid toegepast in de formule van Chézy:

$$u = C\sqrt{RI} \quad (4.3)$$

geeft bij een stroomsnelheid $u = 1$ m/s, een waterdiepte $d = 5,5$ m ($\approx R$), en een Chézy waarde

$$C = 18 \log \frac{12R}{k} = 68,7 \quad (4.4)$$

inderdaad een verhang I van 1:25000.

Uit vergelijking van Figuur 4.14 met Figuur 4.5 blijkt voorts dat de hoogte van de translatiegolf toeneemt bij tegenstroming (bij -1 m/s: toename van ca. 7 cm tot ca. 12 cm) en de voortplantingssnelheid afneemt. Bij meestroming neemt de translatiegolfhoogte af (bij 1 m/s: afname van ca. 7 cm tot ca. 4 cm) en neemt de voortplantingssnelheid toe. De afname of toename van de voortplantingssnelheid volgt ook uit formule (4.2). De waterspiegeldaling naast het schip ten opzichte van de omgevingswaterstand is in alle drie gevallen (tegenstroom, stil water, en meestroom) ongeveer even groot en wordt dus niet erg door de stromingstoestand beïnvloed. Dit geldt ook voor de retourstroomsnelheid ten opzichte van de omgevingsstroomsnelheid.

4.6.6 Conclusies uit de WAROS-berekeningen

Er zijn negen berekeningen uitgevoerd met het rekenprogramma WAROS, waarbij een Groot Rijnschip vanuit een wijde vaargeul een flink nauwere geul in vaart. Daarbij zijn het vaarprogramma, de waterdiepte, de vaarwegconfiguratie, en de stromingstoestand in de vaargeul gevarieerd. Kort samengevat luiden de conclusies van deze berekeningen:

- Bij invaren van een vernauwing in de vaargeul ontstaat een positieve translatiegolf (waterstandverhoging), die aan de voorzijde van het schip weg loopt. De voortplantingssnelheid is afhankelijk van de waterdiepte. De hoogte van de translatiegolf is sterk afhankelijk van de snelheid waarmee het schip de vernauwing in vaart en van de mate van vernauwing: hoe hoger de snelheid en hoe sterker de vernauwing, hoe hoger de translatiegolf. De negatieve translatiegolf die aan de achterzijde van het schip weg loopt is in het brede deel van de vaargeul nog maar weinig opvallend.
- Een translatiegolf wordt ook opgewekt wanneer het schip versnelt of vertraagt; de opgewekte golf is hoger naarmate de vaargeul nauwer is of de versnelling groter.
- Het schip stuwt het water in de vaargeul enigszins op. Dit is voornamelijk merkbaar in het nauwe deel van de vaargeul. Bij invaren van een vernauwing zal een translatiegolf worden opgewekt, die wegloopt van het schip, waarna een licht verhoogde waterstand (opstuwing) vóór het schip resteert. Het schip ondervindt hiervan extra weerstand en dientengevolge zal de evenwichtsvaarsnelheid in de vernauwde vaargeul lager zijn dan in het wijde deel van de vaargeul (bij een zelfde motorvermogen).
- Bij het invaren van het nauwe deel van de vaargeul neemt de waterspiegeldaling naast het schip flink toe, evenals de retourstroomsnelheid. Opstuwing, waterspiegeldaling en retourstroomsnelheid zijn, wanneer het schip de evenwichtsvaarsnelheid heeft bereikt, geheel afhankelijk van de vaarsnelheid en de grootte van de 'natte' doorsnede van de vaarweg (deze laatste grootte ook in relatie tot de dwarsdoorsnede van het schip). Een kleinere 'natte' doorsnede (een kleinere waterdiepte en / of een geringere vaarwegbreedte) heeft in het algemeen een grotere opstuwing, waterspiegeldaling en retourstroomsnelheid tot gevolg.
- Tegenstroming in de vaargeul heeft als effect dat een opgewekte translatiegolf hoger wordt en zich langzamer voortplant dan in stil water.

Omgekeerd geldt dat meestroming de translatiegolfhoogte doet afnemen en de voortplantingssnelheid doet toenemen. De waterspiegeldaling en retourstroomsnelheid (ten opzichte van de omgevingstoestand) worden niet erg beïnvloed door de stroming.

4.7 Betekenis van de WAROS berekeningen voor de werkelijke situatie

De berekeningen zijn gemaakt voor een kleinere situatie dan de situatie van de Sardijngeul. Er geldt een lengteschaalfactor van ca. 2,5. De in de voorgaande paragraaf berekende grootheden kunnen met deze factor worden opgeschaald voor zover het lengtegrootheden betreft; bij snelheidsgrootheden dient volgens de Froude-schaalregel een factor $\sqrt{2,5} = 1,6$ te worden gebruikt. Het opgeschaalde schip heeft dan afmetingen zoals bijvoorbeeld het containerschip Frisia Wissmar. Typische vaarsnelheden zoals toegepast in de berekeningen liggen opgeschaald in de range 2,5 m/s – 5 m/s (5 - 10 knopen), geldig voor het nauwe vaargeulgedeelte met opgeschaalde breedte van 100 m à 200 m en opgeschaalde diepte van 13,5 m. Translatiegolfhoogten in het nauwe vaargeulgedeelte liggen daarbij tussen 0,1 m en 0,2 m, terwijl de waterspiegelaflating naast het schip, de primaire golf, ligt tussen 0,3 m en 0,5 m (dit zijn breedtegemiddelde maten).

Er dienen echter wel kanttekeningen te worden geplaatst bij deze vertaling. Allereerst wordt opgemerkt dat het rekenmodel aan beide zijanten door verticale wanden is begrensd, terwijl in de werkelijkheid sprake is van een oplopend talud naar het strand aan de ene zijde en een glooiing naar de verondieping aan de andere zijde, waardoor de breedte, met name op de waterlijn, in werkelijkheid groter is. Verder geldt dat het water van de Sardijngeul in feite niet begrensd is naar de zuidzijde toe, zodat in werkelijkheid bijvoorbeeld translatiegolven breed kunnen uitwaaiëren en hoogte kunnen verliezen. Bovendien kunnen zich daarbij reflectieverschijnselen voordoen, die in het rechte WAROS-model niet mogelijk zijn. In zijn algemeenheid geldt voorts dat de afmetingen in horizontale zin zodanig groot zijn dat getwijfeld mag worden aan de validiteit van de eendimensionale formuleringen in WAROS voor deze situatie.

Niettemin zijn de berekeningen nuttig omdat de effecten die optreden bij het invaren van een schip in een vernauwing, zoals het ontstaan van translatiegolven, het enigszins opstuwende van water en daardoor toenemen van de vaarweerstand en afnemen van de vaarsnelheid, en het sterker worden van omstroming en waterspiegeldaling naast het schip (primaire golf) goed worden voorspeld, alsmede de effecten ten gevolge van meestroming of tegenstroming. Het is wel zaak om deze berekende effecten goed te interpreteren. Er kan worden aangenomen dat de berekeningsresultaten voor locaties op wat grotere afstand dwars uit het schip aan de conservatieve, hoge kant zijn, en in de directe nabijheid van het schip aan de lage kant. Daarbij geldt evenwel dat geometrische effecten als gevolg van oplopende bodems, bochten, platen e.d. op golfvoortplanting, golfgedrag en stromingen niet in de berekeningsresultaten zijn verdisconteerd en in de werkelijke situatie wel kunnen optreden en dan tot lokaal sterkere verschijnselen kunnen leiden.

Om alle hydrodynamische verschijnselen ten gevolge van een schip dat vaart in een vaarweg met variabele geometrische en bathymetrische eigenschappen goed te kunnen berekenen is een numeriek rekenmodel nodig dat het driedimensionale stromingsveld rond het schip met het bijbehorende golfpatroon goed kan simuleren, dat het ontstaan en de voortplanting van scheepsgolven en translatiegolven kan berekenen, en belangrijker, dat mogelijkheden biedt om het varende schip te modelleren. Bij Deltares bestaan afzonderlijke componenten van een dergelijk numeriek model. Het verdient aanbeveling te inventariseren of een integratie van deze componenten in het kader van een onderzoeksprogramma, ten behoeve van eventuele vervolgacties, tot de mogelijkheden behoort.

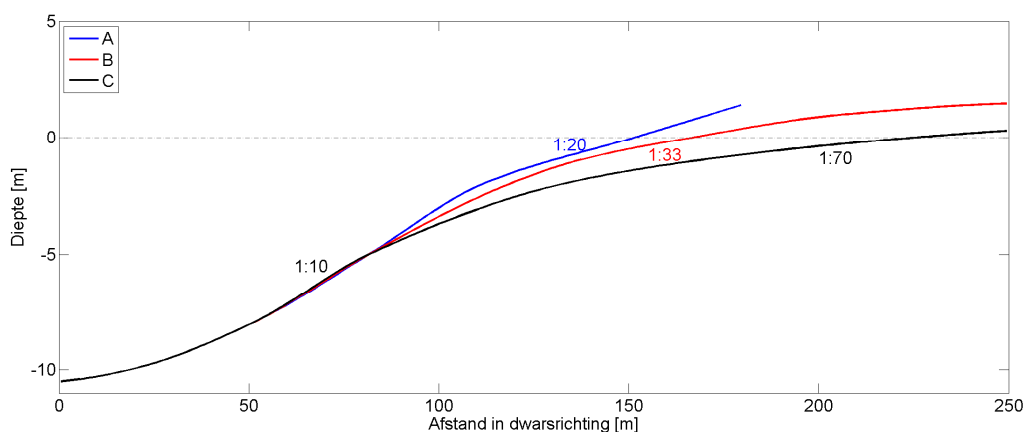
5 Samenvatting en mogelijke maatregelen

5.1 Samenvatting uitgevoerde berekeningen en toepassing van de resultaten

De resultaten uit Hoofdstukken 3 en 4 zijn samengevat en de resultaten zijn zoveel mogelijk op de situatie in de Sardijngeul en het Badstrand bij Vlissingen toegepast.

De invloed van de helling van het strand (hoofdstuk 3).

De invloed van de helling van het strand op de scheepsgolven is in rekenmodel TRITON met een prismatisch dwarsprofiel van vaargeul en van het Badstrand bij een lage waterstand verkend door een schip met een constante vaarsnelheid langs de rand van het model te laten varen. De helling van het strand is van 1:20 naar 1:40 tot 1:70 bij de waterlijn gevarieerd, zie de profielen A, B en C in figuur 5.1. waarin de horizontale en verticale assen op een verschillende schaal zijn uitgezet. Het bestaande strand heeft een helling van 1:40. De invloed van het steiler worden en het flauwer worden van het strand is verkend.

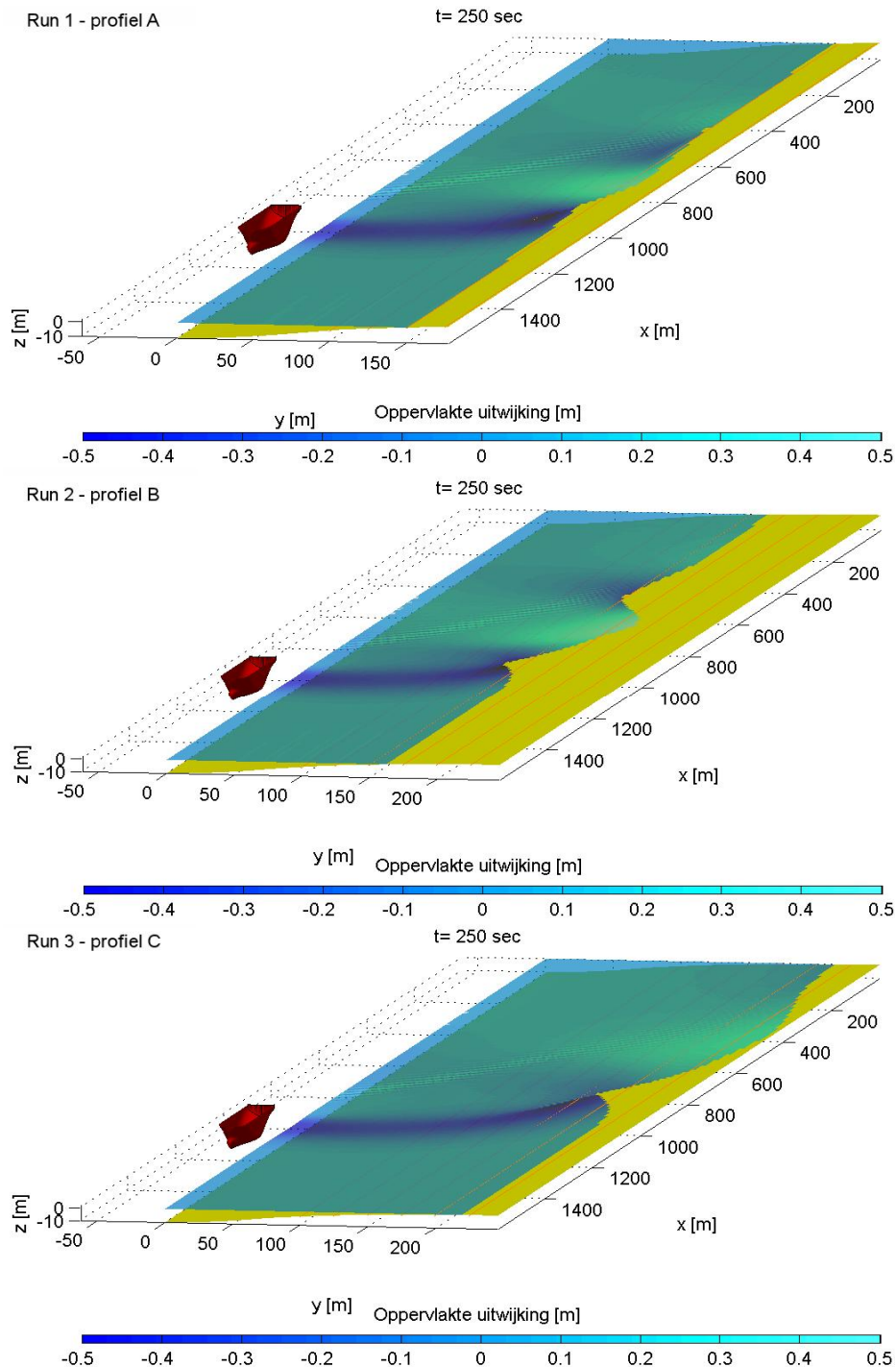


Figuur 5.5.1 Geschematiseerde dwarsprofielen van het Badstrand.

Het beeld van de golfoploop in de simulaties komt overeen met de beschrijvingen van het verschijnsel ter plaatse van de Sardijngeul, zie figuren 5.2 en 5.3. Het water trekt zich terug van het strand, nadat een schip gepasseerd is. In horizontale richting kan de breedte waarover het water zich terugtrekt vrij groot zijn (tientallen meters), terwijl in verticale richting de hoogte van de scheepsgolf nauwelijks zichtbaar is (orde halve meter). Uit de simulaties blijkt dat de afstand tussen het gepasseerde schip en de plek waar de terugloop van het water maximaal is verschilt per bodemprofiel. Voor profiel C is dit ongeveer anderhalve scheepslengte en voor profiel A een halve scheepslengte. Dit is te verklaren uit het feit dat de maximale snelheid waarmee een golf loopt gerelateerd is aan de waterdiepte.

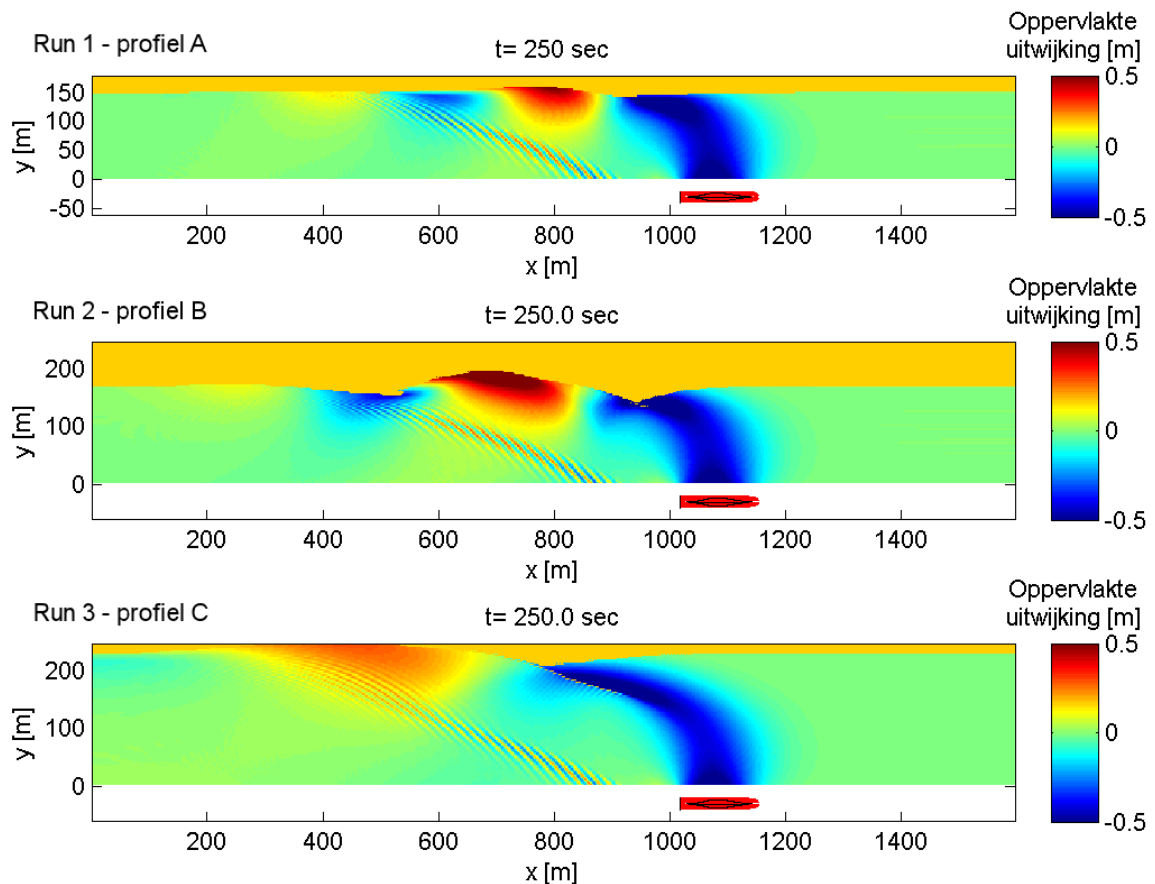
Als het water maximaal van het strand is weggetrokken, wordt de ontstane ruimte weer opgevuld door water dat het strand oploopt. Voor iemand die op het strand staat lijkt deze golf schuin van zee en de zijkant te komen. Het water loopt verder het strand op dan de initiële waterlijn: de berekeningen voor het aangenomen golfsignaal geven bij een steil dwarsprofiel, A, ongeveer 10 m, bij de twee flauwe dwarsprofielen, B en C, ongeveer 25 m.

(De waarden in de werkelijkheid zijn niet bekend, omdat er nog geen duidelijkheid is over het juiste golfsignaal; de veldmetingen zullen hier mee informatie over verschaffen.) Dit kan potentieel overlast veroorzaken voor badgasten die dit niet verwachten. Een flauwer dwarsprofiel van het strand lijkt tot een hogere oploop van de haalgolf te leiden. Dit zou kunnen verklaren dat de hinder groot is bij flauwe strandprofielen en minder bij steile strandprofielen.



De afstand tussen de oranje lijnen is 25 m.

Figuur 5.2 Driedimensionale visualisatie van de golfoploop op het strand met drie verschillen dwarsprofielen.

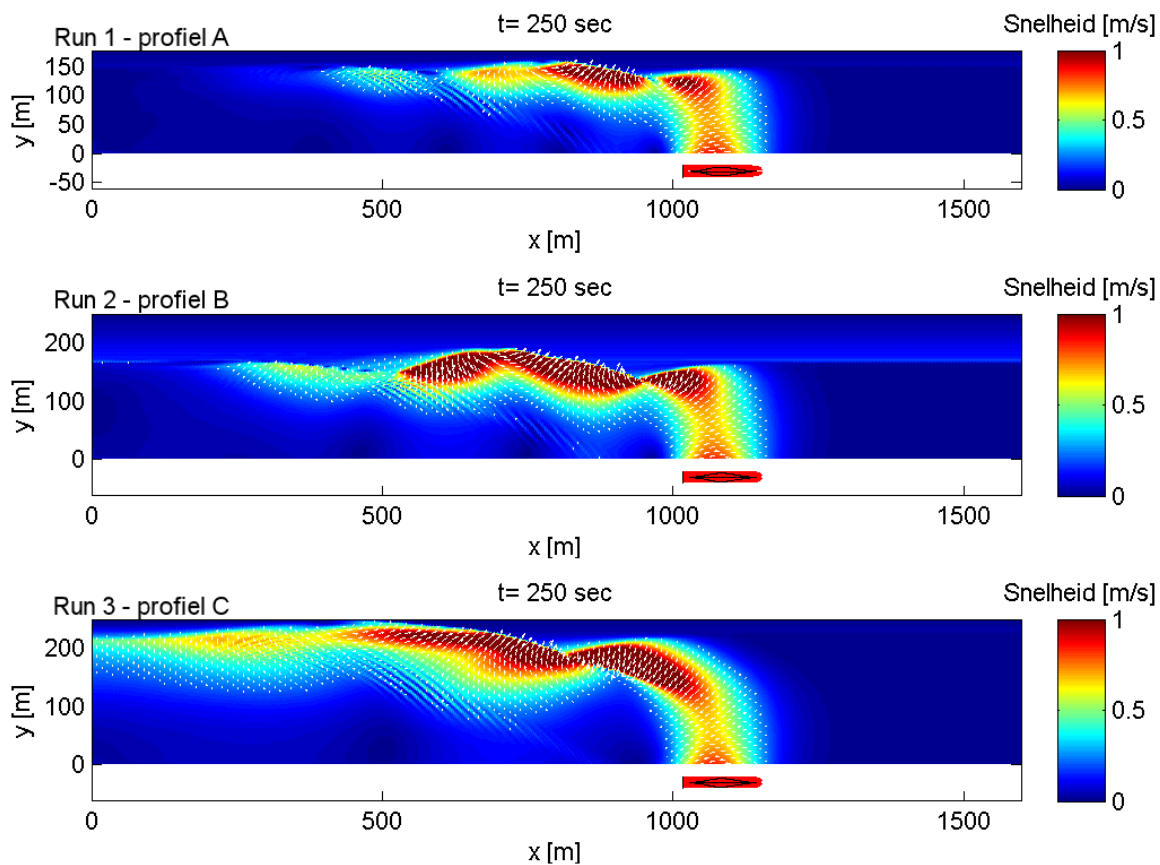


Figuur 5.3 Bovenaanzicht van de oppervlakte-uitwijking voor de drie dwarsprofielen van het Badstrand.

Na de haalgolf volgen nog meer golven. De lengte van die golf neemt sterk toe bij een flauwer talud. De hoogte van die tweede golf lijkt maximaal voor profiel B, het middelste van de drie onderzochte gevallen.

De berekeningen voor het aangenomen golfsignaal geven ook een indruk van de mogelijke stroomsnelheden: het water stroomt met ca. 1 m/s weg van het strand, maar komt in een haalgolf met 1 tot 2 m/s weer het strand opgelopen. De hoogte tussen het diepste punt tot hoogste punt van de haalgolf bedraagt ongeveer 1 m. Deze waarden zouden zeker voor kinderen en ook voor niets vermoedende volwassenen grote hinder kunnen opleveren. De richting waarin de golf het strand op loopt lijkt af te wijken van lokale waarnemingen; de oorzaak daarvan moet nog nader vastgesteld worden. De berekende golfverschijnselen op het strand inclusief de grootte van de stroomsnelheid en de haalgolfhoogte, lijken enigszins op de verschijnselen tijdens de passage van de Oranje op speciale meetdag 21 januari 2011. Door deze visuele overeenkomst is het vertrouwen in de uitkomsten van de Tritonberekeningen gegroeid.

De berekeningen laten zien dat de primaire verstoring van het schip (spiegeldalingskuil) een dominante factor is voor wat betreft de aard en afmetingen van scheepsgolven op het strand. Deze kan versterkt worden door samenvallen met de interferentiepieken met de haalgolf. Dat wordt bepaald door de lengte van het schip en de positie van het schip in de vaargeul. Andere factoren zijn de vorm van het strand en de waterstand. De invloed van de waterstand is in de uitgevoerde berekeningen niet onderzocht.



Figuur 5.4 Opnamen van de stroomsnelheidsvelden voor de drie verschillende dwarsprofielen van het Badstrand.

Passage van een discontinuïteit in de vaarweg. (hoofdstuk 4)

De scheepvaartroute via de Sardijngeul bevat verschillende overgangen van diep naar minder diep en brede naar minder brede vaarweg. Deze al dan niet geleidelijke overgangen worden discontinuïteiten genoemd. De verandering van het vaarwegprofiel heeft tot gevolg dat de omstroming van het schip verandert waardoor translatiegolven worden opgewekt. Dit is een aanvulling op voorgaande beschouwingen van een schip met een constante vaarsnelheid in een prismatische vaarweg.

Het rekenprogramma WAROS [Waterloopkundig Laboratorium, 1992] is ontwikkeld voor situaties waarbij schepen een discontinuïteit in de vaarweg passeren. Het doel van de berekeningen met het programma WAROS was het verkrijgen van inzicht in de volgende effecten:

- De effecten bij het binnenvaren van een vernauwing in de vaargeul.
- De effecten van versnellen of vertragen van het schip.
- De effecten van waterdieptevariatie.
- De effecten van een minder sterke, geleidelijker vernauwing van de vaargeul.
- De effecten van tegenstroming of meestroming in de vaargeul.

Bij deze effecten is speciaal aandacht besteed aan mogelijke toename of afname van de waterspiegeldaling naast het schip.

De belangrijkste effecten bij het binnenvaren van een vernauwing in de vaargeul, bijvoorbeeld als een schip van de Rede van Vlissingen de Sardijngeul invaart, zijn:

- Een afname van de vaarsnelheid van het schip door de toegenomen hydraulische weerstand in de smalle vaargeul.
- Tijdens het passeren van de vernauwing wordt een positieve translatiegolf voor het schip opgewekt. De hoogte van deze translatiegolf ligt tussen 0 en maximaal 0,15 m. Naast en achter het schip loopt een negatieve translatiegolf. Achter het schip heeft deze golf een geringe hoogte.
- In een vernauwing zal de omstroming van het schip in de meeste gevallen flink toenemen, afhankelijk van de mate van vernauwing.
- Als vóór het invaren van een vernauwing eerst extra snelheid wordt opgebouwd (door een toename van het ingestelde motorvermogen) dan wordt de positieve translatiegolf voor het schip aanzienlijk hoger.

De effecten van versnellen of vertragen van het schip.

Tijdens de passage van de smalle Sardijngeul volgt het schip verschillende bochten in de vaarweg. Voor een goede bestuurbaarheid van het schip is het gewenst dat er voldoende druk op het roer staat, dus voldoende schroefvermogen instellen met als gevolg dat de vaarsnelheid gaat toenemen. Het tegenovergestelde is het instellen van een laag schroefvermogen met de kans dat door de geringe druk op het roer het schip in het slechtste geval vrijwel rechtdoor vaart in plaats van zijn bocht te maken. Dat verklaart waarom in sommige situaties de vaarsnelheid tijdens het invaren van de Sardijngeul wordt verhoogd. Uit de berekeningen blijkt dat het versnellen van het schip voor het invaren van een vernauwing een 0 tot 50 % hogere translatiegolf kan veroorzaken dan het versnellen tot een zelfde vaarsnelheid in de vernauwing. Dat kan een interessante maatregel zijn om de hinder door grote scheepsgolven te beperken.

De effecten van waterdieptevariatie

Bij een lage waterstand tijdens eb is in het nauwe deel van de vaarweg de omstroming van het schip sterker (dus ook een grotere waterspiegeldaling naast het schip) en is de hoogte van de positieve translatiegolf groter dan bij een hogere waterstand tijdens vloed.

De vorm van een vernauwing

Een plotselinge vernauwing van de vaarweg leidt tot een hogere translatiegolf dan een geleidelijke vernauwing. Het baggeren van een verruiming van de invaart van de Sardijngeul zal dus een positieve werking hebben op de omstroming van een schip en een matiging van de opgewekte translatiegolven.

De effecten van tegenstroming of meestroming in de vaargeul

Deze situatie treedt op als ebstroom bij dezelfde waterstand wordt vergeleken met een vloedstroom. Bij inzet van hetzelfde motorvermogen veroorzaakt een tegenstroming bij het invaren van een vernauwing een toename van de hoogte van de positieve translatiegolf voor het schip vergeleken met de situatie zonder stroming. De waterspiegeldaling naast het schip verandert bij de inzet van hetzelfde motorvermogen vrijwel niet. Bij meestroming neemt de hoogte van de positieve translatiegolf af.

In werkelijkheid zal vaak een combinatie van de voorgaande effecten optreden. Daarbij kan bedacht worden dat de translatiegolven, die door andere schepen in de Sardijngeul worden opgewekt, de waterspiegeldaling van het beschouwde schip kunnen vergroten of verminderen. De waterspiegeldaling kan daardoor voor een deel een min of meer stochastisch karakter krijgen, naast de besproken deterministische effecten.

5.2 Vertaling van de resultaten naar maatregelen voor het beheer Badstrand

5.2.1 Inleiding

Rijkswaterstaat heeft het plan om in maart 2011 een nieuwe strandsuppletie op het Badstrand te Vlissingen tussen de boeien SG2 en SG4 uit te voeren. Met het oog op die strandsuppletie zijn een richtlijn en aanvullende maatregelen in respectievelijk paragraaf 5.2.5 en paragraaf 5.2.6 geformuleerd. Ter onderbouwing zijn in paragraaf 5.2.4 enkele dwarsprofielen van het Badstrand geanalyseerd. Als achtergrond informatie is het huidige onderhoud van de Sardijngeul en het Badstrand in de paragrafen 5.2.2 en 5.2.3 samengevat. Een aanbeveling voor een betere onderbouwing is in paragraaf 5.2.7 opgenomen.

5.2.2 Het huidige onderhoud van de Sardijngeul

Uit het rapport (van der Werf et al 2011) is de volgende tekst overgenomen:

De Sardijngeul sedimenteert al jarenlang op de drempel tussen het Oostgat en de Sardijngeul (Galgeput) en aan de groene boeienkant nabij de ondiepte Nolleplaat, zie figuur 5.5. Daarom zijn in het verleden vaak onderhoudsbaggerwerkzaamheden uitgevoerd. In de periode 2005 – 2010 is de aanzanding van de vaargeul bij de Nolleplaat toegenomen in vergelijking met de periode 1994 – 2004; voor de locatie Galgeput geldt het tegenovergestelde. Dit is deels de verklaring van de grote onderhoudsbaggerwerken in 2006, 2009 en 2010. Deze vallen mede op omdat in de periode ervoor niet gebaggerd is, terwijl dit vanuit nautisch oogpunt wel nodig was, en omdat in 2010 een groter gebied gebaggerd is dan voor de vaargeul strikt noodzakelijk is.

De belangrijkste oorzaak voor de structurele aanzanding van de Sardijngeul is de natuurlijke morfodynamiek. Enerzijds het scharen van de eb- en vloedstroom bij de Galgeput, en anderzijds de zuidoostelijke migratie van de Nolleplaat. Het is dan ook waarschijnlijk dat dit gedeelte van de vaargeul blijft aanzanden de komende jaren. Ook is het de verwachting dat er af en toe gebaggerd moet worden bij de Galgeput, met name aan de rode boeien kant van de vaargeul. De rode boeien markeren de vaargeul aan de kant van het strand.

Het voorgaande betekent dat de grootte van het dwarsprofiel van de vaargeul in de tijd varieert. Deze variatie heeft direct invloed op de waterspiegeldaling naast een schip dat de Sardijngeul passeert. En daarmee heeft deze variatie van de vaargeul ook invloed op de hinder door grote scheepsgolven op het Badstrand.



Figuur 5.5 De Ligging van de Sardijneul, Galgeput en Nolleplaat rond 1990.

5.2.3 Het huidige onderhoud van het Badstrand

In de periode 2008-2009 zijn nabij het Badstrand in verband met kustversterkingwerkzaamheden uitgevoerd, waarbij het strand tijdelijk grote veranderingen heeft ondergaan, zie luchtfoto van het Badstrand in figuur 5.6. Eind 2009 was dit werk afgerond en is het strand uitgevlakt. De onderhoudstrategie van het Badstrand bestaat uit het regelmatig (gestreefd wordt naar elke 4 jaar) uitvoeren van kustversterkingswerkzaamheden, waaronder strandsuppleties. De gemiddelde diameter (D_{50}) van het gesuppleerde zand is ca. 200 micron.

In het voorjaar wordt het strand jaarlijks wat uitgevlakt richting de waterlijn. In het najaar vinden motorcrosse op het strand plaats. Na afloop van de crosses wordt het strand weer hersteld.

Een en ander betekent dat het huidige onderhoud van het Badstrand een behoorlijke inspanning vergt.

5.2.4 Analyse dwarsprofielen

Uit de lodingen is te zien dat tussen gemiddeld laagwater - 0,5 m en gemiddeld hoogwater, (of tussen de waterstanden -2,31 m+NAP en 2,05 m+NAP te Vliссingen) de helling van het strand geleidelijk flauwer wordt, zie figuren 5.7, 5.8 en 5.9. Gemiddeld laagwater wordt aangeduid met GLW en gemiddeld hoogwater met GHW. Uit de profielen 1603420, 1603440 en 1603458 in 2008 lijkt het dat de meest recente strandsuppletie met een taludhelling van 1:30 tot 1:40 is aangelegd. In alle drie de profielen blijkt dat in 2009 en 2010 de rechte strandhelling uit 2008 zich in meer of mindere mate ontwikkelde in de richting van een typisch S-vormig strandprofiel. Een onderdeel van het S-vormige profiel heeft een flauwe helling van 1:100 tot 1:200 tussen gemiddeld laagwater en gemiddeld hoogwater. In dat deel van het strand neemt de kans op hinder door grote scheepsgolven sterk toe.

Dit is een zeer beknopte analyse van de strandprofielen. Een aanbeveling is een meer uitgebreide analyse uit te voeren.

5.2.5 Richtlijn

Is de helling van een strandsuppletie op het Badstrand flauwer dan ongeveer 1 V : 40 H dan neemt de hinder snel toe. Is die helling steiler dan 1:40 dan neemt de hinder af. Het verdient aanbeveling tussen GLW -0,5 m en GHW het strand bij uitvoering van een strandsuppletie een helling te geven van 1:40 of steiler.

5.2.6 Aanvullende maatregelen

Enigszins geschematiseerd ontwikkelt zich enkele jaren na uitvoering van een strandsuppletie een S-vormig dwarsprofiel. Met de volgende maatregelen kan de hinder door grote scheepsgolven op het Badstrand worden verminderd:

- De ontwikkeling van een S-vormig strandprofiel kan worden vertraagd door een suppletie in dat gebied met een zo grof mogelijke zandfractie uit te voeren. Bij de keuze van het wingebied kan rekening worden gehouden met deze maatregel door een gebied met een relatief grove zandfractie te selecteren.
- Een andere maatregel is het uitvoeren van een extra zandsuppletie tussentijds in dat gebied tussen GLW - 0,5 m en GHW op het strand, zodra de helling van het strand daar de neiging heeft te verflauwen. In de huidige strategie voor strandsuppleties wordt uitgegaan van een suppletie in een periode van vier tot 5 jaar. Extra strandsuppleties vereisen een aanpassing van die strategie.
- Zodra de helling van het strand daar de neiging heeft te verflauwen het strand te herprofilen, zodat in het inter-getijde gebied weer een taludhelling van ongeveer 1:40 kan worden hersteld. Het zand dat hoger op het strand wordt afgezet als onderdeel van het S-profiel kan met een bulldozer worden geherprofileerd. Echter het zand van het deel van het S-profiel dat onder het laagwaterniveau is afgezet, is een verlies en kan niet eenvoudig worden geherprofileerd. Het voorstel is een proef uit te voeren met herprofilering van het Badstrand in de winter gedurende enkele jaren. Rijkswaterstaat kan het voorstel voor zo een proef met de beheerder van het strand bespreken.

De afname van de hinder kan met een criterium voor maximaal aanvaardbare hinder door scheepsgolven op een strand worden vergeleken. Zo een criterium ontbreekt thans. Voor een evaluatie of de mogelijke maatregelen ook kosteneffectief zijn, dat wil zeggen dat de baten groter zijn dan de kosten, is zo een criterium gewenst. Een criterium voor de maximum toelaatbare hinder bestaat uit een combinatie van de golfhoogte op het strand en de stroomsnelheid in de golf waarbij kinderen zich juist staande kunnen houden. De strandwachten weten waarschijnlijk wanneer kinderen zich staande kunnen houden. Kritieke combinaties van stroomsnelheden en golfhoogten kunnen met berekeningen worden onderbouwd. Het verdient aanbeveling een criterium voor de maximaal aanvaardbare hinder vast te stellen.

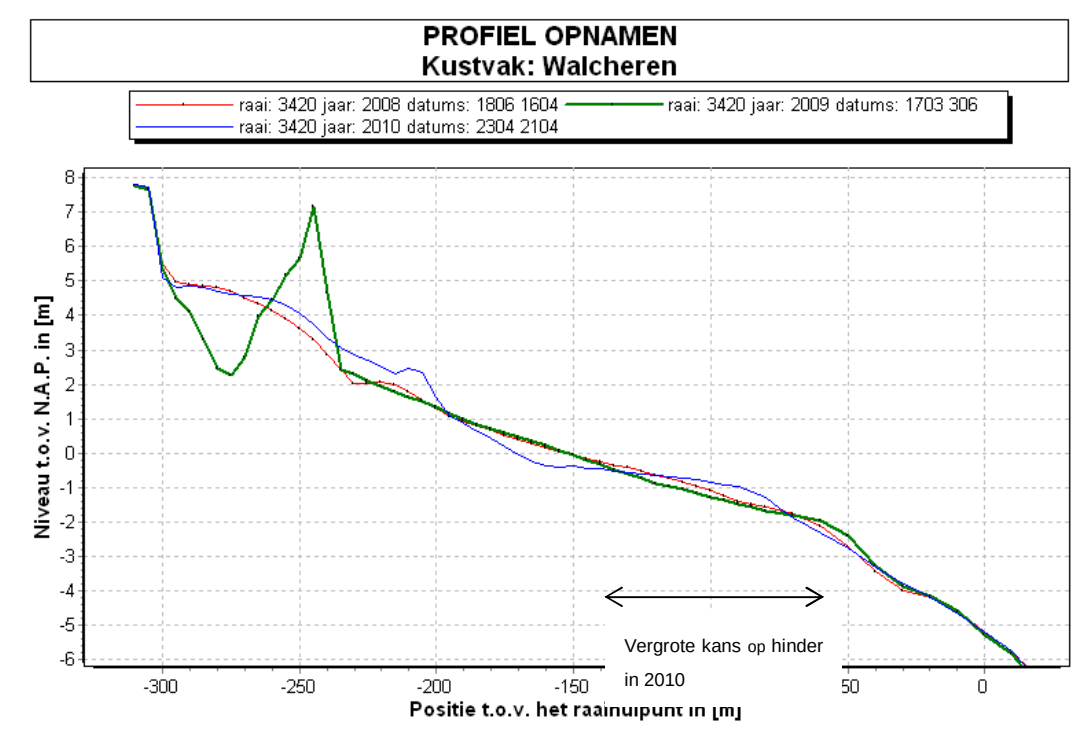
Opgemerkt wordt dat met deze richtlijnen de hinder door scheepsgolven slechts ten delen kan worden voorkomen. Hinder door de grootste scheepsgolven op het strand kan met deze richtlijnen naar verwachting niet worden voorkomen. Daarvoor zijn andere maatregelen gewenst, bijvoorbeeld het beperken van de vaarsnelheden van risicoschepen gedurende een bepaalde getijfase.

5.2.7 Aanbeveling

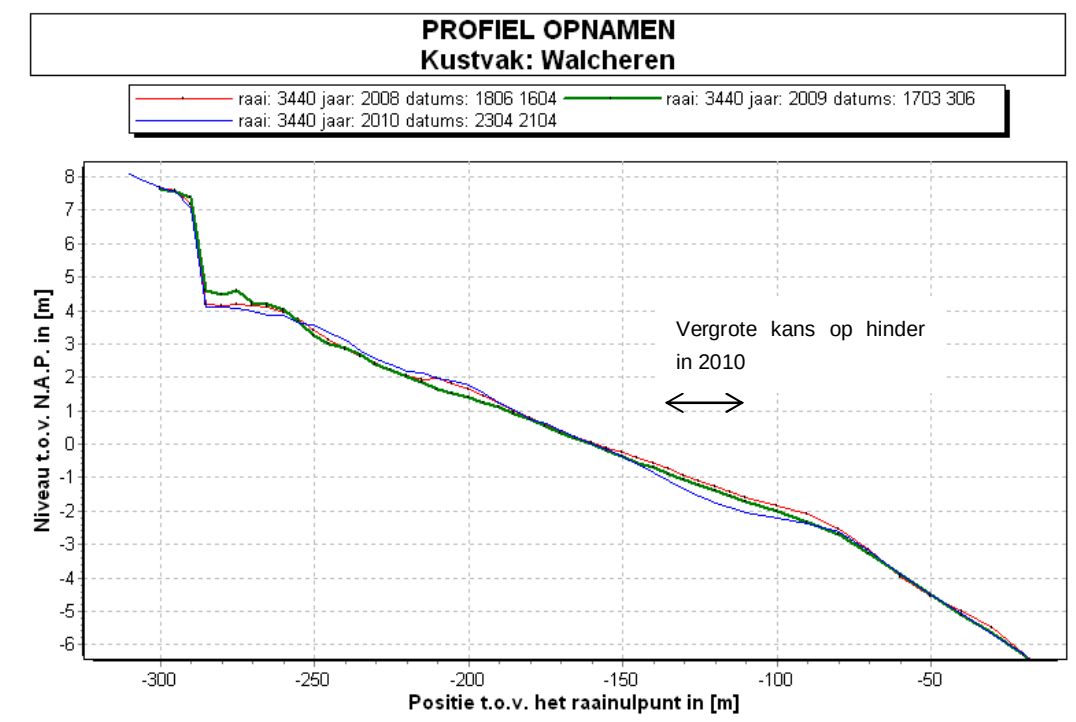
Deze richtlijnen zijn op slechts enkele indicatieve resultaten gebaseerd. Het verdient aanbeveling de onderbouwing van deze richtlijnen te versterken. Waarschijnlijk is het mogelijk met een nadere studie deze richtlijnen te verfijnen en de mate van de reductie van de hinder aan te geven. De bovengrens van gemiddeld hoogwater kan waarschijnlijk wat omlaag. Een nadere studie bestaat uit een analyse van strandprofielen en uit een serie berekeningen van scheepsgolven op een strand met het golfmodel Triton.



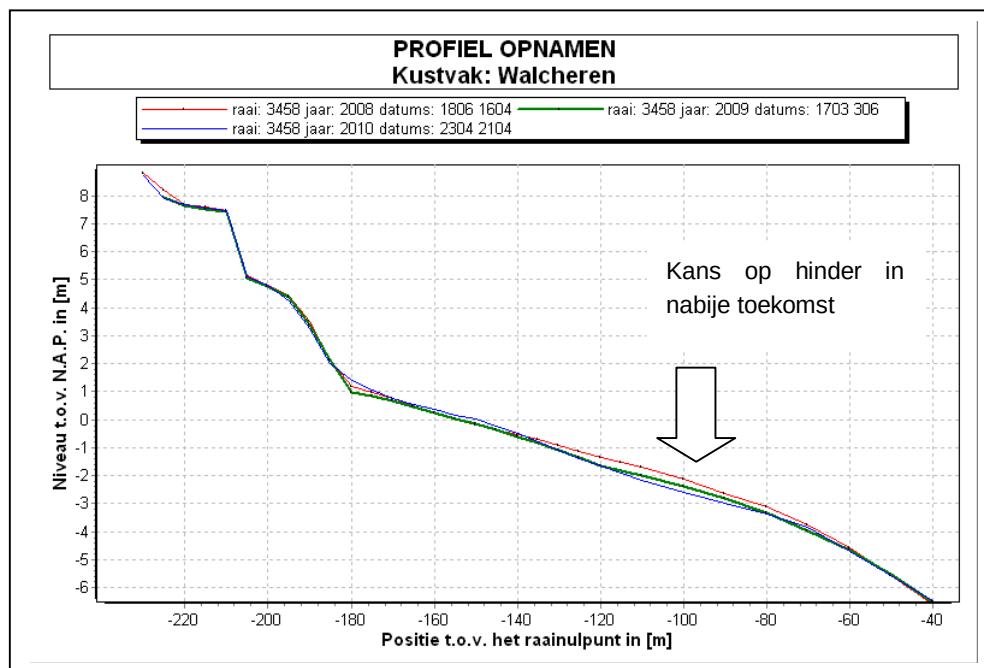
Figuur 5.6 Het Badstrand te Vlissingen met standaard meetraaien.



Figuur 5.7... Dwarsprofielraai 1603420 in 2008, 2009 en 2010.



Figuur 5.8....Dwarsprofiel-raai1603440 in 2008, 2009 en 2010.



Figuur 5.9...Dwarsprofielraai 1603458 in 2008, 2009 en 2010.

5.3 Vertaling van de resultaten naar maatregelen voor het scheepvaartverkeer

De waterspiegeldaling naast een schip al dan niet gecombineerd met translatiegolven blijkt het aandrijvende verschijnsel te zijn voor de hinder door grote scheepsgolven op het strand. Deze hinder zal verminderen als de waterspiegeldaling naast een schip vermindert. De waterspiegeldaling is afhankelijk van de grootte van het ondergedompelde deel van het grootspant van een schip, de vaarsnelheid, versnelling en vertraging van een schip vaarwegdwarsprofiel en de positie van een schip in het vaarwegdwarsprofiel. Dat betekent dat met de volgende generieke maatregelen de waterspiegeldaling kan worden verminderd:

- Een reductie van de vaarsnelheid van een schip

Een reductie van de vaarsnelheid betekent extra vaartijd en dus extra kosten voor de reder.

- Het beperken van de versnelling van een schip.

Het beperken van de versnelling van een schip levert een beperkte reductie van de waterspiegeldaling. Door langzamer te versnellen of later versnellen van een schip neemt de reistijd een klein beetje toe. En dat betekent een bescheiden toename van de kosten voor de reder.

- Het verkleinen van het ondergedompelde deel van het grootspant.

Met deze maatregel wordt de waterspiegeldaling naast een schip gereduceerd, maar het is geen praktische maatregel, omdat het minder afladen van een schip een grote kostenpost voor de reder is.

- Het verruimen van het vaarwegdwarsprofiel

Door het onderhoudsbaggerwerk wordt het vaarwegdwarsprofiel met enige regelmaat verruimd. Door deze verruiming neemt de waterspiegeldaling naast een schip af. Het tijdelijk niet uitvoeren van onderhoudsbaggerwerk kan leiden tot een toename van de hinder door grote scheepsgolven op het strand.

Niet alleen het verruimen, maar ook het aanleggen van geleidelijke overgangen in de grootte van het vaarwegdwarsprofiel reduceert de opgewekte translatiegolven en daarmee de waterspiegeldaling.

Bij hoogwater is het vaarwegdwarsprofiel groter dan bij laag water. Bij laagwater zal de waterspiegeldaling groter zijn, dan bij hoogwater.

- Niet langs de rand van de vaargeul met de rode boeien varen.

Door verder van het strand te varen en niet langs de rand van de vaargeul met de rode boeien te varen wordt de waterspiegeldaling enigszins gereduceerd. Ook het ongunstig samenvallen van de interferentiepieken met de haalgolf op het strand kan daarmee worden voorkomen. Deze maatregel is bij Zoutelande toegepast door de rode boeien zeewaarts te verleggen.

Van deze maatregelen gaat de voorkeur van de opdrachtgever uit naar een richtlijn waarbij schepen verzocht worden hun vaarsnelheid te reduceren. Deze maatregel treft ook schepen die bij sneller varen geen hinder op het strand zouden hebben veroorzaakt. Het is een economisch belang van de reders om snel te varen.

Overwogen is deze generieke maatregel te beperken voor alleen uitgaande schepen, en bij laagwater. Uit de waarnemingen van de strandwachten blijkt echter dat soms ook hinder optreedt bij hoogwater en door inkomende scheepvaart. Deze beperkingen zal de hinder niet in alle gevallen kunnen worden voorkomen.

Dit alles overwegende adviseert Deltares een maatwerk oplossing nader uit te werken om de hinder in alle gevallen te kunnen voorkomen zonder onnodige economische nadelen voor de reders.

Voor een maatwerk oplossing kunnen de volgende twee varianten worden onderscheiden:

Maatwerk per schip

Voor een bepaald schip wordt de waterspiegeldaling bepaald in een serie berekeningen waarin de omstandigheden in de Sardijngeul, de vaarsnelheid en de positie van het schip in de vaargeul en de beladingsgraad van het schip worden gevarieerd. Met een criterium voor de maximaal toelaatbare hinder op het strand kan de maximaal toelaatbare waterspiegeldaling in de verschillende omstandigheden worden bepaald. En daarmee is voor een bepaald schip vrij nauwkeurig bepaald wanneer het hinder zal veroorzaken en wanneer er geen hinder of acceptabele hinder zal optreden. Deze serie berekeningen kunnen door een combinatie van het MARIN en Deltares worden uitgevoerd.

Maatwerk voor alle schepen

Het voorstel is om de golven die door een passerend schip worden opgewekt te meten met een meetinstrument of meerdere meetinstrumenten voor het begin van het problematische deel van de Sardijngeul vanaf het havenhoofd in Vlissingen vooruitgaande schepen en in het Oostgat voor inkomende schepen. In het geval dat een te grote waterspiegeldaling wordt gemeten, wordt dit direct aan het betreffende schip en het Schelde Coördinatie Centrum doorgegeven. Het betreffende schip kan dan direct zijn vaarsnelheid verminderen. Met een criterium voor de maximaal toelaatbare hinder op het strand kan de maximaal toelaatbare waterspiegeldaling in de verschillende omstandigheden in een analyse van alle gemeten waterspiegeldalingen in een periode van bijvoorbeeld een jaar worden bepaald.

Ter verificatie worden gedurende een bepaalde periode (bijvoorbeeld een jaar) de golven ter plaatse van de probleemgebieden eveneens gemeten, ter hoogte van de vaarwegmarkering dan wel het strand.

De voordelen van maatwerk oplossingen zijn:

- Alleen van schepen, die echt te grote golven opwekken, wordt de vaarsnelheid beperkt.
- Met het registreren van de golven is een directe, 100 % controle uitgevoerd en na verloop van tijd ook een 100 % garantie voor de strandgasten dat die golven niet meer optreden.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De in de bureaustudie toegepaste rekenmodellen bevestigen de waarnemingen in de Sardijngemaal als volgt:

- De karakteristiek van de met het golfmodel TRITON gesimuleerde golfoploop komt overeen met wat is waargenomen op het strand. Het water trekt zich terug van het strand *nadat* een schip is gepasseerd, waarna er een golf het strand oploopt. De golfoploop als gevolg van het passerende schip komt hoger dan de initiële waterlijn.
- Het WAROS-waterbewegingsmodel berekent de verschijnselen zoals de toename van de extra weerstand die een schip ondervindt bij het passeren van een vernauwing in de vaarweg. De loodsen kennen dit verschijnsel in de Sardijngemaal en noemen het een plunjereffect. Daarnaast berekent het model het optreden van translatiegolven bij het passeren van een vernauwing. (Zo'n translatiegolf is door de eerste auteur wel eens waargenomen op het strand bij Dishoek.)

Deze waarnemingen geven het vertrouwen dat de verschijnselen berekend met deze modellen kwalitatief correct zijn.

De belangrijkste conclusies van deze bureaustudie zijn:

- 1 De primaire scheepsgolf van het schip (spiegeldalingskuil) is een dominante factor wat betreft de grote scheepsgolven op het strand. Deze kan versterkt worden door samenvallen van de interferentiepieken met de haalgolf.
- 2 Er kunnen ook translatiegolven worden verwacht. Maximum translatiegolfhoogten in het nauwe vaargeulgedeelte liggen daarbij tussen 0,1 m en 0,2 m, terwijl de maximale waterspiegelaflinking naast het schip, de primaire golf, ligt tussen 0,3 m en 0,5 m bij typische vaarsnelheden van 2,5 tot 5 m/s. Een waterspiegelaflingskuil kan toe- of afnemen door samenvallen van een translatiegolf met de waterspiegelaflingskuil.
- 3 De helling van het strand is een belangrijke beïnvloedbare parameter die de waterspiegelafling en de golfoploop op het strand mede bepaalt, zowel in dwars- als in de langsrichting. De helling van het strand in de waterlijn wordt daarbij mede bepaald door de waterstand; het zelfde profiel kan dus tot verschillend 'oploop-gedrag' leiden afhankelijk van het getij.
- 4 De waterstand is waarschijnlijk ook een belangrijke parameter die de waterspiegelafling en de golfoploop op het strand mede bepaalt. Deze parameter is echter niet beïnvloedbaar. In de uitgevoerde berekeningen is deze parameter niet gevarieerd.

De doelstelling van de bureaustudie (zie paragraaf 1.3) is als volgt per onderdeel gerealiseerd:

- Vergroten van het inzicht in de relevantie van de verschillende effecten genoemd in de voorgaande paragrafen voor de situatie van het Badstrand langs de Sardijngemaal te Vlissingen. Met de conclusies 1, 2 en 3 is deze doelstelling grotendeels gerealiseerd.

- Een verkenning van de beschikbare kennis om de verschillende effecten in de situatie van de Sardijngeul te kunnen kwantificeren. De relevante rekenmodellen zijn geïnterpreteerd. De voordelen en nadelen zijn beknopt beschreven.
- Er is niet één rekenmodel beschikbaar dat alle aspecten van de opgetreden verschijnselen volledig simuleert. De beschikbare kennis uit in het verleden uitgevoerde veldmetingen en fysisch modelonderzoek is slechts zijdelings in deze bureaustudie behandeld.
- Beperkingen in de beschikbare kennis en inzicht kunnen door het verrichten van veldmetingen geheel of gedeeltelijk worden aangevuld. De resultaten van de bureaustudie kunnen worden gebruikt bij de voorbereiding van veldmetingen bij het Badstrand te Vlissingen in de periode januari tot maart 2011. De bureaustudie ondersteunt de noodzaak van veldmetingen. Conclusie 1, dat de primaire scheepsgolf de dominante factor is, heeft bijgedragen aan de keuze van de meetinstrumenten voor de veldmetingen.
- Verschillende generieke maatregelen om de hinder te beperken zijn overwogen. De voorkeur gaat uit naar het verzoeken van de schepen hun vaarsnelheid te beperken. Het nadeel is dat deze maatregel leidt tot extra vaartijd van schepen die geen hinder zouden hebben veroorzaakt.
- Twee typen maatwerk oplossingen zijn voor nadere uitwerking aanbevolen. Met maatwerk oplossingen wordt de hinder beperkt door schepen langzamer te laten varen diw daadwerkelijk hinder kunnen veroorzaken.

6.2 Aanbevelingen

Aanvullende berekeningen

Het inzicht in de optredende verschijnselen op een strand tijdens de passage van een schip kan worden vergroot met aanvullende berekeningen met het TRITON-model, nadat de resultaten van de veldmetingen beschikbaar zijn. Een in het kader van de veldmetingen gemeten waterstandsverloop tijdens de passage van een schip kan invoer zijn voor een nieuwe TRITON-berekening. De invloed van de waterstand, de positie van het schip in de vaargeul, de vaarsnelheid en de geometrie van het strand met strandhoofden kunnen met het model worden onderzocht.

Afhankelijk van de resultaten van de veldmetingen kan worden overwogen of aanvullende berekeningen met het WAROS-model gewenst zijn. Verwacht wordt dat uit de veldmetingen blijkt dat tussen het bolwerk De Leugenaar en het Nollehoofd bij bepaalde waterstanden gedeeltelijk gereflecteerde translatiegolven heen en weer lopen. Deze golven zijn mogelijk door een uitvarend zeeschip opgewekt of door een voorganger in de Sardijngeul.

Morfologische analyse Sardijngeul en Badstrand

De verkenning laat zien dat de helling van het Badstrand waarschijnlijk invloed heeft op de hinder door grote scheepsgolven. Het verdient aanbeveling de geschiedenis van de helling van de dwarsprofielen nader te onderzoeken. Van belang is het inzicht in het dynamisch morfologische gedrag van het Badstrand te betrekken in de analyse van het optreden van hinder door grote scheepsgolven. Dit kan worden gecombineerd met een analyse van de morfologische veranderingen in de Sardijngeul in de loop van de tijd. Die veranderingen kunnen invloed hebben op de waterspiegeldaling en het vaargedrag van schepen.

Natuurlijke morfologische veranderingen kunnen ook in de toekomst invloed uitoefenen op de hinder door grote scheepsgolven.

De resultaten van deze morfologische analyse gecombineerd met het verkregen inzicht in de optredende verschijnselen kunnen leiden tot aanbevelingen voor het uitvoeren van geulwandsuppleties en strandsuppleties tussen Vlissingen en Westkapelle.

Vaststellen van een criterium

Om te komen tot maatregelen zal het noodzakelijk zijn om een criterium te formuleren voor de maximaal van aanvaardbare hinder door scheepsgolven op een strand. Deltares kan hierbij behulpzaam zijn. Het uiteindelijke criterium dient in overleg met alle betrokken organisaties te worden vastgesteld.

Aanbeveling voor modelontwikkeling

Om alle hydrodynamische verschijnselen ten gevolge van een schip, dat vaart in een vaarweg met variabele geometrische en bathymetrische eigenschappen, voldoende nauwkeurig te kunnen berekenen is een nieuwe toepassing voor numerieke rekenmodellen en verdere ontwikkeling van bestaande modellen gewenst. Het verdient dan ook aanbeveling deze behoefte aan een verdere ontwikkeling van functionaliteit binnen de bestaande numerieke modellen bij de Waterdienst aan te melden. De Waterdienst coördineert en heeft de regie over het onderzoeksprogramma.

7 Referenties

- Blaauw, H.G., en F.C.M. van der Knaap, Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen, Voorspelling waterspiegeldaling, inzinking en vertrimming van schepen op beperkt water M1115 deel Va, Waterloopkundig laboratorium, Delft, januari 1985.
- Borsboom, M., N. Doorn, J. Groeneweg and M. van Gent, 2000, A Boussinesq-type wave model that conserves both mass and momentum, *Proc. 27th ICCE Conference*, Sydney, 148-161.
- Borsboom, M., N. Doorn, J. Groeneweg and M. van Gent, 2001, Nearshore wave simulations with a Boussinesq-type model including breaking, *Proc. Coastal Dynamics 2001 Conference*, Lund, 759-768.
- Borsboom, M., 2005, Wave run-up in TRITON, WL | *Delft Hydraulics*, Delft, H4387.31.
- Constantine, T., On the movement of ships in restricted waterways, *Journal of Fluid Mechanics*, no 9, Oct. 1960, pp. 247 – 256.
- Doorn, N., Groeneweg, J., Weiler, O., Borsboom, M., 2002, Numerical modelling of ship-induced waves, *Proc. 28th Conference on Coastal Eng.*, Cardiff, 689 - 701.
- Groeneweg, J., Verkenning golfbelasting op kribben, rapport Q3042/H3968, WL Delft Hydraulics, Delft, oktober 2001.
- Huisman, B., R. Schroevers en M. van der Wal, Erosie van het slik van bath, onderzoek naar de drijvende kracht achter erosie, 120633, december 2010.
- Kaa, E.-J. van der, Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen Schelde–Rijnverbinding, Aanval van haalgolf op taludbekleding van stortsteen en zetsteen, M1115 deel IA en IB, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, december 1974.
- Knaap, F.C.M. van der, Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen, Aanval van haalgolf op taludbekleding van stortsteen en zetsteen, deel Xc, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, oktober 1986.
- McNown, J.S., Sinkage and resistance for ships in channels, *Journal of the waterways, harbours and coastal engineering division*, aug. 1976, pp. 287 – 298.
- Nortek Oceanografische Instrumenten en Diensten, Golf- en stroomsnelheidsmetingen op het slik van Bath, juni en juli 2010, Badhoevedorp.
- Schierck G.J., Introduction to bed, bank and shore protection, Delft University Press, Delft, 2001.
- Schijf, J.B., Jansen, P.P., 1953, 18th International Navigation Congress (Rome), Section I, Communication 1, p.p. 175-197.
- Schijf, J.B., PIANC XVII, Lisbon, 1949, SI-2, pp 61 – 78.

- Thiele, A., Schiffswiderstand auf Kanalen, Centralblatt der Bauverwaltung, no. 56, 1901, pp. 345 – 347.
- Tothill, J.T., Ships in restricted channels – a correlation of model tests, field measurements and theory, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Febr. 1966, pp. 11 – 128.
- Vrijer, A., Berekeningen van translatiegolven opgewekt door schepen in vaarwegen, R1350 deel II, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, april 1984
- Verheij, H.J., H. Raven, N. Doorn, M. Borsboom en J. Lambeek, Numerical modelling of ship induced watermotions, report Q2576/ Q2800, WL Delft Hydraulics, Delft, december 2001.
- Wal, M. van der, Grote scheepsgolf over strand van Zoutelande op 10 juni 2006, 1002099, Deltares, Delft, 2009.
- Werf, J.J. van der, A. Giardino en G. Santinelli, Aanzanding en onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de Sardijngeul, 1204421, Deltares, Delft, 2011
- WL Delft Hydraulics, WAROS. Berekenen van scheeps- en waterbewegingen bij passage van sluizen. Rapport Q99, deel IX, handleiding computerprogramma, november 1992.

A Bijlage A Gezamenlijke Bekendmaking 03-2010 van de Gemeenschappelijke Nautische Autoriteit

Gemeenschappelijke Nautische Autoriteit

Oostgat - Sardijngeul

Gezamenlijke Bekendmaking: nr. 03-2010

Aanpassen van de snelheid;

De Rijkshavenmeester Westerschelde publiceert hierbij de in bijlage gevoegde Gezamenlijke Bekendmaking:

Nr. 03-2010 : Aanpassen van de snelheid in het Oostgat /de Sardijngeul.

Bass 089/08 komt hierbij te vervallen.

Deze bekendmaking zal in de Staatscourant worden geplaatst.

Vlissingen, 14 juli 2010

De Rijkshavenmeester Westerschelde,
namens deze,
Het assistent hoofd van het Waterdistrict Westerschelde

H.J.M. Adan



Gezamenlijke Bekendmaking

03-2010

Aanpassen van de snelheid in het Oostgat/de Sardijngeul

Gemeenschappelijke Nautische Autoriteit

De Nederlandse Rijkshavenmeester Westerschelde en de Vlaamse Administrateur-generaal van het Agentschap voor Maritieme Dienstverlening en Kust maken het volgende bekend:

Geconstateerd is dat zeeschepen, die met een te hoge snelheid langs de stranden gelegen aan het Oostgat/de Sardijngeul varen, een zodanige golfslag en/of oeverzuiging kunnen veroorzaken dat dit gevaar voor de op de stranden aanwezige recreanten tot gevolg heeft.

Overwegende dat:

in de praktijk is gebleken dat artikel 3 van het Scheepvaartreglement Westerschelde 1990, waarin het vereiste van "Goed Zeemanschap" is opgenomen, bij de doorvaart van het Oostgat/de Sardijngeul onvoldoende wordt nageleefd;
in aanvulling op dit artikel het "Goed Zeemanschap" verbijzondering behoeft voor wat betreft de vaart door dit traject, de zogenaamde noord-uit en noord-in route langs de Walcherse kust; dit onverlet laat dat het ook in andere delen van het beheersgebied van de Gemeenschappelijke Nautische Autoriteit noodzakelijk kan zijn om overeenkomstig het "Goed Zeemanschap" de vaarsnelheid aan te passen aan de plaatselijke omstandigheden,

wordt met deze bekendmaking het volgende vastgesteld:

als onderdeel van het vereiste van "Goed Zeemanschap" dient de scheepvaart zijn snelheid in het Oostgat/de Sardijngeul zodanig aan te passen dat geen gevaarlijke golfslag en/of oeverzuiging optreedt, als gevolg waarvan op de stranden recreanten te water kunnen geraken dan wel door de golven in nood kunnen geraken;
het niet naleven van deze verplichting levert een strafbaar feit op ingevolge artikel 56 van het Scheepvaartreglement Westerschelde 1990;
in voorkomende gevallen kan door de verkeersleiding van het Schelde Coördinatiecentrum een aanwijzing worden gegeven; het niet opvolgen van de aanwijzing is eveneens strafbaar ingevolge hetzelfde artikel.

Gemeenschappelijk Nautisch Beheer Scheldegebied
Gemeenschappelijke Nautische Autoriteit
Commandoweg 50
4381 BH Vlissingen
Nederland
www.vts-scheldt.net

Gemeenschappelijke Nautische Autoriteit



Met het uitgeven van deze Gezamenlijke Bekendmaking van de Gemeenschappelijke Nautische Autoriteit komt de Bekendmaking aan de Scheepvaart Scheldemonden (BASS) 089/08 te vervallen.

Deze Gezamenlijke Bekendmaking wordt gepubliceerd in de Nederlandse Staatscourant en het Belgisch Staatsblad.

Vlissingen, 13 juli 2010

De Rijkshavenmeester Westerschelde, De Administrateur-generaal van het Agentschap voor
Maritieme Dienstverlening en Kust,

Mr. R.J. van der Kluit

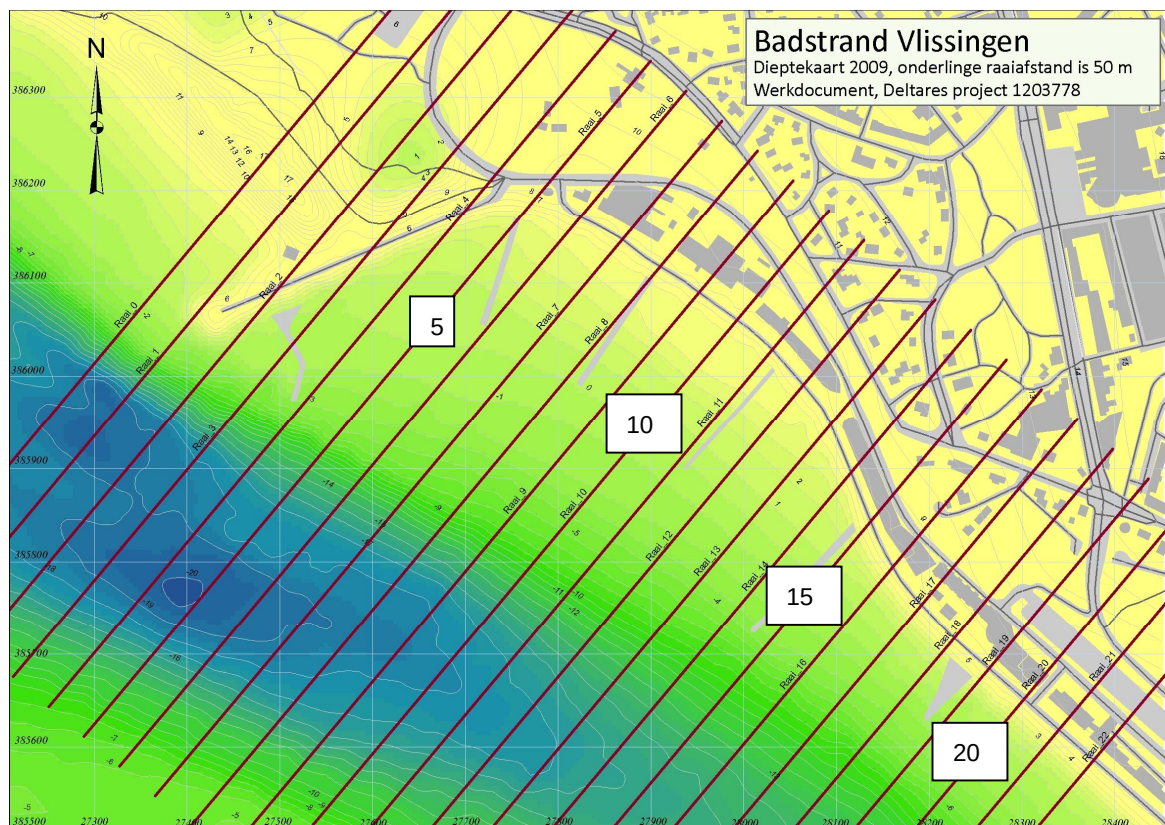
Kapt. J. D'Havé

B Bodemligging Badstrand

In deze bijlage worden enkele dwarsraaien van het Badstrand en de Sardijngeul gepresenteerd.

De hoogteligging en het overzicht van de dwarsraaien in figuur A1 is samengesteld op basis van een topografische kaart Top10nl, die door de DID beschikbaar is gesteld, en de lodingen 2009 uit het bestand Badstrand_Vlissingen_lodingen-Laser2009.pts. De hoogteligging is bepaald door interpolatie op een raster van 5 * 5 m. Het bestand bevat gegevens over de hoogteligging tot aan de boulevard.

De dwarsprofielen in de figuren A2 tot en met A7 hebben een lengte van 945 m en de richting is evenwijdig aan de zogenaamde Jarkusraaien, die een richting hebben van 40 graden ten opzichte van het Noorden. De onderlinge afstand is 50 m. In de figuren met dwarsprofielen zijn ook profielen Vooroever opgenomen uit het bestand 1843p1002_RD NAP_2X2.pts met maximale waarden tot -5,5 m + NAP.

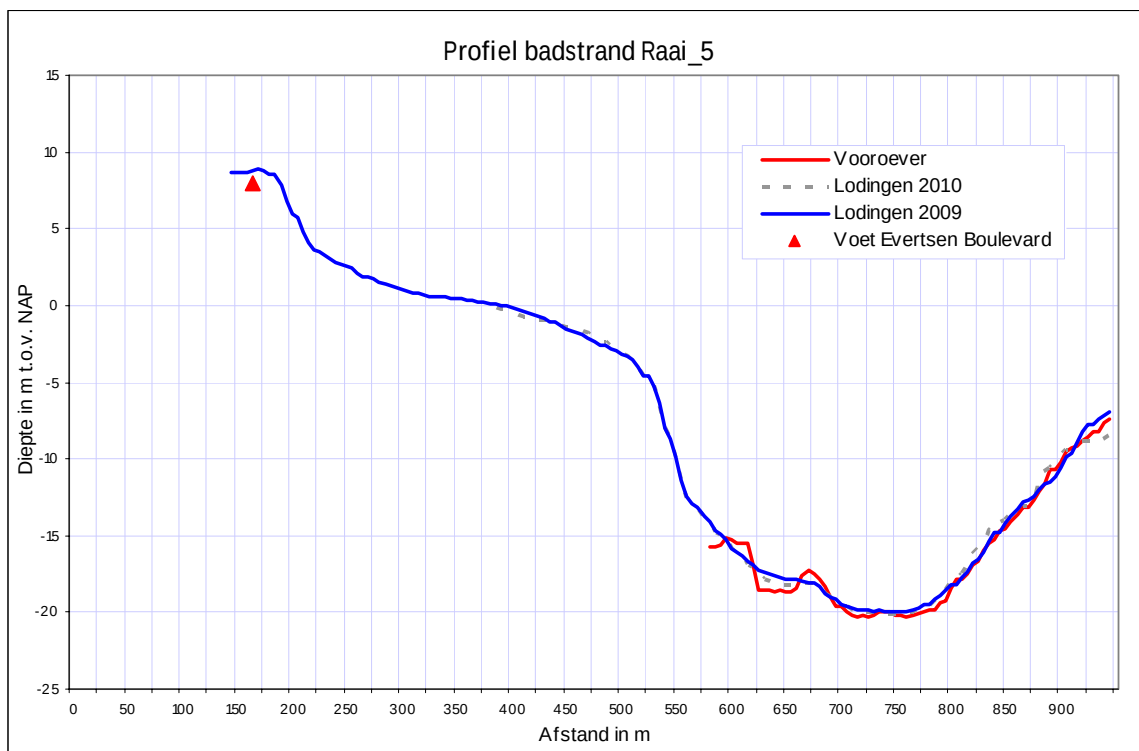


Figuur A1 Hoogteligging met overzicht ligging dwarsprofielen op Badstrand en Sardijngeul, Vlissingen.

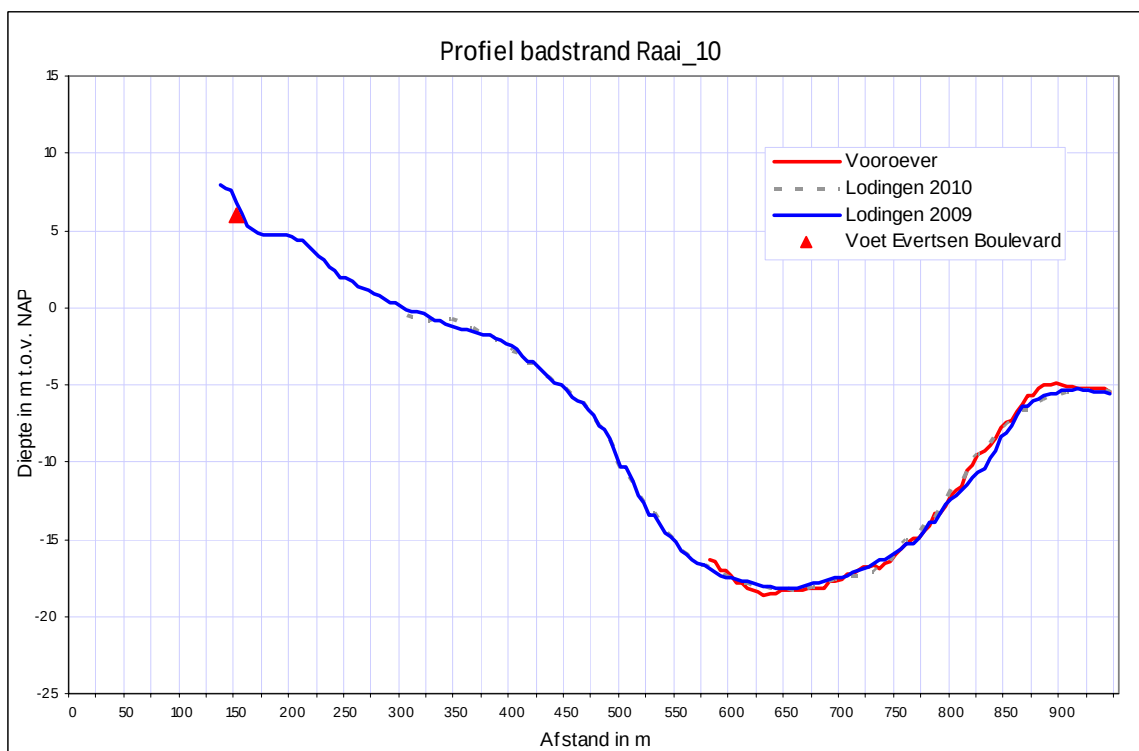
Het verschil tussen loding 2009 en loding vooroever is waarschijnlijk door baggerwerkzaamheden ontstaan.

In het kader van de voorbereiding van de veldmetingen in de periode januari tot maart 2011 is gepland dat in het gebied van de raaien 10 tot en met 12 meetinstrumenten zullen worden geplaatst. Dat is de locatie waar een strandgast in juli 2010 een video-opname heeft gemaakt van een grote scheepsgolf over het strand.

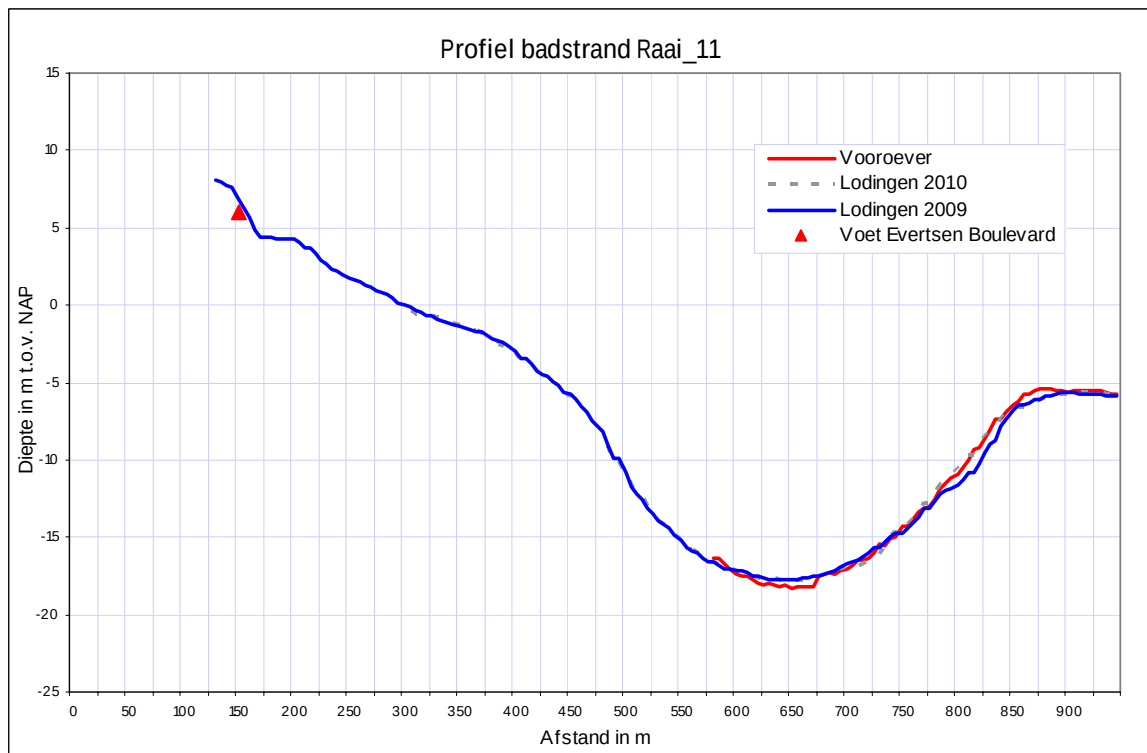
Deze video-opname staat op YouTube <http://www.youtube.com/watch?v=9-H9Jn3SY6A>. Daarom zijn die raaien in deze bijlage opgenomen (Figuren A3 tot en met A5).



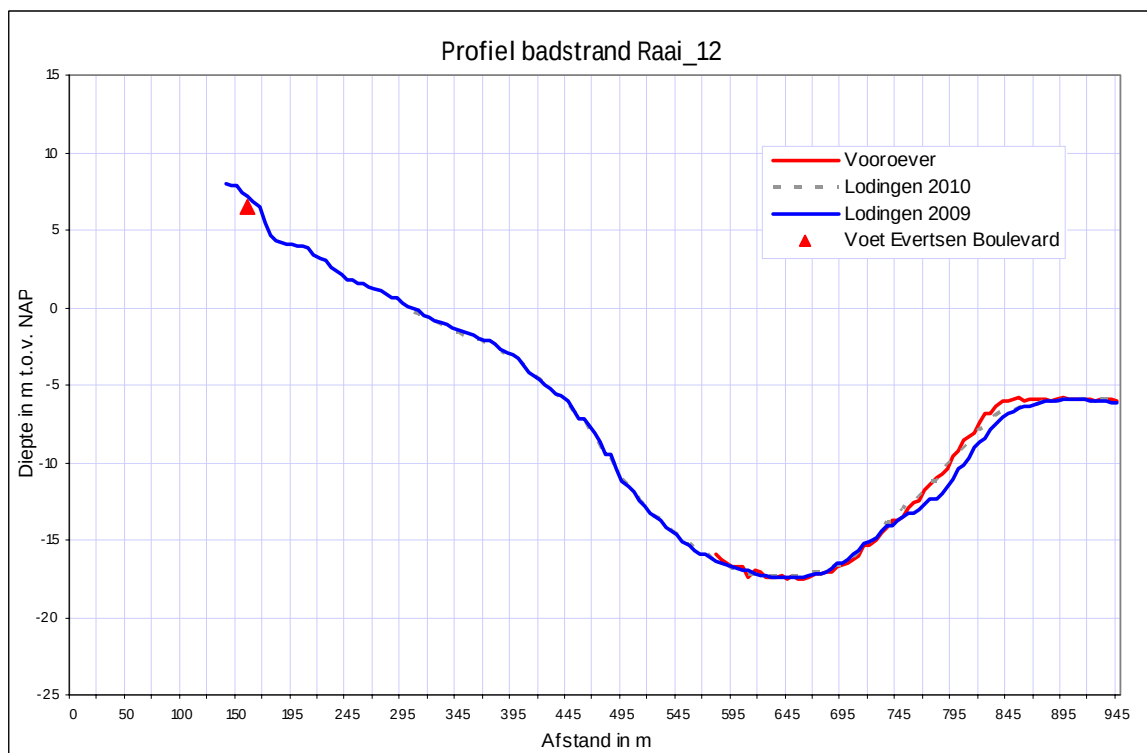
Figuur A2 Dwarsprofiel Badstrand raai 5 loding 2009



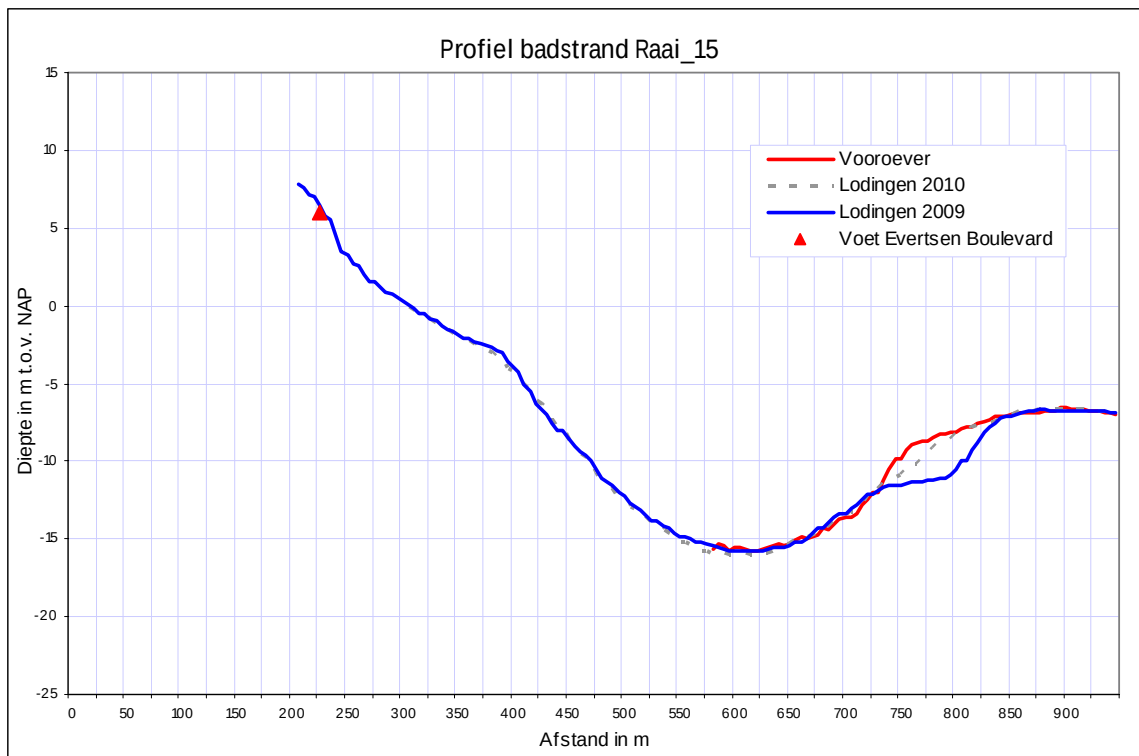
Figuur A3 Dwarsprofiel Badstrand raai 10 loding 2009.



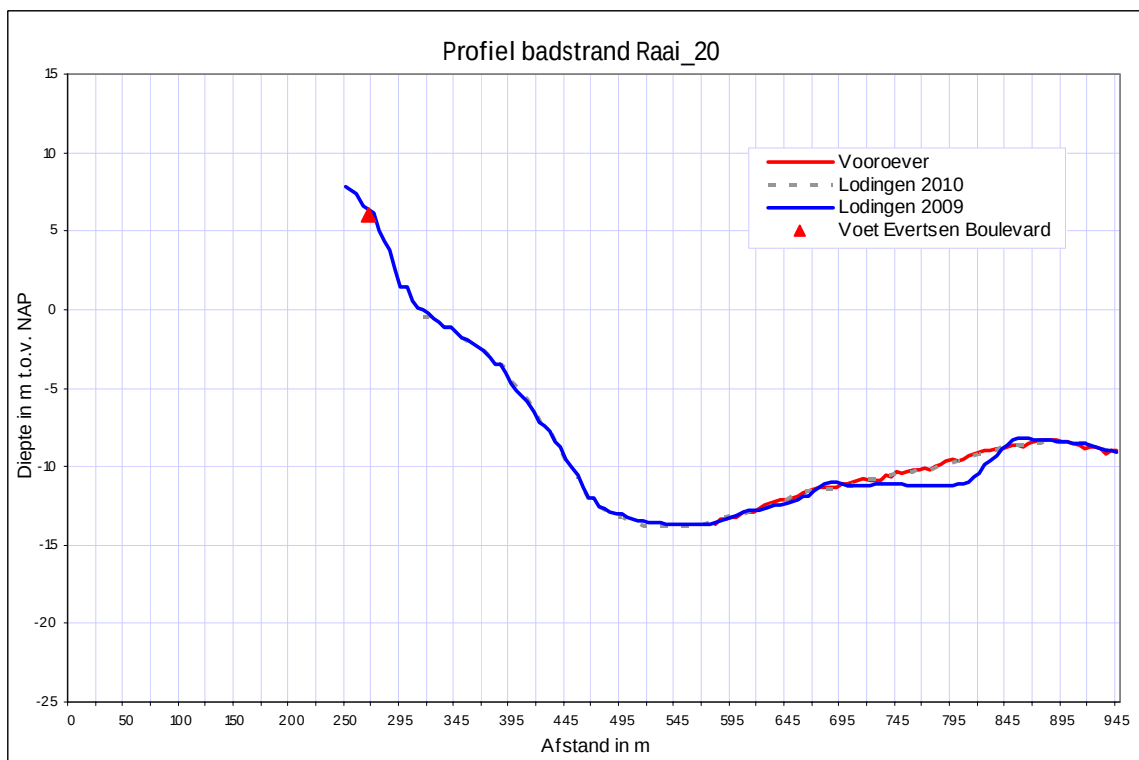
Figuur A4 Dwarsprofiel Badstrand raai 11 loding 2009.



Figuur A5 Dwarsprofiel Badstrand raai 12 loding 2009.



Figuur A6 Dwarsprofiel Badstrand raai 15 loding 2009.



Figuur A7 Dwarsprofiel Badstrand raai 20 loding 2009.

C Informatie over methode Schijf

C.1 Inleiding

De volgende beschrijving van een 1-dimensionale berekeningsmethode van de waterspiegeldaling en retourstroomsnelheid, die door een schip in een vaarweg worden opgewekt, is uit het rapport van Blaauw en van der Knaap [Blaauw et al, 1985 en van de Kaa, 1974] overgenomen. De stroming rondom een schip in een vaarweg met een prismatische dwarsdoorsnede kan met een gemiddelde waterspiegeldaling en een gemiddelde retourstroomsnelheid in een 1-dimensionale berekeningsmethode worden gekarakteriseerd, indien de verhouding tussen het natte oppervlak van het vaarwegdwarsprofiel en het ondergedompelde deel van het grootspant van het schip kleiner is dan 20.

SYMBOLEN

A_c	oppervlak natte kanaaldoorsnede	m^2
A_m	ondergedompelde grootspantoppervlak	m^2
A_w	oppervlak natte kanaaldoorsnede ter plaatse van A_m	m^2
$A(x)$	oppervlak van een scheepsdoorsnede	m^2
b	kanaalbreedte op de waterspiegel	m
b_b	bodembreedte van het kanaal	m
B	scheepsbreedte	m
c_B	blockkoëfficiënt van schip	-
c_p	prismatische koëfficiënt	-
c_s	inzinkingskoëfficiënt	-
c_w	koëfficiënt voor horizontale scheepsdoorsnede	-
c_τ	vertimmingskoëfficiënt	-
F_h	Froudegetal ($= \frac{v}{\sqrt{gh}}$)	-
g	versnelling van de zwaartekracht	$m \ s^{-2}$
h	waterdiepte	m
h_f	opstuwung voor de boeg	m
Δh	waterspiegeldaling	m
i_p	zwaartepuntsafstand van onderwaterschip vanaf het midden in verhouding tot scheepslengte	-
i_w	zwaartepuntsafstand van horizontale scheepsdoorsnede op de waterlijn in verhouding tot scheepslengte	-
k_w	traagheidstraal van horizontale scheepsdoorsnede op de waterlijn	-
L_{pp}	scheepslengte tussen loodlijnen	m
m	helling van het talud	-
R_x	Reynoldsgetal	-
S	inzinking	m
S_b	inzinking van boeg	m
S_s	inzinking van hek	m
T	diepgang van het schip	m
u_r	retourstroomsnelheid	$m \ s^{-1}$
v_s	scheepsnelheid	$m \ s^{-1}$
x	afstand ten opzichte van boeg	m
∇	ondergedompeld scheepsvolume	m^3

C.2 Theorie

2.2 Voorspelling van waterspiegeldaling

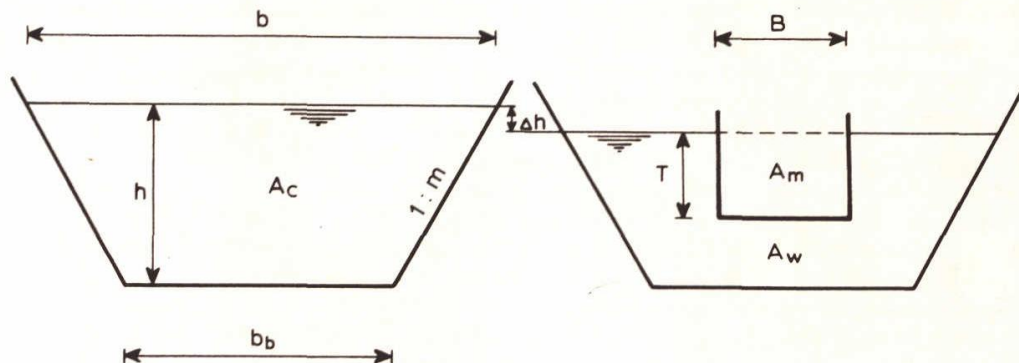
In deze groep worden methoden onderscheiden, die uitgaan van:

1. behoud van energie
2. behoud van impuls.

2.2.1 Behoud van energie

Schijf [13], Constantine [5], Tothill [17] en McNown [12] hebben methoden ontwikkeld om de waterspiegeldaling in smalle kanalen te voorspellen op basis van de aanpak volgens Thiele [16]. Deze aanpak is samengesteld uit een één-dimensionale beschouwing van behoud van energie (vergelijking van Bernoulli) en de continuïteits-vergelijking. Het verschil tussen de geanalyseerde methodes ligt in de schematisatie van de kanaaldoorsnede.

Schijf [13] en Constantine [5] gebruikten een rechthoekige dwarsdoorsnede, Tothill [17] een trapeziumvormige dwarsdoorsnede, terwijl McNown [12] een "machtsprofiel" dwarsdoorsnede gebruikte. Echter in de praktijk is gebleken dat de resultaten van McNown overeenkomen met die van Tothill indien de helling van het talud op de waterlijn in beide methoden hetzelfde is. Om deze reden en vanwege het feit dat een rechthoekige dwarsdoorsnede beschouwd kan worden als een limiet geval van de trapezoidale dwarsdoorsnede, zal de energiemethode worden toegelicht aan de hand van de methode van Tothill [17].



Uitgaande van een scheepssnelheid (V_s) en een retourstroomsnelheid (u_r) luidt de continuïteitsvergelijking:

$$A_c v_s = A_w (v_s + u_r) \quad (1)$$

Volgens Bernoulli geldt:

$$\frac{1}{2} \rho v_s^2 + \rho g h = \frac{1}{2} \rho (v_s + u_r)^2 + \rho g (h - \Delta h) \quad (2)$$

Substitutie van (1) in (2) levert:

$$\Delta h = \frac{v_s^2}{2g} \left\{ \left(\frac{A_c}{A_w} \right)^2 - 1 \right\} \quad (3)$$

Hierin kunnen A_w en A_c respectievelijk geschreven worden als:

$$A_w = b_b (h - \Delta h) + m (h - \Delta h)^2 - A_m \quad (4)$$

$$A_c = b_b h + m h^2 \quad (5)$$

De waterspiegeldaling (Δh) en de retourstroomsnelheid (u_r) kunnen iteratief worden berekend.

De afvoer ter weerszijde van het schip (retourstroom) bereikt een maximale waarde als het water over gaat van stromen in "schieten". De bijbehorende scheepssnelheid wordt de grenssnelheid volgens Schijf genoemd.

Deze snelheid kan worden berekend door de vergelijkingen (3) en (4) naar Δh te differentiëren. Er volgt dan een uitdrukking van de volgende vorm welke de gewenste maximale waarden oplevert indien de differentiaal gelijk aan nul wordt gesteld.

$$2 A_c^2 \left(\frac{d A_w}{d(\Delta h)} \right)_{krit} \cdot \frac{\Delta h_{krit}}{A_{w,krit}} + A_c^2 - A_{w,krit} = 0 \quad (6)$$

Hierin is:

$$\left(\frac{d A_w}{d(\Delta h)} \right)_{krit} = -b_b - 2m(h - \Delta h_{krit}) \quad (7)$$

en

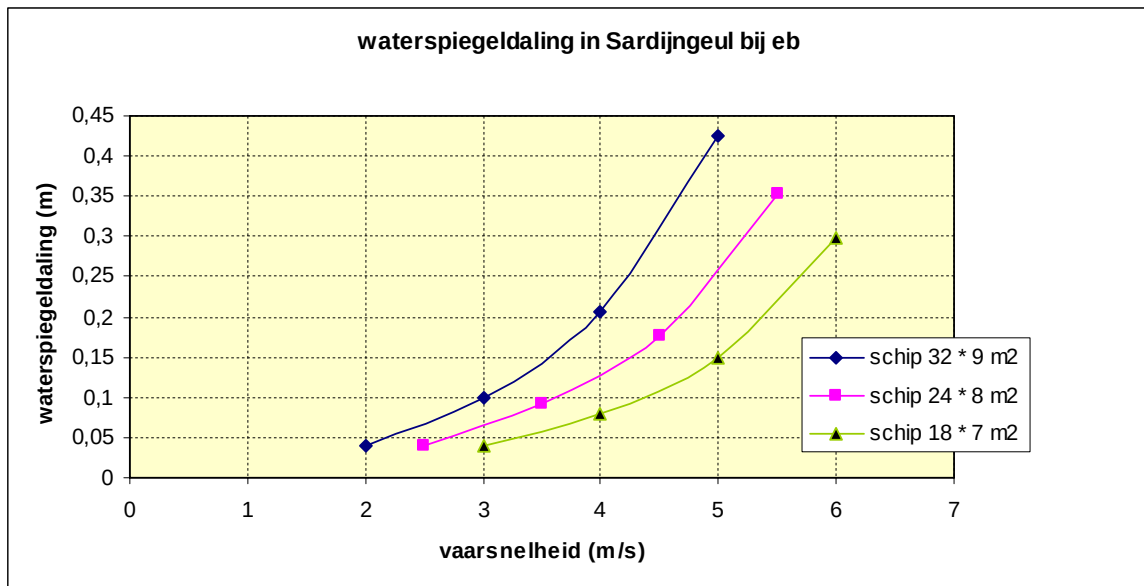
$$A_{w,krit} = b_b(h - \Delta h_{krit}) + m(h - \Delta h_{krit})^2 - A_m \quad (8)$$

Door Δh_{krit} in vergelijking (3) te substitueren volgt de kritieke snelheid (v_{krit}).

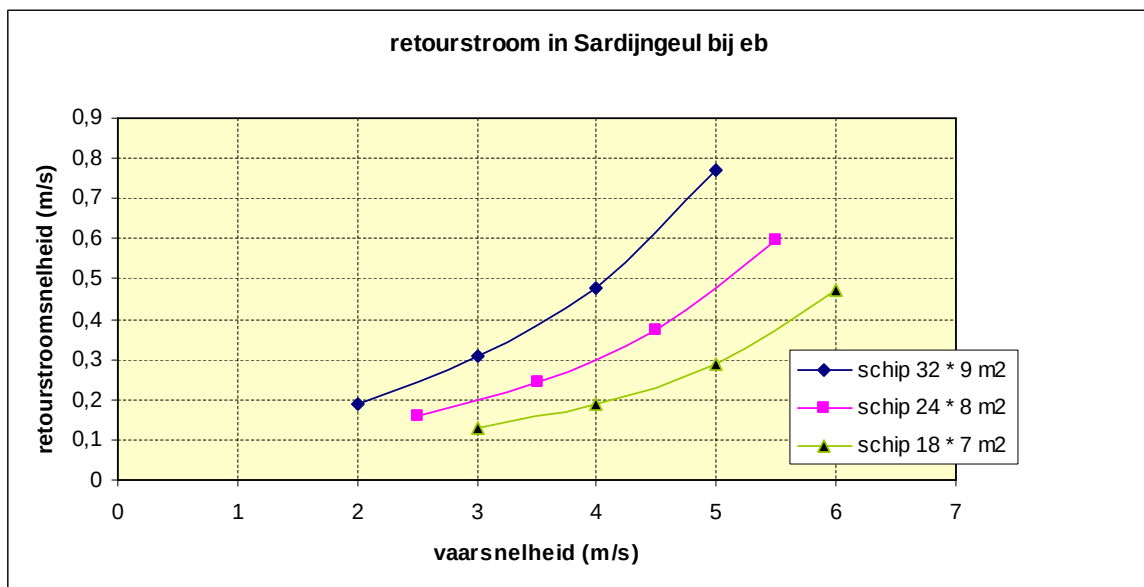
C.3 Toepassing van de methode

De energiemethode volgens Schijf met $\alpha = 1$ berekent de waterspiegeldaling voor een grote variatie in vaarwegbreedten ($2 < b/B_s < 20$) ongeveer 10 % kleiner dan de gemeten waterspiegeldaling. De afwijkingen worden geringer als de b/B_s verhouding afneemt. Opgemerkt wordt dat dit resultaat beïnvloed is door de wijze waarop de waterspiegeldaling is gedefinieerd en hoe de waterspiegeldaling is gemeten. De methoden volgens McNown, TothII, Constantine en Thiele leveren vergelijkbare resultaten, ook voor zeeschepen, als de methode Schijf (Blaauw en van der Knaap, 1985).

De basis voor het effect van de positie van een schip in de vaargeul is de waterbeweging rondom een schip dat in het midden van een vaargeul vaart. De retourstroomsnelheid en waterspiegeldaling in de Sardijngeul voor een schip dat in het midden van de vaargeul vaart is als functie van de vaarsnelheid in de figuren B1 en B2 gepresenteerd. De retourstroomsnelheid en de waterspiegeldaling zijn gemiddelde waarden in een vlak van boeg tot hek en van zijkant schip tot oever.

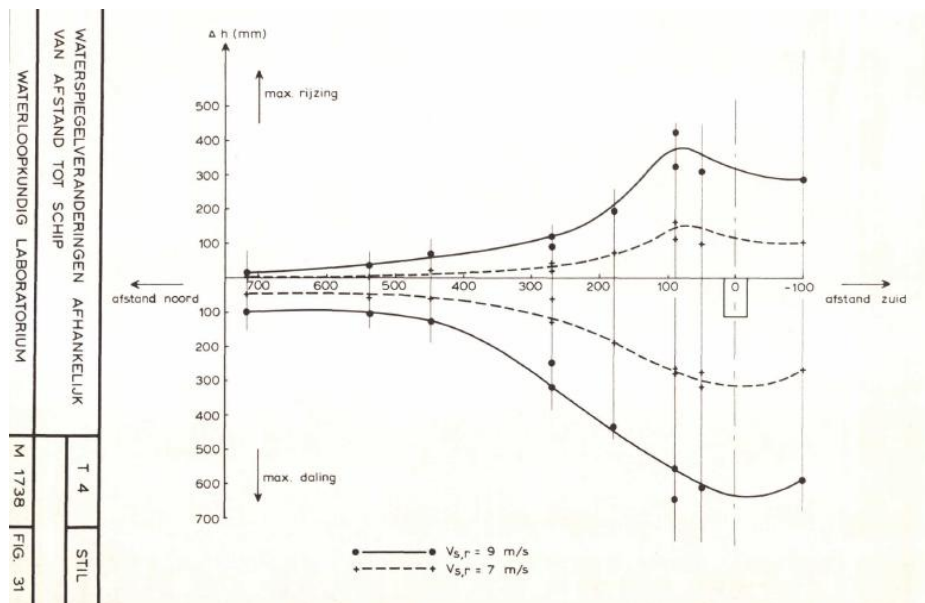


Figuur B1 Berekende gemiddelde waterspiegeldaling als functie van de vaarsnelheid voor drie scheepstypen.



Figuur B2 Berekende gemiddelde retourstroomsnelheid als functie van de vaarsnelheid voor drie scheepstypen.

Op breed vaarwater is de afname van de waterspiegeldaling van een maximum waarde aan de zijkant van het schip tot een kleine waarde nabij de oever niet te verwaarlozen. Een voorbeeld is de in een fysisch schaalmodel gemeten waterspiegeldaling in figuur B3. Het onderzoek betrof het onderzoek naar de Westerschelde tunnel (W.A. de Vries, 1992).



Figuur B3 Voorbeeld van het verloop van de waterspiegeldaling op breed vaarwater.

C.4 Referenties

Constantine, T., On the movement of ships in restricted waterways, Journal of Fluid Mechanics, no 9, Oct. 1960, pp. 247 – 256.

McNown, J.S., Sinkage and resistance for ships in channels, Journal of the waterways, harbours and coastal engineering division, aug. 1976, pp. 287 – 298.

Schijf, J.B., PIANC XVII, Lisbon, 1949, SI-2, pp 61 – 78.

Schijf, J.B., Jansen, P.P., 1953, 18th International Navigation Congress (Rome), Section I, Communication 1, p.p. 175-197.

Thiele, A., Schiffswiderstand auf Kanalen, Centralblatt der Bauverwaltung, no. 56, 1901, pp. 345 – 347.

Tothill, J.T., Ships in restricted channels – a correlation of model tests, field measurements and theory, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Febr. 1966, pp. 11 – 128.

Blaauw, H.G., en F.C.M. van der Knaap, Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen, Voorspelling waterspiegeldaling, inzinking en vertrimming van schepen op beperkt water M1115 deel Va, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, januari 1985.

Vries, W.A. de, Invloed van scheepvaart op tunnelelementen in de sleuf en in het bouwdok Westerschelde oeververbinding, M1738 deel 1 en deel 2, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, oktober 1981.