

Effect verdieping Nieuwe Waterweg op vaargeulonderhoud

Verkenning

dr. Y. Huismans
dr.ir. C.F. van der Mark
dr.ir. J.J. van der Werf
dr.ir. T. van Kessel

1208667-000

Titel

Effect verdieping Nieuwe Waterweg op vaargeulonderhoud

Opdrachtgever

Havenbedrijf Rotterdam

Project

1208667-000

Pagina's

62

Trefwoorden

verdieping, onderhoud, morfologie, zand, slib

Samenvatting

Deze studie is een verkenning van het effect van een verdieping van de Nieuwe Waterweg tussen de monding en de Beneluxtunnel naar -17 m NAP op het vaargeulonderhoud. Hiertoe is een gegevensanalyse uitgevoerd van de bodemontwikkeling en het baggeronderhoud in de Nieuwe Waterweg, zijn hydrodynamische berekeningen uitgevoerd voor de huidige en verdiepte situatie met het 3D Zeedeltamodel en zijn de resultaten van deze berekeningen geanalyseerd met betrekking tot invloed op het getij (direct resultaat uit de berekeningen) en de te verwachten invloed op het zand- en slibtransport (indirect op basis van interpretatie van de berekeningen). Tenslotte zijn de resultaten besproken en geduid in een deskundigenworkshop met zeer ervaren morfologen.

Het resultaat van deze verkennende studie is dat op basis van de beschikbare gegevens en uitgevoerde berekeningen aannemelijk is dat de verdieping er geen sterke invloed heeft op het vaargeulonderhoud. Er wordt aanbevolen om dit resultaat met sedimenttransport-berekeningen in Delft3D verder te onderbouwen; hiervoor wordt in het rapport een aanpak geschetst. Ook is een aantal risico's geïdentificeerd dat niet direct samenhangt met vaargeulonderhoud, maar wel met overig vaargeulbeheer zoals bodem- en oeverstabiliteit, zowel ter plaatse van als stroomopwaarts van de verdieping. Deze risico's dienen nader te worden onderzocht.

Referenties

opdracht d.d. 28 juli 2013

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	aug. 2013	dr. Y. Huismans		ir. C. Kuijper		drs. F.M.J. Hoozemans	
		dr.ir. C.F. van der Mark					
		dr.ir. J.J. van der Werf					
		dr.ir. T. van Kessel					

Status

definitief

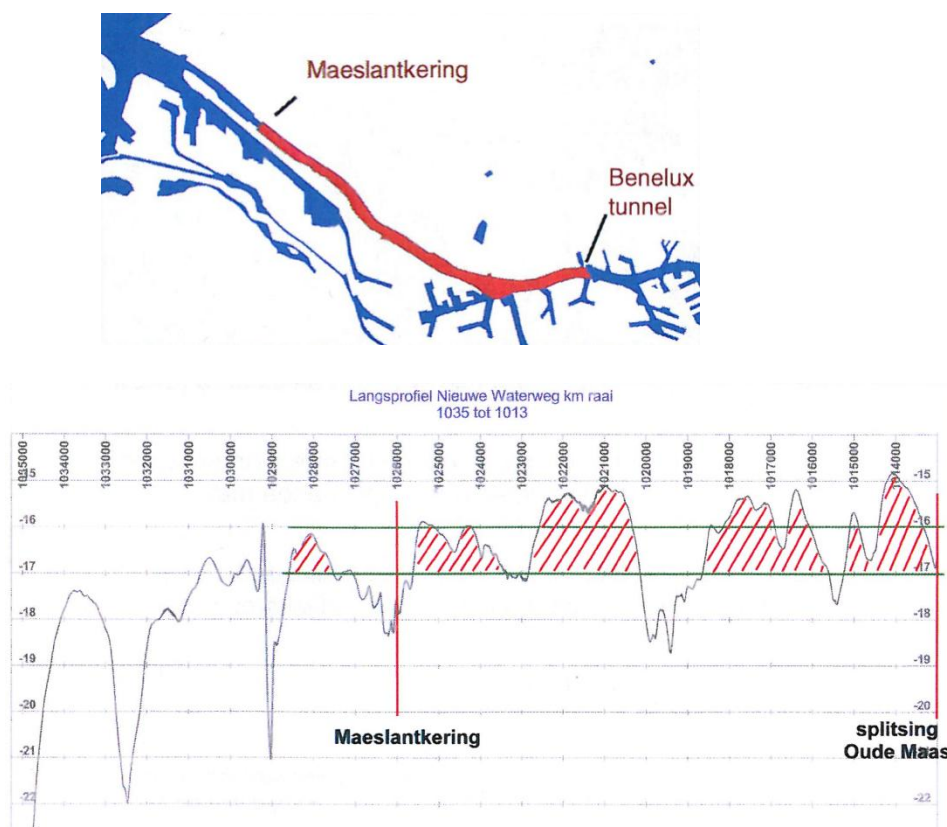
Inhoud

1 Inleiding	1
2 Analyse van literatuur en gegevens	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Morfologische ontwikkeling	3
2.3 Baggerwerkzaamheden	8
2.3.1 Rivierduinen	11
2.3.2 Sedimentsamenstelling	12
2.4 Effecten op baggerwerk na verdieping	13
3 Berekeningen met het 3D-Zeedeltamodel	17
4 Effect op getij	21
4.1 Algemeen	21
4.2 Doorstroomoppervlakte	21
4.3 Waterstanden	23
4.4 Getijdebieten en -volumes	27
4.5 Relatie doorstroomoppervlakte - getijvolume	31
4.6 Samenvatting van effecten op het getij	35
5 Effect op zandtransport	37
5.1 Inleiding	37
5.2 Snelheden	37
5.3 Sedimenttransporten	40
5.4 Discussie en conclusies	44
6 Effect op slibtransport	47
6.1 Effect op saliniteit en bodemschuifspanning	47
6.2 Uitwisseling met de Botlekhaven	50
6.3 Effect verdieping op de slibdynamiek Nieuwe Waterweg	53
7 Inventarisatie vervolgactiviteiten	55
8 Conclusies en aanbevelingen	59

1 Inleiding

HbR heeft Deltares verzocht om een inschatting te maken van de toename van het vaargeulonderhoud ten gevolge van een verdieping van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas tussen de monding en de Beneluxtunnel van -15 tot -17 m NAP (zie Figuur 1.1). Het huidige onderhoud in het met rood aangegeven gebied (zie Figuur 1.1) bedraagt circa 0,5 miljoen m³ per jaar. Voor de aanleg van de verdieping moet circa 5 miljoen m³ sediment worden verwijderd.

De toename van het onderhoud kan zich uiten in de afzetting van zand, silt en slib. Naar verwachting is in de Nieuwe Waterweg zelf de afzetting van (fijn) zand ($d_{50} > 64 \mu\text{m}$) dominant en in de Botlekhaven silt en lutum ($d_{50} < 64 \mu\text{m}$). Het mengsel van silt en lutum (voornamelijk klei) staat beter bekend als 'slib'. De dominante afzettingen elders zijn afhankelijk van de lokale dynamiek, met slibrijke afzettingen in laagdynamische gebieden (zoals havenbekkens) en zandrijke afzettingen in hoogdynamische gebieden. Analyse van meerdere sedimentfracties is daarom noodzakelijk.



Figuur 1.1: Boven- en langsaanzicht van voorgestelde verdieping tot -17 m NAP. Het rood gearceerde te verwijderen volume bedraagt circa 5 miljoen m³.

De doelstelling van deze studie is het bepalen van de toename van het vaargeulonderhoud ten gevolge van een verdieping van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas tussen de monding en de Beneluxtunnel van -15 tot -17 m NAP. Het gaat hierbij in de 1e fase voornamelijk om de toename in de verdiepte vaargeul zelf, die in beheer is bij Rijkswaterstaat. De eveneens te verdiepen toegangsgeul naar de Botlekhaven en de havenbekkens zelf zijn in beheer bij HbR. Bepaling van de extra aanslibbing hierin is ook relevant, maar minder urgent. Mogelijke effecten elders komen in de 1e fase slechts beperkt aan bod op basis van deskundigenbeoordeling. Nadere analyse kan in een vervolgfase (na 1 september) plaatsvinden.

Deze rapportage kent de volgende onderdelen:

Hoofdstuk 2 omvat een gegevensanalyse van de ontwikkeling van de bodemligging en het vaargeulonderhoud in de Nieuwe Waterweg. Deze analyse draagt bij aan het systeembegrip en biedt daarmee waardevolle informatie voor een deskundigenoordeel. Bovendien kan uit deze analyse mogelijk een verband worden opgesteld tussen vaargeuldiepte en onderhoudsbehoefte. Dit geeft de mogelijkheid om in een later stadium de modelresultaten te toetsen.

Hoofdstuk 3 presenteert de resultaten van hydrodynamische berekeningen met het 3D Zeedelta-model zowel met als zonder verdieping. Op basis van een analyse van de veranderingen in parameters als stroomsnelheid, bodemschuifspanning, getij-asymmetrie, saliniteitsverdeling is reeds een eerste oordeel mogelijk van het effect op het vaargeulonderhoud.

Hoofdstuk 4 gaat over de berekeningen van het zandtransport die zijn uitgevoerd op basis van de hydrodynamische berekeningen. Hieruit volgt een eerste inschatting van het effect van de verdieping op het vaargeulonderhoud.

Hoofdstuk 5 gaat over de inschatting op het effect van de verdieping op het slibtransport. Het gedrag van slib wijkt wezenlijk af van dat van zand, vandaar dat dit om een andere aanpak vraagt.

Hoofdstuk 6 bespreekt mogelijke vervolgstappen om de effectbepaling uit te breiden en onzekerheden te verkleinen.

Hoofdstuk 7 geeft tenslotte een opsomming van de belangrijkste conclusies en aanbevelingen van deze studie.

Deze studie is uitgevoerd door de op het titelblad vermelde auteurs. Hiernaast is in de beginfase van de studie enkele keren overlegd met dr. ir C.J. Sloff en prof. dr. ir. J.C. Winterwerp over de aanpak van de studie. Bovendien zijn de resultaten intern getoetst door middel van een deskundigenworkshop op 27 augustus 2013 waarbij (naast de auteurs) dr. ir. E. Mosselman en prof. dr. ir. Z.B. Wang aanwezig waren.

2 Analyse van literatuur en gegevens

2.1 Inleiding

Onder invloed van de stroming door zowel rivierafvoer vanuit het oosten als door de getijdebeweging vanaf zee beweegt zand en slib over de bodem. Zand en slib sedimenteert vervolgens op plaatsen waar de stroming luw is, waardoor de morfologie van de bodem verandert. Dit hoofdstuk beschrijft de morfologische ontwikkeling van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas, en de gevolgen die dit heeft voor het vaargeulonderhoud. Hierbij is gebruik gemaakt van bestaande rapporten en beschikbare gegevens. Vervolgens wordt een doorkijk gemaakt naar wat er zou gebeuren wanneer de bodem wordt verdiept.

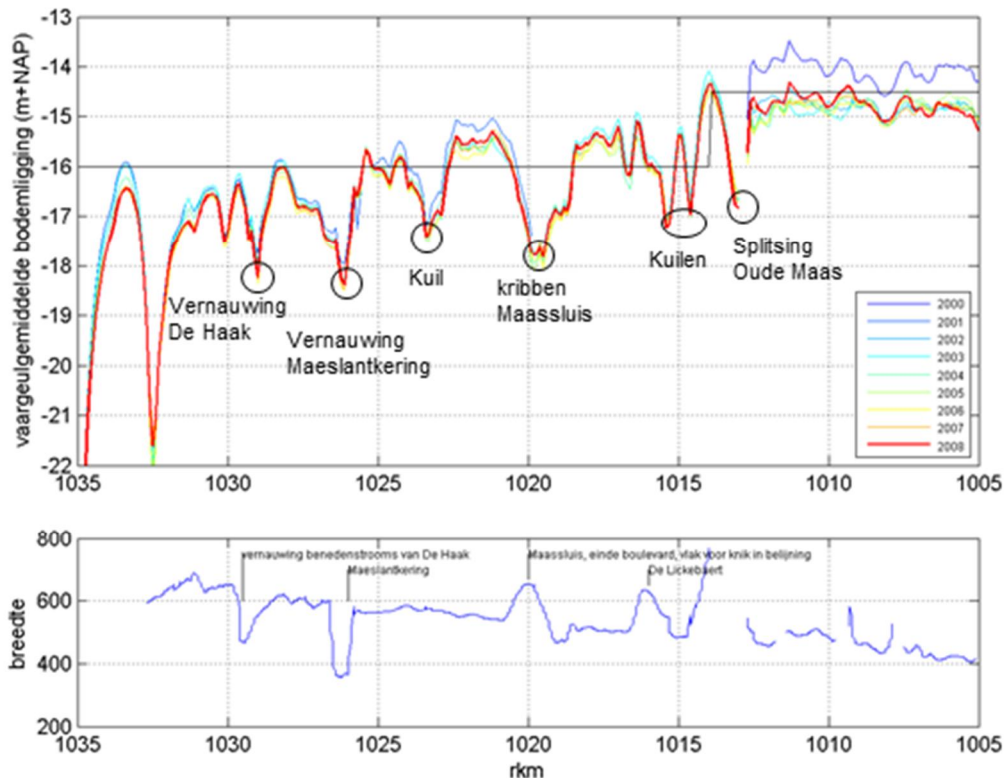
2.2 Morfologische ontwikkeling

Eind jaren '60 en begin jaren '70 van de vorige eeuw is in de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas de zogenaamde trapjeslijn aangelegd. Met deze trapjeslijn zijn de *minimale* en *maximale* waterdiepten voor opeenvolgende trajecten (treden) vastgelegd tussen globaal km. 1035 en km. 990. Het doel van de trapjeslijn is de verzilting vanuit zee te beperken en tegelijkertijd te voldoen aan de eisen vanuit de scheepvaart. In 2000 en 2002 zijn de *minimale* diepten van de treden op de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas vergroot ten behoeve van een betere bereikbaarheid van de Waalhaven en de cruiseterminal aan de Wilhelminakade. Dit heeft ertoe geleid, dat de minimale (gegarandeerde) diepte volgens de oorspronkelijke definitie van de trapjeslijn tussen kms. 1004 en 1014 met 0,5 m groter is geworden (Van der Kaaij et al., 2010).

Variatie in bodemligging

De breedtegemiddelde bodem in langsrichting verloopt niet exact horizontaal zoals de trapjeslijn, maar vertoont pieken en dalen. Door variaties in breedte, bochtprocessen, belijning van de rivier door bijvoorbeeld kribben ontstaan variaties in bodemligging. Figuur 2.1 toont het verloop van de bodem samen met de breedte van de rivier. De breedte neemt grofweg lineair toe naar zee, met hier en daar een vernauwing of verwijding. Ter plaatse van de vernauwingen bij de Maeslantkering en westwaarts van De Haak snijdt de bodem zich in als gevolg van de breedtebeperkingen.

De oorzaak van de insnijding nabij km 1023 is onduidelijk. Op het traject bevinden zich enkele diepe putten, die niet direct gerelateerd kunnen worden aan ontgrondingsprocessen die ontstaan bij kribben. De vorm van de putten doet vermoeden dat het hier locaties betreft met sterkere erodeerbaarheid dan de omliggende bodem (Van der Kaaij et al., 2010). Op dit moment is de bodemligging op dit traject stabiel (zie Figuur G.17 in Van der Kaaij et al., 2010), blijkbaar worden de putten niet groter en dieper. De verdieping tussen km 1019 en 1020 is te verklaren door de grote kribben in de buitenbocht bij Maassluis en de daardoor veroorzaakte versmalling en ontgrondingskuilen bij de kribkoppen. Enkele forse verdiepingen ter hoogte van km 1015 en 1016 zijn waarschijnlijk toe te schrijven aan door oeverbelijning opgewekte ontgrondingskuilen. De verdieping nabij km 1013 is het gevolg van de uitschuring van de bodem door de toestroming van de Oude Maas.



Figuur 2.1 Bodemligging in de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas vergeleken met de breedte van de rivier.

Ontwikkeling in bodemligging

Sinds de aanleg van de trapjeslijn is er geen onderhoud gepleegd om de trapjeslijn in stand te houden. Wel vindt er baggerwerk plaats, maar dit is alleen nautisch baggerwerk ten behoeve van de scheepvaart (handhaving van de minimale gegarandeerde vaardiepte). Er vindt geen “veiligheidsbaggeren” plaats in de Rijn-Maasmonding, oftewel baggerwerk om met de bodemligging de afvoercapaciteit onder maatgevende condities te handhaven (Sieben, ongedateerd).

De veranderingen in bodemligging, die zijn opgetreden vanaf de jaren '70 zijn het gevolg van enerzijds morfologische activiteit en anderzijds nautisch vaargeulonderhoud. Wanneer de sedimentbalans wordt beschouwd voor het interessegebied als geheel (Nieuwe Waterweg en westelijk gedeelte Nieuwe Maas), dan lijkt de bodemligging redelijk stabiel. Echter, de bodemligging is stabiel omdat de te verwachten trend van aanzanding en aanslibbing in het gebied vrijwel geheel wordt teniet gedaan door baggerwerk (zie ook Snippen et al., 2005; Van der Kaaij et al., 2010; Sieben, ongedateerd).

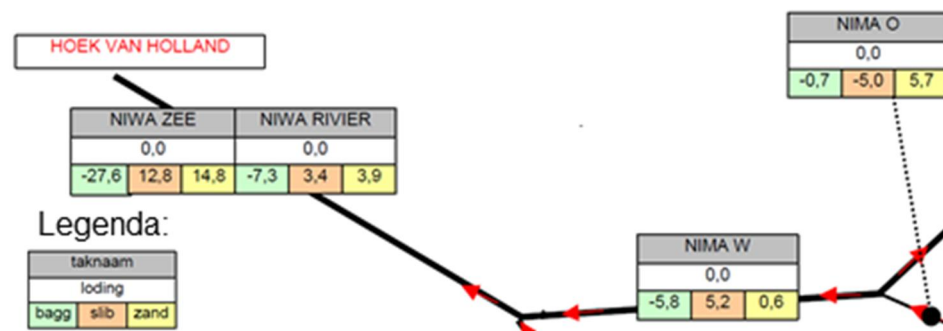
Beschouwd op het schaalniveau van riviertakken wordt dus netto aanzanding en aanslibbing verwacht (zie Snippen et al., (2005) en Figuur 2.2). Uit de analyse van Van der Kaaij et al. (2010) blijkt over de te verwachten morfologische trends (dat wil zeggen zonder vaargeulonderhoud) het volgende (zie Figuur 2.3):

- De zand-transportcapaciteit neemt van km 1025 naar 1007 af, waardoor op dit traject aanzanding kan worden verwacht. Door de aanzanding weg te baggeren is de bodemligging op dit traject redelijk stabiel.

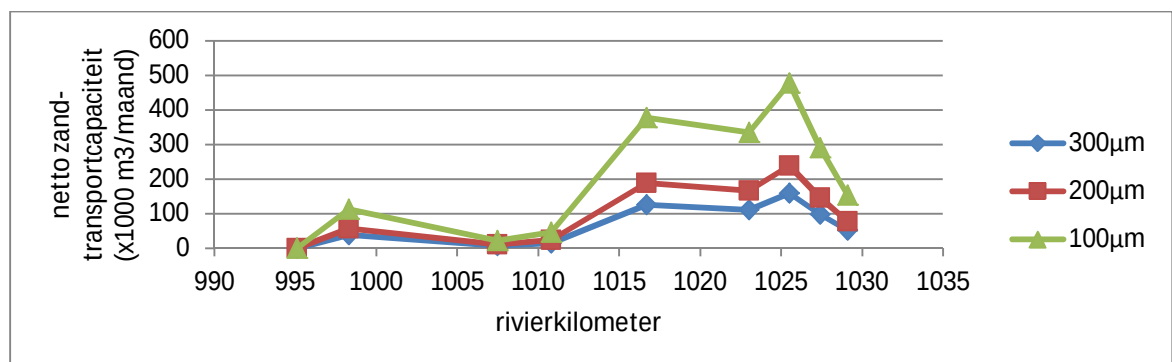
- De zand-transportcapaciteit neemt van km 1029 naar 1025 toe, waardoor op dit traject erosie kan worden verwacht ten westen van de Maeslantkering. Echter, het is onzeker of de dalende trend nog aanwezig is in de huidige situatie, of dat de bodem door erosie een nieuw evenwicht heeft bereikt. De bodemverandering is op dit traject na 2003 namelijk zeer gering geweest (in tegenstelling tot eerdere perioden).

Hierboven zijn de te verwachten morfologische trends weergegeven op basis van transportcapaciteit, dus zonder vaargeulonderhoud. Hoe de bodem zich in werkelijkheid gedraagt, oftewel morfologische activiteit en vaargeulonderhoud samen, is af te leiden uit de historische bodempeilingen. Uit de peilingen valt het volgende op te maken:

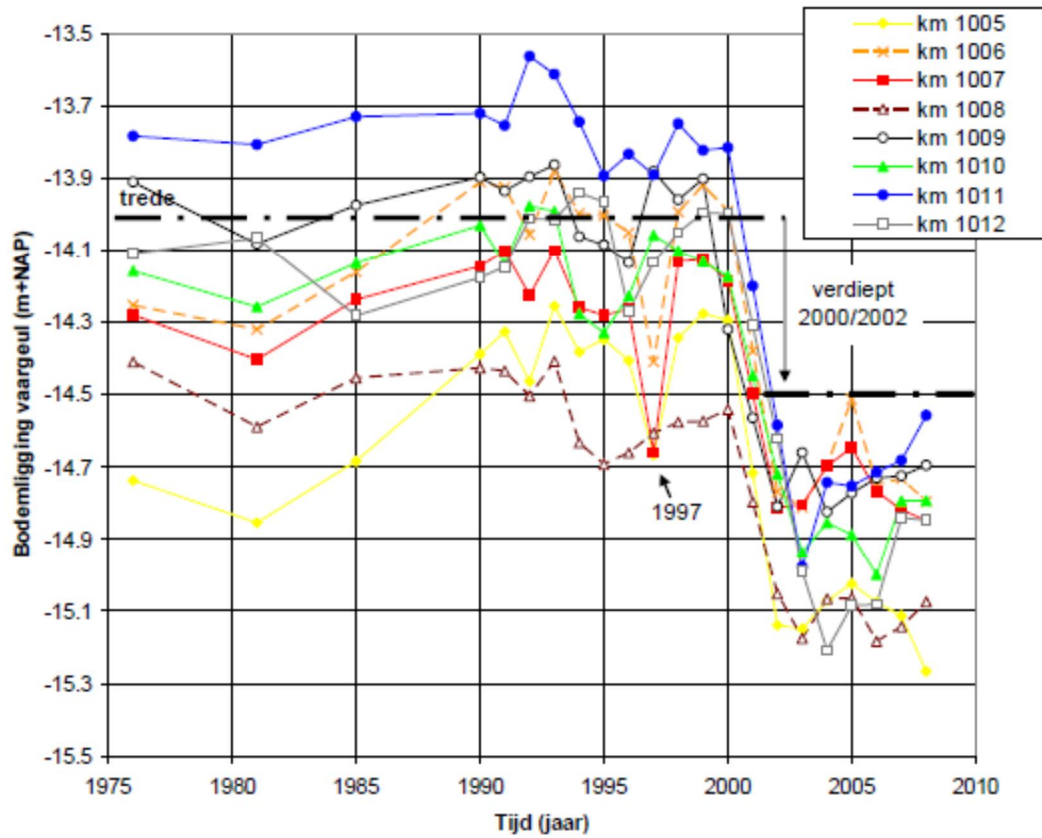
- Op het traject van km 1004 tot 1012,7 is de bodem als redelijk stabiel te beschouwen (Figuur 2.4). De oorspronkelijke diepte van de trapjeslijn op -14 m is in 2002 met een halve meter verlaagd, dit verklaart de trendbreuk. Er wordt gebaggerd om de aanzandende trend teniet te doen. In de bodempeiling van 2008 zijn de baggersporen duidelijk zichtbaar (zie §2.3).
- Bij km 1012,7 leidt de toestroming van de Oude Maas tot een forse verdieping die zich westwaarts van de samenvloeiing uitstrekt. De verdieping is geleidelijk ontstaan, en is stabiel vanaf het jaar 1990 (Figuur 2.5).
- Van km 1014 tot 1018 is de bodem redelijk stabiel. Aanzanding wordt weggebaggerd.
- Van km 1018 tot 1029 heeft een geleidelijke daling van de bodem plaatsgevonden (zie bijvoorbeeld Figuur 2.6). De ontwikkeling van de bodem duidt op een stabilisering vanaf 2005.



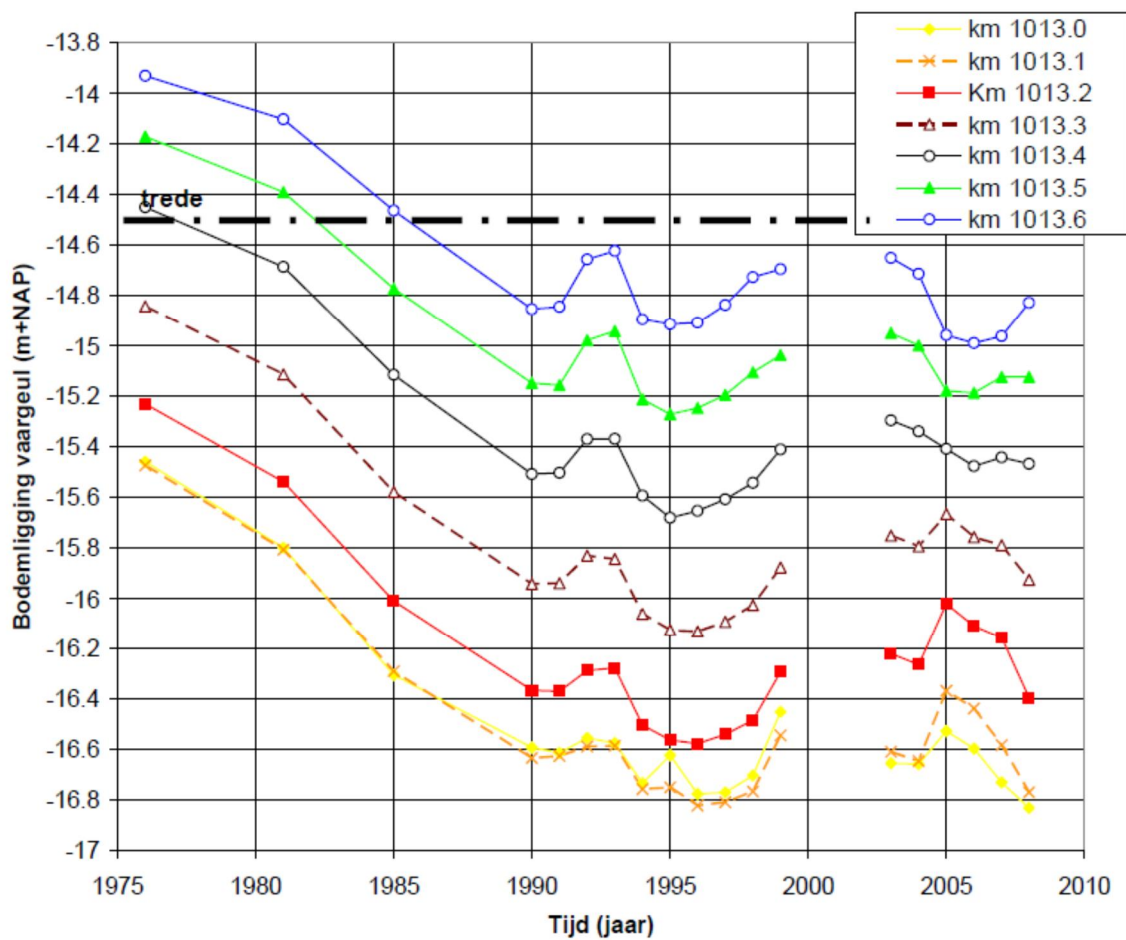
Figuur 2.2 Gemiddelde bodemverandering (cm/jaar; positief = bodemstijging, negatief = bodemdaling) per riviertak in de periode 1990-2000. Er wordt onderscheid gemaakt in bodemverandering door slibtransport, zandtransport en baggerwerkzaamheden. Bron: Snippen et al. (2005).



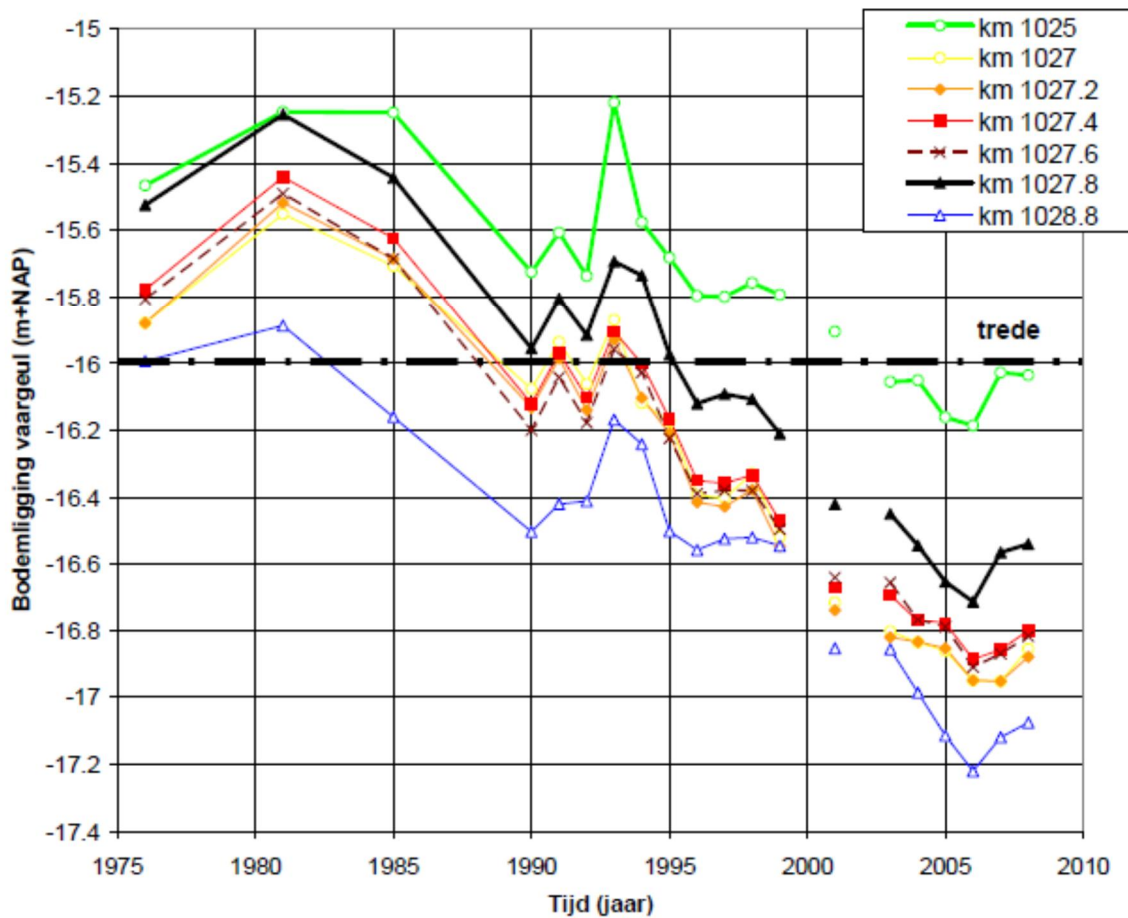
Figuur 2.3 Berekende netto zand-transportcapaciteit voor verschillende korreldiameters. Data gepresenteerd in tabellen in Van der Kaaij (2010). Een positieve getal betekent landinwaarts netto transport.



Figuur 2.4 Ontwikkeling van vaargeulgemiddelde bodemligging op traject km 1005-1012. Bron: Van der Kaaij et al. (2010).



Figuur 2.5 Ontwikkeling van vaargeulgemiddelde bodemligging op traject km 1013-1013,6. Bron: Van der Kaaij et al. (2010).



Figuur 2.6 Ontwikkeling van vaargeulgemiddelde bodemligging op traject km 1025-1029. Bron: Van der Kaaij et al. (2010).

2.3 Baggerwerkzaamheden

Baggerwerkzaamheden beperken zich tot nautisch onderhoud. Het materiaal wordt niet teruggestort in het systeem. In het laatste decennium (2000-2012) bedraagt het baggerwerk in de Nieuwe Waterweg circa 400.000 m³/jaar en in de Nieuwe Maas circa 630.000 m³/jaar, zie Figuur 2.7. De variatie van het baggeronderhoud over de jaren is groot en bedraagt circa een factor 2.

Snippen et al., (2005) rapporteert over de baggerwerkzaamheden o.a. het volgende:

- In de Nieuwe Waterweg is circa 63% van al het baggerwerk gedaan tussen kms 1017 en 1024, bij de bocht van Maassluis.
- In de Nieuwe Maas vindt circa 94% van het baggerwerk plaats tussen kms 1004,7 en 1012, het deel van de rivier waar de grote Rotterdamse havens liggen.

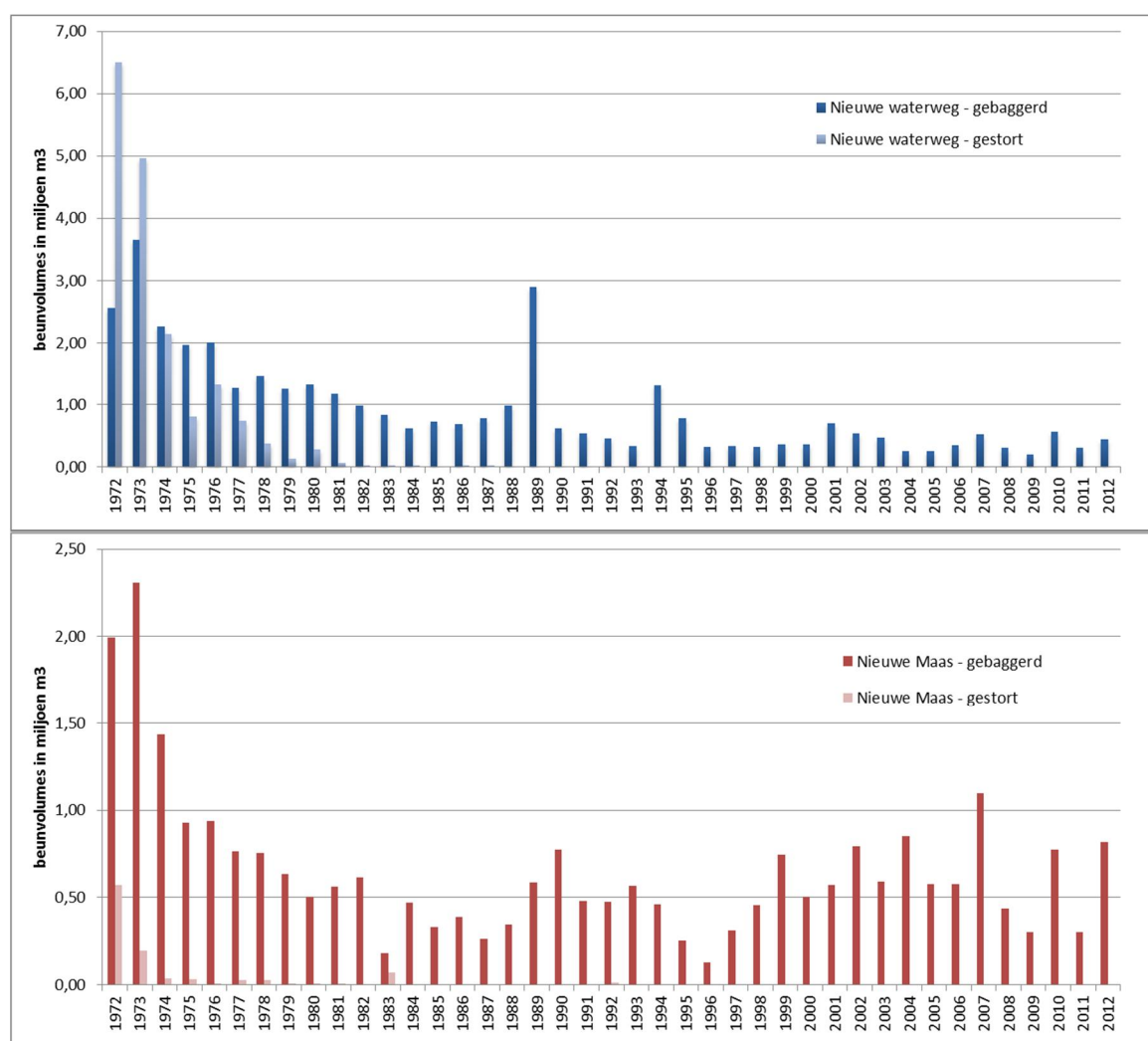
Figuur 2.8 toont de baggerhoeveelheden per deelgebied. Deze waarden komen redelijk goed overeen met de hierboven genoemde waarden. Verschillen kunnen worden verklaard door de omrekenfactoren van "ton droge stof" naar kubieke meter en doordat niet bekend is of het hier beunvolumes of in situ volumes betreft.

Figuur 2.8 laat zien dat er weinig baggerwerk nodig is op het traject 1023-1035,4 (eroderend traject). Dit is logisch aangezien de bodem hier grotendeels lager ligt dan de gewenste

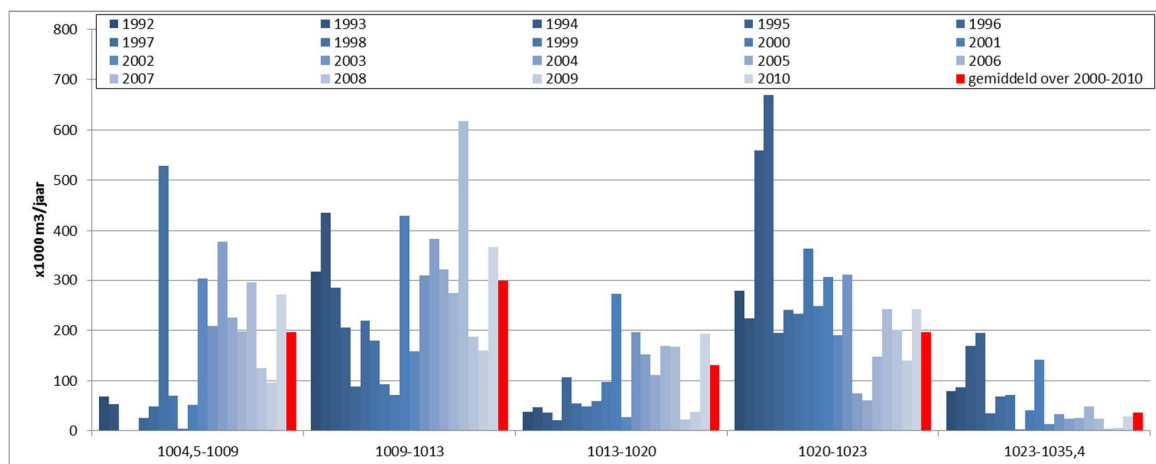
bodemligging volgens de trapjeslijn. De baggersporen in de multibeamkaarten en baggerintensiteitkaarten laten zien dat alleen wordt gebaggerd aan de rand van de vaargeul tussen 1028 en 1029 (waarschijnlijk een ondiepte als gevolg van een zeer flauwe kromming) en tussen 1033 en 1034 (zeewaarts van de splitsingsdam).

De baggerwerkzaamheden tussen km 1020 en 1023 vinden plaats bij Maassluis. De bochten in de rivier zorgen voor een dwarsverhang met diepere buitenbocht dan binnenbocht. De ondiepte in de binnenbochten (bij de meest westelijke bocht strekt zich de ondiepte uit over vrijwel de gehele breedte) wordt weggebaggerd (Figuur 2.9). Duidelijk is te zien dat alleen wordt gebaggerd binnen de vaargeul.

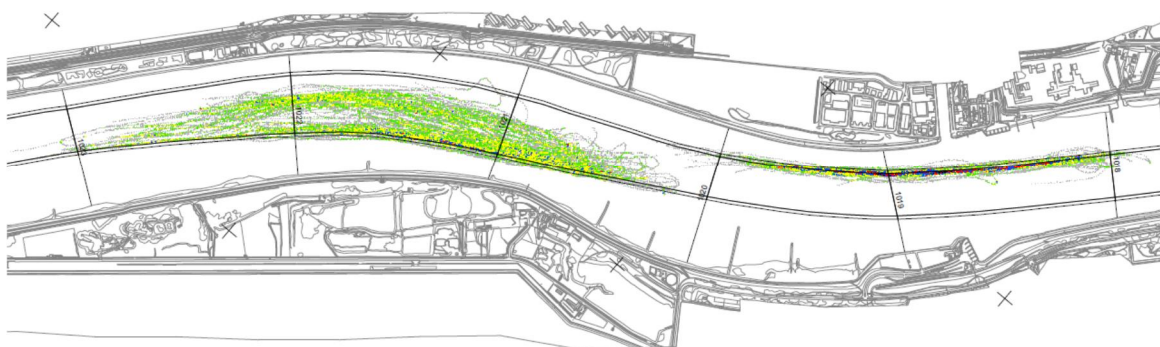
Figuur 2.10 laat de baggerlocaties zien op het traject van 1006 tot 1017. Baggerwerk is noodzakelijk bij iedere bocht (vanwege het dwarsverhang) en bij vrijwel iedere grote haven (vanwege verwijding van de rivier). De grootste inspanning (rood in de figuur) is nodig bij km 1015 en in de binnenbocht tussen km 1007 en 1008.



Figuur 2.7 Verloop van hoeveelheden baggerwerk in de tijd in de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas.



Figuur 2.8 Verloop van hoeveelheden baggerwerk in de tijd voor verschillende deeltrajecten.



Figuur 2.9 Baggertracks uit het jaar 2010 in de bochten bij Maassluis (km 1018-1023). Bron: RWS Noordzee.



Figuur 2.10 Baggertracks uit het jaar 2010 tussen km 1006 -1017. Bron: RWS Noordzee.

2.3.1 Rivierduinen

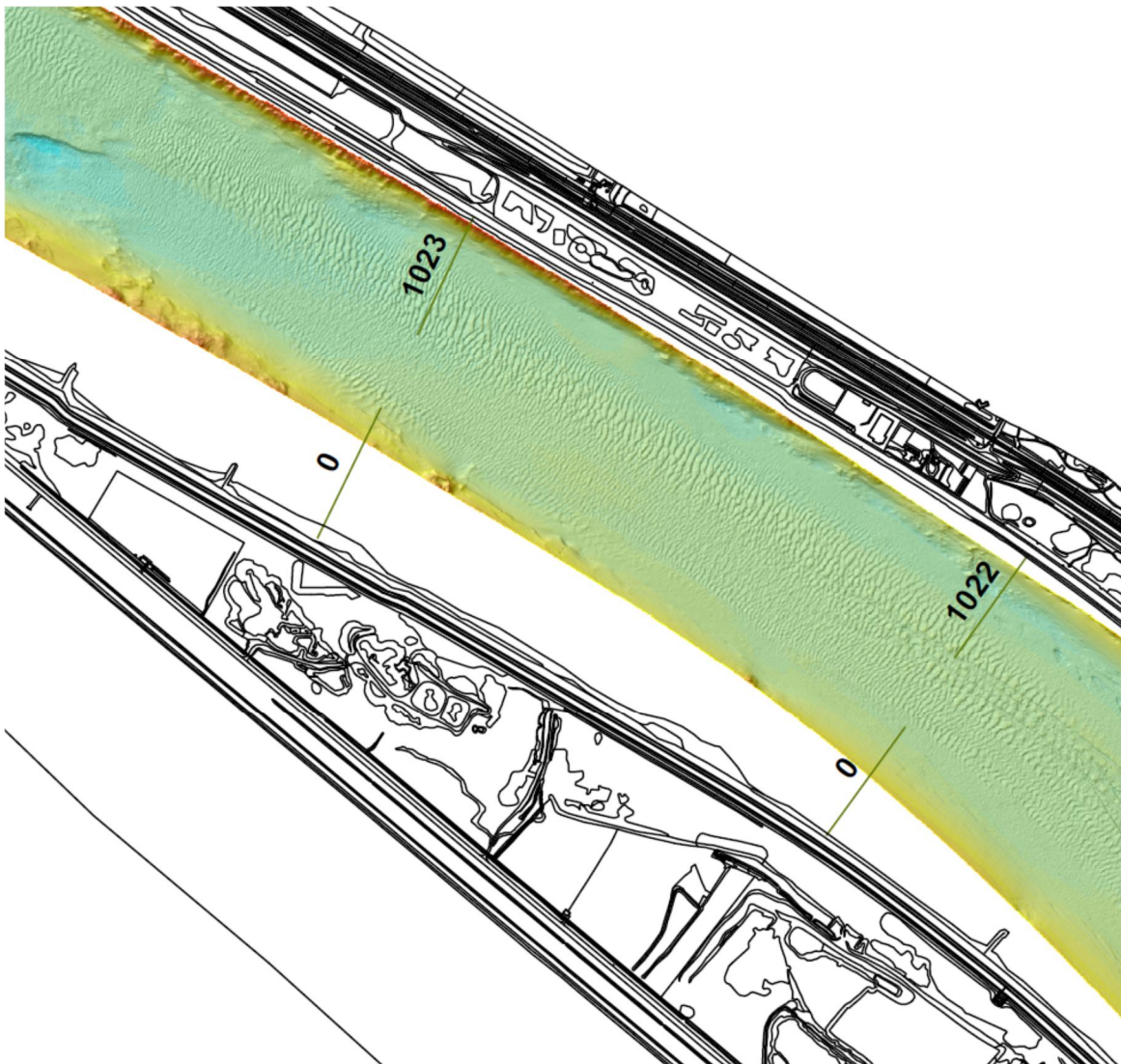
Onder invloed van de stroming ontstaan in een alluviale rivier beddingvormen, ook rivierduinen genaamd. Deze kunnen – in ieder geval in rivierdominante situaties – een hoogte krijgen van tot wel een derde van de waterdiepte, en daarmee hinder opleveren voor de scheepvaart. De toppen van rivierduinen kunnen worden weggebaggerd of er kan geploegd worden, waarbij het materiaal vanaf de duintop in het dal wordt “geschoven”.

In de Nieuwe Waterweg, vooral ten westen van km 1022 komen beddingvormen voor, zie bijvoorbeeld Figuur 2.11. In de figuur is ook te zien dat er een baggerschip een spoor heeft achtergelaten. De multibeam-peilingen (zie §2.3) laten echter zien, dat er niet overal beddingvormen optreden. Op het traject van km 1004 tot 1013 zijn bijvoorbeeld geen beddingvormen zichtbaar, en van km 1013 tot 1022 alleen lokaal en niet uitgestrekt over de gehele breedte. De peilingen zijn uiteraard slechts een momentopname, en beddingvormen kunnen groeien en afvlakken (zelfs geheel verdwijnen) door variatie in de stroming. De peilingen beschouwend, constateren we het volgende:

- Het is niet waarschijnlijk dat beddingvormen tussen km 1004 en 1013 geheel zijn weggebaggerd vlak voordat de peiling werd genomen. Buiten de vaargeul zouden dan nog beddingvormen zichtbaar moeten zijn. Bovendien wordt niet overal tussen km 1004 en 1013 gebaggerd; waar niet wordt gebaggerd zouden dan nog rivierduinen zichtbaar moeten zijn.
- Het is niet waarschijnlijk dat de stromingscondities tussen km 1004 en 1013 ten tijde van de peiling ongeschikt zijn om beddingvormen te laten ontstaan. De stroomsnelheden nabij de bodem en waterdieptes op dit traject vertonen geen significante veranderingen ten opzichte van snelheden en dieptes ten westen of oosten van dit traject.
- Het is daarom het meest waarschijnlijk dat beddingvormen niet aanwezig zijn op bepaalde trajecten, omdat het materiaal op de bodem ongeschikt is om rivierduinen te laten ontstaan. Op de peilingen is te zien dat er trajecten zijn met een slecht-erodeerbare bodem (bijvoorbeeld stortsteen, klei- of veenpakketten).

We vermoeden dat de baggerhoeveelheden zoals beschreven in §2.3 voor slechts een klein deel betrekking hebben op het wegbaggeren van rivierduintoppen, om twee redenen:

- 1 De locaties van het baggerwerk kunnen goed verklaard worden door bochtprocessen en verwijdingen. (Dit is uiteraard geen sluitende redenering, ook in bochten kunnen duinen hinder leveren, maar als baggerwerk niet verklaard zou kunnen worden, dan hadden optredende rivierduinen de verklaring kunnen zijn).
- 2 Op grote delen lijken geen rivierduinen voor te komen (bijv. km 1004-1013), en op het traject waar deze wel voorkomen (bijvoorbeeld vanaf km 1022), is nauwelijks nautisch baggerwerk nodig.



Figuur 2.11 Beddingvormen in de Nieuwe Waterweg.

2.3.2 Sedimentsamenstelling

De sedimentsamenstelling van het gebaggerde materiaal is niet direct af te leiden uit de baggergegevens.. Wel wordt met regelmaat een monstercampagne gehouden in de havens en vaarwegen van het Rijn-Maasmonding gebied (Wensveen en Mol, 2008). Deze campagne heeft voornamelijk als doel de verontreinigingsgraad vast te stellen en de kwaliteitsontwikkeling van het sediment te analyseren. De monsters van de bodem worden genomen met een zogenaamde valbom, waarbij een laag van circa 25 cm naar boven wordt gehaald. Het is aannemelijk dat het gebaggerde sediment een samenstelling heeft die ongeveer overeenkomt met die bepaald uit de monstercampagnes.

In de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas bestaat het grootste deel van het sedimentmonster uit zand (percentages grofweg tussen de 50% en 85%, waarbij het percentage het hoogste is richting zee). De rest van het monster is lutum, silt of grind. Zie Figuur 5.3 voor meer details.

2.4 Effecten op baggerwerk na verdieping

Wanneer de Nieuwe Waterweg en gedeelte van de Nieuwe Maas wordt verdiept, dan beïnvloeden verschillende aspecten de benodigde hoeveelheid onderhoudsbaggerwerk:

- Een grotere diepte kan leiden tot lagere stroomsnelheden (toename nat oppervlak) en tot meer aanzanding/aanslibbing en baggerwerk.
- Anderzijds, een grotere diepte kan leiden tot hogere stroomsnelheden (toename getij-debiet t.g.v. een lagere ruwheid) en daarmee tot minder aanzanding/aanslibbing en baggerwerk.
- Een grotere diepte kan leiden tot een sterker dwarsverhang in bochten, waardoor de binnenbocht relatief ondieper wordt en er meer baggerwerk nodig is. Dit geldt alleen als de bocht in een (dynamisch) evenwicht is. Wanneer er een overdiepte is ten opzichte van het evenwicht en er de tendens tot aanzanding is, zal dit niet gelden. Deze tendens lijkt er te zijn oostwaarts van km 1018.
- Een afnemende breedte-diepte verhouding kan anderzijds ook ertoe leiden dat het ontwikkelen van banken wordt onderdrukt.
- Een grotere diepte kan leiden tot hogere rivierduinen (de duinhoogte in rivieren schaalt grofweg met de diepte), en daarmee meer baggerwerk.
- Een grotere diepte leidt er initieel toe dat een groter bodemareaal van de Nieuwe Waterweg op de (nieuwe) ontwerpdiepte ligt en dat derhalve mogelijk moet worden onderhouden. In de huidige situatie hoeven alleen de toppen van de bodemvormen te worden onderhouden, zie Figuur 1.1.. Nadat zich een nieuw evenwicht heeft ingesteld van bodemvormen, neemt dit areaal weer af. Kort na aanleg kan het benodigde baggeronderhoud dus groter zijn dan na lange tijd.
- Slib vanuit zee verplaatst zich via de zouttong landinwaarts. De locaties met grote / maximale aanslibbing verplaatsen zich mogelijk als gevolg van de verdieping. Dit kan de hoeveelheid baggerwerk beïnvloeden.

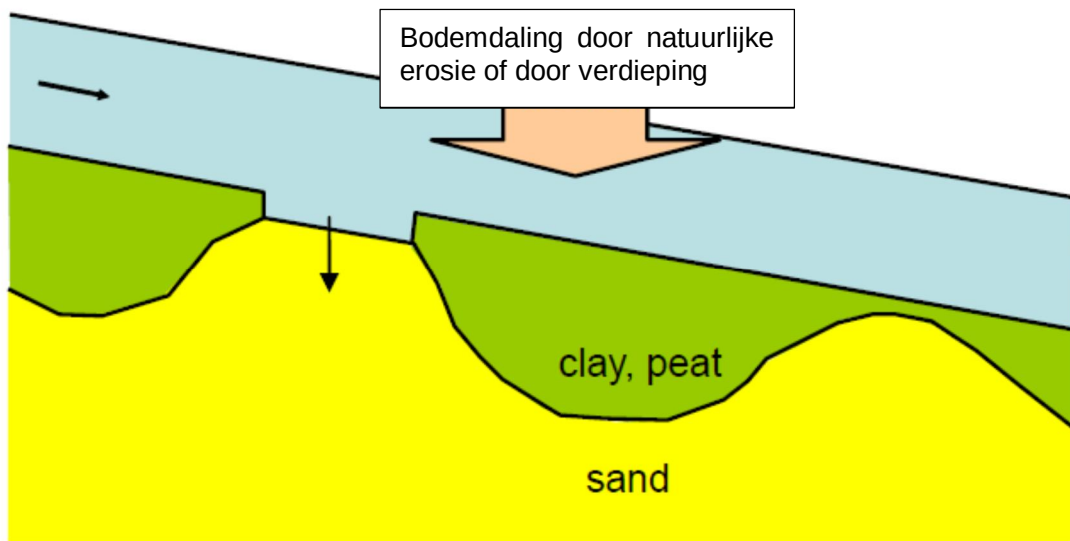
Samengevat: we hebben gezien dat locaties van baggerwerk goed te relateren zijn aan aanzandingen door bochtprocessen en verwijdingen in de rivier. Na verdieping blijven deze processen onverminderd doorgaan, zodat baggerwerk in voornamelijk binnenbochten en nabij haveningen nodig zal blijven. De effecten op de bodemligging door verdieping zijn niet eenduidig. Numerieke berekeningen (zie volgende hoofdstukken) zullen meer inzicht geven in de daadwerkelijke effecten, oftewel waar aanzanding en erosie verwacht kan worden.

Overige aandachtspunten:

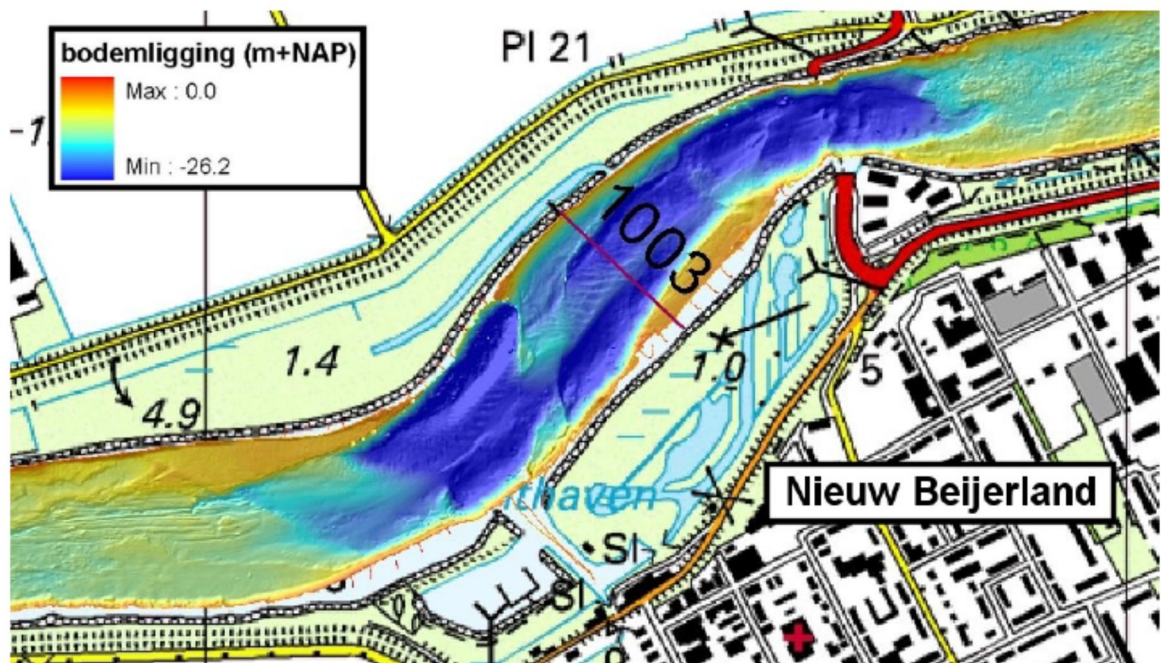
Tot slot willen we nog de aandacht vestigen op onderstaande aspecten die een rol kunnen spelen bij de verdieping:

- Met behulp van de multibeam-peilingen zijn plekken aan te wijzen die duiden op slecht-erodeerbare lagen. Onder een slecht-erodeerbaar pakket klei, veen of stortsteen ligt waarschijnlijk fijner (Pleistocene) zand (zie bijvoorbeeld DINOLoket van TNO; <http://www2.dinoloket.nl/index.html>). Wanneer de laag wordt weggehaald kan dit fijnere zand aan de oppervlakte komen en vervolgens razendsnel gaan eroderen (bv Figuur X; Sloff et al., 2011). Inzicht in de laagdikte en opbouw van de ondergrond is zeer wenselijk. In de peilingen is te zien dat er ontgrondingskuilen aanwezig zijn (bijv bij km 1015-1016 en 1022-1024). Deze zijn waarschijnlijk ontstaan doordat de vaste laag is opengebroken door turbulentie (agv kribben, oeverbelijning), waarna uitspoeling van het fijne materiaal optreedt. In het Spui en Dordtsche Kil zijn door bodemerrosie in korte tijd grote gaten ontstaan, die de stabiliteit van de naastgelegen dijken bedreigen (Figuur Y; Sloff et al., 2011).

- Door de rivier te verdiepen kunnen oevers instabiel worden. Hierbij kan worden gedacht aan afschuiven / afglijden (buitenwaartse macroinstabiliteit), maar ook het risico van deformatie van het voorland bestaat (afschuiving, zettingsvloeiing). Ook binnenwaartse macroinstabiliteit van dijken is mogelijk een aandachtspunt, als de hydraulische intreeweerstand afneemt als gevolg van de verdieping en daarmee de waterspanning toeneemt in de watervoerende lagen onder de rivier en onder de dijk (zie bijvoorbeeld risico-identificatie in de Lek als gevolg van bodemerosie in Van der Mark et al, 2012). . De geplande verdieping snijdt in principe de vooroevers niet in, zodat de steilheid van taluds direct na aanleg onveranderd is. Maar in geval van voortschrijdende erosie kan oeverinstabiliteit toch een probleem vormen (zie vorig punt).
- Verdieping kan leiden tot gewijzigde getijdebieten, waardoor effecten als sedimentatie of erosie kunnen doorwerken tot in andere riviertakken (Oude Maas, Spui, Dordtsche Kil). Dit dient onderzocht te worden; op basis de hydrodynamische berekeningen gepresenteerd in Hoofdstuk 4 kan hiervan al een eerste inschatting worden gemaakt. De huidige studie beperkt zich echter tot effecten op de Nieuwe Waterweg zelf.
- Bij de aanleg van de trapjeslijn is er op een aantal plaatsen grind of onderhoudsspecie gestort om de bodem vast te leggen. Op dit moment is de bodem redelijk stabiel, mogelijk vanwege de aanwezigheid van grind. Als de bodem wordt verdiept (en grind wordt verwijderd), kan het morfologische gedrag wijzigen (i.e. minder stabiel gedrag). Het valt lastig te achterhalen wat met het grind is gebeurd. Volgens Van der Kaaij et al. (2010) zijn de grindafdekkingen km 1003-1003.6, km 1016.3-1018.3 en km 1027-1029.6 niet meer aanwezig.
- Als de extra onderhoudsinspanning voor de beheerder Rijkswaterstaat in beeld gebracht moet worden die ontstaat als gevolg van de verdieping, dan dienen hierbij in ieder geval de volgende aspecten te worden meegenomen:
 - extra vaargeulonderhoud in de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas,
 - maatregelen om te voorkomen dat kabels en leidingen bloot komen te liggen,
 - maatregelen om te voorkomen dat onvoldoende dekking aanwezig is op tunnels (m.n. Beneluxtunnel),
 - maatregelen om te voorkomen dat (voor)oevers van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas bezwijken,
 - eventueel soortgelijke maatregelen in andere riviertakken, indien die nodig blijken door gewijzigde getijdebieten.



Figuur 2.12: Schematische weergave van het vrijkomen van goed-erodeerbare zandlaag als gevolg van bodemdaling. Bodemdaling kan ontstaan door erosie of menselijk ingrijpen.



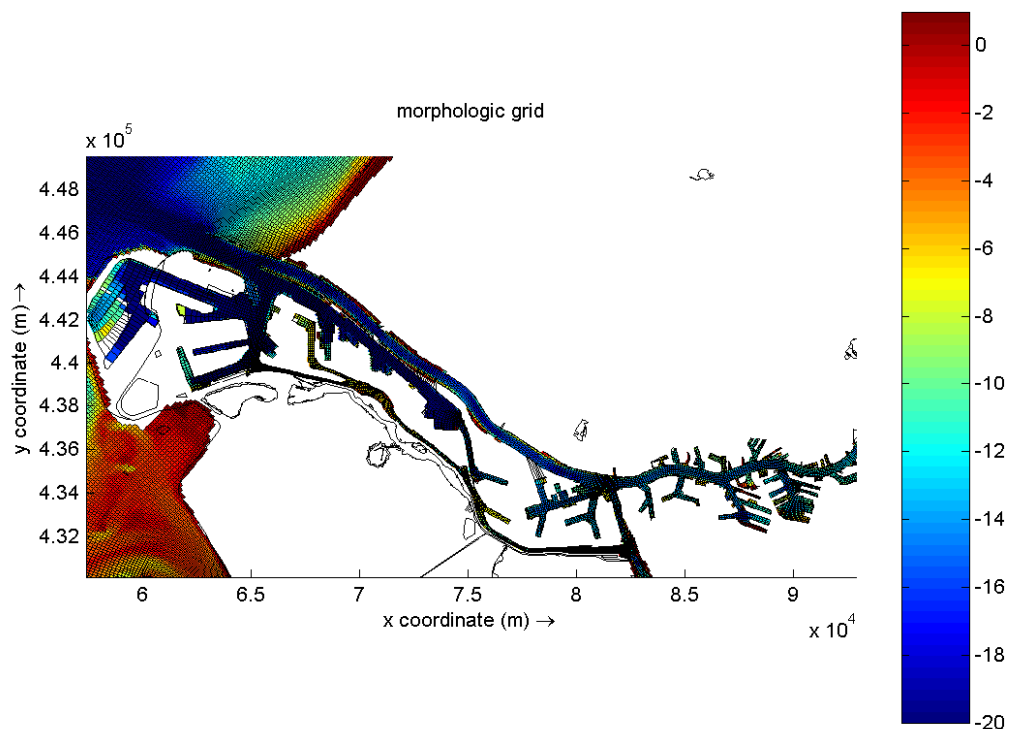
Figuur 2.13: Multibeam peiling ter plaatse van een diepe erosiekuil in het Spui, waar de rivier lokaal in een zandlaag snijdt. Zowel boven- als benedenstrooms van de kuil bestaat de bodem uit klei. Bron: Sloff et al (2011).

3 Berekeningen met het 3D-Zeedeltamodel

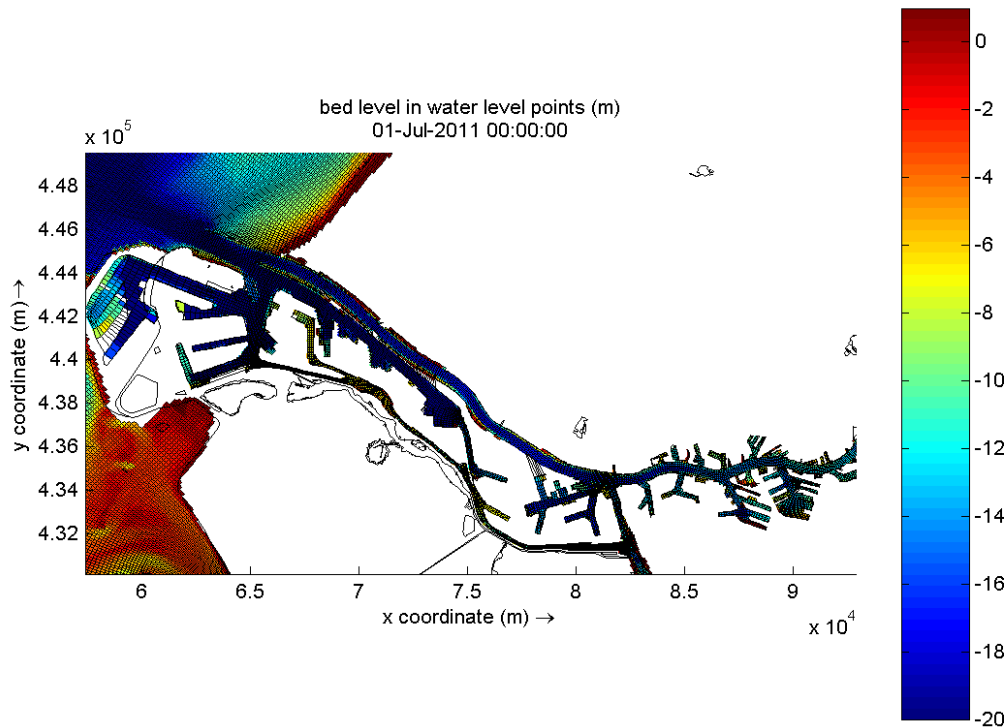
Voor het bepalen van de effecten van de verdieping zijn twee hydrodynamische berekeningen uitgevoerd met het bestaande 3D-Zeedeltamodel, (met 10 lagen in de verticaal) namelijk één met en één zonder verdieping. Hiernaast is (voor beide scenario's) het model geactualiseerd met de huidige lay-out van de tweede Maasvlakte. Figuur 3.1 toont het rooster en de bodem voor het scenario *zonder verdieping* ter hoogte van de Nieuwe Waterweg. Figuur 3.2 toont het rooster en de bodem voor het scenario *met verdieping* ter hoogte van de Nieuwe Waterweg. Het verschil in bodemhoogte tussen beide scenario's wordt getoond in Figuur 3.3. Voor een totaaloverzicht van het Zeedeltarooster wordt verwezen naar Figuur 7.1.

De simulatieperiode loopt van 1 augustus tot 21 september 2011. Figuur 3.4 toont de rivierafvoer bij Lobith in deze periode. Rond 1 augustus is deze afvoer iets lager dan het langjarige gemiddelde van $2200 \text{ m}^3/\text{s}$. Naar 21 september toe neemt de afvoer geleidelijk wat af. Bij een dergelijke afvoer is het bodemtransport in de Nieuwe Waterweg landwaarts gericht, bij hoge afvoeren is het bodemtransport netto zeewaarts gericht (Sloff et al., 2013). De afvoer in de periode 1 augustus tot 21 september 2011 wordt voldoende representatief geacht voor de inschatting van het effect van de verdieping op het sedimenttransport.

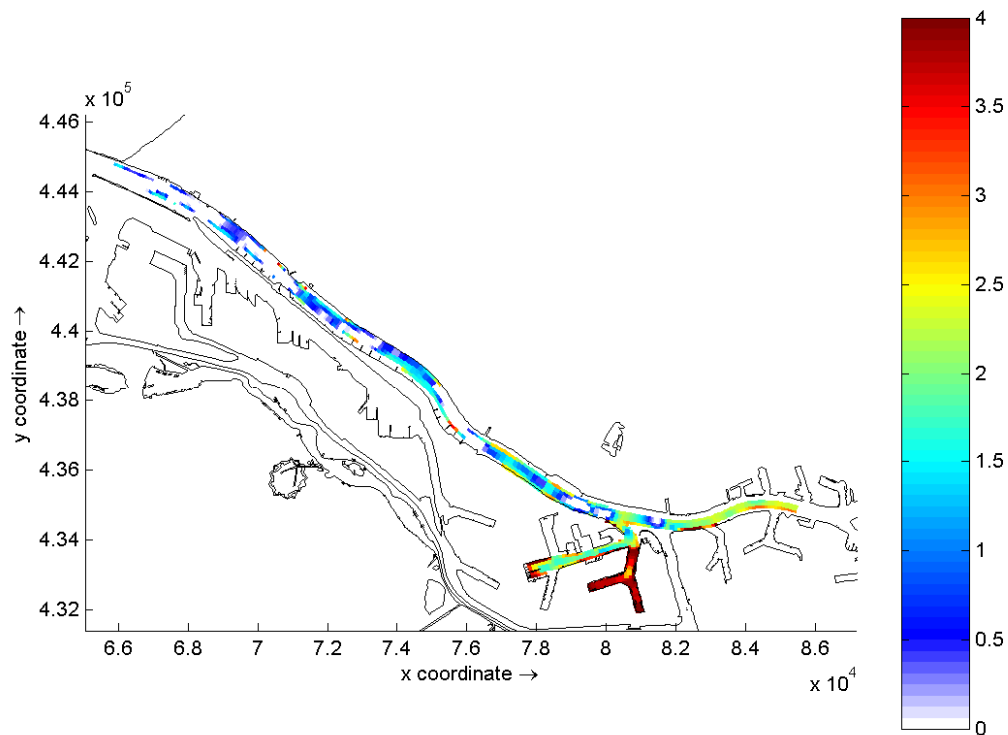
In de hoofdstukken 4 t/m 6 worden de resultaten van de berekeningen met het 3D-Zeedeltamodel besproken met betrekking tot hydrodynamica (H4) en de doorvertaling naar zandtransport (H5) en slibtransport (H6).



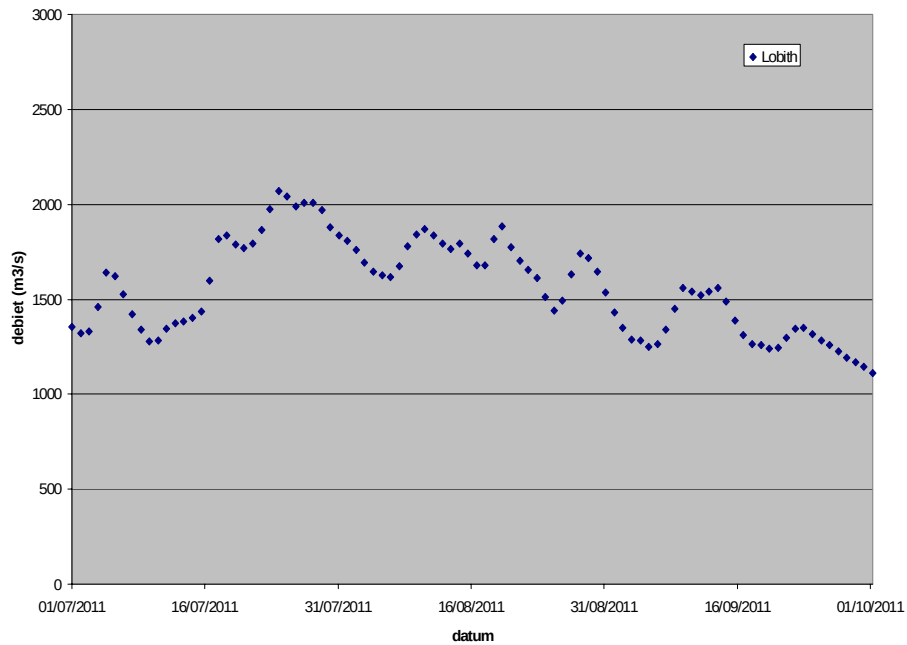
Figuur 3.1: Rooster en bodemligging voor de huidige situatie (run c01).



Figuur 3.2: Rooster en bodemligging met verdieping (run c02).



Figuur 3.3: Verschil in bodemligging tussen de huidige en nieuwe situatie.



Figuur 3.4: Afvoer bij Lobith in de periode 1 juli – 1 oktober 2011.

4 Effect op getij

4.1 Algemeen

Er is een harmonische analyse gedaan met het programma T-Tide op de waterstanden (midden van de geul) en debieten (dwarsraaien) voor de periode 22 augustus 2011 00:00:00 – 20 september 2011 13:40:00, wat correspondeert met 2 springtij – doodtij cycli (29.6 dagen).

In het interessegebied bevinden zich de volgende riviertakken. De Nieuwe Waterweg loopt van 1032.5 – 1014.5 km; bij 1030 km takt hier het Calandkanaal bij aan. De Nieuwe Waterweg splitst tussen rond 1013 km in de Oude Maas en Nieuwe Maas (1012.5 – 990 km), waar bij 995 km de Hollandsche IJssel van aftakt.

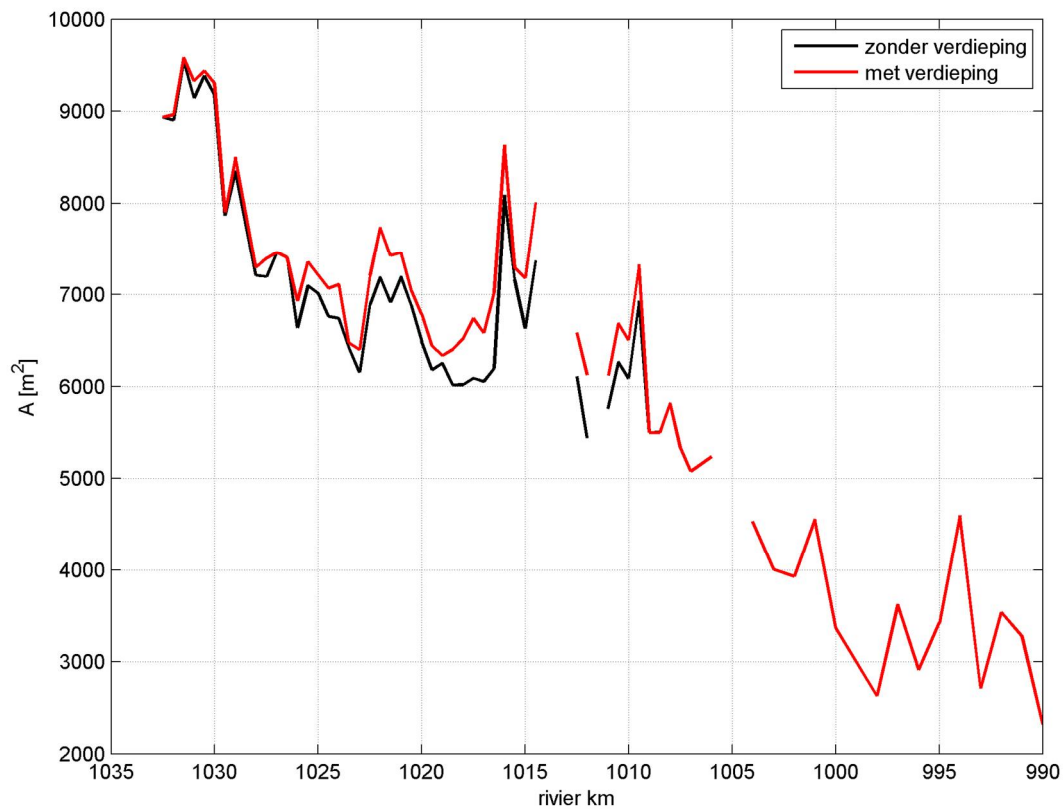
De verdieping vindt plaats tussen 1008 en 1026.0 km.

In de onderstaande analyses zijn raaien 1005 en 1011.5 km achterwege gelaten, omdat deze niet helemaal van oever tot oever lopen.

4.2 Doorstroomoppervlakte

Met de gemiddelde waterstanden uit de modelsimulaties en de modelbodem is de doorstroomoppervlakte (dwarsdoorsnede) A uitgerekend. Hierbij is rekening gehouden met de aanwezigheid van kribben tussen ca. 1020 en 1028 km. Figuur 4.1 toont A als functie van de rivierkilometer.

De verdieping zorgt voor een vergroting van de dwarsdoorsnede met 0-14% en dan met name tussen 1009 en 1019 km. De dwarsdoorsnede loopt over het algemeen af in stroomopwaartse richting. Net na de samenvloeiing (1014.5 – 1017.0 km) zijn de waarden van A opvallend hoog, alsook tussen 1020.0 en 1022.0 km en meer lokaal bij 1009.5 km. De dwarsdoorsnede is op een aantal plaatsen relatief klein, zoals nabij 1023.0 km.



Figuur 4.1 De doorstroomoppervlakte langs Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas met en zonder de verdieping. N.B. voor $r_{\text{km}} < 1008$ heeft geen verdieping plaatsgevonden en lopen de rode en zwarte lijnen exact over elkaar.

4.3 Waterstanden

Figuur 4.2 laat zien dat door de verdieping de amplitude van het M2 getij (met een periode van 12.42 uur) ter plekke en stroomopwaarts van de verdieping toeneemt met 1-2%. Dit is het gevolg van een afgenomen bodemwrijving door de toegenomen diepte. De fase neemt juist af, wat duidt op een snellere voortplanting van het getij; de voortplantingssnelheid is namelijk evenredig met de wortel van de waterdiepte: $c \approx (gh)^{0.5}$ (als benadering van een wrijvingsloze lopende golf).

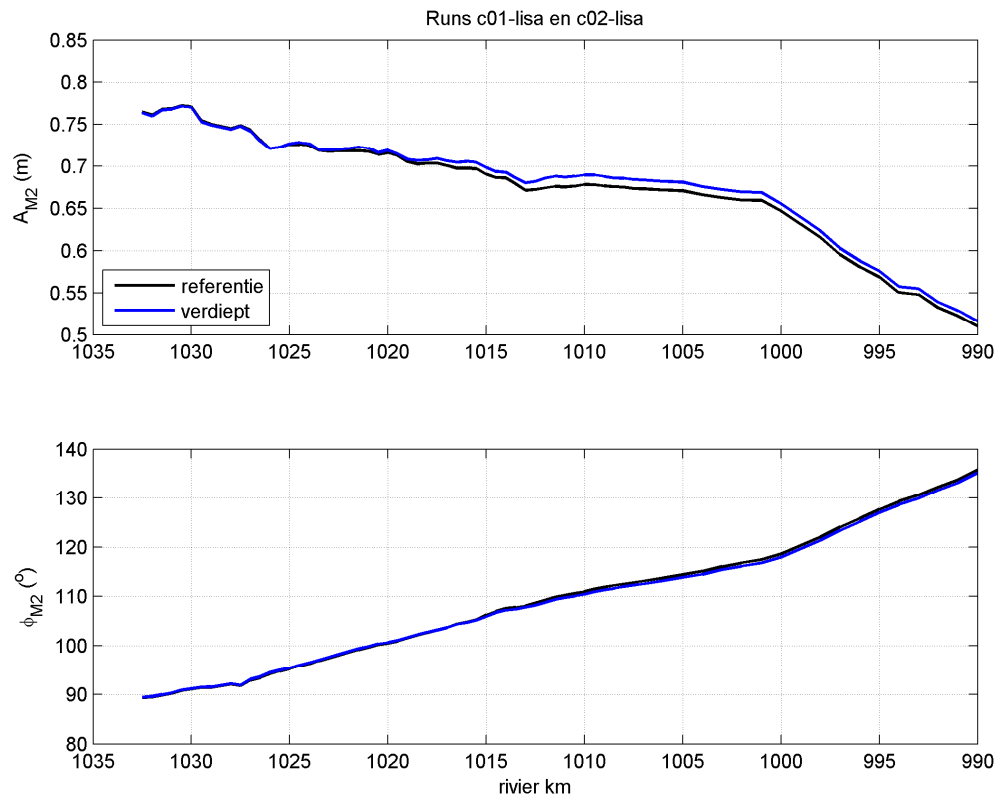
Voor het M4 getij, dat ontstaat in ondiep water als gevolg van de niet-lineaire interactie tussen het M2 getij en bodem, geldt hetzelfde.

Een belangrijke bron van getijasymmetrie is het gevolg van de M2-M4 interactie. De verhouding tussen de amplitudes is een maat voor de sterkte van de asymmetrie en de relatieve fase, $\phi_{M2M4} = 2\phi_{M2} - \phi_{M4}$, voor de richting (en sterkte) van de asymmetrie. Het verticale getij is symmetrisch, dat wil zeggen $T_{vloed} = T_{eb}$, voor $\phi_{M2M4} = 0^\circ$ en 180° . Als $0^\circ < \phi_{M2M4} < 180^\circ$ is het verticale getij vloeddominant ($T_{vloed} < T_{eb}$), en als $180^\circ < \phi_{M2M4} < 360^\circ$ is het verticale getij ebdominant ($T_{vloed} > T_{eb}$). Deze asymmetrie in het verticale getij vertaalt zich meestal in asymmetrie in het horizontale getij (debieten en snelheden) en daarmee ook in de sedimenttransporten.

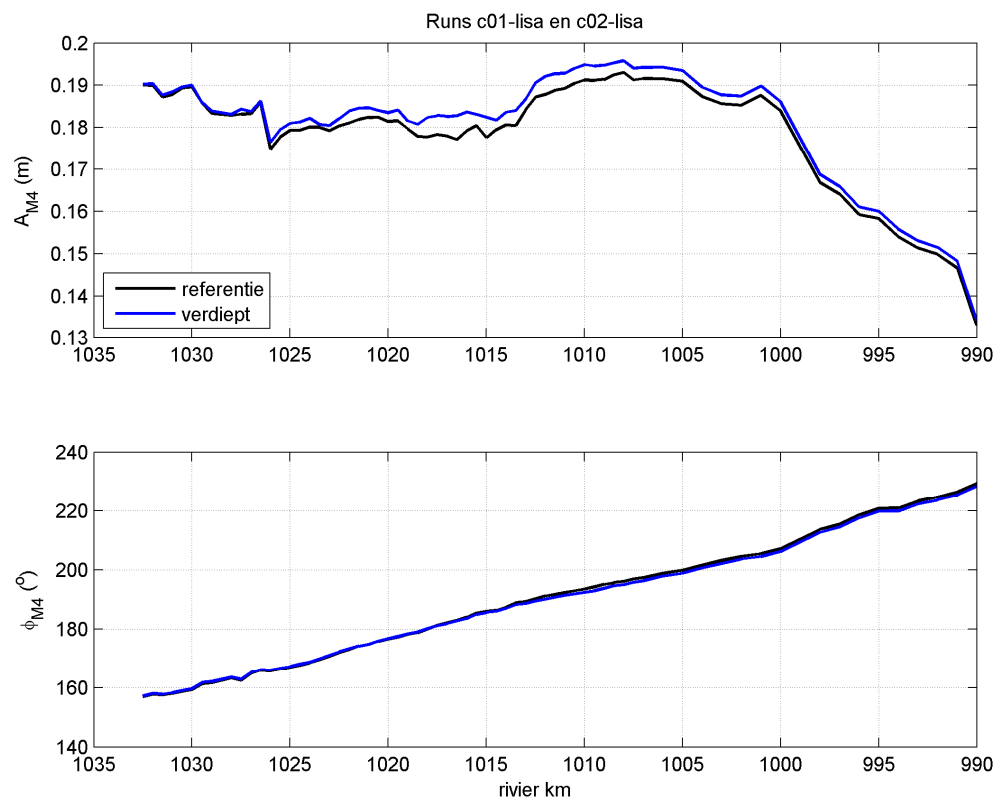
Figuur 4.3 laat zien dat de relatieve amplitude van het M4 getij licht toeneemt ter plekke van de verdieping, terwijl de relatieve fase nauwelijks verandert. Het verticale getij is vloeddominant en de grootte van de asymmetrie neemt toe met de diepte.

Voor korte, getijgedomineerde estuaria concludeerden Friedrichs & Aubrey (1988) dat getijasymmetrie wordt bepaald door de verhouding tussen de getijamplitude en de waterdiepte a/h en de verhouding tussen de komberging en de hoeveelheid water in de geul onder gemiddeld zeeniveau V_s/V_c . Relatieve ondiepe estuaria zijn over het algemeen vloeddominant, en estuaria met relatief veel komberging ebdominant. Het eerste is gekoppeld aan de vervorming van de getijgolf doordat de voortplantingssnelheid toeneemt met de waterdiepte (zoals eerder beschreven) waardoor het hoogwater zich sneller kan voorplanten dan het laagwater. Het tweede is gerelateerd aan de afremming van de voortplanting van het hoogwater door niet of nauwelijks meestromend water in de intergetijdengebieden (komberging).

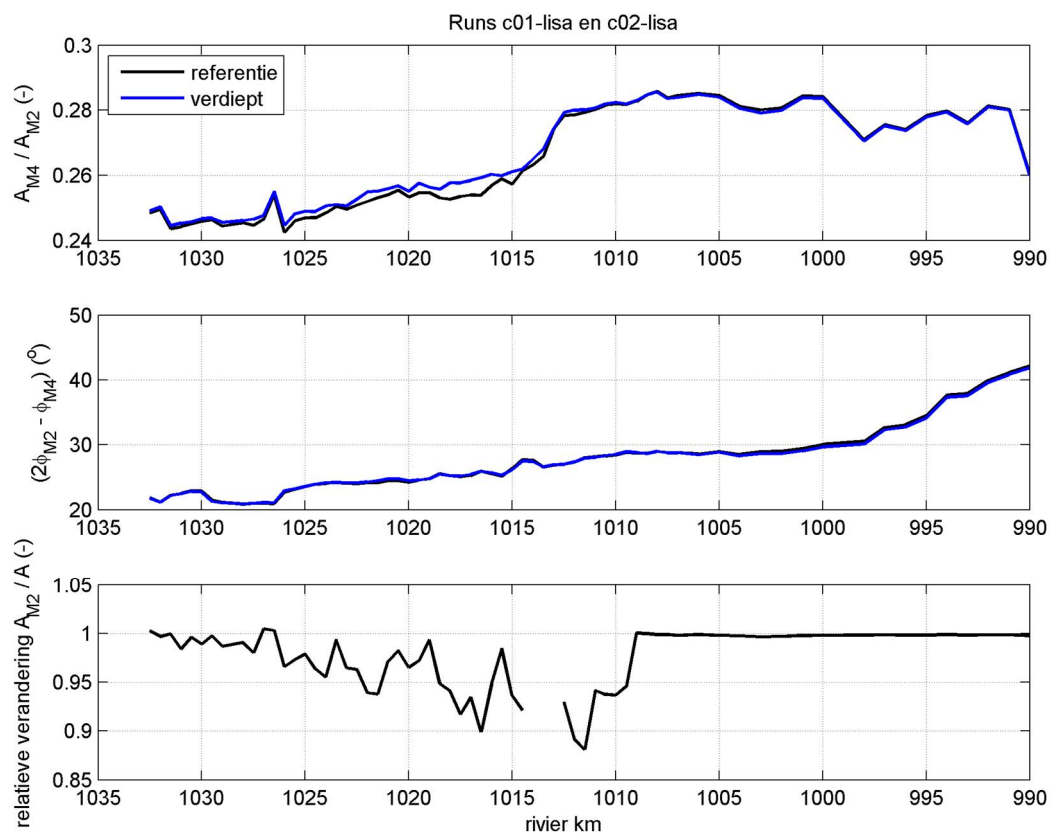
Volgens deze theorie neemt de relatieve amplitude toe met a/h en V_s/V_c . Het onderste paneel van Figuur 4.4 laat de relatieve verandering van de verhouding van de amplitude van het M2-getij en de doorstroomoppervlakte als gevolg van de verdieping zien. Gegeven een constante rivierbreedte B is dit een maat voor de verandering van a/h . Hieruit blijkt dat de verruiming sterker is dan de toename in getijamplitude, waardoor deze verhouding afneemt. Op basis hiervan zou je verwachten dat de vloeddominantie afneemt (i.e. afname van de relatieve amplitude). Zoals eerder geconstateerd zien we echter een (lichte) toename van de relatieve amplitude. Door de verdieping neemt ook de verhouding V_s/V_c af (geen verandering komberging, toename geuldiepte), wat volgens de theorie van Friedrichs & Aubrey (1988) zou leiden tot een afname van de relatieve amplitude. Het verschil tussen deze theorie en de Delft3D berekeningen zou te maken kunnen hebben met de lengte van het bekken, de aanwezigheid van een relatief sterke rivierafvoer en/of de invloed van havenbekkens. Dit illustreert de meerwaarde van de hydrodynamische berekeningen: de stroming in de Nieuwe Waterweg is dermate complex dat op basis van vereenvoudigde relaties tussen dwarsdoorsnede en getij onjuiste conclusies getrokken kunnen worden.



Figuur 4.2 De amplitude en fase van het verticale (waterstanden) M2-getij met en zonder verdieping.



Figuur 4.3 De amplitude en fase van het verticale (waterstanden) M4-getij met en zonder verdieping.



Figuur 4.4 De relatieve amplitude en fase van het verticale (waterstanden) M4- en M2-getij. Het onderste paneel toont de relatieve verandering in de verhouding tussen de amplitude van het M2-getij en de doorstroomoppervlakte als gevolg van de verdieping.

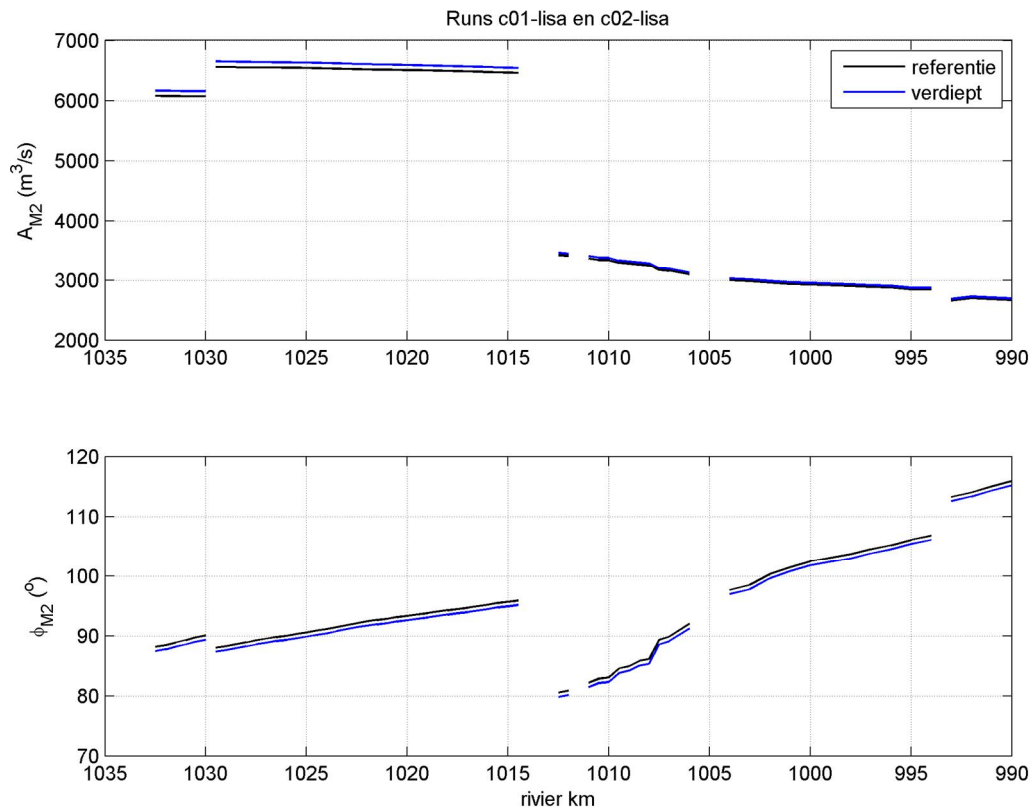
4.4 Getijdebieten en -volumes

De relatie tussen de waterstanden en de getijdebieten is niet-lineair doordat de stroomvoerende breedte afhangt van de waterstand. In het geval van de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas is deze niet-lineariteit naar verwachting niet zo sterk, gegeven het dwarsprofiel dat min of meer rechthoekig is. Figuren 4.5 t/m 4.7 met de getijdebieten laten dan ook een vergelijkbaar gedrag zien als de waterstanden:

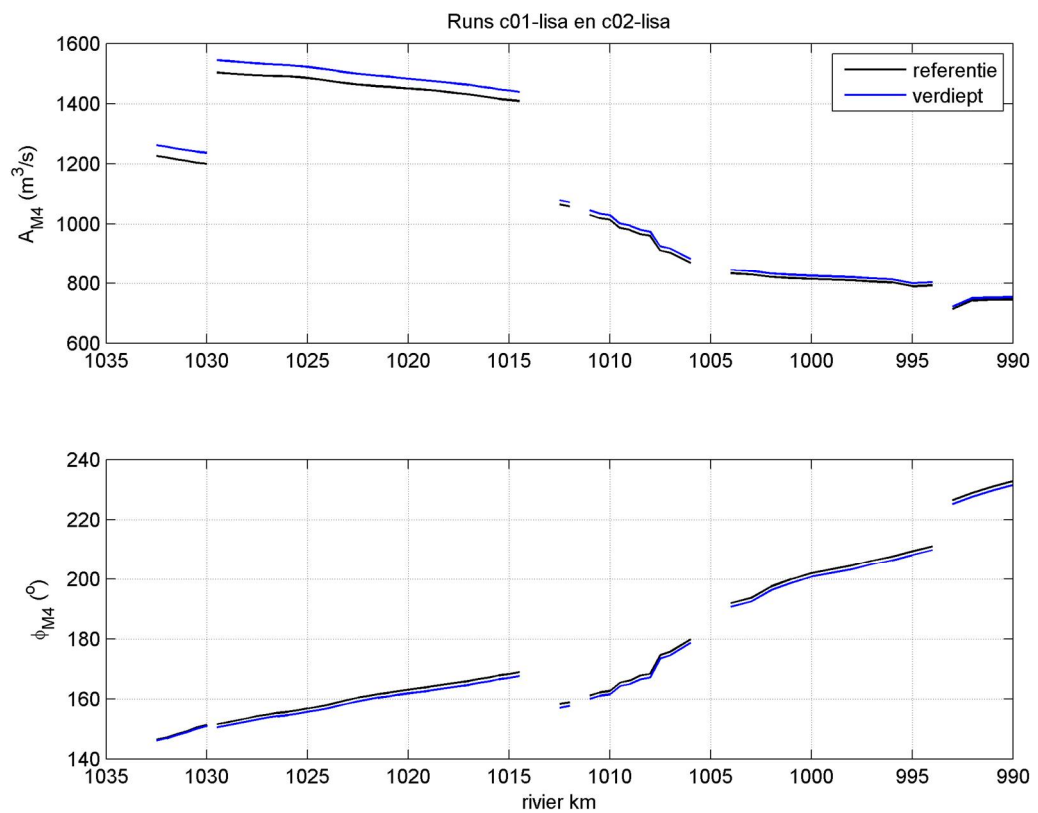
- Amplitudes nemen af in stroomopwaartse richting
- Vloeddominantie (i.e. een relatieve fase tussen -90° en 90°), die zorgt voor grotere getijdebieten in vloed- dan in ebrichting.
- Verdieping zorgt voor een toename van de getijdebieten, een snellere getijvoortplanting en een toename van de vloedasymmetrie.

Verder zien we een sprong in de amplitude van de debieten bij de bifurcaties, omdat een gedeelte van het water respectievelijk het Calandkanaal, de Oude Maas en de Hollandse IJssel instroomt. Deze bifurcaties resulteren ook in sprongen in de fases van het M2 en M4 getij. Verder is de grote sprong in de relatieve amplitude en fase van het M2-M4 getij opvallend, wat duidt op een sterker vloeddominantie in de Nieuwe Maas in vergelijking met de Nieuwe Waterweg.

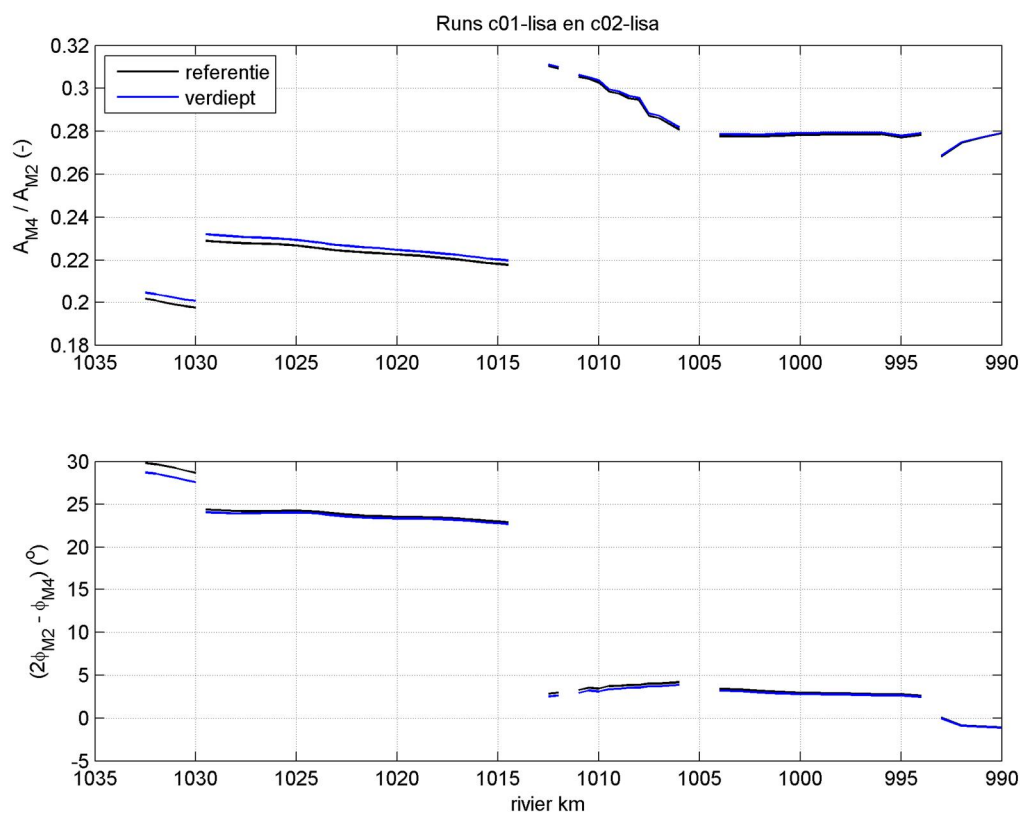
De verdieping zorg ook voor een kleine toename van de watervolumes, al is dit nauwelijks zichtbaar in Figuur 4.8. Het verschil tussen het eb- (V_{eb}) en vloedvolume (V_{vloed}) is het gevolg van de rivierafvoer. We hebben daarom de parameter $V_{getij} = 0.5 \cdot (V_{eb} + V_{vloed})$ gedefinieerd waarmee we het gemiddelde van het in- en uitgaande getijvolume overhouden. De gemiddelde rivierafvoer van deze som bedroeg ca. $350 \text{ m}^3/\text{s}$ in de Nieuwe Maas en $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ in de Nieuwe Waterweg. Het verschil tussen het eb- en vloedvolume is aanzienlijk ($\sim 20\%$ in de Nieuwe Waterweg en $\sim 15\%$ in de Nieuwe Maas), wat duidt op een aanzienlijke invloed van de rivierafvoer.



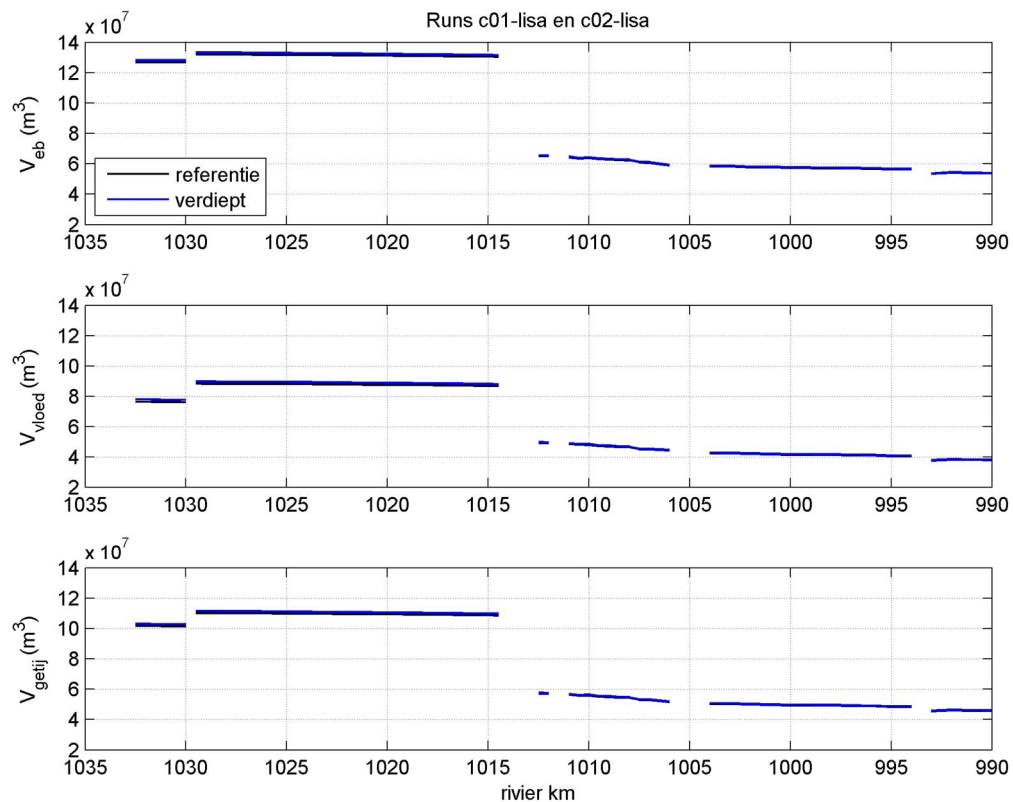
Figuur 4.5 De amplitude en fase van het horizontale (debeten) M2-getij met en zonder verdieping.



Figuur 4.6 De amplitude en fase van het horizontale (debieten) M4-getij met en zonder verdieping.



Figuur 4.7 De relatieve amplitude en fase van het verticale (debieten) M4- en M2-getij.



Figuur 4.8 Het eb- en vloedvolume en het gemiddelde van beide met en zonder verdieping

4.5 Relatie doorstroomoppervlakte - getijvolume

O'Brien (1969) leidde de volgende relatie af tussen het getijprisma P (bij springtij) en de doorstroomoppervlakte A (ten opzichte van gemiddeld zeeniveau):

$$A = \alpha P^\beta \quad (1)$$

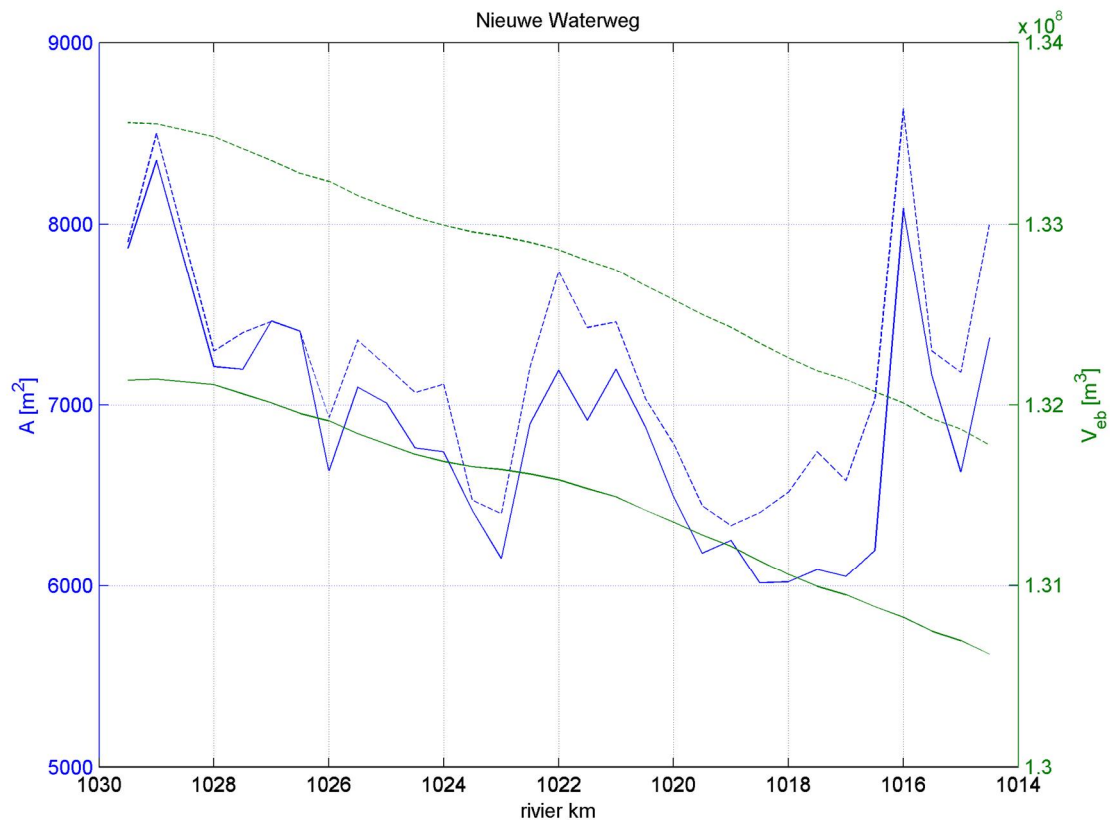
met α en β empirische coëfficiënten. Voor 28 Amerikaanse zeegaten vond O'Brien $\alpha = 4.69 \times 10^{-4}$ en $\beta = 0.85$. Volgens Stive & Rakhorst (2008) is $\beta = 1$ geschikt voor typische zeegaten (zonder rivierafvoer). Verder bovenstrooms, waar het rivierdebiet niet langer verwaarloosbaar is ten opzichte van het getijdebiet, neemt de doorstroomoppervlakte minder sterk af met het getijprisma dan volgens (1). De rivier moet immers ook een zekere doorstroomoppervlakte hebben om het rivierwater af te kunnen voeren. In onderstaande figuren onderzoeken we dan ook de relatie tussen de doorstroomoppervlakte en het ebvolume.

Figuren 4.9 en 4.10 tonen het ebvolume en de doorstroomoppervlakte voor de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas met en zonder verdieping. Voor de Nieuwe Waterweg valt het relatieve grote oppervlak op tussen 1014-1016 km, 1021-1022 en 1028-1029 ten opzichte van het verloop van het ebvolume. Op basis van bovenstaande A - P relatie zijn dit naar verwachting locaties waar sedimentatie optreedt (verkleining A). Hetzelfde geldt ook bij 1010 km in de Nieuwe Maas.

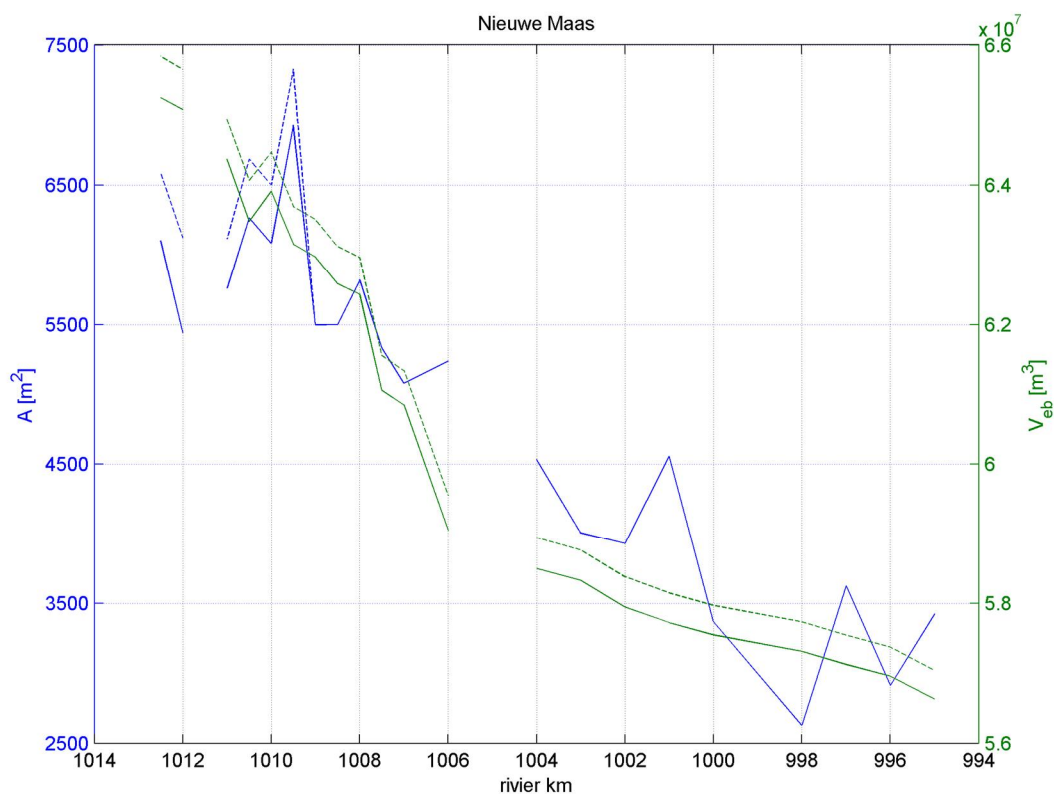
Dit wordt op een andere manier gevisualiseerd in de Figuren 4.11 t/m 4.14 waarin A tegen V_{eb} is uitgezet, waarbij elk punt een raai representeert. Er zijn duidelijk twee groepen datapunten zichtbaar: de Nieuwe Maas (met lage ebvolumes) en de Nieuwe Waterweg (met

hoge ebvolumes). Daarom hebben we voor deze riviertakken ook aparte figuren gemaakt. Bij een evenwichtssituatie volgens Vgl. (1) met een β van rond de 1, zouden de datapunten op een lijn met een hoek van 45° moeten liggen bij deze gelijkoplopende assen. Het is duidelijk dat dit niet het geval is, met uitzondering wellicht van de secties 1006-1009 km en 1010-1013 km in de Nieuwe Maas (blauwe punten). De afwijking van het evenwicht is met name goed zichtbaar in de Nieuwe Waterweg, waar een relatieve grote variatie is in de doorstroomoppervlakte ten opzichte van het ebvolume.

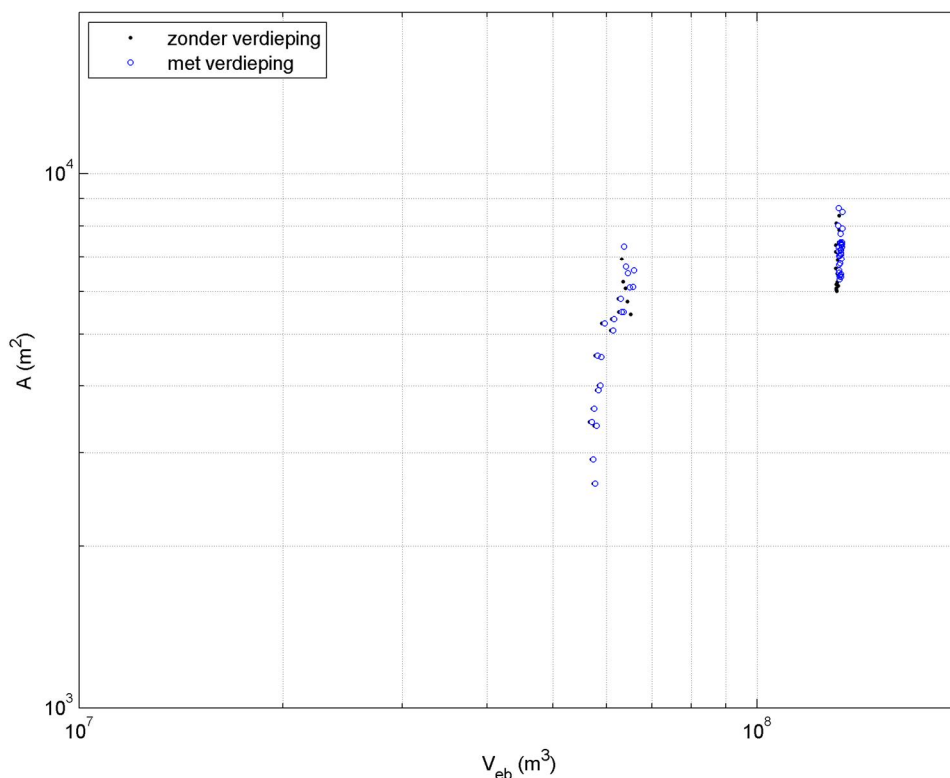
De verdieping zorgt ervoor dat de ebvolumes groter worden; de punten schuiven naar rechts. In de Nieuwe Waterweg schuiven de meeste punten ook naar boven vanwege de toegenomen diepte. Dit is niet zo sterk zichtbaar in de Nieuwe Maas, aangezien maar een paar locaties verdiept worden. Het effect van de verdieping is niet zodanig groot dat het de relatie tussen A en V_{eb} sterk verandert.



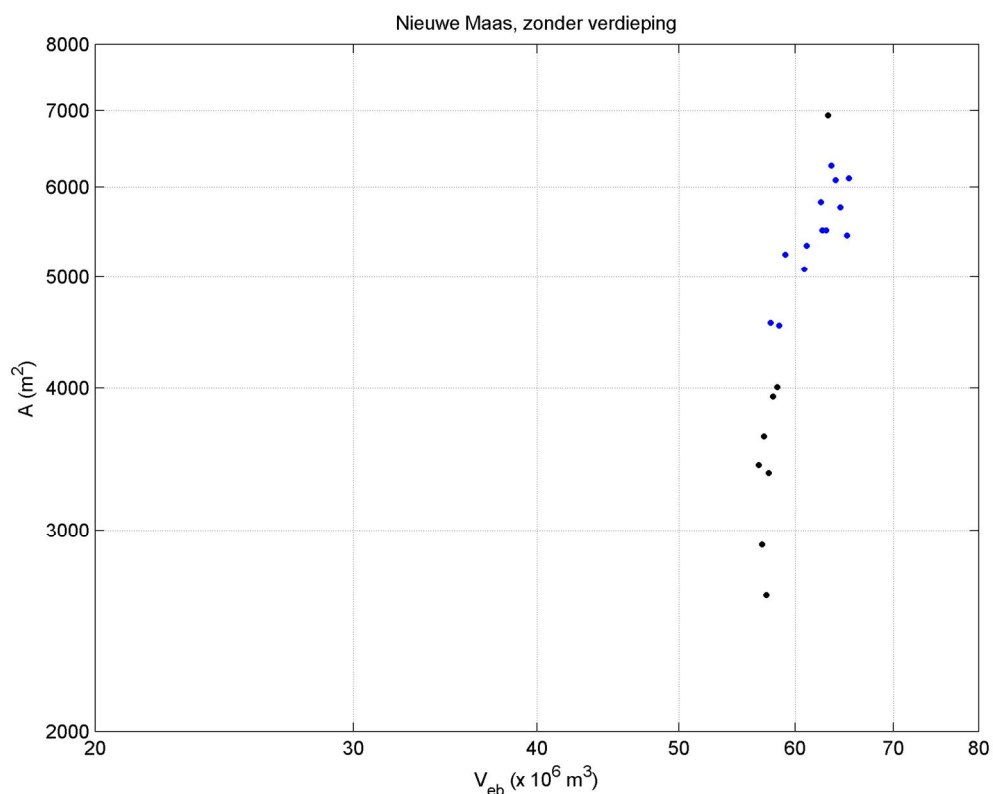
Figuur 4.9 Doorstroomoppervlakte en ebvolume van Nieuwe Waterweg met (gestippelde lijn) en zonder (getrokken lijn) verdieping.



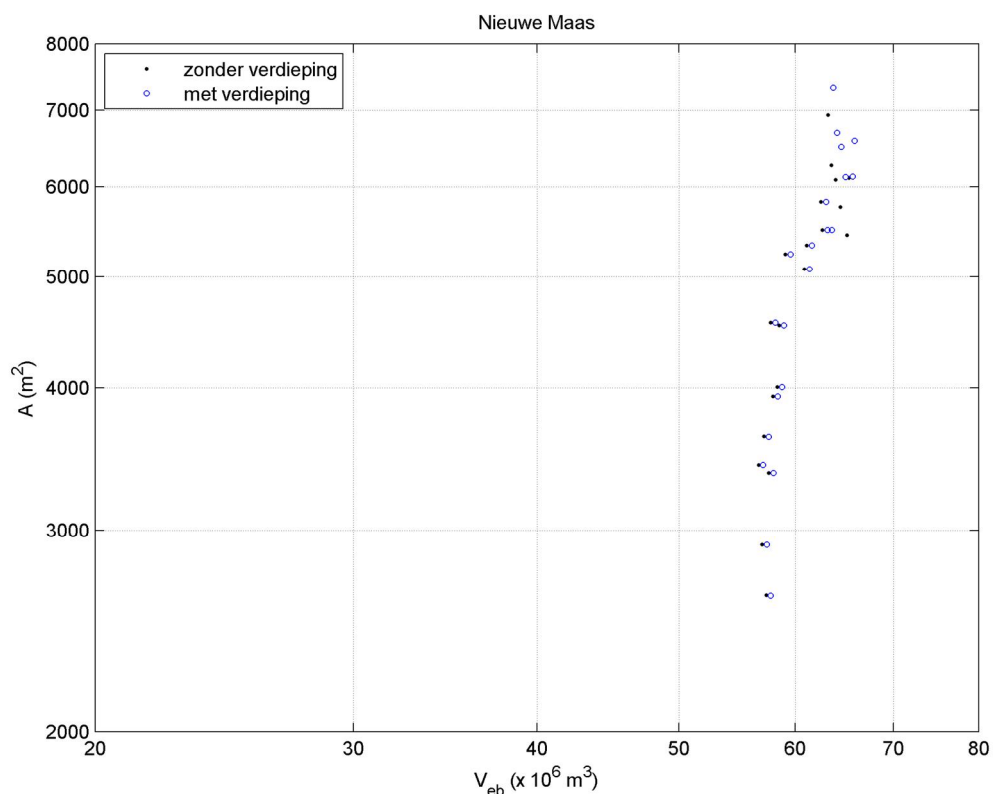
Figuur 4.10 Doorstroomoppervlakte en ebvolume van Nieuwe Maas met (gestippelde lijn) en zonder (getrokken lijn) verdieping.



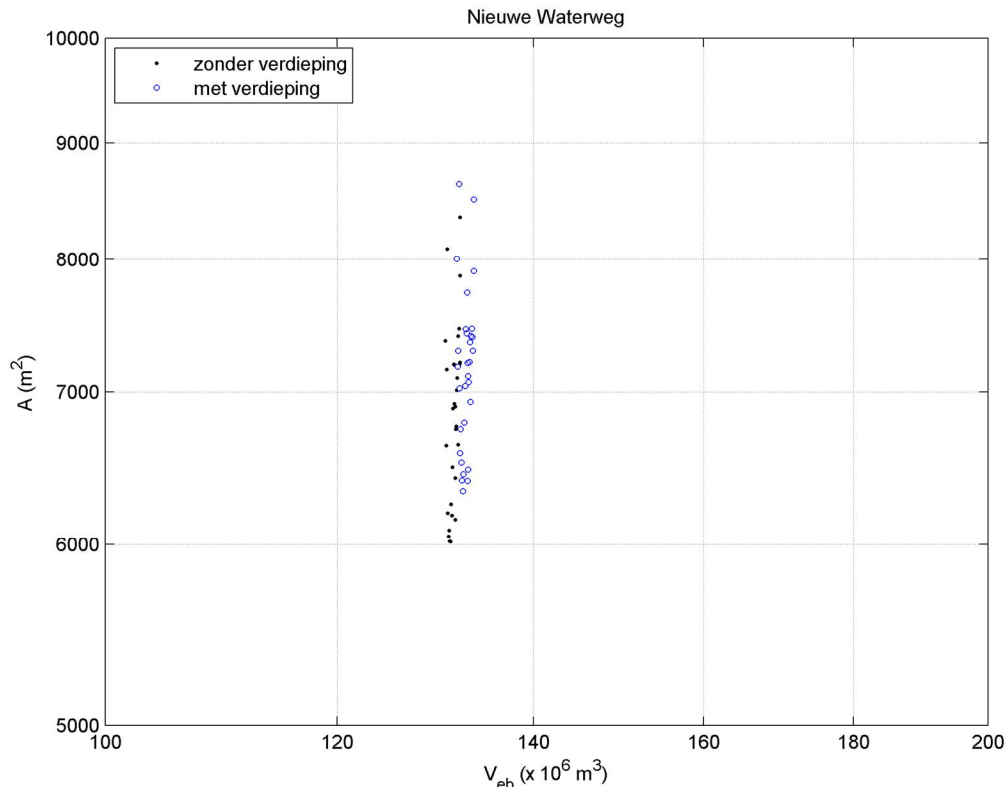
Figuur 4.11 Relatie tussen de doorstroomoppervlakte en het ebvolume van de Nieuwe Waterweg met en zonder verdieping.



Figuur 4.12 Relatie tussen de doorstroomoppervlakte en het ebvolume voor de Nieuwe Maas zonder verdieping. Blauwe punten corresponderen met de secties 1006-1009 km en 1010-1013 km.



Figuur 4.13 Relatie tussen de doorstroomoppervlakte en het ebvolume voor de Nieuwe Maas met en zonder verdieping.



Figuur 4.14 Relatie tussen de doorstroomoppervlakte en het ebvolume voor de Nieuwe Waterweg met en zonder verdieping.

4.6 Samenvatting van effecten op het getij

Door de verdieping neemt lokaal de dwarsdoorsnede toe en de weestand af. Hierdoor neemt de getij-amplitude en het getijvolume toe (met circa 1 tot 2%). In tegenstelling tot wat op basis van eenvoudige beschouwingen mag worden verwacht, neemt ook de getijasymmetrie (licht) toe.

In de Nieuwe Waterweg is geen duidelijk 1:1 verband zichtbaar tussen getijprisma en doorstroomoppervlakte. Dit komt doordat het een kunstmatig, door dijken ingesnoerd estuarium is. Wel zijn er langs de vaargeul duidelijke lokale variaties zichtbaar in de verhouding tussen ebvolume en doorstroomoppervlakte. Voor een gelijke bodemsamenstelling zullen gebieden met een relatief grote doorstroomoppervlakte aanzanden en gebieden met een relatief kleine doorstroomoppervlakte uitschuren.

Ter hoogte van de verdieping neemt het doorstroomoppervlakte sterker toe dan het getijvolume. Stroomafwaarts van de Maeslantkering, waar de bodemdiepte in de huidige situatie al bijna overal -17 m NAP bedraagt, neemt het getijvolume juist sterker toe dan de doorstroomoppervlakte.

De invloed van deze veranderingen op het zandtransport komt in het volgende hoofdstuk aan de bod.

5 Effect op zandtransport

5.1 Inleiding

Om het effect van de verdieping te bestuderen zijn er hydrodynamische berekeningen uitgevoerd met het Zeedeltamodel, met de huidige en de verdiepte bodemligging. Op basis van de uitkomsten van deze berekeningen is er enerzijds gekeken naar de veranderingen in bodemschuifspanningen, getij asymmetrie, saliniteitsverdeling (zie Hoofdstuk 4 en 6), anderzijds zijn op basis van de snelheden de transporten bepaald met een handmatige berekening. Deze informatie is door deskundigen geïnterpreteerd. In dit hoofdstuk wordt de handmatige berekening van de sedimenttransporten gepresenteerd.

Wanneer de bodem verdiept wordt spelen er verschillende effecten een rol.

- Ten eerste verwachten we dat hierdoor de weerstand afneemt en daardoor het getijvolume toeneemt en de getij-asymmetrie afneemt.
- Ten tweede bestaat de verdieping uit het aftoppen van de hoger gelegen delen (zie Figuur 1.1), dit betekent dat in de nieuwe situatie de bodem minder variatie heeft wat kan leiden tot kleinere variaties in de snelheden bij de bodem en wellicht een iets hogere gemiddelde snelheid (kleinere vormweerstand).

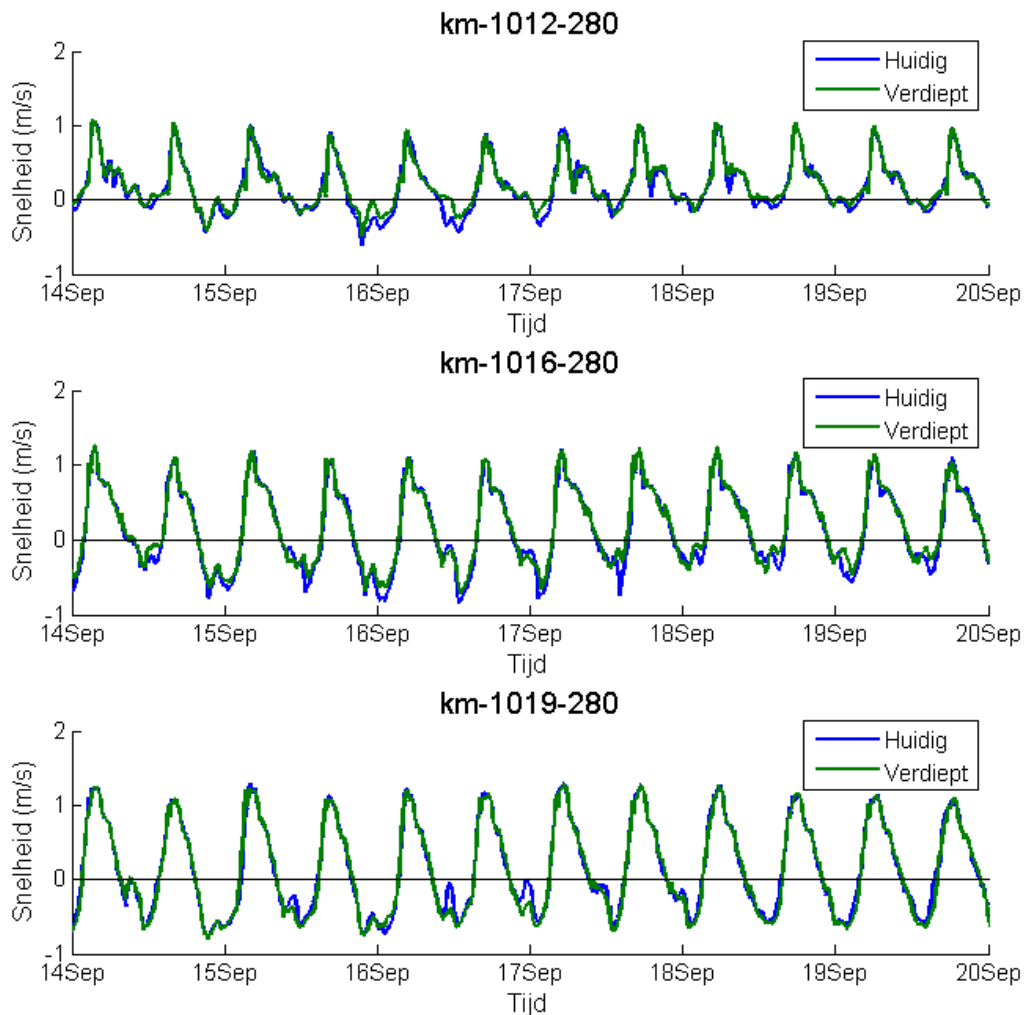
5.2 Snelheden

Voor de sedimenttransporten zijn de snelheden nabij de bodem het meest relevant. Figuur 5.1 geeft een beeld van de snelheden in de negende laag (de tiende laag is de bodem) op een aantal locaties, zowel voor de huidige als de verdiepte situatie. Positieve snelheid betekent landwaarts en negatieve snelheid zeewaarts. De snelheden variëren met het getij en zijn gemiddeld positief (landwaarts). Het effect van de verdieping op de snelheden varieert per tijd en locatie. Om hier een beter beeld van te krijgen is gekeken naar de veranderingen in de gemiddelde snelheden, de gemiddelde positieve snelheden, gemiddelde negatieve snelheden en de maximale veranderingen die optreden. Deze veranderingen zijn samengevat in Figuur 5.2. Gemiddeld genomen veranderen de snelheden met hooguit 0.03 m/s. Zoals blijkt uit de figuur kan deze verandering zowel een toename als een afname zijn, afhankelijk van de locatie. Het is niet het geval dat over het hele gebied of op alle locaties van de aftopping de snelheden homogeen afnemen of toenemen.

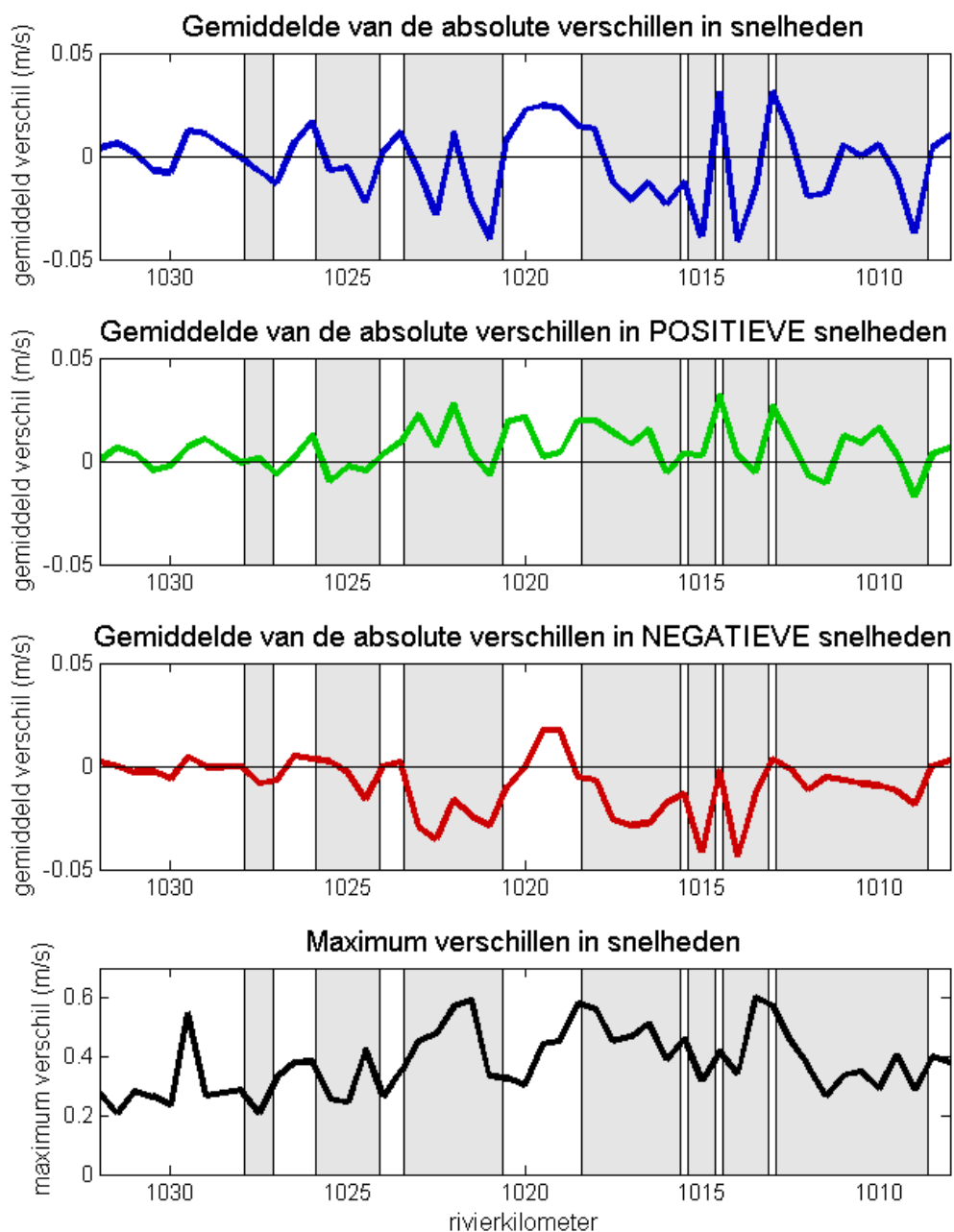
Gezien het hier een estuarium betreft, zijn de snelheden gedurende een deel van de getijperiode landwaarts (positief) gericht en een deel van de periode zeewaarts (negatief) gericht. Het is daarom nuttig om de effecten op de snelheid uit te splitsen in positieve en negatieve snelheid.

Positieve snelheden lijken gemiddeld iets toe te nemen, negatieve snelheden lijken gemiddeld iets af te nemen, vooral op locaties waar de bodem verdiept is.

Maximale verschillen zijn veel hoger en kunnen oplopen tot 0.6 m/s, deze hoge waarden komen slechts af en toe voor en kunnen het effect zijn van een asynchrone stroming waarbij het model in de verdiepte situatie net even later de pieksnelheid bereikt dan in de huidige situatie.



Figuur 5.1 Snelheden in de negende laag voor een aantal locaties in de Nieuwe Waterweg, voor zowel de huidige en verdiepte situatie. Positieve snelheid betekent landwaarts en negatieve snelheid zeewaarts.



Figuur 5.2 Verandering in de snelheden verdiepte situatie t.o.v. huidige situatie. Bovenste figuur: gemiddelde van alle snelheden. Tweede figuur: gemiddelde van alle positieve (landwaartse) snelheden. Derde figuur: gemiddelde van alle negatieve (zeewaartse) snelheden. Onderste figuur: de maximale verschillen. De gearceerde grijze vlakken geven aan waar verdieping (aftopping) plaatsvindt.

5.3 Sedimenttransporten

Het berekenen van sedimenttransporten op basis van snelheden gaat via een transportformule. Deze transportformules zijn empirische formules. In het boek van De Vries (De Vries 1993) wordt een aantal van deze formules vergeleken: Engelund and Hansen (1967), Ackers and White (1973, 1980), Van Rijn (1982, 1984) en Kari mand Kennedy (1983). Voor de gegeven voorbeelden blijkt dat Engelund and Hansen gemiddeld genomen het meest accuraat is. Verder blijkt uit een voorgaande studie in de Nieuwe Waterweg dat andere transportformules (onder andere Van Rijn, 1984, en Van Rijn, 2007) vergelijkbare resultaten opleveren voor de Nieuwe Waterweg (Van der Kaaij, 2010). In de huidige studie is daarom gekozen om wederom gebruik te maken van Engelund Hansen.

De formule luidt als volgt:

$$S = S_b + S_{s,eq} = \frac{0.05\alpha q^5}{\sqrt{g}C^3\Delta^2 D_{50}}$$

Met

α = calibratie coefficient.

q = de snelheid (m/s)

g = de valversnelling (m/s²)

C = de Chezy ruwheid (m^{1/2}/s)

$\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_s$, de dichtheid van sediment (ρ_s) en de dichtheid van water (ρ_w).

D_{50} = korreldiameter (m) waarbij 50% van het sediment fijner is.

In de analyse is gekozen voor $\alpha = 1$, $C = 53 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$, $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$. In het interesse gebied varieert de D_{50} , zoals te zien is in Figuur 5.3. De D_{50} is weergegeven in blauw, met de linker-as als bijbehorende as. Op de rechter-as staan de percentages voor de sedimentfracties grind (gele symbolen), zand (paars), silt (groen) en lutum (rood).

In de grafiek is te zien dat de waarde voor de D_{50} varieert in het gebied tussen de 50 en de 350 μm en toeneemt richting zee als gevolg van een hoger percentage zand. Om deze trend weer te geven in de berekening is gekozen voor een lineaire fit.

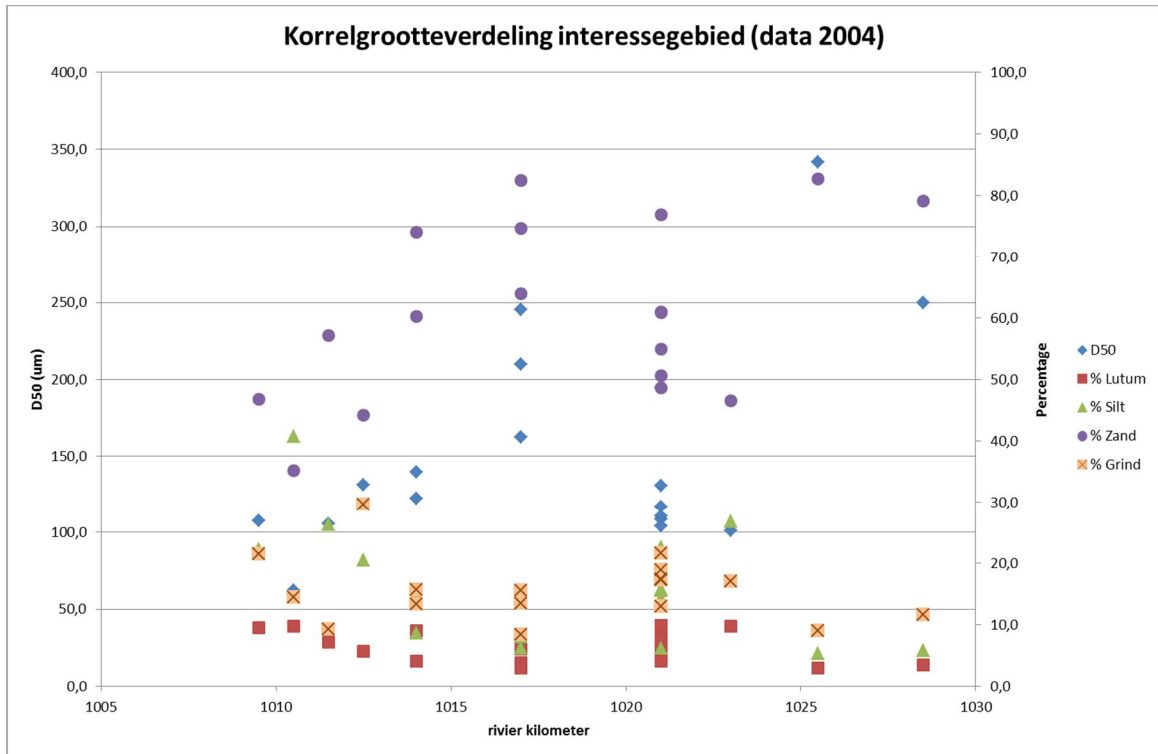
Verder is in lijn met de analyse die toegepast is in het onderzoek naar het herstel van de trapjeslijn (van der Kaaij, 2010) gekozen voor de snelheid in de negende laag als de representatieve snelheid (de tiende laag is de bodem). Gezien transportformules rekenen met een diepte gemiddelde snelheid, moet deze snelheid in de negende laag worden omgerekend naar de diepte gemiddelde snelheid, de factor is 1.1 zodat $v_{\text{gemiddeld}} = 1.1 \cdot v_9$. De snelheid in de tiende en onderste laag is hiervoor minder geschikt omdat deze minder representatief is voor de dieptegemiddelde snelheid.

De resulterende transportcapaciteiten zijn weergegeven in Figuur 5.4. In de bovenste figuur staan de netto transportcapaciteiten voor twee spring-doodtij cycli (29.6 dagen), welke goed overeenkomen met de eerder berekende waarden in (van der Kaaij, 2010). Verder zijn ze in het hele studiegebied landwaarts gericht.

De bruto transportcapaciteiten staan in de tweede (landwaartse capaciteiten) en derde figuur (zeewaartse capaciteiten). Doordat de transporten schalen met de macht 5 van de snelheid zijn de landwaartse transporten vele malen hoger dan de zeewaartse transporten.

In de verdiepte situatie blijft de sedimenttransportcapaciteit redelijk vergelijkbaar, hoewel percentuele verschillen op kunnen lopen tot 100 % (Figuur 5.5). Vooral de negatieve transporten nemen percentueel gezien af. Dit is in overeenstemming met de observatie dat de negatieve snelheden gemiddeld ook lijken af te nemen. De zeer lichte gemiddelde

toename in de positieve snelheden vertaalt zich in een lichte toename in de positieve sedimenttransporten.



Figuur 5.3 Sedimentsamenstelling Nieuwe Waterweg en stukje van de Oude Maas op basis van data uit het rapport "Kwaliteit Onderhoudsbaggerspecie" (Wensveen 2004). De D50 is weergegeven in blauw, met de linker-as als bijbehorende as. Op de rechter-as staan de percentages voor de sedimentfracties grind(gele symbolen, >2 mm), zand (paars, tussen 64 µm en 2 mm), silt (groen, tussen 2 en 64 µm) en lutum (rood, < 2 µm).

Uiteindelijk gaat het om de vraag of erosie of sedimentatie toe- of afneemt. Een toegenomen sedimentatie levert potentieel meer onderhoud op, een toegenomen erosie kan leiden tot het ontstaan van erosiekuilen of het verdiepen van bestaande erosiekuilen (zie Hoofdstuk 2).

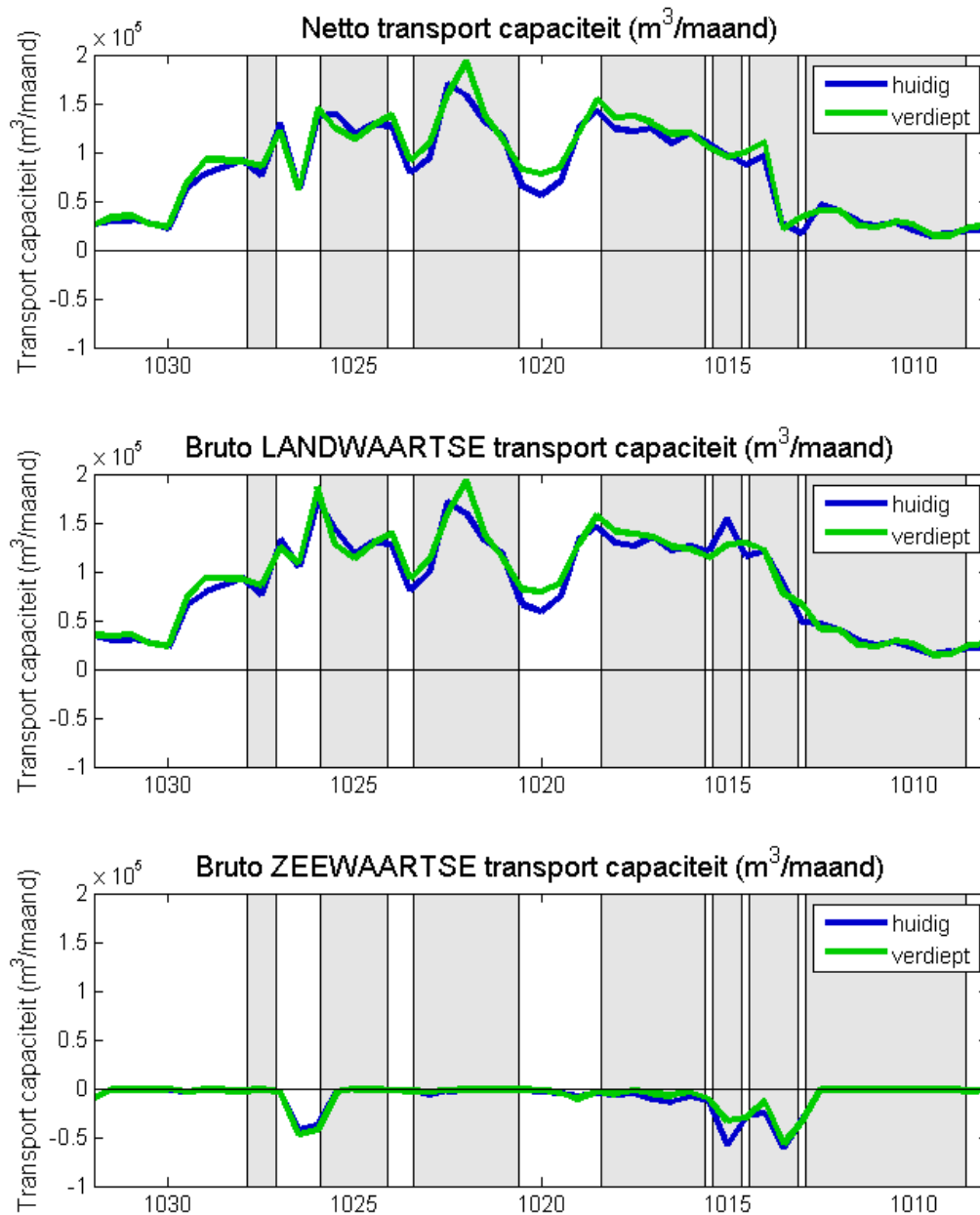
Via de Exner vergelijking kunnen sedimenttransporten worden omgerekend naar erosie en sedimentatie:

$$(1 - \varepsilon_p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} = 0$$

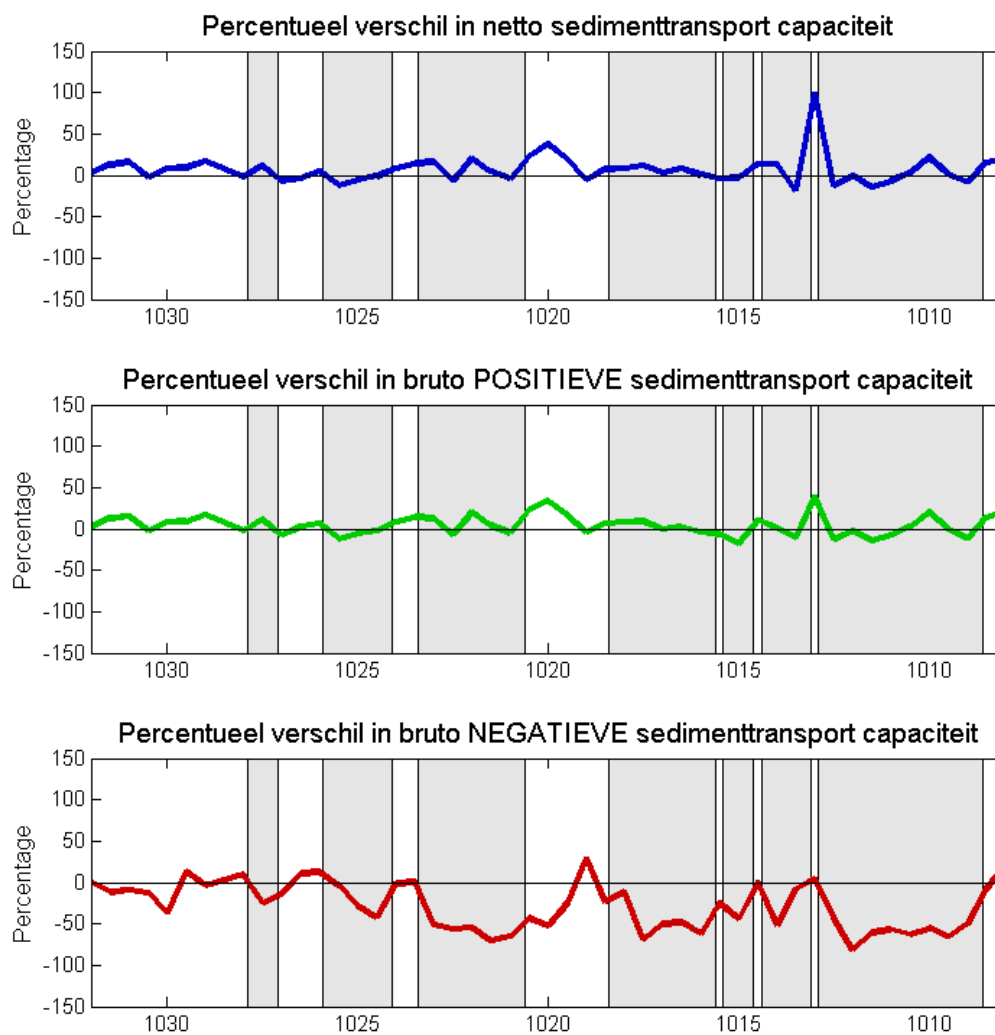
Hierin is ε_p de porositeit, z_b de bodemhoogte en S de sedimenttransportcapaciteit. Voor de porositeit is een waarde van 0.4 gekozen.

Per tijdstap in de berekening (10 minuten), is het effect op de bodemligging uitgerekend. Deze is vervolgens gesommeerd. Het resultaat is gepresenteerd in Figuur 5.6.

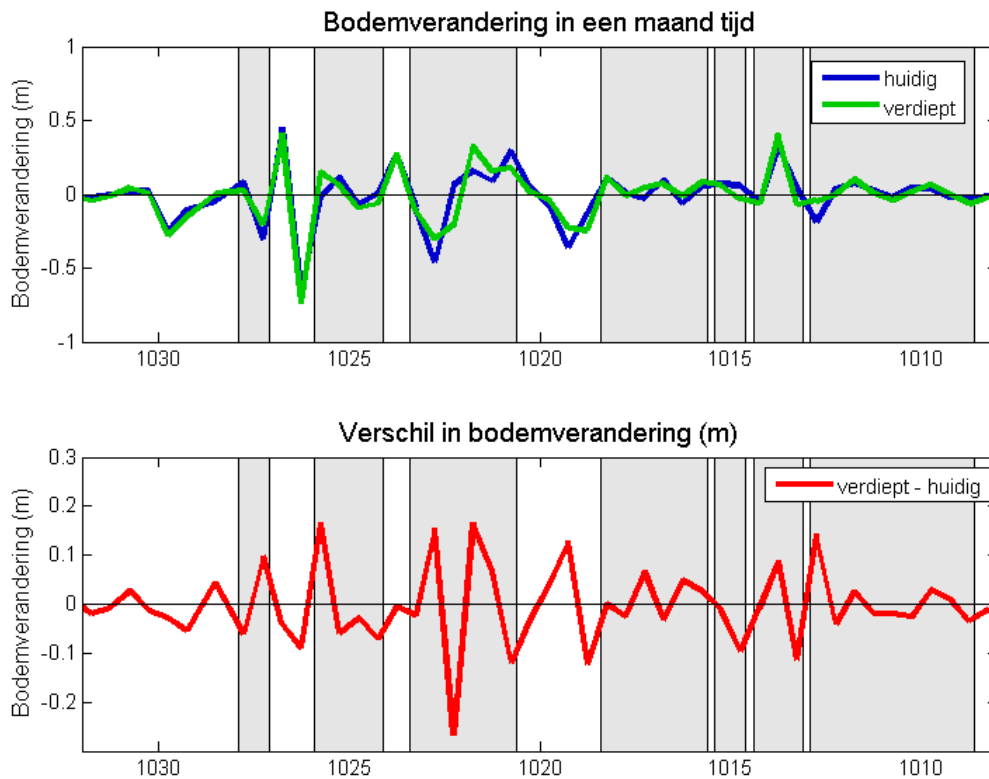
De trend in de bodemveranderingen blijft in de verdiepte situatie globaal hetzelfde. Op sommige locaties lijkt erosie of sedimentatie toe of juist af te nemen. Over het hele interessegebied neemt sedimentatie gemiddeld licht af (~1% van het huidige volume), terwijl erosie licht toe lijkt te nemen (~1.5%).



Figuur 5.4 Transportcapaciteiten voor de huidige en de verdiepte situatie. Er is gemiddeld over twee spring-doodtij cycli (29,6 dagen). In de bovenste figuur staan de netto transporten, de middelste de bruto landwaartse transporten en in de onderste figuur staan de bruto zeewaartse transporten.



Figuur 5.5 Percentuele verschillen in de transportcapaciteit: $\text{percentage} = 100 \times (\text{verdiept} - \text{huidig}) / \text{huidig}$.



Figuur 5.6 Bodemveranderingen in een maand tijd.

5.4 Discussie en conclusies

De verdieping lijkt maar een klein effect te hebben op de snelheden. Door de schaling van de sedimenttransportcapaciteit met de macht 5 van de snelheid, kunnen kleine verschillen in snelheid een versterkt effect hebben op de transportcapaciteit. Lokaal treden ook aanzienlijke verschillen op in de transportcapaciteit, maar de globale trends blijven gelijk. Dit vertaalt zich vervolgens in kleine verschillen in de totale erosie en sedimentatie, waarbij sedimentatie licht lijkt af te nemen ($< 1\%$) en erosie iets lijkt toe te nemen ($> 1.5\%$). Wel neemt door de verdieping het bodemareaal flink toe waar aanzanding direct resulteert in de noodzaak tot onderhoudsbaggerwerk. In de huidige situatie is een groot deel van de vaargeul immers aanmerkelijk dieper dan -15 m NAP, aanzanding leidt hier nu niet direct tot baggeronderhoud. Na aanleg van de verdieping ligt een groot deel van de vaargeul op -17 m NAP, aanzanding leidt hier wel direct tot baggeronderhoud. Dit effect kan ertoe leiden dat hoewel het totale volume aanzanding in de Nieuwe Waterweg nauwelijks verandert, er toch meer baggeronderhoud nodig is, met name kort na aanleg van de verdieping. Na verloop van tijd stelt zich een nieuw evenwicht in waarbij lokale herverdeling van sediment niet langer dominant is, maar de aanvoer van sediment over de randen van de verdiepte sectie.

Voor een beschouwing van het netto transport over de grenzen van de verdiepte sectie geldt dat de netto aanzanding in deze sectie gelijk is aan het verschil in netto sedimenttransport tussen de land- en zeewaartse sectiegrens. Figuur 5.4 toont dat de netto transportcapaciteit toeneemt vanaf Hoek van Holland tot ongeveer km 1022 en vervolgens weer afneemt tot km 1010. Zeewaarts van km 1022 wordt daarom netto erosie verwacht en landwaarts van dit punt netto depositie. Inderdaad laat de bodemanalyse (Hoofdstuk 2) zien dat de bodem erodeert zeewaarts van km 1018 en stabiel is landwaarts van dit punt. Door vaargeulonderhoud komt de bodem hier in de praktijk niet omhoog. Door de verdieping neemt

het netto (en met name landwaarts gerichte) transport licht toe. Doordat het netto transport verder landinwaarts marginaal minder sterk toeneemt, mag gemiddeld over de sectie km 1022 – km 1010 iets meer aanzanding worden verwacht en over de sectie km 1030 – km 1022 iets meer erosie. Procentueel zijn de verschillen in netto transportcapaciteit, die de aandrijvende kracht zijn voor sedimentatie en erosie, beperkt (orde 10%), zie Figuur 5.3.

De onzekerheden in de lokale berekeningen zijn aanzienlijk en worden veroorzaakt door onder andere de volgende aannames:

- Grove ruimtelijke resolutie nabewerking snelheden (500 m)
- De aanname dat de snelheid in het midden van de rivier representatief is voor de hele rivier. Transportcapaciteiten worden hiermee overschat, de transportcapaciteit in het midden van de rivier wordt namelijk vermenigvuldigd met de totale breedte, terwijl de snelheden niet gelijk zijn over de hele breedte en af zullen nemen richting de oevers.
- Onzekerheid bij de aantakking van de Oude Maas (bij rivierkilometer (rkm) 1013). Hier is de stroming complex en varieert in richting en tijd. Hier is in de huidige analyse geen rekening mee gehouden.
- Deze berekening is niet geschikt voor slib, het effect van de verdieping wordt daarom in een ander hoofdstuk besproken.
- De waarde voor de D50.
- De gekozen randvoorwaarde voor de afvoer.

Gezien deze onzekerheden moeten deze berekeningen als indicatief worden gezien en kunnen er geen conclusies worden getrokken over absolute getallen in de vorm van toename of afname in baggervolumes. Wel kan gesteld worden dat gezien de huidige analyse het effect op de baggervolumes klein lijkt, met name nadat zich een nieuw lokaal evenwichts-bodemprofiel heeft ingesteld rond de -17 m NAP. Het wordt aanbevolen om deze conclusies verder te onderbouwen met sedimenttransportberekeningen met Delft3D.

6 Effect op slibtransport

Voor een eerste inschatting van het effect van de verdieping op het slibtransport en aanslibbing (b.v. in de Botlekhaven) wordt gebruik gemaakt van de resultaten van de hydrodynamische berekeningen (zie Hoofdstuk 3 en 4) en van bestaande kennis van de slibdynamiek in de Nieuwe Waterweg. Deze is samengevat en aangevuld met nieuwe inzichten in het proefschrift van De Nijs (2012) en enkele daaraan gerelateerde artikelen (o.a. De Nijs et al., 2010). Aspecten van de hydrodynamica die in eerdere hoofdstukken nog niet aan bod zijn gekomen maar die wel belangrijk zijn voor de slibdynamiek zijn bodemschuifspanning en zoutverdeling. Deze worden daarom eerst besproken, daarna komt de invloed op de slibdynamiek aan bod.

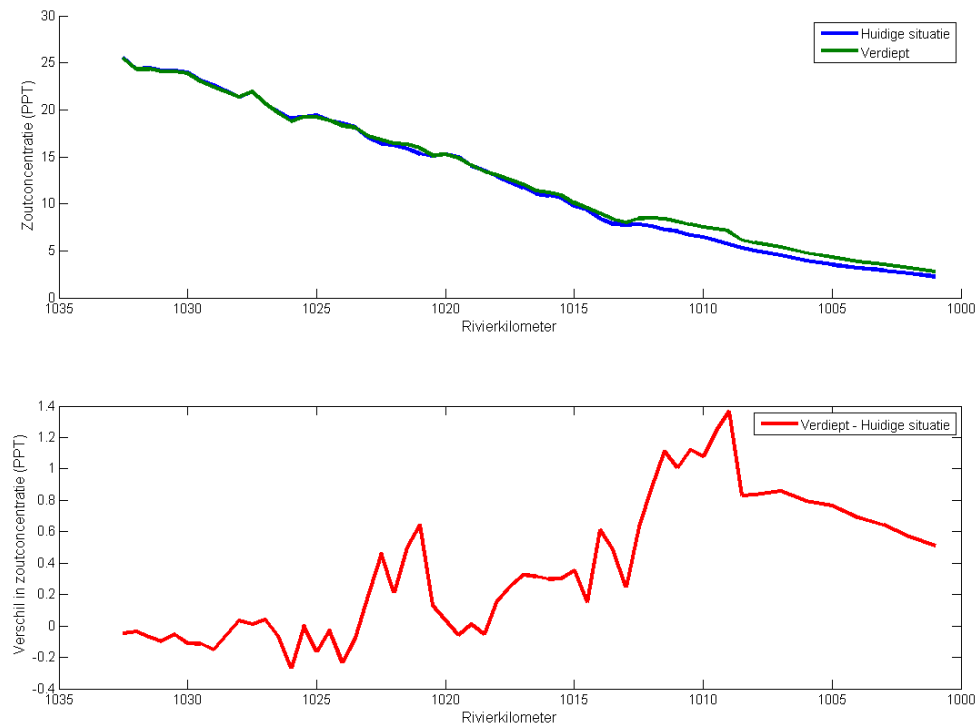
6.1 Effect op saliniteit en bodemschuifspanning

Figuur 6.1 toont de tijd- en dieptegemiddelde saliniteit langs de vaargeul tussen Hoek van Holland en Rotterdam (rkm 1033 – 1001) zoals berekend met het 3D-Zeedeltamodel. Hieruit blijkt dat de tijd- en dieptegemiddelde saliniteit weinig verandert tussen rkm 1033 en rkm 1014. Voor rkm < 1014 neemt de saliniteit door de verdieping toe met circa 1 ppt. De zoetwaterafvoer bij Lobith is tijdens de berekende periode 1580 m³/s

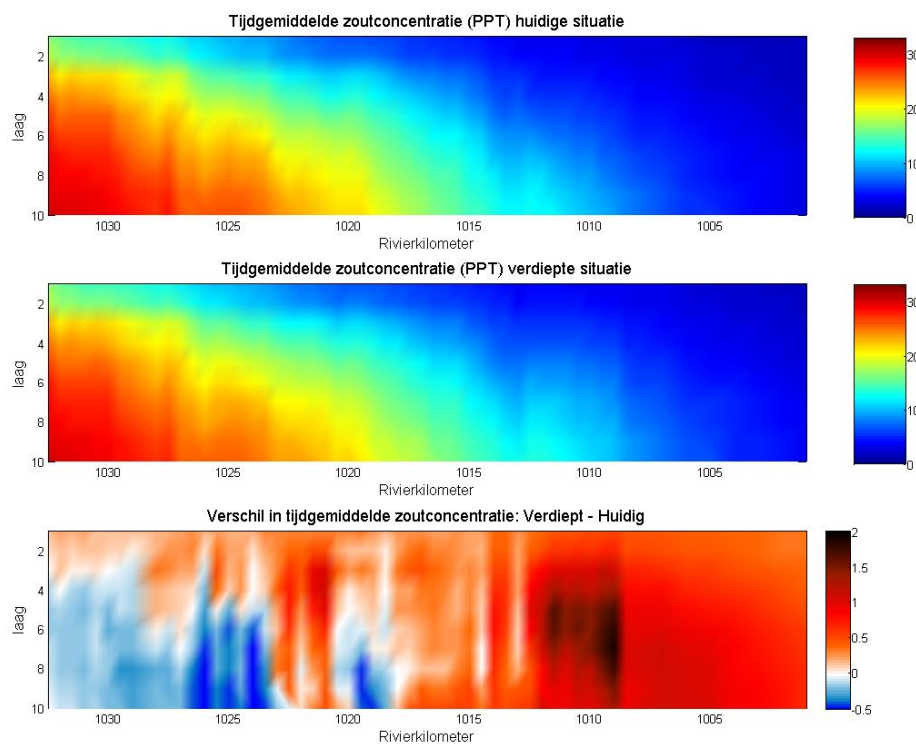
Figuur 6.2 toont dezelfde tijdgemiddelde informatie als Figuur 6.1, maar nu is de dieptemiddeling niet toegepast. Hieruit blijkt dat de gelaagdheid voor rkm > 1018 afneemt bij verdieping: bovenin de waterkolom neemt de saliniteit iets toe, bij de bodem neemt de saliniteit iets af. Deze verandering is overigens klein, typisch enkele tienden ppt toe- en afname met een maximum van circa 0.5 ppt. Op zich is deze afname van de stratificatie verrassend, aangezien bij verdieping eerder een toename zou worden verwacht. Een verklaring zou kunnen zijn dat voor rkm > 1018 de verdieping relatief beperkt is (de meeste bodemveranderingen vinden verder stroomopwaarts plaats), terwijl het getijdebiet hier wel is toegenomen. Lokaal domineert de toename van de getij-energie blijkbaar over de toename van de diepte. Verdere analyse van dit resultaat wordt echter aanbevolen.

Tussen rkm 1012 en 1008 is de toename van de saliniteit het sterkste. De zoutgradiënt tussen oppervlakte en bodem verandert hier weinig, maar de saliniteit halverwege de waterkolom neemt aanmerkelijk toe (> 2 ppt). Voor rkm < 1008 is de toename geringer maar wel meer geconcentreerd bij de bodem, waardoor de stratificatie licht toeneemt. De sectie rkm 1012 – 1008 is precies gelegen tussen de splitsing Oude Maas en de Beneluxtunnel, waar de verdieping het grootst is (zo'n 1.5 tot 3 m).

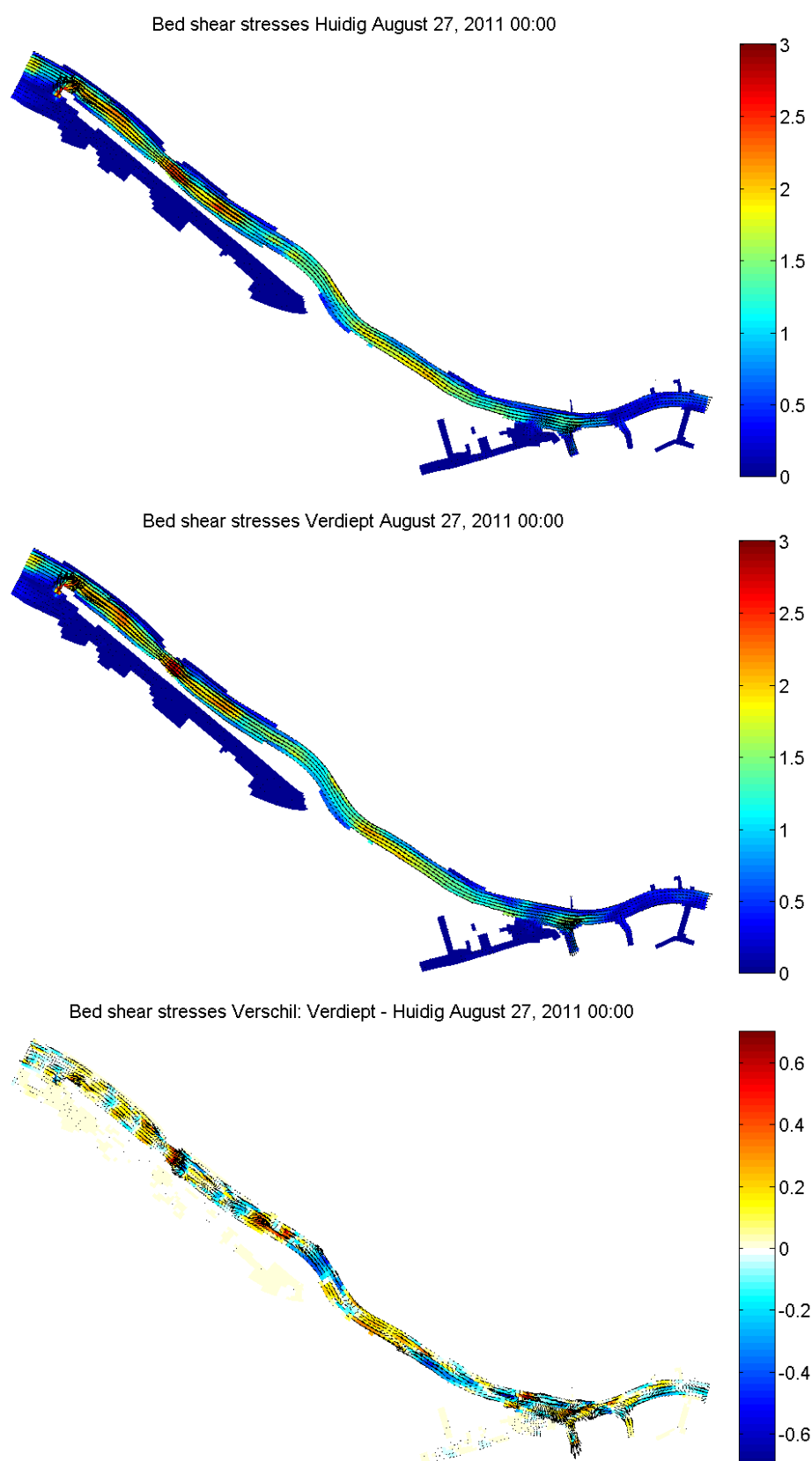
Figuur 6.3 toont de bodemschuifspanning met en zonder verdieping (en het verschil hiertussen) op een specifiek tijdstip, namelijk rond maximale ebsnelheid. In de Nieuwe Waterweg bedraagt de bodemschuifspanning enkele Pa, terwijl deze in de havenbekkens veel lager is. Dit betekent dat slib dat zich rond kentering heeft afgezet op de bodem van de Nieuwe Waterweg hierna snel weer resuspendeert, terwijl in de havenbekkens permanente depositie kan optreden. De verdieping verandert deze tweedeling niet, de bodemschuifspanning in de Nieuwe Waterweg blijft op een hoog niveau. De sectie tussen de splitsing Oude Maas en de Beneluxtunnel is hierbij wel een aandachtspunt, omdat de schuifspanningen hier lager zijn en de verdieping relatief het grootst is.



Figuur 6.1: Tijd- en dieptegemiddelde saliniteit in de Nieuwe Waterweg met en zonder verdieping.



Figuur 6.2: Tijdgemiddelde saliniteit in de Nieuwe Waterweg met en zonder verdieping.



Figuur 6.3: Bodemschuifspanning ongeveer tijdens maximale ebsnelheid. Met en zonder verdieping en verschil hiertussen.

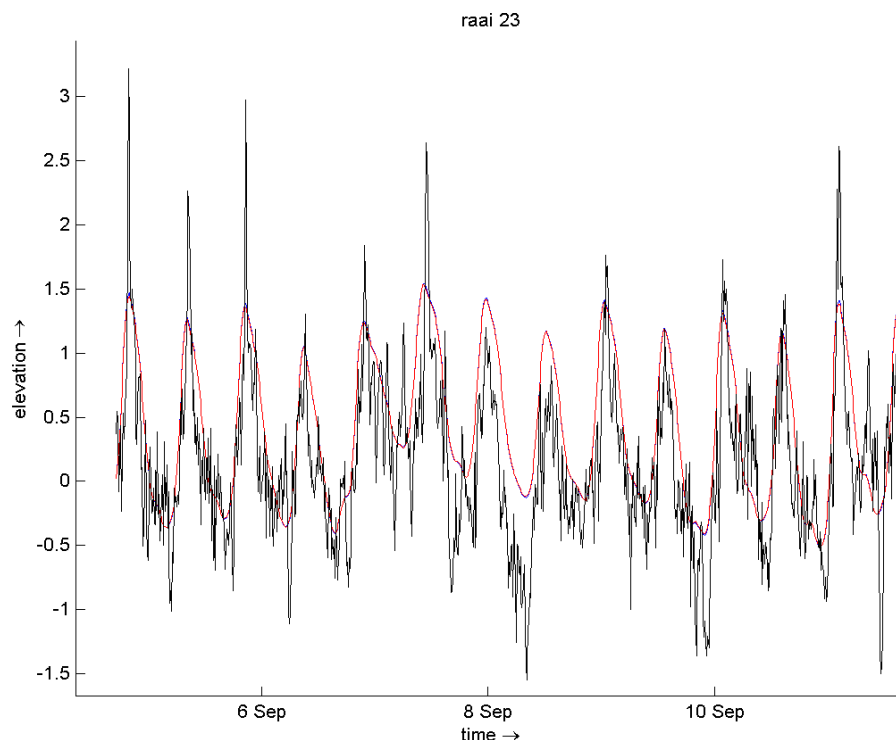
6.2 Uitwisseling met de Botlekhaven

In de onderstaande Figuren worden berekende tijdreeksen getoond voor de parameters waterstand, snelheid en saliniteit middenin de vaargeul ter hoogte van de Botlekhaven. Deze resultaten dienen als invoer voor de analyse van de aanslibbing in de Botlekhaven. De snelheid en saliniteit worden zowel aan het oppervlak als aan de bodem getoond.

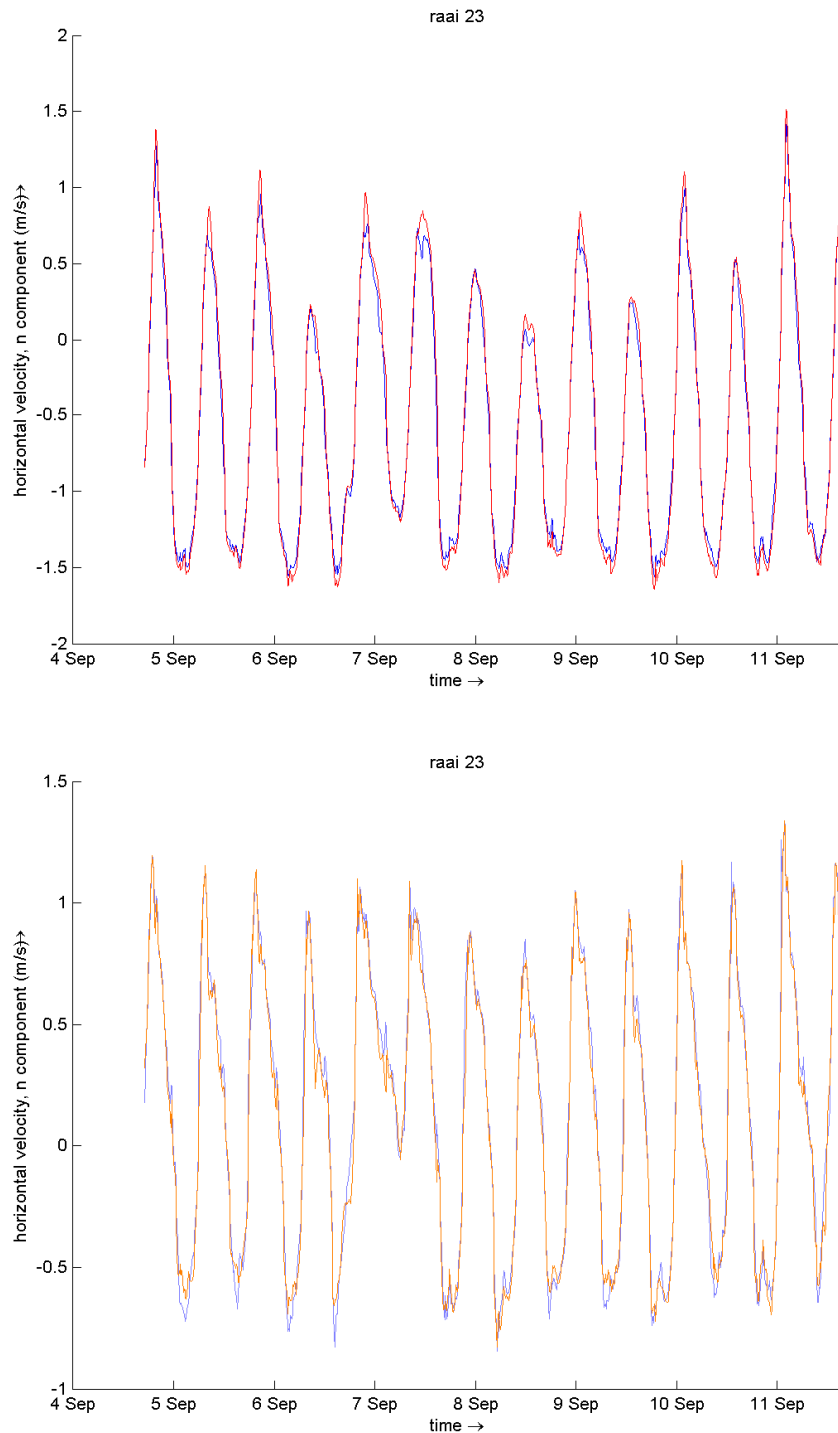
Figuur 6.4 toont het waterstandsverschil tussen de berekening met en zonder verdieping. Tijdens vloed neemt de waterstand toe met zo'n 1 tot 3 cm, tijdens eb neemt de waterstand af met zo'n 0.5 tot 1.5 cm. De getijslag neemt toe met zo'n 2 tot 4 cm ofwel zo'n 1 tot 2%. Hierdoor neemt de getij-uitwisseling met de Botlekhaven met eenzelfde percentage toe.

Figuur 6.5 toont de stroomsnelheid bij de Botlekhaven. Bovenin neemt de maximale stroomsnelheid iets af, zowel bij eb als bij vloed. Onderin neemt de maximale vloedsnelheid meestal iets toe, maar de maximale ebsnelheid meestal iets af. De snelheid van de neer in de havenmonding zal hierdoor nauwelijks veranderen. Toch neemt de uitwisseling door neervorming toe, doordat de bodem in de monding van de Botlek zo'n 2 m (meer dan 10%) dieper wordt. Door de neer kan dus ook zo'n 10% meer volume worden uitgewisseld.

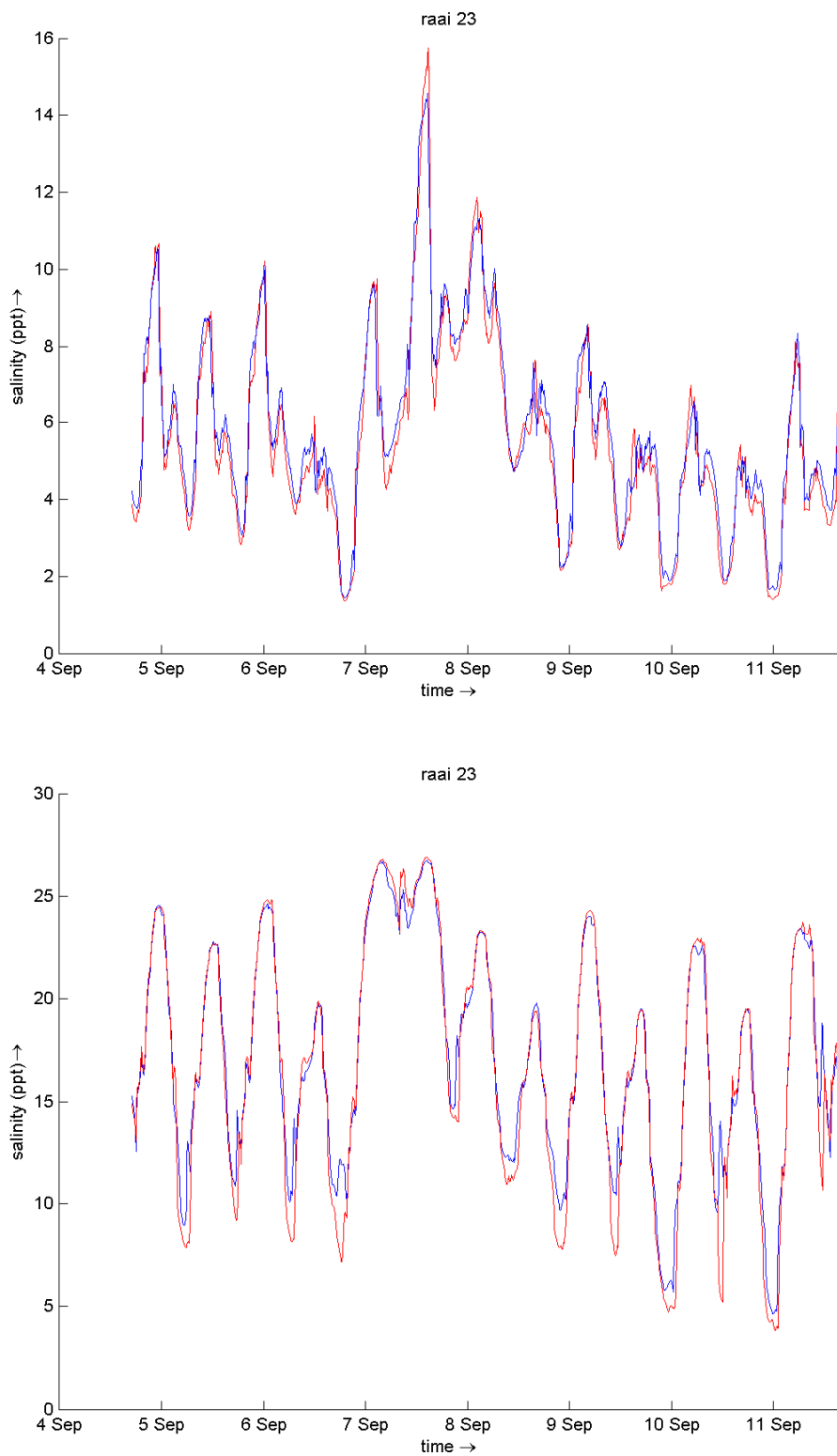
Figuur 6.6 toont de saliniteit boven- en onderin de vaargeul ter hoogte van de Botlek. Hieruit blijkt dat verschil in saliniteit tussen eb en vloed iets afneemt bij verdieping. Hiermee neemt de aandrijvende kracht voor dichtheidsgedreven uitwisseling tussen de vaargeul en Botlekhaven ook iets af. Wel neemt de diepte toe, die ook sterk bepalend is voor de dichtheidsgedreven uitwisseling (Eysink, 1999). De combinatie van beide factoren resulteert waarschijnlijk in een uitwisseling die na verdieping orde 10% groter is geworden. Indien de slibconcentratie niet verandert, neemt de aanslibbing met hetzelfde percentage toe. De verdieping kan echter leiden tot een gewijzigde slibconcentratie, zie §6.3.



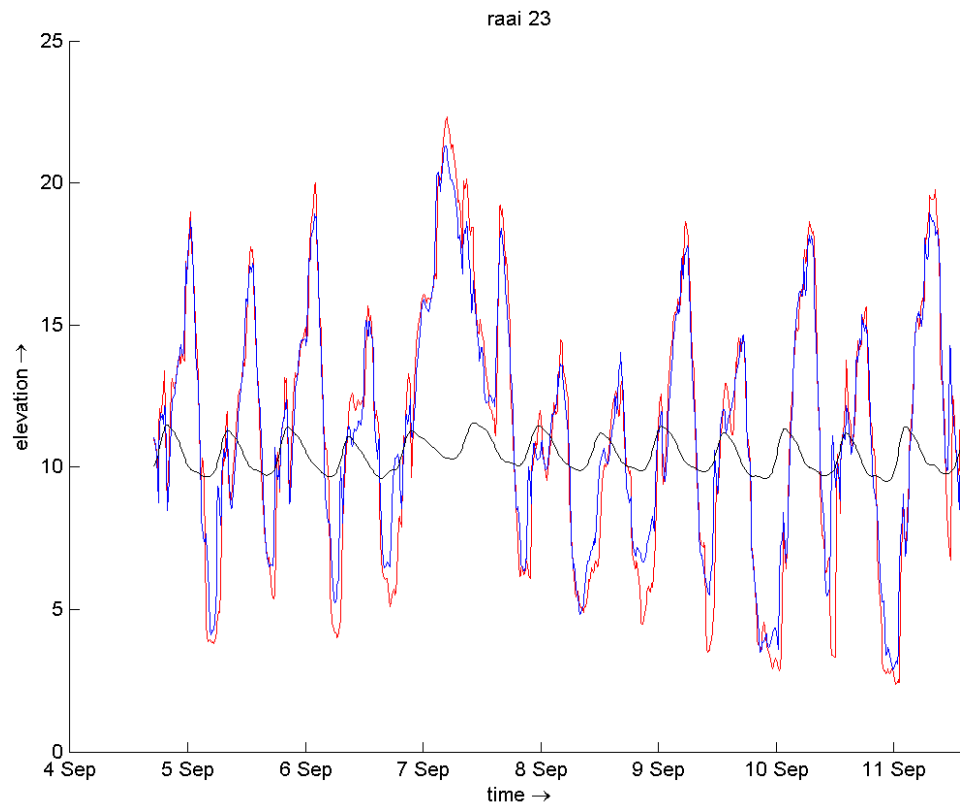
Figuur 6.4: Waterstandsverschil (zwarte lijn, in cm) bij Botlek (verdiept-huidig) en waterstand (rode lijn, in m) bij Botlek voor huidige situatie.



Figuur 6.5. Snelheid boven- en onderin de vaargeul met (blauw) en zonder (rood) verdieping ter hoogte van de Botlekhaven. Bovenzijde = bij oppervlak; onderzijde = bij bodem.



Figuur 6.6. Saliniteit boven- en onderin de vaargeul met (blauw) en zonder (rood) verdieping ter hoogte van de Botlekaven. Bovenzijde = bij oppervlak; onderzijde = bij bodem.



Figuur 6.7. Saliniteitsverschil bodem – oppervlak in de vaargeul ter hoogte van de Botlekhaven. Rood = huidige bodem, blauw = met verdieping.

6.3 Effect verdieping op de slibdynamiek Nieuwe Waterweg

Voor het begrip van de slibdynamiek in de Nieuwe Waterweg is het noodzakelijk om onderscheid te maken tussen het aanbod van slib (d.w.z. transport van slib naar het gebied toe) en de invang van slib (d.w.z. lokale afzetting). Een veranderende aanslibbing kan zowel veroorzaakt worden door een veranderd aanbod als een veranderende invang, of een combinatie van beide.

Uit metingen en analyse door De Nijs (2012) wordt geconcludeerd dat het huidige troebelingsmaximum van slib ('ETM') voornamelijk wordt gevormd door fluviatiel slib dat 'uitsneeuwt' in de gelaagde Nieuwe Waterweg en zodra het de bodemlaag bereikt weer stroomopwaarts wordt getransporteerd in de zouttong. Hoewel het slib zich rond kentering kan afzetten op de bodem van de Nieuwe Waterweg, wordt het hierna weer allemaal snel geresuspendeerd vanwege de hoge getijsnelheid die hier optreedt. Water en slib wisselen ieder getij uit met de havenbekkens, waarin het slib kan bezinken. De Nijs schat de zogenaamde 'trapping efficiency' van de Botlekhaven op bijna 100%. Aldus ontstaat een dynamisch evenwicht waarin aanvoer van fluviatiel slib naar het ETM in evenwicht is met afvoer van slib door bezinking in havenbekkens. Door fluctuaties in aan- en afvoer varieert ook de slibconcentratie in het ETM, maar dit bereikt binnen enkele getijden een nieuw evenwicht. De aanvoer van marien slib naar het ETM is beperkt, dit komt enerzijds door het verschil in bodemhoogte tussen de Maasmond en de Nieuwe Waterweg en anderzijds door de sterke afzetting van slib in de Maasmond.

De vraag is nu hoe deze situatie verandert ten gevolge van de verdieping. Hierin moeten we weer onderscheid tussen het aanbod en de lokale invang. Het aanbod van fluviatiel slib zal in principe niet veranderen, wel kan de fractie die wordt ingevangen in het ETM veranderen. De licht afgenomen stratificatie in de Nieuwe Waterweg heeft hierop mogelijk een iets reducerend effect. Anderzijds is het aannemelijk dat het aanbod van marien slib wat kan toenemen. Het getijvolume en de getij-asymmetrie worden immers iets groter en het verschil in bodemhoogte tussen Maasmond en Nieuwe Waterweg kleiner.

Wat betreft de lokale invang is het zeker dat de uitwisseling tussen de Nieuwe Waterweg en de Botlekhaven zal toenemen (met orde 10%). Het is echter niet zeker dat ook de aanslibbing met eenzelfde cijfer zal toenemen omdat de instroming van slib naar de haven nauw samenhangt met de slibconcentratie voor de havenmond en de relatieve fasering in het getij van saliniteit en slibconcentratie. Het is aannemelijk dat het ETM in bovenstroomse richting zal opschuiven, afhankelijk van de ligging van het ETM ten opzichte van de Botlekhaven kan dit zowel een toe- als afname van de slibconcentratie betekenen.

Overigens zijn deze verschuivingen vooral van belang voor de vraag waar meer of minder aanslibbing zal optreden en minder voor de vraag hoeveel aanslibbing er in totaal in het gebied zal optreden. Immers, indien het ETM van de Botlekhaven wordt weggeduwd vindt potentieel elders meer aanslibbing plaats. Indien deze aanslibbing niet kan optreden door het ontbreken van luwtezones (b.v. bovenstrooms geen havens of intergetijdegebieden meer), zal het ETM verder opladen totdat een nieuw evenwicht is ontstaan tussen aanvoer en afvoer.

Met een 3D numeriek model voor suspensietransport inclusief sedimentatie, depositie en erosie kunnen deze effecten verder worden gekwantificeerd. Het meest voordehandliggende resultaat is hierbij een beperkte toename (orde 10%) van de Botlek zonder noemenswaardige andere veranderingen, maar er zijn 3 belangrijke risico's die om nadere analyse vragen met het slibmodel:

- 1 Toename aanvoer marien slib. In de huidige situatie is deze aanvoer nog gering, maar door de grote beschikbaarheid van slib in het Maasmondgebied is dit een potentieel grote bron die tot een verhoging (en niet alleen verschuiving) van de aanslibbing kan leiden.
- 2 Significante verschuiving van het ETM. Hierdoor kan niet alleen de piek in aanslibbing stroomopwaarts verschuiven, maar kan ook het concentratieniveau in het ETM aanmerkelijk toenemen als er rond de nieuwe lokatie van het ETM weinig laagdynamische zones zijn. Nu wordt uit het ETM ieder getij immers een behoorlijke hoeveelheid slib 'afgetapt' naar de Botlekhaven.
- 3 Aanslibbing in de vaargeul tussen de splitsing Oude Maas en de Beneluxtunnel. Hier vindt de grootste verdieping plaats en is op dit moment al de maximale bodemschuifspanning relatief laag. In combinatie met een stroomopwaarts verschoven ETM is niet uitgesloten dat er zich hier slib kan gaan afzetten in de vaargeul, met name voor de drempel van de Beneluxtunnel.

In relatie met risico 1 wordt aanbevolen om de methodiek volgens Winterwerp (2012) toe te passen op de verdieping van de Nieuwe Waterweg. Weliswaar is de slibconcentratie in het ETM op dit moment nog ver verwijderd van een staat van 'hypertroebelheid' (een staat waarin sediment-geïnduceerde dichtheidsgradiënten een dominante invloed hebben op de verticale menging en effectieve bodemruwheid), maar vanuit het oogpunt van risicobeperking is het verstandig om vast te stellen bij welke diepte het systeem zou kunnen omslaan.

7 Inventarisatie vervolgactiviteiten

Momenteel hebben we twee modelinstrumentaria beschikbaar die we geschikt kunnen maken om het effect van de verdieping op het zand- en slibtransport en de morfologie te voorspellen: het Zeedelta model (Van der Kaaij *et al.*, 2010) en het Rijn-Maas-Mond (RMM) model (Sloff *et al.*, 2013).

Zeedelta model

Het rekenrooster van het Zeedelta model (Figuur 7.1) loopt van Zandvoort in het noorden tot aan de kop van Schouwen-Duiveland in het zuiden, en strekt zich 25-30 km uit in zeewaartse richting. Het rivierendeel van het model omvat de Nieuwe Waterweg, de Nieuwe Maas, de Hollandsche IJssel, de Lek tot aan Hagestein, de Merwedes, de Waal tot aan Tiel, het Haringvliet, het Hollandsch Diep, de Biesbosch en de Maas tot aan Lith. De resolutie van het rooster in de Nieuwe Waterweg is ~200 m en in de Nieuwe Maas ~150 m.



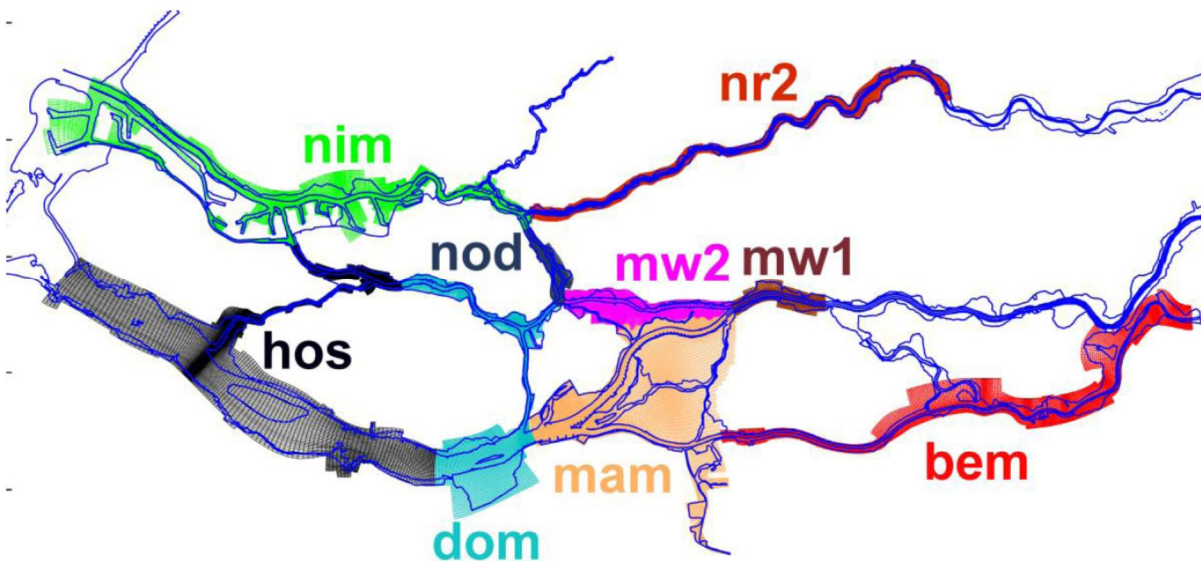
Figuur 7.1 Rekenrooster Zeedelta model.

Het model is 3D met 10 verticale sigma-lagen, elk 10% van de waterdiepte. Het model is opgezet met de SIMONA software en omgezet naar Delft3D. De waterbeweging en het zout worden gemodelleerd. Benedenstrooms worden tijdseries van waterstanden opgelegd, en bovenstrooms tijdseries van debieten.

Op het LISA rekencluster (40 partities) was de rekentijd 2.7 dagen om een periode van 51 dagen door te rekenen, i.e. een verhouding van ongeveer 1:19.

RMM model

Het RMM model is een 2D Delft3D model van de waterbeweging, het zout, het sedimenttransport en de morfologie. In verband met rekentijd en roosterflexibiliteit is domeindecompositie toegepast en bestaat het model uit 9 domeinen (zie Figuur 7.2). Het model bevat dezelfde riviertakken als het Zeedelta model. Belangrijkste verschil is dat het RMM model ophoudt bij de zee; de benedenstrooms rand ligt bij Hoek van Holland. Verder zitten de Hollandse IJssel, de Waal en het Rijn-Maas kanaal niet in het rooster



Figuur 7.2 Rekenrooster RMM model. (figuur afkomstig uit Sloff et al., 2013)

Bovenstrooms worden debieten opgelegd (hydrograaf bestaande uit een lage, midden en hoge afvoer) en benedenstrooms een dubbeldaags harmonisch getij, beide representatief voor de morfologische ontwikkeling.

Het RMM model is hydraulisch geverifieerd door te vergelijken met het SOBEK-NDB (Noordelijk Delta Bekken) model. Sloff *et al.* (2013) concluderen dat over het algemeen de waterbeweging van het RMM model hiermee overeen kwam. Echter, dit gold niet voor de debietverdeling tussen de Merwedes en de Oude Maas, wat wellicht veroorzaakt werd door het niet meenemen van de 3D effecten van zout op de waterbeweging.

Het model rekent met twee zand- en twee slibfracties. Ook zout wordt gemodelleerd. Het 3D effect van de zouttong op sedimenttransport wordt geparameteriseerd meegenomen. Verder houdt het model rekening met de bodemsamenstelling en de aanwezigheid van harde lagen. Ook het baggeren en storten wordt meegenomen. Er wordt gerekend met een morfologische versnellingsfactor van 51 zodat 14 M2-getij cycli corresponderen met 1 jaar morfologische ontwikkeling. Momenteel is de rekentijd ongeveer 1 maand voor 10 jaar morfologische ontwikkeling (1 processor per domein); wellicht kan dit worden versneld door een grotere tijdsstap en morfologische factor.

In het kader van de ontwikkeling van het zogeheten Deltamodel, waar het RMM model onderdeel van uitmaakt, is het RMM model morfologisch getest (Sloff *et al.*, 20113). Hieruit bleek dat het model de locaties van sedimentatie en erosie correct voorspelt, maar dat de magnitude niet altijd juist was. Verder bleek het model in staat de sedimentatie bij de Oversteek van Moerdijk redelijk goed te reproduceren.

Het RMM model is met name geschikt om de morfologische ontwikkeling in het benedenrivierengebied te berekenen tot aan de positie waar verticale gelaagdheid van de stroming een dominante rol gaat spelen. Dit effect wordt weliswaar in geparameteriseerde vorm meegenomen, maar deze parameterisatie kan wijzigen onder invloed van veranderende omstandigheden. Het RMM model is daarom minder geschikt om de invloed van de verdieping van de Nieuwe Waterweg op de lokale morfologie te berekenen, maar wel geschikt om (mede gevoed door lokale 3D-berekeningen) de langetermijnvloed van de verdieping op de morfologie van het benedenrivierengebied te berekenen.

Inventarisatie vervolgfase morfologisch model

Om het effect van de mogelijke verdieping op het sedimenttransport en de morfologische ontwikkeling kwantitatief te bestuderen is een 3D model noodzakelijk, vanwege het belang van zout op de verticale verdeling van de stroomsnelheid. Het model zou uit minimaal 10 verticale rekenlagen moeten bestaan om de verticale verdeling van de stroomsnelheid en zoutconcentraties goed op te lossen. Verder dienen de modelranden niet te dicht bij het interessegebied te liggen. Dit betreft in het bijzonder het gebied waar de verdieping plaats vindt: tussen rkm 1009 (nabij Benelux tunnel in de Nieuwe Maas) en 1032 (ter hoogte van Hoek van Holland in de Nieuwe Waterweg).

Om te onderzoeken wat het effect van de verdieping op het onderhoudsvolume is, lijkt het niet strikt noodzakelijk om een morfologisch model op te zetten, waarbij de interactie tussen de waterbeweging, zandtransport en bodemligging worden gesimuleerd. Waarschijnlijk volstaat een zandtransport model, waarbij we de bodem vasthouden, maar wel het zandtransport modelleren. In eerste instantie kan worden gerekend met 1 zandfractie. Het behoeft nader onderzoek of het nodig is om een realistische bodemsamenstelling in de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas op te leggen. Mochten er relatief veel harde c.q. vaste lagen aanwezig zijn, dan is dit zeker noodzakelijk. De berekende zandtransporten kunnen dan vergeleken worden met bestaande kennis hierover, en indien nodig kunnen de modelinstellingen worden aangepast. De modelranden moeten representatief zijn voor de gemiddelde zandtransporten.

Wanneer we wel de bodemontwikkeling simuleren, kunnen er uitspraken worden gedaan over het effect van de verdieping op de morfologische ontwikkeling van de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas en eventueel ook een aantal nabij gelegen havenbekkens en zijtakken. In dit geval moet er zeker een bodemmodel komen, en moet het model worden gevalideerd op basis van gemeten c.q. berekende bodemontwikkeling. In dit geval kan rekentijd een beperkende factor worden. De modelranden moeten representatief zijn voor de morfologische ontwikkeling, waarbij het handig is als de getijrand harmonisch is zodat makkelijk de simulatieduur aangepast kan worden. Verder moet worden gewerkt met een morfologische versnellingsfactor om rekentijd te besparen. Verder kan nagedacht worden om het nesten van het morfologisch model van de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Oude Maas mogelijk te maken in een groter model waar alleen de waterbeweging wordt uitgerekend.

Het Zeedelta dan wel het RMM model kan als basis dienen voor het te ontwikkelen morfologische model. Elk heeft zijn sterke en minder sterke punten:

- Het Zeedelta model is 3D, gevalideerd voor zout en het rekenrooster loopt door tot in zee. Echter, zandtransport en morfologische ontwikkeling worden niet meegenomen. Verder is het rekenrooster in de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas niet geschikt om morfologisch te rekenen aangezien het “trapjes” bevat die onrealistische stroombeelden (Spruyt *et al.*, 2011) en erosiekuilen generen die na verloop van tijd de meer grootschalige bodemontwikkeling beïnvloeden. Bovendien ligt een relatief onnodig groot aantal rekencellen buiten het interessegebied (namelijk in zee), wat ten koste gaat van de rekentijd.

- Het RMM model is een morfologisch model met een geschikt rekenrooster. Bovendien wordt dit model steeds verder ontwikkeld en vormt het de basis om rivieringrepen door te rekenen. Een nadeel is dat het dieptegemiddeld is en dat de benedenstroomse rand bij Hoek van Holland ligt. Voor de berekening van het effect van de verdieping in de Nieuwe Waterweg op de langetermijn morfologische ontwikkeling verder bovenstrooms (waar gelaagde stroming niet dominant is) is het RMM model wel geschikt.

Dit in ogenschouw nemende, lijkt het huidige Zeedelta model meer geschikt voor fase 1 (alleen zandtransporten) en het huidige RMM model meer geschikt voor fase 2 (zandtransport + morfologie) indien de morfologische effecten bovenstrooms in deze fase het belangrijkste aandachtspunt zouden zijn.

Een geschikt model voor de langetermijnmorfologie van de Nieuwe Waterweg zelf vergt nieuwe ontwikkelingen waarbij sterke punten van het 3D Zeedeltamodel en het 2D RMM model moeten worden gecombineerd. Het opzetten van een nieuw morfologisch model heeft nogal wat voeten in de aarde en het is maar de vraag of hiermee de relevante beheersvragen met betrekking tot de verdieping kunnen worden beantwoord. Daarom verdient het aanbeveling eerst verder uit te zoeken wat deze vragen zijn en in hoeverre een nieuw morfologisch model kan bijdragen deze vragen te beantwoorden. Wel is het op korte termijn mogelijk en zinvol om zand- en slibtransporten uit te rekenen met het Zeedelta model, om de bevindingen op basis van handmatige berekeningen te verifiëren en verder te kwantificeren. Hiermee worden de kortetermijneffecten beter onderbouwd. In aanvulling hierop is voor de kwantificering van effecten op de langetermijnmorfologie bovenstrooms (b.v. Oude Maas, Spui, Dordtsche Kil) het huidige RMM model inzetbaar.

8 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de gegevensanalyse en de hydrodynamische berekeningen wordt het volgende geconcludeerd over de effecten van een verdieping van de Nieuwe Waterweg en een deel van de Nieuwe Maas:

Getij

- Het getijvolume neemt toe en gaat gepaard met een iets toenemende getij-asymmetrie, waardoor het landwaarts transport van zand toeneemt.
- De getijslag neemt toe met circa 2 tot 4 cm bij de Botlek.
- Voorin de Nieuwe Waterweg, waar de bodem niet of nauwelijks wordt verdiept maar waar het getijvolume wel toeneemt, neemt de stratificatie af. Meer landwaarts verandert de stratificatie nauwelijks of neemt licht toe. Lokaal neemt de saliniteit met 1 ppt toe.

Aanzanding

- Het vaargeulonderhoud zal naar verwachting niet sterk afwijken van het huidige onderhoudsvolume.
- Ten westen van de Maeslantkering, waar voor het jaar 2003 een eroderende trend werd waargenomen, zal deze mogelijk tijdelijk opnieuw optreden. Dit wordt veroorzaakt doordat de bodem hier nauwelijks wordt aangepast tijdens de verdieping (met uitzondering van een enkele drempel), terwijl het getijvolume door de stroomopwaartse verdieping wel toeneemt.
- Ten oosten van de Maeslantkering wordt een beperkte netto toename van de aanzanding verwacht vanwege de beperkt toegenomen netto transportgradiënt (orde +10%).
- Kort na aanleg kan het onderhoudsvolume tijdelijk hoger zijn ten gevolge van een lokale herverdeling van zand, waarbij vanuit de initieel grotendeels vlakke bodem zich een nieuw evenwichtsprofiel ontwikkelt.
- Een nauwkeuriger schatting van het onderhoudsvolume is mogelijk op basis van zandtransportberekeningen met het 3D-Zeedeltamodel.
- Door de verdieping kunnen mogelijk harde, erosiebestendige lagen worden verwijderd, waardoor het risico bestaat dat er lokale ontgrondingen ontstaan rond kribben of bij vernauwingen. Ook oeverstabiliteit en terugschrijdende erosie bij de trede bij de Beneluxtunnel is een aandachtspunt.
- Door het toegenomen getijdebiet kunnen effecten als sedimentatie of erosie doorwerken tot in andere riviertakken (Oude Maas, Spui, Dordtsche Kil). Dit dient onderzocht te worden.

Aanslibbing

- De aanslibbing in de Botlekhaven neemt potentieel met circa 10% toe omdat het uitwisselingsvolume met de Nieuwe Waterweg met circa dit percentage toeneemt.
- Doordat het troebelingsmaximum in stroomopwaartse richting opschuift, verandert echter het aanbod van slib (afhankelijk van de actuele rivierafvoer).
- Deze en andere aandachtspunten (zoals een mogelijke toename van de mariene aanvoer die voor de huidige bodemligging van ondergeschikt belang is in de Botlek) kunnen worden gekwantificeerd met slibtransportberekeningen met het 3D-Zeedeltamodel.

Dit zijn voorlopige conclusies op basis van een eerste verkenning. Aanbevolen wordt om met aanvullende gegevens, analyses en berekeningen het effect meer te kwantificeren en risico's en onzekerheden te verkleinen. In eerste instantie zijn hiervoor verdere analyse en korte termijn zand- en slibtransportberekeningen met het 3D-Zeedeltamodel het meest geschikt.

De berekening van de effecten op de langetermijnmorfologie vraagt nog om veel modelontwikkeling. Bovendien kan een LT morfologisch model niet alle geïdentificeerde risico's goed kwantificeren. Een analyse van hydrodynamische berekeningen (reeds beschikbaar) en korte termijn sedimenttransportberekeningen (nog uit te voeren) in combinatie met specifieke proces- en gebiedskennis is op de korte termijn een betere keuze.

A Referenties

- De Vries (1993), Use of Models for River Problems, UNESCO
- Eysink, W.D. (1999). Oorzaken aanslibbing haven van Delfzijl. WL Delft Hydraulics rapport no. H3474.
- Friedrichs, C.T., Aubrey, D.G., 1988. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27, 521–545.
- Nijs, M.A.J. de (2012). On sedimentation processes in a stratified estuarine system. Proefschrift TU Delft.
- Nijs, M.A.J. de, J.C. Winterwerp, J.D. Pietrzak (2010). The Effects of the Internal Flow Structure on SPM Entrapment in the Rotterdam Waterway. *J. Phys. Oceanography* 40, pp. 2357-2380. DOI: 10.1175/2010JPO4233.1
- O'Brien, M.P., 1969. Equilibrium flow areas of inlets on sandy coasts. *J Waterway Port Coast Ocean Eng* 95 (I): 43—52.
- Sieben, A. (ongedateerd). Update trends bodemligging Merwede en Bergsche Maas. Concept-memo.
- Sloff, C.J., Van Spijk, A., Stouthamer, E. & Sieben, A. 2011. Understanding and managing the morphology of Rhine delta branches incising into sand-clay deposits. In Shao Xuejun, Wang Zhaoyin & Wang Guangqian (eds.), RCEM2011, Proc. 7th IAHR Symp. on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Beijing, China.
- Sloff, K., Van der Sligte, R., Huismans, Y., Fuhrhop, H., 2013. Morphological model of the Rhine-Meuse delta, KPP Rivierkunde 2012 - Stabiele keringen. Rapport 1205961-001, Deltares, Nederland.
- Snippen, E., A. Fioole, H. Geelen, A. Kamsteeg, A. van Spijk, en T. Visser (2005). Sediment in (be)weging; Sedimentbalans Rijn-Maasmonding periode 1990-2000. Rijkswaterstaat RIZA.
- Spruyt, A., Mosselman, E., Jagers, B., 2011. A new approach to river bank retreat and advance in 2D numerical models of fluvial morphodynamics. Proceedings River, Coastal and Estuarine Morphodynamics Conference, Beijing, China.
- Stive, M.J.F., Rakhorst, R.D., 2008. Review of empirical relationships between inlet cross-section and tidal prism. *Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, No. 23, 89:95.
- Van der Kaaij, T., Van de Bogaard, H.F.P., Kuijper, C., Sloff, C.J., Van Zetten, J.W., 2010. Herstel van de "trapjeslijn" in de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas (Fase 2), Vervolgstudie naar de effecten op de zoutindringing. Rapport 1002366, Deltares, Nederland.

Van der Mark, R., M. Busnelli, J. Blinde (2012). Verkenning beheer bodemligging Lek, Deltares rapport nr 1204817-000.

Wensveen M. (2004), Kwaliteit Onderhoudsbaggerspecie, Resultaten Monstercampagne Rotterdamse havens en vaarwegen, Havenbedrijf Rotterdam

Wensveen, M. en Mol, J. (2008). Kwaliteit onderhoudsbaggerspecie. Resultaten monstercampagne Rotterdamse havens en vaarwegen 2008. Havenbedrijf Rotterdam N.V. en RWS Dienst Zuid-Holland.

Winterwerp, J.C. (2012). On the response of tidal rivers to deepening and narrowing. Risks for a regime shift towards hyper-turbid conditions. LTV rapport RA12.1292_DP_M.