HYDROMORFOLOGIE EEMS-DOLLARD ESTUARIUM. ACHTERGRONDSTUDIE T.B.V. OTB MER VAARWEG EEMSHAVEN

RIJKSWATERSTAAT, MINISTERIE VAN INFRASTRUCTUUR EN MILIEU

3 december 2013 077141772:D - Definitief B02047.000031.0100



Inhoud

Sa	Samenvatting					
1	Inlei	ding				
2	Huid	ige situat	ie en trends			
	2.1	Inleiding	5			
	2.2	Watersta	anden, stroming en golven			
	2.3	Zoetwate	ertoevoer en saliniteit			
	2.4	Troebelh	neid			
	2.5	Sedimen				
	2.6	Morfolog	gische ontwikkeling op lange termijn			
	2.7	Recente	morfologische ontwikkelingen			
	2.8	Ontwikk				
	2.9	Baggerer				
	2.10	Andere 1	menselijke ingrepen			
	2.11	Sedimen	ıttransportpaden			
3	Modelopzet, kalibratie en validatie					
	3.1	Inleiding	3			
	3.2	Modelop	- Dzet			
		3.2.1	Roosterdimensies en -resolutie			
		3.2.2	Bodem			
		3.2.3	Wind en luchtdruk			
		3.2.4	Golven			
		3.2.5	Zoetwaterdebieten			
		3.2.6	Baggerspecieverspreidingen			
	3.3	Modelka	llibratie			
		3.3.1	Waterstand			
		3.3.2	Stroomsnelheden			
		3.3.3	Saliniteit			
		3.3.4	Sedimentconcentraties			
		3.3.5	Modelinstellingen			
	3.4	Modelva	ılidatie	72		
	3.5	Conclusi	ie	77		
4	Effec	tberekeni	ingen			
	4.1	Inleiding	3			
	4.2	Waterstand, droogvalduur, ebduur en getij-asymmetrie				
	4.3	Saliniteit				
	4.4	Stroomsnelheid				
	4.5	Golven				
	4.6	Morfologie				
	4.7	Verspreidingsstrategie baggerspecie				
	4.8	Effect va	n baggerspecieverspreiding op troebelheid			

		4.8.1	Basis-simulaties		
		4.8.2	Effect hogere baggerfrequentie		
		4.8.3	Effect hogere baggerfrequentie en langere duur		
		4.8.4	Effect van onderhoudsbaggerwerk op vertroebeling		
	4.9	Cumu	ulatie met andere geplande ingrepen		
5	Cond	clusies	en aanbevelingen	151	
Bi	jlage 1	L	Lijst van Figuren		
Bi	jlage 2	2	Lijst van tabellen		
Bi	jlage 3	3	Referenties		
Colofon					

Samenvatting

Inleiding

Voorliggende studie is uitgevoerd in het kader van de milieueffectrapportage voor de verruiming van de vaarweg van de Eemshaven naar de Noordzee (VVEN). In deze studie wordt met behulp van modelberekeningen een voorspelling gegeven van de effecten van verruiming van de vaarweg op de waterbeweging, de saliniteit, de troebelheid en de morfologie in het Eems-Dollard estuarium. De uitkomsten van deze studie worden onder andere gebruikt om de ecologische effecten te beoordelen.

Doelstellingen

De hoofddoelstelling van deze studie is het geven van een kwantitatief inzicht in de effecten van de vaarwegverruiming en de effecten van de verspreiding van baggerspecie. De invloed van deze ingrepen op onderstaande onderwerpen worden in deze studie meegenomen:

- Waterstand.
- Droogvalduur.
- Stroming.
- Saliniteit.
- Golven.
- Troebelheid.
- Morfologie.
- Bodemsamenstelling.

Aanpak

De aanpak in deze studie volgt uit de systematiek van de m.e.r. De volgende aanpak is gehanteerd:

- 1. Analyse van de huidige situatie en de trends.
- 2. Actualisatie, kalibratie en validatie van een waterbewegings- en sedimenttransportmodel voor de voorspelling van de effecten van de verruiming.
- 3. Berekening van de veranderingen in waterstanden, droogvalduren en ebduur (asymmetrie).
- 4. Berekening van de effecten op stroomsnelheid, saliniteit en golven.
- 5. Bepaling van effecten op de morfologie (stabiliteit geulen).
- 6. Vaststelling van de hoeveelheid te baggeren sediment en de verspreidingsstrategie.
- 7. Bepaling van het effect van baggerspecieverspreiding op de troebelheid.
- 8. Cumulatie met andere ingrepen.

Huidige situatie en trends

Algemeen

Het Eems-Dollard estuarium is onderdeel van de Waddenzee. Het gehele estuarium heeft een lengte van ongeveer 100 km van de monding bij Borkum (km 87) tot de sluizen bij Herbrum (km -13). Papenburg ligt op km 0. De vaarweg tussen Emden en de Westereemsverkenningston heeft een lengte van 70 km. In dit gebied worden grote getijdegeulen afgewisseld met zand- en slibplaten. Stroomopwaarts neemt het percentage intergetijdengebied toe, tot wel 85% in de Dollard. Het studiegebied is zeer dynamisch, door de getijstromen en golven worden in het zeegat tussen Rottumeroog en Borkum voortdurend grote hoeveelheden sediment van de bodem losgemaakt en heen en weer getransporteerd. In het gebied zelf zorgen getij- en windgedreven stroming en golven voor een dynamisch stelsel van geulen en prielen. Het merendeel van het kwelderareaal ligt in de Dollard.

Langs de kust beschermen dijken het achterliggende gebied tegen overstromingen. Het estuarium is langgerekt en merendeels goed gemengd, waardoor een geleidelijk verlopende zoet-zout gradiënt aanwezig is.

Het estuarium kan in vier zones worden verdeeld. Ten eerste het mondingsgebied tussen Eemshaven en de Noordzee, dat bestaat uit diepe getijdengeulen, zoals Huibertgat, de Westereems en de Oostereems, met daartussen uitgestrekte slikken en zandplaten. Ten tweede het middendeel ter hoogte van de grote zandplaat Hond-Paap, met daar omheen de geulen Oost Friesche Gaatje en Bocht van Watum. Ten derde de Dollard die bestaat uit slikken en platen die worden doorsneden door geulen zoals Groote Gat en vele kleine prielen. Bij Nieuw Statenzijl mondt de Westerwoldse Aa hier uit in het estuarium. Tot slot de getijdenrivier, of Unterems, die loopt van Herbrum tot Emden. Hier beweegt het water mee met het getij en de afvoer van de rivier. Langs de randen liggen kwelders.

Twee eeuwen geleden waren de Oostereems en de Westereems nog met elkaar verbonden via de Westerbalg. Tegenwoordig ligt hier een wantij dat is ontstaan door verkleining van het intergetijdengebied van de Dollard. Het resultaat is dat het Randzelgat en het Oost Friesche Gaatje nu de belangrijkste geulen zijn geworden. Resultaat hiervan is ook geweest dat de Bocht van Watum in belang is afgenomen.

In de afgelopen tientallen jaren wordt het estuarium gekenmerkt door een morfodynamisch evenwicht met zeewaarts van het zeegat twee geulen die zich achtereenvolgens samenvoegen, splitsen en weer samenvoegen. In het mondingsgebied, het middengebied en de Dollard zijn de veranderingen daardoor betrekkelijk klein. Er is veel zand en slib in beweging en het areaal aan intergetijdengebied is groot en staat niet onder druk.

Verder stroomopwaarts en met name op de getijdenrivier hebben zich echter wel duidelijke veranderingen voorgedaan. De getijdenrivier is troebeler geworden. Het "normale" troebelheidsmaximum met beperkte lengte zoals gewoonlijk gelegen rond het opwaartse einde van de zoutindringing is ontwikkeld tot een troebelheidsmaximum over vrijwel de gehele lengte van de rivier met concentraties aan het oppervlak tot 1 g/l. De grote toename in troebelheid in de afgelopen tientallen jaren wordt toegeschreven aan een voortdurende verdieping van de rivier (De Jonge, 2007; Winterwerp, 2011).

Het is belangrijk de effecten van verruiming van de vaarweg naar Eemshaven in het kader te plaatsen van bovengenoemde ontwikkelingen en daarbij in ogenschouw te nemen dat de geplande verruiming van de vaarweg naar Eemshaven beperkt blijft tot het meest zeewaartse deel van het estuarium en de kustzone waar de geulen betrekkelijk ruim zijn. De geplande verruiming van de vaarweg blijft daardoor beperkt tot minder dan 1% van de totale doorsnede van een getijgeul. Op voorhand mogen daarom zeer geringe effecten op waterbeweging en morfologie verwacht worden.

Getij

De gemiddelde getijslag in het Eems-Dollard estuarium bedraagt bij Huibertgat (Noordzee) ongeveer 2,15 m, bij Eemshaven ongeveer 2,56 m en bij Delfzijl ongeveer 2,99 m. Deze gemiddelde waarden zijn onderhevig aan systematische langjarige variaties. In een 18,6 jarige cyclus varieert het gemiddeld hoogwater bij Huibertgat bijvoorbeeld 6 cm en het gemiddeld laagwater 8 cm. Dit resulteert in een variatie in getijslag van ongeveer 14 cm gedurende deze 18,6 jarige cyclus.

De getijgolf loopt vanuit zee het estuarium in. Daardoor is het moment van hoogwater stroomopwaarts steeds later.

Volgens metingen stijgt het gemiddeld hoogwater op de Noordzee bij de Wierumergronden met ongeveer 1,6 mm/jaar. De gemiddelde hoogwatertrend bij Eemshaven en Delfzijl valt binnen de bandbreedte van de trend bij Wierumergronden.

Het gemiddeld laagwater stijgt bij Wierumergronden met 2,3 mm/jaar. Bij Eemshaven neemt het gemiddeld laagwater toe met 1,2 mm/jaar en bij Delfzijl met 0,1 mm/jaar. Wanneer we van de Noordzee het estuarium ingaan neemt de gemiddeld laagwaterstijging af. De bandbreedte is echter groot.

De jaargemiddelde getijslag neemt bij Wierumergronden met 0,7 mm/jaar af, maar de bandbreedte is groot. Bij Eemshaven neemt de jaargemiddelde getijslag niet significant toe of af binnen de 80% betrouwbaarheidsband. Bij Delfzijl neemt de gemiddelde getijslag toe met 1,3 mm/jaar.

Het Duitse station Knock ligt betrekkelijk dichtbij Delfzijl en de getijkarakteristieken en trends zijn daarom vergelijkbaar. Verder stroomopwaarts vertoont het jaargemiddeld hoogwater een stijgende trend en het jaargemiddeld laagwater een dalende. Deze trends zijn groter naarmate de stations verder stroomopwaarts liggen. Het jaargemiddeld hoogwater stijgt bij Emden met 3,5 mm/jaar, bij Leerort met 6,2 mm/jaar en bij Papenburg met 9,3 mm/jaar. Het jaargemiddeld laagwater daalt bij Emden met -4,0 mm/jaar, bij Leerort met -9,1 mm/jaar en bij Papenburg met -21,0 mm/jaar. Dit resulteert in een toenemende getijslag bij Emden met 7,5 mm/jaar, bij Leerort met 15,4 mm/jaar en bij Papenburg met 30,4 mm/jaar. Overigens valt op dat het jaargemiddeld laagwater na 1995 niet meer zo sterk afneemt als daarvoor.

Mechanismen toename getijverschil

De toename van het getijverschil is een gevolg van drie mechanismen, nl. zeespiegelstijging, versterking van de getijdebeweging als gevolg van de vorm van het estuarium, en veranderingen in de geulen (natuurlijk en antropogeen). Voor de stations op de Noordzee speelt vooral zeespiegelstijging een rol. Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust bedraagt ongeveer 1,9 mm/jaar ± 0,15 mm/jaar op lange termijn (Baart et al. 2012a,b). Verder het estuarium in worden de andere genoemde aspecten ook steeds belangrijker.

De belangrijkste antropogene invloed is de verdieping van de vaarweg richting Emden ter hoogte van Gaatje Bocht en het Emder Vaarwater en de verdieping van de vaarweg verder stroomopwaarts in de Eems rivier. Hierdoor ondervindt de getijde-golf minder weerstand, kan de getijamplitude toenemen en kan de getijdegolf verder doordringen en van vorm veranderen. Vroom et al. (2012) laten zien dat bij de meetstations Eemshaven en Delfzijl de vorm van de getijgolf is veranderd in de afgelopen decennia. Met name de periode van kentering tijdens hoogwater is langer geworden waardoor fijn sediment meer tijd krijgt om uit te zakken. Dit effect lijkt ook zichtbaar te zijn bij de meetstations in de Eems rivier, hoewel de meetreeksen te kort zijn om hier conclusies uit te trekken (Vroom et al., 2012). Vloeibare slib-afzettingen zorgen voor een verdere afname van de ruwheid van de bodem in de Eems rivier waardoor de getijden ook worden beïnvloed. Deze effecten zijn te merken tot aan de sluis bij Herbrum.

Zeespiegelstijging

Met betrekking tot de autonome ontwikkeling is verder de zeespiegelstijging van belang. Bij Wierumergronden stijgt het gemiddeld zeeniveau in de afgelopen 33 jaar met 1,3 mm/jaar. Bij Eemshaven stijgt het gemiddeld zeeniveau met 1,5 mm/jaar en bij Delfzijl met 1,9 mm/jaar. De algehele zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust bedraagt 1,9 mm/jaar ± 0,15 mm/jaar op lange termijn (Baart et al. 2012a,b). De schattingen van het KNMI voor zeespiegelstijging voor deze eeuw in Nederland lopen uiteen van 35 tot 85 cm in 100 jaar.

Stroming

De maximale stroomsnelheden in de grotere getijdegeulen liggen rond de 1,0 tot 1,4 m/s tijdens gemiddeld getij. In de kleinere geulen en op de wadplaten zijn de maximale berekende stroomsnelheden ongeveer 0,6 tot 1,0 m/s. Tijdens doodtij en springtij zullen de stroomsnelheden iets lager respectievelijk hoger zijn. Er is geen informatie beschikbaar met betrekking tot trends in stroomsnelheden. Voor de scheepvaart richting Eemshaven is vooral de stroomsnelheid tijdens de kentering van belang. In deze (korte) periode waarin de stroomsnelheden laag zijn, kunnen schepen namelijk de benodigde manoeuvres maken om de haven in te komen.

Golven

Ten noorden van de lijn Borkum-Rottumerplaat ligt de open Noordzee met betrekkelijk hoge golven. De meeste golven komen uit zuidwestelijke, westelijke of noordwestelijke richting. Een significant golfhoogte van 1,1 m wordt 50% van de tijd overschreden en een significante golfhoogte van 2,5 m voor 10% van de tijd.

Het Eems-Dollard estuarium is deels afgeschermd van de Noordzee door de Waddeneilanden en platen waardoor de golven hier lager zijn dan op de Noordzee. De Dollard is vrijwel volledig afgeschermd en de golven zijn daar het laagst. Ter hoogte van Delfzijl wordt een significante golfhoogte van 0,6 m voor 50% van de tijd overschreden terwijl een significante golfhoogte van 1,0 m voor 10% van de tijd wordt overschreden. Bij Delfzijl komen de meeste golven uit het zuidwesten en de hoogste golven uit het noorden en noordoosten. Reden hiervoor is dat de overheersende windrichting in Nederland zuidwestelijk is terwijl de grootste strijklengte bij Delfzijl in het noorden en noordoosten ligt.

Zoetwatertoevoer en saliniteit

De Eems is de belangrijkste bron van zoet water in het Eems-Dollard estuarium. Het jaargemiddelde debiet van de Eems varieert tussen de 38 en 131 m³/s met een gemiddelde van 81 m³/s. Er bestaat geen statistisch significant toenemende of afnemende trend in de jaargemiddelde debieten van de Eems rivier. Door seizoensinvloeden varieert het maandgemiddelde van 141 m³/s in januari tot 38 m³/s in augustus. Naast de Eems dragen de Westerwoldse Aa, het Eemskanaal en spuien en gemalen aan Duitse zijde in geringe mate bij aan de aanvoer van zoet water.

Door toevoer van zoet water neemt de zoutconcentratie gemiddeld af van circa 29 *practical salinity units* (psu) tussen Borkum en Rottumeroog, naar circa 25 psu bij Eemshaven, circa 20 psu bij Delfzijl en circa 11 psu bij Emden. Verder stroomopwaarts neemt de saliniteit verder af. Hier is de variatie tijdens een getijcyclus circa 10 psu.

Het Eems-Dollard estuarium is betrekkelijk ondiep en het getijvolume is relatief groot. Dit heeft tot gevolg dat er geen of beperkte stratificatie (gelaagdheid) in het systeem aanwezig is en het zoutgehalte verticaal goed is gemengd. De instroom van zoet water is voornamelijk afhankelijk van de regenval. In Nederland is de jaarlijkse neerslag vanaf 1906 toegenomen met 18% (KNMI, 2006). Het is de verwachting dat, als gevolg van een versterking van het broeikaseffect, de hoeveelheid regen de komende 100 jaar zal toenemen. Hierdoor kan dan ook een afname van de saliniteit verwacht worden in de Waddenzee en in het Eems-Dollard estuarium.

Naast instroom van zoet water speelt ook de toename van zout water ten gevolge van een grotere getijdewerking een rol. De eventuele vergroting van de instroom van zout water heeft een tegengesteld effect aan de veronderstelde toename van de zoetwater aanvoer. Het is niet bekend of de instroom van zoet water of zout water het overheersende mechanisme zal zijn. De saliniteit zal ook licht toenemen ten gevolge van een landwaartse verplaatsing van de longitudinale zoutverdeling. Deze toename is voornamelijk een gevolg van zeespiegelstijging.

Troebelheid

Troebelheid (zwevend stofconcentraties) is vanuit de ecologie gezien een belangrijke parameter. Veel organismen zijn afhankelijk van de troebelheid, het is bijvoorbeeld bepalend voor de lichtinval en daarmee voor het vermogen tot fotosynthese. De troebelheid van het water in de Waddenzee wordt bepaald door de aanwezigheid van zwevende deeltjes in de waterkolom. Dit zwevende stof is een mengsel van deeltjes van biologische herkomst (levend en dood) en deeltjes van niet-biologische oorsprong (klei en silt). De hoeveelheid zwevend stof in de waterkolom wordt bepaald door een samenspel van biotische en abiotische parameters.

De troebelheid in het Eems-Dollard estuarium vertoont veel ruimtelijke en temporele variatie. De concentratie is relatief laag bij de monding van het estuarium en bereikt een maximum meer stroomopwaarts. De temporele variatie wordt voor een groot deel bepaald door het getij omdat binnen een getij en tijdens een doodtij-springtij cyclus de stroomsnelheden sterk wisselen. De variatie in zwevend stof ten gevolge van variaties in getij-stroomsnelheden kan honderden mg/l bedragen.

Ook hebben windrichting en windsnelheid een grote invloed op de zwevend stof concentratie. Op grotere tijdschaal spelen seizoensvariaties en rivierafvoervariaties (mede door antropogene activiteiten) een rol. Daarnaast zijn baggeractiviteiten verantwoordelijk voor korte termijn verhogingen van de zwevend stof concentraties. Recente metingen bevestigen de grote variatie in zwevend stof concentraties (Van Santen & Spitzner, 2012; Reneerkens & Spitzner, 2012a, b en c).

De zwevend stof concentraties zijn de laatste decennia continu toegenomen (o.a. Spiteri et al., 2011), met name in het deel bovenstrooms van Delfzijl. Vroom et al. (2012) hebben een gedetailleerde statistische analyse uitgevoerd op gemeten zwevend-stofconcentraties. Uit deze analyse blijkt dat in de periode 1990-2011 de concentratie zwevend stof tussen Borkum en Rottumeroog (meetstation Huibertgat Oost) is toegenomen met ongeveer 0,7 mg/l/jaar. Verder het estuarium in, in de Bocht van Watum noord, is dit 2,4 mg/l/jaar. In de Dollard (meetstation Groote Gat noord) is de toename 3,9 mg/l/jaar. De oorzaak van deze toename is nog niet geheel duidelijk. Vroom et al. (2012) bespreken verschillende hypothesen. De hydrodynamische veranderingen ten gevolge van de verdieping van de hoofdvaarweg vanaf Knock en verder stroomopwaarts heeft in elk geval geleid tot meer import van sediment in de Unterems.

Morfologische ontwikkelingen op lange termijn

De morfologie van het gebied is de resultante van een ontwikkeling die zich de afgelopen 1500 jaar heeft voltrokken. In de 14e en 15e eeuw breidde de invloed van de Noordzee zich in het gebied uit, zodat enkele grote zeearmen ontstonden. Ten westen van de Groninger Waddenzee vormden de Lauwerszee en het Groningerdiep en Reitdiep een zeearm van beperkte omvang en ook de Eems-Dollard zelf vormde een zeearm. Tussen deze zeearmen vormde de Fivel een inham in het verder relatief hooggelegen gebied (Van Veen, 1930; Roeleveld, 1974).

De Dollard bereikte zijn maximale omvang rond 1520. Door de natuurlijke sedimentatie in de zeearmen breidden de wadplaten en de kwelders uit, waardoor de zeearmen in omvang afnamen. De bewoners van deze gebieden gebruikten de kwelders en begonnen deze al vroeg in de geschiedenis te voorzien van walletjes, die als lage dijken fungeerden. Later werden de kwelders echt ingedijkt, waardoor polders ontstonden. Stapsgewijs werden op deze wijze grote delen van de Dollard ingepolderd, zoals voor de Dollard is beschreven in de historische studie van Stratingh en Venema (1855). Een vergelijkbare ontwikkeling heeft zich voorgedaan rond de Lauwerszee en bij de Fivel (o.a. Roeleveld, 1974).

Morfologische ontwikkelingen afgelopen 100 jaar

De grootste verandering in de afgelopen 100 jaar is het verdwijnen van de geulverbinding tussen de kombergingsgebieden van de Westereems en de Oostereems, ten zuidoosten van het waddeneiland Borkum (Gerritsen, 1952). Tegenwoordig ligt hier een wantij, dat wordt gevormd door de platen en ondieptes Ranzel, Eemshorn en het Pilzumer wad, die niet worden doorsneden door geulen. In het verleden doorsneed de geul Westerbalg het gebied. Overigens is het wantij, net als in de rest van de Waddenzee, een open wantij, waarover water en sediment kan worden uitgewisseld (Van Straaten, 1969).

Andere morfologische veranderingen omvatten de verplaatsing en toe- en afname van de omvang van geulen. De ligging en het belang van de geulen in de Eems en de Eemsmonding is hierdoor gewijzigd. Deze veranderingen gaan hand in hand met veranderingen in de ligging van de platen. Al vanaf de jaren twintig is deze ontwikkeling mede gestuurd door het baggeren van de vaarweg. Vanaf de Noordzee naar het land is een aantal veranderingen te benoemen. In de monding is de grootte van de Westereems toegenomen en de grootte van het Huibertgat afgenomen. Joustra (1971) beschrijft de oorzaken waarom in eerste instantie het Huibertgat en later de Westereems groot zijn geworden en waarom de Westereems nu steeds groter wordt. In het gedrag van deze geulen is geen cyclisch proces te ontdekken. Het Randzelgat is een redelijk stabiele geul, maar de geul Oude Westereems migreert naar het noordoosten. De tussenliggende plaat Meeuwenstaart neemt gaandeweg in omvang af. De omvang van het Doekegat blijft min of meer gelijk, terwijl de naamloze geul ten oosten van de Doekeplaat in omvang afneemt. Het Oost Friesche Gaatje neemt in omvang toe, terwijl de Bocht van Watum al sinds het begin van de 20e eeuw in omvang afneemt. In de Gaatjebocht verandert het geulprofiel. De positie en de grootte van het Emder Vaarwater is relatief stabiel, door de combinatie van baggerwerkzaamheden en aanleg van de Geiseleitdam op de Geiserücken, de geleidingsdam die het Emder Vaarwater van het Groote Gat scheidt. Het Groote Gat is geleidelijk aan minder groot geworden.

Recente morfologische ontwikkelingen

Recente morfologische ontwikkelingen zijn onderzocht op basis van zes bodemhoogtekaarten uit de jaren 1985, 1989-1999, 1995-1997, 1999-2001, 2005, 2007-2008 en 2010. De kaarten laten zeewaarts van het zeegat duidelijk twee geulen zien die zich achtereenvolgens samenvoegen, splitsen en weer samenvoegen. Ter hoogte van de splitsing lijken de Oude Westereems en het Randzelgat equivalent terwijl verderop in het estuarium de ene geul domineert over de andere (Oost Friesche Gaatje ten opzichte van Bocht van Watum).

De belangrijkste recente ontwikkelingen zijn een verbreding van de Huibertplaat en zuidwaartse migratie van Huibertplaat en daardoor van het Huibertgat. Tegelijk treedt enige verruiming van de Westereems op.

In het Zeegat van de Eems migreert het noordelijk deel van de Oude Westereems 100 tot 400 m naar het noordoosten. Dit is richting het noordelijk deel van het Randzelgat en Borkum. Deze migratie gaat gepaard met een erosie van het meest noordelijke deel van de Meeuwenstaart. Het Randzelgat is betrekkelijk stabiel.

Tussen 1985 en 1999/2001 is de Meeuwenstaart richting het Randzelgat gemigreerd maar dat deze migratie zich daarna niet heeft voortgezet. Deze migratie is mogelijk veroorzaakt door het ontstaan van een diepe put in het Randzelgat waardoor de geul te ruim in zijn jasje kwam.

Verderop in het estuarium zijn de sedimentatie in de Bocht van Watum en verdieping van het Oostfriesche Gaatje zichtbaar. De geul Gaatjebocht is aan de zuidkant het meest dynamisch zonder duidelijke trend en aan de noordkant betrekkelijk stabiel. Het Emder Vaarwater blijft stabiel tussen 1985 en 2010.

Ondanks de complexiteit van de fysische processen in estuaria bestaan er betrekkelijk eenvoudige stabiliteitsrelaties tussen de oppervlakte van het dwarsprofiel van geulen en de hoeveelheid water die per getij passeert. Hartsuiker et al. (2007) en Kiezebrink (1996) hebben de stabiliteit van het geulensysteem onderzocht. Uit die analyse blijkt dat de dwarsdoorsnedes van het Huibertgat en de Westereems in evenwicht zijn met de hoeveelheid water die passeert. Het Zeegat tussen Borkum en Rottumeroog is kleiner dan verwacht, maar vertoont niet de neiging om groter te worden. Het noordelijk deel van het Randzelgat is kleiner dan verwacht zou mogen worden. Dit kan een gevolg zijn van het feit dat een deel van het water tijdens vloed niet alleen door het Randzelgat stroomt maar ook over de Meeuwenstaart. Het zuidelijke deel van het Randzelgat is redelijk in evenwicht. Het noordelijke deel van de Oude Westereems is iets groter dan verwacht zou mogen worden. Voor het zuidelijke deel geldt dit niet.

Uit voorgaande mag geconcludeerd worden dat het geulensysteem in het deel van het estuarium waarin de vaarwegverruiming plaatsvindt in de afgelopen decennia betrekkelijk stabiel is geweest.

Berekende effecten

Waterstanden

Het effect van verruiming van de vaarweg op de getijslag is in het algemeen kleiner dan 0,1%. De effecten van verruiming van de vaarweg op de waterstanden zijn klein ten opzichte de natuurlijke variatie in het estuarium en ten opzichte van het effect van zeespiegelstijging. Dit zowel in absolute zin, veranderingen zijn altijd kleiner dan 0,5 cm, als in relatieve zin, de veranderingen zijn van dezelfde grootte (noordelijk deel estuarium) tot een factor 5 kleiner (zuidelijk deel estuarium) dan de veranderingen door zeespiegelstijging. Dat het effect van de geulverruiming op de waterstanden klein is, stemt overeen met de conclusies van Hartsuiker et al. (2007).

Droogvalduur

Droogvallende platen in het Eems-Dollard estuarium en de aangrenzende Waddenzee vormen een belangrijk rustgebied voor vogels en zeezoogdieren. Uit modelberekeningen blijkt dat het effect van verruiming van de vaarweg op de droogvalduur vrijwel overal kleiner is dan 5 minuten. Hier en daar zijn stipjes te vinden waar de verandering 5-10 minuten bedraagt. Deze veranderingen zijn het gevolg van zeer kleine fluctuaties in berekende waterstand door de verruiming en daardoor verschillen in numerieke afrondingen. Deze verschillen in afronding wisselen elkaar af en tonen geen structurele toe- of afname van de droogvalduur. Zowel de gebieden waarin deze afrondingsverschillen voorkomen als de grootte van de verandering zijn klein ten opzichte van droogvalduren van enkele uren. Hierbij moet nog worden vermeld dat in de berekeningen de morfologische aanpassing van de platen niet is meegenomen en dat daardoor het effect in de berekeningen groter is dan in werkelijkheid.

Ebduur

Het effect van vaarwegverruiming op de ebduur is zeer klein ten opzichte van de natuurlijke variatie. Volgens de berekeningen leidt verruiming van de vaarweg tot een betrekkelijk kleine (< 2 minuten; < 1%) verandering in ebduur. Dit is in overeenstemming met de bevindingen door Hartsuiker et al (2007). Dit betekent dat verruiming van de vaarweg een zeer kleine invloed heeft op de getij-asymmetrie.

Stroomsnelheid

Vaarwegverruiming leidt tot veranderingen in stroomsnelheden, maar het gebied waarin deze veranderingen plaatsvinden is klein. Alleen daar waar gebaggerd wordt, nabij km 100 en ten noorden van de Eemshaven komen kleine veranderingen voor. De grootste veranderingen vinden nabij de Eemshaven plaats. Stroomsnelheden veranderen met circa 15%, maar omdat het hier om een afname gaat worden geen problemen voor de scheepvaart verwacht.

Golfhoogte

Uit de berekeningen blijkt niet dat verruiming van de vaarweg leidt tot hogere golven bij de kust. De verruimde vaargeul heeft slechts een klein lokaal effect op de golfcondities. Voor de ontwerphoogte van dijken zijn de waterstanden veel hoger dan de waterstanden waarmee in de effectberekeningen is gerekend. Onder dergelijke extreem hoge waterstanden is de invloed van verruiming van de vaarweg veel kleiner dan onder normale condities. Dit geldt ook voor golfhoogtes bij de kust. Op het traject waar de verdieping plaatsvindt, zullen de golven onder extreme omstandigheden weinig van de bodem voelen. Het maakt dan niet veel uit of de bodem van de geul op NAP-15 m of NAP-16 m ligt bij een waterstand van NAP+5,50 m (Eemshaven).

Saliniteit

Uit de effectsimulaties blijkt dat de veranderingen in saliniteit door de geulverruiming lokaal zijn: alleen in en net voor de Eemshaven treden kleine veranderingen op, dit in tegenstelling tot de veranderingen door zeespiegelstijging die de saliniteit in bijna het gehele estuarium doen veranderen. In vergelijking met de saliniteits-verandering door de autonome trend zijn de veranderingen ook betrekkelijk klein. Dit komt overeen met de conclusies van Hartsuiker et al. (2007) dat de veranderingen in saliniteit langs het transect door de verruiming enkele honderdsten psu zijn, terwijl zij voor zeespiegelstijging enkele tiende psu zijn en dat de reikwijdte van het gebied waarbinnen de saliniteit verandert beperkt is tot het gebied voor de Eemshaven. De verschuiving van de maximale en minimale saliniteit door verruiming van de vaarweg is maximaal 160 meter zowel in zeewaartse als in landwaartse richting. Door zeespiegelstijging verschuiven de isohalines verder landwaarts langs het gehele estuarium met ongeveer 150 meter bij een ZSS van 2,4 cm en een paar honderd meter bij een ZSS van 14,0 cm.

Morfologie

Het effect van het baggeren en verspreiden van sediment op de morfologie hangt samen met de omvang van de ingreep relatief ten opzichte van de afmetingen van de geulen en platen in het estuarium en de omvang van hun autonome gedrag.

Historische kaarten van 1812 tot 1949 geven aan dat grootschalige landaanwinningswerken in de Dollard en baggeractiviteiten in het Oostfriesche Gaatje hebben geresulteerd in significante veranderingen in het geulensysteem. Aanpassingen op deze grote ruimtelijke schaal (gehele estuarium) treden op, op tijdschalen van circa 100 jaar. In de afgelopen decennia (tussen 1985 en 2010) vertoont het estuarium echter een redelijk stabiele grootschalige configuratie met twee hoofdgeulen gescheiden door een plaat.

Wang (1997) ontwikkelde stabiliteitscriteria voor een twee-geulensysteem en concludeert dat baggeren een gering effect heeft op de stabiliteit van een twee-geulensysteem. In het geval van de vaarweg naar Eemshaven blijft de geplande verruiming beperkt tot minder dan 1% van de totale doorsnede van één van de twee geulen. Dit is klein ten opzichte van de natuurlijke variatie in geuldoorsnede.

Verspreiding van gebaggerd materiaal kan echter wel een rol spelen en het systeem doen neigen naar een ééngeulsysteem wanneer de totale hoeveelheid verspreid sediment meer dan 10% bedraagt van de transportcapaciteit van het twee-geulensysteem (Wang, 1997). Dit verspreidingscriterium is stringenter wanneer het baggeren plaatsvindt in één geul van het tweegeulensysteem en verspreiding in de andere. De verspreidingscriteria zoals bepaald door Wang (1997) zijn gehanteerd bij vaststelling van de verspreidingsstrategie.

Uit berekeningen van het netto effect van vaargeulverruiming op de geuldoorsnede blijkt dat deze veel kleiner zijn dan de natuurlijke variatie. Hierbij moet worden vermeld dat voor de berekeningen is uitgegaan van een worst case scenario, namelijk dat het sediment uit de geul wordt onttrokken. In werkelijkheid wordt het meeste sediment verspreid binnen hetzelfde geuloppervlak waardoor de totale oppervlakte van het dwarsprofiel en daardoor de directe en indirecte effecten minder sterk zullen zijn dan is berekend.

Troebelheid

Verspreiding van baggerspecie tijdens de verruiming van de vaarweg veroorzaakt een tijdelijke verhoging van de troebelheid. Er zijn verschillende verspreidingslocaties aangewezen in de nabijheid van de vaarweg. Op locaties P0, P3 en P4 wordt slibarme specie(zand met circa 2% slib) verspreid en op locatie P1 wordt naast zand ook slibrijke specie (klei en keileem) verspreid. De mate van vertroebeling is afhankelijk van de baggermethode, de hoeveelheid slib die wordt verspreid, het opwervelend vermogen van de stroming, de frequentie waarmee wordt verspreid en de verspreidingsduur. In de effectstudie is uitgegaan van een worst case scenario waarbij het materiaal tijdens de verruiming zodanig wordt gebaggerd en verspreid dat het aanwezige fijne sediment volledig in de waterkolom in suspensie wordt gebracht. Er zijn verschillende varianten in verspreidingsstrategie onderzocht waarbij met name is onderzocht of de verspreiding geconcentreerd of meer gespreid moet plaatsvinden (verspreidingsfrequentie en –duur) en wat het effect is van de verdubbeling van de hoeveelheid.

Uit modelberekeningen blijkt dat verspreiding van slib-arme specie(zand) op P0, P3 of P4 leidt tot een kleine verspreidingspluim (orde enkele km) en een maximale toename in daggemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom van 2-5 mg/l direct na verspreiding. Dit is enkele procenten van de natuurlijke achtergrondwaarde. Eén dag na de verspreiding zijn de extra concentraties in de pluim afgenomen tot waarden kleiner dan 2 mg/l. Uitgaande van een zekere verspreidingsfrequentie (elk uur of elke 2 uur) maakt het hierbij nauwelijks verschil hoeveel (dus hoe lang) er wordt verspreid. Reden hiervoor is dat de concentratietoename bij slib-arme verspreiding niet zozeer afhankelijk is van het aanbod aan slib (dat blijft nog steeds beperkt omdat de verspreidde specie slib-arm is) maar meer afhankelijk is van het opwervelend vermogen van de stroming, en dat is in beide gevallen ongeveer gelijk.

Modelberekeningen laten zien dat verspreiding van slibrijke specie (klei of keileem) op P1 onmiddellijk na verspreiding leidt tot een maximale toename van de daggemiddelde slibconcentratie in het zwaartepunt van de pluim van 30-70 mg/l, afhankelijk van het verspreidingsscenario. Dit is van dezelfde orde als de achtergrondconcentratie. Verder naar de rand van de pluim neemt deze concentratie af naar 2-5 mg/l op 25-30 km afstand van het zwaartepunt. De totale lengte van de pluim bedraagt op dat moment ongeveer 50-60 km en de breedte ongeveer 7 km. Ongeveer 3 weken na het verspreiden van slibrijke baggerspecie op locatie P1 is de extra slibconcentratie als gevolg van baggerspecieverspreiding overal afgenomen tot 2-5 mg/l of lager.

Belangrijke conclusie is dat het effect van de slibverspreidingen door aanleg en onderhoud veel kleiner zijn dan de natuurlijke variaties in het systeem door bijvoorbeeld stormen. In de onderhoudsfase is er alleen sprake van zandige onderhoudsspecie. Deze heeft een zeer laag slibgehalte. De modelberekeningen voor het baggeren en verspreiden van zand bij de realisatie van de vaarwegverruiming tonen aan dat de effecten op vertroebeling van dergelijke hoeveelheden gering zijn. Ook bij het baggeren ten behoeve van onderhoud kan dus gesteld worden dat de effecten op vertroebeling zowel in concentratie, ruimte als tijd vrijwel nihil zullen zijn.

1 Inleiding

Deze studie is uitgevoerd in het kader van de milieu effect rapportage (m.e.r.) van Rijkswaterstaat voor de verruiming van de vaarweg naar Eemshaven.

Doel

De hoofddoelstelling van deze studie is het geven van een kwantitatief inzicht in de effecten van de vaarwegverruiming en de effecten van de verspreiding van baggerspecie. De invloed van deze ingrepen op onderstaande onderwerpen worden in deze studie meegenomen (Ebben-Gerrits & Schellekens, 2013):

- Waterstand.
- Droogvalduur.
- Stroming.
- Saliniteit.
- Golven.
- Troebelheid.
- Morfologie.
- Bodemsamenstelling.

Aanpak

De aanpak in deze studie volgt uit de systematiek van de m.e.r. De volgende aanpak is gehanteerd:

- 1. Analyse van de huidige situatie en de trends.
- 2. Actualisatie, kalibratie en validatie van een waterbewegings- en sedimenttransportmodel voor de voorspelling van de effecten van de verruiming.
- 3. Berekening van de veranderingen in waterstanden, droogvalduren en ebduur (asymmetrie).
- 4. Berekening van de effecten op stroomsnelheid, saliniteit en golven.
- 5. Bepaling van effecten op de morfologie (stabiliteit geulen).
- 6. Vaststelling van de hoeveelheid te baggeren sediment en de verspreidingsstrategie.
- 7. Bepaling van het effect van baggerspecieverspreiding op de troebelheid.
- 8. Cumulatie met andere ingrepen.

Voor de effectberekeningen is een *state-of-the-art* 3D-model toegepast waarin alle relevant fysica is meegenomen. Dit model is geactualiseerd aan de hand van de meest recente beschikbare gegevens. Verder is voor de onderliggende software (Delft3D) de meeste recente beschikbare versie (6.00.01.2399; april 2013) toegepast. De toepassing van een eerdere versie van dit model is door een auditcommisie en andere deskundigen beoordeeld en goedgekeurd.

Leeswijzer

Hoofdstuk 2 van dit rapport beschrijft de huidige situatie en de trends in waterbeweging, sediment, troebelheid en morfologie. Ook menselijke ingrepen zoals baggeren, baggerspecieverspreiding en zandwinning worden hier beschreven.

Hoofdstuk 3 beschrijft de actualisatie, kalibratie en validatie van een waterbewegings- en sedimenttransportmodel. Dit model is geactualiseerd op basis van de meest recente beschikbare gegevens en representeert de situatie van het estuarium in 2012. Het 3D-model bevat alle relevante fysische processen die nodig zijn voor de beoordeling van de hydromorfologische effecten van de vaargeulverruiming zoals stroming door getij en wind, golven, saliniteit, sedimentconcentratie (zand en slib) en de interactie tussen deze processen.

Hoofdstuk 4 beschrijft de berekende effecten van verruiming van de vaargeul op de waterbeweging (stroming en golven), de saliniteit en de morfologie. In dit hoofdstuk wordt eveneens de baggerhoeveelheid per sedimentsoort vastgesteld (in de aanleg- en onderhoudsfase), wordt de verspreidingsstrategie gepresenteerd en worden de effecten van baggerspecieverspreiding op de troebelheid gepresenteerd. Tot slot wordt de cumulatie met andere ingrepen besproken.

Hoofdstuk 5 sluit dit rapport af met conclusies en aanbevelingen.

2 Huidige situatie en trends

2.1 INLEIDING

Het Eems-Dollard estuarium beslaat het gebied tussen de riviermonding van de Eems nabij Pogum en de uitmonding van het estuarium in de Noordzee (figuur 1). Het gebied tot één zeemijl uit de kust is 482 km² groot, waarvan circa 100 km² Dollard (bijv. SGD, 2009). De Rijksgrens met Duitsland in het Eems-Dollard estuarium is omstreden. Tussen beide landen zijn afspraken gemaakt betreffende het milieu- en waterbeheer.



Figuur 1. Het Eems-Dollard estuarium

Het Eems-Dollard estuarium is onderdeel van de Waddenzee. Het gehele estuarium heeft een lengte van ongeveer 100 km van de monding bij Borkum (km 87) tot de sluizen bij Herbrum (km -13). Papenburg ligt op km 0. De vaargeul tussen Emden en de Westereemsverkenningston heeft een lengte van 70 km. In dit gebied worden grote getijdegeulen afgewisseld met zand- en slibplaten. Stroomopwaarts neemt het percentage intergetijdegebied toe, tot wel 85% in de Dollard. Het studiegebied is zeer dynamisch, door de getijstromen en golven worden in het zeegat tussen Rottumeroog en Borkum voortdurend grote hoeveelheden sediment van de bodem losgemaakt en heen en weer getransporteerd. In het gebied zelf zorgen getij- en windgedreven stroming en golven voor een dynamisch stelsel van geulen en prielen. Het merendeel van het kwelderareaal ligt in de Dollard. Langs de kust beschermen dijken het achterliggende gebied tegen overstromingen. Het estuarium is langgerekt en merendeels goed gemengd, waardoor een geleidelijke zoet-zout gradiënt aanwezig is. Figuur 2 toont de namen van de morfologische eenheden (geulen en platen) en enkele plaatsnamen.



Figuur 2. Plaatsnamen en namen van morfologische eenheden (geulen en platen).

2.2 WATERSTANDEN, STROMING EN GOLVEN

Het stroombeeld in het Eems-Dollard estuarium wordt in hoge mate bepaald door getijstroming. Het estuarium wordt gekenmerkt door een dubbeldaagse getijcyclus welke landinwaarts zorgt voor een toenemende getijslag door het afnemende oppervlakte van het dwarsprofiel.

Tabel 1 toont de hoogwaterstanden, de laagwaterstanden en de verschillen tussen hoog- en laagwater (getijslag) tijdens springtij, gemiddeld tij en doodtij condities bij Huibertgat (Noordzee), Eemshaven en Delfzijl (zie figuur 3 voor locaties). De gemiddelde getijslag in het Eems-Dollard estuarium bedraagt bij Huibertgat (Noordzee) ongeveer 2,15 m, bij Eemshaven ongeveer 2,56 m bij Delfzijl ongeveer 2,99 m (tabel 1). Deze waarden zijn gebaseerd op de meest recente officiële publicatie. Deze gemiddelde waarden zijn onderhevig aan systematische langjarige variaties. In een 18,6 jarige cyclus varieert het gemiddeld hoogwater bij Huibertgat bijvoorbeeld 6 cm en het gemiddeld laagwater 8 cm. Dit resulteert in een variatie van de getijslag van ongeveer 14 cm gedurende deze 18,6 jarige cyclus.

Station	Springtij			Gemiddeld tij			Doodtij		
	HW	LW	HW-LW	HW	LW	HW-LW	HW	LW	HW-LW
Huibertgat	108	-135	243	94	-121	215	77	-98	175
Eemshaven	133	-153	286	118	-138	256	101	-116	217
Delfzijl	151	-180	331	135	-164	299	116	-140	256

Tabel 1. Hoogwater, laagwater en verschil tussen hoog- en laagwater (cm NAP) tijdens springtij, gemiddeld tij en doodtij condities bij Huibertgat, Eemshaven en Delfzijl (Getijtafels voor Nederland 2012: slotgemiddelde 1991.0).

De getijgolf loopt vanuit zee het estuarium in. Daardoor valt het moment van hoogwater stroomopwaarts steeds later. Tabel 2 geeft de verschillende tijdstippen voor hoogwater in de Eems.

Plaats	Tijdstip hoogwater t.o.v. hoogwater bij Eemshaven (uur:min)
Huibertgat	-1:11
Eemshaven	+0:00
Delfzijl	+0:45
Nieuwe Statenzijl	+0:82

Tabel 2. Tijdstippen hoogwater t.o.v. Eemshaven (Getijtafels, 2013).

Ter hoogte van Eemshaven is de duur van de stijging gemiddeld 5 uur en 55 minuten en van de daling gemiddeld 6 uur en 30 minuten (Rijkswaterstaat, 1991). Bij Huibertgat duurt de stijging 5 minuten langer en de daling 5 minuten korter. Bij Delfzijl duurt de stijging 3 minuten langer en de daling 3 minuten korter. Er is dus geen duidelijk verloop van buiten naar binnen.

Inzicht in de trends en autonome ontwikkeling kan verkregen worden door analyse van getijgegevens en waterstanden. Er zijn gegevens beschikbaar van vijf Nederlandse meetstations in het Eems-Dollard estuarium. Dit zijn Wierumergronden (vanaf 1981), Huibertgat (vanaf 1974), Eemshaven (vanaf 1979), Delfzijl (vanaf 1827) en Nieuwe Statenzijl (vanaf 1839, alleen hoogwater). Figuur 3 toont de locaties van deze stations. Door menselijke ingrepen kan het getij op de verschillende meetstations in de loop der tijd zijn beïnvloed. Zo is bij de haven van Delfzijl een sprong waarneembaar die wordt veroorzaakt door de aanleg van de havendam in zuidoostelijke richting in de periode 1963-1966, en de afsluiting van de westelijke havenmond van Delfzijl in 1978. Om de jaarlijkse variatie in waterstandskarakteristieken te illustreren en de trends in de stations met elkaar te kunnen vergelijken is een trendanalyse gemaakt voor meetgegevens vanaf 1978.



Figuur 3. Locaties meetstations langs het Eems-Dollard estuarium

Figuur 4 toont het verloop in de tijd van het jaargemiddeld hoogwater, het jaargemiddeld laagwater en de jaargemiddelde getijslag voor de Nederlandse meetstations in het Eems-Dollard estuarium. Hieruit blijkt een betrekkelijk grote variatie per jaar in het gemiddelde hoogwater en laagwater.

Bij de Eemshaven is het jaarlijks verschil in gemiddeld hoogwater en laagwater ongeveer 4 cm. Tussen 1995 en 1996 was dit 14 cm. De variatie in de jaargemiddelde getijslag is iets minder groot. Bij de Eemshaven is het verschil in de jaargemiddelde getijslag ongeveer 2 cm. Tussen 1995 en 1996 was dit 7 cm. In het jaar 1996 was er betrekkelijk veel oostenwind.

Figuur 4 toont in de legenda ook de trend en de 80% betrouwbaarheidsband rondom die trend, bepaald met lineaire regressieanalyse. Volgens de metingen stijgt het gemiddeld hoogwater bij de Wierumergronden met ongeveer 1,6 mm/jaar. De stijging bij Huibertgat is veel groter maar wijkt erg af van alle andere stations in het Eems-Dollard estuarium. De gemiddeld hoogwaterstijging bij Eemshaven en Delfzijl valt binnen de bandbreedte van de stijging bij Wierumergronden. De gemiddelde hoogwaterdaling bij Nieuwe Statenzijl bedraagt -1,3 mm/jaar. De waarnemingen van het laagwater zijn voor dit station niet verwerkt vanwege de grote spui-invloeden.



Figuur 4. Jaargemiddeld hoogwater, jaargemiddeld laagwater en jaargemiddelde getijslag voor vier Nederlandse meetstation in het Eems-Dollard estuarium. Zie figuur 3 voor locaties. De legenda toont de trend en de 80% betrouwbaarheidsband rondom die trend.

De gemiddeld laagwaterstijging bij Wierumergronden bedraagt 2,3 mm/jaar. De stijging bij Huibertgat wijkt wederom erg af van alle andere stations in het Eems-Dollard estuarium Bij Eemshaven neemt het gemiddeld laagwater toe met 1,2 mm/jaar en bij Delfzijl met 0,1 mm/jaar. Wanneer we van de Noordzee het estuarium ingaan neemt de gemiddeld laagwaterstijging af. De bandbreedte is echter groot.

De jaargemiddelde getijslagafname bij Wierumergronden bedraagt -0,7 mm/jaar maar de bandbreedte is groot. De trend bij Huibertgat wijkt af van de andere stations in het Eems-Dollard estuarium. Bij Eemshaven is de jaargemiddelde getijslag niet significant toenemend of afnemend binnen de 80% betrouwbaarheidsband. Bij Delfzijl neemt de gemiddelde getijslag toe met 1,3 mm/jaar.

Vroom et al. (2012) hebben een getij-analyse uitgevoerd op de waterstandsmetingen van meetstations in het Eems-Dollard estuarium en constateren dat de getij-amplitudes voor de Nederlandse stations zijn toegenomen in de jaren tussen 1960 en 1980. Vanaf de jaren 1980 zijn de getij-amplitudes min of meer stabiel volgens Vroom et al. (2012). De amplitude van de M4-getijcomponent blijkt bij Delfzijl echter ook in de afgelopen 30 jaar toe te nemen. Dit is in overeenstemming met de trendanalyse die hier is gepresenteerd

Figuur 5 toont het verloop in de tijd van het gemiddeld hoogwater, het gemiddeld laagwater en de gemiddelde getijslag gemeten bij zeven Duitse stations vanaf Knock naar bovenstrooms op de Eems rivier. Knock ligt betrekkelijk dicht bij Delfzijl en de getijkarakteristieken en trends zijn daarom vergelijkbaar. Verder stroomopwaarts vertoont het jaargemiddeld hoogwater een stijgende trend en het jaargemiddeld laagwater een dalende. Deze trends zijn groter naarmate de stations verder stroomopwaarts liggen. Het jaargemiddeld hoogwater stijgt bij Emden met 3,5 mm/jaar, bij Leerort met 6,2 mm/jaar en bij Papenburg met 9,3 mm/jaar. Het jaargemiddeld laagwater neemt bij Emden af met -4,0 mm/jaar, bij Leerort met -9,1 mm/jaar en bij Papenburg met -21,0 mm/jaar. Dit resulteert in een toenemende getijslag bij Emden met 7,5 mm/jaar, bij Leerort met 15,4 mm/jaar en bij Papenburg met 30,4 mm/jaar. Overigens valt op dat het jaargemiddeld laagwater na 1995 niet meer zo sterk afneemt als daarvoor.



Figuur 5. Gemiddeld hoogwater, gemiddeld laagwater en gemiddelde getijslag voor zeven Duitse meetstation langs de Eems. Zie figuur 3 voor locaties. De legenda toont de trend en de 80% betrouwbaarheidsband rondom die trend.

Mechanismen toename getijverschil

De toename van het getijverschil is een gevolg van drie mechanismen, nl. zeespiegelstijging, versterking van de getijdebeweging als gevolg van de vorm van het estuarium, en veranderingen in de geulen (natuurlijk en antropogeen).

Voor de stations op de Noordzee speelt vooral zeespiegelstijging een rol. Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust bedraagt ongeveer 1,9 mm/jaar ± 0,15 mm/jaar op lange termijn (Baart et al. 2012a,b). Verder het estuarium in worden de andere genoemde aspecten ook steeds belangrijker.

De belangrijkste antropogene invloed is de verdieping van de vaargeul richting Emden ter hoogte van Gaatje Bocht en het Emder Vaarwater en de verdieping van de vaargeul verder stroomopwaarts in de Eems rivier. Hierdoor ondervindt de getijgolf minder weerstand, kan de getijamplitude toenemen en kan de getijgolf verder doordringen en van vorm veranderen. Vroom et al. (2012) laten zien dat bij de meetstations Eemshaven en Delfzijl de vorm van de getijgolf is veranderd in de afgelopen decennia. Met name de periode van kentering tijdens hoogwater is langer geworden waardoor fijn sediment meer tijd krijgt om uit te zakken. Dit effect lijkt ook zichtbaar te zijn bij de meetstations in de Eems rivier, hoewel de meetreeksen te kort zijn om hier conclusies uit te trekken (Vroom et al., 2012). Vloeibare slib-afzettingen zorgen voor een verdere afname van de ruwheid van de bodem in de Eems rivier waardoor de getijden ook worden beïnvloed. Deze effecten zijn te merken tot aan de sluis bij Herbrum.



Figuur 6. Gemiddeld zeeniveau gemeten op vier Nederlandse meetstations in het Eems-Dollard estuarium

Met betrekking tot de autonome ontwikkeling is verder de zeespiegelstijging van belang. Figuur 6 toont het gemiddeld zeeniveau gemeten op vier Nederlandse meetstations voor de periode van 1978 t/m 2011. De legenda in deze figuur toont de trends en de 80% betrouwbaarheidsband rondom de trend. Bij Wierumergronden stijgt het gemiddeld zeeniveau in de afgelopen 33 jaar met 1,3 mm/jaar. De stijging bij Huibertgat is veel groter dan alle andere stations in het Eems-Dollard estuarium. Bij Eemshaven stijgt het gemiddeld zeeniveau met 1,5 mm/jaar en bij Delfzijl met 1,9 mm/jaar.

De algehele zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust bedraagt 1,9 mm/jaar ± 0,15 mm/jaar op lange termijn (Baart et al. 2012a,b). De schattingen van het KNMI voor zeespiegelstijging voor deze eeuw in Nederland lopen uiteen van 35 tot 85 cm in 100 jaar.

In de effecthoofdstukken worden de effecten voorspeld op verschillende tijdschalen. Vanwege de verwachte versnelling van de zeespiegelstijging is daarom op de verschillende tijdstippen uitgegaan van andere waarden.

De veronderstelde zeespiegelstijging in de modelberekeningen is voor de verschillende jaren als volgt (ten opzichte van 2012):

- 2015: 0,6 cm (1,9 mm/jaar).
- 2020: 2,4 cm (3,0 mm/jaar).
- 2040: 14,0 cm (5,0 mm/jaar).

Vroom et al. (2012) verwachten dat zeespiegelstijging geen, of zeer beperkte, invloed zal hebben op de sediment dynamiek in het Eems-Dollard estuarium.

Stroming

Figuur 7 toont ter illustratie de berekende stroomsnelheden bij opkomend tij. De maximale stroomsnelheden in de grotere getijgeulen liggen rond de 1,0 tot 1,4 m/s tijdens gemiddeld getij. In de kleinere geulen en op de wadplaten zijn de maximale berekende stroomsnelheden ongeveer 0,6 tot 1,0 m/s. Tijdens doodtij en springtij zullen de stroomsnelheden iets lager respectievelijk hoger liggen. Er is geen informatie beschikbaar met betrekking tot trends in stroomsnelheden. Voor de scheepvaart richting Eemshaven is vooral de stroomsnelheid tijdens de kentering van belang. In deze(korte) periode waarin de stroomsnelheden laag zijn, kunnen schepen namelijk de benodigde manoeuvres maken om de haven in te komen.



Figuur 7. Berekende stroomsnelheden in het Eems-Dollard estuarium bij opkomend tij

Figuur 8 toont ter illustratie de berekende stroomsnelheden tijdens een springtij-doodtij cyclus op km 70 in de vaargeul. Dit is ter hoogte van Eemshaven.



Figuur 8. Berekende waterstanden, stroomsnelheden en stroomrichtingen op km 70 (ter hoogte van Eemshaven)

Golven

Ten noorden van de lijn Borkum-Rottumerplaat ligt de open Noordzee met betrekkelijk hoge golven. Figuur 9 toont in de linker panelen het golfklimaat ten noorden van Borkum. De meeste golven komen uit zuidwestelijke, westelijke of noordwestelijke richting (langste taartpunt). Een significant golfhoogte van 1,1 m wordt 50% van de tijd overschreden en een significante golfhoogte van 2,5 m voor 10% van de tijd.

Het Eems-Dollard estuarium is deels afgeschermd van de Noordzee door de Waddeneilanden en platen waardoor de golven lager zijn dan op de Noordzee. De Dollard is vrijwel volledig afgeschermd en de golven zijn daarom daar het laagst. Figuur 9 toont in de rechterpanelen het golfklimaat ter hoogte van Delfzijl (locatie Eemszinker). Op deze locatie wordt een significant golfhoogte van 0,6 m voor 50% van de tijd overschreden terwijl een significante golfhoogte van 1,0 m voor 10% van de tijd wordt overschreden.

Op de locatie bij Delfzijl komen de meeste golven uit het zuidwesten (langste taartpunt in figuur 9) en de hoogste golven uit het noorden en noordoosten (donkerpaarse kleur in Figuur 9). Reden hiervoor is dat de overheersende windrichting in Nederland zuidwestelijk is (langste taartpunt) terwijl de grootste strijklengte bij Delfzijl in het noorden en noordoosten ligt (donkerpaarse kleur).



Figuur 9. Golfklimaat op de Noordzee bij Borkum riff (links) en in de Eems-Dollard bij Delfzijl Eemszinker (rechts). Het percentage staat voor het percentage van voorkomen uit de betreffende richting. De kleur geeft de golfhoogte aan. De lengte van de taartpunt geeft het percentage golven uit die betreffende richting. Let op het verschil in schaal tussen beide figuren.

Volgens de KNMI'06 klimaatscenario's zal de temperatuur toenemen, de neerslag veranderen en de zeespiegel stijgen. De veranderingen van het windklimaat zullen echter klein blijven ten opzicht van de natuurlijke grilligheid (KNMI, 2006). De combinatie van deze invloeden zal effecten hebben op het golfklimaat. Het is echter niet bekend in welke mate de golven zullen veranderen. Wel wordt verwacht dat grotere waterdieptes als gevolg van zeespiegelstijging kunnen leiden tot hogere golven in het estuarium.

2.3 ZOETWATERTOEVOER EN SALINITEIT

De Eems is de belangrijkste bron van zoet water in het Eems-Dollard estuarium. Daarnaast dragen Westerwoldse Aa en het Eemskanaal in mindere mate bij aan de aanvoer van zoet water. Figuur 10 toont de variatie in de tijd van de maandgemiddelde en jaargemiddelde debieten in de Eems rivier bij station Versen van 1940 t/m 2009. Het jaargemiddelde varieert tussen de 38 en 131 m³/s met een gemiddelde van 81 m³/s. Het maximum maandgemiddelde varieert tussen de 83 en 389 m³/s en het minimum tussen de 9 en 58 m³/s. Er bestaat geen statistisch significant toenemende of afnemende trend in de jaargemiddelde debieten van de Eems rivier.



Figuur 10. Maandgemiddelde en jaargemiddelde debieten in de Eems rivier bij station Versen. (bron: *Global Runoff Data Centre* (GRDC); *Bundesanstalt für Gewässerkunde* (BfG))



Figuur 11. Lange termijn maandgemiddelde debieten in de Eems rivier bij station Versen (bron: *Global Runoff Data Centre* (GRDC); *Bundesanstalt für Gewässerkunde* (BfG))

Figuur 11 toont de lange-termijn maandgemiddelde debieten in de Eems rivier bij station Versen. Deze variëren van 141 m³/s in januari tot 38 m³/s in augustus.

De jaargemiddelde afvoer van de Westerwoldse Aa bedraagt ongeveer 10 m³/s en die van het Eemskanaal ongeveer 8 m³/s. Maxima kunnen tijdens natte periodes hoger zijn en tijdelijk oplopen tot enkele tientallen m³/s.

Naast bovengenoemde Nederlandse spui- en maaldebieten wordt ook aan de Duitse zijde van het estuarium zoet water aangevoerd.

Figuur 12 laat zien dat door deze toevoer van zoet water de zoutconcentratie gemiddeld afneemt van ca. 29 practical salinity units (psu) tussen Borkum en Rottumeroog, naar ca. 25 psu bij Eemshaven, ca. 20 psu bij Delfzijl en ca. 11 psu bij Emden. Verder stroomopwaarts neemt de saliniteit verder af. Hier is de variatie tijdens een getijcyclus ca. 10 psu.



Figuur 12. Gemeten gemiddelde saliniteit in het Eems-Dollard estuarium als functie van de afstand tot Papenburg

Het Eems-Dollard estuarium is betrekkelijk ondiep en het getijvolume is relatief groot. Dit heeft tot gevolg dat er geen of beperkte stratificatie (gelaagdheid) in het systeem aanwezig is en de verticaal goed gemengd is. De instroom van zoet water is voornamelijk afhankelijk van de regenval. In Nederland is de jaarlijkse neerslag vanaf 1906 toegenomen met 18% (KNMI, 2006). Het is de verwachting dat, als een gevolg van een versterking van het broeikaseffect, de hoeveelheid regen de komende 100 jaar opnieuw zal toenemen. Hierdoor kan dan ook een afname van de saliniteit verwacht worden in de Waddenzee en in het Eems-Dollard estuarium.

Naast instroom van zoet water speelt ook de toename van zout water ten gevolge van een grotere getijwerking een rol. De eventuele vergroting van de instroom van zout water heeft een tegengesteld effect aan de veronderstelde toename van de zoetwateraanvoer. Het is niet bekend of de instroom van zoet water of zout water het overheersende mechanisme zal zijn. De saliniteit zal ook licht toenemen ten gevolge van een landwaartse verplaatsing van de longitudinale zoutverdeling. Deze toename is voornamelijk een gevolg van zeespiegelstijging.

Figuur 13 toont de variatie in de tijd van de saliniteit gemeten op verschillende stations in het Eems-Dollard estuarium. Op ongeveer 3 km uit de kust ten noorden van Rottumerplaat bedraagt de saliniteit gemiddeld 29,9 psu. De saliniteit op deze locatie vertoont een statistisch significant toenemende trend van 0,0275 psu/jaar met een 95% betrouwbaarheidsinterval van 0,0144 tot 0,0405 psu/jaar.

Op meetstation Huibertgat oost bedraagt de saliniteit gemiddeld 28,9 psu. Deze vertoont een significant toenemende trend van 0,067 psu/jaar met een 95% betrouwbaarheidsinterval van 0,053 tot 0,081 psu/jaar.

Op meetstation Oude Westereems bedraagt de saliniteit gemiddeld 26,7 psu. De tijdserie van dit meetstation is betrekkelijk kort. Er is daarom geen trend bepaald. Op meetstation Bocht van Watum Noord bedraagt de gemiddelde saliniteit 22,3 psu. Deze tijdserie vertoont geen statistisch significant toenemende of afnemende trend. Op meetstation Oost Friesche Gaatje is de saliniteit gemiddeld 18,9 psu. Ook deze tijdserie is betrekkelijk kort. Er is daarom geen trend bepaald.

Op meetstation Groote Gat Noord in de Dollard bedraagt de gemiddeld saliniteit 14,0 psu. De tijdserie van dit meetstations vertoont een significant toenemende trend van 0,075 psu/jaar met een 95% betrouwbaarheidsinterval van 0,043 tot 0,108 psu/jaar.



Figuur 13. Variatie in de tijd van de saliniteit voor 6 verschillende meetstations in het Eems-Dollard estuarium (bron: www.waterbase.nl)

2.4 TROEBELHEID

Troebelheid (zwevend stofconcentraties) is vanuit de ecologie gezien een belangrijke parameter. Veel organismen zijn afhankelijk van de troebelheid. Het is bijvoorbeeld bepalend voor de lichtinval en daarmee voor het vermogen tot fotosynthese. De troebelheid van het water in de Waddenzee wordt bepaald door de aanwezigheid van zwevende deeltjes in de waterkolom. Dit zwevende stof is een mengsel van deeltjes van biologische herkomst (levend en dood) en deeltjes van niet-biologische oorsprong (klei en silt). De hoeveelheid zwevend stof in de waterkolom wordt bepaald door een samenspel van biotische en abiotische parameters.

De troebelheid vertoont veel ruimtelijke en temporele variatie. De concentratie is relatief laag bij de monding van het estuarium en bereikt een maximum meer stroomopwaarts. De temporele variatie wordt voor een groot deel bepaald door het getij omdat binnen een getij en tijdens de doodtij-springtij cyclus de stroomsnelheden sterk wisselen. De variatie in zwevend stof ten gevolge van variaties in getijstroomsnelheden kan honderden mg/l bedragen. Ook hebben windrichting en windsnelheid een grote invloed op de zwevend stof concentratie. Op grotere tijdschaal spelen seizoensvariaties en rivierafvoervariaties (mede door antropogene activiteiten) een rol. Daarnaast zijn baggeractiviteiten verantwoordelijk voor korte termijn verhogingen van de zwevend stof concentraties. Recente metingen bevestigen de grote variatie in zwevend stof concentraties (Van Santen & Spitzner, 2012; Reneerkens & Spitzner, 2012a, b en c).





De zwevend stof concentraties zijn de laatste decennia continu toegenomen (o.a. Spiteri et al., 2011). Figuur 14 toont ter illustratie het zwevend stofgehalte in 1975/1976 en in 2005/2006 als functie van de afstand tot Papenburg. Hieruit blijkt dat met name in het deel bovenstrooms van Delfzijl de zwevendstofconcentratie is toegenomen. Vroom et al. (2012) hebben een gedetailleerde statistische analyse uitgevoerd op gemeten zwevend-stofconcentraties. Uit deze analyse blijkt dat in de periode 1990-2011 de concentratie zwevend stof tussen Borkum en Rottumeroog (meetstation Huibertgat Oost) is toegenomen met ongeveer 0,7 mg/l/jaar. Verder het estuarium in, in de Bocht van Watum noord, is dit 2,4 mg/l/jaar. In de Dollard (meetstation Groote Gat noord) is de toename 3,9 mg/l/jaar.

De grote toename in troebelheid in de afgelopen tientallen jaren wordt toegeschreven aan een voortdurende verdieping van de rivier (De Jonge, 2007). Winterwerp (2011) beschrijft de mechanismen die hebben geleid tot deze zogenoemde regime shift. In reactie op de verdiepingen van de Eems rivier neemt de sedimentlast in de rivier allereerst toe door een toename van het opwaarts transport. In de overgangsfase daarna, wanneer de concentraties in de rivier waarden hebben bereikt van enkele 100 mg/l, wordt interne getij-asymmetrie dominant door de interactie tussen de sedimentlast, de turbulente waterbeweging en verticale menging. Het lijkt erop dat de rivier zich rond 1990 in deze overgangsfase bevond. Uiteindelijk is de sedimentlast zo groot dat in de laatste ontwikkelingsfase van de rivier er vloeibare sliblagen worden gevormd en het opwaarts transport wordt gedomineerd door getij-asymmetrie van de stroomsnelheid.

Van Santen & Spitzner (2012) en Reneerkens & Spitzner (2012a, b en c) beschrijven recente metingen van stroomsnelheden, sedimentconcentraties, temperatuur en saliniteit in het Eems-Dollard estuarium in het gebied van de geplande vaargeulverruiming. Figuur 15 toont een voorbeeld van gemeten waarden in het Randzelgat op ongeveer 5 m onder het wateroppervlak in de periode van 1 maart 2012 tot 1 mei 2012. De gemiddelde concentratie in deze periode bedraagt 55 mg/l en de standaard deviatie 32 mg/l. In 95% van de tijd blijft de concentratie onder de 114 mg/l en in 5% van de tijd onder de 17 mg/l.



Figuur 15. Gemeten sedimentconcentratie, temperatuur en saliniteit. (referenties: Van Santen & Spitzner, 2012; Reneerkens & Spitzner, 2012a, b en c)

2.5 SEDIMENTEIGENSCHAPPEN

Het Eems-Dollard estuarium is gevormd tijdens het Holoceen. Het Waddengebied en het Eems-Dollard estuarium bestaan voornamelijk uit zandige en kleiige afzettingen. Op een aantal plaatsen worden deze afzettingen doorsneden door keileempakketten. Dit keileem is afgezet tijdens de ijstijden (Saalien en Weichselien). Het keileem uit het Saalien bevindt zich op een diepte van meer dan NAP- 25 m en is voornamelijk terug te vinden ten westen van het estuarium. Keileem uit het Weichselien ligt op ongeveer NAP -20 tot NAP-5 m en bevindt zich voornamelijk ten noordoosten van het estuarium, dit is ten noorden van en langs de kust van Ost-Friesland (Koomans & De Vries, 2006; Hartsuiker et al., 2007; Jonkman & De Vries, 2010).

De mediane korreldiameter in het estuarium en langs het vaarweg traject wisselt sterk (figuur 16). Het sediment in de diepere geulen van het estuarium is voornamelijk zandig met een mediane korreldiameter van ongeveer 0,18 mm tot 0,60 mm. De ondiepere gedeelten bevatten meer slib (silt, lutum) en fijn zand. De mediane korreldiameter varieert hier tussen ongeveer 0,06 mm en 0,24 mm. Langs het vaarwegtraject (tot buiten het estuarium) zijn een aantal extra sedimentmonsters genomen. Hieruit blijkt dat op de meeste plekken langs de vaarweg zand aanwezig is met een korreldiameter tussen de 0,2 en 0,6 mm. Op een aantal plekken zijn keileem en kleilagen gevonden (Koomans & De Vries, 2006; Hartsuiker et al., 2007; Jonkman & De Vries, 2010).

De slibpercentages van het bodemmateriaal in het estuarium variëren sterk maar nemen landinwaarts toe (figuur 17). Tussen Borkum en Rottummeroog bedraagt het slibpercentage ongeveer 0-2%. In de Dollard is dit 10-100%.



Figuur 16. Mediane korreldiameter van het sediment in het Eems-Dollard estuarium. Bron gegevens: Sedimentatlas Waddenzee; Rijkswaterstaat, 1998.



Figuur 17. Slibpercentages in het Eems-Dollard estuarium. Bron gegevens: Sedimentatlas Waddenzee; Rijkswaterstaat, 1998.

2.6 MORFOLOGISCHE ONTWIKKELING OP LANGE TERMIJN

De morfologie van het gebied is de resultante van een ontwikkeling die zich de afgelopen 1500 jaar heeft voltrokken. Figuur 18 toont de situatie aan het begin van deze ontwikkeling (rond het jaar 500).

In de 14e en 15e eeuw breidde de invloed van de Noordzee in het gebied uit, zodat enkele grote zeearmen ontstonden. Ten westen van de Groninger Waddenzee vormden zich de Lauwerszee en het Groningerdiep en Reitdiep een zeearm van beperkte omvang en ook de Eems-Dollard zelf vormde een zeearm. Tussen deze zeearmen vormde de Fivel een inham in het verder relatief hooggelegen gebied (Van Veen, 1930; Roeleveld, 1974).



Figuur 18. Paleografische reconstructie van het oostelijke waddengebied rond ongeveer 600 A.D. (uit Esselink, 2000)

De Dollard bereikte zijn maximale omvang rond 1520. Door de natuurlijke sedimentatie in de zeearmen breidden de wadplaten en de kwelders uit, waardoor de zeearmen in omvang afnamen. De bewoners van deze gebieden gebruikten de kwelders en begonnen deze al vroeg in de geschiedenis te voorzien van walletjes, die als lage dijken fungeerden. Later werden de kwelders echt ingedijkt, waardoor polders ontstonden. Stapsgewijs werden op deze wijze grote delen van de Dollard ingepolderd, zoals voor de Dollard is beschreven in de historische studie van Stratingh en Venema (1855). Figuur 19 toont de inpolderingen van de Dollard. Een vergelijkbare ontwikkeling heeft zich voorgedaan rond de Lauwerszee en bij de Fivel (o.a. Roeleveld, 1974).



Figuur 19. Inpolderingen van de Dollard (uit Esselink, 2000)

De grootste verandering in de afgelopen 100 jaar is het verdwijnen van de geulverbinding tussen de kombergingsgebieden van de Westereems en de Oostereems, ten zuidoosten van het Waddeneiland Borkum (Gerritsen, 1952). Tegenwoordig ligt hier een wantij, dat wordt gevormd door de platen en ondieptes Ranzel, Eemshorn en het Pilzumer wad, die niet worden doorsneden door geulen. In het verleden doorsneed de geul Westerbalg het gebied. Overigens is het wantij, net als in de rest van de Waddenzee, een open wantij, waarover water en sediment kan worden uitgewisseld (Van Straaten, 1969). Figuur 20 toont kaarten van de Eems in 1833 en 1949 ter illustratie van deze ontwikkelingen.

Andere morfologische veranderingen omvatten de verplaatsing en toe- en afname van de omvang van geulen. De ligging en het belang van de geulen in de Eems en de Eemsmonding is hierdoor gewijzigd. Deze veranderingen gaan hand in hand met veranderingen in de ligging van de platen. Al vanaf de jaren twintig is deze ontwikkeling mede beïnvloed door het baggeren. Vanaf de Noordzee naar het land is een aantal veranderingen te benoemen. In de monding is de grootte van de Westereems toegenomen en de grootte van het Huibertgat afgenomen. Joustra (1971) beschrijft de oorzaken waarom in eerste instantie het Huibertgat en later de Westereems groot zijn geworden en waarom de Westereems nu steeds groter wordt. In het gedrag van deze geulen is geen cyclisch proces te ontdekken. Het Randzelgat is een redelijk stabiele geul, maar de geul Oude Westereems migreert naar het noordoosten. De tussenliggende plaat Meeuwenstaart neemt gaandeweg in omvang af. De omvang van het Doekegat blijft min of meer gelijk, terwijl de naamloze geul ten oosten van de Doekplaat in omvang afneemt. Het Oost Friesche Gaatje neemt in omvang toe, terwijl de Bocht van Watum al sinds het begin van de 20e eeuw in omvang afneemt. In de Gaatjebocht verandert het geulprofiel. De positie en de grootte van het Emder Vaarwater is relatief stabiel, mede door de combinatie van baggerwerkzaamheden en aanleg van de Geiseleitdam op de Geiserücken, de geleidingsdam die het Emder Vaarwater van het Groote Gat scheidt. Het Groote Gat is geleidelijk aan minder groot geworden.



Figuur 20. Kaarten van de Eems in 1833 en 1949 (uit Gerritsen, 1952).

2.7 RECENTE MORFOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN

Recente morfologische ontwikkelingen zijn onderzocht op basis van zes bodemhoogtekaarten uit de jaren 1985, 1989-1999, 1995-1997, 1999-2001, 2005, 2007-2008 en 2010. Deze kaarten zijn opgenomen in bijlage A. Ter illustratie toont figuur 21 de bodemhoogtekaart van 2010. De kaarten laten zeewaarts van het zeegat duidelijk twee geulen zien die zich achtereenvolgens samenvoegen, splitsen en weer samenvoegen. Ter hoogte van de splitsing lijken de Oude Westereems en het Randzelgat equivalent terwijl verderop in het estuarium de ene geul domineert over de andere (Oostfriesche Gaatje ten opzichte van Bocht van Watum). De interpretatie van het temporele gedrag van de geulen en platen worden hier beschreven op basis van het netto sedimentatie-erosie-patroon tussen 2010 en 1985 (figuur 22), de ontwikkelingen in 12 dwarsdoorsnedes (figuur 23 t/m figuur 25), en op basis van de ontwikkeling van de NAP-10 m contourlijnen.



Figuur 21. Bodemhoogte Eems-Dollard estuarium gemeten in 2010 (bron: WSA Emden)



Figuur 22. Bodemhoogteverschil (sedimentatie en erosie) tussen 2010 en 1985. Positief is sedimentatie (warme kleuren) en negatief is erosie (koude kleuren).



Figuur 23. Locatie van dwarsdoorsnedes langs het Eems-Dollard estuarium

Op de buitendelta toont dwarsdoorsnede 1 een verbreding van de diepere delen van het Huibertgat en versteiling van de zuidelijke rand van deze geul (1^{ste} paneel in figuur 24).

Verder richting het Zeegat van de Eems toont dwarsdoorsnede 1a een vernauwing van het Huibertgat door verbreding van de Huibertplaat (2^e paneel in figuur 24). De Huibertplaat verbreedt zich eveneens richting de Westereems hetgeen resulteert in sedimentatie langs de zuidelijke geulrand. Erosie treedt op aan de noordelijke geulrand van de Westereems, vooral in de eerste jaren vanaf 1985.

Juist zeewaarts van het Zeegat van de Eems toont dwarsdoorsnede 2 een zuidwaartse migratie van Huibertplaat en daardoor van het Huibertgat (3^e paneel in figuur 24). Tegelijk treedt verruiming van de Westereems op in deze dwarsdoorsnede.

In het Zeegat van de Eems laat dwarsdoorsnede 3 zien dat het noordelijk deel van de Oude Westereems 100 tot 400 m naar het noordoosten migreert (4^e paneel in figuur 24). Dit is richting het noordelijke deel van het Randzelgat en Borkum. Deze migratie gaat gepaard met een erosie van het meest noordelijke deel van de Meeuwenstaart. Dit is ook zichtbaar in de NAP-10 m contourlijn in figuur 26. Het Randzelgat is betrekkelijk stabiel in dwarsdoorsnede 3.

Verderop in het estuarium laat dwarsdoorsnede 4 een noordoostelijke migratie van de Meeuwenstaart zien van ongeveer 200 m (5^e paneel in figuur 24). Tegelijkertijd treedt versmalling van deze plaat op (zie ook NAP-10 m contourlijn in figuur 27). De hoogte blijft vrijwel gelijk. In dwarsdoorsnede 4a is te zien dat de Meeuwenstaart richting het Randzelgat is gemigreerd tussen 1985 en 1999/2001 maar dat deze migratie zich daarna niet heeft voortgezet (6^e paneel in figuur 24). Deze migratie is mogelijk veroorzaakt door het ontstaan van een diepe put in het Randzelgat waardoor de geul te ruim in zijn jasje kwam.





De twee geulen Oude Westereems en Randzelgat komen samen in het Doekegat in dwarsdoorsnede 5 (1^{ste} paneel in figuur 25). Deze laat in het noordoosten migratie van de geulrand naar het zuidwesten zien en tegelijk verdieping van de geul in deze buitenbocht. Deze ontwikkeling is ook duidelijk zichtbaar in de NAP-10 m contourlijn in figuur 27.

Dwarsdoorsnede 6 ligt op de overgang tussen Doekegat en de twee geulen Oostfriesche Gaatje en Bocht van Watum (2^e paneel in figuur 25). Deze toont sedimentatie in de Bocht van Watum en verdieping van het Oostfriesche Gaatje. Dwarsdoorsnedes 7 en 8 laten hetzelfde zien (3^e en 4^e paneel in figuur 25).
Dwarsdoorsnede 9 laat zien dat de geul Gaatjebocht aan de zuidkant het meest dynamisch is en aan de noordkant betrekkelijk stabiel (5^e paneel in figuur 25). Dwarsdoorsnede 10 toont noordwaartse migratie van de zuidelijke geulrand van de geul Gaatjebocht tussen de jaren 1985 en 1999-2001 (6^e paneel in figuur 25). Daarna blijft deze rand redelijk stabiel. Het Emder Vaarwater blijft stabiel tussen 1985 en 2010. Dit is ook zichtbaar in de NAP-10 m contourlijnen in figuur 28.



Figuur 25. Ontwikkeling van dwarsprofielen 5 t/m 10 in de periode van 1985 t/m 2010. Figuur 23 toont de locatie van dwarsdoorsnedes.



Figuur 26. Ontwikkeling van de NAP-10 m contourlijn ter hoogte van Westereems en Huibertgat van 1985 t/m 2010



Figuur 27. Ontwikkeling van de NAP-10 m contourlijn ter hoogte van Doekegat van 1985 t/m 2010



Figuur 28. Ontwikkeling van de NAP-10 m contourlijn ter hoogte van het Oostfriesche Gaatje van 1985 t/m 2010

Ondanks de complexiteit van de fysische processen in estuaria bestaan er betrekkelijk eenvoudige stabiliteitsrelaties tussen de oppervlakte van het dwarsprofiel van geulen en de hoeveelheid water die per getij passeert. Een vergelijking tussen het gemeten oppervlak met het oppervlak uit de stabiliteitsrelatie geeft een indicatie van de te verwachten vergroting of verkleining van de geul. Voor het Eems-Dollard estuarium bestaan er stabiliteitsrelaties door Gerritsen & De Jong (1985) en Van de Kreeke & Haring (1979). Hartsuiker et al. (2007) en Kiezebrink (1996) hebben de stabiliteit van het geulensysteem onderzocht. Analyse met recentere gegevens is niet mogelijk omdat debietmetingen ontbreken. Paragraaf 4.6 in dit rapport gaat hier nader op in.

2.8 ONTWIKKELING SEDIMENTVOLUMES

De ontwikkeling van de sedimentvolumes is een belangrijke basis om de morfologische ontwikkeling te snappen. Deze geeft een beeld van de grootschalige veranderingen die plaatsvinden in het Eems-Dollard estuarium. Cleveringa (2008) heeft in navolging van Hartsuiker et al. (2007) op basis van digitaal beschikbare bodemliggingen, bestaande analyses en sedimenttransportbanen, de ontwikkeling van de sedimentvolumes bepaald van de Groninger Wadden en de Eems-Dollard. Figuur 29 toont het beschouwde studiegebied. Na 2008 zijn nieuwe digitale bodemliggingen van de Eems-Dollard beschikbaar gekomen. In dit hoofdstuk worden de nieuwe gegevens gebruikt om de bestaande sedimentbalans van Cleveringa (2008) aan te vullen.



Figuur 29. Ligging van het studiegebied

De analyse van de sedimentvolumes is uitgevoerd op basis van digitaal beschikbare bodemliggingen uit de periode van 1985 tot en met 2010 (tabel 3). Ook de jaren van opname van de deelgebieden zoals die door Rijkswaterstaat worden gehanteerd bij de vaklodingen zijn opgenomen in tabel 3. Van deze jaren van opnamen is een vertaling gemaakt naar de kuberingsgebieden (figuur 30). Bij een combinatie van verschillende opnamejaren per kuberingsgebied (dat is met name het geval in deelgebied 3) is het jaartal genomen waarin het grootste areaal van het deelgebied is opgenomen.

Tabel 4 geeft de gebruikte opnamejaren per deelgebied, die zijn gebruikt bij het vaststellen van de ontwikkelingen van de sedimentvolumes.

Tabel 3. Jaar van opname voor de verschillende deelgebieden uit de Rijkswaterstaat Vaklodingen en de lodingen van het Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) in Emden

Combinatie grids	Dollard	Eems	Eems buiten	Huibertgat & Lauwers buiten	Huibertgat & Lauwers binnen
RWS 1985	1985	1985	1985	1985	
RWS 1989-1990	1990	1990	1990	1989	1989
RWS 1994-1997	1996	1997	1995		1994
RWS 1999-2002	2002	2002	2001	2001	2000
WSA 2005	2005	2005	2005	2005	2005
RWS 2005-2008	2008	2008	2008	2007	2007
WSA 2010	2010	2010	2010	2010	2010

Combinatie	Gebied 1	Gebied 2	Gebied 3	Gebied 4	Gebied 5
grids					
RWS 1985	1985	1985	1985	1985	-
RWS 1989-1990	1990	1990	1990	1989	1989
RWS 1994-1997	1995	1995	1997	1996	1994
RWS 1999-2002	2000	2002	2002	2002	2000
WSA 2005	2005	2005	2005	2005	2005
RWS 2005-2008	2007	2008	2008	2008	2007
WSA 2010	2010	2010	2010	2010	2010

Tabel 4. Jaar per kuberingsgebied.

De Rijkswaterstaat vaklodingen zijn uitgeleverd in een 20 m x 20 m rooster in het RD stelsel, met een diepte in cm ten opzichte van NAP. Beide WSA-gegevens sets zijn omgezet naar hetzelfde type raster. Per deelgebied is het watervolume onder een referentiehoogte bepaald (NAP + 3, 0 m, NAP -5 m en NAP -10 m, behalve waar anders is aangegeven). Het verschil in watervolume ten opzichte van de eerste opname (1985 voor de deelgebieden 1 tot en met 4, 1989 voor deelgebied 5) is omgekeerd evenredig aan de verandering in het sedimentvolume.

De kuberingsgebieden uit de eerdere studies zijn te zien op de kaart in figuur 30, waarin ook de bodem van 2010 is opgenomen. Bij gebied 1 en gebied 5 zijn kleine stukken te zien die een afwijkende (roze) kleur hebben. Van deze kleine gebieden zijn geen bodemliggingen uit 2010 beschikbaar. De kuberingsgebieden zijn hierop aangepast en zijn daarom iets kleiner dan de oorspronkelijke gebieden uit Cleveringa (2008).



Figuur 30. Kaart met de kuberingsgebieden.

Cleveringa (2008) concludeert dat de verschilkaarten en dwarsdoorsneden van het studiegebied patronen vertonen die wijzen op fouten in de gegevens. Deze foutenmarge rond de veranderingen in het sedimentvolume is vastgesteld en gebruikt in de tabellen met de resultaten. Een indicatie van het belang van de foutenmarge bij het vaststellen van de ontwikkelingen is zichtbaar in de grafieken met de ontwikkeling van de watervolumes in de Eems (gebieden 1 t/m 3) in figuur 31 en in de Dollard (gebied 4) in figuur 32. In deze grafieken is een foutenmarge aangegeven ter grootte van de oppervlakte van het gebied vermenigvuldigd met 0,075 m (7,5 cm). In andere studies is gerekend met nauwkeurigheden van 10 cm (bijvoorbeeld Grasmeijer en Cleveringa, 2010). Voor alle duidelijkheid, deze bandbreedte van 7,5 cm heeft geen betrekking op de (toevallige) fout van de hoogtemetingen, maar omvat alle toevallige en systematische fouten die voortkomen uit het meten en verwerken. De berekende lineaire trends vallen (net) binnen deze bandbreedte. De waarde die aan de schommelingen in de volumes wordt gehecht is daarom beperkt. Dat de ontwikkelingen binnen de bandbreedte van de nauwkeurigheid blijven suggereert dat er geen heel grootschalige veranderingen plaatsvinden, bijvoorbeeld vergeleken met de Westerschelde en de Westelijke Waddenzee.



Figuur 31. Grafiek van de ontwikkeling van het watervolume van de Eems (gebieden 1 t/m 3 in figuur 30) onder NAP + 3 m, met een indicatie van de fout en de lineaire trend (boven) en procentueel t.o.v. 1985 (onder).





De in Cleveringa (2008) bepaalde trend voor de sedimentatie in de Eems is opnieuw bepaald met de aangevulde reeks waarnemingen (figuur 31) en dat is ook voor de Dollard gebeurd (figuur 32). Tabel 5 toont in rij 1 de bepaalde sedimentatie in de Eems over de periode 1985-2010, met tussen haakjes de oorspronkelijk in Cleveringa (2008) bepaalde trends. De trend voor de sedimentatie in de Eems in de periode 1985-2010 ligt op de ondergrens van de oorspronkelijk bepaalde trend. Voor de Dollard is de bepaalde trend van 0,0x10⁶ m³/jaar lager dan de oorspronkelijk beredeneerde trend van 0,2 x10⁶ m³/jaar (rij 3 in tabel 5).

Voor de gebieden die niet of slechts beperkt in de metingen zijn vertegenwoordigd zijn geen nieuwe getallen bepaald. Deze getallen zijn overgenomen uit Cleveringa (2008). In dat rapport wordt onderbouwd op welke wijze de getallen zijn opgebouwd. Hier wordt beknopt ingegaan op de herkomst van de getallen. Van de gebieden die niet in de vaklodingen zijn opgenomen (rij 2 in tabel 5) is op basis van andere gegevens (bijvoorbeeld hoogtemetingen in de kwelders), of op basis van *expert judgement* een schatting gemaakt van de sedimentatie. Voor de kwelders in de Dollard zijn hoogtemetingen gebruikt (rij 4 in tabel 5). Het onttrekkingsvolume is in rij 5 van tabel 5 gebaseerd op overzichten van de in het verleden uitgevoerde onttrekkingen in combinatie met verwachtingen over toekomstige onttrekkingen. Het sedimentvolume dat aan de Eems-Dollard wordt onttrokken voor landaanwinning en zandwinning is sterk afgenomen in de jaren '90. De toekomstige netto aanvoer van sediment naar de Eems-Dollard zal daarom waarschijnlijk tussen de 1,9 en 3,9x10⁶ m³ per jaar liggen. Hiervan is 1,5 tot 3,2x10⁶ m³ per jaar zand. Het bodemdalingsvolume door gaswinning is gebaseerd op gerapporteerde volumes.

De grootschalige geologie legt geen grote beperkingen op aan de vorm van het estuarium, maar kan lokaal, bijvoorbeeld op de plekken waar keileem in de ondergrond aanwezig is, wel de ontwikkelingen beïnvloeden doordat de erosie wordt beperkt;

Tabel 5: Sedimentatie Eems-Dollard over de periode 1985-2010 (de oorspronkelijke getallen voor periode 1985-2002 voor de Eems en de Dollard uit Cleveringa (2008) zijn tussen haakjes vermeld).

	Ondergrens (x10 ⁶ m ³ /jaar)	Gemiddeld (x10 ⁶ m ³ /jaar)	Bovengrens (x10 ⁶ m ³ /jaar)
1. Geobserveerde veranderingen sedimentvolume Eems	1,2	1,2 (2,0)	2,9
2. Gebieden niet in bodemligginggegevens		0,04	
3. Geobserveerde veranderingen sedimentvolume Dollard		0,0 (0,2)	
4. Kwelders Dollard	0,02	0,06	0,09
5. Onttrekking sediment (gemiddeld (1985-2006)		2,0	
6. Bodemdaling als gevolg van gaswinning (Slochteren)		0,43	
Totaal	3,9	3,7 (4,7)	5,7
7. Bijdrage slibsedimentatie		0,4-0,7	

Rij 1 in tabel 6 toont de sedimentatie in de Groninger Wadden op basis van de waargenomen trend over de periode van 1985 tot 2010. De in Cleveringa (2008) bepaalde waarde is tussen haakjes in rij 1 van tabel 6 opgenomen. De berekende toename van 0,66x10⁶ m³ per jaar in de periode van 1985 tot en met 2010 is beduidend groter dan de eerder berekende bovengrens in de veranderingen van het sedimentvolume. Deze waargenomen sedimentatie bedraagt iets meer dan de 0,5x10⁶ m³ per jaar die noodzakelijk is voor het bijhouden van de zeespiegelstijging. Van de gebieden die niet in de vaklodingen zijn opgenomen (rij 2 in tabel 6) is op basis van andere gegevens (bijvoorbeeld hoogtemetingen in de kwelders), of op basis van *expert judgement* een schatting gemaakt van de sedimentatie. Het ontbreken van zandwinning is gebaseerd op overzichten van de onttrekkingen (Mulder, 2013).

Tabel 6. Sedimentatie Groninger Wadden over de periode 1985-2010 (Het oorspronkelijke getal voor periode 1985-2002 uit Cleveringa (2008) is tussen haakjes vermeld).

	Ondergrens (x10 ⁶ m³/jaar)	Gemiddeld (x10 ⁶ m ³ /jaar)	Bovengrens (x10 ⁶ m³/jaar)
1. Geobserveerde veranderingen sedimentvolume	-0,25	+0,66 (-0,13)	0,02
Groninger Wadden			
2. Gebieden niet in bodemligginggegevens	0,09	0,22	0,34
3. Zandwinning	0,0		
Totaal	-0,17	0,88 (0,09)	0,32

De ontwikkelingen van de sedimentvolumes zoals die hierboven zijn weergegeven, zijn voor de Eems over een groot gebied gecombineerd. Per gebied blijken de ontwikkelingen te verschillen.

In gebied 1 in de monding van de Eems is sprake van een afname van het sedimentvolume, die consequent optreedt over de gehele periode van waarnemen. In de periode van 1985 tot 2010 is het sedimentvolume met ongeveer 15x10⁶ m³ afgenomen. Gebied 2 omvat de grote geulen Randzelgat en Oude Westereems, die van elkaar worden gescheiden door de ondiepte Meeuwenstaart. Ook omvat het een deel van het Groningerwad en een deel van het wad ten zuidoosten van Borkum. In dit gebied is sprake van een toename van het sedimentvolume, die in totaal ruim 15x10⁶ m³ bedraagt.

Deze toename is niet constant in de tijd verlopen, de metingen laten een grote toename zien tot 2001, gevolgd door twee waarnemingen met een lager sedimentvolume. De waarde uit 2010 komt vrijwel overeen met die van 2001.

Gebied 3 omvat het grote plaatgebied Hond-Paap, met aan de westzijde de geul Bocht van Watum en aan de oostzijde de geul Oostfriesche Gaatje. Aan de noordzijde in het gebied ligt het Doekegat en de Doekeplaat, een naamloze geul, de Eemshornplaat en het Pilsumerwad. Figuur 33 toont een grafiek van de ontwikkeling van het sedimentvolume in gebied 3, onder drie hoogteniveaus. Het totale sedimentvolume onder NAP +3 m is ten opzichte van 1985 toegenomen, met ruim 20x10⁶ m³. De diepe delen in gebied 3, onder respectievelijk NAP -5 en -10 m laten een duidelijke afname van het sedimentvolume zien, die onder NAP – 5 m ruim 30 x 10⁶ m³ bedraagt. De geulen zijn dus ruimer geworden, terwijl de ondiep gebieden nog ondieper zijn geworden . In figuur 22**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** is zichtbaar dat de belangrijke sedimentatiegebieden de Bocht van Watum, de Eemshornplaat en het Pilsumerwad zijn.



Figuur 33. Grafiek van de ontwikkeling van het sedimentvolume ten opzichte van dat in 1985 in gebied 3.

In de Dollard en aangrenzende gebieden die samen gebied 4 vormen, is het sedimentvolume na een toename tot meer dan 10x10⁶ m³ in 2010 terug op het niveau van 1985 (figuur 32). In de Dollard en aangrenzende gebieden die samen gebied 4 vormen, is het sedimentvolume beperkt toegenomen. Ook op het Groningerwad (gebied 5) heeft een beperkte sedimentatie plaatsgevonden.

In de figuur 34 t/m figuur 38 is voor de gebieden 1 tot en met 5 de ontwikkeling van het sedimentvolume ten opzichte van 1985 weergegeven. In deze figuren is ook een bandbreedte weergegeven rond de meetpunten, die de onzekerheden in de hoogtebepalingen omvat. De lineaire trends vallen binnen de weergegeven bandbreedte. Aan de sprongen tussen de meetpunten moet geen waarde worden toegekend, deze zijn waarschijnlijk het gevolg van onzekerheden in de bepalingen.



Figuur 34. Verandering van de het sedimentvolume in gebied 1 ten opzichte van dat in 1985.



Figuur 35. Verandering van de het sedimentvolume in gebied 2 ten opzichte van dat in 1985.



Figuur 36. Verandering van de het sedimentvolume in gebied 3 ten opzichte van dat in 1985.



Figuur 37. Verandering van de het sedimentvolume in gebied 4 ten opzichte van dat in 1985.





2.9 BAGGEREN, VERSPREIDEN EN ZANDWINNING

Baggeren en zandwinning

Het totale baggerwerk in het gehele estuarium inclusief onderhoud van de havens en zandwinning bedraagt globaal 11 miljoen m³ per jaar. Hiervan wordt 0,50 miljoen m³ per jaar gebaggerd in de Westereems, het Randzelgat en het Zeegat tussen Borkum en Rotummeroog. In het Doekegat en het Oostfriesche Gaatje wordt 0,36 miljoen m³ per jaar gebaggerd.

Verder naar binnen wordt in de Gaatje Bocht 2,55 miljoen m³ per jaar gebaggerd en in het Emder Vaarwater 3,65 miljoen m³. Daarnaast vindt er zandwinning plaats, hoofdzakelijk in het Oostfriesche Gaatje tussen km 57,5-60. Dit bedraagt ongeveer 0,56 miljoen m³ per jaar. De overige 3,56 miljoen m³ wordt gebaggerd in de havens. Tabel 7 geeft een overzicht van de baggervolumes (bron: Mulder, 2013).

Tabel 7. Gemiddelde jaarlijkse baggervolumes voor onderhoud langs de vaargeul, zandwinning en in de havens voor de periode 2007-2011. Eemshaven ligt ter hoogte van km-sectie 70. Bron: Mulder (2013).

Locatie		Km-sectie	Gemiddeld onderhoud (x10 ⁶ m³/jaar)	Soort materiaal
1	Westereems	90-105	0,43	zand
2	Randzelgat en Zeegat	74,6-90,0	0,07	zand
3	Doekegat	62,0-74,6	0,32	zand
4	Oostfriesche Gaatje	57,0-62,0	0,04	zand
5	Gaatje Bocht	50,0-57,0	2,55	zand/slib
6	Emder Vaarwater	40,7-50,0	3,65	slib
7	Zandwinning		0,56	zand
8	Havens		3,56*	slib
9	Totaal		11,18	

* Dit volume is inclusief het volume voor verruiming Eemshaven van 3,2x10⁶ in de periode 2009-2011.

Uit bovenstaand overzicht blijkt dat betrekkelijk veel wordt gebaggerd in het Emder Vaarwater en in de Gaatje Bocht. Het meeste sediment wordt vervolgens verspreid in het Oostfriesche Gaatje en het Doekegat (Klapstellen 5 en 7). Op deze manier vindt er een kunstmatig transport van sediment plaats van zuidoost naar noordwest.

Onttrekkingen

Voor de grootschalige sedimentbalans van het gebied is het vooral van belang hoeveel sediment permanent wordt onttrokken (of toegevoegd, maar daar is in dit gebied geen sprake van). Het baggeren en storten binnen het Eems-Dollard estuarium resulteert in een interne herverdeling van het sediment, die voor de ontwikkeling van het sedimentvolume van het gehele gebied niet uitmaakt. Dit geldt ook voor het baggeren van sediment in de havens en in de Unterems. Deze baggerlocaties liggen buiten de kuberingsgebieden, terwijl de stortgebieden wel binnen de kuberingsgebieden liggen. Verondersteld wordt dat de aanvoer van baggerspecie naar de kuberingsvakken gelijk is aan de natuurlijke sedimenttransporten naar de havens en de Unterems. Dit is derhalve ook een herverdeling van sediment, zonder gevolgen voor de lange termijn ontwikkeling van het sedimentvolume. Het totale gebaggerde en gestorte volume in het Eems-Dollard estuarium bedraagt gemiddeld ongeveer 11x10⁶ m³ per jaar. Dit zijn beunvolumes in het baggerschip en niet direct vergelijkbaar met gemeten in-situ volumes.

Voor de Eems-Dollard zijn de onttrekkingen ten bate van landaanwinning en de delfstofwinning van zand van belang voor de grootschalige sedimentbalans.

Figuur 39 toont het jaarlijks volume van bij vaarwegonderhoud onttrokken sediment uit het Eems-Dollard estuarium, gebruikt voor landaanwinning van de Rysumer Nacken. Dit begon met 0,16x10⁶ m³ in 1960 en liep op tot 11,62 x10⁶ m³ in 1972 waarna het weer afnam tot nul in 1995.

Figuur 40 toont een overzicht van de jaarlijkse zandwinvolumes voor de periode 1970-2011 (Mulder, 2013). Van 1970 tot 2000 bedroeg de jaarlijkse zandwinning ongeveer 1,38x10⁶ m³/jaar. Vanaf het jaar 2000 bedraagt de jaargemiddelde zandwinning ongeveer 0,59 x 10⁶ m³ per jaar.



Onttrokken/opgespoten voor landaanwinning

Figuur 39. Jaarlijks volume (m³) van bij vaarwegonderhoud onttrokken sediment uit het Eems-Dollard estuarium, gebruikt voor landaanwinning van Rysumer Nacken (Mulder, 2013).



Zandwinning in het Eems-Dollard estuarium

Figuur 40. Jaarlijks volume (m3) van zandwinning in het Eems-Dollard-estuarium

2.10 ANDERE MENSELIJKE INGREPEN

Een overzicht van de ingrepen in het gebied is gepresenteerd in figuur 41. De bagger-, stort- en zandwinactiviteiten zijn reeds in de voorgaande paragraaf besproken. Het Eems-Dollard estuarium ligt in het bereik van de bodemdalingsschotel van het Slochterenveld. De voorspelling is dat in 2050 de totale bodemdaling -19,7 x 10⁶ m³ bedraagt voor het hele estuarium (Hoeksema et al, 2004). Wanneer wordt uitgegaan van een lineaire trend dan heeft de bodemdaling een vergelijkbaar effect op het sedimentvolume in het estuarium van -0.43 x 10⁶ m³/jaar.

De afdamming van de Lauwerszee in 1969 heeft tot gevolg gehad dat de stroming in het getijbekken van het Friesche Zeegat meer west-oost is georiënteerd in plaats van noordwest-zuidoost naar de Lauwerszee toe. Na 1969 is het oostelijke wantij van het getijdebekken van het Friesche Zeegat naar het oosten verplaatst (zie bijvoorbeeld Oost, 1995). Deze uitbreiding is ten koste gegaan van het getijdebekken van de Eilanderbalg.

Het Emssperrwerk is gebouwd van 1998-2002. In 1972 is voor de haven van Delfzijl het zeehavenkanaal aangelegd. Aan de Geiseleitdamm is van 1961 t/m 1968 gewerkt tot aan zijn huidige vorm.



Figuur 41. Overzicht van de recente menselijke ingrepen in het gebied van de Eems-Dollard en de Groninger Wadden.

Voor de systeemkennis zou het gewenst zijn om een sedimentbalans uit te werken waarin de ingreepvolumes en locaties zijn verwerkt, zodat een beter kwantitatief beeld ontstaat van de transporten en de antropogene modificatie daarvan. Echter, de gegevensdichtheid van het Eems-Dollard gebied (met slechts één totaal opname iedere zes jaar) is veel lager dan die van bijvoorbeeld de Westerschelde (tegenwoordig een jaarlijkse totaal opname). In combinatie met de beperkingen die voortkomen uit de kwaliteit van de gegevens kunnen we op voorhand vaststellen dat een sedimentbalans voor de Eems-Dollard zeer grote marges zou opleveren rond de berekende transporten. Hierbij moet worden bedacht dat het juist voor het Eems-Dollard estuarium belangrijk is om een onderscheid te maken tussen de transporten van zand en van slib. Recent is voor de Westerschede vastgesteld dat de transporten van zand en slib in de Westerschelde verschillen en dat dit fundamentele verschillen met de sedimentbalans oplevert. Voor het doel van deze studie hebben dergelijke analyses geen toegevoegde waarde ten opzichte van de simulaties die in hoofdstuk 4 van dit rapport worden gepresenteerd.

Ook voor een verdere verdieping van de meso-schaal kennis (van de bagger- en verspreidingslocaties en van de bochtgroepen als geheel) is het wenselijk om een beter beeld te krijgen van de autonome en antropogeen beïnvloedde ontwikkelingen in het estuarium. Dit geldt in brede zin, voor alle bagger- en verspreidingsactiviteiten zoals die door verschillende partijen zijn en worden aangevoerd. Hierbij past/hoort ook een beschrijving van eerdere ingrepen, waaronder de verdiepingen (van delen) van de vaarweg. Voor de bepaling van de effecten van verruiming van de vaarweg naar Eemshaven is het op zichzelf echter niet noodzakelijk is om deze systeemkennis te verdiepen, hiervoor volstaande uitgevoerde simulaties zoals gepresenteerd in hoofdstuk 4 van dit rapport.

In de beschikbare gegevens zijn de natuurlijke en antropogene invloeden niet te onderscheiden. Effecten van de huidige baggerspecieverspreidingen of het huidig vaargeulonderhoud zijn bijvoorbeeld niet te onderscheiden van andere processen in de waargenomen morfologische ontwikkelingen. Gezien de relatief beperkte impact van de hier geplande verruiming is dat voor het doel van deze studie ook niet zinvol. Zelfs voor een systeem zoals de Westerschelde, dat een lange geschiedenis kent van dergelijke onderzoeken, is de interpretatieruimte (binnen de bandbreedte van de nauwkeurigheid) nog steeds betrekkelijk groot en kunnen de resultaten niet zonder worden toegepast voor een invulling van het beheer.

2.11 SEDIMENTTRANSPORTPADEN

Figuur 42 toont schematisch de netto sedimenttransportpaden in het studiegebied.

- De transportpaden van zand zijn bepaald aan de hand van de resultaten van de McLaren methode (die werkt met trends in de korrelgroottes, GeoSea, 1991, 1992; McLaren et al., 2007), de uitkomsten van het Inverse Sediment Transport Model (Mulder, 1996), de stroommetingen gerapporteerd in Kiezenbrink (1996), de berekeningen aan de getijstroming Van de Kreeke en Robaczewska (1993), de analyse van Jeuken e.a., 2007 en de residuele getijstromingen zoals berekend in Hartsuiker e.a. (2007).
- De transportpaden van slib zijn bepaald aan de hand van de resultaten van het Inverse Sediment Transport Model (Mulder, 1996) en van Hartsuiker en Grasmeijer (2008).

Er is niet voldoende informatie beschikbaar om uitspraken te doen over de transportpatronen op de Groninger Wadden. Hieronder worden de sedimenttransporten uit figuur 42 kort toegelicht.



Figuur 42. Schematische weergave van de sedimenttransporten op de Groninger Wadden en in de Eems-Dollard. Uitleg bij de getallen en bronnen in de tekst.

- 1. Golf- en getijgedreven sedimenttransport van west naar oost, langs de kust van de Waddeneilanden;
- 2. Getijgedreven sedimenttransport langs de buitendelta van de Eems;

3. Twee parallelle eb- en vloedgedomineerde sedimenttransportcellen in de Eemsmonding. Het Huibertgat wordt gedomineerd door de vloedstroom en de Westereems door de ebstroom;

4a en 4b. Een eb- en vloedcirculatiecel, die op basis van de stromingspatronen feitelijk uit twee circulatiecellen bestaat, waarbij stroming over de Meeuwenstart plaatsvindt. De Oude Westereems is gedomineerd door de vloedstroming en het Ranzelgat door de ebstroming;

5. Netto water- en sedimenttransport over het wantij onder Borkum, van de Eems naar de Oostereems;

6. Een sedimentcirculatiecel rond het Eemshoorngat en de Eemshoornplaat. Het resultaat van 5. en 6. is doorgaande netto sedimentatie in het wantijgebied tussen Eems en Oostereems;

7. Een circulatiecel die bestaat uit het vloedgedomineerde Oostfrieschegaatje en de ebgedomineerde Bocht van Watum, waarbij een belangrijk deel van de stroming over de plaat Hond en Paap trekt;

8. Een sedimentcirculatiecel in de Gaatjebocht, waarbij de zuidwestelijke geulhelft vloedgedomineerd is en de noordoostelijk helft ebgedomineerd;

9. Een sedimentcirculatiecel in de Dollard, waarbij netto geen sediment achterblijft en waarschijnlijk zelfs enige erosie plaatsvindt;

10. Transport van slib naar de Ems, onder invloed van de estuariene circulatie;

11. Transport van sediment (waarschijnlijk hoofdzakelijk slib) naar de kwelders van de Dollard;

12. Sedimenttransport (hoofdzakelijk slib) naar de haven van Delfzijl en Eemshaven, door een combinatie van processen, waaronder estuariene circulatie;

13. Transport van sediment naar de Groninger kwelders.

In het bovenstaande overzicht ontbreekt de sedimentcirculatiecel in het Doekegat die door Jeuken e.a. (2007) is beschreven. Deze zou bestaan uit een ebgedomineerde nevengeul aan de noordoostzijde, in combinatie met een vloedgedomineerd Doekegat. Deze cel komt overeen met de schets van de eb- en vloedscharen in de Eems-Dollard van Van Veen (1950). Deze beschreven dominantie komt echter niet overeen met de residuele stroming, zoals gerapporteerd door Van der Kreeke en Robaczewska (1993) en Hartsuiker e.a. (2007) en is daarom niet in figuur 4.6 opgenomen.

De richting en grootte van de stroming in en uit de Eems-Dollard is sterk afhankelijk van de meteorologische condities. Dit is recent gedemonstreerd met numerieke modelsimulaties van stormen in de Waddenzee, inclusief de Eems-Dollard (Lipari & Van Vledder, 2008). Een belangrijk deel van het water dat naar de Eems-Dollard wordt aangevoerd blijkt volgens deze simulaties door de Waddenzee zelf, over de wantijen naar de Eems-Dollard te worden aangevoerd. Waarschijnlijk zijn ook de

sedimenttransportpatronen die optreden tijdens stormen anders dan de patronen die worden herleid op basis van de getijstroming alleen. Het feit dat zand en slib in dezelfde zone andere paden kunnen hebben is nog niet uitgewerkt in deze studie.

3 Modelopzet, kalibratie en validatie

3.1 INLEIDING

Om de huidige situatie te karakteriseren en de effecten van ingrepen in het Eems-Dollard estuarium op de water- en sedimentbeweging te bepalen, wordt gebruik gemaakt van een *state-of-the-art* 3D numeriek model waarin alle relevante fysica is meegenomen (Delft3D). Voor het doel van dit project is het model geactualiseerd aan de hand van de meest recente beschikbare gegevens en opnieuw gekalibreerd en gevalideerd. Een volledige set randvoorwaarden is voor het model gemaakt voor de periode van 1 januari t/m 1 juni 2012. Deze periode is gekozen op basis van beschikbaarheid van meetgegevens om randvoorwaarden te genereren.

3.2 MODELOPZET

3.2.1 ROOSTERDIMENSIES EN -RESOLUTIE

Het Eems-Dollard-model wordt aangedreven door de modellentrein "Van oceaan tot Nederlandse binnenwateren". Figuur 43 toont de roosters van deze modellentrein. Figuur 44 toont het modelrooster van het Eems-Dollard-model dat zich in west-oost-richting uitstrekt van Ameland tot het Duitse Waddeneiland Juist en in noord-zuid-richting van 30 km ten noorden van Borkum tot Papenburg.



Figuur 43 Modellentrein van oceaan tot Nederlandse binnenwateren: Rooster van het CSM, ZuNo en Kuststrook model

Het Eems-Dollard-model omvat horizontaal 188x320 rekencellen en verticaal 8 rekenlagen. De celgrootte varieert van ongeveer 1700x600 m in het meest zeewaartse deel tot ongeveer 250x150 m in de monding van de Dollard. In de verticaal bestaat het model uit 8 lagen. De dikte van deze lagen is van boven naar beneden 25%, 25%, 19%, 13%, 8%, 5%, 3%, 2% van de waterdiepte.



Figuur 44. Rooster van Eems-Dollard-model.

3.2.2 BODEM

Voor de schematisatie van de bodemligging zijn de volgende gegevens gebruikt:

- Bodemhoogtemetingen beschikbaar gesteld door Wasser- und Schifffahrtsamt Emden (WSA Emden): bestandsnamen: unterems_7_5_rdasc.asc, mittelems_15_rdasc.asc en aussenems_25_rdasc.asc. De originele data werden aangeleverd door WSA Emden in Gauss-Krüger coördinaten met hoogtereferentie Normalnull (NN) en zijn door Rijkswaterstaat geconverteerd naar het Rijksdriehoekstelsel (RD) en Normaal Amsterdams Peil (NAP).
- Vaklodingen oostelijk deel van de Waddenzee. Datum opname: 2005-2008. Bestandsnaam: OostWad200508.xyz.
- Bodemhoogtemetingen vaarweg Eemshaven aangeleverd door Rijkswaterstaat. Datum van opname: september 2012. Bestandsnaam: eemsgeul_sept2012_10mgrid_deel.xyz.
- Bodemhoogtemetingen Eemshaven beschikbaar gesteld door Groningen Seaports. Datum van opname: 22 juli 2011. Bestandsnaam: 33377_20110722_EH_2x2.pts.
- Bodemhoogtemetingen haven Delfzijl beschikbaar gesteld door Groningen Seaports. Datum van opname: 6 en 7 augustus 2012. Bestandsnaam: delfzijl_002.pts.
- Bodemhoogtemetingen buitendelta 2010. Bestandsnaam: HuGat2010tt-asc.

Bovengenoemde gegevens zijn door middel van triangulatie geïnterpoleerd op het modelrooster. Figuur 45 toont de bodemhoogte in het Eems-Dollard-model.



Figuur 45 Schematisatie bodemhoogte Eems-Dollard-model.

Parameter	Zand	Slib		
Korreldiameter [µm]	200	26		
Dichtheid [kg/m ³]	2650	2650		
Porositeit	0,40	0,81		

Tabel 8. Parameters sedimentfracties.

In het model worden de transportformuleringen van Van Rijn (2007a, b en c) toegepast om voor twee fracties de sedimenttransporten te berekenen.

Tabel 8 toont de sedimenteigenschappen. De verhouding van deze twee fracties is als volgt bepaald. Allereerst is de bodem opgedeeld in vier lagen: een toplaag van 0,1 meter, twee lagen van 1 meter en een basislaag van 100 meter. De verhouding voor de bovenste drie lagen is gevonden door uit eerdere simulaties door Grasmeijer (2013) de samenstelling van de bovenste laag over te nemen en aan te nemen dat de onderste laag geheel uit zand bestaat. Vervolgens zijn de veranderingen in de bodemsamenstelling uitgerekend in een simulatie zonder golven voor een periode van 4,7 maand. Deze werd door middel van een morfologische factor met 12,6 opgeschaald zodat de veranderingen een periode van 5 jaar representeren. Met de zo gevonden bodem werd hierna een periode van 3 maanden doorgerekend met golven en met een morfologische factor van 1. Ten slotte worden de lagen 2 tot en met 4 gevuld met zand en slib in dezelfde verhouding als ze in laag 1 voorkomen. Alleen in de Eems rivier werden alle lagen volledig gevuld met slib om gevonden slib- concentraties hier overeen te laten komen met gemeten waarden door bijvoorbeeld De Jonge (2007). De bodemsamenstelling die op deze manier gevonden wordt is weergegeven in figuur 46.



Figuur 46. Berekend percentage slib in de bodem

3.2.3 WIND EN LUCHTDRUK

Naast het getij wordt de waterbeweging in het Eems-Dollard estuarium beïnvloed door wind en luchtdruk. Deze worden in het model opgelegd door middel van in tijd en ruimte variërende wind- en drukgegevens afkomstig uit resultaten van het metereologische model HIRLAM van het KNMI die beschikbaar zijn in de MATROOS database (Multifunctional Access Tool foR Operational Oceandata Services). Deze wind- en drukgegevens worden hier niet getoond.

Om een indruk te geven van de windcondities gedurende de periode waarvoor de simulaties zijn uitgevoerd toont figuur 47 de meetreeks van station Lauwersoog. Voor alle duidelijkheid, deze is niet op het model opgelegd maar wordt hier uitsluitend ter illustratie getoond.



Figuur 47. Windsnelheid en –richting bij Lauwersoog.

3.2.4 GOLVEN

De opwoeling van sediment door golfwerking heeft een grote invloed op de slibconcentraties in het estuarium. Om deze invloed mee te kunnen nemen wordt in het Eems-Dollard model met behulp van Delft3D-Waves (SWAN) ieder uur een nieuw golfveld uitgerekend. Bij deze simulaties wordt rekening gehouden met de herverdeling van golfenergie door shoaling, refractie, triad- en quadruplet interacties, de generatie van golfenergie door de wind en de dissipatie van golfenergie door white-capping en bodemwrijving.

De golven die via de zeezijde (noordzijde) van het model binnenlopen worden beschreven met een JONSWAP-spectrum waarvan de significante golfhoogte, de gemiddelde golfrichting en piekgolfperiode afgeleid zijn uit meetdata in het MWTL-station Schiermonnikoog (figuur 48). Omdat het meetpunt Schiermonnikoog verder kustwaarts ligt dan de noordelijke modelrand was het noodzakelijk de significante golfhoogtes te corrigeren. Aan de hand van een testsimulatie is bepaald dat de correctiefactor tussen de significante golfhoogtes op de noordrand en in het meetpunt Schiermonnikoog 1,1 is. De piekgolfperiode is uit de gemeten Tm02-golfperiode berekend door aan te nemen dat het golfspectrum in het meetpunt een goede benadering van een JONSWAP-spectrum is. In dit geval is de piekgolfperiode 1,285 keer de Tm02-golfperiode.



Figuur 48. Golfhoogte, -periode en -richting zoals gemeten op MWTL-station Schiermonnikoog

3.2.5 ZOETWATERDEBIETEN

Naast het debiet uit de Eems rivier vindt toevoer van zoet water plaats via spuisluizen en gemalen langs het estuarium. Figuur 49 toont de locaties waarin zoetwaterdebieten in het model zijn opgelegd. Tabel 9 toont de bijbehorende namen.



Figuur 49. Punten in het model waar een instromend gebied is opgelegd (zie tabel 9 voor de namen).

Punt	Naam	Punt	Naam
1	Cleveringsluizen	12	Cöldeborger Siel
2	Oude zeesluis Delfzijl	13	Terborger Siel
3	Gemaal Duurswold	14	Siel Sautel
4	Gemaal Rozema	15	Jemgumer Siel
5	Gemaal Fiemel	16	Nüttermoorer Siel
6	Gemaal Nieuw-Statenzijl	17	Soltborger Siel
7	Siel Knock	18	Muhder Siel
8	Siel Ditzum	19	Coldemuntje
9	Perkumer Siel	20	Siel Buschfield
10	Pogumer Siel	21	Marker Siel
11	Siel Oldersum	22	Stapelmoorer Siel

Tabel 9. Namen debietpunten in figuur 50

De debietgegevens werden aangeleverd door onderstaande instanties:

- Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Duitsland.
- Waterschap Hunze en Aa's, Nederland.
- Waterschap Noorderzijlvest, Nederland.
- Rijkswaterstaat, Nederland.

De twee belangrijkste debieten zijn die van de Eems rivier gemeten bij Versen en het debiet gemeten bij het Ledasperrwerk. Tijdseries hiervan zijn weergegeven in figuur 50 en figuur 51. De debieten van de Nederlandse en Duitse gemalen en spuien zijn weergegeven in figuur 52. Voor de Duitse gemalen zijn alleen maandgemiddelden uit de periode 1992-2010 beschikbaar, welke bij gebrek aan een tijdserie voor de huidige simulatieperiode gebruikt zullen worden.



Figuur 50. Debiet van de Eems rivier zoals gemeten bij Versen. Bron: Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, NLWKN, Duitsland.



Figuur 51. Debiet dat bij Leda het model instroomt (positief) en uitstroomt (negatief). Bron: Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, NLWKN, Duitsland).



Figuur 52. Debieten van de Nederlandse en Duitse gemalen en sluizen gebaseerd op bovengenoemde bronnen.

In alle gevallen betreft het debieten van zoet water. De sedimentconcentratie in het water dat via de Eems en Leda het model in- en uitstroomt is gelijk aan de berekende evenwichtsconcentratie volgens de formuleringen van Van Rijn (2007a, b en c). Dit is de concentratie waarbij erosie van sediment gelijk is aan de depositie van sediment. De andere debieten bevatten geen sediment.

3.2.6 BAGGERSPECIEVERSPREIDINGEN

Het voor de verruiming van de Eemshaven gebaggerde sediment werd in de maanden december 2011 tot en met februari 2012 op een drietal locaties verspreid, namelijk P1, P5a en P6 (figuur 53). Deze verspreidingen zijn in het model meegenomen door discharge-punten te definiëren in de rekencellen waar verspreiding plaatsvond. In deze discharge-punten wordt in de onderste laag een klein debiet (0,01 m³/s) geloosd dat, op de momenten dat er sediment wordt verspreid, een hoge concentratie sediment bevat. De momenten waarop er sediment wordt verspreid en de hoeveelheden zijn gebaseerd op gegevens zoals deze door Groningen Seaports zijn aangeleverd. De cumulatieve hoeveelheid sediment die volgens deze gegevens op de verschillende locaties wordt verspreid is weergegeven in figuur 54.









3.3 MODELKALIBRATIE

De ondiepwatervergelijkingen en sedimenttransportformuleringen die ten grondslag liggen aan en opgenomen zijn in het Delft3D-model bevatten een aantal vrije modelparameters. Dit zijn bijvoorbeeld de bodemwrijvingscoëfficiënt, de parametrisatie van de turbulentie, de samenstelling van de bodem en de verhouding van stromings- en golfgedreven transporten. De kalibratie en validatie van eerdere versies van het model zijn uitgebreid beschreven door Hartsuiker et al. (2007a), Van Banning et al. (2008) en Grasmeijer et al. (2010). Voor het doel van deze studie is de kalibratie geactualiseerd. Voor verschillende instellingen van de vrije modelparameters zijn kalibratiesimulaties gedraaid en de resultaten hiervan zijn vergeleken met metingen. De modelparameters die bij de kalibratie zijn gevarieerd betreffen de bodemruwheid, de horizontale en verticale diffusiviteit en de bodemhoogte (binnen de onzekerheidsmarge van de metingen). Bij de vergelijking is steeds gekeken naar data en modelresultaten in de periode van 16 maart tot 1 april 2012. Deze periode is gekozen omdat de invloed van wind en golven in deze periode betrekkelijk klein was en er geen baggerspecieverspreidingen plaatsvonden. Dit beperkt het aantal vrijheidsgraden en vereenvoudigd daardoor de interpretaties van de modelresultaten. In het volgende worden de data van de metingen in deze periode getoond samen met de modelresultaten van de simulaties die het best overeenkomen met de metingen.

3.3.1 WATERSTAND

Waterstanden worden gemeten op verschillende meetstations in het Eems-Dollard-estuarium (figuur 55). Voor de Nederlandse stations zijn tijdreeksen beschikbaar in Waterbase (www.waterbase.nl). Voor de Duitse stations zijn ze aangeleverd door Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) in Emden. Figuur 56 toont de berekende en gemeten waterstanden bij respectievelijk Huibertgat, Emshörn en Knock. De overeenkomst tussen model en metingen is goed. De correlatiecoëfficiënt tussen metingen en berekeningen is in alle gevallen groter dan 0,96.





Figuur 57 toont de gemeten en berekende amplitude en fase van de M2-component van het getij langs het Eems-Dollard estuarium en figuur 58 die van de M4-component. Voor de berekende condities reproduceert het model de toename van de M2-amplitude nauwkeurig van 1,03 m bij Huibertgat, tot bijvoorbeeld 1,22 m bij Eemshaven, 1,38 m bij Delfzijl en 1,55 m bij Leerort. De kwadratisch gemiddelde fout van de M2-amplitude bedraagt 0,02 m. Ook de toename in M2 fase wordt goed weergegeven van 277° bij Huibertgat, tot bijvoorbeeld 312° bij Eemshaven, 331° bij Delfzijl en 6° bij Leerort. De kwadratisch gemiddelde fout van de M2-fase bedraagt 5°, dat komt overeen met een periode van ongeveer 10 minuten. Het model heeft de neiging de M2-fase in het midden van het estuarium iets te onderschatten.





De M4-amplitude neemt toe van 0,09 m bij Huibertgat tot 0,18 m bij Delfzijl en blijft daarna min of meer constant (figuur 58). Het model reproduceert dit goed met een kleine maar onderschatting van de M4-amplitude tussen Delfzijl en Pogum. De kwadratisch gemiddelde fout bedraagt 0,03 m. De M4-fase neemt toe van 43° bij Huibertgat, tot bijvoorbeeld 104° bij Eemshaven, 133° bij Delfzijl en 248° bij Leerort. Het model reproduceert deze toename goed. De kwadratisch gemiddelde fout van de M4-fase bedraagt 4° voor de getoonde stations, dat komt overeen met een periode van ongeveer 4 minuten.

Een correcte weergave van de getij-asymmetrie is van belang voor het sediment transport. De asymmetrie door de interactie tussen de M2- en de M4-component van het getij bepaalt in belangrijke mate het getijgemiddelde transport. Deze interactie kan zorgen voor een kortere vloed- dan ebperiode met hogere snelheden tijdens vloed dan tijdens eb. Dit zorgt voor de import van sediment.

De interactie tussen de M2- en de M4-component kan ook invloed hebben op de periode van kentering. Als de periode van kentering voorafgaand aan de eb langer duurt dan die voorafgaand aan vloed dan heeft het fijne sediment tijdens die eerste periode meer tijd om uit te bezinken. Dit zorgt voor import van fijn sediment (slib).







Figuur 58. Gemeten en berekende amplitude en fase voor de M4-component van het getij langs het Eems-Dollard estuarium

De interactie tussen M2 en M4 wordt bepaald door het faseverschil $\theta = 2\varphi M2 - \varphi M4$. Wanneer $45^\circ < \theta < 135^\circ$ dan heeft de vloed een kortere periode dan de eb en zijn de vloedsnelheden groter dan de ebsnelheden. Dit zorgt voor import van sediment.

Wanneer $135^{\circ} < \theta < 225^{\circ}$ dan duurt de overgang van vloed naar eb langer en heeft het sediment meer tijd om uit te zakken dan tijdens de overgang van eb naar vloed. Ook wel, de vloed komt meer plotseling opzetten terwijl de eb meer geleidelijk verloopt. Dit zorgt voor import van fijn sediment.

Wanneer $225^{\circ} < \theta < 315^{\circ}$ dan duurt de eb korter dan de vloed en zijn de ebsnelheden groter dan de vloedsnelheden. Dit zorgt voor export van sediment. Dit laatste komt zelden voor.

Wanneer $315^{\circ} < \theta < 45^{\circ}$ dan duurt de overgang van eb naar vloed langer en heeft het sediment meer tijd om te bezinken dan tijdens de overgang van vloed naar eb. Dit zorgt voor export van fijn sediment

Figuur 59 toont het berekende en gemeten faseverschil $\theta = 2\varphi M2 - \varphi M4$. Deze figuur laat zien dat de getij-asymmetrie een maximum vertoont bij Borkum en rondom Delfzijl en Knock. Dit zorgt voor import van fijn sediment. Verder bovenstrooms neemt het faseverschil af tot een meer vloeddominant getij. Het model geeft dit verloop van het faseverschil goed weer, met een lichte onderschatting van gemiddeld 7°.



Figuur 59. Gemeten en berekend faseverschil $\theta = 2\varphi M 2 - \varphi M 4$ van het getij langs het Eems-Dollard estuarium

3.3.2 STROOMSNELHEDEN

Berekende stroomsnelheden zijn vergeleken met recentelijk uitgevoerde metingen door Aqua Vision BV op een tweetal vaste locaties metingen. Figuur 60 toont de meetlocaties.



Figuur 60. Meetlocaties OBS en ADCP meetframes

De metingen werden verricht met frames waarop een zogenaamde Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) en een Optical Backscatter Sensor (OBS) waren gemonteerd. Deze instrumenten hebben gedurende een aantal maanden waterstanden, stroomsnelheden, sedimentconcentraties, temperatuur en saliniteit gemeten. Van Santen & Spitzner (2012) en Reneerkens & Spitzner (2012a,b) geven een uitvoerige beschrijving van de metingen.

Figuur 61 toont gemeten en berekende snelheden op meetlocatie GSP05. De dieptegemiddelde stroomsnelheid en –richting worden door het model op deze locatie goed gerepresenteerd met een correlatie tussen metingen en berekeningen van 0,93. In de metingen verloopt de snelheid tijdens de vloed iets grilliger dan in het model. Dit kan te maken hebben met de roosterresolutie waardoor turbulente wervels kleiner dan een roostercel niet worden gerepresenteerd. Ook de diepteschematisatie is van invloed op de snelheden. De dieptevariatie langs een roostercel kan 2 m bedragen ter plaatste van de meetlocatie.

Figuur 62 toont gemeten en berekende snelheden op locatie GSP02. De overeenkomst tussen metingen en berekeningen tijdens vloed is op deze locatie goed. Tijdens eb is de gemeten snelheid echter veel lager dan tijdens vloed. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door het feit dat de het meetframe betrekkelijk dicht bij de Meeuwenstaart is geplaatst. Met name tijdens de ebstroom staat het meetframe enigszins in de luwte van deze zandplaat. Ook wervelingen (neer) die ontstaan langs de plaatrand kunnen van invloed zijn op de metingen tijdens eb. De resolutie van het model is onvoldoende om deze wervelingen te kunnen representeren. Voor het doel van deze studie is het ook niet nodig deze wervelingen in detail te berekenen.



Figuur 61. Stroomsnelheden en -richtingen op locatie GSP05.



Figuur 62. Stroomsnelheden en -richtingen in het punt GSP02-7.

3.3.3 SALINITEIT

De saliniteit varieert langs het estuarium van zout aan de buitenkant naar zoet aan de binnenkant. De variatie verloopt van ongeveer 29 *practical salinity units* (psu) bij Borkum, 25 psu bij Eemshaven, 21 psu bij Delfzijl, 7 psu bij Pogum, 2 psu bij Terborg en 0,4 psu bij Leerort (figuur 67). Het model reproduceert deze variatie goed.



Figuur 63. Gemeten en berekende saliniteit langs het Eems-Dollard estuarium.

De berekende saliniteit is vergeleken met metingen Aqua Vision BV op de twee voornoemde locaties. Saliniteit is gemeten op twee verschillende hoogtes namelijk nabij de bodem (op het frame) en op ongeveer 5 meter onder het wateroppervlak (aan een ketting boven het frame). Figuur 64 toont de vergelijking waarbij uit het model de 8^e rekenlaag wordt vergeleken met de bodemmetingen en de 2^e rekenlaag met de metingen op 5 meter onder het oppervlak.

Op locatie GSP02 zijn door ondergraving van het frame helaas alleen saliniteitsmetingen op de ketting beschikbaar. Gemiddelde waarde van de berekende en gemeten saliniteit en ook de variatie gedurende het getij komen hier goed overeen. Op de meer landwaarts gelegen locatie GSP05 komen de modelresultaten goed overeen met de saliniteit gemeten aan de ketting. De saliniteit gemeten op het frame is ongeveer 2 psu hoger.

Figuur 65 toont de gemeten en berekende saliniteit op de Duitse meetstations Knock, Emden, Pogum, Terborg en Leerort. Ook in deze figuur is te zien dat het model de afname van de gemiddelde saliniteit van langs deze stations (stroomopwaarts van buiten naar binnen) goed reproduceert. Ook de temporele variatie binnen een getij wordt goed weergegeven.



Figuur 64. Gemeten en berekende saliniteit op GSP2 en GSP5. Zie figuur 60 voor meetlocaties.



Figuur 65. Gemeten en berekende saliniteit bij Knock, Emden, Pogum, Terborg en Leerort.

3.3.4 SEDIMENTCONCENTRATIES

Figuur 66 vergelijkt gemeten en berekende gemiddelde sedimentconcentraties in het bovenste deel van de waterkolom als functie van de afstand tot Papenburg. De concentraties gemeten op ongeveer 1,5 m onder het wateroppervlak zijn in de Unterems (km 0-40) betrekkelijk hoog met waarden rond 0,90 kg/m³. Verder zeewaarts nemen de gemeten concentraties af tot ongeveer 0,02 kg/m³ bij Borkum.

De berekende concentraties in figuur 66 representeren waarden in de bovenste rekenlaag. De dikte van die rekenlaag bedraagt 25% van de waterdiepte. Dat is 1,5 m in een waterdiepte van 6 m. De modeluitkomsten vertonen een goede overeenkomst met deze metingen, zowel bij Borkum (~km 100) als op de Unterems.

Naast de vergelijking met metingen gerapporteerd door De Jonge (2007) is er eveneens een vergelijking gemaakt met eerder genoemde metingen door Aqua Vision BV in 2012. Metingen van sedimentconcentraties met zowel de ADCP als de OBS zijn beschikbaar op ongeveer 5,0 m onder het wateroppervlak. Bij de kalibratie is met name gekeken naar de metingen op deze diepte omdat het effect van troebelheid op de primaire productie in het bovenste gedeelte van de waterkolom het grootst is.



Figuur 66. Vergelijking gemeten en berekende sedimentconcentraties als functie van de afstand tot Papenburg. Eemshaven ligt ter hoogte van km 70.

De vergelijking tussen de concentratiemetingen door Aqua Vision en de berekeningen met het model zijn weergegeven in figuur 67 en figuur 68. Deze figuren laten zien dat de concentraties gemeten met de ADCP ongeveer een factor 2 groter zijn dan die gemeten met de OBS. Dit verschil wordt veroorzaakt door een verschil in meetmethode. Reneerkens & Spitzner (2012c) gaan uitgebreid in op de meetmethodes en de conversie van meetsignalen naar suspensieve sediment concentraties. Voor het doel van deze studie is het voldoende te constateren dat het verschil tussen de meetmethodes bestaat. Het geeft een indruk van de bandbreedte in de metingen waarmee rekening moet worden gehouden bij de vergelijking met modelresultaten.

De berekende concentraties liggen het dichtst bij de waarden gemeten met de OBS. Op locatie GSP05 is de gemiddelde berekende concentratie vrijwel gelijk aan de gemiddelde gemeten OBS-waarde. Op locatie GSP02 is de gemiddelde berekende waarde ongeveer een factor 2 kleiner dan de OBS-metingen. De berekende waarden liggen daarmee binnen de bandbreedte waarmee sedimentconcentraties in het veld gemeten kunnen worden.



Figuur 67. Gemeten en gemodelleerde sedimentconcentraties op locatie GSP02 op 5,0 m onder wateroppervlak.



Figuur 68. Gemeten en gemodelleerde sedimentconcentraties op GSP05 5,0 m onder wateroppervlak.
3.3.5 MODELINSTELLINGEN

Tabel 10 toont de belangrijkste modelinstellingen na kalibratie

Tabel 10. Modelinstellingen

Parameter	Value
Roughness	
Roughness formula	Manning
Roughness value	Ruimtelijk variërend van 0.022 tot 0.012
Viscosity	
Horizontal eddy viscosity	1 m²/s
Horizontal eddy diffusivity	1 m²/s
Vertical eddy viscosity	0,0001 m ² /s
Vertical eddy diffusivity	1x10 ⁻⁶ m ² /s
Ozmidov length scale	0 m
Model for 3D turbulence	k-Epsilon
Sediment	
Median sediment diameter sand	200 µm
Median sediment diameter silt	26 µm
Initial distribution of fractions	Ruimtelijk variërend
Morphology	
Include effect of sediment on fluid density	True
Equilibrium sand conc. profile at inflow boundaries	True
Van Rijn's reference height factor	1
Threshold sediment thickness	0,05 m
Factor for erosion of adjacent cells	0
Current-related reference concentration factor	1
Current-related transport vector magnitude factor	1

3.4 MODELVALIDATIE

Een modelvalidatie is uitgevoerd om de modelinstellingen die bij de kalibratie zijn gevonden te controleren. Op basis van meetgegevens die niet eerder zijn gebruikt voor de kalibratie worden de modeluitkomsten getoetst. Wanneer model en werkelijkheid voldoende overeenstemming hebben kan worden gesproken van een valide model.

Bij de kalibratie in het voorgaande hoofdstuk is gebruik gemaakt van meetgegevens uit maart 2012. Dit is een periode met weinig wind, lage golven en een betrekkelijk lage afvoer van de Eems rivier. De modelvalidatie is daarentegen uitgevoerd voor een periode in januari met harde wind, betrekkelijk hoge golven en een hoge afvoer van de Eems rivier. De modelinstellingen zijn gelijk gehouden aan die uit de kalibratie. Het is van belang om te onderzoeken of het model ook onder deze condities voldoende presteert. Het geeft eveneens een beeld van de voorspellingsbandbreedte.

Figuur 69 toont de gemeten en berekende waterstanden op de stations Huibergat, Emshörn en Knock. De overeenkomsten zijn ook voor de validatie-periode over het algemeen goed met $r^2 \ge 0.97$. De amplitude en fase van het berekende getij komt goed overeen met de metingen op de verschillende stations en ook de invloed van op- en afwaaiing wordt goed gerepresenteerd.

Op 19 en 20 januari zijn de berekende laagwaters echter 1 tot 3 dm hoger dan gemeten. Dit valt samen met een sterke noordwesterstorm (zie figuur 47). De resolutie en nauwkeurigheid van de wind- en drukvelden zijn tijdens deze condities erg belangrijk. Vermoedelijk is dit de beperkende factor in dit specifieke geval.



Figuur 69. Gemeten en berekende waterstand bij station Huibertgat, Emshörn en Knock.



Figuur 70. Gemeten en berekende stroomsnelheden en -richtingen op punt GSP02.



Figuur 71. Gemeten en berekende stroomsnelheden en -richtingen op GSP05.

Figuur 70 en figuur 71 tonen de gemeten en berekende tijdseries van stroomsnelheden tussen 25 en 27 januari 2012 voor respectievelijk GSP02 en GSP05. Op GSP05 komen de berekende snelheden goed overeen met de metingen.

Voor GSP02 laat de vergelijking tussen metingen en berekeningen voor de validatieperiode eenzelfde patroon zien als voor de kalibratieperiode. Tijdens vloed is de overeenkomst goed. Tijdens eb is de asymmetrie in de berekende snelheden minder groot dan in de metingen. Mogelijke oorzaken hiervoor zijn al eerder besproken.



Figuur 72. Gemeten en berekende sedimentconcentraties in punt GSP02.

Figuur 72 toont een voorbeeld van de vergelijking tussen gemeten en berekende sedimentconcentraties op GSP02. De gemiddelde concentratie gemeten met de ADCP bedraagt 39 mg/l en die gemeten met de OBS 86 mg/l. Het berekende gemiddelde ligt met 84 mg/l dichtbij de OBS metingen. Ook de variatie gedurende het getij met een concentratietoename halverwege de ebfase van het getij en een sterke afname rond hoogwater wordt redelijk gerepresenteerd.

Figuur 73 toont de resultaten voor station GSP05 en laat de sedimentconcentraties zien zoals deze in januari door de ADCP en de OBS gemeten zijn. Wederom valt het verschil tussen ADCP-data en OBS-data op. Deze laatste zijn met bijna een factor 2 toegenomen ten opzichte van de periode van 24 tot 26 maart. Dit is wat verwacht mag worden op basis van de grotere golfhoogte en windsnelheid. De door de ADCP gemeten sedimentconcentraties zijn echter afgenomen. Deze afname heeft mogelijk zijn oorzaak in de kalibratie van de ADCP. Figuur 74 toont voor beide punten de kalibratiecurven waarmee de door de ADCP gemeten *backscatter* is omgezet in een sedimentconcentratie. Deze curven zijn uitgerekend voor zowel metingen in januari-februari, metingen in maart-april en voor de gehele meetcampagne januari-juni (Aquavision 2012). De sedimentconcentraties zoals deze in figuur 72 en figuur 73 zijn weergegeven gevonden met die laatste kalibratie. Uit de curves blijkt dat door gebruik van de totale kalibratie sedimentconcentraties in zowel maart als januari lager uit vallen dan het geval zo zijn bij gebruik van respectievelijk de kalibraties voor januari en maart.

Bovendien is deze onderschatting in januari groter dan in maart en wel dusdanig veel groter in januari dan in maart dat, als de kalibratiecurven voor januari en maart gebruikt zouden zijn, de door de ADCP gemeten sedimentconcentraties in januari groter zouden zijn dan die in maart. Ook uit de sedimentconcentratiemetingen in januari volgt dus dat de onzekerheid in de gemeten waarde groot is (tenminste een factor 2).

De door het model berekende waarden volgen het best de OBS-waarden. De nauwkeurigheid waarmee het model de OBS reproduceert is ook bij deze ruwere condities vergelijkbaar met de nauwkeurigheid voor de rustigere kalibratieperiode. Ook de temporele variatie wordt door het model redelijk weergegeven. De laagste concentraties worden gemeten en berekend vlak na hoogwater. De hoogste concentraties worden gemeten en berekend tijdens laagwater.







Figuur 74: kalibratiecurves ADCP.

077141772:D - Definitief

3.5 CONCLUSIE

In dit hoofdstuk werden de actualisatie, kalibratie en validatie van het waterbewegings- en sedimenttransportmodel beschreven. Dit model is geactualiseerd op basis van de meest recente beschikbare gegevens en representeert de situatie van het estuarium in 2012.

Het 3D-model bevat alle relevante fysische processen die nodig zijn voor de beoordeling van de hydromorfologische effecten van de vaargeulverruiming zoals stroming door getij en wind, golven, saliniteit, sediment (zand en slib) en de interactie tussen deze processen. Deze processen worden met voldoende nauwkeurigheid gesimuleerd om als basis te dienen voor effectberekeningen.

Hydromorfologie Eems-Dollard estuarium. Achtergrondstudie t.b.v. OTB MER Vaarweg Eemshaven

4 Effectberekeningen

4.1 INLEIDING

De waterbeweging in het Eems-Dollard estuarium is afhankelijk van vele variabelen, zoals de waterstanden in de Noordzee, de geometrie van het Eems-Dollard estuarium, de afvoeren en het weer. Verruiming van de vaargeul verandert de geometrie en kan dus leiden tot veranderingen in waterbeweging. Deze veranderingen in waterbeweging kunnen op hun beurt weer veranderingen in sedimenttransporten en zoutconcentraties veroorzaken, hetgeen weer gevolgen kan hebben voor de ecologie, de scheepvaart en de onderhouds-baggerwerkzaamheden. Doel van dit hoofdstuk is de effecten van de verruiming van de vaargeul op de waterbeweging, saliniteit, troebelheid, morfologie en bodemsamenstelling inzichtelijk te maken, zowel qua grootte als qua reikwijdte.

De hoofddoelstelling van deze studie is het geven van een kwantitatief inzicht in de effecten van de vaarwegverruiming en de effecten van de verspreiding van baggerspecie. De invloed van deze ingrepen op onderstaande onderwerpen worden in deze studie meegenomen (Ebben-Gerrits & Schellekens, 2013):

- Waterstand.
- Droogvalduur.
- Stroming.
- Saliniteit.
- Golven.
- Troebelheid.
- Morfologie.
- Bodemsamenstelling.

Het effect van de vaargeulverruiming wordt beschreven aan de hand van kaarten waarin de berekende verschillen worden getoond tussen de huidige situatie (T0), de situatie met verruimde vaargeul volgens het ontwerp met ligplaats (T1) en de situatie met verruimde vaargeul volgens het ontwerp met keerplaats (T2). Daarnaast worden de effecten inzichtelijk gemaakt door deze langs een km traject in het estuarium uit te zetten. Figuur 75 toont dit traject. De effecten worden onderzocht voor de huidige situatie en voor drie zeespiegelstijgingsscenario's (2015, 2020, 2040). De vaargeulverruiming wordt in het model geschematiseerd in een discreet aantal rekencellen. Dit is zodanig uitgevoerd dat de schematisatie altijd ruimer is dan de werkelijk gepland verruiming. Wanneer er volgens het ontwerp bijvoorbeeld een volume van 6,54x10⁶ m³ sediment moet worden gebaggerd om de geul te verruimen dan is dit in het model meer, namelijk 6,80x10⁶ m³. De geul is in het model dus ruimer dan in het ontwerp.



Figuur 75: locatie en kilometrering vaargeul.

Er zijn drie representatieve periodes doorgerekend. Eén periode rondom springtij, één rondom doodtij en één rondom gemiddeld getij. Deze getijden zijn geselecteerd uit de maand maart 2012 waarin de condities zo goed als mogelijk de gemiddelden representeren. Tabel 11 toont de geselecteerde periodes.

Getij	Start periode	Eind periode	Start simulatie		
Gemiddeld getij	15-3-2012 00:50	15-3-2012 13:20	14-3-2012 00:00		
Springtij	24-3-2012 15:20	25-3-2012 03:50	23-3-2012 00:00		
Doodtij	3-3-2012 02:20	3-3-2012 11:50	2-3-2012 00:00		

Tabel 11: Geselecteerde simulatieperiodes.

De randvoorwaarden voor het model zijn steeds gegenereerd met de modellentrein "Van oceaan tot Nederlandse binnenwateren". Naast simulaties van de huidige situatie, zijn er ook drie scenario's met zeespiegelstijging doorgerekend. De randvoorwaarden voor deze simulaties zijn berekend door de zeespiegelstijging zoals deze in tabel 12 zijn weergegeven op te tellen bij de waterstand op de rand van het Kuststrookmodel en vervolgens met het Kuststrookmodel randvoorwaarden voor het Eems-Dollard-model te genereren. Met uitzondering van de randvoorwaarden aan de zeerand wijkt de invoer voor de simulaties met zeespiegelstijging niet af van de simulaties van de huidige situatie. De waarden in tabel 12 zijn geïnterpoleerd uit de verwachte zeespiegel volgens Baart et al.(2012a, 2012b) en KNMI (2006).

Hierbij moet worden vermeld dat de effecten door zeespiegelstijging zijn meegenomen zonder aanpassing van de bodem in het model. In werkelijkheid zal ook de morfologie van het estuarium zich aanpassen aan de stijgende zeespiegel. Vermoedelijk zal de bodem in meer of mindere mate meegroeien met de stijgende zeespiegel. Dit is niet meegenomen in de hier gepresenteerde berekeningen waardoor het effect van zeespiegelstijging wordt overschat.

Tabel 12: Zeespiegelstijgingsscenario's

Jaar	Verhoging waterstand Kuststrookmodel [cm]
2012	0,0
2015	0,6
2020	2,4
2040	14,0

4.2 WATERSTAND, DROOGVALDUUR, EBDUUR EN GETIJ-ASYMMETRIE

Figuur 76 toont in het bovenste paneel de berekende gemiddelde waterstand langs het estuarium voor de huidige situatie (2012 T0), voor de huidige bodemligging met een hogere zeespiegel (2015 T0, 2020 T0, 2040 T0), voor de situatie met verruimde vaargeul met ligplaats (2012 T1) en voor de situatie met verruimde vaargeul met keerplaats (2012 T2). Deze figuur laat zien dat in de huidige situatie (2012 T0) de waterstand gaande van Papenburg (km 0) richting zee geleidelijk afneemt met ongeveer 24 cm. Deze afname is het gevolg van de afvoer van de Eems rivier. Door aangevoerd water uit de rivier zal de gemiddelde waterstand aan de landzijde stijgen. Dit leidt tot een gradiënt in waterstand en dus ook in hydrostatische druk die een netto debiet in zeewaartse richting zal veroorzaken. Uiteindelijk zal er een dusdanige afname van de gemiddelde waterstand in zeewaartse richting ontstaan dat het netto zeewaartse debiet door het waterstandsverhang gelijk is aan de afvoer van de Eems rivier.

Voor andere scenario's dan 2012 T0 vertoont het verloop van de gemiddelde waterstand een soortgelijk patroon. Het verschil tussen de waterstand in deze scenario's en 2012 T0 is weergegeven in het middelste paneel. Hierin is te zien dat het signaal vrijwel geheel door zeespiegelstijging wordt bepaald.

De door zeespiegelstijging veroorzaakte toename in waterdiepte kan leiden tot veranderingen in de getijvoortplanting in het estuarium en dit kan ook weer leiden tot verschillen in waterstand. Om deze verschillen zichtbaar te maken is allereerst de stijging in de gemiddelde waterstand berekend die het directe gevolg is van de zeespiegelstijging. Dit is gedaan door in een uitvoerpunt dat ver genoeg zeewaarts ligt (10 km zeewaarts van Schiermonnikoog) de gemiddelde waterstand te berekenen voor elk scenario. Vervolgens is deze gemiddelde buitengaatse waterstand afgetrokken van de gemiddelde waterstanden in het estuarium. De zo gevonden waterstanden worden hier de gecorrigeerde waterstanden genoemd. Ten slotte is voor de scenario's 2012 T1, 2012 T2, 2015 T0, 2020 T0 en 2040 T0 het verschil bepaald tussen de gemiddelde gecorrigeerde waterstand en de gemiddelde gecorrigeerde waterstand in het scenario 2012 T0. Dit verschil is getoond in het onderste paneel van figuur 76. Zeespiegelstijging leidt tot een afname in de gemiddelde gecorrigeerde waterstand door het hele Eems-Dollard estuarium. Deze afname is het grootst op de Eemsrivier (km 0-40). Dit betekent dat de zeespiegelstijging aan de zeewaartse kant van het estuarium groter zal zijn dan op de Eemsrivier. Dit verschil in zeespiegelstijging kan oplopen tot 2 mm in de nabije toekomst (2020) en ongeveer 1 cm in 2040, uitgaande van de hier berekende scenario's.

De verandering in gemiddelde waterstand door de vaargeulverruiming, zowel voor verruiming met een ligplaats (2012 T1) of voor verruiming met een keerplaats (2012 T2), bedraagt minder dan een millimeter.





Figuur 77 toont in het bovenste paneel de gemiddelde getijslag voor verschillende scenario's. In al deze scenario's is een geleidelijke landwaartse toename van getijslag zichtbaar van ongeveer 1,9 m naar ongeveer 3,6 m. Deze toename wordt veroorzaakt door het smaller worden van het estuarium en interferentie van de inkomende getijgolf met de aan de landwaartse zijde gereflecteerde getijgolf.

Het onderste paneel van figuur 77 toont het verschil in getijslag voor verschillende scenario's ten opzichte van de huidige situatie (T0 2012). Hierin is te zien dat door een zeespiegelstijging van 0,6 cm de getijslag achterin het estuarium (km 0-70) zou toenemen met ongeveer 0,5 cm en door een zeespiegelstijging van 14,0 cm zou toenemen met ongeveer 6,5 cm. In het buitenste deel van het estuarium (> 70 km) verandert de getijslag niet (2015 T0, 2020 T0) of aanzienlijk minder (2040 T0). Verruiming van de vaarweg heeft geen invloed op de getijslag buiten het estuarium. Tussen Borkum en Eemshaven neemt de getijslag volgens de berekeningen toe met maximaal 0,2 cm en ter hoogte van Leerort ongeveer 0,5 cm. Dit is betrekkelijk klein ten opzichte van de natuurlijke variatie.

Tabel 13 toont de procentuele verandering van de getijslag door zeespiegelstijging (2015 T0, 2020 T0 en 2040 T0) en die door verruiming van de vaarweg naar Eemshaven (2012 T1) ten opzichte van de huidige situatie (2012 T0) langs het km-traject in figuur 75. Het effect van verruiming van de vaarweg is in het algemeen kleiner dan 0,1%.

km	2015T0	2020T0	2040T0	2012T1	2012T2	km	2015T0	2020T0	2040T0	2012T1	2012T2
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0	0,00	0,16	1,78	0,00	0,00	60	0,02	0,05	0,26	0,07	0,11
5	0,09	0,32	1,50	0,05	0,06	65	0,01	0,04	0,19	0,06	0,08
10	0,15	0,29	1,58	0,11	0,09	70	-0,01	0,00	-0,09	0,06	0,08
15	0,14	0,26	1,62	0,16	0,00	75	-0,02	-0,03	-0,11	0,08	0,12
20	0,08	0,32	1,72	0,08	0,03	80	-0,01	-0,03	-0,03	0,06	0,09
25	0,00	0,26	1,74	0,01	0,06	85	-0,03	-0,01	0,07	0,03	0,04
30	0,07	0,23	1,42	0,03	0,09	90	-0,03	-0,01	0,08	0,02	0,05
35	0,05	0,17	1,00	0,04	0,13	95	0,01	0,05	0,30	0,02	0,05
40	0,05	0,16	0,90	0,09	0,10	100	-0,01	0,04	0,41	0,01	0,00
45	0,04	0,14	0,80	0,08	0,13	105	-0,01	0,04	0,47	0,01	0,00
50	0,04	0,11	0,71	0,09	0,10	110	0,02	0,08	0,51	0,02	0,05
55	0,03	0,09	0,52	0,06	0,11						

Tabel 13: Procentuele verandering van de getijslag door zeespiegelstijging (2015T0, 2020T0 en 2040T0), door verruiming van de vaarweg naar Eemshaven met ligplaats (2012T1) en door verruiming van de vaarweg naar Eemshaven met keerplaats (2012T2) ten opzichte van de huidige situatie (2012T0) langs het km-traject zoals getoond in figuur 75





Figuur 78 toont in het bovenste paneel het maximum van de berekende waterstanden. Deze wordt volledig bepaald door springtij condities. In de huidige situatie (2012 T0) neemt de maximale waterstand landinwaarts geleidelijk toe met ongeveer 1,1 m. Andere scenario's vertonen een vergelijkbaar beeld waarbij de maximale waterstand door zeespiegelstijging uiteraard toeneemt.

Het middelste paneel toont het verschil in waterstand ten opzicht van de huidige situatie. Evenals de gemiddelde waterstand wordt het signaal vrijwel geheel door zeespiegelstijging bepaald. Figuur 78 toont daarom in het onderste paneel de verandering in maximale waterstanden gecorrigeerd voor zeespiegelstijging. Zeespiegelstijging zorgt wel over het hele estuarium voor een toename van maximale gecorrigeerde waterstanden. In het noordelijk deel (> 60 km) neemt de waterstand met 0,2 cm of 1,0 cm meer toe dan door zeespiegelstijging alleen. In het zuidelijke deel (< 60 km) is dit respectievelijk 0,6 cm en 3,0 cm meer.

Verruiming van de vaarweg leidt op het meest bovenstroomse deel van de Eems rivier (0-20 km) tot veranderingen van de maximale gecorrigeerde waterstand van minder dan 0,5 cm. Dit is van vergelijkbare grootte als de veranderingen door zeespiegelstijging. In de rest van het estuarium verandert de maximale gecorrigeerde waterstand door vaarwegverruiming niet.



Figuur 78. Berekende maximale waterstand (boven), verschil in maximale waterstand t.o.v. de huidige situatie (midden) en voor zeespiegelstijging gecorrigeerd verschil in maximale waterstand (onder) langs het Eems-Dollard estuarium.

Figuur 79 toont in het bovenste paneel de berekende minimale waterstand van de waterstanden. Van buiten naar binnen neemt de minimale waterstand geleidelijk toe van -1,5 m naar -2,2 m in de huidige situatie (2012 T0). Andere scenario's vertonen een vergelijkbaar beeld waarbij de minimale waterstand door zeespiegelstijging uiteraard ook stijgt.

Het middelste paneel toont het verschil in minimale waterstand ten opzicht van de huidige situatie. Ook hier wordt het signaal vrijwel geheel door zeespiegelstijging bepaald. Figuur 79 toont in het onderste paneel de minimale waterstanden gecorrigeerd voor zeespiegelstijging. Hierin is te zien dat zeespiegelstijging leidt tot een stijging van de gecorrigeerde minimale waterstanden in het noordelijk deel van het estuarium (> 60 km), en een verlaging in het zuidelijk deel (< 60 km).

De stijging in het noordelijk deel is ongeveer 0,2 cm bij een zeespiegelstijging van 0,6 en 2,4 cm en 0,6 cm bij een zeespiegelstijging van 14,0 cm. De berekende verlaging van de minimale gecorrigeerde waterstand in het zuidelijk deel is nihil bij een zeespiegelstijging van 0,6 cm en de verlaging is ongeveer 4,0 cm bij een zeespiegelstijging van 14,0 cm.

De berekeningen laten zien dat verruiming van de vaarweg naar Eemshaven, zowel met ligplaats als keerplaats, leidt tot een beperkte verlaging (minder dan 0,2 cm) van de gecorrigeerde minimale waterstand.





Figuur 80 toont de waterstanden in het Eems-Dollard estuarium in de huidige situatie tijdens hoogwater in de Eemshaven voor een gemiddeld getij (15 maart 2012). De waterstand neemt toe van ongeveer NAP+0,8 m bij Borkum tot ongeveer NAP+1,4 bij Emden. Figuur 81 toont de waterstanden in het estuarium in de huidige situatie tijdens laagwater in de Eemshaven. In deze fase neemt de waterstand af van ongeveer NAP-1,4 m bij Borkum tot NAP-2,0 bij Emden.

Het effect van verruiming van de vaargeul op de waterstanden rond respectievelijk hoogwater en laagwater is berekend door de waterstanden voor de huidige situatie (2012 T0) af te trekken van de waterstanden met verruimde vaargeul (2012 T1, 2012 T2). Voor beide ontwerpen zijn de verschillen dusdanig klein (orde 5 mm) dat zij ten opzichte van bijvoorbeeld variaties in waterstand door meteorologische effecten (orde 10¹ cm) te verwaarlozen zijn. De berekende effecten zijn van dezelfde orde als die door Hartsuiker et al. (2007). Eventuele kleine verschillen tussen de huidige studie en die door Hartsuiker et al. (2007) worden mogelijk veroorzaakt door een verbeterde schematisatie en een recentere simulatie-periode.



Figuur 80. Waterstand tijdens gemiddeld hoogwater in de huidige situatie (2012 T0).



Figuur 81. Waterstand tijdens gemiddeld laagwater in de huidige situatie (2012 T0).

Samenvattend kan worden gezegd dat de effecten van verruiming van de vaargeul op de waterstanden klein zijn ten opzichte van de natuurlijke variatie in het estuarium en ook klein zijn ten opzichte van het effect van zeespiegelstijging. Dit zowel in absolute zin, veranderingen zijn altijd kleiner dan 0,5 cm, als in relatieve zin, de veranderingen zijn van dezelfde grootte (noordelijk deel estuarium) tot een factor 5 kleiner (zuidelijk deel estuarium) dan de veranderingen door zeespiegelstijging. Dat het effect van de geulverruiming op de waterstanden klein is, stemt overeen met de conclusies van Hartsuiker et al. (2007).

Droogvalduur

Droogvallende platen in het Eems-Dollard estuarium en de aangrenzende Waddenzee vormen een belangrijk rustgebied voor vogels en zeezoogdieren. Om te kijken of de geulverruiming invloed heeft op de tijd dat deze platen gebruikt kunnen worden is voor de roostercellen in de gebieden rondom de vaarweg berekend hoelang zij droogvallen binnen de periode 15-3-2013 00:30 tot 15-3-2013 13:00 (gemiddeld getij). Dit is gedaan door allereerst een *spline* te trekken door de waterdiepte zoals deze voor iedere rekencel elke 30 minuten is weggeschreven. Vervolgens is als droogvalduur genomen de duur waarvoor de waterdiepte onder de grens ligt waarvoor een rekencel in het model inactief wordt (droog valt). De zo gevonden droogvalduur is weergegeven in figuur 82.

Figuur 83 en figuur 84 tonen het berekende effect van verruiming van de vaarweg volgens het ontwerp met ligplaats respectievelijk volgens het ontwerp met keerplaats op de droogvalduur. Dit effect is vrijwel overal kleiner dan 5 minuten. Hier en daar zijn stipjes te vinden waar de verandering 5-10 minuten bedraagt. Deze sporadische veranderingen zijn het gevolg van zeer kleine fluctuaties in waterstand door de verruiming en daardoor verschillen in numerieke afrondingen. Deze verschillen in afronding wisselen elkaar af en tonen geen structurele toe- of afname van de droogvalduur. De gebieden waarin deze afrondingsverschillen voorkomen en de grootte van de verandering zijn klein ten opzichte van droogvalduren van enkele uren.



Figuur 82. Droogvalduur in het Eems-Dollard estuarium gedurende een gemiddeld getij.



Figuur 83. Verschil in droogvalduur tussen de situatie met verruimde vaargeul met ligplaats (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0) tijdens een gemiddeld getij.



Figuur 84. Verschil in droogvalduur tussen de situatie met verruimde vaargeul met keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0) tijdens een gemiddeld getij.

Eb-duur

Door de Stokes-drift, advectie en bodemwrijving (Dronkers, 1986) zijn zowel stroomsnelheden als waterstanden tijdens vloed en eb in estuaria niet elkaars spiegelbeeld. Dit wordt getij-asymmetrie genoemd. Verdieping van delen van het estuarium kan een effect hebben op de voortplantingssnelheid van het getij en daarmee ook de getij-asymmetrie. Getij-asymmetrie kan voor getijgemiddelde sedimenttransporten zorgen en dus de onderhoudsbaggerwerkzaamheden beïnvloeden. Om te beoordelen of de getij-asymmetrie wezenlijk verandert door verruiming van de vaarweg is de periode tussen hoogwater en laagwater bepaald gedurende een gemiddeld getij voor de huidige situatie (2012 T0), de situatie met verruimde vaarweg (2012 T1, 2012 T2) en een aantal zeespiegelstijgingsscenario's zonder verruimde vaarweg (2015 T0, 2020 T0, 2040 T0). Hoe verder deze duur afwijkt van 6,2 uur, des te groter de getij-asymmetrie.

Langs het transect in figuur 75 zijn om de 5 km uitvoerpunten gedefinieerd. Hier wordt om de 10 minuten de waterstand weggeschreven. Deze resolutie is niet voldoende om een kleine verandering in periode van vallend tij, de periode tussen hoog- en laagwater, als gevolg van verruiming van de vaargeul te registreren. Daarom is er interpolatie gebruikt om het moment van hoogwater (laagwater) te vinden. Hiertoe is voor elk uitvoerpunt langs het transect het punt uit de tijdserie gehaald waarvoor de waterstand maximaal (minimaal) is. Door dit punt en het punt dat 10 minuten eerder en 10 minuten later is weggeschreven wordt een 2^{de} graads polynoom gefit. Als moment van hoogwater (laagwater) wordt nu het moment aangehouden waarop dit polynoom zijn maximum (minimum) aanneemt.



Figuur 85. Duur van vallend tij (boven), standaard deviatie in duur van vallend tij (midden) en het verschil in de duur van vallend tij ten opzichte van de huidige situatie (onder) voor verschillende scenario's.

Het bovenste paneel in figuur 85 toont de duur tussen hoogwater en het daarop volgende laagwater (ebduur) voor de huidige situatie (2012 T0) en voor verschillende scenario's. In de huidige situatie varieert de ebduur langs het estuarium. Vanaf Eemshaven zeewaarts (> 70 km) duurt de eb ongeveer even lang als de vloed. Tussen Eemshaven en Oldersum (30-70 km) duurt de eb korter dan de vloed en op de Eems rivier (km 0-30) duurt de eb weer langer dan de vloed. De andere scenario's vertonen een vergelijkbaar beeld.

Het middelste paneel in figuur 85 toont de standaard deviatie van de ebduur in de huidige situatie. Dit is de variatie in ebduur gedurende een springtij-doodtij cyclus. Deze figuur laat zien dat de ebduur in de huidige situatie niet alleen ruimtelijk maar ook in de tijd met 15 tot 21 minuten kan variëren.

Het onderste paneel in figuur 85 toont het verschil in ebduur voor verschillende scenario's ten opzichte van die in de huidige situatie. Duidelijk is dat het effect op de ebduur zeer klein is ten opzichte van de natuurlijke variatie voor alle scenario's. Volgens de berekeningen leidt verruiming van de vaarweg (2012 T1 en 2012 T2) tot een betrekkelijk kleine (< 2 minuten) verandering in ebduur. Dit is in overeenstemming met bevindingen door Hartsuiker et al (2007).

Getij-componenten en getij-asymmetrie

Naast de invloed op waterstand, droogvalduur en ebduur kan het effect van verruiming van de vaargeul worden beschreven in termen van de belangrijkste getij-componenten (M2 en M4) en de getij-asymmetrie. Met name de getij-asymmetrie door de interactie tussen de M2- en M4-component van het getij bepaalt in belangrijke mate het getijgemiddelde transport.

Figuur 86 toont de amplitude en fase van de M2-componenten van het getij als functie van de afstand tot Papenburg. De berekende amplitude van de M2-component neemt toe van ongeveer 1,0 m bij Huibertgat tot ongeveer 1,2 m bij Eemshaven, 1,4 m bij Delfzijl en 1,6 m bij Leerort. Uit figuur 86 blijkt dat de invloed van zowel T1 als T2 op de M2-amplitude zeer klein is. In absolute zin is dit altijd kleiner dan 2,5 mm en in relatieve zin altijd kleiner dan 0,2%. De berekende fase van de M2-component neemt toe van ongeveer 277° bij Huibertgat tot 311° bij Eemshaven, 332° bij Delfzijl en 360° bij Leerort. Figuur 86 laat zien dat de invloed van beide vaargeulontwerpen op de fase van de M2-component zeer klein is, namelijk altijd kleiner dan 0,25°. Dat komt overeen met een tijdsverschil van minder dan 30 seconden.



Figuur 86. Berekende amplitude en fase voor de M2-component van het getij langs het Eems-Dollard estuarium voor de huidige situatie (T0) en voor de situatie met tijdelijke ligplaats (T1) en voor de situatie met keerplaats (T2).

Figuur 87 toont de amplitude en fase van de M4-componenten van het getij als functie van de afstand tot Papenburg. De berekende amplitude van de M4-component neemt licht toe van ongeveer 0,09 m bij Huibertgat tot ongeveer 0,18 m bij Delfzijl en blijft daarna min of meer constant. Figuur 87 laat zien dat het effect van verruiming van de vaargeul zowel voor alternatief T1 als T2 zeer klein is. In absolute zijn is dit altijd kleiner dan 0,9 mm en in relatieve zin altijd kleiner dan 1,3%. De berekende fase van de M4-component neemt toe van ongeveer 35° bij Huibertgat, 92° bij Eemshaven, 123° bij Delfzijl en 241° bij Leerort (figuur 87 onderste paneel). De invloed van beide vaargeulontwerpen (T1 en T2) op de fase van de M4-component zeer klein is, namelijk altijd kleiner dan 0,9°. Dat komt overeen met een tijdsverschil van minder dan 1 minuut.



Figuur 87. Berekende amplitude en fase voor de M4-component van het getij langs het Eems-Dollard estuarium voor de huidige situatie (T0) en voor de situatie met tijdelijke ligplaats (T1) en voor de situatie met keerplaats (T2).



Figuur 88. Berekend faseverschil $\theta = 2\varphi M2 - \varphi M4$ van het getij langs het Eems-Dollard estuarium voor de huidige situatie (T0) en voor de situatie met tijdelijke ligplaats (T1) en voor de situatie met keerplaats (T2).

The interactie tussen M2 en M4 wordt bepaald door het faseverschil $\theta = 2\varphi M2 - \varphi M4$.

Wanneer $45^{\circ} < \theta < 135^{\circ}$ dan heeft de vloed een kortere periode dan de eb en zijn de vloedsnelheden groter dan de ebsnelheden. Dit zorgt voor import van sediment.

Wanneer $135^{\circ} < \theta < 225^{\circ}$ dan duurt de kentering van vloed naar eb langer en heeft het sediment meer tijd om uit te zakken dan tijdens kentering van eb naar vloed. Dit zorgt voor import van fijn sediment.

Wanneer $225^{\circ} < \theta < 315^{\circ}$ dan duurt de eb korter dan de vloed en zijn de ebsnelheden groter dan de vloedsnelheden. Dit zorgt voor export van sediment.

Wanneer $315^{\circ} < \theta < 45^{\circ}$ dan duurt de kentering van eb naar vloed langer en heeft het sediment meer tijd om te bezinken dan tijdens de kentering van vloed naar eb. Dit zorgt voor export van fijn sediment

Figuur 88 toont het berekende faseverschil voor de huidige situatie en voor de ontwerp verruimingen T1 en T2. Deze figuur laat zien dat de berekende getij-asymmetrie een maximum vertoont van ongeveer 169° bij Borkum en rondom Delfzijl en Knock. Ter hoogte van Eemshaven bedraagt het faseverschil ongeveer 160°. Dit zorgt voor import van fijn sediment. Verder bovenstrooms neemt het faseverschil af tot een meer vloeddominant getij.

Het effect van T1 en T2 op het faseverschil $\theta = 2\varphi M2 - \varphi M4$ is zeer klein. Het faseverschil neemt maximaal toe met 0,6° ter hoogte van Eemshaven. Ter hoogte van Delfzijl en verder stroomopwaarts is deze toename kleiner dan 0,2°. Dit betekent dat beide verruimingsscenario's volgens de berekeningen niet zullen leiden tot een versterking van de import van fijn sediment naar de Dollard en de Unterems.

4.3 SALINITEIT

Om de verandering in de saliniteit door vaargeulverruiming en zeespiegelstijging te bepalen zijn de gemiddelde, maximum en minimum saliniteit in de Eems, alsook de veranderingen hierin ten opzichte van de huidige situatie berekend. Simulaties laten zien dat de stratificatie in het Eems-Dollard estuarium zwak is, max. 2-3 ppt verschil tussen oppervlakte en bodem. In deze paragraaf zullen daarom alleen de variaties in dieptegemiddelde saliniteit worden getoond.

Figuur 89 toont in het bovenste paneel de berekende dieptegemiddelde saliniteit langs het estuarium. De variatie in gemiddelde saliniteit verloopt voor de berekende condities van ongeveer 31 psu bij Borkum, 27 psu bij Eemshaven, 22 psu bij Delfzijl, 8 psu bij Pogum, 2 psu bij Terborg en 0,4 psu bij Leerort. Het middelste paneel van figuur 89 toont de standaard deviatie (natuurlijke variatie) rondom het gemiddelde. Dit varieert van ongeveer 1,0 psu bij Borkum, 1,6 psu bij Eemshaven, 1,9 psu bij Delfzijl, 4,6 psu bij Pogum en 0,4 psu bij Leerort.

De gevolgen van zeespiegelstijging (2015 T0, 2020 T0, 2040 T0) en de verruiming van de vaarweg (2012 T1, 2012 T2) op de gemiddelde saliniteit zijn weergegeven in het onderste deel van figuur 89. Hieruit blijkt dat verruiming van de vaarweg in de berekeningen leidt tot een zeer kleine toename ter hoogte van km 50-60 en een zeer kleine afname van 0,04 psu ter hoogte van km 75. Dit is minder dan 0,2% van de gemiddelde saliniteit bij Eemshaven. De toename tussen km 50 en 60 is voor de verruiming volgens het ontwerp met ligplaats (+0,02 psu) iets kleiner dan wanneer de verruiming volgens het ontwerp met keerplaats (+0,04 psu) wordt uitgevoerd. Elders verandert de gemiddelde saliniteit niet. Deze veranderingen zijn zeer klein ten opzichte van de natuurlijke variatie en de autonome toename van de gemiddelde saliniteit door zeespiegelstijging. Deze toename reikt ver stroomopwaarts (tot km 15 in 2040) en is het sterkst in de buurt van Pogum (km 35) waar de toename door zeespiegelstijging kan oplopen tot 0,52 psu bij een zeespiegelstijging van 14 cm in 2040.



Figuur 89. Gemiddelde saliniteit voor verschillende scenario's (boven), standaard deviatie rondom het gemiddelde (midden) en het effect op de saliniteit t.o.v. de huidige situatie voor verschillende scenario's.

In plaats van een vergelijking van de saliniteit op een positie langs het estuarium kan ook een vergelijking worden gemaakt van de positie die een bepaalde saliniteit maximaal en minimaal kan bereiken. De verschuiving van deze posities ten opzichte van de huidige situatie is voor verschillende saliniteiten weergegeven in figuur 90 (maximaal) en figuur 91 (minimaal). Een negatieve verschuiving betekent dat de positie waar deze saliniteit aangetroffen kan worden dichter bij Papenburg komt te liggen, een positieve verschuiving duidt juist op een verschuiving van de isohaline (= lijn van gelijke saliniteit) richting zee. In deze figuren is te zien dat de verschuiving door verruiming van de vaarweg volgens het ontwerp met een ligplaats (2012 T1) maximaal 160 meter is, zowel in de zeewaartse als in de landwaartse richting. Verruiming volgens het ontwerp met keerplaats (2012 T2) kan leiden tot het lokaal landwaarts verschuiven van de isohaline met maximaal ongeveer 160 meter en zeewaarts met maximaal 350 meter. Door zeespiegelstijging verschuiven de isohalines verder landwaarts met 150 meter in 2020 tot een paar honderd meter in 2040.



Figuur 90. Verschuiving isohaline maximale saliniteit in de verschillende scenario's ten opzichte van de huidige situatie (2012 T0).



Figuur 91. Verschuiving isohaline minimale saliniteit in de verschillende scenario's ten opzichte van de huidige situatie (2012 T0).

Naast verandering van saliniteit langs de het km-traject kan verruiming van de vaarweg ook leiden tot verandering in ruimtelijke variatie van de saliniteit. Om dit in kaart te brengen is voor de huidige situatie en de situatie met verruimde vaarweg tijdens het hoog- en laagwater van een gemiddeld getij de dieptegemiddelde saliniteit in het estuarium berekend. De berekende saliniteiten voor de huidige situatie zijn te zien in figuur 92 en figuur 93. In de figuren is duidelijk de toename van saliniteit in zeewaartse richting te zien. Tevens is zien dat de verschuiving van de isohalines (lijnen met dezelfde saliniteit) met het tij het grootst is in de hoofdgeul tussen Eemshaven en de Dollard.

De verschillen in dieptegemiddelde saliniteit tussen de situatie met verruimde vaargeul met ligplaats en de huidige situatie tijdens hoogwater en laagwater zijn weergegeven in figuur 94 en figuur 95. De veranderingen blijven beperkt tot een klein gebied in de Eemshaven en ten noorden van de Eemshaven. Tijdens hoogwater is de toename in Eemshaven maximaal 0,5 psu en zijn er ten noorden van de Eemshaven betrekkelijk kleine zones met een verandering van minder dan 0,3 psu. Tijdens laagwater is de toename in Eemshaven maximaal 0,5 psu en zijn er ten noorden van de Eemshaven maximaal 0,5 psu en is er ten noorden van de Eemshaven een kleine zone met een toename van ongeveer 0,3 psu en ten westen kleine zones met een afname met van ongeveer 0,1 psu. De veranderingen in dieptegemiddelde saliniteit door verruiming van de vaargeul volgens het ontwerp met keerplaats zijn weergegeven in figuur 96 en figuur 97. De veranderingen zijn vergelijkbaar met die gevonden zijn bij verruiming met ligplaats.

Uit de simulaties blijkt dus dat de veranderingen in saliniteit door de geulverruiming lokaal zijn: alleen in en net voor de Eemshaven treden noemenswaardige veranderingen op, dit in tegenstelling tot de veranderingen door zeespiegelstijging die de saliniteit in bijna het gehele estuarium veranderen. In vergelijking met de saliniteitsverandering door de autonome trend zijn de veranderingen ook zeer klein. Dit komt overeen met de conclusies van Hartsuiker et al. (2007) dat de verandering in saliniteit langs het transect door de verruiming enkele honderste ppt zijn, terwijl zij voor zeespiegelstijging enkele tiende ppt zijn en dat de reikwijdte van het gebied waarbinnen de saliniteit optreedt beperkt is tot het gebied voor de Eemshaven.



Figuur 92. Dieptegemiddelde saliniteit op moment van hoogwater in de Eemshaven tijdens een gemiddeld getij in de huidige situatie (2012 T0).



Figuur 93. Dieptegemiddelde saliniteit op moment van laagwater in de Eemshaven tijdens een gemiddeld getij in de huidige situatie (2012 T0).



Figuur 94. Verschil dieptegemiddelde saliniteit situatie met verruimde vaarweg met ligplaats (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0) op moment van hoogwater tijdens een gemiddelde getijperiode.



Figuur 95. Verschil dieptegemiddelde saliniteit situatie met verruimde vaarweg met ligplaats (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0) op moment van laagwater tijdens een gemiddelde getijperiode.



Figuur 96. Verschil dieptegemiddelde saliniteit situatie met verruimde vaarweg met keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0) op moment van hoogwater tijdens een gemiddelde getijperiode.



Figuur 97. Verschil dieptegemiddelde saliniteit situatie met verruimde vaarweg met keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0) op moment van laagwater tijdens een gemiddelde getijperiode.

4.4 STROOMSNELHEID

Figuur 98 toont in het bovenste paneel de berekende maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid. Voor alle scenario's geldt dat de stroomsnelheid vanaf de zee toeneemt van 0,6 tot 1,4 m/s bij Borkum (km 90). Landwaarts van Borkum blijft de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid rond de 1,4 m/s fluctueren.

Het onderste gedeelte van figuur 98 toont de verandering van de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid ten opzichte van de huidige situatie. Zeespiegelstijging zorgt in het noordelijk deel van het Eemsestuarium (km 45-110) voor een stijging in de maximale stroomsnelheden, in het middendeel (km 15-45) voor een lichte daling en in het zuidelijk deel (km 0-15) weer voor een stijging. In 2020 zijn de groottes van deze toe- en afname respectievelijk 0,004 m/s en 0,001 m/s. In 2040 loopt dit op tot respectievelijk 0,025 m/s en 0,01 m/s. De verruiming van de vaargeul zorgt alleen in het noordelijk deel van het estuarium (km 65-110) voor verandering in stroomsnelheden. De grootste verandering is daarbij de afname van stroomsnelheden ter plaatse van de Eemshaven (km 70). Voor het vaargeulontwerp met ligplaats (2012 T1) is deze maximale verandering 0,02 m/s en voor het vaargeulontwerp met keerplaats (2012 T2) is deze maximale verandering 0,03 m/s.



Figuur 98. Maximale stroomsnelheden langs het transect in Figuur 75 en het verschil in maximum stroomsnelheid ten opzichte van de huidige situatie (2012 T0) voor verschillende scenario's.

Figuur 99 toont de gemiddelde stroomsnelheden. Deze zijn uiteraard kleiner dan de maximale stroomsnelheden maar vertonen een vergelijkbaar beeld. De gemiddelde stroomsnelheid bedraagt ongeveer 0,4 m/s aan de zeezijde tot 0,7 m/s landwaarts van Borkum. Ook hier leidt het ontwerp met keerplaats tot grotere veranderingen dan het ontwerp met ligplaats, al blijft ook in dit laatste geval de maximale verandering (0,02 m/s) klein ten opzichte van de gemiddelde stroomsnelheid (0,7 m/s).



Figuur 99. Gemiddelde stroomsnelheden langs het transect in Figuur 75 en het verschil in gemiddelde stroomsnelheid ten opzichte van de huidige situatie (2012 T0) voor verschillende scenario's.

Om de reikwijdte van de effecten van de vaargeulverruiming op de stromingen loodrecht op het transect inzichtelijk te maken zijn tijdens maximale vloed en maximale eb van een gemiddeld getij de dieptegemiddelde stromingen uitgerekend. Deze stromingen zijn voor de huidige situatie weergegeven in figuur 100 t/m figuur 103. Slechts voor 1/25^{ste} van de rekenpunten wordt de stromingsvector weergegeven (dus in beide richtingen zijn de vectoren een factor 5 uitgedund). Dit om de figuren overzichtelijk te houden. De figuren laten zien dat de stromingen in de hoofdvaargeul tussen de 1,0 en 1,4 m/s liggen en de geul volgen. Op de aangrenzende ondieptes zijn de stroomsnelheden 0,1-0,6 m/s en de stroomrichting maakt een grote hoek (70°-90°) ten opzichte van de stroomrichting in de geulen.

In figuur 104 t/m figuur 107 is er een vergelijking gemaakt tussen de stroming in de situatie met verruimde vaargeul met ligplaats en de huidige situatie. De vectoren in deze figuren geven het vectorverschil aan tussen de dieptegemiddelde stroming in situatie met verruimde vaargeul ten opzichte van de huidige situatie. De kleurenschaal geeft niet de norm van dit vectorverschil, maar geeft het verschil tussen de absolute stroomsnelheid in de situatie met verruimde vaargeul en de huidige situatie. In de figuren is te zien dat de veranderingen in stromingen door verruiming van de vaargeul lokaal zijn. Alleen waar gebaggerd moet worden voor de verruiming, rond km 100 en ten noorden van de Eemshaven, veranderen de stroomsnelheden met maximaal 0,16 m/s. Naast de geul nemen de stroomsnelheden toe met maximaal 0,02 m/s.

Figuur 108 t/m figuur 111 tonen het verschil in stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met keerplaats en de huidige situatie. De vorm van de veranderingen komen overeen met de veranderingen door de vaarweg met ligplaats, echter de veranderingen zijn iets groter: snelheden kunnen door de verruiming afnemen met 0,2 m/s.

Toenames vinden alleen plaats op kleine gebieden buiten de aanvaarroute en met maximaal 0,1 m/s. In het zuidelijk deel van het estuarium veranderen de stroomsnelheden tijdens maximale eb en vloed niet meer dan 0,1 m/s.



file:B02047_000031_plot_velocitynew_map

Figuur 100. Dieptegemiddelde stromingen in noordelijk deel Eems-Dollard estuarium tijdens maximale eb van een gemiddeld getij.



Figuur 101. Dieptegemiddelde stromingen in noordelijk deel Eems-Dollard estuarium tijdens maximale vloed van een gemiddeld getij.



file:B02047_000031_plot_velocitynew_map

Figuur 102. Dieptegemiddelde stromingen in zuidelijk deel Eems-Dollard estuarium tijdens maximale eb van een gemiddeld getij.



Figuur 103. Dieptegemiddelde stromingen in zuidelijk deel Eems-Dollard estuarium tijdens maximale vloed van een gemiddeld getij.



file:B02047_000031_plot_velocitynew_map

Figuur 104. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met ligplaats (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale eb in een gemiddeld getij voor het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium.



Figuur 105. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale vloed in een gemiddeld getij voor het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium.



file:B02047_000031_plot_velocitynew_map

Figuur 106. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale eb in een gemiddeld getij voor het zuidelijk deel van het Eems-Dollard estuarium.



Figuur 107. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met ligplaats (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale vloed in een gemiddeld getij voor het zuidelijk deel van het Eems-Dollard estuarium.



file:B02047_000031_plot_velocitynew_map

Figuur 108. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale eb in een gemiddeld getij voor het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium.



Figuur 109. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale vloed in een gemiddeld getij voor het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium



file:B02047_000031_plot_velocitynew_map

Figuur 110. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale eb in een gemiddeld getij voor het zuidelijk deel van het Eems-Dollard estuarium.



Figuur 111. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale vloed in een gemiddeld getij voor het zuidelijk deel van het Eems-Dollard estuarium



file:B02047_000031_plot_residualvelocity

Figuur 112. Residuele stroming in het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium gedurende een gemiddeld getij in de huidige situatie.


file:B02047_000031_plot_residualvelocity

Figuur 113. Residuele stroming in het zuidelijk deel van het Eems-Dollard estuarium gedurende een gemiddeld getij in de huidige situatie.



file:B02047_000031_plot_residualvelocity

Figuur 114. Verschil residuele stroming in het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium tussen de situatie met verruimde vaargeul met ligplaats (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0).



file:B02047_000031_plot_residualvelocity

Figuur 115. Verschil residuele stroming in het zuidelijk deel van het Eems-Dollard estuarium tussen de situatie met verruimde vaargeul met ligplaats (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0).



file:B02047_000031_plot_residualvelocity

Figuur 116. Verschil residuele stroming in het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium tussen de situatie met verruimde vaargeul met keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0).



file:B02047_000031_plot_residualvelocity

Figuur 117. Verschil residuele stroming in het zuidelijk deel van het Eemsestuarium tussen de situatie met verruimde vaargeul met keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0).

Ten slotte is de residuele dieptegemiddelde stroomsnelheid berekend voor een gemiddeld getij (residuele stroming is de stroming die overblijft als de resultante van de getijdenwerking, de reststroom). Dit is gedaan door in ieder roosterpunt een *spline* door elke component van de stroomsnelheden te trekken en d.m.v. integratie van 15-3-2012 00:00 15-3-2012 13:20 (1 getijperiode) het gemiddelde te bepalen. Het resultaat hiervan is weergegeven in figuur 112 en figuur 113. In het patroon zijn een aantal circulatiecellen te herkennen. Deze ontstaan doordat vorticiteit die op de overgangen tussen ondiepten en geulen wordt gegenereerd met de stroming wordt meegevoerd naar de monding van de geulen. De grootste van deze circulatiecellen ligt om de Meeuwenstaart. Dit is een zandbank die tussen km 80 en km 85 ten westen van de vaargeul ligt. De grootste residuele stroomsnelheden kunnen in deze circulatiecel gevonden worden en zijn 0,3 m/s groot.

De effecten van de verruiming op de residuele stromingen in het Eems-Dollard estuarium zijn berekend door residuele stromingen in de huidige situatie (2012 T0) van de situatie met verruimde vaargeul met ligplaats af te trekken (2012 T1). De verschillen tussen de situatie met verruimde vaargeul met ligplaats en de huidige situatie zijn weergegeven in figuur 114 en figuur 115. De kleurenschaal geeft wederom het verschil in absolute stroomsnelheden, terwijl de vectoren het vectorverschil tussen de residuele stroomsnelheid in 2012 T0 en 2012 T1 weergeven. In de figuren is te zien dat door de verruiming de residuele stroomsnelheden met maximaal 0,01 m/s toenemen. De toename is echter lokaal: alleen ten noorden van de Eemshaven en bij km 100, op de punten waar gebaggerd wordt, vinden veranderingen plaats.

Het verschil in residuele stroming tussen de situatie met verruimde vaargeul met keerplaats en de huidige situatie is weergegeven in figuur 116 en figuur 117. De locaties van de veranderingen, hun richting en de grootte is vergelijkbaar met de veranderingen door verruiming van de vaargeul met een ligplaats.

Dus vaarweg verruiming leidt tot veranderingen in stroomsnelheden, maar het gebied waarin deze veranderingen plaatsvinden is klein. Alleen daar waar gebaggerd wordt, nabij km 100 en ten noorden van de Eemshaven komen veranderingen voor. De grootste veranderingen vinden nabij de Eemshaven plaats. Stroomsnelheden veranderen met ca. 15%, maar omdat het hier om een afname gaat worden geen problemen voor de scheepvaart verwacht.

4.5 GOLVEN

Het effect van de veruiming van de vaarweg naar Eemshaven op de golfcondities in het estuarium is berekend voor vier verschillende scenario's met behulp van Delft3D-Wave (SWAN). Voor elk scenario zijn twee berekeningen gemaakt, de eerste voor de bestaande situatie en de tweede met veruimde vaargeul. Tabel 14 toont per scenario de golf- en windcondities. Deze zijn dezelfde als die toegepast door Hartsuiker et al. (2007).

Scenario	Golfhoogte H _{m0}	Golfperiode T_p	Windrichting	Windsnelheid	Waterstand
	[m]	[s]	[°]	[m/s]	[m NAP]
А	6,3	10,0	315	20	2,0
В	5,0	7,8	315	19	2,0
С	2,0	5,5	315	15	1,5
D	1,0	5,0	315	10	0,5

Tabel 14. Toegepaste golf- en windcondities voor bepaling van effect van verruiming van de vaargeul op de golfcondities in het Eems-Dollard estuarium

Figuur 118 toont in het bovenste paneel de berekende variatie in significante golfhoogte en-richting in de bestaande situatie voor scenario A. De golfhoogte op de Noordzee is 6,3 m en bij Eemshaven is dit afgenomen tot ongeveer 1,7 m. Het onderste paneel in figuur 118 toont het effect van verruiming van de vaargeul op de golfhoogte voor scenario A. Rode kleuren geven een toename aan ten opzichte van de bestaande situatie en blauwe kleuren een afname. De kleur is wit wanneer het effect kleiner is dan 0,01 m. Verruiming van de vaargeul heeft een klein effect op de golfhoogte langs het meest noordelijke deel van de vaargeul. Lokaal neemt de golfhoogte ten noorden van de vaargeul toe met 0,05-0,10 m en ten zuiden van de vaargeul af met eveneens 0,05-0,10 m. Deze kleine lokale aanpassing wordt veroorzaakt door refractie die de golven ter hoogte van de verruiming iets meer tegen de klok in doet draaien dan zonder verruiming. De refractie is ook in beperkte mate zichtbaar in het gebied juist ten noorden van Eemshaven. Het effect op de significante golfhoogte is daar 0,01-0,02 m. De aanpassingen zijn betrekkelijk klein ten opzichte van de absolute golfhoogte ter plaatse en de natuurlijke variatie daarin.

Figuur 119 toont in het bovenste paneel de berekende variatie in significante golfhoogte en-richting in de bestaande situatie voor scenario B. De golfhoogte op de Noordzee is 5,0 m en bij Eemshaven is dit afgenomen tot ongeveer 1,6 m. Het onderste paneel in figuur 119 toont het effect van verruiming van de vaargeul op de golfhoogte voor scenario B. Deze vertoont een zelfde patroon als voor scenario A maar minder sterk. Voor scenario C is het effect nog minder sterk (figuur 120) en voor scenario D blijft het effect op de significante golfhoogte onder de 0,01 m (figuur 121). Deze bevindingen zijn in overeenstemming met eerdere berekeningen door Hartsuiker et al. (2007).



Figuur 118. Berekende variatie significante golfhoogte in m (boven) en effect van verruiming van de vaargeul op de golfhoogte in m (onder) op basis van scenario A (zie tabel 14 voor scenario's)



Figuur 119. Berekende variatie significante golfhoogte in m (boven) en effect van verruiming van de vaargeul op de golfhoogte in m (onder) op basis van scenario B (zie tabel 14 voor scenario's)



Figuur 120. Berekende variatie significante golfhoogte in m (boven) en effect van verruiming van de vaargeul op de golfhoogte in m (onder) op basis van scenario C (zie tabel 14 voor scenario's)



Figuur 121. Berekende variatie significante golfhoogte in m (boven) en effect van verruiming van de vaargeul op de golfhoogte in m (onder) op basis van scenario D (zie tabel 14 voor scenario's)

4.6 MORFOLOGIE

Invloed van baggeren

Het geulensysteem in een natuurlijk estuarium bestaat in het algemeen uit een hoofdebgeul die zich opsplitst in twee parallelle geulen: een eb- en een vloedschaar (Van Veen, 1950). Wanneer de hoofdebgeul, of 'stam', zich gaat splitsen in een vloedschaar en een ebschaar die langs elkaar gaan stromen, dan ontstaan twee parallelle geulen met daartussen een nieuwe drempel. Dit 'breken' van de hoofdebgeul is een gevolg van te grote plaatselijke breedte van het estuarium, of met andere woorden een gevolg van onvoldoende geleiding van de geul door de oevers. Elke natuurlijke geul van enige lengte wil zich splitsen, tenzij men door geleidingswerken of baggeren, de eenheid weet te bewaren. Het kost moeite een ebschaar en een vloedschaar te laten samengaan in één geul.

Het effect van het baggeren en verspreiden op de morfologie hangt samen met de omvang van de ingreep relatief ten opzichte van de afmetingen van de geulen en platen in het estuarium en de omvang van hun autonome gedrag.

Historische kaarten van 1812 tot 1949 geven aan dat grootschalige landaanwinningswerken in de Dollard en baggeractiviteiten in het Oostfriesche Gaatje hebben geresulteerd in significante veranderingen in het geulensysteem (zie paragraaf 2.7). Aanpassingen op deze grote ruimtelijke schaal (gehele estuarium) treden op, op tijdschalen van circa 100 jaar. In de afgelopen decennia (tussen 1985 en 2010) vertoont het estuarium echter een redelijk stabiele grootschalige configuratie met twee hoofdgeulen gescheiden door een plaat.

Wang (1997) ontwikkelde stabiliteitscriteria voor een twee-geulensysteem en concludeert dat baggeren een gering effect heeft op de stabiliteit van een twee-geulensysteem. In het geval van de vaarweg naar Eemshaven blijft de geplande verruiming beperkt tot minder dan 1% van de totale doorsnede van één van de twee geulen. Dit is klein ten opzichte van de natuurlijke variatie in geuldoorsnede (zie paragraaf 2.7).

Verspreiding van gebaggerd materiaal kan echter wel een rol spelen en het systeem doen neigen naar een één-geulsysteem wanneer de totale hoeveelheid verspreid sediment meer dan 10% bedraagt van de transportcapaciteit van het twee-geulensysteem (Wang, 1997). Dit verspreidingscriterium is meer stringent wanneer het baggeren plaatsvindt in de ene geul van het tweegeulensysteem en verspreiding in de andere. De verspreidingscriteria zoals bepaald door Wang (1997) zijn gehanteerd bij vaststelling van de verspreidingsstrategie zoals gepresenteerd in paragraaf 4.7 (zie ook Jeuken et al. 2007).

In de effectstudie is uitgegaan van een *worst case* scenario waarbij het materiaal tijdens de verruiming zodanig wordt gebaggerd en verspreid dat het aanwezige fijne sediment volledig in de waterkolom in suspensie wordt gebracht. In werkelijkheid kan er een ophoging van de bodem ontstaan die enige tijd blijft liggen en niet of langzaam erodeert. Modelberekeningen waarin de bodem op de verspreidingslocaties is opgehoogd laten zien dat dit een lokaal effect heeft met een kleine verhoging van de stroomsnelheid van orde 0,10 m/s op de locatie zelf en een verlaging benedenstrooms (Hartsuiker et al. ,2007).

Effect op basis van stabiliteitscriterium

Het effect van verruiming van de vaargeul op de morfologie kan ook worden beoordeeld op basis van een empirische stabiliteitsrelatie. Hartsuiker et al. (2007) hebben dit onderzocht op basis van de relatie van Van de Kreeke en Haring (1979) die als volgt is gedefinieerd:

$V_{vloed} = 12195 \times A_{NAP}$

Of

$$A_{NAP} = 8,2 \times 10^{-6} \times V_{vloed}$$

Hierin is V_{vloed} het vloedvolume in m³ bij gemiddelde getijcondities en A_{NAP} het oppervlak van de doorsnede onder NAP.

Baggeren beïnvloedt het estuarium dus niet alleen direct door aanpassing van de natte doorsnede maar ook indirect. Ten eerste zal de toename van de doorsnede het getijvolume veranderen en ten tweede zal dat aangepaste getijvolume via bovengenoemde relatie weer invloed hebben op de doorsnede. Deze indirecte effecten zijn subtiel maar zouden bestaande morfologische trends kunnen versnellen of vertragen.

Hartsuiker et al. (2007) en Kiezebrink (1996) hebben de stabiliteit van het geulensysteem onderzocht. Hieruit blijkt dat de dwarsdoorsnedes van het Huibertgat en de Westereems in evenwicht zijn met de hoeveelheid water die passeert. Het Zeegat tussen Borkum en Rottumeroog is kleiner dan verwacht, maar vertoont niet de neiging om groter te worden. Het noordelijk deel van het Randzelgat is kleiner dan verwacht zou mogen worden. Dit kan een gevolg zijn van het feit dat een deel van het water tijdens vloed niet alleen door het Randzelgat stroomt maar ook over de Meeuwenstaart. Het zuidelijke deel van het Randzelgat is redelijk in evenwicht. Het noordelijke deel van de Oude Westereems is iets groter dan verwacht zou mogen worden. Voor het zuidelijke deel geldt dit niet. Geconcludeerd mag worden dat het geulensysteem, in het deel van het estuarium waarin de vaargeulverruiming plaatsvindt, in de afgelopen decaden betrekkelijk stabiel is geweest.

Geul Variatie in vloedvolume		
	(Kiezebrink, 1996)	
Westereems	± 7,6%	
Huibertgat	± 1,8%	
Randzelgat	± 16,0%	
Oude Westereems	± 6,4%	

Tabel 15. Waargenomen variaties in vloedvolume (Kiezebrink, 1996)

Hoewel het aantal datasets te beperkt en de variatie te groot is om statistische betrouwbare uitspraken te kunnen doen, willen we hier toch enig inzicht geven in de ontwikkeling. De huidige gegevens laten zien dat de diepte en het dwarsprofiel van het Huibertgat iets afnemen (gemiddelde bodemligging trend van 0,03 m/jr). De Huibertplaat heeft de neiging om in breedte toe te nemen, hetgeen kan resulteren in sedimentatie van de vaargeul in de Westereems. De Westereems zelf lijkt een relatief stabiele geul te zijn, alhoewel de beschikbare gegevens beperkt zijn. De Oude Westereems vertoont sedimentatie (gemiddelde bodemligging trend van 0,03 m/jr) en heeft de neiging om te migreren in de richting van het Randzelgat. Het Randzelgat erodeert in geringe mate met een gemiddelde trend in de bodemligging van 0,02 m/jr.

Tabel 16. Autonome trend en natuurlijke variatie tussen haakjes

	Autonome trend en natuurlijke variatie dwarsdoorsnede
	(%/jaar)
Westereems	0,0% (± 0,2%)
Huibertgat	-0,3% (± 1,3%)
Randzelgat	+0,1% (± 0,3%)
Oude Westereems	-0,3% (± 1,3%)

Bovengenoemde autonome trends zijn, mede op basis van Hartsuiker et al. (2007), weergegeven in tabel 16. Deze percentages moeten met grote voorzichtigheid worden gehanteerd en geven slechts een indictie van de richting en de orde van grootte. In tabel 17 toont kolom A het berekende effect van verruiming van de vaargeul op het vloedvolume. Deze waarden moeten worden beschouwd in het licht van de betrekkelijk grote natuurlijke variatie van het vloedvolume zoals gepresenteerd in tabel 15. Kolom B van tabel 17 toont vervolgens het directe effect van verruiming op de dwarsdoorsnede van de geul. De laatste kolom toont het netto effect van de vaargeulverruiming op de geuldoorsnede van de betreffende geulen. Vergelijken we de tabel 17 met tabel 15 en tabel 16 dan blijkt dat het netto effect van vaargeulverruiming kleiner is dan de natuurlijke variatie. Hierbij moet worden vermeld dat voor de berekeningen is uitgegaan van een worst case scenario, namelijk dat het sediment uit de geul wordt onttrokken. In werkelijkheid wordt het sediment in het algemeen verspreid binnen hetzelfde geuloppervlak waardoor de totale oppervlakte van het dwarsprofiel en daardoor de directe en indirecte effecten minder sterk zullen zijn dan in tabel 17 wordt vermeld.

Tabel 17. Aanpassing van de geuldoorsnede als gevolg van het indirecte effect van vaargeulverruiming op het	
vloedvolume (A), direct effect van vaargeulverruiming op de doorsnede (B) en het netto resultaat (A-B).	

	Indirect effect via vloedvolume	Direct effect verruiming	Netto resultaat
	Α	В	A-B
Westereems	+0,5%	+0,7%	-0,2%
Huibertgat	-0,1%	+0,0%	-0,4%
Randzelgat	+0,2%	+0,1%	+0,2%
Oude Westereems	-0,2%	0,0	-0.5%

4.7 VERSPREIDINGSSTRATEGIE BAGGERSPECIE

Inleiding

Bij de aanleg en het onderhoud van de verruiming van de vaargeul Noordzee-Eemshaven komt baggerspecie vrij waarvan het de bedoeling is die elders te verspreiden. Deze paragraaf presenteert de hoeveelheden baggermateriaal in de aanlegfase en de hoeveelheden te verspreiden baggerspecie per verspreidingslocatie (de verspreidingsstrategie).

Uitgangspunten

Medusa Explorations (De Vries, 2013; Excel-bestand) heeft de te baggeren volumes berekend uitgaande van de werkelijke bodems van 2008, 2010, 2011 en 2012 en de dimensies van de vaargeul zoals weergegeven door Schweter (2013). De baggervolumes zijn dus volumes in situ. Medusa heeft de berekende baggervolumes ook per sedimentsoort berekend.

Bij de keuze van de ligging en het gebruik van de verspreidingslocaties wordt de verspreidingsstrategie (Mulder, 2008) die in het kader van het vorige, vernietigde, Tracébesluit is gemaakt is als basis gebruikt. Hierbij is rekening gehouden met verspreidingscapaciteit, morfologische effecten en ecologische effecten.

Hoeveelheden baggermateriaal in de aanlegfase

Er blijkt geen duidelijke toename of afname in de berekende baggervolumes tussen 2008 en 2012. De variatie zit met name in de dynamiek van het zandige deel. Het gemiddelde totale baggervolume langs de vaarweg bedraagt 5,835x106 m3 en de standaarddeviatie (n = 4) bedraagt 6% van het gemiddelde (naar boven afgerond).



Voor de effectstudie wordt uitgegaan van een realistisch worst case scenario. Voor een realistische bovengrens van het baggervolume in de aanlegfase gaan we daarom uit van het gemiddelde plus twee keer de standaarddeviatie. Het totale baggervolume komt daarmee op 6.540.000 m³. Tabel 18 toont de

Sedimentsoort	Volume vaargeul (x10 ⁶ m³)
Zand	5,28
Keileem	0,86
Klei	0,26
Veen	0,14
Totaal	6,54

baggervolumes per sedimentsoort.

Door verfijningen gedurende het ontwerpproces zijn er detailverschillen tussen het baggervolume zoals dat in deze studie is opgenomen en de volumes die in de MER zijn opgenomen. De volumes die in deze studie worden gepresenteerd zijn iets groter.

Verspreidingslocaties en -capaciteit

Figuur 123 toont de verschillende potentiële Nederlandse baggerspecieverspreidingslocaties. Een aantal hiervan overlapt met de Duitse *Klappstellen*. Voor de vaarweg zijn hieruit vier verspreidingslocaties geselecteerd namelijk P0, P1, P3 en eventueel P4 (Mulder, 2008). De coördinaten van het midden van deze locaties zijn gegeven in tabel 19.



Figuur 123. Potentiële verspreidingslocaties

Tabel 20 toont de verspreidingscapaciteit per jaar voor de geselecteerde locaties. Verspreidingslocatie P0 is de enige in de Westereems en de capaciteit is daarom vastgesteld op die in de Westereems zoals gerapporteerd door Jeuken et al (2007). Deze bedraagt 1,50x10⁶ m³/jaar. P0 wordt op dit moment door Duitsland gebruikt (Klappstelle 2). Gemiddeld over de jaren 2003-2011 is hier 0,40x10⁶ m³/jaar verspreid. Het maximum was 0,85x10⁶ m³ in 11 maanden tijd (1-Sep-2009 tot 1-Aug-2010). Het huidig gebruik van P0 ligt dus ruim onder de verspreidingscapaciteit. De locaties P1 en P3 zijn diepe putten. P1 is reeds vergund aan en gebruikt door Groningen Seaports als verspreidingslocatie. P3 is een nieuwe potentiële verspreidingslocatie. P4 is een Duitse verspreidingslocatie maar is de laatste jaren niet meer in gebruik. De capaciteit van o.a. P1, P3 en P4 is eerder vastgesteld door Hartsuiker et al. (2007). Omdat er zich geen wezenlijke veranderingen in waterbeweging en morfologie hebben voorgedaan worden deze uit de eerdere studies overgenomen.

Verspreidingslocatie	x [m _{RD}]	y [m _{RD}]
P0	231136	626664
P1	246690	615410
P3	226690	621840
P4	222980	628560

Tabel 19. Coördinaten hartpunten verspreidingslocaties.

Tabel 20. Maximale jaarlijkse verspreidingscapaciteit van de verschillende locaties gesommeerd voor verschillende perioden.

Periode		P0 (x10 ⁶ m ³)	P1 (x10 ⁶ m ³)	P3 (x10 ⁶ m ³)	P4 (x10 ⁶ m ³)
1 jaar	Zand	1,50	1,58	0,93	0,18
	Slib	?	1,80	0,50	1,80
4 jaar	Zand	6,00	6,32	3,72	0,72
	Slib	?	7,20	2,00	7,20
5 jaar	Zand	7,50	7,90	4,65	0,90
	Slib	?	9,00	2,50	9,00

In principe wordt er naar gestreefd de verspreidingscapaciteit van een locatie niet langdurig te overschrijden, ten einde grote morfologische effecten te vermijden. Als bovengrens voor de eenmalig te verspreiden hoeveelheid zand wordt 5-maal de jaarlijkse capaciteit gehanteerd. Dit houdt verband met het vermogen tot morfologisch herstel zonder blijvende effecten (Mulder, 2008).

Voldoende verspreidingscapaciteit op meerdere locaties is van belang om de volgende redenen:

- a) Zoveel mogelijk ruimte bieden voor diversen typen baggermaterieel (diepgang van baggerschip). Hierdoor kan de markt in het in te zetten materieel keuzes maken waardoor kosten (life cycle costs = LCC) niet onnodig hoog zijn.
- b) Door beperking van de vaarafstanden is er minder aanwezigheid en verstoring door schepen, minder milieubezwaar (uitstoot verbrandingsstoffen) en minder kosten (LCC).
- c) Uit monitoring zou kunnen blijken dat het ongewenst is om een locatie maximaal te benutten (bijvoorbeeld bij P0 te veel retourstroom of bij P4 te snelle verondieping). Meerdere locaties c.q meer capaciteit bieden de flexibiliteit om hier op in te spelen.
- d) Na aanleg is onderhoud nodig (zie verderop in de paragraaf). De hoeveelheid onderhoudsbaggerwerk is minder goed in te schatten dan de hoeveelheid bij aanleg. Ook de locaties van onderhoud kunnen onzeker zijn. Ruimte in de verspreidingscapaciteit en het aantal locaties is daarom op voorhand gewenst.

Na enkele jaren ervaring te hebben opgedaan met het onderhoud, zijn aanpassingen van het gebruik van de verspreidingslocaties te overwegen. Dit kan met een adaptief onderhoudsbeleid, gebaseerd op monitoring en evaluatie van de ontwikkelingen.

Voor zand uit de kustzone hebben P0, P3 en P4 samen een capaciteit van 2,61x10⁶m³/jaar. De effecten van de aanleg zouden over meerdere jaren mogen worden uitgesmeerd, maximaal 4 tot 5 jaar. We gaan ervan uit dat aanleg ongeveer 0,5 jaar in beslag neemt.

Wanneer we voor het onderhoud uitgaan van ongeveer 1,5x10⁶m³/jaar (zie verderop in deze paragraaf) dan is een capaciteit voor aanleg en onderhoud nodig van in totaal 8,9x10⁶ tot 10,4x10⁶m³ in 4 tot 5 jaar. Hierbij is uitgegaan zijn van 3,57x10⁶ m³ te verspreiden zand in de kustzone (zie tabel 21) vermeerderd met 5,3 tot 6,8 x10⁶ m³, ofwel 3,5 (jaar) resp. 4,5 (jaar) maal 1,5x10⁶ m³/jr. De drie locaties hebben samen een capaciteit van 10,4x10⁶ tot 13,0x10⁶m³ in 4 tot 5 jaar. Deze getallen en de onzekerheden in de capaciteit en de baggerhoeveelheden geven aanleiding om uit te gaan van een verspreidingsstrategie waarbij alle genoemde locaties worden meegenomen.

Vaarafstand

Figuur 124 toont de te baggeren zones noodzakelijk voor verruiming van de vaargeul te samen met de verspreidingslocaties. Dit geeft een indruk van de vaarafstanden noodzakelijk voor het baggeren en verspreiden. Figuur 125 en figuur 126 zoomen in op respectievelijk het noordelijke en het zuidelijke deel. Figuur 127 toont de baggervolumes per km langs het traject.

In de kustzone is baggerwerk noodzakelijk voor een deel van het traject tot aan de bocht bij Borkum. De afstand tot verspreidingslocaties P0 bedraagt 1 tot 9 km, de afstand tot verspreidingslocatie P3 bedraagt 4 tot 6 km, en die tot P4 bedraagt 3 tot 9 km. Dit zijn de afstanden in een rechte lijn. De werkelijke vaarafstanden zijn mede afhankelijk van de diepgang van het baggerschip.

In de Waddenzee wordt gebaggerd ter hoogte van de ligplaats en in de bocht naar Eemshaven. De afstand van dit traject tot verspreidingslocaties P1 bedraagt 3 tot 7 km.



Figuur 124. Baggerdiepte ten behoeve van verruiming van de vaargeul. De blauwe nummers geven de afstand in km langs het traject aan. Figuur 127 toont de baggervolumes per km.



Figuur 125. Baggerdiepte ten behoeve van verruiming van de vaargeul ingezoomd op noordelijke deel. De blauwe nummers geven de afstand in km langs het traject aan.



B02047_000031_plot_dredging_areas

Figuur 126. Baggerdiepte ten behoeve van verruiming van de vaargeul ingezoomd op zuidelijke deel. De blauwe nummers geven de afstand in km langs het traject aan.



Figuur 127. Baggervolumes per km. Figuur 124 t/m figuur 126 tonen in blauwe cijfers de km's langs het traject.

Verspreidingsstrategie

Tabel 21 toont de verspreidingsstrategie. Het zand uit de kustzone wordt verspreid over locaties P0, P3 en P4. De rest wordt verspreid op locatie P1. Tabel 22 toont de totaal te verspreiden volumes zand en kleikeileem-veen in de aanlegfase.

Zone	Sediment	Totaalvolume (x10 ⁶ m ³)	P0 (x10 ⁶ m ³)	P1 (x10 ⁶ m ³)	P3 (x10 ⁶ m ³)	P4 (x10 ⁶ m ³)
Kustzone	zand	3,572	2,053		1,273	0,246
	keileem	0,041		0,041		
Waddenzee	zand	1,704		1,704		
	keileem	0,814		0,814		
	klei	0,262		0,262		
	veen	0,143		0,143		
Totaal		6,536	2,053	2,964	1,273	0,246

Tabel 21. Verspreidingsstrategie aanlegfase

Tabel 22. Totaal te verspreiden volumes zand en klei-keileem-veen

Sediment	Totaalvolume (x10 ⁶ m ³)	P0 (x10 ⁶ m ³)	P1 (x10 ⁶ m ³)	P3 (x10 ⁶ m ³)	P4 (x10 ⁶ m ³)
zand	5,276	2,053	1,704	1,273	0,246
klei-keileem-veen	1,260		1,260		

Het zand uit de vaarweg wordt geheel verspreid in het (invloeds)gebied van de Eems. Het zand uit de kustzone (i.e. de Westereems) kan het beste op P0, P3 of P4 verspreid worden, omdat de vaarafstand tot P1 veel groter is. De capaciteit van P0 en P3 is een orde groter dan die van P4. Verspreidingslocatie P0 ligt het dichtst bij de te baggeren trajecten in de kustzone. In principe veroorzaakt verspreiding op deze reeds lang in gebruik zijnde plek dus de minste milieueffecten. Echter, omdat niet zeker is, dat de totale hoeveelheid zand uit de kustzone ook echt op P0 verspreid kan worden, wordt voor de effectbepaling voorgesteld om het zand uit de kustzone te verdelen over P0, P3 en P4.

De eenmalige capaciteit van locaties P0, P3 en P4 ligt hoger dan de totaal te verspreiden volumes in tabel 22. Daardoor is er ruimte om op termijn een andere verdeling te maken.

Voor het zand uit het Waddenzee-gedeelte (Randzelgat) is P1 de beste optie. Het zand zal zich verspreiden in het systeem zonder merkbare gevolgen voor de troebelheid. Het zand zal dicht bij de bodem blijven en met name via het proces van bodemtransport verspreid worden.

Voor het onderbrengen van het mengsel van keileem, klei en veen uit de vaarweg is put P1 met een diepte van 30 m geselecteerd. De meest logische optie, gezien de capaciteit en de vaarafstand (met name ten opzichte van het Doekegat). P1 is voldoende diep en de opvulling van P1tot een niveau van NAP-16 m zal geen risico voor de vaarwegdiepte opleveren in het geval dat het mengsel als brokken wordt gebaggerd (met dieplepel) en achterblijft in P1. Voor opvulling tot een niveau van NAP-16 m zou circa 5x10⁶ m³ nodig zijn, maar zoveel wordt hier niet verspreid.

Uit het klei-keileem-veen mengsel kan fijn sediment vrijkomen dat extra vertroebeling veroorzaakt. In de beschikbare boringen en monster-analyses blijkt dat het aandeel aan slib in het keileem 30-37% bedraagt (De Vries, 2013). Voor klei gaan we uit van 100% fijn sediment. Wanneer dit materiaal met een hopper of cutter wordt gebaggerd zal de extra vertroebeling naar verwachting hoger zijn dan wanneer het met een dieplepel wordt gebaggerd.

Het veen dat vrijkomt zal gemakkelijk door de stromingen worden getransporteerd door het laag soortelijk gewicht. Tijdens het baggeren kunnen brokken die niet direct in de zuigmond terechtkomen of uit de dieplepel vallen, gaan opdrijven. Dit kan in vissersnetten terecht komen, de koelwateraanzuiging verstoppen of op de veekrand aanspoelen (pers. communicatie Cleveringa, 2013; Van Koningsveld, 2013). Wanneer het plantaardig materiaal in contact komt met zuurstof uit de lucht zal het oxideren en in volume afnemen.

Uitvoering

Voor het baggeren van zand ligt het gebruik van een sleephopperzuiger (hopper) voor de hand. Voor het baggeren van het mengsel keileem-klei-veen zijn er in principe 3 opties: hopperen, cutteren (snijkopzuiger) of dieplepelen (*backhoe dredger*). Het hopperen en cutteren leiden beide tot verlies aan compactie van het sediment (Grasmeijer et al., 2008).

Voor de baggercapaciteit wordt uitgegaan van schattingen op basis van de praktijk. In het onderzoek van Grasmeijer et al. (2008) naar de effecten van opvulling van verspreidingslocatie P1 is op basis van gesprekken met aannemers een hoppercapaciteit van 160.000 m³ per week als realistisch vermeld, ook voor de keileem. Hierover is echter discussie mogelijk vanwege het feit dat de productie zal volgen uit een beoordeling van de aannemer over de eigenschappen van de keileem in relatie tot zijn beschikbare en in te zetten baggermaterieel. Daarom moet rekening worden gehouden met een ondergrens van 80.000 m³ per week voor de keileem. Hier wordt als middenweg een capaciteit van 120.000 m³ per week gekozen.

De capaciteit van een dieplepel is sterker afhankelijk van de omstandigheden dan die van een hopper of cutter. Een dieplepel met een bak van 7-8 m³ kan onder rustige omstandigheden ongeveer 400 m³/uur verwerken, waarmee de maximale capaciteit per week op ongeveer 70.000 m³/week zou komen. Bij harde wind en hoge golven kan een dieplepel echter niet werken. Voor de omstandigheden langs de vaargeul naar de Eemshaven wordt daarom gemiddeld door aannemers een capaciteit van 20.000-40.000 m³/week ingeschat. We gaan uit van een conservatieve inschatting van 20.000 m³/week.

We hanteren daarom de volgende uitgangspunten voor de baggercapaciteit:

- Baggeren zand: 160.000 m³/week (hopper/cutter).
- Baggeren keileem-klei-veen: 120.000 m³/week in geval van een hopper of cutter en 20.000 m³/week in geval van een dieplepel.

We onderscheiden de volgende twee uitvoeringsscenario's:

- 1. Alles hopperen (eventueel cutteren) met één hopper.
- 2. Het zand hopperen en het mengsel keileem-klei-veen dieplepelen.

Uitvoeringsscenario hopperen/cutteren, onderdeel van VKA 2013

Tabel 23 toont de resulterende duur en periode van de uitvoering voor het VKA 2013. Alles wordt in het voorkeursalternatief met een hopper of cutter gebaggerd. Iets meer dan de helft van het totale baggerwerk vind plaats in de kustzone. Uitgaande van één hopper bedraagt de totale duur voor het baggerwerk in de vaargeul in de kustzone 22,6 weken. De duur van het baggerwerk in de vaargeul in de Waddenzee bedraagt 20,9 weken. De totale duur is dan 43,5 weken.

Uitvoeringsscenario: keileem dieplepelen

Tabel 24 toont de duur van de uitvoering voor uitvoeringsscenario keileem dieplepelen. Het zand wordt in dit scenario gebaggerd met een hopper en het keileem, klei en veen met een dieplepel. Uitgaande van één hopper en één dieplepel bedraagt de totale duur voor het baggerwerk in de kustzone 30,9 weken. De duur voor het baggerwerk in de vaargeul in de Waddenzee bedraagt 63,5 weken en die voor de ligplaats 21,7 weken. De totale duur voor het hopperen bedraagt 35,1 weken en voor het dieplepelen 81,0 weken. De werkelijke uiteindelijke uitvoeringsduur is uiteraard afhankelijk van het aantal schepen dat wordt ingezet.

Zone	Sediment	Totaalvolume (x10 ⁶ m ³)	Baggermethode	Capaciteit (m³/week)	Duur (weken)
Kustzone	zand	3,572	Hopper/cutter	160.000	22,3
	keileem	0,041	Hopper/cutter	120.000	0,3
Waddenzee	zand	1,704	Hopper/cutter	160.000	10,7
	keileem	0,814	Hopper/cutter	120.000	6,8
	klei	0,262	Hopper/cutter	120.000	2,2
	veen	0,143	Hopper/cutter	120.000	1,2
Totaal		6,536			43,5

Tabel 23: Uitvoeringsscenario hopperen/cutteren, onderdeel VKA 2013

Tabel 24: Uitvoeringsscenario 2: keileem dieplepelen

Zone	Sediment	Totaalvolume (x10 ⁶ m ³)	Baggermethode	Capaciteit (m³/week)	Duur (weken)
Kustzone	zand	3,572	Hopper/cutter	160.000	22,3
	keileem	0,041	Dieplepel	20.000	2,1
Waddenzee	zand	1,704	Hopper/cutter	160.000	10,7
	keileem	0,814	Dieplepel	20.000	40,7
	klei	0,262	Dieplepel	20.000	13,1
	veen	0,143	Dieplepel	20.000	7,2
Totaal hopper/cutter		5,276			33,0
Totaal dieplepel		1,260			63,0
Totaal		6,536			

Scheepsbewegingen voor uitvoeringsscenario hopperen/cutteren, onderdeel van VKA 2013

Uitgaande van een hopper/cutter met een beunvolume van 7500 m³ kan het aantal scheepsbewegingen worden uitgerekend. De volumes zoals hier gepresenteerd zijn in-situ volumes. Voor de omrekening naar beunvolumes wordt een factor 1,2 tot 1,5 gehanteerd (beun = factor x in-situ), afhankelijk van het soort materiaal en de wijze van baggeren. Hier gaan we uit van een omrekenfactor van 1,5 waarmee het in-situ volume per cyclus 5000 m³ zal bedragen. Tabel 25 toont de resulterende scheepsbewegingen.

Zone	Sediment	P0	P1	P3	P4
Kustzone	zand	411		255	49
	keileem		8		
Waddenzee	zand		341		
	keileem		163		
	klei		52		
	veen		29		
Totaal		411	593	255	49

Tabel 25. Scheepsbewegingen baggerschepen voor uitvoeringsscenario hopperen/cutteren, onderdeel van VKA 2013

Onderhoud

Het onderhoud bedroeg gemiddeld tussen 2007 en 2011 ongeveer $660 \times 10^3 \text{ m}^3$ /jaar beunkuubs voor het gehele vaargeultraject tussen 70 km en 105 km (Mulder, 2013). Dat is ongeveer 550.000 m³/jaar in situ. Op basis van een eenvoudige *engineering* benadering is in eerdere studies berekend dat het onderhoud als gevolg van verruiming en verdieping van de vaargeul ongeveer twee keer zo groot wordt, namelijk $1,1\times10^6 \text{ m}^3$ /jaar (Hartsuiker et al, 2007). Hierbij werd een onzekerheidsmarge van 50% gehanteerd.

In voorliggende studie zijn numerieke modelberekeningen uitgevoerd waarbij een vergelijking is gemaakt tussen de sedimentatie van zand in de vaargeul zonder en met verruiming. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een volledige springtij-doodtij cyclus van 14 dagen en een morfologische versnellingsfactor van 26,1 zodat de simulatieperiode representatief is voor de bodemverandering na 1 jaar. Figuur 128 toont het op deze manier berekende jaarlijks onderhoudsvolume per km-traject langs de vaargeul. Het totaal berekende jaarlijks onderhoudsvolume dat op deze wijze is berekend bedraagt ongeveer 1,50x10⁶ m³/jaar. Het benodigde onderhoud is in drie trajecten te verdelen. In het traject ter hoogte van het Doekegat (km 70 tot 79) bedraagt het berekende onderhoud ongeveer 0,03x10⁶ m³/jaar. Aan de zeezijde ter hoogte van de Westereems (km 94-112) bedraagt het berekende onderhoud ongeveer 1,11x10⁶/jaar.





Figuur 128 toont eveneens een inschatting van de bandbreedte rondom de voorspelling van het jaarlijks onderhoudsbaggervolume.

4.8 EFFECT VAN BAGGERSPECIEVERSPREIDING OP TROEBELHEID

4.8.1 BASIS-SIMULATIES

Algemeen

De mate van vertroebeling is afhankelijk van de hoeveelheid slib die wordt verspreid, het opwervelend vermogen van de stroming, de frequentie waarmee wordt verspreid en de verspreidingsduur. Deze laatsten kunnen variëren. In deze paragraaf gaan we uit van een realistische *worst case* waarin we aannemen dat er met meerdere schepen tegelijk wordt gebaggerd en dat de cyclusduur van deze schepen samen 2 uur bedraagt. Dit wil zeggen dat er elke 2 uur baggerspecie wordt verspreid op de betreffende locatie. Omwille van de rekentijd is deze simulatie uitgevoerd voor een periode van één week.

Op locaties P0, P3 en P4 wordt op deze manier slib-arme (zand) specie verspreid en op locatie P1 wordt slibrijke (klei en keileem) verspreid. Voor klei is uitgegaan van 100% slibgehalte en voor keileem van 37% slibgehalte. De bodemsamenstelling varieert door erosie en depositie van zand en slib aan het bodemoppervlak en menging van sediment in de bodem (Van Ledden, 2003). Tijdens rustige periodes kan er op een zandige bodem slib sedimenteren die door menging in het zand gevangen wordt. Voor de kustzone zijn we uitgegaan van 2% slib in het zand. Er is een droge dichtheid van 1600 kg/m³ gehanteerd.

In een lading van 5000 m³ zand (in situ) zit dan $0.02 \times 1600 \times 5000 = 160$ ton slib. In een lading keileem zit dan $0.37 \times 1600 \times 5000 = 2960$ ton slib en in een lading klei zit dan $1.0 \times 1600 \times 5000 = 8000$ ton slib. In totaal wordt er ten behoeve van de verruiming van de vaarweg naar Eemshaven 1.163.000 ton slib verspreid (zie tabel 26).

Zone	Sediment	Totaalvolume (x10 ⁶ m ³)	Totaalmassa (x10 ⁶ kg)	% slib	Slibmassa (x10 ⁶ kg)
Kust	zand	3,572	5.715	2	114
	keileem	0,041	66	37	24
Waddenzee	zand	1,704	2.726	2	55
	keileem	0,814	1.302	37	482
	klei	0,262	419	100	419
	veen	0,143	229	30	69
Totaal		6,536	10.458		1.163

Tabel 26. Omrekening van baggervolumes naar massa sediment en massa slib onder de aanname dat het te baggeren sediment een droge dichtheid heeft van 1600 kg/m³

In de simulaties is voor een representatieve slibarme specie uitgegaan van sediment met 2% slib en voor een representatieve slib-rijke specie van sediment met 37% slib. In de simulaties wordt het slib elke baggercyclus gedurende 10 minuten op de betreffende verspreidingslocatie in suspensie aan de onderste rekenlaag toegevoegd. Om het effect van de verspreidingsfrequentie en de verspreidingsduur te kwantificeren zijn ook simulaties gemaakt waarin de frequentie is verdubbeld en simulaties waarin zowel de frequentie als de duur is verdubbeld. De resultaten van deze simulaties worden gepresenteerd in respectievelijk paragraaf 4.8.2 en 4.8.3. Daarnaast zijn er voor de verspreiding op P1 aanvullende scenario's uitgevoerd met grotere hoeveelheden om de bandbreedte van de effecten te onderzoeken. Met de basis-simulatie en de andere scenario's kan een doorvertaling worden gemaakt naar verschillende baggerhoeveelheden en -frequenties. In deze paragraaf behandelen we eerst de resultaten van de basis-simulaties.

Het effect van baggerspecieverspreiding wordt in deze studie steeds getoond voor het bovenste deel van de waterkolom (bovenste 25% van de waterdiepte) omdat die van direct invloed is op de lichtdoordringing en daardoor op de primaire productie.

Slib-arme baggerspecieverspreiding op P0

Figuur 129 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom (dat is de bovenste 25% van de waterdiepte) onmiddellijk na het twee-uurlijks verspreiden van slib-arme baggerpecie op locatie P0 gedurende één week. Dit zijn 84 verspreidingen. De hoeveelheid slib per verspreiding bedraagt 160.000 kg (160 ton). Na 84 keer is er dus 13.440.000 kg (13.440 ton) verspreid. Dat is ongeveer 10% van de totale hoeveelheid die wordt verspreid op P0, P3 en P4.

Figuur 129 laat zien dat de verspreidingspluim zeer klein is en dat de maximale toename in slibconcentratie van 2-5 mg/l na deze verspreiding zeer beperkt is ten opzichte van de natuurlijke achtergrond. De kleine pluim (1 km) ligt iets zeewaarts van de verspreidingslocatie. Eén dag na de verspreiding zijn de extra concentraties in de pluim afgenomen tot waarden kleiner dan 2 mg/l (niet getoond).



Figuur 129. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom onmiddellijk na het twee-uurlijks verspreiden van slibarme baggerpecie op locatie P0 gedurende een hele week (84 verspreidingen).

Figuur 130 toont in het bovenste paneel de gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder baggerspecieverspreiding als functie van de afstand tot Papenburg en de achtergrond plus daggemiddelde slibconcentratie na het twee-uurlijks verspreiden van slib-arme (zand) specie op P0 gedurende een hele week. Het gaat dan in totaal om 84 verspreidingen. Het middelste paneel toont de absolute toename van de slibconcentratie na de verspreiding en het onderste paneel de procentuele toename ten opzichte van de natuurlijke achtergrond.

Het middelste paneel in figuur 130 laat zien dat het maximum van de verspreidingspluim in de tijd sterk afneemt van ongeveer 1 mg/l onmiddellijk na 84 verspreidingen tot minder dan 0,4 mg/l na 3 dagen.

Het onderste paneel toont de procentuele toename in concentratie ten opzicht van de natuurlijke achtergrond. Deze laat zien dat het maximum ten opzichte van de natuurlijke achtergrond ongeveer op zijn plaats blijft, namelijk ter hoogte van de verspreidingslocatie, en afneemt van ongeveer 7% onmiddellijk na de verspreiding tot 3% na 3 dagen, 2% na 6 dagen, 2% na 9 dagen, 1% na 12 dagen en 0,6% na 15 dagen. Bovenstrooms van Delfzijl neemt de slibconcentratie niet wezenlijk toe.





Slib-arme baggerspecieverspreiding op P3

Figuur 131 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom onmiddellijk na het twee-uurlijks verspreiden van slibarme baggerpecie op locatie P3 gedurende een hele week. Dit zijn 84 verspreidingen en de hoeveelheid slib per verspreiding is gelijk aan die bij P0.

Figuur 131 laat zien dat ook hier de verspreidingspluim klein is en dat de maximale toename in slibconcentratie van 2-5 mg/l na deze verspreiding zeer beperkt is ten opzichte van de natuurlijke achtergrond. De lengte van de pluim is ongeveer 10 km en de breedte ongeveer 2 km. Eén dag na de verspreiding is de toename in concentratie kleiner dan 2 mg/l (niet getoond). Het gedrag van de slibpluim in de tijd vertoont een zelfde beeld als bij P0 (zie figuur 130).



Toename slibconcentratie 0.0 dagen na 84 zandige specieverspreidingen op P3, elke 2 uur

Figuur 131. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het twee-uurlijks verspreiden van slibarm baggerpecie op locatie P3 gedurende een hele week (84 verspreidingen).

Slib-arme baggerspecieverspreiding op P4

Figuur 132 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom onmiddellijk na het twee-uurlijks verspreiden van slib-arme baggerspecie op locatie P4 gedurende een hele week. Dit zijn 84 verspreidingen en de hoeveelheid slib per verspreiding is gelijk aan die bij P0.

Figuur 132 laat zien dat ook hier de verspreidingspluim klein is en dat de maximale toename in slibconcentratie van 2-5 mg/l na deze verspreiding zeer beperkt is ten opzichte van de natuurlijke achtergrond. De lengte van de pluim is ongeveer 3 km en de breedte ongeveer 2 km. Eén dag na de verspreiding is de toename in concentratie kleiner dan 2 mg/l (niet getoond). Het gedrag van de slibpluim in de tijd vertoont een zelfde beeld als bij P0 (zie figuur 130).



Figuur 132. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het twee-uurlijks verspreiden van zandig baggerspecie op locatie P4 gedurende een hele week (84 verspreidingen).

Slib-rijke baggerspecieverspreiding op P1

Figuur 133 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom onmiddellijk na het twee-uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerpecie op locatie P1 gedurende een hele week. Dit zijn 84 verspreidingen. De hoeveelheid slib per verspreiding is hier met 2.960.000 kg (2.960 ton) veel groter, namelijk 18,5 keer groter, dan op P0, P3 en P4. Na 84 keer is er dan 248.640.000 kg (248.640 ton) verspreid. Dit is ongeveer 25% van de totale hoeveelheid die wordt verspreid op P1 en een *worst case* scenario waarbij er met meerdere schepen tegelijk wordt gebaggerd.

Figuur 133 laat zien dat de grotere hoeveelheid slib ook leidt tot een sterkere toename van de slibconcentratie. Onmiddellijk na 84 verspreidingen bedraagt de maximale toename 60-80 mg/l. De totale lengte van de pluim bedraagt op dat moment ongeveer 50 km en de breedte ongeveer 7 km.

Figuur 134 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie 15 dagen na het twee-uurlijks verspreiden van slibrijke baggerpecie op locatie P1 gedurende een week. De maximale toename is afgenomen tot 2-5 mg/l en de lengte van de pluim is gehalveerd tot ongeveer 25 km. De breedte rondom het zwaartepunt is ongeveer 5 km.



Figuur 133. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het twee-uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een hele week (84 verspreidingen).



Figuur 134. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) 15 dagen na het twee-uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een hele week (84 verspreidingen).

Figuur 135 toont in het bovenste paneel de gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder baggerspecieverspreiding als functie van de afstand tot Papenburg en de achtergrond plus daggemiddelde slibconcentratie na het twee-uurlijks verspreiden van slib-rijke specie op P1 gedurende een hele week. Het gaat dan in totaal om 84 verspreidingen.

Het middelste paneel toont de absolute toename van de slibconcentratie na de verspreiding en het onderste paneel de procentuele toename ten opzichte van de natuurlijke achtergrond.

Het middelste paneel in figuur 143 laat zien dat het maximum van de verspreidingspluim in de tijd sterk afneemt van ongeveer 29 mg/l onmiddellijk na 84 verspreidingen tot ongeveer 13 mg/l na 3 dagen, 9 mg/l na 6 dagen, 6 mg/l na 9 dagen, 3 mg/l na 12 dagen en 3 mg/l na 15 dagen. Het maximum verschuift in 15 dagen ongeveer 19 km landwaarts. De lengte van de pluim neemt af van ongeveer 50 km direct na de verspreidingen tot ongeveer 20 km na 15 dagen.

Het onderste paneel toont de procentuele toename in concentratie ten opzicht van de natuurlijke achtergrond. Deze laat zien dat het maximum ten opzichte van de natuurlijke achtergrond ongeveer op zijn plaats blijft, namelijk ter hoogte van de verspreidingslocatie, en afneemt van ongeveer 121% onmiddellijk na verspreiding tot 54% na 3 dagen, 32% na 6 dagen, 16% na 9 dagen, 7% na 12 dagen en 3% na 15 dagen. Bovenstrooms van Delfzijl neemt de slibconcentratie niet wezenlijk toe.



Figuur 135. Gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder verspreiding en verschillende dagen na 84 slib-rijke baggerspecieverspreidingen op P1 elke twee uur (boven), absolute toename slibconcentratie door baggerspecieverspreidingen op P1 (midden) en procentuele toename slibconcentratie door baggerspecieverspreiding op P1 (onder).

4.8.2 EFFECT HOGERE BAGGERFREQUENTIE

Slib-arme baggerspecieverspreiding op P0, elk uur gedurende halve week

Figuur 136 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van zandige baggerspecie op locatie P0 gedurende een halve week. Dit zijn 84 verspreidingen. De hoeveelheid slib per verspreiding bedraagt 160.000 kg (160 ton). Na 84 keer is er dus 13.440.000 kg (13.440 ton) verspreid. Dat is ongeveer 10% van de totale hoeveelheid die wordt verspreid op P0, P3 en P4. Er wordt dezelfde hoeveelheid verspreid als in de vorige paragraaf maar met een 2x zo hoge frequentie.

Figuur 136 laat zien dat de toename in slibconcentratie van 2-5 mg/l na deze verspreiding zeer beperkt ten opzichte van de natuurlijke achtergrond. Het zwaartepunt van de verspreidingspluim blijft rond de verspreidingslocatie. De lengte van de pluim is ongeveer 20 km en de breedte ongeveer 5 km.

Het gedrag van de pluim in de tijd is te zien in figuur 137. Deze figuur toont in het bovenste paneel de gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder baggerspecieverspreiding als functie van de afstand tot Papenburg en de slibconcentratie na het uurlijks verspreiden van zandige specie op P0 gedurende een halve week (84x). Het middelste paneel toont de absolute toename van de slibconcentratie na de verspreiding en het onderste paneel de procentuele toename ten opzichte van de natuurlijke achtergrond.

Het middelste paneel in figuur 137 laat zien dat het maximum van de verspreidingspluim klein is en in de tijd sterk afneemt van ongeveer 3 mg/l onmiddellijk na 84 verspreidingen tot ongeveer 0,8 mg/l na 3 dagen en ongeveer 0,2 mg/l na 15 dagen. Het maximum verschuift nauwelijks.

Het onderste paneel toont de procentuele toename in concentratie ten opzicht van de natuurlijke achtergrond. Deze laat zien dat het maximum ten opzichte van de natuurlijke achtergrond ongeveer op zijn plaats blijft, namelijk ter hoogte van de verspreidingslocatie, en afneemt van 19% onmiddellijk na verspreiding tot ongeveer 6% na 3 dagen en ongeveer 1% na 15 dagen. Bovenstrooms van Delfzijl neemt de slibconcentratie niet wezenlijk toe.



Figuur 136. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van zandige baggerspecie op locatie P0 gedurende een halve week (84 verspreidingen).



Figuur 137. Gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder verspreiding en verschillende dagen na zandige baggerspecieverspreiding op P0 elk uur (boven), absolute toename slibconcentratie door baggerspecieverspreiding op P0 (midden) en procentuele toename slibconcentratie door baggerspecieverspreiding op P0 (onder).

077141772:D - Definitief

Slib-arme(zand) baggerspecieverspreiding op P3

Figuur 138 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van zandig baggerspecie op locatie P3 gedurende een halve week. Het gaat hier om dezelfde frequentie en hetzelfde aantal verspreidingen als op P0, dus 84 verspreidingen. Er wordt dezelfde hoeveelheid verspreid als in de vorige paragraaf maar met een 2x zo hoge frequentie.

Figuur 138 laat zien dat ook na de verspreiding op P3 de toename in slibconcentratie met 2-5 mg/l zeer beperkt blijft ten opzichte van de natuurlijke achtergrond. De lengte van de pluim is met 30 km iets groter dan die bij P0 en de breedte is met 3 km iets kleiner. Het zwaartepunt van de verspreidingspluim ligt iets meer landwaarts. Het temporele gedrag van de verspreidingspluim bij P3 lijkt erg op dat bij P0. Het maximum neemt sterk af van ongeveer 3 mg/l onmiddellijk na 84 verspreidingen tot ongeveer 0,8 mg/l na 3 dagen en ongeveer 0,2 mg/l na 15 dagen (niet getoond). Het gedrag van de slibpluim in de tijd vertoont een zelfde beeld als bij P0 (zie figuur 137).



Figuur 138. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van zandig baggerspecie op locatie P3 gedurende een halve week (84 verspreidingen).

Slib-arme baggerspecieverspreiding op P4

Figuur 139 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van zandige baggerspecie op locatie P4 gedurende een halve week. Het gaat hier om dezelfde frequentie en hetzelfde aantal verspreidingen als op P0 en P3, dus 84 verspreidingen. Er wordt dezelfde hoeveelheid verspreid als in de vorige paragraaf maar dan met een 2x zo hoge frequentie.

Figuur 139 laat zien dat ook na de verspreiding op P4 de toename in slibconcentratie met 2-5 mg/l zeer beperkt blijft ten opzichte van de natuurlijke achtergrond. De lengte van de pluim is met 10 km kleiner dan die bij P0 en P3 en de breedte is met 3 km ongeveer vergelijkbaar met P3 en kleiner dan die bij P0.

Het zwaartepunt van de verspreidingspluim ligt iets meer landwaarts dan de verspreidingslocatie. Het temporele gedrag van de verspreidingspluim bij P4 lijkt erg op dat bij P0 en P3. Het maximum neemt sterk af in de tijd. Eén dag na de 84 verspreidingen is de toename in slibconcentratie kleiner dan 2 mg/l (niet getoond). Het gedrag van de slibpluim in de tijd vertoont een zelfde beeld als bij P0 (zie figuur 137).



Figuur 139. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van zandig baggerspecie op locatie P4 gedurende een halve week (84 verspreidingen).

Slibrijke baggerspecieverspreiding op P1

Figuur 140 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van slibrijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een halve week. De hoeveelheid slib per verspreiding is hier met 2.960.000 kg (2.960 ton) veel groter, namelijk 18,5 keer groter, dan op P0, P3 en P4. Na 84 keer is er dan 248.640.000 kg (248.640 ton) verspreid. Dat is ongeveer 25% van de totale hoeveelheid die wordt verspreid op P1. Dit is dezelfde hoeveelheid als in de vorige paragraaf maar dan met frequentie die twee keer zo hoog ligt.

Figuur 141 laat zien dat de grotere hoeveelheid slib ook leidt tot een sterkere toename van de slibconcentratie. Onmiddellijk na 84 verspreidingen bedraagt de maximale toename 60-80 mg/l. De totale lengte van de pluim bedraagt op dat moment ongeveer 50 km en de breedte ongeveer 7 km.

Figuur 142 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie 15 dagen na het uurlijks verspreiden van slibrijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een halve week. De maximale toename is afgenomen tot 2-5 mg/l en de lengte van de pluim is gehalveerd tot ongeveer 25 km. De breedte rondom het zwaartepunt is ongeveer 5 km.



Figuur 140. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een halve week (84 verspreidingen).



Figuur 141. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) 5 dagen na het uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een halve week (84 verspreidingen).



Figuur 142. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) 15 dagen na het uurlijks verspreiden van slibbig baggerspecie op locatie P1 gedurende een halve week (84 verspreidingen).

Figuur 143 toont in het bovenste paneel de gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder baggerspecieverspreiding als functie van de afstand tot Papenburg en de achtergrond plus daggemiddelde slibconcentratie na het uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op P1 gedurende een halve week. Het gaat dan in totaal om 84 verspreidingen. Het middelste paneel toont de absolute toename van de slibconcentratie na de verspreiding en het

onderste paneel de procentuele toename ten opzichte van de natuurlijke achtergrond.

De maximale absolute toename na de uurlijkse baggerspecieverspreiding op P1 gedurende een halve week (84x) bedraagt onmiddellijk na het verspreiden bijna 50 mg/l (ongeveer 140% van de achtergrond). Na 3 dagen bedraagt het maximum van de pluim bijna 15 mg/l (ongeveer 60% van de achtergrond) en na 15 dagen is dit ongeveer 2 mg/l (ongeveer 5% van de achtergrond).

Het middelste paneel in figuur 143 laat zien dat het maximum van de verspreidingspluim in de tijd sterk afneemt van ongeveer 49 mg/l onmiddellijk na 84 verspreidingen tot ongeveer 15 mg/l na 3 dagen, 9 mg/l na 6 dagen, 7 mg/l na 9 dagen, 5 mg/l na 12 dagen en 3 mg/l na 15 dagen. Het maximum verschuift in 15 dagen ongeveer 19 km landwaarts. De lengte van de pluim neemt af van ongeveer 50 km direct na de verspreidingen tot ongeveer 25 km na 15 dagen.

Het onderste paneel toont de procentuele toename in concentratie ten opzicht van de natuurlijke achtergrond. Deze laat zien dat het maximum ten opzichte van de natuurlijke achtergrond ongeveer op zijn plaats blijft, namelijk ter hoogte van de verspreidingslocatie, en afneemt van 140% onmiddellijk na verspreiding tot ongeveer 60% na 3 dagen en ongeveer 6% na 15 dagen. Bovenstrooms van Delfzijl neemt de slibconcentratie niet wezenlijk toe.



Figuur 143. Gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder verspreiding en verschillende dagen na 84 slib-rijke baggerspecieverspreidingen op P1 elk uur (boven), absolute toename slibconcentratie door baggerspecieverspreidingen op P1 (midden) en procentuele toename slibconcentratie door baggerspecieverspreiding op P1 (onder).

4.8.3 EFFECT HOGERE BAGGERFREQUENTIE EN LANGERE DUUR

Slib-arme baggerspecieverspreiding op P0, elk uur gedurende 1 week

Figuur 144 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van slib-arme baggerspecie op locatie P0 gedurende een hele week. Dit zijn 168 verspreidingen. De hoeveelheid slib per verspreiding bedraagt 160.000 kg (160 ton). Na 168 keer is er dus 26.880.000 kg (26.880 ton) verspreid. Dat is ongeveer 20% van de totale hoeveelheid die wordt verspreid op P0, P3 en P4.

Figuur 144 laat zien dat de toename in slibconcentratie van 2-5 mg/l na deze verspreiding, ondanks dat er 2x zoveel verspreid is dan in het vorige scenario, ook in dit geval zeer beperkt ten opzichte van de natuurlijke achtergrondconcentratie. Het zwaartepunt van de verspreidingspluim ligt iets zeewaarts van de verspreidingslocatie. De lengte van de pluim is ongeveer 10 km en de breedte ongeveer 7 km.

De toename in concentratie na 168 slib-arme verspreidingen is vergelijkbaar met die na 84 verspreidingen. Reden hiervoor is dat de concentratietoename bij slib-arme verspreiding niet zozeer afhankelijk is van het aanbod aan slib (dat blijft nog steeds beperkt omdat de verspreidde specie slib-arm is) maar meer afhankelijk is van het opwervelend vermogen van de stroming, en dat is in beide gevallen ongeveer gelijk.

Het gedrag van de pluim na 168 slib-arme verspreidingen in de tijd lijkt daarom erg op dat na 84 verspreidingen (zie figuur 137). Eén dag na de verspreidingen is de toename in concentratie afgenomen tot waarden kleiner dan 2 mg/l (niet getoond).



Figuur 144. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van zandige baggerspecie op locatie P0 gedurende een hele week (168 verspreidingen).

Slib-arme baggerspecieverspreiding op P3

Figuur 145 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van slib-arme baggerspecie op locatie P3 gedurende een hele week. Dit zijn 168 verspreidingen en de hoeveelheid slib per verspreiding is gelijk aan die op P0.

Figuur 145 laat zien dat de toename in slibconcentratie 2-5 mg/l ook na verspreiding op P3 zeer beperkt blijft ten opzichte van de natuurlijke achtergrond, ondanks dat er 2x zoveel verspreid is dan in het vorige scenario. De lengte van de pluim is met 30 km iets groter dan bij P0 en de breedte is met 3 km iets kleiner.

Het gedrag van de pluim in de tijd lijkt erg op dat na 84 verspreidingen op P0 (zie figuur 137). Eén dag na de verspreidingen is de toename in concentratie afgenomen tot waarden kleiner dan 2 mg/l (niet getoond).



Figuur 145. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van zandige baggerspecie op locatie P3 gedurende een hele week (168 verspreidingen).

Slib-arme baggerspecieverspreiding op P4

Figuur 146 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van slib-arme baggerspecie op locatie P4 gedurende een hele week. Dit zijn 168 verspreidingen en de hoeveelheid slib per verspreiding is gelijk aan die op P0.

Figuur 146 laat zien dat de toename in slibconcentratie 2-5 mg/l ook na verspreiding op P4 zeer beperkt blijft ten opzichte van de natuurlijke achtergrond, ondanks dat er 2x zoveel verspreid is dan in het vorige scenario. De dimensies van de pluim zijn met 10 km x 3 km kleiner dan die bij P0 en P3. Het gedrag van de pluim in de tijd lijkt ook hier weer erg op dat na 84 verspreidingen op P0 (zie figuur 137). Eén dag na de verspreidingen is de toename in concentratie afgenomen tot waarden kleiner dan 2 mg/l (niet getoond).



Figuur 146. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van zandige baggerspecie op locatie P4 gedurende een hele week (168 verspreidingen).

Slibrijke baggerspecieverspreiding op P1

Figuur 147 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van de waterkolom onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een hele week. De hoeveelheid slib per verspreiding is hier met 2.960.000 kg (2.960 ton) veel groter, namelijk 18,5 keer groter, dan op P0, P3 en P4. Na 168 keer is er dan 497.280.000 kg (497.280 ton) verspreid. Dat is ongeveer 50% van de totale hoeveelheid die wordt verspreid op P1.

Figuur 147 laat zien dat de grotere hoeveelheid slib ook leidt tot een sterkere toename van de slibconcentratie. Onmiddellijk na 168 verspreidingen bedraagt de maximale toename 40-60 mg/l. De totale lengte van de pluim bedraagt op dat moment ongeveer 60 km en de breedte ongeveer 7 km. Het zwaartepunt van de pluim heeft zich iets landwaarts verplaatst ten opzichte van de verspreidingslocatie.

Figuur 148 toont de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie 15 dagen na het uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een hele week. De maximale toename is afgenomen tot 2-5 mg/l en de lengte van de pluim is gehalveerd tot ongeveer 25 km. De breedte rondom het zwaartepunt is ongeveer 5 km.



Figuur 147. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een hele week (168 verspreidingen).



Figuur 148. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) 15 dagen na het uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een hele week (168 verspreidingen).

Figuur 149 geeft een indruk van het gedrag van de slibpluim in de tijd. Deze figuur toont in het bovenste paneel de gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder baggerspecieverspreiding als functie van de afstand tot Papenburg en de achtergrond plus daggemiddelde slibconcentratie na het uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op P1 gedurende een hele week. Het gaat dan in totaal om 168 verspreidingen.
Het middelste paneel toont de absolute toename van de slibconcentratie na de verspreiding en het onderste paneel de procentuele toename ten opzichte van de natuurlijke achtergrond.

Het middelste paneel in figuur 149 laat zien dat het maximum van de verspreidingspluim in de tijd sterk afneemt van ongeveer 55 mg/l onmiddellijk na 168 verspreidingen tot ongeveer 25 mg/l na 3 dagen, 17 mg/l na 6 dagen, 11 mg/l na 9 dagen, 6 mg/l na 12 dagen en 3 mg/l na 15 dagen. Het maximum verschuift in 15 dagen ongeveer 25 km landwaarts. De lengte van de pluim neemt af van ongeveer 60 km direct na de verspreidingen tot ongeveer 40 km na 15 dagen.

Het onderste paneel toont de procentuele toename in concentratie ten opzicht van de natuurlijke achtergrond. Deze laat zien dat het maximum ten opzichte van de natuurlijke achtergrond ongeveer op zijn plaats blijft, namelijk ter hoogte van de verspreidingslocatie, en afneemt van 225% onmiddellijk na verspreiding, tot 103% na 3 dagen, 62% na 6 dagen, 33% na 9 dagen, 14% na 12 dagen en 3% na 15 dagen. Bovenstrooms van Delfzijl neemt de slibconcentratie niet wezenlijk toe.

De maximale concentratietoename berekend met 168 uurlijkse verspreidingen is vlak na de verspreidingen tot ongeveer 2x zo groot als die met uurlijkse 84 verspreidingen. Na ongeveer 15 dagen is de maximale concentratieverhoging van dezelfde grootte maar is de lengte van de pluim ongeveer 2x zo groot. Reden hiervoor is dat met name in het begin de concentratietoename afhankelijk zal zijn van het aanbod aan slib (na 168 verspreidingen is het aanbod groter) terwijl na een paar dagen het slib meer gelijkmatig verdeeld zal zijn en de concentratie meer afhankelijk zal zijn van het opwervelend vermogen van de stroming.



file:B02047_000031_conc_alongchannel_effect_v06

Figuur 149. Gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder verspreiding en verschillende dagen na 168 slib-rijke baggerspecieverspreidingen op P1 elk uur (boven), absolute toename slibconcentratie door baggerspecieverspreidingen op P1 (midden) en procentuele toename slibconcentratie door baggerspecieverspreiding op P1 (onder).

077141772:D - Definitief

Naast de uurlijkse verspreidingen gedurende één week op P1 zijn er eveneens berekeningen gedaan met twee-uurlijkse verspreidingen gedurende twee weken (168x dus 50% van de totale hoeveelheid), tweeuurlijkse verspreidingen gedurende vier weken (336x dus 100% van de totale hoeveelheid) en uurlijkse verspreidingen gedurende twee weken (336x). Deze aanvullende scenario's zijn niet realistisch maar uitgevoerd om de bandbreedte van de effecten te onderzoeken.

Ter illustratie van het effect van de verspreiding van meer baggerspecie toont figuur 150 de berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie 15 dagen na het twee-uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op P1 gedurende vier weken (336 verspreidingen). Dit wil zeggen dat 100% van de totaal te verspreiden hoeveelheid op P1 wordt verspreid in vier weken. De maximale concentratietoename is na 15 dagen afgenomen tot 2-10 mg/l. De totale lengte van de pluim bedraagt op dat moment ongeveer 60 km en de breedte ongeveer 7 km. Het zwaartepunt van de pluim heeft zich iets landwaarts verplaatst ten opzichte van de verspreidingslocatie. Drie weken na het einde van de verspreidingsperiode zijn de concentraties in de pluim in het algemeen afgenomen tot 2-5 mg/l. In werkelijkheid zal dit scenario nooit optreden omdat de werkelijke baggerfrequentie veel lager zal liggen en de verspreiding in werkelijkheid met tussenpozen zal plaatsvinden.



Figuur 150. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) 15 dagen na het twee-uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende vier weken (336 verspreidingen).

Figuur 151 toont de invloed van de frequentie en duur van baggerspecieverspreiding op de extra slibconcentraties bij P1. Hierin is te zien dat een verdubbeling van de frequentie bij gelijkblijvende hoeveelheid leidt tot extra slibconcentraties in de pluim (ten opzichte van de natuurlijke achtergrond) die direct na verspreiding ongeveer 60% hoger zijn. Ook de periode waarin de pluim zichtbaar is, is langer. Wanneer zowel verspreidingsfrequentie als verspreidingsduur worden verdubbeld dan zijn de extra concentraties in de pluim direct na verspreiding ongeveer 90% hoger. De periode waarin de pluim zichtbaar is, is langer dan die met een lagere frequentie maar vergelijkbaar met die met een hogere frequentie maar kortere duur. Voor alle scenario's geldt dat 3 weken na verspreiding de concentraties in de pluim zijn afgenomen tot waarden kleiner dan 5 mg/l.



Figuur 151. Invloed van frequentie en duur van baggerspecieverspreiding op de extra slibconcentratie bij P1

4.8.4 EFFECT VAN ONDERHOUDSBAGGERWERK OP VERTROEBELING

In de onderhoudsfase is er alleen sprake van zandige onderhoudsspecie. Deze heeft een zeer laag slibgehalte. De modelberekeningen voor het baggeren en verspreiden van zand bij de realisatie van de vaarwegverruiming tonen aan dat de effecten op vertroebeling van dergelijke hoeveelheden gering zijn. Ook bij het baggeren ten behoeve van onderhoud kan dus gesteld worden dat de effecten op vertroebeling zowel in concentratie, ruimte als tijd vrijwel nihil zullen zijn.

4.9 CUMULATIE MET ANDERE GEPLANDE INGREPEN

In het voorgaande is getoond hoe de hydrodynamiek en sedimentconcentraties in het estuarium veranderen ten opzichte van de huidige situatie. Naast de verruiming van de vaarweg naar de Eemshaven zijn nog een aantal andere ingrepen in het Eems-Dollard estuarium gepland, met name aan de Duitse zijde, die van belang zijn voor de bepaling van het cumulatieve effect met de verruiming van de vaargeul naar Eemshaven. Dit zijn de volgende (Jürges et al., 2012):

- Verdieping van de vaarweg tussen km-40,7 tot km-74,6 met een meter. Waar nodig ook om een verbreding van de vaarweg om te voorkomen dat de maximale hellingshoek van de bodem na verdieping overschreden wordt. De gebruikte maximale hellingshoek is 1:8,8 voor het traject km-40,7 tot km-51,5 en 1:13 vanaf km-51,5.
- Verbreding vaargeul ten behoeve van aanleg van een keervoorziening bij Emden.
- Verlenging kribben bij km-47 om de effecten van de verdieping van de vaarweg tussen km-40,7 en km-74,6 zoveel mogelijk te mitigeren.

Naast bovengenoemde ingrepen is Typhoon Capital van plan ten noordnoordwesten van Rottumeroog twee windmolenparken, samen Gemini genaamd, te bouwen. De hier opgewekte elektriciteit zal aan het Nederlandse elektriciteitsnet worden geleverd via twee elektriciteitskabels die in de zeebodem worden ingegraven. Het ingraven wordt met verschillende technieken uitgevoerd. Dit afhankelijk van de locatie. In totaal zal binnen maximaal 23 weken 9,8x10⁶ m³ sediment worden weggebaggerd. Ter vergelijking: voor de verruiming van de vaargeul zal 7,24x10⁶ m³ worden weggebaggerd. Langs het tracé waar dit gebeurt zal door opwerveling van sediment door scheepsschroeven, door overstort vanuit de beun en door de verspreiding van sediment een toename van gesuspendeerde slibconcentratie plaatsvinden.

Ingrepen Emder Vaarwater

Door de combinatie van ingrepen in het Emder Vaarwater met de geplande verruiming van de vaarweg naar de Eemshaven zouden de in het voorgaande gevonden veranderingen in de hydrodynamica en sedimentconcentraties ten opzichte van de huidige situatie groter uit kunnen vallen: het zogenaamde cumulatie effect. In Jürges et al. (2012) is dit cumulatie effect in een numerieke modelstudie onderzocht. Daarbij is gekeken wat de verandering van hydrodynamica en sedimentconcentraties is in de situatie met alle bovenstaande maatregelen plus verruiming vaarweg naar de Eemshaven ten opzichte van een situatie waarin de verdieping van de vaarweg tussen km-40,7 en km-74,6, de verbreding ten behoeve van een keervoorziening bij Emden en de verlenging van de kribben niet wordt uitgevoerd. In het vervolg zal naar deze drie ingrepen worden gerefereerd als verdieping Emder Fahrwasser. Hier zullen de resultaten van de studie naar de gevolgen van de verdieping van het Emder Fahrwasser kort worden samengevat en bekeken worden of een combinatie van vaarwegverruiming naar de Eemshaven en verdieping van Emder Fahrwasser leidt tot veranderingen ten opzichte van de huidige situatie die groter zijn dan de veranderingen door verruiming van de vaarweg naar de Eemshaven alleen.

In Jürges et al. (2012) wordt gevonden dat het laagwater met 1 cm toeneemt, net zeewaarts van de verlengde strekdammen met 2 cm. Het hoogwater neemt met maximaal 0,5 cm toe. In beide gevallen is de toename beperkt tot het Duitse deel: ten noorden van Knock zorgt de verdieping van het Emder Fahrwasser niet voor verandering in hoog- en laagwaterstand. Gevonden was dat de verandering in laagwater en hoogwater door verruiming vaarweg Eemshaven minder dan 0,5 cm was. Combinatie van de verruiming van de Vaarweg Eemshaven en verdieping Emder Fahrwasser leidt dus niet tot grote veranderingen in de waterstand.

De maximale stroomsnelheden variëren vanaf km-95 stroomopwaarts tussen de 1,2 en 1,6 m/s. Uit Jürges et al. (2012) blijkt dat de maximale stroomsnelheden als gevolg van de verdieping van het Emder Vaarwater met maximaal 0,35 m/s toenemen. Het gebied waar de toename plaatsvindt is beperkt tot het traject Knock-Emden. Alleen ter plekke van de draaivoorziening vindt een afname van maximaal 0,15 m/s plaats. Elders is er geen noemenswaardige verandering in de stroomsnelheden. De verandering in de maximale stroomsnelheid door verruiming van de vaarweg naar de Eemshaven is veel kleiner: maximaal 0,02 m/s bij de Eemshaven, elders <0,005 m/s. De gecumuleerde verandering in stroomsnelheid valt in het Duitse deel dus aanzienlijk groter uit dan de verandering door verruiming van de vaarweg naar de Eemshaven alleen.

In het voorgaande is gevonden dat de veranderingen in gemiddelde, minimale en maximale dieptegemiddelde saliniteit als gevolg van de verruiming van de vaarweg naar de Eemshaven ten opzichte van de huidige situatie kleiner zijn dan 0,05 psu. Verdieping van het Emder Fahrwasser leidt ten noorden van km-60 niet tot extra veranderingen in de minimale saliniteit. Ten zuiden liggen de veranderingen in de orde van tienden psu: in Emder Fahrwasser is er een toename van maximaal 0,8 psu, in de Dollard is er een toename van 0,1-0,2 psu en ter hoogte van Knock is er sprake van een afname van 0,3 psu. De maximale saliniteit neemt tussen het Emssperwerk en Leerort met maximaal 0,4 psu, tussen Knock en het Emssperwerk vindt er een afname van maximaal 0,2 psu plaats. Ten noorden van Knock zijn er geen veranderingen in maximale saliniteit en in de Dollard is de toename van dezelfde ordegrootte als de toename van de minimale saliniteit. De gemiddelde saliniteit ten noorden van km-60 verandert niet. Bij Knock vindt er een kleine afname van gemiddelde saliniteit van maximaal 0,1 psu plaats, terwijl verder stroomopwaarts de gemiddelde saliniteit toeneemt met maximaal 0,3 psu. In de Dollard is er weer sprake van een toename met 0,1-0,2 psu. Dus gecumuleerde effecten op de saliniteit zijn in het Duitse deel van de Eems aanzienlijk (bijna factor 10) groter dan de effecten van de verruiming van de vaarweg naar de Eemshaven op de saliniteit. Echter, in het gebied waar deze verschillen optreden is het natuurlijke verschil tussen minimale en maximale saliniteit 5-10 psu. In vergelijking hiermee zijn de gecumuleerde veranderingen verwaarloosbaar klein.

In deze studie is gekeken naar hoeveel de gesuspendeerde sedimentconcentratie toeneemt door verspreiding van het, in de vaargeul naar de Eemshaven gebaggerde sediment, ten opzichte van een situatie waarin geen verspreidingen plaatsvinden. In Jürges et al. (2012) is dezelfde vergelijking gemaakt, maar nu is alleen gekeken naar de toename door verspreiding van sediment dat weggebaggerd is uit het Emder Fahrwasser en het Gatjebogen. Wanneer er voor de verspreidingsstrategie wordt gekozen waarbij het retourtransport naar het Emder Fahrwasser minimaal is (Variant 0II en CII) blijkt de hoeveelheid gesuspendeerd sediment in de geul tussen km-60 en Emden met 20 mg/l toe te nemen, terwijl op het platen gebied aan de Duitse zijde zeer lokaal verhogingen met 100 mg/l plaatvinden. Ten noorden van km-60 vindt door de Duitse verspreiding geen verhoging van sedimentconcentraties in de geul plaats. De extra gesuspendeerde sedimentconcentratie door de Nederlandse verspreidingen varieert van maximaal 70 mg/l direct na de verspreidingen in het Randzelgat tot maximaal 5 mg/l drie weken na het stoppen van de verspreidingen en komen voor in het gebied stroomafwaarts van Delfzijl. De toename is dus van vergelijkbare orde als de Nederlandse verspreidingen. Wanneer de verspreidingen gelijktijdig plaatsvinden dan moet er als gevolg van de cumulatie rekening gehouden worden met een extra toename van gesuspendeerde sedimentconcentratie tussen km-60 en Delfzijl.

Als conclusie kan gezegd worden dat de veranderingen in de hydrodynamica en sedimentconcentraties door verruiming van het Emder Fahrwasser groter zijn dan die door de verruiming van de vaargeul naar de Eemshaven. Dit is in overeenstemming met de bevindingen door Hartsuiker et al. (2007). De gebieden waar veranderingen optreden zijn voor de verruiming van de vaarweg naar de Eemshaven (ruwweg gebied 1 en 2 in figuur 30) en de verdieping Emder Fahrwasser (ruwweg gebied 3 en 4 in figuur 30) wel heel verschillend. Het watervolume in gebieden 1 en 2 is bijvoorbeeld 40% groter, en daardoor de relatieve effecten kleiner, dan in gebieden 3 en 4. Voor de effecten van baggerspecieverspreiding is er enige overlap in het gedeelte km-60 tot Knock/Delfzijl.

Bouw Gemini windparken

Perk (2012) heeft net als in voorliggende studie, de toename van de gesuspendeerde slibconcentratie in de bovenste 25% van de waterkolom tijdens de baggerwerkzaamheden berekend met een model dat vergelijkbaar is met het model dat in voorliggende studie is gebruikt.

In vergelijking met de slibconcentratietoename door de verruiming van de vaarweg naar Eemshaven ligt het gebied waar toename in slibconcentratie door kabel-ingraving plaatsvindt net ten noorden van de Waddeneilanden. Waar bij verruiming van de vaarweg de toename van slibconcentratie direct na het verspreiden tot Delfzijl merkbaar is, reikt het gebied waar door aanleg van het kabeltracé toename optreedt niet verder dan de Eemshaven. Aan de andere kant reikt het gebied waar bij het kabeltracé verhoging van de concentratie optreedt wel verder westwaarts (tot x=212 km ten opzichte van x=218 km voor de verruiming van de vaarweg).

Gemiddeld over een springtij-doodtij cyclus is de maximale toename van de slibconcentratie 15 mg/l, maar dit maximum is aan het eind van de baggerwerkzaamheden gedaald tot maximaal 7-8 mg/l. Dit is aanmerkelijk lager dan de maxima in deze studie die op 70 mg/l liggen. De locatie van dit maximum is echter wel verschillend: in de vertroebelingsstudie voor Gemini ligt het ten noorden van de Waddeneilanden, in de huidige studie nabij de Eemshaven. Ten noorden van de eilanden is de maximale toename in de huidige studie 5 mg/l.

Omdat de overlap tussen het gebied waar door aanleg van de kabels voor Gemini verhoging van de sedimentconcentratie optreedt (net ten noorden van Waddenzee) en waar door verruiming van de vaarweg naar de Eemshaven verhoging optreedt (Eems-Dollard estuarium tussen eilanden en Delfzijl) verschillend zijn, zal het gecumuleerde effect van deze twee activiteiten op de toename van de sedimentconcentratie goed benaderd worden door de som van beide effecten. In bijzonder zullen gecumuleerde sedimentconcentraties vergelijkbaar zijn met de sedimentconcentraties zoals deze in voorliggende studie en door Perk (2012) zijn genoemd en zal de snelheid waarmee de sedimentconcentraties na het stopzetten van de baggerwerkzaamheden terugvallen naar de achtergrondwaarden overeenkomen met wat in de afzonderlijke studies is gevonden.

Hydromorfologie Eems-Dollard estuarium. Achtergrondstudie t.b.v. OTB MER Vaarweg Eemshaven

5 Conclusies en aanbevelingen

Hieronder worden de conclusies uit voorliggende studie puntsgewijs samengevat.

Waterstand

De effecten van verruiming van de vaargeul op de waterstanden zijn klein ten opzichte de natuurlijke variatie in het estuarium en ten opzichte van het effect van zeespiegelstijging. Dit zowel in absolute zin, veranderingen zijn altijd kleiner dan 0,5 cm, als in relatieve zin, de veranderingen zijn van dezelfde grootte (noordelijk deel estuarium) tot een factor 5 kleiner (zuidelijk deel estuarium) dan de veranderingen door zeespiegelstijging. Dat het effect van de geulverruiming op de waterstanden klein is, stemt overeen met de conclusies van Hartsuiker et al. (2007). Het effect van de verruiming van de vaarweg op de getijslag is in het algemeen kleiner dan 0,1%.

Droogvalduur

Het effect van verruiming van de vaargeul op de droogvalduur is vrijwel overal kleiner dan 5 minuten. In de berekeningen zijn stipjes te vinden waar de verandering 5-10 minuten bedraagt. Deze sporadische veranderingen zijn het gevolg van zeer kleine fluctuaties in waterstand door de verruiming en daardoor verschillen in numerieke afrondingen. Deze verschillen in afronding wisselen elkaar af en tonen geen structurele toe- of afname van de droogvalduur. De gebieden waarin deze afrondingsverschillen voorkomen en de grootte van de verandering is dusdanig klein in vergelijking met typische droogvalduur van ca. 4 uur dat we kunnen concluderen dat het effect van de verruiming van de vaargeul op de droogvalduur zeer klein is.

Ebduur

Het effect van vaargeulverruiming op de ebduur is zeer klein is ten opzichte van de natuurlijke variatie voor alle scenario's. Volgens de berekeningen leidt verruiming van de vaarweg (2012 T1) tot een betrekkelijk kleine (< 2 minuten; < 1%) verandering in de ebduur. Dit is in overeenstemming met de bevindingen door Hartsuiker et al (2007).

Getij-componenten en getij-asymmetrie

Naast de invloed op waterstand, droogvalduur en ebduur kan het effect van verruiming van de vaargeul worden beschreven in termen van de belangrijkste getij-componenten (M2 en M4) en de getij-asymmetrie. Met name de getij-asymmetrie door de interactie tussen de M2- en M4-component van het getij bepaalt in belangrijke mate het getijgemiddelde transport.

Uit de berekeningen blijkt dat het effect van vaargeulverruiming op de amplitude van de M2-component van het getij zeer klein is (< 2,5 mm; < 0,2%). Ook de invloed op de fase van de M2-component is zeer klein (<0,25° \approx 30 sec.). Ook het berekende effect van vaargeulverruiming op de amplitude van de M4-component (< 0,9 mm; < 1,3%) en de fase van de M4-component is zeer klein (< 0,9° \approx 60 sec.).

Het berekende effect van de vaargeulverruiming op het faseverschil $\theta = 2\varphi M2 - \varphi M4$ bedraagt maximaal 0,6° ter hoogte van Eemshaven (toename). Ter hoogte van Delfzijl en verder stroomopwaarts is deze toename kleiner dan 0,2°. De berekeningen laten zien dat vaargeulverruiming niet zal leiden tot versterking van de import van fijn sediment naar de Dollard en de Unterems.

Stroomsnelheid

Vaargeulverruiming leidt tot veranderingen in stroomsnelheden, maar het gebied waarin deze veranderingen plaatsvinden is klein. Alleen daar waar gebaggerd wordt, nabij km 100 en ten noorden van de Eemshaven komen kleine veranderingen voor. De grootste veranderingen vinden nabij de Eemshaven plaats. Stroomsnelheden veranderen met ca. 15%, maar omdat het hier om een afname gaat worden geen problemen voor de scheepvaart verwacht.

Golfhoogte

Het effect van vaargeulverruiming op de golfhoogte is lokaal en betrekkelijk klein ten opzichte van de absolute golfhoogte ter plaatste en de natuurlijke variatie.

Saliniteit

Uit de effectsimulaties blijkt dat de veranderingen in saliniteit door de geulverruiming lokaal zijn: alleen in en net voor de Eemshaven treden kleine veranderingen op (< 0,2%), dit in tegenstelling tot de veranderingen door zeespiegelstijging die de saliniteit in bijna het gehele estuarium doen veranderen. In vergelijking met de saliniteitsveranderingen door de autonome trend zijn de veranderingen ook betrekkelijk klein. Daarom kan gezegd worden dat de effecten van verruiming van de vaargeul op de saliniteit in het gehele Eems-Dollard estuarium zeer klein zijn. Dit komt overeen met de conclusies van Hartsuiker et al. (2007) dat de verandering in saliniteit langs het transect door de verruiming enkele honderste psu's zijn, terwijl zij voor zeespiegelstijging enkele tienden psu's zijn en dat de reikwijdte van het gebied waarbinnen de saliniteitsverandering optreedt beperkt is tot het gebied voor de Eemshaven.

Morfologie

Het effect van het baggeren en verspreiden op de morfologie hangt samen met de omvang van de ingreep relatief ten opzichte van de afmetingen van de geulen en platen in het estuarium en de omvang van hun autonome gedrag. In het geval van de vaarweg naar Eemshaven blijft de geplande verruiming beperkt tot minder dan 1% van de totale doorsnede van één van de twee geulen. Dit is betrekkelijk klein ten opzichte van de natuurlijke variatie in geuldoorsnede. Berekeningen naar het directe effect van vaargeulverruiming en het indirecte effect door verandering van het vloedvolume laten zien dat het netto effect zeer gering is ten opzichte van de natuurlijke variatie en dat vaargeulverruiming de autonome trend niet versterkt.

Vertroebeling

De mate van vertroebeling is afhankelijk van de hoeveelheid slib die wordt verspreid, het opwervelend vermogen van de stroming, de frequentie waarmee wordt verspreid en de verspreidingsduur. Deze laatste kunnen variëren. In deze studie gaan we uit van een realistisch *worst case* scenario waarin we aannemen dat er met meerdere schepen tegelijk wordt gebaggerd en dat de cyclusduur van deze schepen samen 2 uur bedraagt. Dit wil zeggen dat er elke 2 uur baggerspecie wordt verspreid op de betreffende locatie. Op locaties P0, P3 en P4 wordt op deze manier slibarme (zand) baggerspecie verspreid en op locatie P1 wordt slib-rijke (klei en keileem) specie verspreid.

Verspreiding van slib-arme (zand) specie op P0, P3 of P4 leidt tot een kleine verspreidingspluim (orde enkele km) en een maximale toename in slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom van 2-5 mg/l direct na verspreiding. Dit is enkele procenten van de natuurlijk achtergrond. Eén dag na de verspreiding zijn de extra concentraties in de pluim afgenomen tot waarden kleiner dan 2 mg/l.

Verspreiding van slib-rijke specie (klei of keileem) op P1 leidt onmiddellijk na verspreiding tot een de maximale toename van 60-80 mg/l. De totale lengte van de pluim bedraagt op dat moment ongeveer 50 km en de breedte ongeveer 7 km. Na een periode van 15 dagen na het verspreiden van de slib-rijke baggerspecie op locatie P1 is de extra slibconcentratie in de pluim afgenomen tot 2-5 mg/l en de lengte van de pluim is gehalveerd tot ongeveer 25 km. De breedte rondom het zwaartepunt is ongeveer 5 km.

Een verdubbeling van de verspreidingsfrequentie bij gelijkblijvende hoeveelheid leidt tot extra slibconcentraties in de pluim (ten opzichte van de natuurlijke achtergrond) die direct na verspreiding ongeveer 60% hoger zijn. Ook de periode waarin de pluim zichtbaar is, is langer. De grootte van de pluim is vergelijkbaar met een lagere frequentie. Wanneer zowel verspreidingsfrequentie als verspreidingsduur worden verdubbeld dan zijn de extra concentraties in de pluim direct na verspreiding ongeveer 90% hoger en is de pluim ongeveer 20% groter. De periode waarin de pluim zichtbaar is, is langer dan die met een lagere frequentie maar vergelijkbaar met die met een hogere frequentie maar kortere duur.

Belangrijke conclusie is dat het effect van de slibverspreidingen door aanleg en onderhoud veel kleiner zijn dan de natuurlijke variaties in het systeem door bijvoorbeeld stormen.

Cumulatie met andere geplande ingrepen

De veranderingen in de hydrodynamica en sedimentconcentraties door verruiming van het Emder Fahrwasser zijn groter dan die door verruiming van de vaargeul naar de Eemshaven. De gebieden waar veranderingen optreden zijn voor de verruiming van de vaarweg naar de Eemshaven en de verdieping van het Emder Fahrwasser wel heel verschillend. Alleen voor de effecten van baggerspecieverspreiding is er overlap in het gedeelte km-60 tot Delfzijl.

Hydromorfologie Eems-Dollard estuarium. Achtergrondstudie t.b.v. OTB MER Vaarweg Eemshaven

Bijlage 1Lijst van Figuren

Figuur 1. Het Eems-Dollard estuarium	15
Figuur 2. Plaatsnamen en namen van morfologische eenheden (geulen en platen).	16
Figuur 3. Locaties meetstations langs het Eems-Dollard estuarium	17
Figuur 4. Jaargemiddeld hoogwater, jaargemiddeld laagwater en jaargemiddelde getijslag voor vier	
Nederlandse meetstation in het Eems-Dollard estuarium. Zie figuur 3 voor locaties. De legenda to	ont
de trend en de 80% betrouwbaarheidsband rondom die trend.	18
Figuur 5. Gemiddeld hoogwater, gemiddeld laagwater en gemiddelde getijslag voor zeven Duitse	
meetstation langs de Eems. Zie figuur 3 voor locaties. De legenda toont de trend en de 80%	
betrouwbaarheidsband rondom die trend	19
Figuur 6. Gemiddeld zeeniveau gemeten op vier Nederlandse meetstations in het Eems-Dollard estuar	rium
Figuur 7. Berekende stroomsnelheden in het Eems-Dollard estuarium bij opkomend tij	20 21
Figuur 8 Berekende waterstanden, stroomsnelheden en stroomrichtingen op km 70 (ter hoogte van	
Eemshaven)	22
Figuur 9. Golfklimaat op de Noordzee bij Borkum riff (links) en in de Eems-Dollard bij Delfzijl Eemszi	inker
(rechts). Het percentage staat voor het percentage van voorkomen uit de betreffende richting. De	
kleur geeft de golfhoogte aan. De lengte van de taartpunt geeft het percentage golven uit die	
betreffende richting. Let op het verschil in schaal tussen beide figuren	23
Figuur 10. Maandgemiddelde en jaargemiddelde debieten in de Eems rivier bij station Versen. (bron:	
Global Runoff Data Centre (GRDC); Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG))	24
Figuur 11. Lange termijn maandgemiddelde debieten in de Eems rivier bij station Versen (bron: Global	
Runoff Data Centre (GRDC); Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG))	24
Figuur 12. Gemeten gemiddelde saliniteit in het Eems-Dollard estuarium als functie van de afstand tot	t
Papenburg	25
Figuur 13. Variatie in de tijd van de saliniteit voor 6 verschillende meetstations in het Eems-Dollard	
estuarium (bron: www.waterbase.nl)	26
Figuur 14. Zwevend stof gehalte langs het Eems-Dollard estuarium (bron: De Jonge, 2007)	27
Figuur 15. Gemeten sedimentconcentratie, temperatuur en saliniteit. (referenties: Van Santen & Spitzn	er,
2012; Reneerkens & Spitzner, 2012a, b en c)	28
Figuur 16. Mediane korreldiameter van het sediment in het Eems-Dollard estuarium. Bron gegevens:	
Sedimentatlas Waddenzee; Rijkswaterstaat, 1998	29
Figuur 17. Slibpercentages in het Eems-Dollard estuarium. Bron gegevens: Sedimentatlas Waddenzee;	
Rijkswaterstaat, 1998	29
Figuur 18. Paleografische reconstructie van het oostelijke waddengebied rond ongeveer 600 A.D. (uit	
Esselink, 2000)	30
Figuur 19. Inpolderingen van de Dollard (uit Esselink, 2000)	31
Figuur 20. Kaarten van de Eems in 1833 en 1949 (uit Gerritsen, 1952).	32
Figuur 21. Bodemhoogte Eems-Dollard estuarium gemeten in 2010 (bron: WSA Emden)	32
Figuur 22. Bodemhoogteverschil (sedimentatie en erosie) tussen 2010 en 1985. Positief is sedimentatie	
(warme kleuren) en negatiet is erosie (koude kleuren).	33
Figuur 23. Locatie van dwarsdoorsnedes langs het Eems-Dollard estuarium	33
Figuur 24. Ontwikkeling van dwarsprotielen 1 t/m 4a in de periode van 1985 t/m 2010. Figuur 23 toont	: de
Iocatie van dwarsdoorsnedes.	35
Figuur 25. Ontwikkeling van dwarsproneien 5 t/m 10 in de periode van 1985 t/m 2010. Figuur 23 toont	ae
IOCALIE VALLUWATSCOOTSDECIES	

Figuur 26. Ontwikkeling van de NAP-10 m contourlijn ter hoogte van Westereems en Huibertgat van 1985
t/m 2010
Figuur 27. Ontwikkeling van de NAP-10 m contourlijn ter hoogte van Doekegat van 1985 t/m 2010
Figuur 28. Ontwikkeling van de NAP-10 m contourlijn ter hoogte van het Oostfriesche Gaatje van 1985 t/m 2010
Figuur 29. Ligging van het studiegebied
Figuur 30. Kaart met de kuberingsgebieden
Figuur 31. Grafiek van de ontwikkeling van het watervolume van de Eems (gebieden 1 t/m 3 in figuur 30)
onder NAP + 3 m, met een indicatie van de fout en de lineaire trend (boven) en procentueel t.o.v. 1985 (onder)
Figuur 32 Grafiek van de ontwikkeling van het watervolume van de Dollard (gebied 4 in figuur 30)onder
NAP + 3 m met een indicatie van de fout en de lineaire trend (boven) en procentueel t.o.v. 1985
(onder) 42
Figuur 33. Grafiek van de ontwikkeling van het sedimentvolume ten opzichte van dat in 1985 in gebied 3.
Figuur 34 Varandaring van da hat sadimantvaluma in gabiad 1 tan anzichte van dat in 1985 45
Figuur 35. Verandering van de het sedimentvolume in gebied 2 ten opzichte van dat in 1985
Figuur 36. Verandering van de het sedimentvolume in gebied 2 ten opzichte van dat in 1985
Figuur 36. Verandering van de het sedimentvolume in gebied 5 ten opzichte van dat in 1985.
Figuur 37. Verandering van de het sedimentvolume in gebied 5 ten opzicht van dat in 1965.
Figuur 36. verändering van de net sedimentvolume in gebied 5 ten opzicht van dat in 1965
riguur 39. jaariijks volume (m ²) van bij vaarwegondernoud onttrokken sediment uit net Eems-Donard
Eiguur 40. Jaarliika valuma (m3) van zandwinning in het Fama Dellard actuarium
Figuur 40. Jaarnijks volume (m ³) van zandwinning in het eenis-Donard-estuarium
Groninger Wedden
Eigure 42. Schemetische userreeue von de sedimenttrenenerten en de Croninger Wedden en in de Ferre
Dollard. Uitleg bij de getallen en bronnen in de tekst
Figuur 43 Modellentrein van oceaan tot Nederlandse binnenwateren: Rooster van het CSM, ZuNo en
Kuststrook model
Figuur 44. Rooster van Eems-Dollard-model
Figuur 45 Schematisatie bodemhoogte Eems-Dollard-model
Figuur 46. Berekend percentage slib in de bodem
Figuur 47. Windsnelheid en –richting bij Lauwersoog
Figuur 48. Golfhoogte, -periode en –richting zoals gemeten op MWTL-station Schiermonnikoog
Figuur 49. Punten in het model waar een instromend gebied is opgelegd (zie tabel 9 voor de namen) 58
Figuur 50. Debiet van de Eems rivier zoals gemeten bij Versen. Bron: Niedersächsische Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, NLWKN, Duitsland
Figuur 51. Debiet dat bij Leda het model instroomt (positief) en uitstroomt (negatief). Bron:
Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, NLWKN,
Duitsland)
Figuur 52. Debieten van de Nederlandse en Duitse gemalen en sluizen gebaseerd op bovengenoemde
bronnen
Figuur 53. Verspreidingslocaties baggerspecie
Figuur 54. Cumulatieve massa verspreid sediment als functie van de tijd per verspreidingslocatie
(gebaseerd op data De Boer)61
Figuur 55. Locaties stations waterstandsmetingen
Figuur 56. Gemeten en berekende waterstand bij station Huibertgat, Emshörn en Knock
Figuur 57. Gemeten en berekende amplitude en fase voor de M2-component van het getij langs het Eems-
Dollard estuarium

Figuur 58. Gemeten en berekende amplitude en fase voor de M4-component van het getij langs het Eem	IS-
Dollard estuarium	. 64
Figuur 59. Gemeten en berekend faseverschil $\theta = 2\varphi M2 - \varphi M4$ van het getij langs het Eems-Dollard	
estuarium	. 65
Figuur 60. Meetlocaties OBS en ADCP meetframes	. 66
Figuur 61. Stroomsnelheden en -richtingen op locatie GSP05	. 67
Figuur 62. Stroomsnelheden en -richtingen in het punt GSP02-7	. 67
Figuur 63. Gemeten en berekende saliniteit langs het Eems-Dollard estuarium	. 68
Figuur 64. Gemeten en berekende saliniteit op GSP2 en GSP5. Zie figuur 60 voor meetlocaties	. 69
Figuur 65. Gemeten en berekende saliniteit bij Knock, Emden, Pogum, Terborg en Leerort.	. 69
Figuur 66. Vergelijking gemeten en berekende sedimentconcentraties als functie van de afstand tot	
Papenburg. Eemshaven ligt ter hoogte van km 70	. 70
Figuur 67. Gemeten en gemodelleerde sedimentconcentraties op locatie GSP02 op 5,0 m onder	
wateroppervlak	. 71
Figuur 68. Gemeten en gemodelleerde sedimentconcentraties op GSP05 5,0 m onder wateroppervlak	. 71
Figuur 69. Gemeten en berekende waterstand bij station Huibertgat, Emshörn en Knock.	. 73
Figuur 70. Gemeten en berekende stroomsnelheden en -richtingen op punt GSP02	74
Figuur 71. Gemeten en berekende stroomsnelheden en -richtingen op GSP05.	74
Figuur 72. Gemeten en berekende sedimentconcentraties in punt GSP02.	. 75
Figuur 73: Gemeten en berekende sedimentconcentraties in punt GSP05.	. 76
Figuur 74: kalibratiecurves ADCP.	. 76
Figuur 75: locatie en kilometrering vaargeul	. 80
Figuur 76. Gemiddelde waterstand (boven), verschil in gemiddelde waterstand t.o.v. de huidige situatie	5
(midden) en voor zeespiegelstijging gecorrigeerd verschil in waterstand (onder) langs het km-trajed	zt
in figuur 75 voor verschillende scenario's	. 82
Figuur 77: Berekende getijslag (boven) en het verschil in getijslag t.o.v. de huidige situatie (onder) langs	
het Eems-Dollard estuarium	. 83
Figuur 78. Berekende maximale waterstand (boven), verschil in maximale waterstand t.o.v. de huidige	
situatie (midden) en voor zeespiegelstijging gecorrigeerd verschil in maximale waterstand (onder)	
langs het Eems-Dollard estuarium	. 84
Figuur 79. Minimale waterstand (boven), verschil in minimale waterstand t.o.v. de huidige situatie	
(midden) en voor zeespiegelstijging gecorrigeerd verschil in minimale waterstand ten opzichte van	de
huidige situatie (onder) langs het transect in figuur 75 voor verschillende scenario's	. 85
Figuur 80. Waterstand tijdens gemiddeld hoogwater in de huidige situatie (2012 T0).	. 86
Figuur 81. Waterstand tijdens gemiddeld laagwater in de huidige situatie (2012 T0).	. 86
Figuur 82. Droogvalduur in het Eems-Dollard estuarium gedurende een gemiddeld getij	. 87
Figuur 83. Verschil in droogvalduur tussen de situatie met verruimde vaargeul met ligplaats (2012 T1) e	en
de huidige situatie (2012 T0) tijdens een gemiddeld getij	. 88
Figuur 84. Verschil in droogvalduur tussen de situatie met verruimde vaargeul met keerplaats (2012 T2))
en de huidige situatie (2012 T0) tijdens een gemiddeld getij	. 88
Figuur 85. Duur van vallend tij (boven), standaard deviatie in duur van vallend tij (midden) en het	
verschil in de duur van vallend tij ten opzichte van de huidige situatie (onder) voor verschillende	
scenario's	. 89
Figuur 86. Berekende amplitude en fase voor de M2-component van het getij langs het Eems-Dollard	
estuarium voor de huidige situatie (T0) en voor de situatie met tijdelijke ligplaats (T1) en voor de	
situatie met keerplaats (T2)	. 90
Figuur 87. Berekende amplitude en fase voor de M4-component van het getij langs het Eems-Dollard	
estuarium voor de huidige situatie (T0) en voor de situatie met tijdelijke ligplaats (T1) en voor de	
situatie met keerplaats (T2)	. 91

Figuur 88. Berekend faseverschil $\theta = 2\varphi M2 - \varphi M4$ van het getij langs het Eems-Dollard estuarium voor de
huidige situatie (T0) en voor de situatie met tijdelijke ligplaats (T1) en voor de situatie met keerplaats
(T2)
Figuur 89. Gemiddelde saliniteit voor verschillende scenario's (boven), standaard deviatie rondom het
gemiddelde (midden) en het effect op de saliniteit t.o.v. de huidige situatie voor verschillende
scenario's
Figuur 90. Verschuiving isohaline maximale saliniteit in de verschillende scenario's ten opzichte van de
huidige situatie (2012 T0)
Figuur 91. Verschuiving isohaline minimale saliniteit in de verschillende scenario's ten opzichte van de
huidige situatie (2012 T0)
Figuur 92. Dieptegemiddelde saliniteit op moment van hoogwater in de Eemshaven tijdens een gemiddeld
getij in de huidige situatie (2012 T0)95
Figuur 93. Dieptegemiddelde saliniteit op moment van laagwater in de Eemshaven tijdens een gemiddeld
getij in de huidige situatie (2012 T0)96
Figuur 94. Verschil dieptegemiddelde saliniteit situatie met verruimde vaarweg met ligplaats (2012 T1) en
de huidige situatie (2012 T0) op moment van hoogwater tijdens een gemiddelde getijperiode96
Figuur 95. Verschil dieptegemiddelde saliniteit situatie met verruimde vaarweg met ligplaats (2012 T1) en
de huidige situatie (2012 T0) op moment van laagwater tijdens een gemiddelde getijperiode97
Figuur 96. Verschil dieptegemiddelde saliniteit situatie met verruimde vaarweg met keerplaats (2012 T2)
en de huidige situatie (2012 T0) op moment van hoogwater tijdens een gemiddelde getijperiode 97
Figuur 97. Verschil dieptegemiddelde saliniteit situatie met verruimde vaarweg met keerplaats (2012 T2)
en de huidige situatie (2012 T0) op moment van laagwater tijdens een gemiddelde getijperiode 98
Figuur 98. Maximale stroomsnelheden langs het transect in Figuur 75 en het verschil in maximum
stroomsnelheid ten opzichte van de huidige situatie (2012 T0) voor verschillende scenario's
Figuur 99. Gemiddelde stroomsnelheden langs het transect in Figuur 75 en het verschil in gemiddelde
stroomsnelheid ten opzichte van de huidige situatie (2012 T0) voor verschillende scenario's
Figuur 100. Dieptegemiddelde stromingen in noordelijk deel Eems-Dollard estuarium tijdens maximale eb
van een gemiddeld getij
Figuur 101. Dieptegemiddelde stromingen in noordelijk deel Eems-Dollard estuarium tijdens maximale
vloed van een gemiddeld getij
Figuur 102. Dieptegemiddelde stromingen in zuidelijk deel Eems-Dollard estuarium tijdens maximale eb
van een gemiddeld getij
Figuur 103. Dieptegemiddelde stromingen in zuidelijk deel Eems-Dollard estuarium tijdens maximale
vloed van een gemiddeld getij
Figuur 104. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met
ligplaats (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale eb in een gemiddeld getij
voor het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium
Figuur 105. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul (2012
T1) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale vloed in een gemiddeld getij voor het
noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium
Figuur 106. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul (2012
T1) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale eb in een gemiddeld getij voor het zuidelijk
deel van het Eems-Dollard estuarium
Figuur 107. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met
ligplaats (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale vloed in een gemiddeld getij
voor het zuidelijk deel van het Eems-Dollard estuarium
Figuur 108. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met
keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale eb in een gemiddeld getij
voor het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium

Figuur 109. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met
keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale vloed in een gemiddeld
getij voor het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium 106
Figuur 110. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met
keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale eb in een gemiddeld getij
voor het zuidelijk deel van het Eems-Dollard estuarium
Figuur 111. Verschil dieptegemiddelde stroomsnelheden tussen de situatie met verruimde vaargeul met
keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0) gedurende maximale vloed in een gemiddeld
getij voor het zuidelijk deel van het Eems-Dollard estuarium
Figuur 112. Residuele stroming in het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium gedurende een
gemiddeld getij in de huidige situatie107
Figuur 113. Residuele stroming in het zuidelijk deel van het Eems-Dollard estuarium gedurende een
gemiddeld getij in de huidige situatie
Figuur 114. Verschil residuele stroming in het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium tussen de
situatie met verruimde vaargeul met ligplaats (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0)
Figuur 115. Verschil residuele stroming in het zuidelijk deel van het Eems-Dollard estuarium tussen de
situatie met verruimde vaargeul met ligplaats (2012 T1) en de huidige situatie (2012 T0)
Figuur 116. Verschil residuele stroming in het noordelijk deel van het Eems-Dollard estuarium tussen de
situatie met verruimde vaargeul met keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0)
Figuur 117. Verschil residuele stroming in het zuidelijk deel van het Eemsestuarium tussen de situatie met
verruimde vaargeul met keerplaats (2012 T2) en de huidige situatie (2012 T0)
Figuur 118. Berekende variatie significante golfhoogte in m (boven) en effect van verruiming van de
vaargeul op de golfhoogte in m (onder) op basis van scenario A (zie tabel 14 voor scenario's)
Figuur 119. Berekende variatie significante golfhoogte in m (boven) en effect van verruiming van de
vaargeul op de golfhoogte in m (onder) op basis van scenario B (zie tabel 14 voor scenario's)
Figuur 120. Berekende variatie significante golfhoogte in m (boven) en effect van verruiming van de
vaargeul op de golfhoogte in m (onder) op basis van scenario C (zie tabel 14 voor scenario's)
Figuur 121. Berekende variatie significante golfhoogte in m (boven) en effect van verruiming van de
vaargeul op de golfhoogte in m (onder) op basis van scenario D (zie tabel 14 voor scenario's)
Figuur 122. Baggervolumes zonder ligplaats berekend voor 4 verschillende bodems en vastgestelde worst
case
Figuur 123. Potentiële verspreidingslocaties
Figuur 124. Baggerdiepte ten behoeve van verruiming van de vaargeul. De blauwe nummers geven de
afstand in km langs het traject aan. Figuur 127 toont de baggervolumes per km
Figuur 125. Baggerdiepte ten behoeve van verruiming van de vaargeul ingezoomd op noordelijke deel. De
blauwe nummers geven de afstand in km langs het traject aan
Figuur 126. Baggerdiepte ten behoeve van verruiming van de vaargeul ingezoomd op zuidelijke deel. De
blauwe nummers geven de afstand in km langs het traject aan
Figuur 127. Baggervolumes per km. Figuur 124 t/m figuur 126 tonen in blauwe cijfers de km's langs het
traject
Figuur 128. Berekend jaarlijks onderhoudsbaggervolume
Figuur 129. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) in het bovenste deel van
de waterkolom onmiddellijk na het twee-uurlijks verspreiden van slibarme baggerpecie op locatie P0
gedurende een hele week (84 verspreidingen)
Figuur 130. Gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder verspreiding en
verschillende dagen na 84 slibarme (zand) baggerspecieverspreidingen op P0 elke twee uur (boven),
absolute toename slibconcentratie door baggerspecieverspreidingen op P0 (midden) en procentuele
toename slibconcentratie door baggerspecieverspreiding op P0 (onder)

Figuur 131. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het twee-
uurlijks verspreiden van slibarm baggerpecie op locatie P3 gedurende een hele week (84
verspreidingen)
Figuur 132. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het twee-
uurlijks verspreiden van zandig baggerspecie op locatie P4 gedurende een hele week (84
verspreidingen)
Figuur 133. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het twee-
uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een hele week (84
verspreidingen)
Figuur 134. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) 15 dagen na het twee-
uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een hele week (84
verspreidingen)
Figuur 135. Gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder verspreiding en
verschillende dagen na 84 slib-rijke baggerspecieverspreidingen op P1 elke twee uur (boven), absolute
toename slibconcentratie door baggerspecieverspreidingen op P1 (midden) en procentuele toename
slibconcentratie door baggerspecieverspreiding op P1 (onder)
Figuur 136. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het
uurlijks verspreiden van zandige baggerspecie op locatie P0 gedurende een halve week (84
verspreidingen)
Figuur 137. Gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder verspreiding en
verschillende dagen na zandige baggerspecieverspreiding op P0 elk uur (boven), absolute toename
slibconcentratie door baggerspecieverspreiding op P0 (midden) en procentuele toename
slibconcentratie door baggerspecieverspreiding op P0 (onder)
Figuur 138. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het
uurlijks verspreiden van zandig baggerspecie op locatie P3 gedurende een halve week (84
verspreidingen)
Figuur 139. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het
uurlijks verspreiden van zandig baggerspecie op locatie P4 gedurende een halve week (84
verspreidingen)
Figuur 140. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het
uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een halve week (84
verspreidingen)
Figuur 141. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) 5 dagen na het uurlijks
verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een halve week (84 verspreidingen).
Figuur 142. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) 15 dagen na het uurlijks
verspreiden van slibbig baggerspecie op locatie P1 gedurende een halve week (84 verspreidingen). 138
Figuur 143. Gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder verspreiding en
verschillende dagen na 84 slib-rijke baggerspecieverspreidingen op P1 elk uur (boven), absolute
toename slibconcentratie door baggerspecieverspreidingen op P1 (midden) en procentuele toename
slibconcentratie door baggerspecieverspreiding op P1 (onder)
Figuur 144. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het
uurlijks verspreiden van zandige baggerspecie op locatie P0 gedurende een hele week (168
verspreidingen)
Figuur 145. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het
uurlijks verspreiden van zandige baggerspecie op locatie P3 gedurende een hele week (168
verspreidingen)

Figuur 146. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het uurlijks verspreiden van zandige baggerspecie op locatie P4 gedurende een hele week (168
verspreidingen)
Figuur 147. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) onmiddellijk na het
uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een hele week (168
verspreidingen)
Figuur 148. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) 15 dagen na het uurlijks
verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende een hele week (168 verspreidingen).
Figuur 149. Gemiddelde slibconcentratie in het bovenste deel van de waterkolom zonder verspreiding en
verschillende dagen na 168 slib-rijke baggerspecieverspreidingen op P1 elk uur (boven), absolute
toename slibconcentratie door baggerspecieverspreidingen op P1 (midden) en procentuele toename
slibconcentratie door baggerspecieverspreiding op P1 (onder)144
Figuur 150. Berekende toename in daggemiddelde slibconcentratie (troebelheid) 15 dagen na het twee-
uurlijks verspreiden van slib-rijke baggerspecie op locatie P1 gedurende vier weken (336
verspreidingen)
Figuur 151. Invloed van frequentie en duur van baggerspecieverspreiding op de extra slibconcentratie bij
P1

Bijlage 2Lijst van tabellen

abel 1. Hoogwater, laagwater en verschil tussen hoog- en laagwater (cm NAP) tijdens springtij,	
gemiddeld tij en doodtij condities bij Huibertgat, Eemshaven en Delfzijl (Getijtafels voor Ne	ederland
2012: slotgemiddelde 1991.0)	
Tabel 2. Tijdstippen hoogwater t.o.v. Eemshaven (Getijtafels, 2013).	
Tabel 3. Jaar van opname voor de verschillende deelgebieden uit de Rijkswaterstaat Vaklodinge	n en de
lodingen van het Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) in Emden	
Tabel 4. Jaar per kuberingsgebied	
Tabel 5: Sedimentatie Eems-Dollard over de periode 1985-2010 (de oorspronkelijke getallen voor	. periode
1985-2002 voor de Eems en de Dollard uit Cleveringa (2008) zijn tussen haakjes vermeld)	
Tabel 6. Sedimentatie Groninger Wadden over de periode 1985-2010 (Het oorspronkelijke getal	voor
periode 1985-2002 uit Cleveringa (2008) is tussen haakjes vermeld)	
Tabel 7. Gemiddelde jaarlijkse baggervolumes voor onderhoud langs de vaargeul, zandwinning	en in de
havens voor de periode 2007-2011. Eemshaven ligt ter hoogte van km-sectie 70. Bron: Muld	er (2013).
Tabel 8. Parameters sedimentfracties.	
Tabel 9. Namen debietpunten in figuur 50	
Tabel 10. Modelinstellingen	72
Tabel 11: Geselecteerde simulatieperiodes.	
Tabel 12: Zeespiegelstijgingsscenario's	
Tabel 13: Procentuele verandering van de getijslag door zeespiegelstijging (2015T0, 2020T0 en 20)40T0),
door verruiming van de vaarweg naar Eemshaven met ligplaats (2012T1) en door verruimir	ng van de
vaarweg naar Eemshaven met keerplaats (2012T2) ten opzichte van de huidige situatie (201	2T0) langs
het km-traiect zoals getoond in figuur 75	-10) lange 83
Tabel 14 Toegenaste golf- en windcondities voor benaling van effect van verruiming van de vaa	argeul op
de golfcondities in het Fems-Dollard estuarium	111
Tabel 15 Waargenomen variaties in vloedvolume (Kiezebrink 1996)	115
Tabel 16. Autonome trend en natuurlijke variatie tussen haakies	116
Tabel 17. Approximation de geuldoorspede als gevolg van het indirecte effect van vaargeulver	uiming on
hat vloodvolume (A) direct offect van vaargeulverruiming on de deerenede (B) en het nette	vinning op
(A B)	116
Tabel 18 Baggerwalumes per sedimentseert	
Tabel 10. Gağırdinaton hartnunton verenreidingelegetice	
Tabel 19. Coordinaten hartputten verspreidingstocaties.	
Tabel 20. Maximale jaarlijkse verspreidingscapaciteit van de verschillende locaties gesommeerd	voor 110
verschillende perioden.	
Tabel 21. Verspreidingsstrategie aanlegtase	
Tabel 22. Totaal te verspreiden volumes zand en klei-keileem-veen	
Tabel 23: Uitvoeringsscenario hopperen/cutteren, onderdeel VKA 2013	
Tabel 24: Uitvoeringsscenario 2: keileem dieplepelen	
Tabel 25. Scheepsbewegingen baggerschepen voor uitvoeringsscenario hopperen/cutteren, onde	rdeel van
VKA 2013	
Tabel 26. Omrekening van baggervolumes naar massa sediment en massa slib onder de aannam	e dat het te
baggeren sediment een droge dichtheid heeft van 1600 kg/m³	

Bijlage 3 Referenties

- Baart, F., Van Gelder, P.H.A.J.M., De Ronde, J., Van Koningsveld, M., Wouters, B., 2012a. The Effect of the 18.6-Year Lunar Nodal Cycle on Regional Sea-Level Rise Estimates. Journal of Coastal Research 511–516.
- Baart, F., Van Koningsveld, M., Stive, M.J.F., 2012b. Trends in Sea-Level Trend Analysis. Journal of Coastal Research 311–315.
- Biegel. E.R.J., 1993. Morphological changes due to sea-level rise in tidal basins in the Dutch Wadden Sea versus concepts morphological response model MORRES. Rijksuniversiteit Utrecht IMAU rapport IMAU 93-14.
- Boon, J., Kernkamp, H., Dardengo, L., 2002. Alternative dumping sites in the Ems-Dollard estuary. Model study. WL-Delft Hydraulics. Z3328.
- Cleveringa, J., 2008. Ontwikkeling sedimentvolume Eems-Dollard en het Groninger wad; Overzicht van de beschikbare kennis en gegevens (No. A2269R1r3). Alkyon Hydraulic Consultancy & Research, Marknesse, The Netherlands.
- De Jonge, V.N., 1983. Relations between annual dredging activities, suspended matter concentrations and the development of the tidal regime in the Ems estuary. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 40 (suppl. 1): 289-300.
- De Jonge, V.N., 2007. Biological processes in the Ems estuary. Presentation at the LOICZ workshop on the Ems River, February, 2007, Emden, Germany

De Vries, K., 2013. Grondbalans_2013_Vaargeul_Eemshaven-Noordzee_pres.xls. Medusa Explorations b.v.

- De Vries, S. 2013. Slibgehalte in keileem monsters vaarweg Noordzee-Eemshaven. Memo 2013-P416-v1. Medusa Explorations b.v.
- Dronkers, J., 1986. Tidal asymmetry and estuarine morphology. Netherlands Journal of Sea Research 20, 117–131
- Ebben-Gerrits, S., Schellekens, T. Actualisatie startnotitie verruiming vaargeul Eemshaven-Noordzee. ARCADIS, 2013. Datum: 22 maart 2013. Referentie: 076979957:C
- Esselink, P.,2000. Nature management of coastal salt marshes; Interactions between anthropogenic influences and natural dynamics, Proefschrift Universitieit Groningen.
- Eysink, W.D., 1979. Morfologie van de Waddenzee; gevolgen van zand- en schelpenwinning, WL | Delft Hydraulics, rapport R1336.
- GeoSea Consulting (UK) Ltd, 1991. Sediment transport pathways in the Eems estuary.
- GeoSea Consulting (UK) Ltd, 1992. The sediment transport regime in the Dollard.
- Gerritsen, F., 1952. Historisch- hydrografisch onderzoek Eems. Rijkswaterstaat, Studiedienst Hoorn.
- Gerritsen, F., De Jong, H., 1985. Stability of flow profiles in the Wadden area (in Dutch), Rijkswaterstaat, Adviesdienst Vlissingen, Nota WWKZ-84, Vol. 6, December 1985.
- Grasmeijer, B.T., Kater B., Smelter, M., 2008. Hydromorphological and ecological effects of disposing clay and boulder clay in the Randzelgat. Report A1836R7r5, Alkyon Hydraulic Consultancy & Research, November 2008.
- Grasmeijer B.T., Cleveringa J, 2010. Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijdebekkens Vlie en Marsdiep; Grootschalige morfologische ontwikkelingen Westelijke Waddenzee. Alkyon rapport A2062R3.
- Grasmeijer, B.T., Perk, L.M., Kater, B., 2010. Effects of the disposal of sand and sand-clay at P1 and P2A in the Ems (No. A1836R10r3). Alkyon Hydraulic Consultancy & Research, Marknesse, The Netherlands.
- Grasmeijer, B.T. 2013. Numerieke Modelberekeningen voor Ecodynamische Variantenanalyse Kustontwikkeling Delfzijl. ARCADIS rapport 076893494:A.
- Grasmeijer, B.T. 2013b. Berekening baggervolumes grotere ligplaats. Bestandsnaam: opp ligplaats groter_BG4.xls

- Hartsuiker, G., Grasmeijer, B.T., Perk, L., 2007. Hydromorphological study for EIA of Eemshaven and EIA of fairway to Eemshaven (No. A1836R1r5). Alkyon Hydraulic Consultancy & Research, Marknesse, The Netherlands.
- Hartsuiker, G., Grasmeijer, B.T., 2008. Effects of dumping silt in the Ems estuary, 3D model study (No. A1836R2r3). Alkyon Hydraulic Consultancy & Research, Marknesse, The Netherlands.
- Hoeksema H.J., H.P.J. Mulder, M.C. Rommel, J.G. de Ronde, J. de Vlas, J.P.A. Roest, L. Van der Valk, W.D. Eysink, Z.B. Wang, H.J. de Vriend & K.S. Dijkema., 2004. Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 : vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. Rapport Rijkswaterstaat RIKZ/2004.025.
- Jeuken, C., Tonnon, P.K., Verploegh, D., 2007. Stortcapaciteit en stabiliteit van het meergeulensysteem in het Eems estuarium (No. Z4344). Deltares, Delft, The Netherlands.
- Jonkman, H., De Vries, K., 2010. Bodemopbouw vaarweg Eemshaven-Noordzee (No. 2010-P-310V1). MEDUSA Explorations BV, Groningen, The Netherlands.
- Jürges J, Weilbeer H, Uliczka I, Winkel N. Vertiefung der Außerems bis Emden (2012). Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang. Bundesanstalt für Wasserbau, rapport A3955 03 10144, Hamburg.
- Koomans, R., De Vries, K., 2006. Vaargeul Eems Kartering bodemsamenstelling (No. 2006-P-144R3). MEDUSA Explorations BV, Groningen, The Netherlands.
- KNMI, 2006. Klimaat in de 21e eeuw. Vier scenario's voor Nederland. Brochure, KNMI, De Bilt, The Netherlands.
- Louters en Gerritsen, 1994. Het Mysterie van de Wadden Hoe een getijdesysteem inspeelt op zeespiegelstijging. Rijkswaterstaat RIKZ rapport 94.040
- McLaren, P., Hill, S.H., and Bowles, D., 2007. Deriving transport pathways in a sediment trend analysis (STA). Sedimentary Geology, 202(3): 489-498.
- Merckelbach, L.M., Eysink, W.D., 2001. Trendanalyse zwevend stof in Eems estuarium in relatie tot aanslibbing haven Delfzijl. (No. Z3210). WL | Delft Hydraulics.
- Mulder, H.P.J., 1996. Sedimentbalans Eems-Dollard: een tweedimensionale rekenmethode. Een zand- en slibbalans voor de periode 1985-1990 met het Invers Sediment Transport Model. Report RIKZ-96.013, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Haren, The Netherlands (in Dutch).
- Mulder, H.P.J., 2008. Hoeveelheden baggerspecie en verspreidingsstrategie in het kader van de verruiming van de vaarweg Eemshaven-Noordzee en de verdieping en uitbreiding van de Eemshaven. Rijkswaterstaat.
- Mulder, H.P.J., 2013. Bagger- en stortgegevens Eems-Dollard estuarium voor de periode 1960-2011. Rijkswaterstaat. Memo 18 april 2013.
- Oost, A. P., 1995. Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet. A study of barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins, Geologica Ultraiectina, Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen no. 126, Utrecht University.
- Perk, L (2012). MER Kabeltrace(s) Gemini vertroebelingstudie. Rapport 076519530:0.6, Arcadis, Zwolle. ARCADIS (2012). Passende beoordeling windmolenpark en kabeltracé Geminie. Rapport 076496519:0.21, Arcadis, Assen/Arnhem/Zwolle.
- Postma, H., 1961. Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. Netherlands Journal of Sea Research 1, 148–190.
- Reneerkens, M., Spitzner, A., 2012a. Monitoring baggerverspreiding Eemshaven. Meet- en verwerkingsrapport 3 (No. AV_DOC_110164_3_definitief). Aqua Vision BV, Utrecht, The Netherlands.
- Reneerkens, M., Spitzner, A., 2012b. Monitoring baggerverspreiding Eemshaven. Meet- en verwerkingsrapport 2 (No. AV_DOC_110164_2_definitief). Aqua Vision BV, Utrecht, The Netherlands.
- Reneerkens, M., Spitzner, A., 2012c. Monitoring baggerverspreiding Eemshaven. Conversie naar suspensieve sediment concentraties (SSC). Aanvullende Analyse (No. AV_DOC_110164_4 | Concept). Aqua Vision BV, Utrecht, The Netherlands.

Ridderinkhof, H., 1989. Tidal and residual flows in the western Dutch Wadden Sea III: vorticity balances. Netherlands Journal of Sea Research 24, 9–26.

Rijkswaterstaat, 1991. Referentiewaarden waterstanden.

http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Referentiewaarden%20waterstanden_tcm174-326696.pdf Rijkswaterstaat, 2011. Getijtafels voor Nederland 2012.

Roeleveld, W. 1974. The Groningen Coastal Area: A study in Holocene geology and low-land physical geography. Berichten van de Rijksdienst voor het Oudheidkundig Bodemonderzoek Vol 24.

Schweter, L., 2013. AutoCAD tekening ontwerp vaarweg naar Eemshaven. Bestandsnaam: VW_EEMS_tbv_effectstudies_2.dwg

- SGD, 2013. Internationaal beheerplan volgens artikel 13 kaderrichtlijn water voor het stroomgebieddistrict Eems. Beheerperiode 2010-2015. Internationale stroomgebieddistrict (SGD) Eems.
- Spiteri, C., Riegman, R., Winterwerp, H., Brinkman, B., Stolte, W., Jak,, R., Van Maren, B., 2011. Mud dynamics in the Eems- Dollard, research phase 1. literature review mud and primary production (No. 1204891-000-ZKS-0012). Deltares, Delft, The Netherlands.
- Stratingh, G.A., Venema, G.A. 1855. De Dollard of Geschied-, aardrijks- en natuurkundige beschrijving van dezen boezem der Eems. Fascimimilie uitgave 1979, Landelijke vereniging tot behoud van de Waddenzee (Harlingen) en de stichting het Groninger Landschap (Groningen).

Talke, S.A., Swart, H.E. de, 2006. Hydrodynamics and Morphology in the Eems estuary. Review of Models, Measurements, Scientific Literature, and the Affects of Changing Conditions. Concept Report. University of Utrecht. Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht.

- Van Banning, G., Grasmeijer, B.T., Hartsuiker, G., 2008. Effects of dumping silt in the Ems estuary, 3D model study Hydromorphological study for EIA of Eemshaven and EIA of fairway to Eemshaven (No. A1836R8r1). Alkyon Hydraulic Consultancy & Research, Marknesse, The Netherlands.
- Van de Kreeke, J., Haring, J., 1979. Equilibrium flow areas in the Rhine-Meuse Delta. Coast. Eng. 3: 97-111.
- Van de Kreeke, J., Robaczeweska, K., 1993. Tide-induced residual transport of coarse sediment; application to the Ems estuary. Netherlands Journal of Sea Research, 31(3): 209-219
- Van Rijn, L.C., 2007a. Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport. Journal of Hydraulic Engineering 133, 649–667.
- Van Rijn, L.C., 2007b. Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II: Suspended Transport. Journal of Hydraulic Engineering 133, 668–689.
- Van Rijn, L.C., 2007c. Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. III: Graded Beds. Journal of Hydraulic Engineering 133, 761–775.
- Van Rijn, L.C., Walstra, D.J.R., Van Ormondt, M., 2007d. Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. IV: Application of Morphodynamic Model. Journal of Hydraulic Engineering 133, 776–793.
- Van Santen, P., Spitzner, A., 2012. Monitoring baggerverspreiding Eemshaven. Meet- en verwerkingsrapport 1 (No. AV_DOC_110164_1_definitief). Aqua Vision BV, Utrecht, The Netherlands.
- Van Veen, J., 1950. Ebb and flood channel systems in the Netherlands tidal waters (English translation, published by Delft University Press). Journal of the Royal Dutch Geographical Society 67, 303– 325.
- Vroom, J., Van den Boogaard, H., Van Maren, B., 2012. Mud dynamics in the Ems-Dollard, research phase2. Analysis existing data (No. 1205711-001). Deltares, Delft, The Netherlands.
- Zijlstra, R. 1993. Het verzamelen van bagger- en stortgegevens van Eems-Dollard estuarium t.b.v. GISapplicatie en diverse belanghebbenden. Ministerie van Verkeer en Waterstaat & Rijks Hogeschool Groningen, Sector Natuur en Techniek, Civiele Techniek.

Hydromorfologie Eems-Dollard estuarium. Achtergrondstudie t.b.v. OTB MER Vaarweg Eemshaven

Colofon

HYDROMORFOLOGIE EEMS-DOLLARD ESTUARIUM. ACHTERGRONDSTUDIE T.B.V. OTB MER VAARWEG EEMSHAVEN

OPDRACHTGEVER:

Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu

STATUS:

Definitief

AUTEUR:

Bart Grasmeijer Ivo Pasmans

GECONTROLEERD DOOR:

Gijs van Banning

VRIJGEGEVEN DOOR:

Steef van Baalen

3 december 2013 077141772:D

ARCADIS NEDERLAND BV Voorsterweg 28 Postbus 248 8300 AE Emmeloord Tel +31 527 248 100 Fax +31 527 248 111 www.arcadis.nl Handelsregister 9036504