

Z4344

Opdrachtgever:


RWS-RIKZ

Stortcapaciteit en stabiliteit van het meergeulensysteem in het Eems- Dollard estuarium

Operationalisering en toepassing van het Cellenconcept

Rapport

Mei 2007

	bibliotheek postbus 177 - 2600 MH Delft waterlooptkundig laboratorium/WL
BB	67742
WL	Z 4344
EXPL	WL Delft Hydraulics



C 151319

Opdrachtgever:

RWS-RIKZ

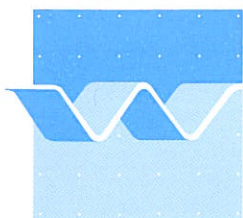
Stortcapaciteit en stabiliteit van het meergeulensysteem in het Eems- Dollard estuarium

Operationalisering en toepassing van het Cellenconcept

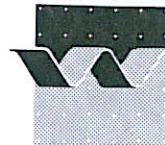
C. Jeuken, P. Tonnon, D. Verploegh

Rapport

Mei 2007



wl | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: RWS, Rijks Instituut voor Kust en Zee, Haren

TITEL: Stortcapaciteit en stabiliteit van het meergeulensysteem in het Eems-Dollard estuarium. Operationalisering en toepassing van het Cellenconcept.

SAMENVATTING:

Het Rijksinstituut voor Kust en Zee laat een MER studie uitvoeren voor het verdiepen van het zeewaarts gelegen deel van de vaargeul in het Eems-Dollard estuarium, van de Noordzee naar de Eemshaven. Dit deel van het estuarium wordt gekenmerkt door een zogenaamd meergeulensysteem. Uit eerdere studie is gebleken dat een meergeulensysteem kan degenereren naar een één-geulensysteem onder invloed van baggeren en storten. Het Cellenconcept is ontwikkeld om een uitspraak te kunnen doen over de hoeveelheid zand die jaarlijks maximaal in een geul kan worden gestort zonder dat de geul op lang termijn verzandt als gevolg van dit storten.

In de voorliggende studie is het Cellenconcept geoperationaliseerd en toegepast voor (een deel van) het meergeulensysteem in het Eems-Dollard estuarium met als doel:

- Het bepalen van de stortcapaciteit van het meergeulensysteem zeewaarts van Eemshaven.
- Het kwalitatief beoordelen van de consequenties van een vaargeulverdieping op het evenwicht en de stabiliteit het meergeulensysteem, gegeven de voorspellingen van het vaargeulonderhoud.

Uit de analyses blijkt dat, naast het huidige vaargeulonderhoud van circa $0,4 \text{ Mm}^3/\text{jr}$, waarbij het gebaggerde sediment wordt teruggestort in de vaargeulen Westereems en Randzelgat, er in de huidige situatie ruimte is om jaarlijks $0,6$ a $2,0 \text{ Mm}^3$ (scenario 2) tot $3,4$ - $4,9 \text{ Mm}^3$ (scenario 1) (extra) te storten. De specie dient hierbij te worden verdeeld over de vier geulen in de twee macrocellen.

Door de verdieping van de vaargeul neemt het vaargeulonderhoud naar verwachting (Alkyon, 2007) toe tot circa $1,2 \text{ Mm}^3/\text{jr}$. Dit betekent $0,8 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ extra baggerwerk waarvan het sediment in de geulen moet worden gestort. De huidige stortcapaciteit in het geulensysteem lijkt hiervoor toereikend te zijn. Zolang de maximale stortcapaciteiten niet langdurig (jaren-decennia) wordt overschreden zal het meergeulensysteem niet degenereren naar een één-geulensysteem als gevolg van het vaargeulonderhoud. Het evenwicht van het geulensysteem, gekarakteriseerd aan de hand van de gemiddelde geuldiepte, zal echter wel veranderen. De geulen waar gedurende langere tijd netto wordt gestort zullen een (relatieve) sedimentatie vertonen, terwijl de geulen waar netto wordt gebaggerd over het algemeen dieper zullen worden.

REFERENTIES:

VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1	C. Jeuken	20 april 2007		Z.B. Wang	
2	C. Jeuken	15 mei 2007			T. Schilperoort

PROJECTNUMMER:	Z4344
TREFWOORDEN:	Eems-Dollard estuarium, stabiliteit meergeulensysteem, baggeren en storten
AANTAL BLADZIJDEN:	27
VERTROUWELIJK:	<input type="checkbox"/> JA <input checked="" type="checkbox"/> NEE
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG <input type="checkbox"/> CONCEPT <input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Vraagstelling	1
2	Het Cellenconcept in het kort	3
3	Operationaliseren van het Cellenconcept	6
3.1	Inleiding	6
3.2	Schematiseren van het geulstelsel	6
3.3	Bruto zandtransporten	10
3.3.1	Methode	10
3.3.2	Resultaten	10
3.3.3	Discussie	12
3.4	Historische ontwikkelingen	13
3.4.1	Methode	13
3.4.2	Resultaten	16
3.4.3	Discussie	18
4	Toepassen van het Cellenconcept	19
4.1	Inleiding	19
4.2	Richtlijnen voor toepassing van het Cellenconcept	19
4.3	Resultaat - Stortcapaciteit in de macrocellen	21
4.3.1	De huidige situatie	21
4.3.2	De situatie na verdieping van de vaargeul	22
4.4	Discussie en conclusies	23

5	Conclusies en aanbevelingen	25
5.1	Conclusies	25
5.2	Aanbevelingen	26
6	Referenties	27

I Inleiding

I.1 Achtergrond

Rijkswaterstaat laat een m.e.r. studie uitvoeren voor het verdiepen van het zeewaarts gelegen deel van de vaargeul in het Eems-Dollard estuarium, van de Noordzee naar de Eemshaven. Dit deel van het estuarium wordt gekenmerkt door een systeem van twee grote parallelle geulen (eb- en vloedgeul) die gescheiden worden door overwegend subgetijdenbanken, en op sommige plaatsen met elkaar verbonden zijn door kleine kortsluitgeulen. Deze morfologische karakterisering wordt ook wel aangeduid met de term meergeulensysteem. Meergeulensystemen worden aangetroffen in diverse estuaria (o.a. Westerschelde, Humber).

Op basis van eerdere omvangrijke studies voor de Westerschelde kan worden gesteld dat de morfologische, en daarmee deels de ecologische, effecten van de voorgenomen verdieping vooral zullen worden bepaald door de grootte van het te verwachten onderhoudsbaggerwerk en de te hanteren stortstrategie (Wang et al., 1997, Winterwerp et al., 2000; Jeuken et al., 2004). Uit deze eerdere studies blijkt ook dat een meergeulensysteem kan degenereren naar een één-geulensysteem onder invloed van storten, een situatie die voor het Schelde estuarium als ongewenst wordt beschouwd. Het Cellenconcept is ontwikkeld om een uitspraak te kunnen doen over de hoeveelheid zand die maximaal kan worden gestort zonder dat het geulensysteem op langere termijn degenereert naar een één-geulensysteem als gevolg van het storten (Wang en Winterwerp, 2001, Winterwerp et al., 2001, Wang et al., ingezonden; Jeuken en Wang, ingezonden). Het concept is door WL inmiddels toegepast in MER studies, aanvragen van WVO-vergunningen en evaluaties van het vaargeulbeheer in de Westerschelde.

Voor het Eems-Dollard estuarium is nog geen lange-termijn visie beschikbaar waarin de instandhouding van het meergeulensysteem wordt geadresseerd. Vooruitlopend hierop is het, gezien de ervaringen in de Westerschelde, wel wenselijk om na te gaan hoe groot de huidige stortcapaciteit van het meergeulensysteem is en of een verdieping, en vooral het daarop volgende onderhoud van de vaargeul consequenties kan hebben voor de stabiliteit van het meergeulensysteem. Daarom heeft Rijkswaterstaat-RIKZ aan WL|Delft Hydraulics opdracht gegeven om de stortcapaciteit en stabiliteit van het meergeulensysteem in de huidige situatie en na aanleg van de verdiepte vaargeul te analyseren met behulp van het Cellenconcept.

I.2 Vraagstelling

In het voorliggende onderzoek staan de volgende twee onderzoeksvragen centraal:

1. Hoe groot is de stortcapaciteit van het meergeulensysteem zeewaarts van de Eemshaven? Hoeveel zand kan er jaarlijks in dit deel van het meergeulensysteem worden gestort zonder dat het geulensysteem op lange termijn degenereert naar een één-geulensysteem als gevolg van het storten?

2. Hoe beïnvloeden de vaargeulverdieping en het voorgestelde vaargeulonderhoud, het evenwicht en de stabiliteit van het meergeulensysteem (kwalitatief)? De huidige streefdiepte van de vaargeul is NAP-14 m. Deze wordt aangepast tot NAP-16,1m bij de zeewaarts gelegen toegang tot de Westereems en geleidelijk afnemend tot NAP-14,5m bij de Eemshaven.

Deze vragen zullen worden beantwoord door gebruik te maken van het Cellenconcept. De voorspelling van het toekomstige jaarlijkse onderhoudsbaggerwerk die in het kader van de studie voor de MER is gemaakt wordt hierbij als uitgangspunt gehanteerd (Alkyon, 2007).

De achtergronden van het Cellenconcept worden in hoofdstuk 2 beknopt samengevat. De resultaten van de operationalisering van het Cellenconcept voor het Eems-estuarium worden gepresenteerd in hoofdstuk 3. De toepassing van het concept, ter beantwoording van de onderzoeksvragen, staat centraal in hoofdstuk 4. Tot slot, worden in Hoofdstuk 5 de belangrijkste conclusies samengevat en worden enkele aanbevelingen gedaan.

2 Het Cellenconcept in het kort

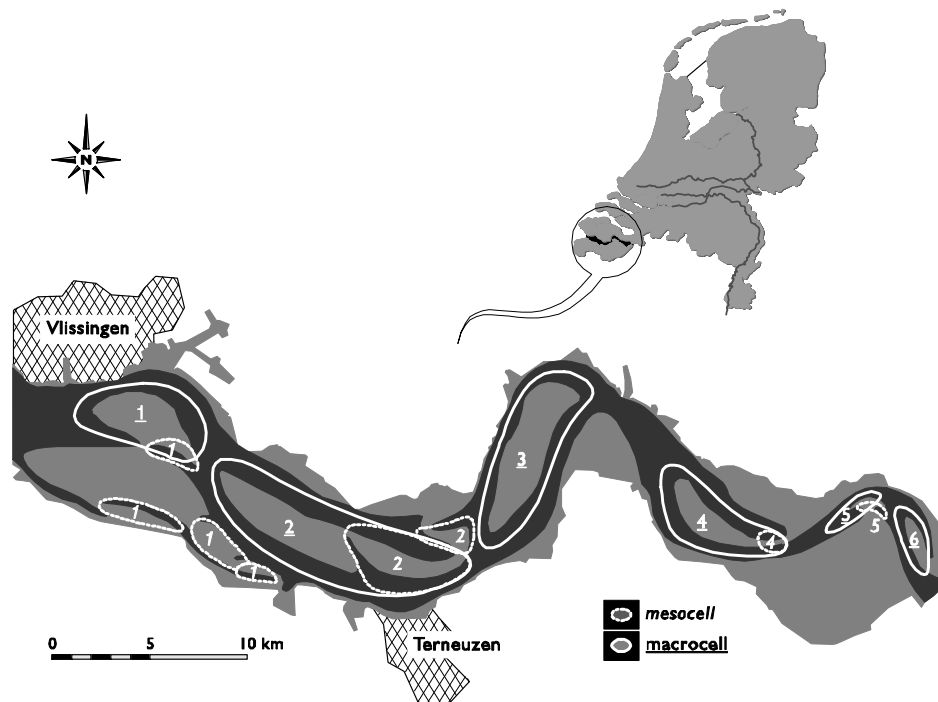
Het Cellenconcept is ontwikkeld in het kader van de studie voor de Lange-termijn Visie voor het Schelde estuarium (Winterwerp et al., 2000; RWS en MVG, 2001). De basis voor het concept was al enkele jaren eerder gelegd ten behoeve van de Milieuaspecten studie (Wang et al., 1997, RWS, 1998). Het concept bestaat uit twee onderdelen:

1. Een schematisering van een systeem van geulen en platen in zogenaamde macrocellen (Van Veen, 1950; Jeuken, 2000, Winterwerp et al, 2001), en;
2. een (wiskundige) stabiliteitsanalyse van het geschematiseerde geulstelsel (Wang en Winterwerp, 2001; Wang et al., ingezonden).

De essentie van beide onderdelen wordt in de navolgende twee paragrafen kort samengevat.

Schematisering van een meergeulensysteem

Meergeulensysteem zoals die voorkomen in trechtervormige estuaria, zoals het Schelde en het Eems-Dollard estuarium, kunnen worden geschematiseerd in zogenaamde macrocellen op basis van morfologische kenmerken en op basis van patronen van resttransporten en -stromingen. Iedere macrocel bestaat uit twee parallelle geulen: een door de eb gedomineerde ebgeul met daarnaast een door de vloed gedomineerde vloedgeul. Deze geulen zijn meestal van elkaar gescheiden door inter- of subgetijdenbanken en eventueel met elkaar verbonden door kleinere kortsluitgeulen. De kortsluitgeulen vormen de kleinere mesocellen. Figuur 2-1 toont ter illustratie de schematisering van het meergeulensysteem in de Westerschelde in zes macrocellen.



Figuur 2-1 Schematisering van het meergeulensysteem in de Westerschelde in zes macrocellen (Jeuken et al., ingezonden).

Stabiliteitsanalyse

De invloed van baggeren en storten op het morfologische evenwicht van een geschematiseerde (macro)cel is onderzocht door middel van een stabiliteitsanalyse (zie Intermezzo stabiliteit).

Intermezzo – stabiliteit

De stabiliteit van een cel voor relatief kleine verstoringen wordt bepaald door het evenwicht tussen de transportcapaciteit van elk van de geulen onderling en van het geulensysteem als geheel. Een kleine verondieping (storting) in één van de geulen leidt lokaal tot het vernauwen van de geuldoorsnede en daarmee tot het vergroten van de lokale stroomsnelheid, waardoor de transportcapaciteit toeneemt, en de verondieping geërodeerd wordt. Dit is dus een stabiele situatie. Indien echter de verondieping een zekere grootte overschrijdt, neemt de hydraulische ruwheid van die geul snel toe, met als gevolg dat er minder water door de verondiepte geul, en meer water door de verdiepte geul stroomt. Het gevolg is dan een afnemende transportcapaciteit in de verondiepte geul. Dit is een zichzelf versterkend proces: de verondiepte geul wordt steeds ondieper en degenereert. Dit is dus een instabiele situatie. Een stabiliteitsanalyse kan dit proces kwantificeren. Met behulp van deze analyse is onderzocht wanneer een verstoring, in de vorm van baggeren en/of storten, in de geulen uitdempt (stabiel situatie) of groeit (instabiele situatie). De groei van een verstoring wordt geïnterpreteerd als de aanzet tot een degeneratie van het geulplaatstelsel.

De stabiliteitsanalyse is gebaseerd op de volgende uitgangspunten (Wang, 1997; Winterwerp et al., 2000, Wang en Winterwerp, 2001, Wang et al. ingezonden):

1. Een stabiel geulensysteem is een systeem met twee geulen, al dan niet gescheiden door intergetijdengebieden, die beiden open blijven. Een van beide geulen wordt gebruikt als vaargeul (de hoofdgeul). De andere geul is nevengeul.
2. Er bestaat een evenwichtssituatie waarin het geulensysteem in een macrocel een bruto zand transportcapaciteit T_e heeft.

Om na te gaan hoeveel er in een geul van een stabiele macrocel in evenwicht gestort kan worden, wordt de ingreep gerelateerd aan T_e . Uit de analyse van de stabiliteit van een dergelijk systeem blijkt dat er een kritische grens bestaat voor de hoeveelheid sediment die langdurig in een geul kan worden gestort zonder dat het twee-geulensysteem degenereert ('instabiel wordt') naar een één-geul systeem. De grootte van deze stortcapaciteit in een stabiel geulensysteem in evenwicht, het stortcriterium SC_0 , bedraagt ongeveer:

- $SC_0=5\% \cdot T_e$ wanneer in de vaargeul wordt gebaggerd en het sediment in de nevengeul van dezelfde cel wordt gestort.
- $SC_0=10\% \cdot T_e$ wanneer er niet in de vaargeul wordt gebaggerd. Het sediment dat in de nevengeul wordt gestort is afkomstig uit een ander gebied.

Door het storten van hoeveelheden sediment beneden deze kritieke waarde verandert de diepte van de geul wel (neemt af), maar verzand de geul niet (blijft open= stabiel, maar niet in oorspronkelijk evenwicht).

Uit een aanvullende studie (Wang et al, ingezonden) zijn de aannamen die ten grondslag liggen aan deze stabiliteitsanalyse onderbouwd. Hieruit is o.a. gebleken dat een (stabiel) geulensysteem dat morfologisch wel verandert, c.q. niet in evenwicht is, een andere waarde voor de kritische stortcapaciteit heeft: in een van 'nature' eroderende geul is deze capaciteit

groter dan 5-10% van het bruto sedimenttransport. In een sedimenterende geul is deze kritische waarde juist kleiner. Wanneer het geulstelsel niet in evenwicht is (geweest), is T_c in principe niet bekend. In die gevallen moet het evenwichtstransport worden benaderd door het bruto transport T voor een gegeven situatie T (bijvoorkeur met onzekerheidsmarge) en moet het stortcriterium worden gecorrigeerd (zie hoofdstuk 4 voor richtlijnen). Analyses van historische waarnemingen bevestigen het bestaan en de globale grootte van het stortcriterium (Jeuken et al, 2003, Jeuken et al., ingezonden).

Het stortcriterium en schattingen van de absolute grootte van dit criterium kunnen worden gebruikt bij het evalueren van het vaargeulbeheer en het vormgeven aan een stortstrategie op het niveau van gehele geulen (= op hoofdlijnen). Richtlijnen voor het toepassen van het Cellenconcept voor deze doeleinden worden gegeven in Hoofdstuk 4.

3 Operationaliseren van het Cellenconcept

3.1 Inleiding

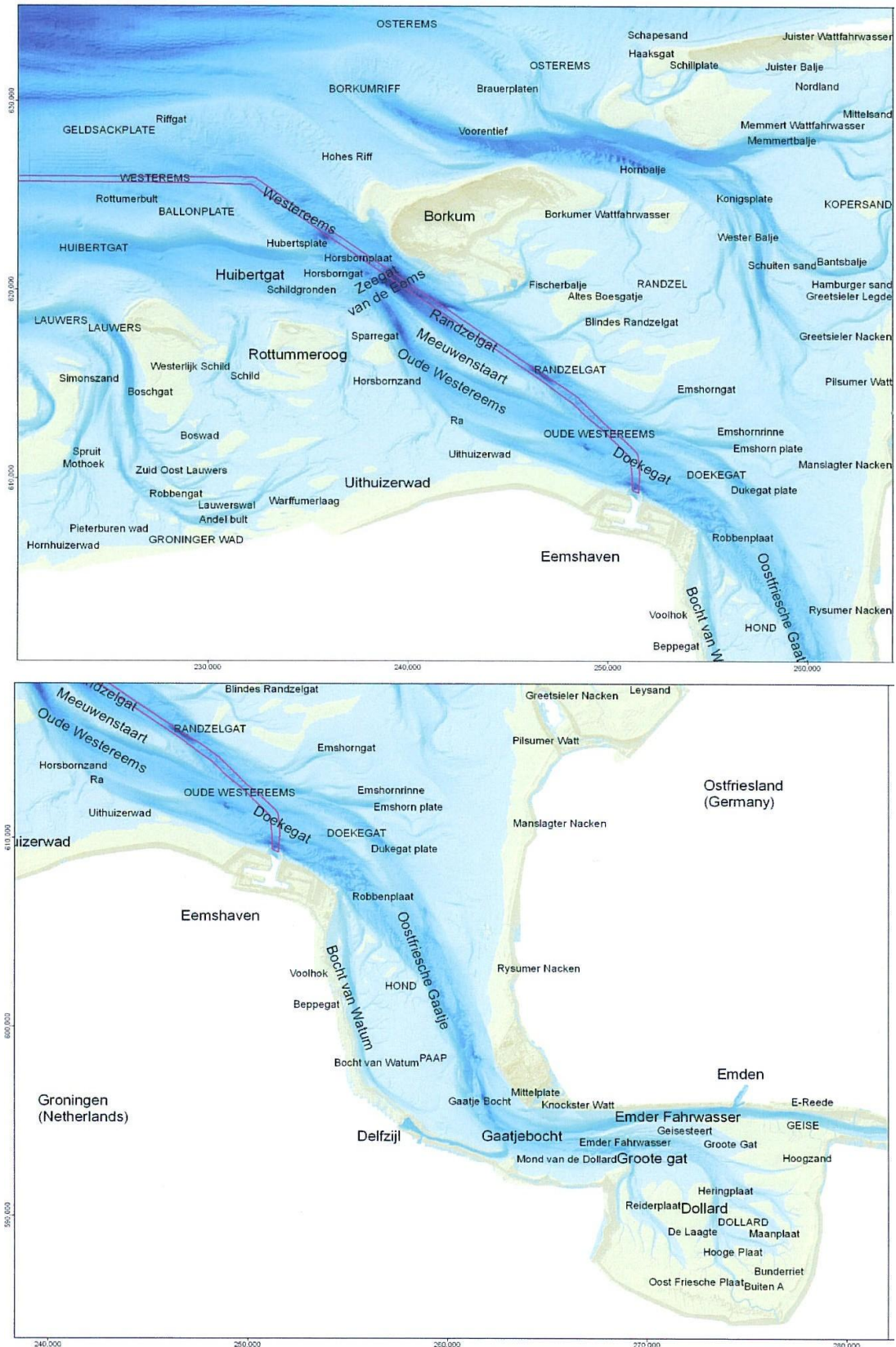
Het Cellenconcept is nog niet operationeel voor het Eems-estuarium. Hiervoor zijn de volgende voorbereidende analyses uitgevoerd:

1. Schematiseren van het meergeulensysteem in macrocellen.
2. Bepaling van de bruto zandtransportcapaciteit van het geulensysteem in de macrocellen zeewaarts van Eemshaven.
3. Bepaling van de historische ontwikkelingstendensen van de individuele geulen zeewaarts van Eemshaven.

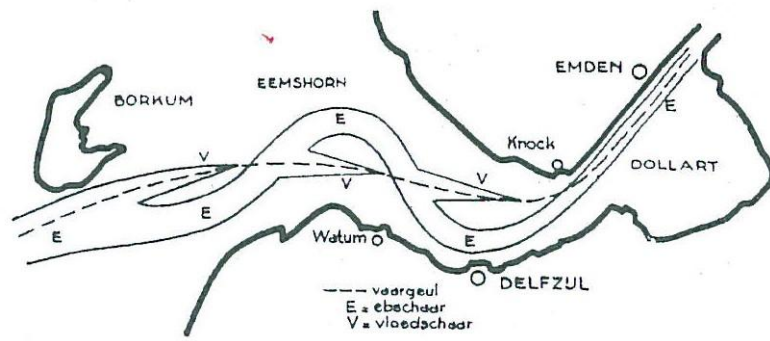
Voor het schematiseren van het meergeulensysteem en het kwantificeren van de morfologische veranderingen (punten 1 en 2) is gebruik gemaakt van eerdere studies en de beschikbare morfologische kaarten en informatie over baggeren, zoals die in het kader van de studie voor de m.e.r. door Alkyon (2007) zijn samengesteld. Aanvullend hierop is door de opdrachtgever informatie verstrekt over zandwinning en de plaatsen en hoeveelheden van zandstortingen ten behoeve van het vaargeulonderhoud gedurende de periode 2003-2006. Voor de bepaling van de bruto transporten is gebruik gemaakt van het waterbewegingsmodel dat eveneens in de m.e.r. studie is gebruikt. Dit Waqua in Simona model is met het oog op het berekenen van de bruto zandtransporten omgezet naar Delft3D. Nadere informatie over de gehanteerde methoden en de resultaten van deze voorbereidende analyses worden in de navolgende paragrafen gepresenteerd en kort bediscussieerd.

3.2 Schematiseren van het geulensysteem

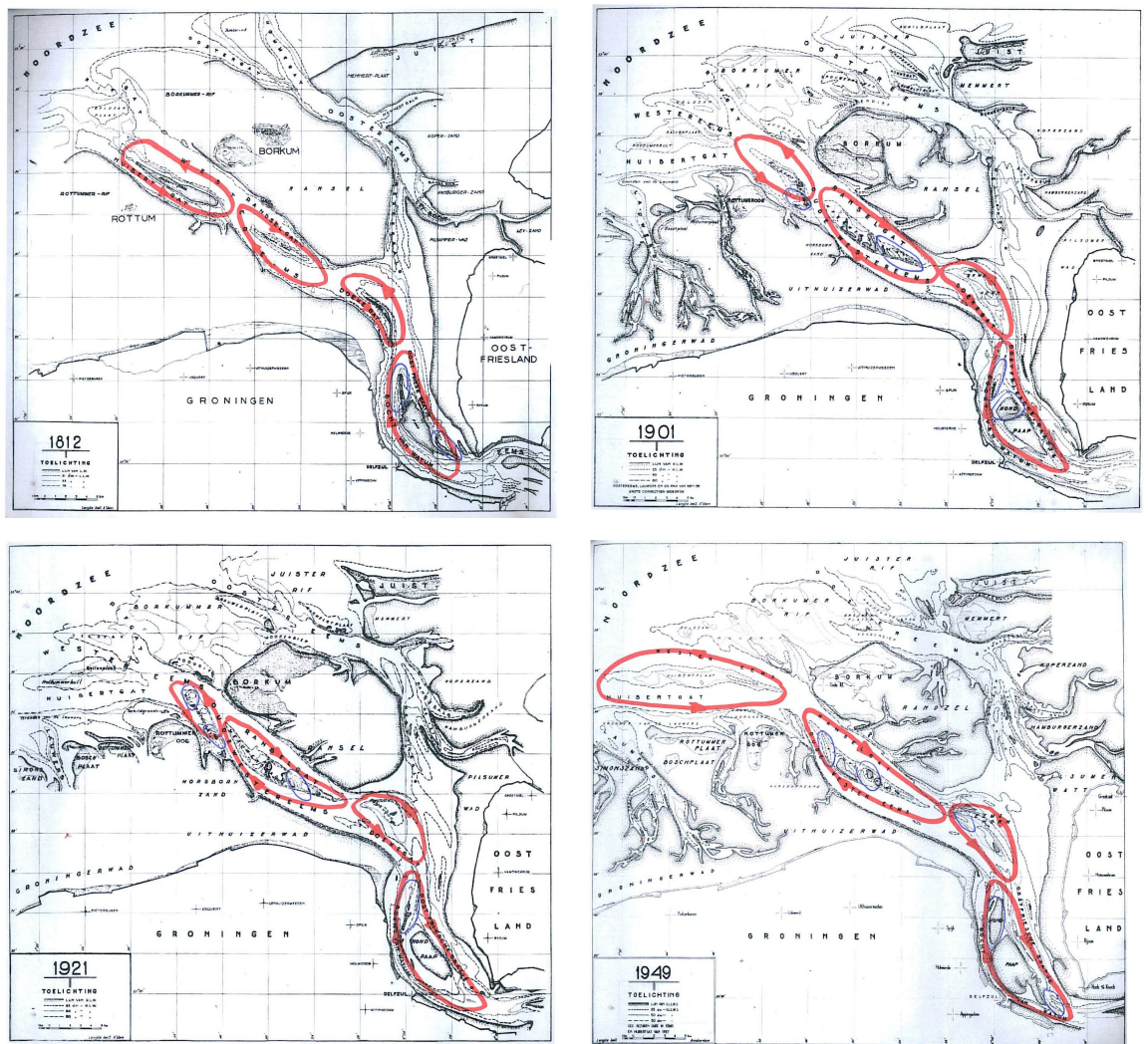
Van Veen (1950) was de grondlegger van het morfologisch schematiseren van de plaatgeulensystemen in de Nederlandse getijdewateren. Hierin onderscheidt hij eb- en vloedgeulen op basis van morfologische kenmerken die hij waarneemt uit dieptekaarten (en vermoedelijk fysische kenmerken die hij afleidt uit de eerste debietmetingen uit de jaren dertig): ebgeulen worden aan de zeezijde begrensd door een relatieve ondiepte, een drempel, terwijl vloedgeulen landwaarts een drempel hebben. Op basis hiervan classificeert Van Veen (1950) de geulen Huibergat en Randzelgat van het meergeulensysteem als vloedgeulen (zie Figuur 3-1 en Figuur 3-2). De meer gekromde geulen Westereems en Oude Westereems vormen de grote ebgeulen. Ook landwaarts van de Eemshaven is nog sprake van een meergeulensysteem: Naast de vloedgeulen Doekegat en Oost Friesche Gaatje liggen de relatief kleine ebgeulen Eemshoorn en Bocht van Watum. Uit hydrografische kaarten van de periode 1812-1949 blijkt dat dit landwaarts gelegen deel van het meergeulensysteem duidelijke tekenen van degeneratie naar een één-geul systeem vertoont op een tijdschaal van decennia (Figuur 3-3).



Figuur 3-1 Het meergeulensysteem van het Eems-Dollard estuarium.



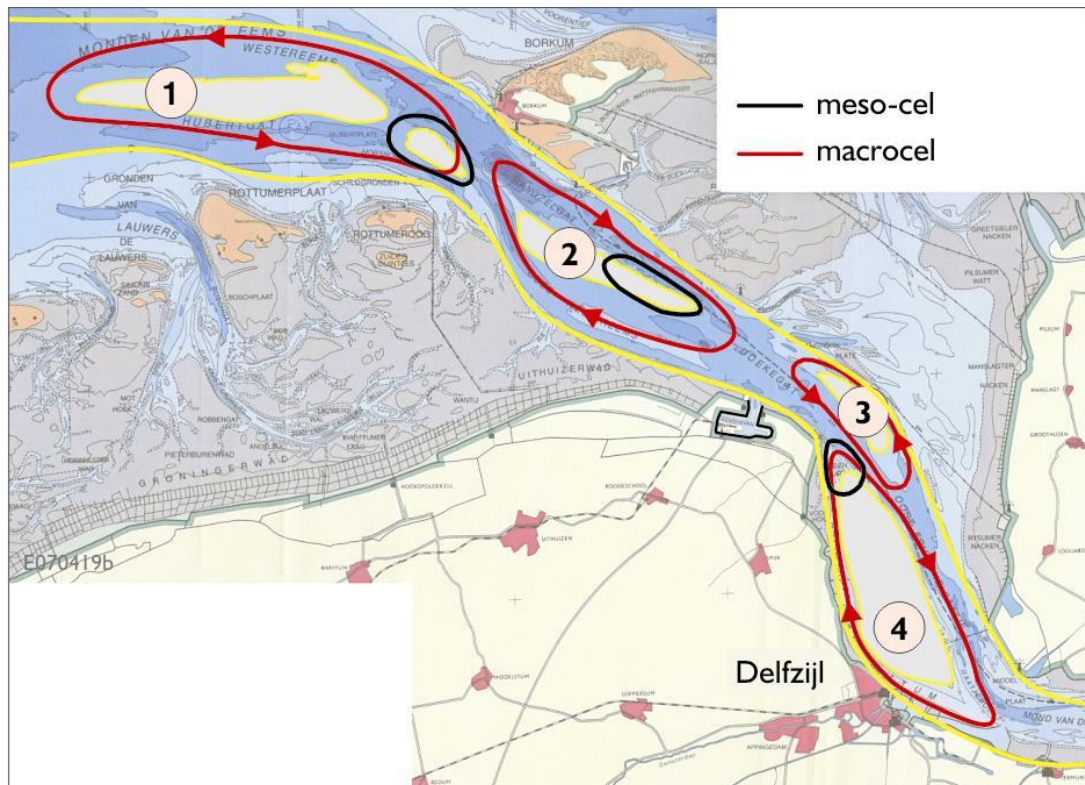
Figuur 3-2 Schematisering van het meergeulensysteem in het Eems-Dollard estuarium in eb- en vloedgeulen volgens Van Veen (1950).



Figuur 3-3 Hydrografische kaarten van de Eems-Dollard voor de periode 1812-1949. De vier macrocellen (in rood) en verschillende mesocellen kunnen op de kaarten vanaf 1812 worden waargenomen. De twee landwaarts gelegen macrocellen vertonen sinds circa 1900 tekenen van degeneratie.

De meer recente studies van De Jonge (1992), Van de Kreeke en Robaczewska (1993) en Kiezebrink (1996) gaan in op de grootschalige patronen van reststromingen en –transporten op basis van metingen en berekeningen. Deze studies bevestigen het bovengenoemde beeld dat Van Veen (1950) schetst voor het geulensysteem zeewaarts van Eemshaven. Met behulp van het beschikbare Delft3D model (zie §3.3.1) zijn indicatieve¹ patronen van resttransporten berekend voor een springtij. Deze berekening bevestigt eveneens de morfologische schematisering zeewaarts van de Eemshaven. Landwaarts van de Eemshaven zijn de morfologische kenmerken van gescheiden eb- en vloedgeulen nog wel aanwezig. Het verschil in de afmetingen tussen de beide geulen is echter dermate groot geworden door de degeneratie gedurende de afgelopen decennia dat het eb- vloedgeul karakter nauwelijks meer tot uitdrukking komt in de resttransporten².

Bovenstaande betekent dat in het meergeulensysteem van het Eems-Dollard estuarium vier macrocellen kunnen worden onderscheiden. Iedere macrocel bestaat uit een relatief rechte



Figuur 3-4 Schematisering van het meergeulensysteem in het Eems-Dollard estuarium in macrocellen, eb en vloedgeulen.

¹ indicatief omdat de transporten betrekking hebben op een niet-cyclisch getij.

²Zo wordt de vloedgeul Randzelgat gekenmerkt door een vloeddominantie langs de oostzijde van de geul en ebdominantie langs de westzijde van de geul. In het Oostfriesche Gaatje zijn de berekende residuele zandtransporten in de huidige situatie overwegend zeewaarts gericht. Dit verschil tussen globale morfologische kenmerken en resttransporten hangt vermoedelijk samen met de degeneratie van de macrocel richting een 1-geul systeem. In de situatie van 1949 en daarvoor zal naar verwachting wel sprake zijn geweest van vloedgedomineerde resttransporten. Verder kan het verschil tussen morfologie en richting van het resttransport ook deels worden veroorzaakt door een onvolledige weergave van de zoutgradiënten in het 2D model.

vloedgeul en een gekromde ebgeul die van elkaar gescheiden worden door sub- of intergetijdengebieden (Figuur 3-4). Naast deze macrocellen kunnen ook enkele mesocellen worden gedefinieerd die samenhangen met het voorkomen van kortsluitgeulen. Het bestaan van de vier macrocellen is waar te nemen op de hydrografische kaarten vanaf (tenminste) 1812 (zie Figuur 3-3).

Hoewel het meest zeewaarts gelegen geulsysteem (macrocel 1 in Figuur 3-4) in de ebdelta ligt is het toch als macrocel geclassificeerd. De motivatie hiervoor is tweeledig. Enerzijds verdelen zowel de ebstroom als de vloedstroom zich hier over twee min of meer parallelle geulen. Anderzijds is het huidige (achterstallige) vaargeulonderhoud in dit geulsysteem het grootst en zal het onderhoud na de verdieping in deze macrocel naar verwachting ook het meeste toenemen (Alkyon, 2007).

3.3 Bruto zandtransporten

3.3.1 Methode

De bruto sediment transportcapaciteit van het geulsysteem op macroschaal S_{cap} is gedefinieerd als,

$$S_{cap} = \frac{1}{T} \int_0^T |S_0| dt = \frac{1}{T} \int_0^T (|S_1| + |S_2|) dt \quad (1)$$

Hierin is S_0 het op lange-termijn representatieve sediment transport door de cel. S_1 en S_2 zijn de sedimenttransporten door de individuele geulen en T is de beschouwde getijperiode.

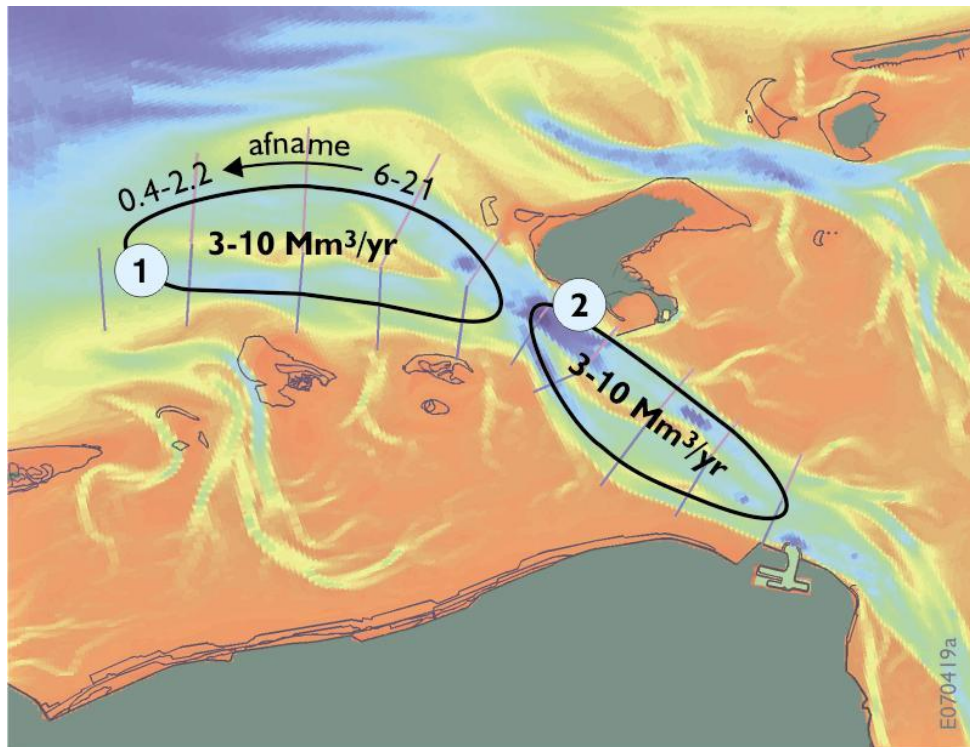
Voor de bepaling van de bruto transportcapaciteit per macrocel is gebruik gemaakt van het DELFT3D model dat in het kader van de M.E.R. studie is opgezet en toegepast (Alkyon, 2007). Omdat de waarde van de transportcapaciteit ruimtelijk kan variëren zijn in beide macrocellen vier tot vijf raaien gedefinieerd (zie Figuur 3-5). De transporten door deze raaien zijn berekend voor de doortij-springtij cyclus (14 dagen) tijdens de periode 8 maart tot 22 maart 2001. De berekende transporten zijn vervolgens vertaald naar bodem in situ hoeveelheden door rekening te houden met de porositeit (vermenigvuldigen van de berekende transporten met de factor $1/(1-0,4)$).

De berekening van zandtransporten kent diverse onzekerheden. Daarom is een kleine gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin is gekeken naar de invloed van de gekozen transportformulering (Engelund-Hansen, Van Rijn 1993 en Van Rijn 2004), de gehanteerde korrelgrootte (200 μm versus 175 μm , ontleend aan de Waddenatlas) en de invloed van de verdieping van de vaargeul. Op basis van deze berekeningen is voor beide macrocellen een range voor de ruimtelijk gemiddelde bruto transportcapaciteit per jaar bepaald.

3.3.2 Resultaten

De resultaten voor de geulsystemen Westereems-Hubertgat (macrocel 1) en Randzelgat-Oude Westereems (macrocel 2) zijn samengevat in en Tabel 3-1. Hieruit kan volgende worden afgeleid:

- De bruto zandtransport capaciteit in beide macrocellen bedraagt ongeveer $3-10 \text{ Mm}^3/\text{jr}$, waarbij de bijdrage van de twee individuele geulen ongeveer even groot is. De maximale diepte gemiddelde zandconcentraties tijdens springtij in het midden van de geulen varieert tussen 10 mg/l en 100 mg/l , afhankelijk van de locatie (berekening 1).
- De marge in deze berekende transportcapaciteit, $3-10 \text{ Mm}^3/\text{jr}$, is vrij groot en wordt bepaald door de gekozen transportformulering (variatie factor 3). De invloed van de beschouwde korrelgrootte variatie op de berekende transporten is relatief klein (factor 1,3). De invloed van de *aanleg* van de verdiepte vaargeul (waarbij de aanlegspecie wordt onttrokken) op de berekende bruto transporten is verwaarloosbaar.
- De bruto transportcapaciteit wordt ook gekenmerkt door een ruimtelijke variatie. Deze variatie komt tot uitdrukking in de maximum en minimum waarden per berekening zoals die in Tabel 3-1 zijn samengevat. In macrocel 2 variëren de transporten ruimtelijk met ongeveer een factor 1,5. In macrocel 1 is deze variatie opvallend groot: de bruto transportcapaciteit neemt in zeewaartse richting af met een factor 10. Deze afname blijkt samen te gaan met afnemende maximum stroomsnelheden. Een evaluatie van de empirische relatie tussen het vloed volume en het doorstroomoppervlak (Alkyon, 1997) bevestigt dit beeld en suggereert dat het doorstroomoppervlak van het zeegat te klein is voor het getijvolume dat er door heen stroomt (en daardoor ook erodeert, zie §3.4). Dit te kleine doorstroomoppervlak wordt toegeschreven aan het feit dat het oostelijk gelegen Waddeneiland Borkum min of meer is gefixeerd door oeververdedigingen, terwijl het westelijk gelegen eiland Rottumeroog in oostelijke richting verplaatst met als gevolg dat het doorstroomoppervlak van het zeegat afneemt, c.q. onder (zand)druk staat. Bij het bepalen van de stortcapaciteit in de huidige en toekomstige situatie moet rekening worden gehouden met deze grote ruimtelijke variatie in de bruto transporten in macrocel 1.



Figuur 3-5 Schematisch overzicht van berekende bruto transporten (in Mm^3/jr) in de twee macrocellen. De raaien waarvoor de transporten zijn bepaald zijn eveneens weer gegeven.

Tabel 3-1 Berekende ruimtelijk gemiddelde bruto zandtransporten (in Mm^3/jr bodem in situ) voor de macrocellen en de individuele geulen. De ruimtelijke variatie in de bruto transporten in een macrocel en geul komt tot uitdrukking in de maximale en minimale waarden per berekening. EH = Engelund Hansen, VR93 = Van Rijn 1993, VR04 = Van Rijn 2004 (met ruwheidsvoorspeller).

Berekening nummer		1	2	3	4	5
Transport formulering		EH	EH	VR93	VR93	VR04
D50 (um)		200	200	200	175	200
Bodemligging		huidig	verdiept	huidig	huidig	huidig
Cel 1	gemiddeld	4.6	4.6	8.0	9.9	2.7
	maximum	8.7	8.8	17.4	21.1	6.6
	minimum	1.5	1.5	1.6	2.2	0.4
<i>Westereems</i>	<i>gemiddeld</i>	<i>2.1</i>	<i>2.1</i>	<i>3.7</i>	<i>4.6</i>	<i>1.3</i>
	maximum	4.1	4.2	8.7	10.5	3.7
	minimum	0.5	0.5	0.5	0.7	0.1
<i>Hubertgat</i>	<i>gemiddeld</i>	<i>2.1</i>	<i>2.1</i>	<i>3.5</i>	<i>4.3</i>	<i>1.1</i>
	maximum	4.6	4.6	8.7	10.6	2.9
	minimum	0.8	0.8	1.0	1.3	0.2
Cel 2	gemiddeld	4.1	4.0	8.4	10.3	2.9
	maximum	4.8	4.8	9.7	11.9	3.6
	minimum	3.3	3.3	6.5	8.1	2.1
<i>Oude Westereems</i>	<i>gemiddeld</i>	<i>2.0</i>	<i>2.0</i>	<i>4.1</i>	<i>5.0</i>	<i>1.5</i>
	maximum	3.2	3.2	6.7	7.9	2.4
	minimum	0.6	0.6	1.1	1.5	0.4
<i>Randzelgat</i>	<i>gemiddeld</i>	<i>2.1</i>	<i>2.1</i>	<i>4.3</i>	<i>5.2</i>	<i>1.4</i>
	maximum	2.7	2.7	5.7	7.0	2.0
	minimum	1.6	1.6	2.8	3.5	0.8

3.3.3 Discussie

De waterbeweging in het model is gevalideerd (Alkyon, 1997). Dit geldt echter niet voor de zandtransporten. Om desondanks een gevoel te kunnen krijgen voor de representativiteit van deze resultaten kan een vergelijking worden gemaakt met de bruto transporten zoals die destijds voor de Westerschelde zijn bepaald en vergeleken zijn met metingen (Wang et al., 1997; Winterwerp et al., 2000; Jeuken, 2001).

De breedte van de beschouwde macrocellen in het Eems estuarium (ca. 6-8 km) is enigszins groter dan die van de macrocellen in het westelijk deel van de Westerschelde (ca. 5 km), terwijl de vloedvolumina door de cellen van dezelfde orde van grootte zijn ($700\text{-}900 \text{ Mm}^3$, bij gemiddeld getij). In de transport bepaling voor de Westerschelde is eveneens gebruikt gemaakt van de formulering van Engelund-Hansen. Voor de D_{50} van het bodemsediment is voor de Westerschelde een waarde van $190\text{-}210 \mu\text{m}$ aangenomen, wat ook vergelijkbaar is met de hier gehanteerde waarde van $200 \mu\text{m}$. De resulterende bruto transportcapaciteit in de Westerschelde bedraagt $13\text{-}20 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ (in situ). Dit is een factor 3 tot 4 groter dan de waarde zoals deze nu zijn bepaald voor de geulen in het Eems-Dollard estuarium (uitgaande van berekening 1). Dit lijkt op het eerste oog een groot verschil. Het verschil kent echter een hydrodynamische oorzaak: De berekeningen voor de Westerschelde hebben betrekking op gemiddelde springtijcondities, terwijl in de berekeningen voor de Eems-Dollard een doortij-springtij cyclus is gebruikt. Dit verklaart grotendeels waarom de berekende bruto transporten in het geulsysteem van het Eems-estuarium kleiner zijn (immers het transport is

een functie van de snelheid tot de vijfde macht). Daarnaast lijken de stroomsnelheden in het Eems Dollard estuarium wat lager te zijn dan in de Westerschelde: alleen in het zeegat lijken tijdens springtij stroomsnelheden tot 1,2 m/s voor te komen, terwijl in de Westerschelde de maximale stroomsnelheden op diverse plaatsen kunnen oplopen tot 1,5 m/s. Op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat de orde van grootte van de berekende bruto zandtransporten voor het Eems estuarium wel realistisch is.

In de transportberekening is geen rekening gehouden met de sediment loswoelende werking van golven. De belangrijkste reden hiervoor is dat dit fenomeen (nog) niet is meegenomen in de stabiliteitsanalyse die ten grondslag ligt aan het Cellenconcept. Het is echter denkbaar dat door het gecombineerde effect van (morfologisch maatgevende) golfwerking en getijstroming de bruto zandtransporten groter worden. De berekende range in de transporten is naar verwachting echter voldoende groot om dit effect te ondervangen (Van Rijn 2004 met loswoeling door golven geeft naar verwachting geen grotere transporten dan Van Rijn 1993 met alleen getij).

Een bruto zand transport capaciteit van 3-10 Mm³/jr impliceert volgens de theorie, die ten grondslag ligt aan het Cellenconcept, een stortcapaciteit die varieert tussen de 0,15 en 1,0 Mm³/jr voor een individuele geul. De transport- en stortcapaciteit worden echter ook bepaald door de ontwikkelingstendens van een geul (Jeuken et al., ingezonden): in een van nature eroderende geul is de capaciteit groter, terwijl in de sedimenterende geul deze capaciteit juist kleiner is. Deze ontwikkelingstendensen worden in de volgende paragraaf in kaart gebracht.

3.4 Historische ontwikkelingen

3.4.1 Methode

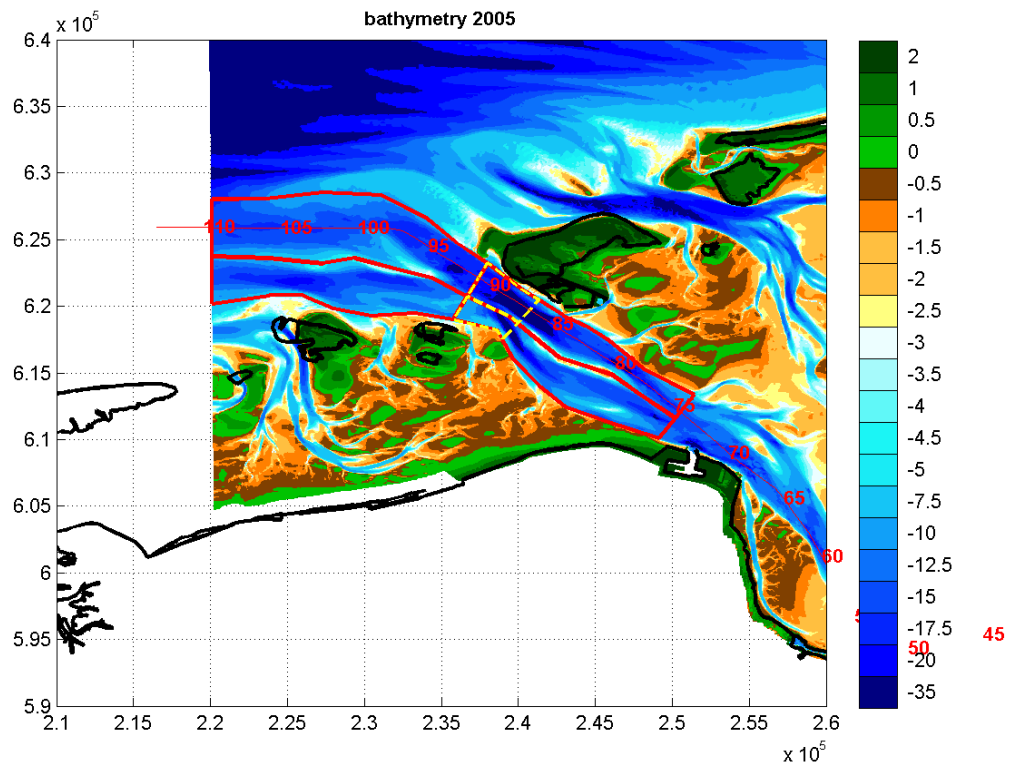
Voor de bepaling van de stortcapaciteit van de geulen in het meergeulensysteem is het van belang om de recente tendensen van geulontwikkeling op macroschaal te kennen: is een geul morfologisch in evenwicht, erodeert de geul of verondiept de geul en in hoeverre is deze ontwikkeling beïnvloed door netto baggeren en/of storten? Om deze vragen te kunnen beantwoorden is de volgende analyse uitgevoerd.

Allereerst is voor het geschematiseerde geulsysteem (§3.2) een geulgeoriënteerde morfologische vakindeling gemaakt waarin de individuele geulen op macroschaal worden onderscheiden (Figuur 3-6). In deze vakindeling is de scheiding tussen de eb- en vloedgeulen binnen een macrocel globaal bepaald langs de hoogste delen van de sub- en intergetijdenplaten 'Ballonplaat' (macrocel 1) en 'Meeuwenstaart' (macrocel 2). Naast deze vakindeling, die gebaseerd is op de onderscheiden macrocellen, zijn voor de geulen Randzelgat en Oude Westereems (macrocel 2) ook de volumeveranderingen in de zeewaarts gelegen geuldelen, die het zeegat vormen, bepaald. De vakindeling is toegepast voor het kwantificeren van de opgetreden morfologische veranderingen op basis van verschilkaarten en hypsometrische krommen.

Voor de vier onderscheiden morfologische eenheden zijn vervolgens de volgende volumeveranderingen bepaald (zie bijvoorbeeld Jeuken et al., 2003; ingezonden):

1. De totale volumeverandering, ΔV_{tot} (in Mm^3/jr) af te leiden uit opeenvolgende gemeten dieptekaarten (door kubering van verschilkaarten). De hypsometrische krommen zijn gebruikt om de veranderingen in de gemiddelde geuldiepte (t.o.v. NAP) te bepalen.
2. Het netto volume van de ingrepen, ΔV_I (in Mm^3/jr), wordt bepaald als de som van baggeren en storten in een geul. Voor het vertalen van de beunkuubs naar bodem in situ hoeveelheden is een uitleveringspercentage voor fijn zand van 10% (Bray et al., 1997) gehanteerd. Alleen voor de periode 2002-2006 is informatie over baggeren, storten en zandwinning beschikbaar (Tabel 3-2 en Figuur 3-7). Voor de periode 1995-1999 is nog wel aanvullende informatie over het jaarlijks baggervolume ten behoeve van het vaargeulonderhoud beschikbaar, maar niet waar dit materiaal gestort is.
3. De afgeleide netto volumeverandering, ΔV_{netto} (in Mm^3/jr) wordt veroorzaakt door de waterbeweging en wordt ook wel de 'natuurlijke' volumeverandering genoemd. Deze volumeverandering wordt afgeleid uit de eerste twee volumeveranderingen volgens: $\Delta V_{netto} = \Delta V_{tot} - \Delta V_I$. Door de beperkte beschikbaarheid van de ingreepgegevens kon deze volumeverandering alleen worden bepaald voor de periode 2000-2005. Hierbij zijn de ingreepgegevens voor de periode 2002-2006 representatief verondersteld voor de gehele periode 2000-2005.

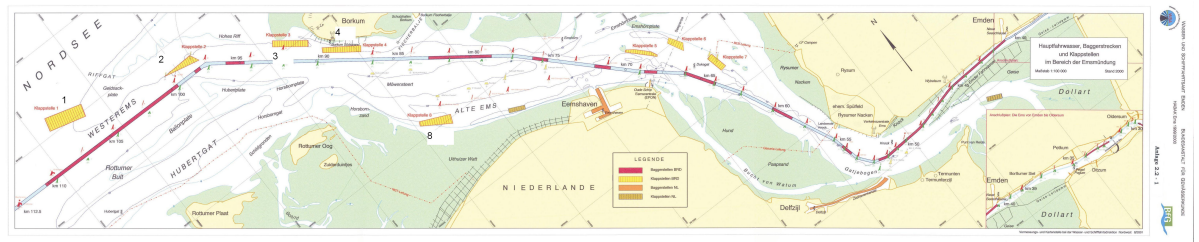
Een negatieve volumeverandering van ΔV_{tot} en/of ΔV_{netto} duidt op erosie (verlies van zand) dan wel netto baggeren (in geval van ΔV_I). Een positieve waarde betekent sedimentatie of netto storten.



Figuur 3-6 Gehanteerde morfologische vakindeling voor de analyse van de ontwikkeling van de individuele geulen. De rode getallen en lijn geven de km-indeling van het vaargeul-trace weer. De gestippelde gele lijn geeft het gebied van het zeegat weer.

Tabel 3-2 Ingreepegegevens (bodem in situ hoeveelheden in Mm^3/jr) voor de periode 2002-2006

Cel	Naam	Ingrepen periode 2002-2006			ΔV_I som
		Baggeren	Storten	Zandwinning	
1	Westereems	-0.42	0.40	0.00	-0.02
	Hubertgat	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Randzelgat	0.00	0.00	0.00	0.00
	Oude Westereems	0.00	0.14	0.00	0.14



Figuur 3-7 Locaties voor baggeren en storten ten behoeve van het vaargeulonderhoud.

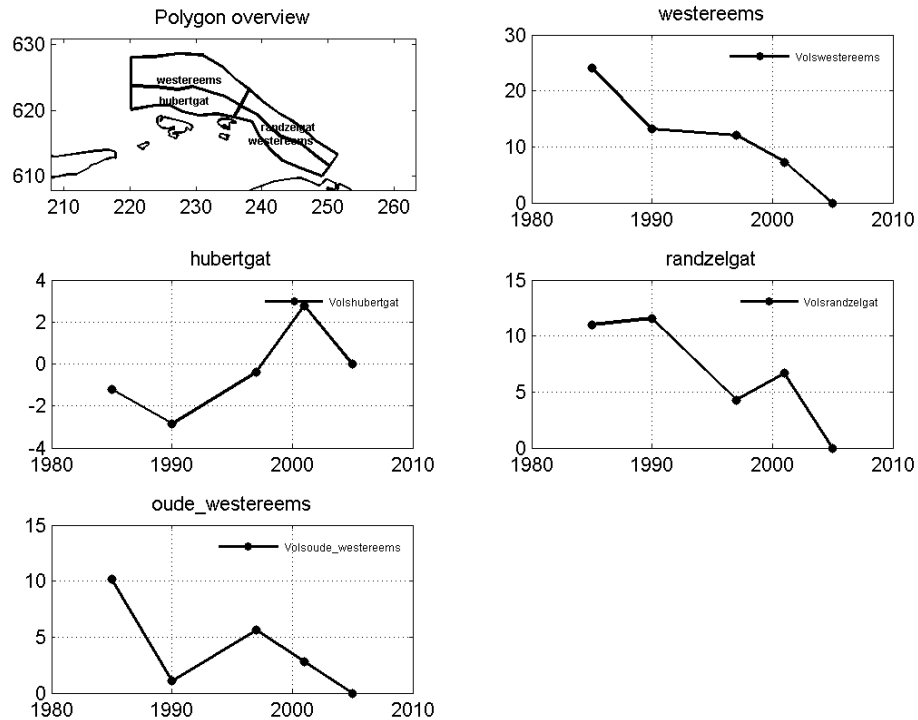
Tijdreeksen van de cumulatieve volumeveranderingen, aangevuld met informatie over de verandering in de gemiddelde diepte van een geul, geven informatie over de ontwikkelingstendens van een geul. Hierin worden vier situaties onderscheiden (Jeuken et al., ingezonden), die van belang zijn voor het bepalen van de stortcapaciteit (Hoofdstuk 4):

1. Een geul is in evenwicht als zowel de jaarlijkse volumeverandering ΔV_{tot} en ΔV_{netto} ongeveer gelijk aan nul zijn en de gemiddelde niet of nauwelijks verandert.
2. Er is sprake van een natuurlijke tendens tot erosie/sedimentatie al dan niet versterkt of verzwakt door baggeren en/of storten als ΔV_{tot} en ΔV_{netto} hetzelfde teken hebben en de gemiddelde geuldiepte geleidelijk verandert.
3. De geulontwikkeling wordt gestuurd door baggeren of storten wanneer het teken van ΔV_{tot} tegengesteld is aan dat van ΔV_{netto} en de gemiddelde geuldiepte geleidelijk verandert.
4. Een situatie waarin ΔV_{tot} en de gemiddelde geuldiepte niet of nauwelijks veranderen ondanks netto baggeren of storten kan vanuit beheersoogpunt worden beschouwd als een ‘no-regret’ situatie.

De resultaten van deze analyse worden in de volgende paragraaf gepresenteerd.

3.4.2 Resultaten

Figuur 3-8 toont de gemeten erosie en sedimentatietendensen in de vier geulen. De erosie/sedimentatie trends zijn bepaald voor twee perioden: de recente periode 2000-2005 en indien mogelijk de langere termijn periode 1985-2005. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 3-3. De verschilkaart 1985-2005 is ter illustratie opgenomen in Figuur 3-9.

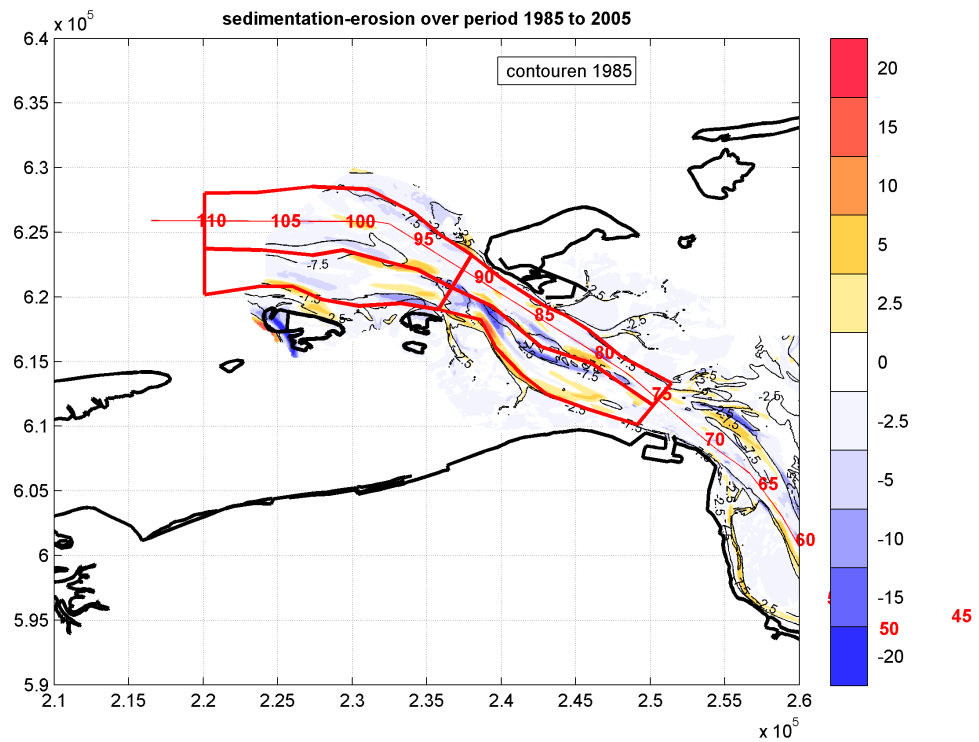


Figuur 3-8 Berekenende volumeveranderingen ΔV_{tot} (in Mm^3/jr) ten opzichte van 2005, voor elk van de vier geulen. De waarnemingen voor de Westereems gedurende de periode 1985 t/m 1997 en de waarneming voor het Hubertgat in 1985 zijn indicatief omdat de waarnemingen van die jaren voor deze geulen geen volledige gebiedsdekking hebben

Uit deze resultaten kan het volgende beeld van geulontwikkelingen worden afgeleid:

- De ebgeul *Westereems* in macrocel 1 erodeert vermoedelijk min of meer nature. In deze geul is de laatste jaren circa $0,4 Mm^3/jr$ gebaggerd. Het gebaggerde sediment wordt echter op de oostelijk gelegen geulwand teruggestort (stortlocatie 2 in Figuur 3-7), waardoor de som van de ingrepen nagenoeg gelijk aan nul is.
- De vloedgeul *Hubertgat* in macrocel 1 vertoont een tendens tot geringe sedimentatie op een tijdschaal van twee decennia. De recente waarnemingen duiden echter op een geringe erosie. Er wordt in deze geul niet gebaggerd of gestort.
- De vloedgeul *Randzelgat* in macrocel 2 erodeert van nature. De laatste jaren lijkt de erosie te zijn toegenomen. Ook wanneer de erosie in het zeewaarts gelegen deel van de macrocel, het zeegat, buiten beschouwing wordt gelaten erodeert de geul.

- De ebgeul *Oude Westereems*, in macrocel 2, vertoont op een tijdschaal van twee decennia een erosie die zich vooral manifesteert in het zeewaarts gelegen deel van de macrocel (zeegat). De laatste vijf jaar erodeert de geul enigszins ondanks geringe stortingen uit de Eemshaven (qua zand ca. 0,15 Mm³/jr, Mulder pers. com.). De verandering in gemiddelde geuldiepte gedurende de afgelopen 5 jaar zijn echter zeer klein.
- Het meergeulensysteem in de twee macrocellen verliest op middellange en korte termijn zand (respectievelijk 1,8 en 3,9 Mm³/jr).
- De verschilkaart wordt gedomineerd door patronen van erosie en sedimentatie die worden veroorzaakt door de langzame migratie van geulen en platen (Figuur 3-9).



Figuur 3-9 Vershilkaart 1985-2005 (blauw = erosie, geel = sedimentatie)

Tabel 3-3 Tendensen van geulontwikkeling gedurende de periode 1985-2005 en 2000-2005. Een negatieve volumeverandering betekent erosie of netto baggeren. Een positieve volumeverandering betekent sedimentatie. De erosie voor de Westereems gedurende de periode 1985-2005 is indicatief: de gebiedsdekking is alleen compleet voor de jaren 2000 en 2005. De ontwikkelings-tendensen (excl zeegat) zijn kwalitatief vergelijkbaar de waarnemingen van Alkyon (2007).

Cel	Naam	Type	ΔV_{tot}		ΔV_I	ΔV_{netto}	diepte (%)
			85-05	00-05			
1	Westereems	ebgeul	-1.1	-1.5	0.0	-1.5	<1
	Hubertgat	vloedgeul	0.2	-0.6	0.0	-0.6	<1
2	Randzelgat	vloedgeul	-0.5	-1.3	0.0	-1.3	1
	excl. zeegat		-0.2	-0.8	0.0	-0.8	
	Oude Westereems	ebgeul	-0.4	-0.6	0.1	-0.7	<1
	excl. Zeegat		0.3	-0.3	0.1	-0.4	
Zeegat	Randzelgat	vloedgeul	-0.4	-0.5	0.0	-0.5	
	Oude Westereems	ebgeul	-0.7	-0.3	0.0	-0.3	
1+2			-1.8	-3.9	0.1	-4.1	

3.4.3 Discussie

Het meergeulensysteem zeewaarts van Eemshaven vertoont, op een tijdschaal van jaren tot enkele decennia, een tendens tot 'natuurlijke' erosie (situatie 2, eventueel 1, uit §3.4.1) waarbij de gemiddelde diepte enigszins toeneemt (met minder dan 1% in 5 jaar). Deze erosie manifesteert zich vooral in de geulen waar de vaargeul is gelegen, de Westereems en het Randzelgat. Daarnaast erodeert het zeegat, dat als een onderdeel van macrocel 2 is geschematiseerd, onder invloed van het oostwaarts verplaatsende Waddeneiland Rotummeroog. De geulen Hubertgat en Oude Westereems vertonen recent een beperkte erosie. Deze ontwikkelingstendensen van de geulen in de twee macrocellen lijken weinig op directe wijze te zijn beïnvloed door bagger en stortactiviteiten.

Deze ontwikkelingstendensen worden gekenmerkt door onzekerheden door o.a. de beperkte beschikbaarheid van dieptekaarten (frequentie van opnamen en gebiedsdekking) en het ontbreken van volledige gegevens over baggeren, storten en zandwinning voor de periode 1985-2002. Om met deze onzekerheid en het feit dat de historische veranderingen in gemiddelde geuldiepte klein zijn, om te kunnen gaan zullen in de bepaling van de stortcapaciteit (hoofdstuk 4) twee scenario's worden gehanteerd:

1. Een voortzetting van de tendens tot geulerosie zoals waargenomen gedurende de periode 2000-2005.
2. Een evenwichtssituatie waarin de geulen niet eroderen of sedimenteren.

4 Toepassen van het Cellenconcept

4.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is het Cellenconcept voor het Eems- Dollard estuarium geoperationaliseerd door de morfologie van het meergeulensysteem te schematiseren in macrocellen (en mesocellen), en door het bepalen van de bruto zandtransportcapaciteit en de morfologische ontwikkelingstendens van de twee zeewaarts gelegen macrocellen waar het in deze studie om gaat (macrocellen 1 en 2 in Figuur 3-4).

In dit hoofdstuk staat de toepassing van het Cellenconcept centraal: Hoe groot is de stortcapaciteit van het meergeulensysteem zeewaarts van Eemshaven in de huidige situatie? En, wat is de (kwalitatieve) invloed van de vaargeulverdieping en het voorgestelde vaargeulonderhoud (Alkyon, 2007) op het evenwicht en de stabiliteit van het meergeulensysteem? Het toepassen van het Cellenconcept ter beantwoording van deze vragen betekent dat voor een individuele geul als geheel kan worden aangegeven hoeveel zand er jaarlijks in deze geul kan worden gestort zonder dat deze geul verzandt als gevolg van het storten. Met het Cellenconcept kunnen geen uitspraken worden gedaan over waar er precies binnen een geul kan / moet worden gestort. Om hierover uitspraken te kunnen doen zijn aanvullende analyses nodig die buiten de scope van dit onderzoek van vallen.

4.2 Richtlijnen voor toepassing van het Cellenconcept

Meergeulensystemen zoals die voorkomen in het estuarium van de Eems-Dollard en de Schelde zijn zelden gedurende langere tijd in evenwicht (geweest). Dit is inherent aan o.a. de continue ingrepen in het systeem door de mens en het optreden van morfodynamische interacties tussen de verschillende morfologische elementen van het meergeulensysteem. Het praktisch ontbreken van een evenwichtssituatie betekent dat de bruto transportcapaciteit T_e , die ten grondslag ligt aan het Cellenconcept, niet bekend is. Recent zijn richtlijnen opgesteld om de stortcapaciteit te bepalen op basis van het Cellenconcept rekening houdend met het feit dat T_e niet bekend is (Jeuken et al., ingezonden). In deze richtlijnen wordt onderscheid gemaakt tussen de zogenoemde nevengeul en de hoofdgeul. De hoofdgeul is de geul waarin de scheepvaartgeul is gelegen en waar in de praktijk vaak wordt gebaggerd. De nevengeul is de naastgelegen geul in een macrocel waar vaak geen formele vaargeul met gegarandeerde diepten aanwezig is.

Storten in een nevengeul

Voor het storten in een nevengeul gelden voor de vier onderscheiden ontwikkelingstendensen (zie § 3.4.1) de volgende richtlijnen voor het bepalen van de stortcapaciteit SC :

1. In het geval van een evenwichtssituatie geldt voor de stortcapaciteit:

$$SC = \alpha.T \quad (2)$$

2. In geval van een ‘natuurlijke’ ontwikkelingstendens geldt:

$$SC = \alpha.T - \Delta V_{tot} \quad (3)$$

3. In geval van geulontwikkeling die bepaald wordt door storten geldt:

$$SC < 0,05.T \quad (4)$$

4. In een no-regret geulontwikkeling, waarbij in de macrocel in de huidige situatie en in de toekomst wordt gebaggerd en gestort, geldt voor de stortcapaciteit:

$$SC = \Delta V_i \approx (\alpha.T) \quad (5)$$

In deze richtlijnen is T de morfologisch representatieve bruto transport capaciteit van het geulsysteem in de macrocel. Deze waarde moet worden vermenigvuldigd met $\alpha = 5\%$ als de jaarlijkse storthoeveelheden ten minste de helft bedragen van de hoeveelheden die in de andere geul worden gebaggerd of als deze andere geul erodeert. In alle andere gevallen is het $\alpha = 10\%$ criterium van toepassing.

Storten in een hoofdgeul

Storten in de geul waar de formele scheepvaartgeul is gelegen is in twee situaties een goede strategie om de stabiliteit van het meergeulensysteem te waarborgen:

5. De vaargeul erodeert van ‘nature’. Voor de stortcapaciteit geldt dan:

$$|\Delta V_{tot}| \leq SC \leq |\Delta V_{netto}| \quad (6)$$

ΔV_{tot} is een ondergrens die gehanteerd kan worden als in de betreffende geul nog niet netto wordt gestort. ΔV_{netto} is een bovengrens die kan worden toegepast als in de betreffende vaargeul al netto wordt gestort.

6. De vaargeul erodeert als gevolg van zandwinning. In dit geval is de som van deze zandwinning (onttrekking van zand) en eventuele stortingen (toevoeging van zand) een netto onttrekking van zand die kleiner is dan ΔV_{tot} . Deze netto onttrekking kan worden benut als stortruimte:

$$SC = \Delta V_{zandwinning} + \Delta V_{storten} \quad (7)$$

7. Het storten in de vaargeul in alle andere situaties zal waarschijnlijk leiden tot een toename van het onderhoudsbaggerwerk en wordt als niet wenselijk beschouwd. De stortcapaciteit wordt in dit geval gelijk aan nul gesteld. Hierbij wordt opgemerkt dat dit een conservatieve richtlijn is. Het is denkbaar dat uit een kostenoptimalisatie blijkt dat het economisch, en wellicht ecologisch, aantrekkelijker is om in de vaargeul te storten ondanks een geringe toename van het jaarlijks volume onderhoudsbaggerwerk.

De stortcapaciteit zoals die met bovenstaande richtlijnen per geul en per macrocel kan worden bepaald kan worden toegepast zonder dat de stabiliteit van het geulstelsel op langere termijn in gevaar komt als gevolg van het storten. Idealiter zijn, naast inzicht in de historische ontwikkelingstendensen, gevalideerde goede morfologische modellen beschikbaar om de toekomstige morfologische veranderingen (o.a. ΔV_{tot}) te bepalen op een tijdschaal van jaren tot enkele decennia. In de afwezigheid van zulke modellen, zoals in deze studie het geval is, is het mogelijk om met een operationeel Cellenconcept en de daarvoor bepaalde historische morfologische ontwikkelingstendensen, de stortcapaciteit van de geulen te bepalen en op basis daarvan een stortstrategie te definiëren voor de korte tot middellange termijn (5-10 jaar). Zoals aangegeven in §3.4.3 zullen hiervoor in deze studie twee scenario's worden gehanteerd:

1. Een voortzetting van de tendens tot geulerosie zoals waargenomen gedurende de periode 2000-2005.
2. Een evenwichtssituatie waarin de geulen niet eroderen of sedimenteren.

Tot slot. Hoewel een degeneratie van een geul zich pas op grote tijdschalen afspeelt (decennia-eeuw) zijn tussentijdse evaluaties van morfologische effecten en eventuele aanpassingen van de stortstrategie altijd nodig om tijdig te kunnen bijsturen richting de gewenste geulontwikkelingen. De termijn waarop dit idealiter moet gebeuren is afhankelijk van de morfologische tijdschaal van het systeem en de omvang van de ingrepen, maar zal voor het Eems-Dollard estuarium ongeveer eens in de vijf a tien jaar zijn.

4.3 Resultaat - Stortcapaciteit in de macrocellen

4.3.1 De huidige situatie

In deze paragraaf wordt de stortcapaciteit in de macrocellen bepaald voor de huidige situatie aan de hand van de twee genoemde scenario's voor geulontwikkeling. De huidige situatie betekent ook dat wordt uitgegaan van de huidige praktijk van vaargeulonderhoud, waarbij in de vaargeul in macrocel 1 jaarlijks circa $0,4 \text{ Mm}^3$ wordt gebaggerd en de gebaggerde specie terug wordt gestort in deze geul. Het gevolg hiervan is dat het netto effect van deze ingrepen op de schaal van de gehele (vaar)geul in macrocel 1 gelijk aan nul is (in macrocel.2 is de laatste jaren niet gebaggerd).

Toepassing van de richtlijnen (§4.2) voor het bepalen van de stortcapaciteit in de twee scenario's geeft maximale stortcapaciteiten zoals samengevat in Tabel 4-1. Wanneer wordt uitgegaan van de ontwikkelingstendens 2000-2005 (scenario 1) bedraagt de totale maximale hoeveelheid zand die jaarlijks in de vier geulen van dit deel van het meergeulensysteem kan worden gestort ongeveer 3,4 tot $4,9 \text{ Mm}^3$. De ondergrens in deze capaciteit is om drie redenen een veiligere waarde dan de bovengrens:

1. De bruto transportcapaciteit in macrocel 1 neemt in zeewaartse richting snel af (3.3.2).
2. De erosie van het zeegat, het zeewaarts gelegen deel van macrocel 2, wordt niet meegenomen in de bepaling van ΔV_{tot} .
3. De transportberekeningen zijn gebaseerd op een geschatte gemiddelde D_{50} van het bodemsediment van $200 \mu\text{m}$. Deze inschatting is aan de lage kant. Uit een meer precieze bepaling van de ruimtelijk gemiddelde waarde van D_{50} volgt een kengetal van $250 \mu\text{m}$.

De grootte van de maximale stortcapaciteit wordt vooral bepaald door het feit dat de geulen een tendens tot ‘natuurlijke’ erosie vertonen. Wanneer wordt aangenomen dat de geulen op macroschaal min of meer in evenwicht zijn (scenario 2), bedraagt de jaarlijkse stortcapaciteit 0,6-2,0 Mm³. Vooral het vervallen van de stortruimte in de vaargeul zorgt voor de afname in stortcapaciteit.

Tabel 4-1 Bepaling van de maximale stortcapaciteit (in Mm³/jr in situ) in de geulen van de macrocellen 1 en 2. De minimale en maximale waarde van V_{tot} voor de geulen in macrocel 2 hebben betrekking op het al (maximum) dan niet (minimum) meenemen van het zeegat in het bepalen van de ontwikkelingstendens.

Scenario 1 - Ontwikkelingstendens 2000-2005										
Cel	Naam	Functie	ΔV_{tot}		Richtlijn	α	T		stortcapaciteit SC	
			min	max			min	max	ondergrens	bovengrens
1	Westereems	vaargeul	-1.5		5	n.v.t	3.0	10.0	1.5	1.5
	Hubertgat		-0.6		2	5%	3.0	10.0	0.7	1.1
2	Randzelgat	vaargeul	-0.8	-1.3	5	n.v.t	3.0	10.0	0.8	1.3
	Oude Westereems		-0.3	-0.6	2	5%	3.0	10.0	0.4	1.1
Totale stortcapaciteit									3.4	4.9
Scenario 2 - evenwicht										
1	Westereems	vaargeul	0.0		7	n.v.t	3.0	10.0	0.0	
	Hubertgat		0.0		1	10%	3.0	10.0	0.3	1.0
2	Randzelgat	vaargeul	0.0		7	n.v.t	3.0	10.0	0.0	
	Oude Westereems		0.0		1	10%	3.0	10.0	0.3	1.0
Totale stortcapaciteit									0.6	2.0

In de huidige situatie wordt alle gebaggerde specie teruggestort in de geul(en) waar de vaargeul is gelegen. Afhankelijk van het beschouwde scenario is er in de huidige situatie, ruimte om jaarlijks 0,6 a 2,0 Mm³ (scenario 2) tot 3,4 a 4,9 Mm³ (scenario 1) extra te storten (naast de 0,4 Mm³/jr die er nu wordt gestort). Hierbij moet worden opgemerkt dat deze stortcapaciteit betrekking heeft op het schaalniveau van gehele individuele geulen en dat met het Cellenconcept geen uitspraken kunnen worden gedaan over de te hanteren locatie voor storten binnen een geul. Dit betekent ook dat de stortcapaciteit in de vaargeul niet eindeloos groot is zolang de gebaggerde onderhoudsspecie wordt terug gestort in de geul waar het gebaggerd is.

4.3.2 De situatie na verdieping van de vaargeul

De aanleg van de verdiepte vaargeul (inclusief het wegwerken van achterstallig onderhoud) gaat gepaard met eenmalig baggerwerkzaamheden in de vaargeul van circa 5 Mm³. Deze hoeveelheid is groter dan de maximale stortcapaciteit zoals afgeleid in de voorgaande paragraaf ³. Incidentele stortingen waarbij de stortcapaciteit van een geul wordt overschreden hoeven echter geen bedreiging te vormen voor de stabiliteit van het meergeulensysteem. De aanlegspecie zou naar rato van de stortcapaciteit over de vier individuele geulen verdeeld kunnen worden.

Het jarenlang onderhouden van de verdiepte vaargeul heeft waarschijnlijk meer invloed op het evenwicht en de stabiliteit van het meergeulensysteem dan de aanleg van de vaargeul. Voor het beoordelen van de situatie na verdieping van de vaargeul is het daarom vooral van belang om inzicht te hebben in de omvang van het te verwachten vaargeulonderhoud. Dit aspect is door Alkyon (2007) onderzocht: afhankelijk van de gekozen variant voor de vorm van de vaargeul, neemt het onderhoudsbaggerwerk toe van circa 0,4 Mm³/jr in de huidige situatie naar 1,1-1,2 Mm³/jr na de verdieping. Wanneer rekening wordt gehouden met

³ Opgemerkt wordt dat de bruto transport capaciteit niet of nauwelijks verandert door de aanleg van de verdieping (zie Tabel 3-1).

onzekerheden zal het toekomstige onderhoud in de vaargeul kunnen variëren tussen de 0,5 en 1,8 Mm³/jr (Alkyon, 2007).

Wanneer wordt uitgegaan van de huidige stortcapaciteit van het geulsysteem van 3,4-4,9 Mm³/jr (scenario 1) hoeft een toename van het onderhoud naar 1,2 of eventueel 1,8 Mm³/jr geen problemen op te leveren voor de lange-termijn stabiliteit van het meergeulensysteem. Voorwaarde hierbij is wel dat de stortcapaciteit van de individuele geulen (Tabel 4-1) niet langdurig wordt overschreden. Het storten van sediment zal wel gepaard kunnen gaan met een verminderde erosie (relatieve sedimentatie) van de geulen, waardoor een al dan niet tijdelijke aanpassing van storthoeveelheden nodig kan blijken te zijn (na een evaluatie).

Wanneer het vaargeulonderhoud meer onderhoudsbaggerwerk vraagt dan voorspeld en/of de ontwikkelingstendens van de geulen om andere redenen verandert (scenario 2), kan de beschikbare stortcapaciteit niet toereikend blijken te zijn. Indien een dergelijke situatie zich voordoet en de stortcapaciteit maximaal benut dan wel overschreden wordt, zal het evenwicht van de geulen meetbaar veranderen op een tijdschaal van jaren tot enkele decennia. Geulen waar gedurende langere tijd netto meer wordt gestort dan volgens het stortcriterium mogelijk is, zullen verondiepen, terwijl de geulen waar netto wordt gebaggerd (de geulen waar de vaargeul is gelegen) minimaal op diepte blijven. Een degeneratie naar een één-geulsysteem manifesteert zich echter op veel grotere tijdschalen (decennia tot een eeuw).

4.4 Discussie en conclusies

In dit hoofdstuk zijn de twee onderzoeksvragen die centraal staan in deze studie (zie hoofdstuk 1) beantwoord:

1. Hoe groot is de stortcapaciteit van het meergeulensysteem zeewaarts van de Eems haven?

In de huidige situatie wordt alle gebaggerde specie ten behoeve van het vaargeulonderhoud teruggestort in de geul(en) waar de vaargeul is gelegen. Dit is gezien de toereikende stortcapaciteit van de geul een goede stortstrategie als het gaat om het waarborgen van de stabiliteit van het meergeulensysteem in de twee macrocellen. Naast het feitelijke huidige vaargeulonderhoud van circa 0,4 Mm³/jr is er ruimte om jaarlijks 0,6 a 2,0 Mm³ (scenario 2) tot circa 3,4-4,6 Mm³ (scenario 1) (extra) te storten verdeeld over de vier geulen in de twee macrocellen (Tabel 4-1).

2. Hoe beïnvloeden de vaargeulverdieping en het voorgestelde vaargeulonderhoud het evenwicht en de stabiliteit van het meergeulensysteem (kwalitatief).

Door de verdieping van de vaargeul neemt het vaargeulonderhoud naar verwachting (Alkyon, 2007) toe met een factor drie tot circa 1,2 Mm³/jr. Dit betekent 0,8 Mm³ /jr extra baggerwerk waarvan het sediment in de geulen moet worden gestort. De huidige stortcapaciteit in het geulsysteem lijkt hiervoor toereikend te zijn.

Qua te hanteren stortstrategie kan worden overwogen om de huidige strategie, waarbij er zo veel als mogelijk terug wordt gestort in de (eroderende) (vaar)geulen Westereems en

Randzelgat, voort te zetten. Dit is vanuit het waarborgen van het evenwicht en de stabiliteit van het meergeulensysteem het gunstigst zolang het onderhoud niet duidelijk toeneemt⁴ als gevolg van het storten. Wanneer dit wel gebeurt kunnen de 'nevengeulen' Hubertgat en Oude Westereems als stortlocatie in gebruik worden genomen.

Zolang de maximale stortcapaciteiten niet langdurig (jaren-decennia) wordt overschreden zal het meergeulensysteem niet degenereren naar een één-geulensysteem als gevolg van het vaargeulonderhoud. Het evenwicht van het geulensysteem, gekarakteriseerd aan de hand van de gemiddelde geuldiepte, zal echter wel veranderen. De geulen waar gedurende langere tijd netto wordt gestort zullen een (relatieve) sedimentatie vertonen, terwijl de geulen waar netto wordt gebaggerd over het algemeen dieper zullen worden.

⁴ *De locatie van stortingen op de oostelijk gelegen geulwand zou wel kunnen leiden tot een het verlies van zand in het estuarium, doordat het sediment vanaf deze stortlocatie gemakkelijk kan worden getransporteerd naar de zeegaten langs de Duitse Waddenkust.*

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

In voorliggende studie is het Cellenconcept geoperationaliseerd en toegepast voor (een deel van) het meergeulensysteem in het Eems-Dollard estuarium met als doel:

1. Het bepalen van de stortcapaciteit van het meergeulensysteem zeewaarts van Eemshaven.
2. Het kwalitatief beoordelen van de consequenties van een vaargeulverdieping op het evenwicht en de stabiliteit het meergeulensysteem, gegeven de voorspellingen van het vaargeulonderhoud. De huidige streefdiepte van de vaargeul is NAP-14 m. Deze wordt aangepast tot NAP-16,1m bij de zeewaarts gelegen toegang tot de Westereems en geleidelijk afnemend tot NAP-14,5m bij de Eemshaven.

De belangrijkste conclusies van deze operationalisering en toepassing kunnen als volgt worden samengevat:

- Het meergeulensysteem in het Eems-Dollard estuarium kan op basis van morfologische kenmerken worden onderverdeeld in vier macrocellen en een aantal mesocellen. Iedere macrocel bestaat uit een relatief rechte vloedgeul en een gekromde ebgeul. Deze twee geulen worden gescheiden door sub- en intergetijdengebieden en met elkaar verbonden door kleinere kortsluitgeulen. De kortsluitgeulen vormen de mesocellen.
- Oude hydrografisch kaarten duiden op een degeneratie van het meergeulensysteem landwaarts van Eemshaven (de macrocellen 3 en 4) op een tijdschaal van decennia tot een eeuw.
- De bruto zandtransportcapaciteit van de twee zeewaarts gelegen macrocellen bedraagt 3-10 Mm³/jr per cel. Wanneer wordt aangenomen dat geulsysteem in evenwicht is met het huidige vaargeulonderhoud betekent deze transport capaciteit dat totale stortcapaciteit van dit deel van het meergeulensysteem 0,6-2,0 Mm³/jr bedraagt.
- De historische waarnemingen duiden op een erosie van de geulen op korte en middellange termijn. Wanneer rekening wordt gehouden met de recente ontwikkelingstendensen van de individuele geulen (scenario 1), bedraagt de maximale stortcapaciteit van het geulsysteem in de huidige situatie 3,4-4,9 Mm³/jr.
- De verdieping van de vaargeul gaat naar verwachting gepaard met een toename van het onderhoudsbaggerwerk van 0,4 Mm³/jr naar 1,2 Mm³/jr (Alkyon, 2007). In de huidige stortstrategie voor het vaargeulonderhoud wordt de gebaggerde specie teruggestort in de geul waar het zand gebaggerd is, waardoor er netto niet wordt ingegrepen op macroschaal. Dit betekent dat de stortcapaciteit van het geulsysteem hoogst waarschijnlijk toereikend is om het verwachte extra jaarlijkse onderhoudsbaggerwerk van 0,8 Mm³ ten gevolge van de verdieping te kunnen storten. De capaciteit kan echter

kritisch blijken te zijn, wanneer ontwikkelingstendensen veranderen en/of het toekomstige vaargeulonderhoud veel groter is dan voorspeld.

- Zolang het storten in de (vaar)geulen Westereems en Randzelgat niet leidt tot een toename van het onderhoud (of andere nadelige effecten), kan de huidige stortstrategie na de verdieping worden voortgezet. Deze strategie is gunstig vanuit het waarborgen van de stabiliteit van het meergeulensysteem. Naast deze morfologische overwegingen zullen bij het bepalen van een stortstrategie ook economische aspecten (kosten) in overweging worden genomen. Uit een kostenoptimalisatie zou kunnen blijken dat een (beperkte) toename van het onderhoud ten gevolge van terugstorten in de geul waar gebaggerd is, goedkoper is dan het verder weg storten in nevengeulen. De stortcapaciteit van het geulsysteem kan bij de uitwerking van een stortstrategie als één van de randvoorwaarden worden gebruikt.

5.2 Aanbevelingen

Op basis van de resultaten van deze studie kunnen de volgende aanbevelingen voor het beheer en vervolgonderzoek worden gedaan.

- Verdiepingen en vaargeulonderhoud zijn van invloed op het evenwicht van het meergeulensysteem in het Eems-Dollard. Om de stabiliteit van het meergeulensysteem te kunnen waarborgen dienen langdurige overschrijdingen van de stortcapaciteit te worden vermeden.
- Baggeren en storten is altijd van invloed op het evenwicht van het meergeulensysteem en beïnvloedt daarmee ook de stortcapaciteit van het geulsysteem. Daarom is nodig om het vaargeulonderhoud periodiek te evalueren op basis van waarnemingen, indien mogelijk aangevuld met modelvoorspellingen, en zonodig aan te passen.
- Het verdient aanbeveling om het belang van het meergeulensysteem voor de waarden en gebruiksfuncties van het estuarium goed in kaart te brengen.
- Als er duidelijkheid is of het wenselijk is om het meergeulensysteem in stand te houden, verdient het aanbeveling om een beoordelingskader voor de morfologische diversiteit van het meergeulensysteem op te zetten, zoals dat nu ook wordt ontwikkeld voor het Schelde estuarium.
- Tot slot verdient het aanbeveling om onderzoek uit voeren naar de lange-termijn (decennia-eeuwen) morfologische ontwikkeling van het meergeulensysteem in het Eems-Dollard estuarium en de ecologische consequenties van deze veranderingen. Een dergelijk onderzoek en een vergelijking met de ontwikkelingen in het Schelde estuarium kan een belangrijke wetenschappelijk bijdrage leveren aan het afwegen van het belang van een meergeulensysteem versus een één-geulsysteem. Voordat een dergelijke onderzoek kan worden uitgevoerd is het nodig om beschikbare historische dieptekaarten en ingreepgegevens van het Eems-Dollard estuarium te digitaliseren.

6 Referenties

- Alkyon, 2007. Hydromorphological study for EIA of Eemshaven and EIA of fairway to Eemshaven. Rapport A1836.
- Bray, R.N. A.D. Bates, J.M. Land (1997), Dredging. A handbook for engineers. New York, John Wiley.
- Jeuken et al, 2003 Jeuken, M.C.J.L., I.C. Tanczos, Z.B. Wang (2003a), Evaluatie van het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning sinds de tweede vaargeulverdieping op basis van veldwaarnemingen en het verbeterde Cellenconcept Westerschelde. Delft, WL | delft Hydraulics. Rapportnr. Z3467.
- Jeuken, M.C.J.L., Z.B. Wang, T. van der Kaaij, M. van Helvert, M. van Ormondt, R. Bruinsma, I. Tanczos, 2004. Morfologische ontwikkelingen in het Schelde estuarium bij voortzetting van het huidige beleid en effecten van een verdere verdieping van de vaargeul en uitpolderingen langs de Westerschelde.
- Jeuken, M. C.J.L. en Z. B. Wang, ingezonden. Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems – Part 2: Observations.
- Kiezebrink, M., 1996. De dynamiek van het Eems-Dollard estuarium. Raport NN-ANW 96-07, pp.1-110. Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland.
- Rijkswaterstaat (1998), Milieuaspectenstudie Baggerspeciëstort Westerschelde. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Middelburg.
- Rijkswaterstaat Directie Zeeland en Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2001) Langetermijnvisie Schelde-estuarium.
- Van Veen, 1950. Eb band flood cahnnel systems in the Netherlands tidal waters. English translation of the original Dutch text with annotations.
- Van de Kreeke, J. en K Robaczewska, 1993. Tide-indiced residual transport of coarse sediment; application to the Ems estuary. Netherlands journal of Sea Research, 31(3):209-219.
- Wang Z.B. , P.M.C. Thoolen, R.J. Fokkink (1997), Studie naar de morfologische effecten van storten en baggeren in de Westerschelde. Ten behoeve van MER storten gebaggerd materiaal, Rapport Z2310, WL|Delft Hydraulics.
- Wang, Z.B. en J.C. Winterwerp, 2001. Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems. In Proceedings of 2nd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Sept. 2001, Obihiro, Japan, pp. 515-524.
- Wang, Z.B. (2002). A validation and improvement of the cell-concept: the influence of a flood-ebb circulation on the dumping capacity. WL|Delft Hydraulics, concept-rapport Z3288
- Wang, Z.B., P.T. Thoolen, I. Tanczos, 2002 Onderbouwing van het Cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer. Toetsing van aanames met SOBEK berekeningen. WL | Delft Hydraulics rapport Z3325, cofinanciering doelsubsidie Z3288 door RIKZM.
- Wang, Z.B., M.C.J.L. Jeuken en J.C. Winterwerp, ingezonden. Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems – Part 1: Theory.
- Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert, C. Kuyper, A. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C. Thoolen en Z.B. Wang (2000), Lange Termijnvisie Schelde-estuarium cluster morfologie (2 delen). WL|Delft Hydraulics.
- Winterwerp, J.C., Z.B. Wang, M.J.F. Stive, A. Arends, C. Jeuken, C. Kuijper, P.M.C. Thoolen, (2001), A new morphological schematization of the Western Scheldt Estuary. The Netherlands. In Proceedings of 2nd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Sept. 2001, Obihiro, Japan, pp. 525-533.



WL | Delft Hydraulics

**Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl**

**Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl**

