

Knelpuntanalyse verbinding Eemshaven Noordzee



Knelpuntanalyse verbinding Eemshaven Noordzee

Ontwikkeling van een conceptueel model van sedimentdynamiek in het vaargeultracé

Auteur(s)

Reinier Schrijvershof

Carlijn Meijers

Bart Grasmeijer

Knelpuntanalyse verbinding Eemshaven-Noordzee

Ontwikkeling van een conceptueel model van sedimentdynamiek in het vaargeultracé en verkenning van handelingsperspectief

Opdrachtgever	RWS
Referenties	
Trefwoorden	Vaargeul Eemshaven-Noordzee, baggerbezwaar, morfologie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	4-04-2025
Projectnummer	11210370
Document ID	11210370 – 006 SITO 2014 WWH07 - Kennis voor BenO Waddenzee
Pagina's	66
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Reinier Schrijvershof	
	Carlijn Meijers	
	Bart Grasmeijer	

Samenvatting

De verbinding Eemshaven-Noordzee is in 2016-2017 verruimd om de vaarweg geschikt te maken voor Panamax schepen met een maximale diepgang van 14 meter. Sinds de vaarwegverruiming zijn de onderhoudsbaggervolumes echter toegenomen tot ongeveer 3 - 3,5 miljoen kubieke meter (Mm^3) per jaar en lijken deze in 2024 nog verder toe te nemen. Voorafgaand aan de verruiming was de inschatting dat de onderhoudsbaggervolumes ca. 1,5 Mm^3 per jaar zouden bedragen. Het is tot heden onduidelijk waarom het baggerbezwaar zoveel hoger is dan in eerdere studies voorafgaand aan de verruiming was voorzien.

Dit rapport beschrijft een onderzoek dat is uitgevoerd om de oorzaak van het verhoogde baggerbezwaar te verklaren aan de hand van de geul- en plaatdynamiek. De dynamiek in het gebied rondom het vaargeultracé en de verspreidingslocaties is inzichtelijk gemaakt en de relatie met de toegenomen baggervolumes is geanalyseerd. Er is een conceptueel model ontwikkeld dat de morfodynamiek en sedimentdynamiek in het huidige mondingsgebied (de Buiten Eems) en het vaargeultracé beschrijft. Het conceptuele begrip is gebruikt om te concluderen waarom eerdere inschattingen van de toename in baggerbezwaar afwijken van de huidige trend.

Eerdere MER studies hebben het baggerbezwaar na verdiepen onderschat om twee redenen. Ten eerste is tijdens deze eerdere studies te weinig rekening gehouden met langjarige trends, specifiek het oostwaarts opschuiven van het plaat-geul systeem. Ten tweede is de inschatting van het baggerbezwaar sterk gebaseerd op numerieke modellen. Het voorspellen van baggerbezwaar met dergelijke modellen is uitdagend vanwege het belang van morfologisch evenwicht en van autonome trends. Daarnaast is een deel van de aanzanding het gevolg van golven welke niet zijn gemodelleerd bij eerdere studies.

Er zijn drie knelpunten geïdentificeerd.

- Knelpunt 1 ligt aan zeewaartse zijde van de Westereems. Het baggerbezwaar is hier toegenomen doordat de Ballon Plate in noordoostelijke richting uitbouwt. Deze plaatmigratie wordt waarschijnlijk aangedreven door de rotatie van het Huibertgat welke een gevolg is van de uitbouw van Rottumerplaat en de ebdelta van het Zeegat van de Lauwers (Gronden van de Lauwers).
- Knelpunt 2 ligt in het Randzelgat, het centrale gedeelte van de Buiten Eems. Het baggerbezwaar is hier toegenomen door twee afzonderlijke oorzaken.
 - In het centrale gedeelte van het Randzelgat migreert de Meeuwenstaart richting de vaargeul, aangedreven door een oostelijke verschuiving en verondieping van de Oude Westereems (als gevolg van oostwaartse uitbouw van Horsbornzand en Groningerwad). Daarnaast worden er grote volumes baggerspecie verspreid in de voormalige erosiekuil op verspreidingslocatie P1. Deze kuil is tijdens de aanlegfase opgevuld met keileem. .
 - In het zuidelijke gedeelte van het Randzelgat ligt de vaargeul gedeeltelijk op de oostelijke geulwand. Deze geulwand migreert in zuidwestelijke richting door de uitbouw van de ebschilden van de geulen Emshorngat en Emshörn Rinne.
- Knelpunt 3 ligt op het drempelgebied tussen de Oude Westereems en het Doekegat. Een drempelgebied is een sterk sedimenterende ondiepte tussen twee geulsystemen. De onderhoudsdiepte hanteren op een drempelgebied gaat onvermijdelijk gepaard met een grote baggerinspanning.

Inhoud

Knelpuntanalyse verbinding Eemshaven Noordzee		2
Samenvatting		4
1	Introductie	7
1.1	Achtergrond en probleemstelling	7
1.2	Doel en onderzoeksvragen	8
1.3	Studiegebied	8
1.4	Methode	9
1.5	Leeswijzer	10
2	Synthese hydro-morfologie Buiten Eems	11
2.1	Historische ontwikkeling	11
2.1.1	Invloed geologie	11
2.1.2	Invloed landaanwinningen	13
2.2	Recente ontwikkelingen (decennia)	15
2.2.1	Menselijke ingrepen	15
2.2.2	Plaat-geul systemen	17
2.3	Sedimenttransport en stortcapaciteit	21
3	Bagger- en stortvolumes	24
3.1	Gerealiseerde onderhoudsvolumes	24
3.2	Berekening inschatting onderhoudsvolumes	26
4	Morfologische dynamiek van het vaargeultracé	29
4.1	Huibertgat – Huibertplaat – Westereems	29
4.2	Oude Westereems - Meeuwenstaart - Randzelgat	31
4.2.1	Verspreidingsvak P1	31
4.2.2	Baggervakken C5 en D1	33
4.2.3	Baggervakken E1 en E2	35
4.3	Doekegat – Doekeplaat – Emshörn Rinne	36
5	Modellering getij- en sedimentdynamiek	40
5.1	Model- en simulatieoverzicht	40
5.2	Debietverdeling	42
5.3	Stromingspatronen	45
5.4	Residuele zandtransportpatronen	46
5.4.1	Globale transportpatronen	47
5.4.2	Westereems – Huibertgat	48
5.4.3	Randzelgat – Oude Westereems	49
5.4.4	Doekegat	50
6	Conceptueel model	51

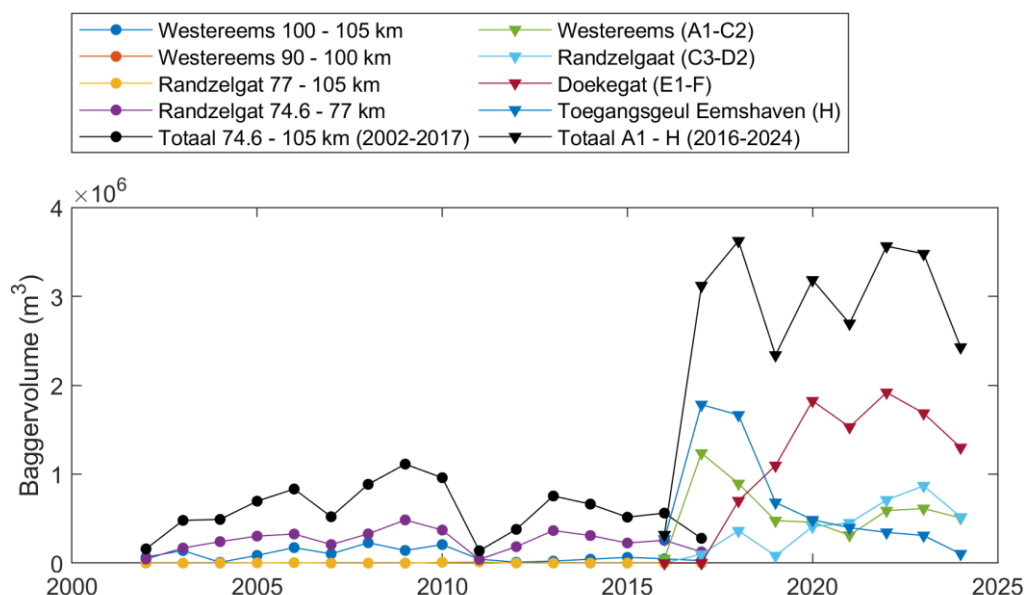
6.1	Megaschaal: Eems-Dollard estuarium en Groninger Wad	51
6.2	Macroschaal: Buiten Eems (Eemshaven – Noordzee)	52
6.3	Mesoschaal: knelpunten	53
7	Discussie	57
7.1	Redenen voor toename in baggerbezwaar	57
7.2	Redenen voor onderschatting van de voorspellingen	58
7.3	Transitie meergeulenstelsel	59
7.4	Impact storten op stabiliteit meergeulenstelsel	60
8	Conclusies en aanbevelingen	61
8.1	Conclusies	61
8.2	Aanbevelingen	63
	Literatuurlijst	64
	Appendices	66

1 Introductie

1.1 Achtergrond en probleemstelling

De verbinding Eemshaven-Noordzee is in 2016-2017 verruimd om de vaarweg geschikt te maken voor 'Panamax' schepen met een maximale diepgang van 14 meter. De verruimde vaargeul heeft een 'getrapt' diepteprofiel gekregen waarbij de bodemligging aan de zeezijde op (minimaal) -16.1 m NAP ligt en ter hoogte van de Eemshaven op -15.0 m NAP. Het centrale gedeelte van de vaargeul is 200 m breed. Op de meeste locaties in de geul zijn er aan weerszijden van de vaargeul passeervakken aangelegd op een diepte van -12,0 m NAP met een breedte van 200 m. Na de aanlegfase is er met regelmaat gebaggerd om de verruimde vaargeul te onderhouden. Dit baggerbezwaar concentreert zich voornamelijk op de van nature voorkomende drempels bij het Duitse Waddeneiland Borkum en in de bocht naar Eemshaven. De hoofdzakelijk zandige baggerspecie wordt vervolgens verspreid over drie verspreidingslocaties gelegen nabij de vaargeul.

De baggervolumes ten behoeve van het onderhoud van de vaargeul bedroegen in de periode 2017-2023 ongeveer 3-3,5 miljoen kubieke meter (Mm^3) per jaar (Figuur 1.1). In het jaar 2024 lijkt, op basis van extrapolatie van de maandelijkse baggervolumes, het baggerbezwaar richting de 4,5 Mm^3 te gaan. Voorafgaand aan de vaarwegverruiming was het baggerbezwaar in de periode 2002-2017 ongeveer 0,55 Mm^3 /per jaar. In de milieueffectrapportage naar de verruiming van de vaarweg Eemshaven-Noordzee (Rijkswaterstaat, 2013) was het baggerbezwaar voorzien toe te nemen tot 1,5 Mm^3 /per jaar. Het is onduidelijk waarom het baggerbezwaar sinds de verruiming zoveel hoger is dan voorzien. Rijkswaterstaat heeft aan Deltares de vraag gesteld om een onderzoek uit te voeren naar de oorzaak van het hogere baggerbezwaar en te adviseren wat de mogelijkheden zijn om de bagger- en stortstrategie te optimaliseren zodat het baggerbezwaar afneemt.



Figuur 1.1. Baggervolumes voor de verbinding Eemshaven-Noordzee. De baggervolumes worden gepresenteerd per kilometersectie voor de periode voorafgaand aan de vaargeulverruiming in 2016-2017 en per baggervak (A1 t/m H) voor de periode na de verruiming. De zwarte lijn geeft het totale baggervolume voor de gehele verbinding Eemshaven – Noordzee. Baggervolumes van het jaar 2024 zijn verkregen voor de maanden januari t/m juli.

1.2 Doel en onderzoeksvragen

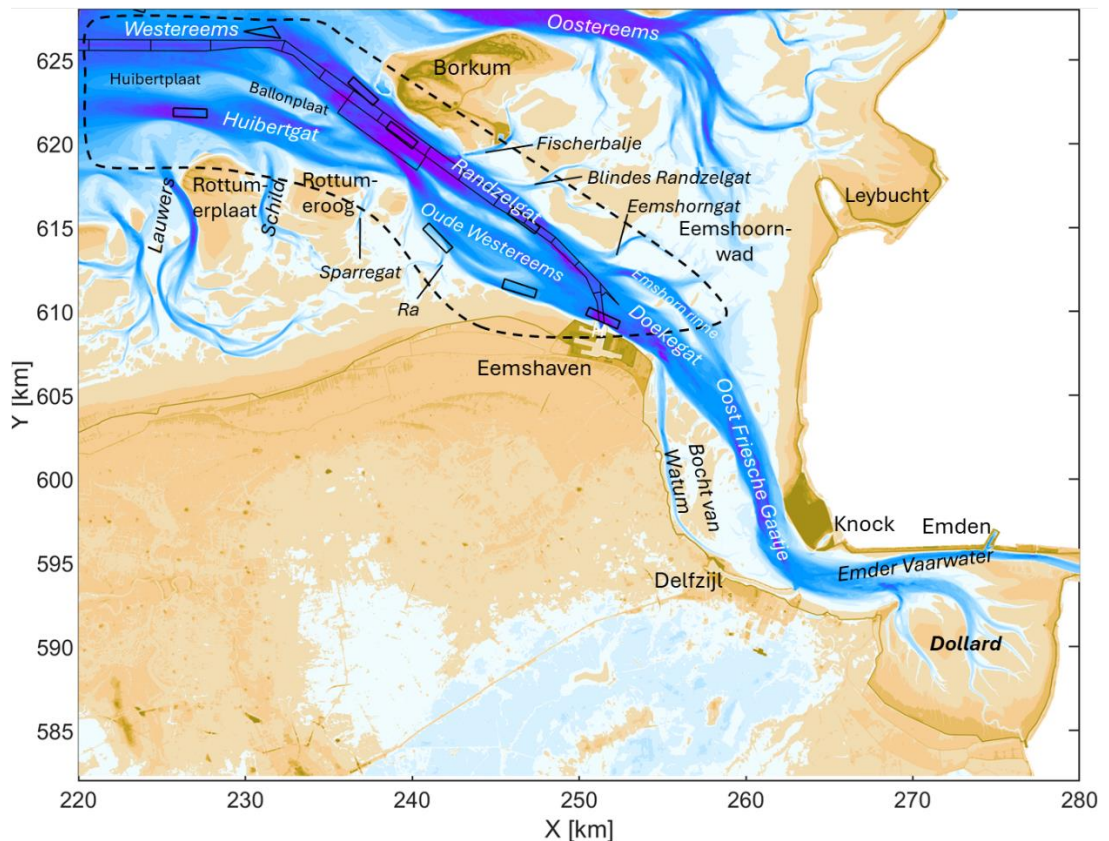
De doelstelling van de studie is om de oorzaak van het verhoogde baggerbezwaar te verklaren door de geul- en plaatdynamiek van het gebied rondom het vaargeultracé en de verspreidingslocaties inzichtelijk te maken en de relatie met de toename in baggervolumes te analyseren. Daarnaast is geanalyseerd waarom eerdere inschattingen van de toename in baggerbezwaar afwijken van de huidige trend. Om de doelstelling te bereiken is een conceptueel model opgesteld dat inzicht geeft in de sedimentdynamiek van het mondingsgebied en het vaargeultracé.

Er is invulling gegeven aan de doelstelling door de volgende twee onderzoeksvragen te beantwoorden:

1. Wat zijn de dominante processen die de sedimentdynamiek in het gebied van het vaargeultracé bepalen?
2. Wat verklaart het onverwacht intensieve baggerbezwaar in het vaargeultracé?
 - a. In hoeverre is deze toename gerelateerd aan de ligging van het vaargeultracé en aan de gebruikte verspreidingslocaties?
 - b. Waarom is de toename van de onderhoudsbaggervolumes veel hoger dan voorafgaand aan de verruiming was voorzien?

1.3 Studiegebied

Het onderzoek dat beschreven staat in deze rapportage omvat het gebied dat we definiëren als de Buiten Eems. Het mondingsgebied van het Eems-Dollard estuarium bestond in het verleden zowel uit de Westereems als de Oostereems. Om deze onderscheiding te verduidelijken definiëren we de Buiten Eems als het huidige mondingsgebied van het Eems-Dollard estuarium, dat zich tussen de Westereems ebdelta en Eemshaven bevindt. De belangrijkste namen van de platen en geulen worden veelvuldig gebruikt in dit rapport en zijn weergegeven in Figuur 1.2.



Figuur 1.2 Namen van platen en geulen in het Eems-Dollard estuarium. Het studiegebied richt zich op de Buiten Eems, de platen en geulen in het gebied vanaf Eemshaven tot aan de ebdelta van de Westereems (aangegeven met zwarte stippellijn). De vaarroute (baggervakken) en stortvakken zijn weergegeven als zwarte omlijning. De benamingen van de bagger en stortvakken worden weergegeven in Figuur 3.1.

1.4 Methode

De studie is uitgevoerd binnen drie werkpakketten. De drie werkpakketten volgen elkaar zodanig op dat er steeds verder is ingezoomd op ruimtelijk niveau en in toenemende mate gebruik is gemaakt van de beschikbare informatie (literatuur, meetgegevens, bestaande modellen). De gehanteerde aanpak komt grotendeels overeen met de aanbeveling voor een generieke aanpak voor een knelpuntanalyse, zoals voorgesteld door Meijers et al. (2024).

1 WP1 – Grootschalige hydro-morfologie Buiten Eems

In dit werkpakket zijn de (lange termijn) hydro-morfologische trends van de Buiten Eems onderzocht op basis van beschikbare literatuur. Het doel van het werkpakket is om systeembegrip op te bouwen om de autonome ontwikkeling (natuurlijk en antropogeen gestuurd) te begrijpen. Daarmee draagt dit werkpakket bij aan het beantwoorden van onderzoeksvraag 1.

2 WP2 – Actuele morfologische dynamiek vaargeultracé Noordzee-Eemshaven

In dit werkpakket zijn bestaande meetgegevens geanalyseerd. Het doel van dit werkpakket is om inzicht te krijgen in de autonome morfologische dynamiek van de geulen van het vaargeultracé, of deze is veranderd sinds de vaarwegverruiming en hoe deze dynamiek gerelateerd is aan het hoge baggerbezwaar. De beschikbare bagger- en stortgegevens zijn geanalyseerd en de eerder uitgevoerde studies naar de verwachte toename in onderhoudsvolumes zijn geëvalueerd om te kunnen verklaren waarom het onderhoudsvolume destijds onderschat is. Het werkpakket draagt bij aan het beantwoorden van onderzoeksvragen 2 en 3.

3 WP3 – Hydrodynamica geulen Buiten Eems

In dit werkpakket is de verandering van de debietverdeling en residuele stromings- en zandtransportpatronen in de Buiten Eems over de afgelopen decennia geanalyseerd aan de hand van numerieke modelsimulaties. Het doel van dit werkpakket is om inzicht te verkrijgen in de historische verandering van de hydrodynamica en sedimentdynamiek om de potentiële verstoring als gevolg van de vaarwegverruiming in dit perspectief te plaatsen. Hiermee draagt dit werkpakket bij aan het beantwoorden van alle drie de onderzoeksvragen.

1.5 Leeswijzer

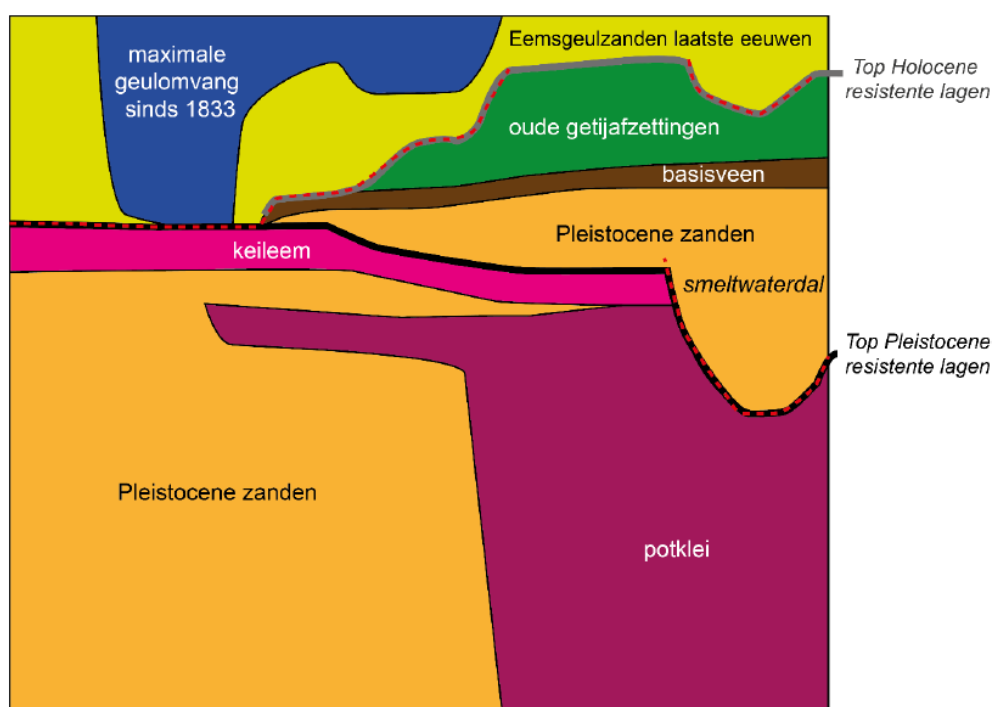
De rapportage begint in Hoofdstuk 2 met een synthese van de (lange-termijn) hydro-morfologische trends in de Buiten Eems. Het hoofdstuk dient als achtergrondinformatie om de huidige ontwikkelingen, die geanalyseerd worden in de opvolgende hoofdstukken, in een breder perspectief te plaatsen. De inhoud van Hoofdstuk 2 is beperkt tot aspecten die relevant zijn voor de huidige studie naar het baggerbezwaar in de verbinding Eemshaven – Noordzee en biedt geen alomvattende beschrijving van de hydro-morfologie. In Hoofdstuk 3 worden ten eerste de bagger- en stortvolumes gepresenteerd (§3.1) en vervolgens wordt samengevat hoe de inschatting van de baggervolumes voorafgaand aan de verruiming tot stand is gekomen (§3.2). In Hoofdstuk 4 wordt de morfologische dynamiek van de platen en geulen rondom het vaargeultracé geanalyseerd aan de hand van lodingsgegevens. De hydrodynamica en sedimentdynamiek in de Buiten Eems wordt in Hoofdstuk 5 geanalyseerd aan de hand van modelsimulaties. Alle gepresenteerde informatie wordt in Hoofdstuk 6 geïntegreerd tot een conceptueel model over de sedimentdynamiek in de Buiten Eems te komen. Discussiepunten met betrekking tot het systeembegrip die uit deze studie volgen worden besproken in Hoofdstuk 7. Ten slotte worden in Hoofdstuk 8 de conclusies getrokken door antwoorden te geven op de gestelde onderzoeksvragen (§8.1) en aanbevelingen te doen voor vervolgonderzoek (§8.2).

2 Synthese hydro-morfologie Buiten Eems

2.1 Historische ontwikkeling

2.1.1 Invloed geologie

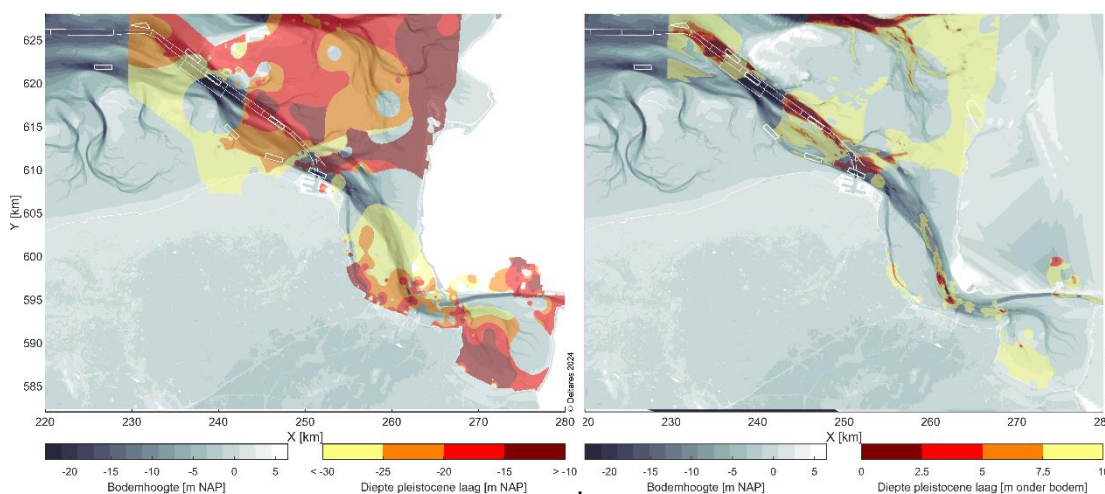
Het substraat in het buitengebied van het Eems-Dollard estuarium bestaat voornamelijk uit ongeconsolideerd zand van Holocene en Pleistocene afkomst. Dit wordt afgewisseld met twee sterk geconsolideerde lagen van Pleistocene ouderdom. Ten eerste is dit een laag die Potklei wordt genoemd. Potklei is een glacio-lacustriene klei uit het Elsterien (475.000 – 410.000 jaar geleden). Dit zijn zeer compacte donkere kleien die gevormd zijn in glaciale zoetwatermeren. Afzettingen van potklei liggen in een netwerk van tunneldalen van soms enkele kilometers breed en honderden meters diep. Daarnaast is er een geconsolideerde laag die gevormd wordt door Keileem. Keileem (ca. 150.000 jaar geleden gevormd) bestaat uit glaciale afzettingen uit het Saalien (238.000 – 126.000 jaar geleden). Dit is zeer compacte klei, silt, en zand gemengd met grind dat is aangevoerd en gecompacteerd door gletsjers. Keileemafzettingen liggen in ruggen met een oriëntatie WZW - ONO. Tussen de keileemruggen liggen dalen waar het keileem is geërodeerd door smeltwater. De geconsolideerde lagen van Holocene ouderdom (jonger dan 9000 jaar geleden) bestaan uit Basisveen en oude getijafzettingen. Basisveen bestaat uit veenlagen die aan het begin van het Holoceen zijn gevormd en sterk gecompacteerd door de afzettingen die hier bovenop zijn gesedimenteerd. De oude getijafzettingen zijn afkomstig uit voormalige getijdebekkens en estuaria. Deze afzettingen bestaan voornamelijk uit zand in en rondom de voormalige getijdegeulen en klei dat afgezet is aan de randen van de getijdebekkens. De geologische opbouw van de ondergrond van het Eems-Dollard estuarium is weergegeven in een schematische doorsnede in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Schematische weergave van de geologische opbouw van de ondergrond van het Eems-Dollard estuarium, geïllustreerd aan de hand van een (hypothetische) dwarsdoorsnede door het estuarium (uit: Pierik et al., 2019). De rode stippellijn geeft aan waar de overgang tussen geologische eenheden is gevormd door erosieprocessen.

De schematische weergave van de geologische opbouw (Figuur 2.1) laat zien dat de geuldiepte van de getijdegeulen in het Eems-Dollard estuarium beperkt kan worden door het voorkomen van harde lagen van Pleistocene ouderdom (de maximale geuldiepte komt overeen met harde keileemlagen). De aanwezigheid van de Pleistocene harde lagen heeft daarmee de positie en dimensies van het geulenpatroon beïnvloed (Pierik et al., 2022). Op de locaties waar de geuldiepte beperkt werd zijn de geulen lateraal uit gaan breiden wat ruimte bood voor de opbouw van platen (banken). De geulen zijn op deze locaties ook sterker gaan meanderen. De geologische opbouw van de ondergrond heeft daardoor in grote mate beïnvloed op welke locatie in het estuarium een tweegeulensysteem is gevormd, gescheiden door tussengelegen platen, en waar samenstroompunten zijn gevormd. De harde lagen van Holocene ouderdom hebben de morfologische ontwikkeling voornamelijk op kleinere schaal beïnvloedt, en dan vooral landwaarts van Eemshaven (Pierik et al., 2019).

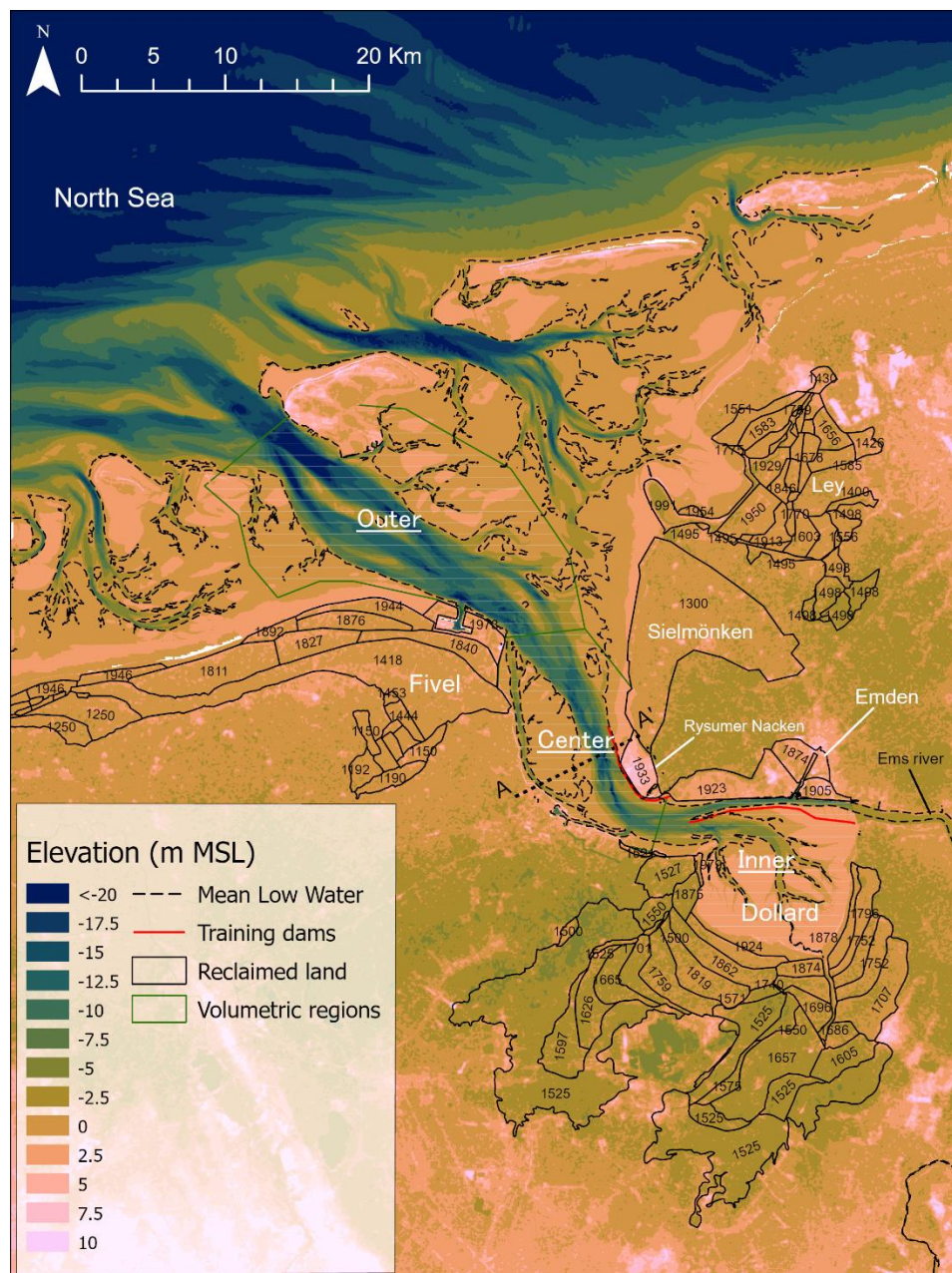
De harde lagen van Pleistocene ouderdom zijn in het gehele estuarium in de diepere ondergrond aanwezig (Figuur 2.2, links). De harde lagen zijn echter alleen sturend in de morfologische ontwikkeling als de diepte of laterale migratie van de geulen beperkt wordt door hun aanwezigheid. De huidige geuldiepte wordt beperkt als er harde lagen aanwezig zijn vlak onder de huidige bodemligging (Figuur 2.2, rechts). Het is duidelijk te zien dat in de Buiten Eems dit het geval is ter plaatse van de Westereems (net zeewaarts van Borkum), in het Randzelgat, en ter plaatse van het Doekegat (net ten noorden van Eemshaven). Verder landinwaarts in het estuarium wordt de geuldiepte beperkt in het zuidelijke gedeelte van het Oost Friesche Gaatje (ten westen van de Rysumer Nacken) en in het zuidelijke gedeelte van de Bocht van Watum. Het gevolg hiervan is dat de geul zich is gaan verbreden om het benodigde doorstroomoppervlakte te hanteren.



Figuur 2.2 Bathymetrie van het Eems-Dollard estuarium (grijs tinten) met de diepte van het voorkomen van harde lagen van Pleistocene ouderdom (geel-rode kleuren), weergegeven in meters onder NAP (links) en weergegeven in meters ten opzichte van de huidige (2020) bodemligging van het estuarium (rechts). Harde lagen met een diepteligging dieper dan 10 meter onder de huidige (2020) bodemligging zijn uitgefilterd in het rechter figuur. Bathymetrie is gebaseerd op vaklodingen uit 2020 en het AHN, diepteligging van de harde lagen is afkomstig van de gepubliceerde dataset van Pierik (2019).

2.1.2 Invloed landaanwinningen

In de afgelopen eeuwen is de morfologische ontwikkeling van het estuarium sterk beïnvloed door menselijke ingrepen. Het aanwinnen van land door het inpolderen van intergetijdengebied is tot aan de 20^e eeuw veruit de belangrijkste menselijke invloed geweest (Schrijvershof et al., 2024, Van Maren et al., 2016). Landaanwinningen hebben het areaal intergetijdengebied in het estuarium verkleind. Het totale areaal aan gewonnen gebied is ongeveer 700 km² in de periode 1200 tot heden. De landaanwinningen in de Dollard zijn met totaal 350 km² het grootste ingewonnen gebied (Figuur 2.3). De grootte van de huidige Dollard is nog ongeveer 20% van de omvang van de Dollard aan het begin van de 16^e eeuw, toen de Dollard zijn maximale uitbreiding had als gevolg van landverlies door stormvloeden (Vos en Knol, 2013). Als gevolg van de landaanwinningen is het totale oppervlak van het estuarium met ongeveer met een derde verkleind.



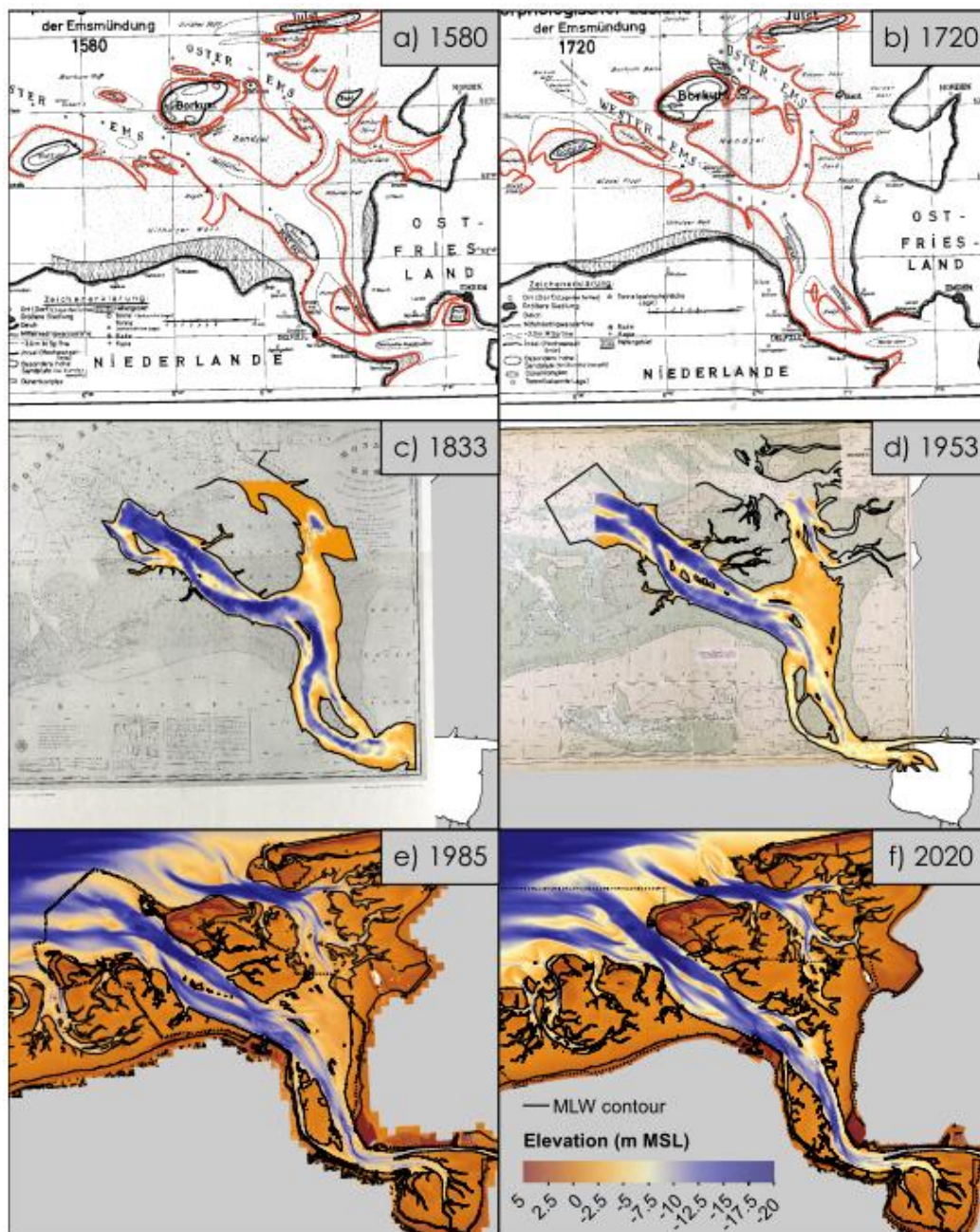
Figuur 2.3 Landaanwinningen rondom het Eems-Dollard estuarium met het jaartal van voltooiing (uit: Schrijvershof et al., 2024).

Het kombergingsvolume is het watervolume dat iedere getijcyclus nodig is om het estuarium te vullen en ledigen. De grootte van het volume wordt bepaald door (de hypsometrie van) het intertidaal. Het verlies aan intergetijdengebied in het Eems-Dollard estuarium (voornamelijk in de Dollard) heeft het kombergingsvolume verkleind. Het getijprisma is hierdoor evenredig gereduceerd. Het kleinere getijprisma stroomt door de geulen die gedimensioneerd zijn op het getijprisma dat paste bij de situatie voor de landaanwinningen. Het gevolg hiervan is een lagere stroomsnelheid in de geulen en sedimentatie (bij voldoende sedimentaanbod). Het doorstroomoppervlakte van de geulen is dus afgenomen als gevolg van de landaanwinningen.

In het centrale gedeelte van het estuarium (tussen Eemshaven en Knock) is de afname van het doorstroomoppervlak gepaard gegaan met het verlies van het meergeulenstelsel (Figuur 2.4). Er heeft een omslag plaatsgevonden van twee afzonderlijke eb- en vloedgeulen naar een enkelgeulstelsel bestaande uit het Oost Friesche Gaatje (zie Figuur 2.4c t/m Figuur 2.4f). Deze ontwikkeling heeft zich voltrokken over een tijdschaal van eeuwen en het estuarium past zich mogelijk nog steeds aan, sedimentatie in de Bocht van Watum gaat namelijk nog steeds door. Degeneratie van de Bocht van Watum werkt door in de functie van geulsystemen verder zeewaarts gelegen in het estuarium. Het Doekegat en de Emshorn Rinne zijn gewisseld in dominantie (vergelijk Figuur 2.4c en d) en later is ook het geulstelsel Oude Westereems-Randzelgat van functie gewisseld (vergelijk Figuur 2.4d en e).

In het mondingsgebied is de verbinding tussen de Oostereems en het Doekegat (Westerbalg) dichtgeslibd tot een wantij (zie Figuur 2.4a t/m Figuur 2.4f). Het is zeer recent dat de verbinding Oostereems-Doekegat zich tot een echt wantij heeft ontwikkeld. De bathymetrie van 2014 (niet getoond) laat nog een doorlopende laagwatercontourlijn zien, in 2020 niet meer. Inpoldering van de Ley Bucht in Oost-Friesland heeft aan deze ontwikkeling bijgedragen doordat het verlies van het intergetijdengebied in dit bekken eveneens voor een verkleining van het getijprisma door de Oostereems heeft gezorgd. De ontwikkeling van een geulverbinding tot wantij heeft ervoor gezorgd dat er een omslag heeft plaatsgevonden van een mondingsgebied met twee aangesloten zeegaten naar een mondingsgebied dat aangesloten is door een enkel zeegat. Het is niet duidelijk of de degeneratie van de Bocht van Watum de oorzaak of juist een gevolg van deze ontwikkelingen is geweest.

Het totale geulvolume van de geulen Oude Westereems-Randzelgat is over de afgelopen twee eeuwen min of meer constant gebleven en in perioden zelfs toegenomen (Pierik et al., 2022). Dit komt waarschijnlijk door een compensatie van de getijvolume-uitwisseling die verloren ging bij het dichtslibben van de verbinding met de Oostereems. In de afgelopen decennia, sinds de eerste nauwkeurige bodemhoogtegevens in 1985, wordt er een continue trend van aanzanding (geulverkleining) waargenomen (o.a. Hartsuiker et al, 2007) van 2,5 Mm³/jaar in de Oude Westereems en 14,4 Mm³/jaar in het Randzelgat (Elias et al., 2022).

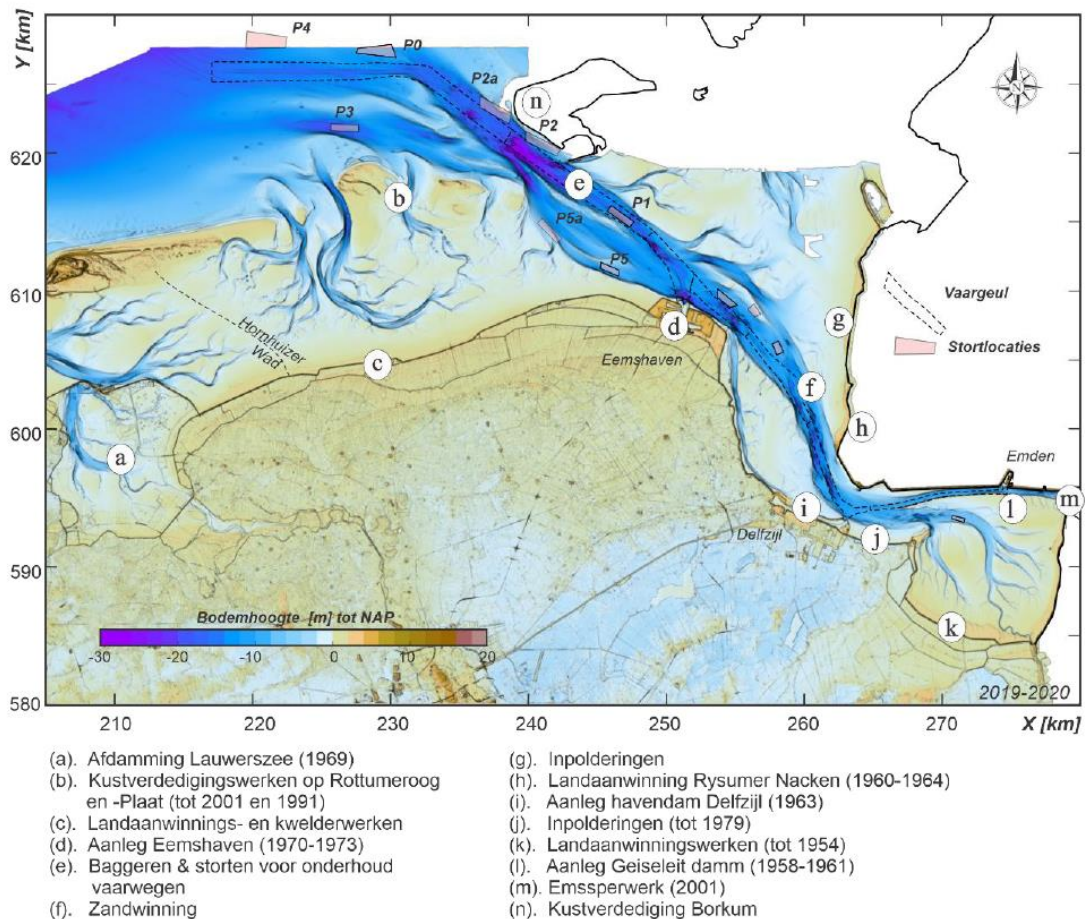


Figuur 2.4 Morfologische ontwikkeling van het geulenpatroon in het Eems-Dollard estuarium over de afgelopen 500 jaar (uit: Schrijvershof et al, 2024).

2.2 Recente ontwikkelingen (decennia)

2.2.1 Menselijke ingrepen

Sinds halverwege de 20^e eeuw zijn de aanleg van havens en haar stroomreguleringswerken, vaargeulverdiepingen en de bijbehorende onderhoudsbaggerwerkzaamheden de belangrijkste menselijke ingrepen in het Eems-Dollard estuarium. Figuur 2.5 laat de belangrijkste ingrepen in het gehele Eems-Dollard estuarium zien. Op grote ruimtelijke schaal zijn de afdamming van de Lauwerszee in 1969 (Figuur 2.5, a) en landaanwinningsswerken langs de Groningse kust (Figuur 2.5, c) van belang. Met name de verkleining van de komberging van het Friesche Zeegat heeft gezorgd voor een afname van het getijprisma door het zeegat, resulterend in erosie van de ebdelta. Dit zorgt voor een toename van het sedimentaanbod vanuit het Groningerwad richting de buiten Eems (Elias et al., 2022).



Figuur 2.5 Overzichtskartaal van de belangrijkste menselijke ingrepen in het Eems-Dollard estuarium (uit: Elias et al, 2022).

In Tabel 2-1 zijn specifiek de ingrepen opgenomen die relevant worden geacht voor de huidige morfologische ontwikkeling van het plaat-geul systeem in de Buiten Eems. Tussen 1970 en 1973 is de Eemshaven aangelegd. De haven is aangelegd door in zeewaartse richting uit te bouwen en heeft daarmee het Doekegat versmald. De ontwikkeling van het plaat-geul complex *Doekegat* – *Doekeplaat* – *Eemshörn Rinne* wordt waarschijnlijk sterk beïnvloed door deze versmalling. Vlak na de aanleg van de Eemshaven liep de route van de vaargeulverbinding Eemshaven – Noordzee vanaf het Doekegat, via de Oude Westereems naar het Huibertgat. De van nature voorkomende hoofdgeul werd ten tijde van de aanleg gevormd door de (ebgedomineerde) Oude Westereems die door de oversteek van een smal drempelgebied efficiënt te verbinden was met het Huibertgat (zie Figuur 2.4c,d,e). In de jaren 70 van de 20^e eeuw is de vaarroute verlegd naar het Randzelgat omdat de Oude Westereems steeds verder verondiepte. Voor deze verlegging moest het drempelgebied dat tussen het Doekegat en het Randzelgat ligt verdiept worden. In 1989 heeft in het zeewaartse gedeelte tevens een vaargeulverlegging plaatsgevonden, van het Huibertgat naar de Westereems (zie Tabel 2-1). Voor deze verlegde route moest het drempelgebied aan zeewaartse zijde van de Westereems verdiept worden. De huidige vaarverbinding volgt een route die het Doekegat, Randzelgat en de Westereems volgt (zie Figuur 1.2). De zuidwestzijde van het Duitse Waddeneiland Borkum is versterkt met een kustverdediging, wat laterale migratie van de Westereems in noordoostelijke richting niet mogelijk maakt. Als gevolg van de kustverdediging zijn diepe ontgrondingskuilen in de Westereems ontstaan.

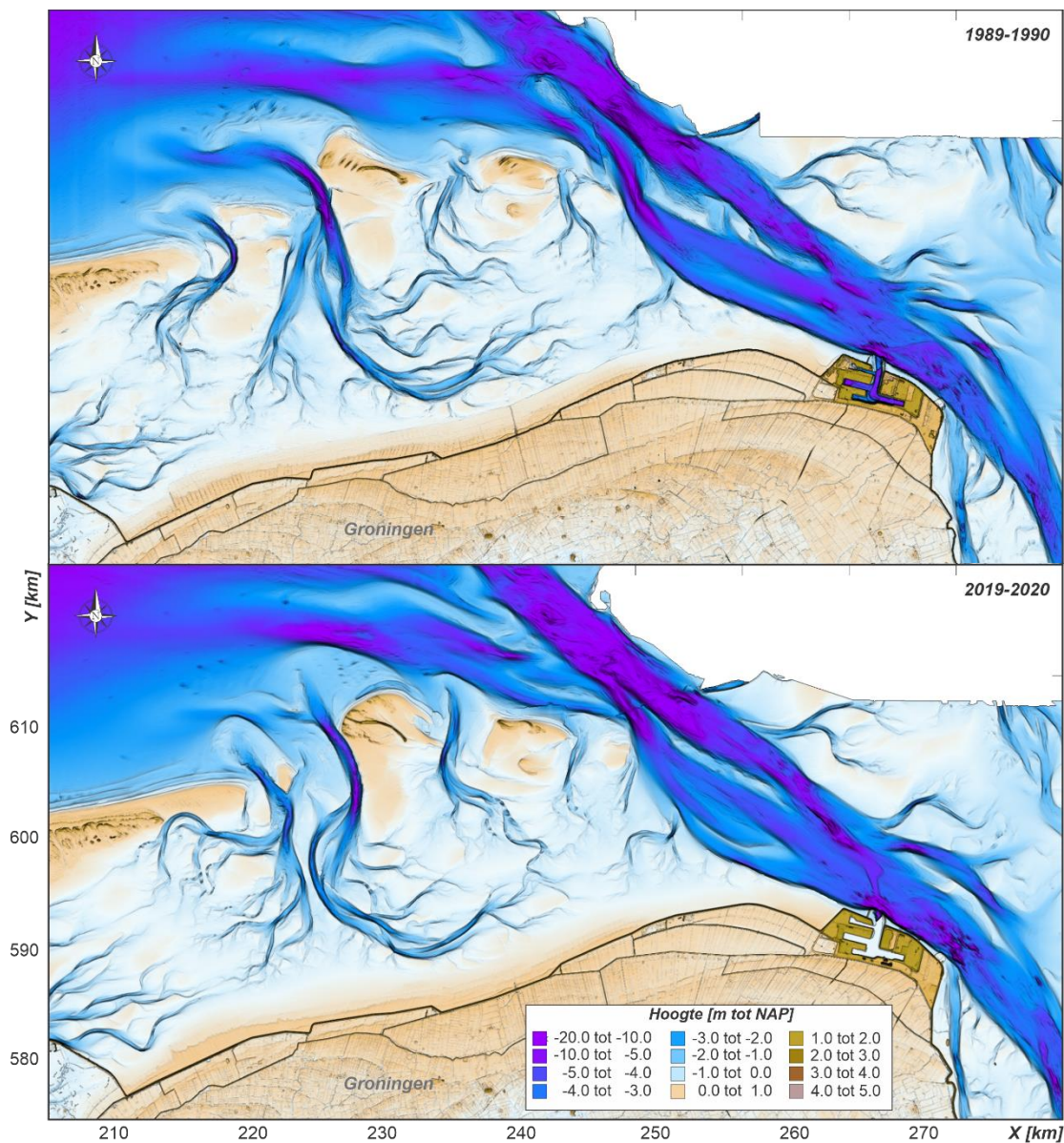
Tabel 2-1. Menselijke ingrepen in de Buiten Eems. Gebaseerd op Vroom et al. (2022) en Cleveringa (2008).

Jaar	Ingreep
1898	Start baggerwerkzaamheden Oost Friesche Gaatje
Begin 20 ^e eeuw	Verlegging vaargeul van Bocht van Watum naar Oost Friesche Gaatje
1969	Afdamming Lauwerszee
1969	Verruiming Huibertgat (diepgang 14 meter)
1972	Baggeren Bocht van Watum wordt gestopt
1970 – 1973	Aanleg Eemshaven
1976	Verlegging vaargeul van Oude Westereems naar Randzelgat (na verdieping drempelgebied tussen Randzelgat en Doekegat)
1991	Kustverdediging Rottumerplaat gestopt
1989	Verlegging vaargeul van Huibertgat naar Westereems (na verdieping drempelgebied). Ingebruikname stortlocatie Oude Westereems voor baggerspecie Eemshaven
2001	Kustverdediging Rottumeroog gestopt
1972 – 2004	Storten van baggerspecie in de Bocht van Watum
2009 – 2013	Verdieping en uitbreiding (Beatrixhaven en Wilhelminahaven) van de Eemshaven
2016 – 2017	Verruiming van de verbinding Eemshaven - Noordzee voor schepen met een diepgang van 14 meter.

2.2.2 Plaat-geul systemen

et geulsysteem in de Buiten Eems bestaat uit locaties met een tweegeulensysteem gescheiden door een ondiepte (zandplaat) afgewisseld met een enkelgeulsysteem waar de twee geulen convergeren. De van nature voorkomende ondieptes (drempels) in de vaargeul bevinden zich aan de uiteinden van een dergelijk plaat-geulsysteem.

De zeewaarts gelegen ebdelta wordt gevormd door de Ballon Plate, omsloten door de geulen Huibertgat en Westereems (Figuur 2.6). Ter plaatse van de Waddeneilanden Borkum en Rottumeroog komen deze geulen samen. Landwaarts van deze lijn scheiden de geulen zich in Oude Westereems en Randzelgat met het tussengelegen plaatcomplex Meeuwenstaart. Landwaarts van Eemshaven ligt de geul Doekegat met de naastgelegen plaat Doekeplaat. De geul gelegen tussen de Doekeplaat en het huidige wantij bestaande uit de Eemshornplaat heet de Emshörn Rinne. Het vaargeultraject van de verbinding Eemshaven-Noordzee gaat door de geulen Doekegat, Randzelgat en Westereems (zie Figuur 1.2).



Figuur 2.6 Benamingen van geulen en platen in de Buiten Eems weergegeven op de bathymetrie uit 1989, voor het mondingsgebied (boven) en vanaf de monding tot Eemshaven (onder) (uit: Elias et al., 2022).

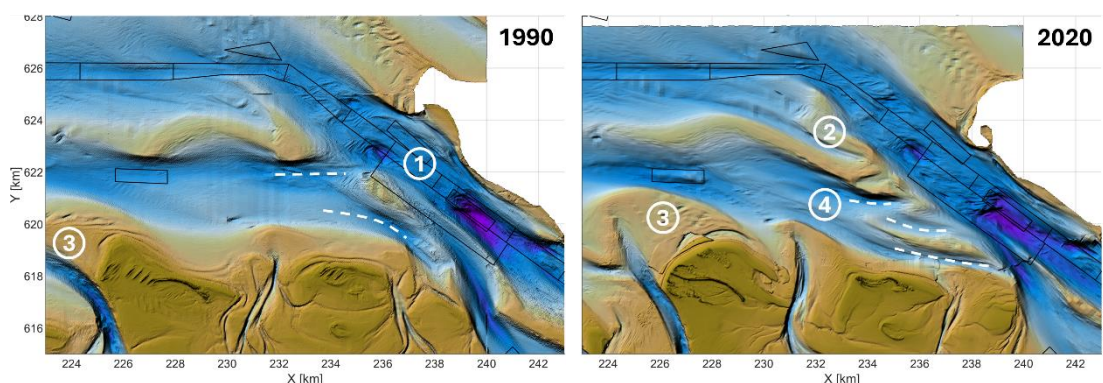
2.2.2.1 Huibertgat – Huibertplaat – Westereems

De buitendelta van de Eems wordt gedomineerd door twee grote geulen, Westereems en Huibertgat, gescheiden door de Huibertplaat/Ballon Plate. De Westereems is een stabiele geul en vertoont weinig migratie (Hartsuiker, 2007). Elias et al. (2022) toont aan dat sedimentvolumes in dit gebied afnemen met een lineaire trend van $-0.86 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ sinds 1990, dwz. de geul verruimt. In het zuidoosten van de buitendelta, ter hoogte van Borkum, wordt de maximale diepte van de Westereems beperkt door harde lagen die hier direct onder de geulbodem liggen (zie Figuur 2.2). Hierdoor is de geul in de breedte uit gaan breiden (Pierik et al., 2019). De harde kustverdediging van Borkum voorkomt oostelijke migratie van de Westereems. Hierdoor krijgt de geul een haast rechthoekige vorm met een brede, opvallend platte bodem en steile geulwanden (zie (1) in Figuur 2.7).

De Huibertplaat is een langgerekte plaat die Westereems en Huibertgat van elkaar scheidt. Deze neemt toe in breedte en in volume (Hartsuiker, 2007; Elias et al., 2022). Het oostelijke deel van de Huibertplaat, de Ballon Plate, wordt zowel richting het noorden als naar het zuiden toe breder (zie (2) in Figuur 2.7). Dit resulteert in sedimentatie aan de zuidelijke rand van de Westereems en rotatie van het Huibertgat.

Het Huibertgat, dat zuidelijk van de Huibertplaat ligt had in 1990 nog een oost-west oriëntatie. De buitendelta van de Lauwers bouwt in noordoostelijke richting uit (3) door een kloksgewijze rotatie van de belangrijkste uitstroombegul van het zeegat van de Lauwers (Elias & Cleveringa, 2021). Hierdoor roteert het Huibertgat, waarbij de oostelijke uitstroombegul Westereems/Randzelgat zuidelijk verplaatst. De aansluiting tussen Huibertgat en Randzelgat verandert van een systeem met twee uitstroombegulen (in oostelijke en zuidoostelijke richting) naar een breder drempelgebied met meerdere eb- en vloedscharen (4). Het getijvolume door het Huibertgat neemt af (Kiezebrink, 1996).

Veel van de ontwikkelingen in dit gebied worden gedreven door een groot sedimentaanbod langs de kustzone in oostelijke richting (Elias et al., 2022). Dit is een (indirect) effect van de afsluiting van de Lauwerszee, waardoor de ebdelta van het Friesche Zeegat sterk in volume is afgenomen. Veel van het sediment vanuit de ebdelta van het Friesche Zeegat is vervolgens aangeland op het eiland Schiermonnikoog waardoor de eilandstaart van Schiermonnikoog tussen 1989 en 2020 zo'n 3,4 km langer is geworden (Elias & Cleveringa, 2021). Als gevolg hiervan breiden de buitendelta's van Lauwers en Schild in oostelijke richting uit en kent ook het Groningerwad een grote toename in sedimentvolume.



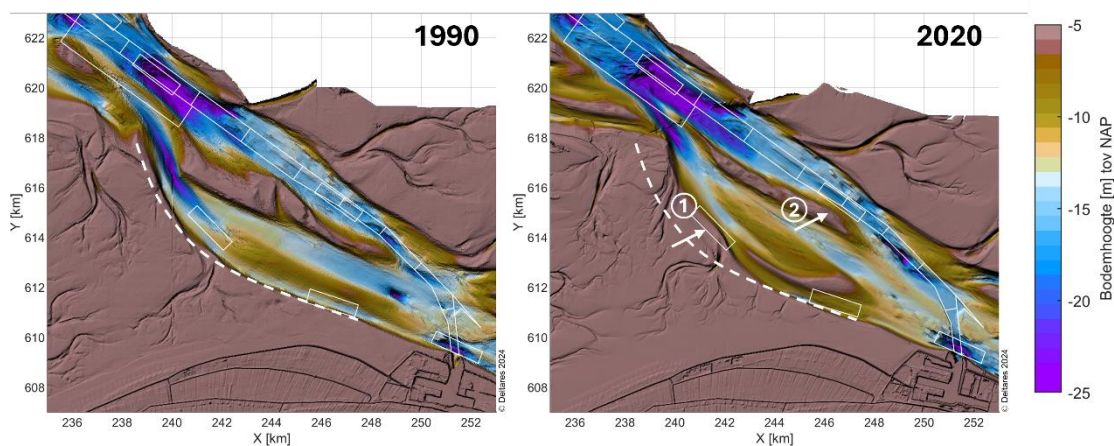
Figuur 2.7 Morfologische ontwikkeling van het plaat-geul systeem Huibertgat – Huibertplaat/Ballon Plate – Westereems. Links de bodem uit 1990, rechts 2020.

2.2.2.2 Oude Westereems – Meeuwenstaart – Randzelgat

Landinwaarts van het Waddeneiland Borkum bevinden zich de geulen Oude Westereems en Randzelgat, gescheiden door de langgerekte plaat Meeuwenstaart. De Oude Westereems was in de 19^e eeuw nog de hoofdgeul (zie Figuur 2.4). De laatste decennia kent de Oude Westereems een trend van verondieping (Hartsuiker, 2007) door sedimentatie met een gemiddelde volumetoename van 2,5 Mm³/jaar (Elias et al., 2022). Hierdoor is de geul meer gaan meanderen en ontstaan eb- en vloedscharen, gescheiden door drempels. Vanwege het hoge sedimentaanbod vanuit het Groninger Wad wordt de Oude Westereems naar het oosten gedrukt ((1) in Figuur 2.8).

De Meeuwenstaart is sinds 1989 duidelijk in volume afgenomen (Elias et al., 2022). De plaat wordt zowel smaller als lager, waardoor het debiet over de Meeuwenstaart toeneemt. De versmalling vindt met name plaats aan westelijke zijde, waar de oostelijke migratie van de Oude Westereems druk op de Meeuwenstaart uitoefent (2). Hierdoor migreert ook de Meeuwenstaart naar het oosten, richting het Randzelgat. Met name de meest oostelijke punt van de Meeuwenstaart, ter hoogte van de ontgrondingskuil bij verspreidingslocatie P1, is de afgelopen jaren in oostelijke richting opgeschoven.

In het Randzelgat wordt de morfologische ontwikkeling beïnvloed door de ligging van harde lagen. Er bevindt zich hier keileem direct onder de geulbodem, met daaronder potklei. Omdat de diepte door deze harde lagen beperkt wordt, heeft er geulverbreding plaatsgevonden (Pierik et al., 2019). Op enkele locaties zijn ontgrondingskuilen te vinden. In tegenstelling tot de Oude Westereems en de Meeuwenstaart kan het Randzelgat niet naar het oosten migreren vanwege de ligging van harde lagen en het hoge (en in hoogte toenemende) plaatgebied Randzel dat zich hier ten oosten bevindt. Waar de Oude Westereems in volume en diepte afneemt, neemt het geulvolume van het Randzelgat toe. De verwachting is dat het Randzelgat zal gaan domineren over de oorspronkelijke hoofdgeul Oude Westereems (Hartsuiker, 2007).

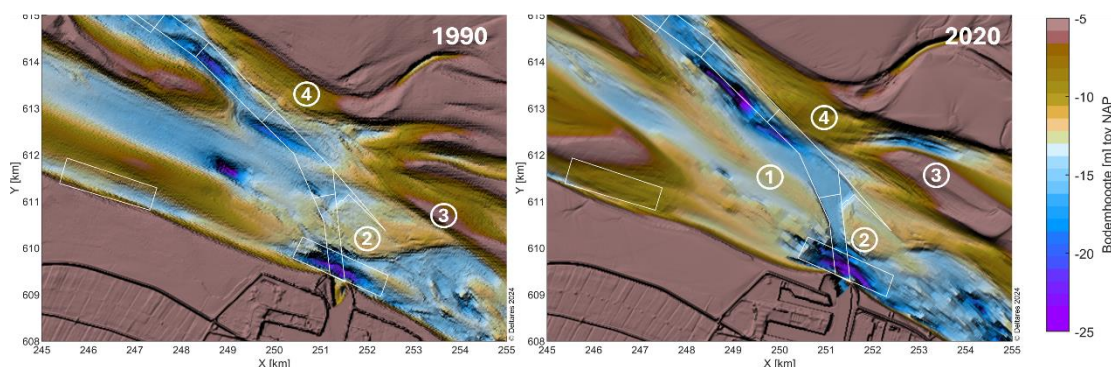


Figuur 2.8 Morfologische ontwikkeling van het plaat-geul systeem Oude Westereems – Meeuwenstaart – Randzelgat

2.2.2.3 Doekegat – Doekeplaat – Eemshörn Rinne

Het Doekegat, dat voor Eemshaven langs loopt, vormt een tweegeulensysteem met de Eemshörn Rinne, van elkaar gescheiden door de Doekeplaat. Het Doekegat vertoont een lichte trend van verruiming en neemt in sedimentvolume af (Hartsuiker, 2007; Elias et al., 2022). Voor de ingang van de Eemshaven bevindt zich een drempelgebied waar stromingen uit vier geulen (Randzelgat, Oude Westereems, Doekegat en Eemshörn Rinne) samenkomen. Dit drempelgebied is de afgelopen decennia toegenomen in hoogte, met name in het verlengde van de Meeuwenstaart ((1) in Figuur 2.9). Direct voor Eemshaven bevindt zich een diepe erosiekuil met daaromheen een gebied waarbij de harde lagen direct onder de bodem liggen, dwz. de diepte wordt hier begrensd door de aanwezigheid van harde lagen (2).

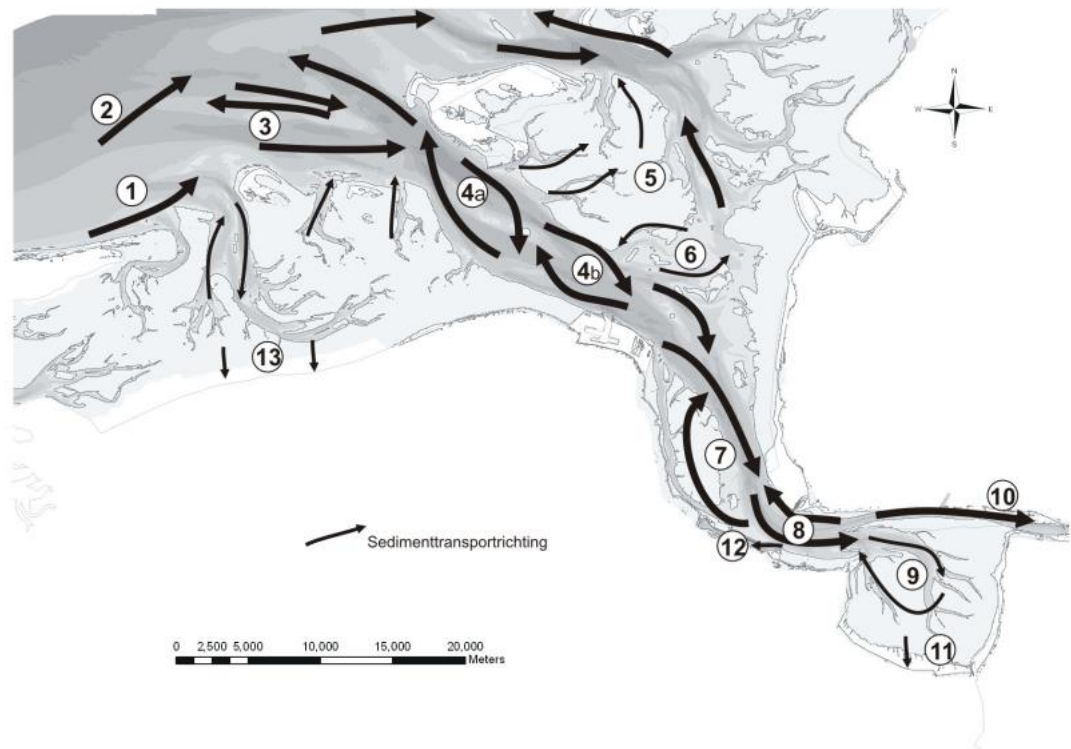
De Doekeplaat, ten noordoosten van het Doekegat, neemt toe in volume en breedte (3). Hierdoor wordt de Eemshörn Rinne naar het noordoosten gedrukt. Deze geul was oorspronkelijk de hoofdgeul en sloot aan op de Bocht van Watum (zie ook Figuur 2.4) maar met het verdwijnen van de Bocht van Watum en de verbinding met de Oostereems heeft deze geul aan belang verloren. Tegelijkertijd is een uitbouw zichtbaar in het ebschild van het Eemshoornvat dat vanuit het Eemshoornwad afwatert (4).



Figuur 2.9 Morfologische ontwikkeling van het plaat-geul complex Doekegat - Doekeplaat - Eemshörn Rinne tussen 1990 en 2020.

2.3 Sedimenttransport en stortcapaciteit

De residuele zandtransportpatronen in het gehele Eems-Dollard estuarium zijn door Cleveringa (2008) geschematiseerd door interpretatie van de residuele transporten berekend aan de hand van de bodemsamenstelling en numerieke modelresultaten (Figuur 2.10). In het zeewaartse gedeelte van de Buiten Eems vindt er hoofdzakelijk een west naar oost langtransport plaats gedreven door schuin invallende golven en een asymmetrisch getij (zie (1) en (2) in Figuur 2.10). Het netto zandtransport in de geulen van de Buiten Eems is hoofdzakelijk getijgedreven. Het Huibertgat (zie (3) in Figuur 2.10) is een vloeddominante geul en de Westereems is ebdominant. Het plaat-geul complex *Oude Westereems* – Meeuwenstaart – *Randzelgat* wordt gekenmerkt door het voorkomen van twee circulatiecellen doordat er ook stroming over de Meeuwenstaart plaatsvindt (zie (4a) en (4b) in Figuur 2.10). Het Randzelgat is de vloedgedomineerde geul en de Oude Westereems is ebgedomineerd. Vanuit het Randzelgat is er een netto zandtransport (zie (5) en (6) in Figuur 2.10) richting het wantij dat tegenwoordig de Oostereems scheidt van het Eems-Dollard estuarium (De Randzel en het Eemshoornwad, zie Figuur 1.2). Op basis van de interpretatie van residuele zandtransportpatronen door Cleveringa (2008) is de *Eemshörn Rinne* een vloedgedomineerde geul maar is niet met zekerheid vast te stellen hoe de gehele circulatiecel van het plaat-geulcomplex *Doekegat* – *Doekeplaat* – *Eemshörn Rinne* er uit ziet.



Figuur 2.10 Residuele zandtransportpatronen, afgeleid aan de hand van een combinatie van methoden gebaseerd op data van de bodemsamenstelling en modelresultaten (uit: Cleveringa, 2008).

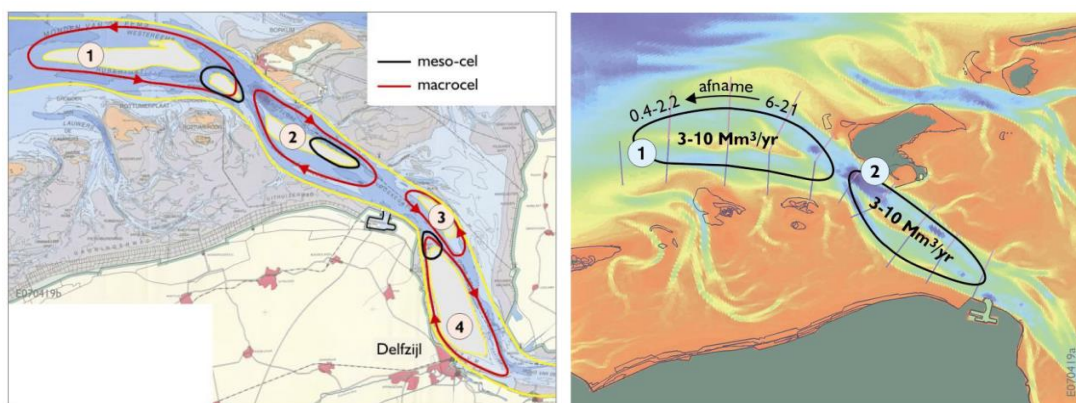
Als onderdeel van de milieueffectrapportage naar de vaarwegverruiming uitgevoerd in 2009 (Rijkswaterstaat, 2009) hebben Jeuken et al. (2008) het macrocellenconcept, dat is ontwikkeld op basis van de residuele transportpatronen in de Westerschelde (zie Winterwerp et al., 2001), toegepast op de Buiten Eems (Figuur 2.11, links). Een dergelijke analyse is relevant omdat een meergeulensysteem, zoals in de Buiten Eems, kan degenereren naar een ééngeulensysteem onder invloed van baggeren en storten (Wang & Winterwerp, 2001, Jeuken & Wang, 2010). Het cellenconcept is toegepast om te evalueren hoeveel gebaggerd zand jaarlijks maximaal in een geul gestort kan worden zonder dat het de stabiliteit van het meergeulensysteem beïnvloedt (i.e. dat een geul verzandt).

De stabiliteit van het meergeulensysteem wordt beïnvloed als er een kritische stortcapaciteit overschreden wordt. Hiervoor wordt de stortcapaciteit gerelateerd aan het evenwichtstransport in een geul. Het evenwichtstransport (T_e) is gedefinieerd als het totaal van het getijgemiddelde bruto sedimenttransport van de hoofd- en nevengeul bij elkaar opgeteld. De kritische stortcapaciteit is gedefinieerd als:

- 5% van T_e als het sediment in de vaargeul gebaggerd wordt en in de nevengeul van dezelfde cel gestort wordt
- 10% van T_e als het sediment dat in de nevengeul gestort wordt uit andere macrocellen afkomstig is.

De bruto zandtransporten zijn door Jeuken et al. (2007) berekend op basis van de hydrodynamische numerieke modelberekeningen (Hartsuiker et al., 2007) die in het kader van de MER-studie uit 2009 (Rijkswaterstaat, 2009) zijn uitgevoerd. In macrocel 1 & 2 (Figuur 2.11,

links) is de bruto zandtransportcapaciteit ongeveer 3 – 10 Mm³/jaar (Figuur 2.11, rechts). Uit het evenwichtstransport (T_e) dat volgt uit deze bruto zandtransporten concluderen Jeuken et al. (2007) dat de totale stortcapaciteit van dit deel van het meergeulensysteem 0,6 – 2,0 Mm³/jaar bedraagt. Met de destijds ingeschatte toename van het baggerbezwaar in de vaargeul van 0,8 Mm³/jaar was de conclusie dat de stortcapaciteit in dit deel van het meergeulensysteem van de Buiten Eems toereikend was voor de toename in baggerbezwaar als gevolg van de geplande vaarwegverruiming. Hierbij moet de opmerking gemaakt worden dat het concept uitgaat van storten in de nevengeul en baggeren in de hoofdgeul. Met de huidige verspreidingslocaties gaat dat niet op en wordt er gebaggerd én gestort in de hoofdgeul. De stortcapaciteit zal daarom waarschijnlijk in werkelijkheid hoger liggen.

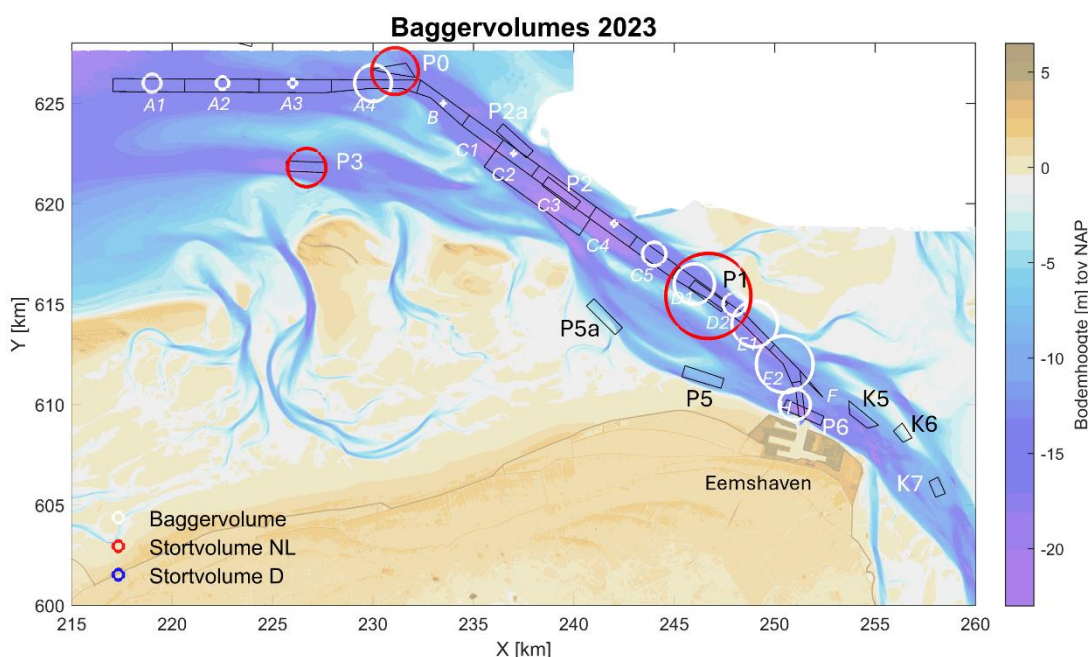


Figuur 2.11 Toepassing van het macrocellenconcept op het eb- en vloed meergeulensysteem van het Eems-Dollard estuarium (links) en de ingeschatte bruto sedimenttransporten voor de macrocel 1 & 2 (rechts) (uit: Jeuken et al., 2007).

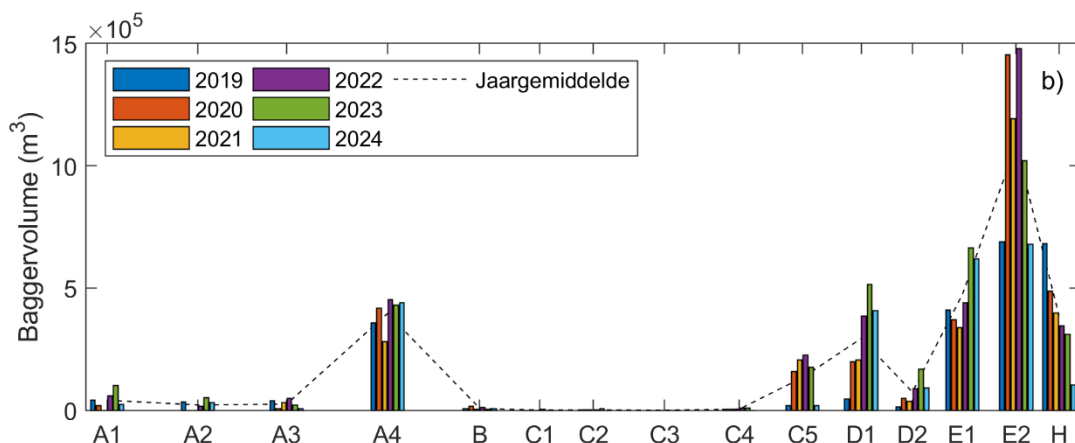
3 Bagger- en stortvolumes

3.1 Gerealiseerde onderhoudsvolumes

In de periode 2002 – 2017 bedroegen de baggervolumes ten behoeve van het vaargeulonderhoud ongeveer 0,55 Mm³/jaar (zie Figuur 1.1). Sinds de vaarwegverruiming is uitgevoerd zijn de baggervolumes bekend per individueel baggervak (zie Figuur 3.1 voor de ligging en benaming van de baggervakken). Het baggerbezwaar concentreert zich op drie locaties (zie Figuur 3.1 en Figuur 3.2); op het drempelgebied aan de zeewaartse zijde van de Westereems (baggervak A4), in het Randzelgat (baggervakken C5 tot E1) en op het drempelgebied dat tussen het Randzelgat en het Doekegat gelegen is (baggervakken E2 en H). In de Westereems (Figuur 3.2, baggervak A) is het gebaggerde volume vrij constant sinds de verruiming en ongeveer 0,4 – 0,5 Mm³/jaar. In het Randzelgat (C5 tot E1) zijn de jaarlijkse baggervolumes meer variabel maar schommelen rond een gemiddelde van 1,5 Mm³/jaar. In het drempelgebied tussen Doekegat en Randzelgat (E2 en H) is het baggerbezwaar veruit het grootst met ongeveer 2,0 Mm³/jaar. In een deel van dit gebied (baggervak H, drempelgebied Doekegat) nemen de baggervolumes sinds de verruiming jaarlijks af.



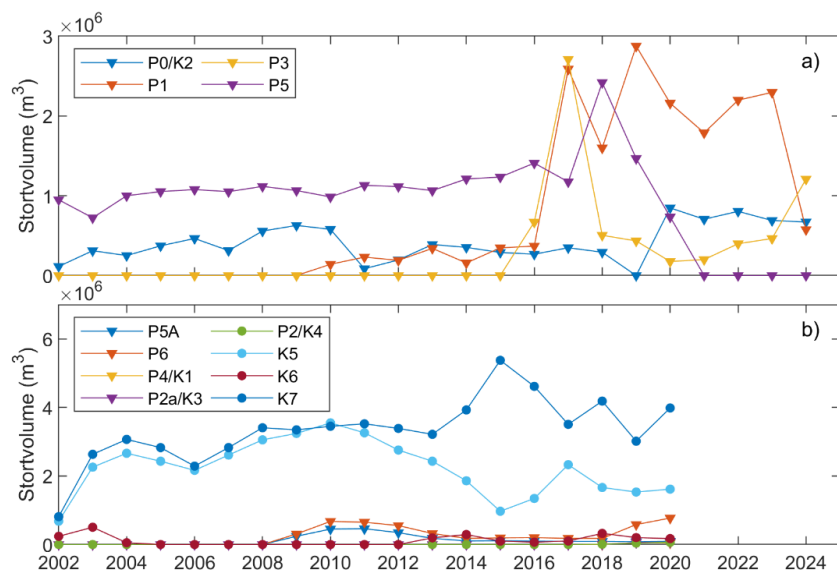
Figuur 3.1 Bagger- en stortvolumes voor het jaar 2023. De grootte van de cirkels geven de relatieve grootte van het baggervolume (witte cirkels) dan wel stortvolume (rode cirkels) weer per bagger- of stortvak (Duitse stortvolumes ontbreken voor het jaar 2023).



Figuur 3.2 Jaarlijkse baggervolumes voor de verbinding Eemshaven – Noordzee weergegeven per baggervak over de periode januari 2019 t/m juli 2024 (het jaar 2024 is niet compleet).

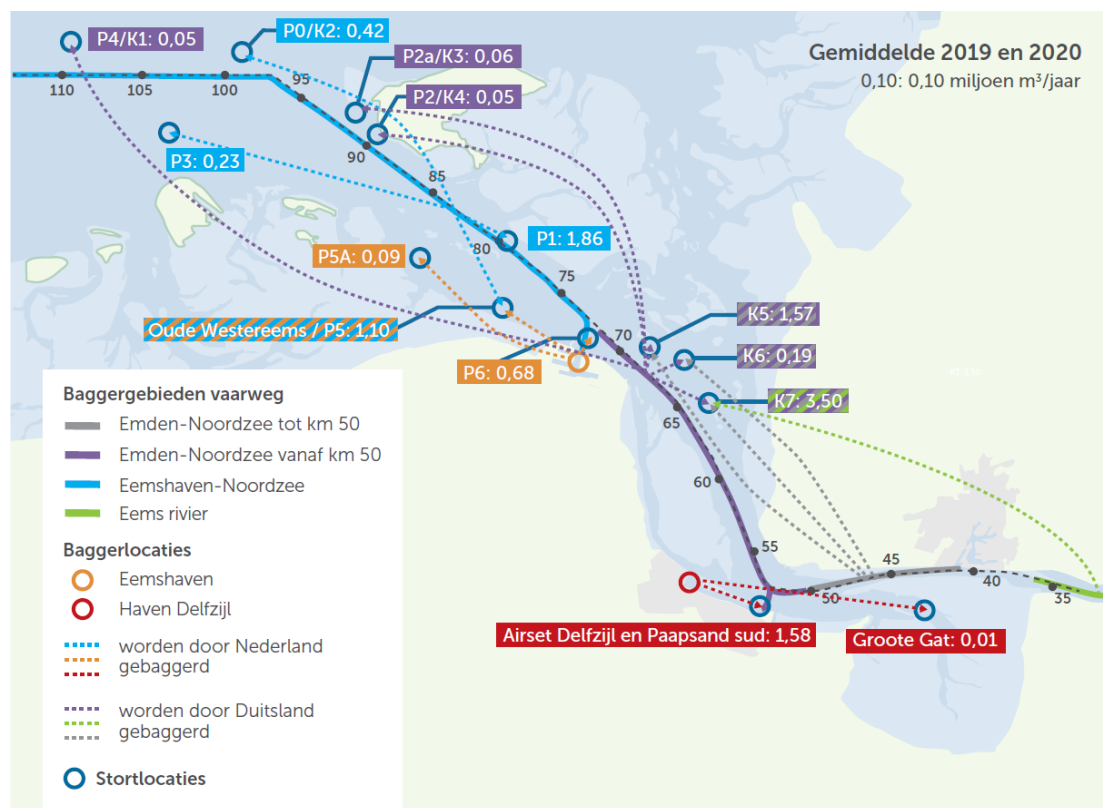
Het sediment (voornamelijk zand) dat door Nederland gebaggerd wordt voor de vaargeulverbinding Eemshaven – Noordzee wordt gestort op verspreidingsvakken P0, P1 en P3 en tot 2021 ook op verspreidingsvak P5 (zie Figuur 3.1 voor de ligging). Het grootste volume (2 – 3 Mm³/jaar) wordt gestort op verspreidingslocatie P1 (Figuur 3.3a), gelegen in het Randzelgat. Doordat de (juridisch afgesproken) stortcapaciteit in baggervak P1 overschreden wordt is er in 2024 meer gebruik gemaakt van stortlocatie P3, gelegen in het Huibertgat (pers. comm. Rijkswaterstaat).

In de Buiten Eems wordt ook sediment gestort dat vrij komt door het baggeren van de vaargeulen landwaarts van Eemshaven. Op de Duitse verspreidingslocaties K5 en K7 wordt sinds de vaarwegverruiming in 2016-2017 ongeveer gemiddeld 2 Mm³/jaar en 4 Mm³/jaar gestort, respectievelijk. De verspreidingslocatie K5 ligt ten zuiden van de Doekeplaat, hier wordt voornamelijk zandig materiaal gestort afkomstig van de drempel aan de landwaartse kant van het Oost Friesche Gaatje. De verspreidingslocatie K7 ligt aan de landwaartse zijde van het Doekegat (zie Figuur 3.1 voor de ligging), hier wordt voornamelijk slibrijk materiaal gestort afkomst uit het vaargeulonderhoud van het Vaarwater naar Emden (Vroom et al., 2022).



Figuur 3.3 Jaarlijkse stortvolumes voor alle stortvakken gebruikt voor (a) het vaargeulonderhoud van de verbinding Eemshaven-Noordzee en (b) het vaargeulonderhoud voor de geulen verder landwaarts in het estuarium.

Uit de geleverde bagger- en stortgegevens van het traject Eemshaven – Noordzee kan niet opgemaakt worden waar gebaggerd sediment uit een specifiek baggervak verspreid is. In Figuur 3.4 is een indicatie gegeven van de verspreidingsverdeling van de gemiddelde baggervolumes over de jaren 2019 en 2020. De figuur toont echter de absolute verdeling voor ieder vaarwegtraject, en dus niet per individueel baggervak.



Figuur 3.4 Gemiddelde bagger- en stortvolumes voor de jaren 2019 en 2020 voor het gehele Eems-Dollard estuarium. De stippellijnen geven de verspreidingsverdeling van het baggermateriaal van een geheel vaarwegtraject (uit: Vroom et al., 2022).

3.2 Berekening inschatting onderhoudsvolumes

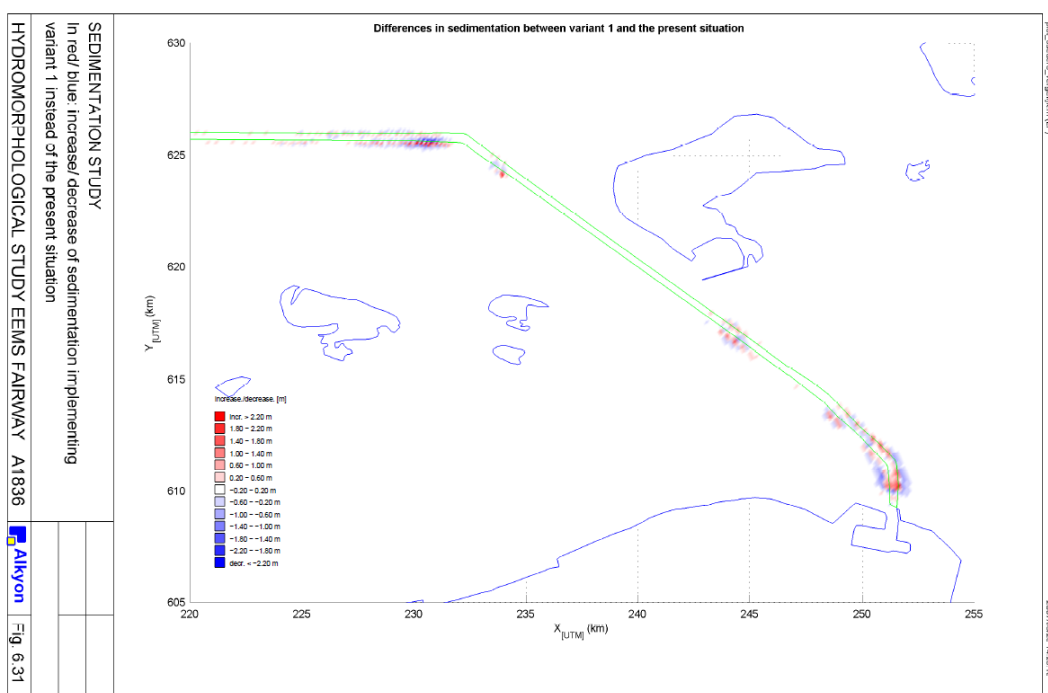
In het kader van de MER naar de vaarwegverruiming in 2009 (Rijkswaterstaat, 2009) is er ingeschat hoeveel het onderhoudsbaggerbezwaar zou toenemen. Hartsuiker et al. (2007) hebben met behulp van twee methoden en twee ontwerpvarianten van de vaargeul berekend dat het vaargeulonderhoud van (de destijds gemiddeld gerealiseerde) 0,44 Mm³/jaar zou toenemen tot ongeveer 1,1 - 1,2 Mm³/jaar (afhankelijk van de ontwerpvariant). Er is onderscheid gemaakt in een toename van het baggerbezwaar als gevolg van (1) een afname van de transportcapaciteit in de vaargeul als gevolg van de verdieping en verruiming en (2) morfodynamische activiteit van het plaat-geul systeem.

Om de toename in sedimentatie in de vaargeul als gevolg van de afname in transportcapaciteit (1) in te schatten is er gebruik gemaakt van een numeriek model gebaseerd op empirische formuleringen voor de waterbeweging en het sedimenttransport als gevolg van golven en stroming (CHANS). De stroming is afgeleid uit een Simona waterbewegingsmodel. De golfinformatie is afgeleid van metingen van een meetlocatie nabij Borkum (Borkumriff) en een meetlocatie verder richting Eemshaven (Eemszinker). Sedimentatiesnelheid is berekend door het verschil in transportcapaciteit met en zonder vaarwegverruiming te berekenen. Het

onderhoudsvolume als gevolg van de afname in transportcapaciteit werd geschat op 0,55 – 0,6 Mm³/jaar (afhankelijk van de ontwerpvariant).

Het toekomstige onderhoudsvolume als gevolg van de morfodynamische activiteit (2) is ingeschat door aan de hand van het verschil in bodemhoogte tussen 2005 en 2001 de sedimentatiesnelheid langs de vaargeul te berekenen. De sterkste aanzanding werd via deze methode berekend bij de Huibertplaat (km 98-100) en de Meeuwenstaart (km 78-80). De berekende jaarlijks-gemiddelde en vaarweg-gemiddelde sedimentatiesnelheid is gebruikt om tot een baggerbezwaar van 0,32 – 0,39 Mm³/jaar (afhankelijk van de ontwerpvariant) te komen. Hartsuiker et al. (2007) geven aan dat de sedimentatie als gevolg van morfodynamische activiteit voor de grootste onzekerheid zorgen en dat de sedimentatiesnelheden 50% hoger of lager kunnen zijn.

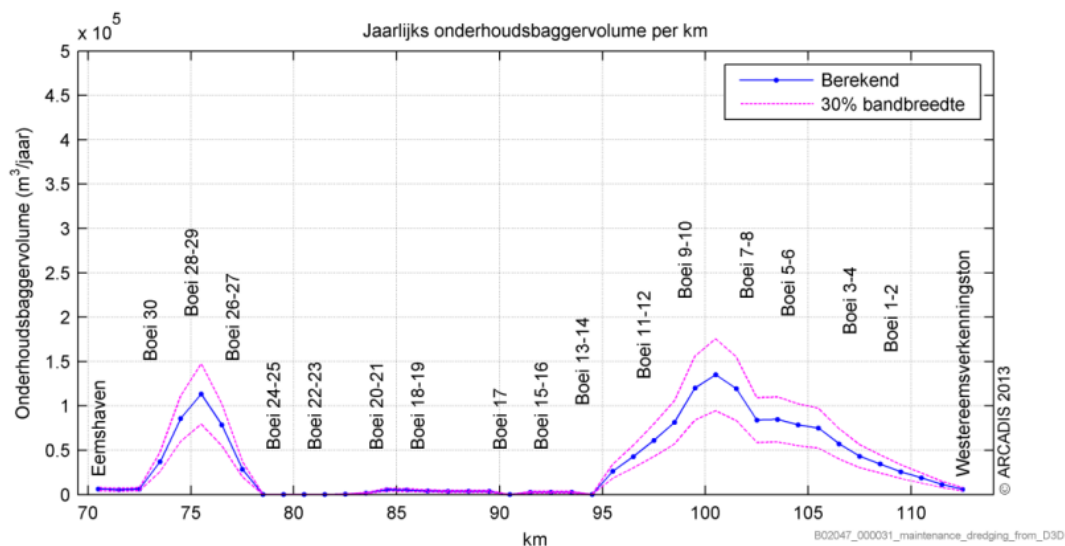
Aanvullend op de hier boven beschreven sedimentatieberekeningen hebben Hartsuiker et al. (2007) morfologische berekeningen gedaan met een Delft3D model (geconverteerd vanuit een SIMONA waterbewegingsmodel) om beter inzicht te krijgen in de sedimentatie- en erosieprocessen rondom het traject van de vaargeul. Deze resultaten (Figuur 3.5) zijn gebruikt om een verwachting uit te kunnen spreken over de locaties van het hoogste baggerbezwaar. De Delft3D resultaten zijn niet gebruikt om tot een kwantitatieve inschatting voor het baggerbezwaar te komen.



Figuur 3.5 Inschatting van Hartsuiker et al. (2007) van de toename (rood) of afname (blauw) in sedimentatie als gevolg van de vaarwegverruiming (variant 1). Uit: Hartsuiker et al. (2007).

In het kader van de MER naar de vaarwegverruiming in 2014 (Rijkswaterstaat, 2013) heeft Arcadis (2013) een studie uitgevoerd met een numeriek model van het Eems estuarium (Delft3D). Dit model is uitvoerig gevalideerd op de waterbeweging, saliniteit en sedimentconcentraties. Een morfologische validatie op basis van gerealiseerde baggervolumes of plaat-geulmigratie is geen onderdeel van de rapportage. Het model is toegepast voor de morfologische effectberekeningen van de vaarwegverruiming.

Op basis van een hydrodynamische simulatie (enkel getijstroming) van één springtij-doodtijcyclus is de morfologische ontwikkeling van één jaar gesimuleerd door deze op te schalen met een morfologische acceleratiefactor. Het baggerbezwaar tijdens een simulatie met de vaargeulverruiming is vergeleken met het baggerbezwaar tijdens een simulatie zonder de vaargeulverruiming. Het grootste baggerbezwaar langs het vaargeultraject na vaarwegverruiming werd in de Westereems (km 100) en aan de zuidzijde van het Randzelgat (km 75) verwacht (Figuur 3.6). Het totale onderhoudsvolume werd ingeschat op 1,5 Mm³/jaar (Rijkswaterstaat, 2013).

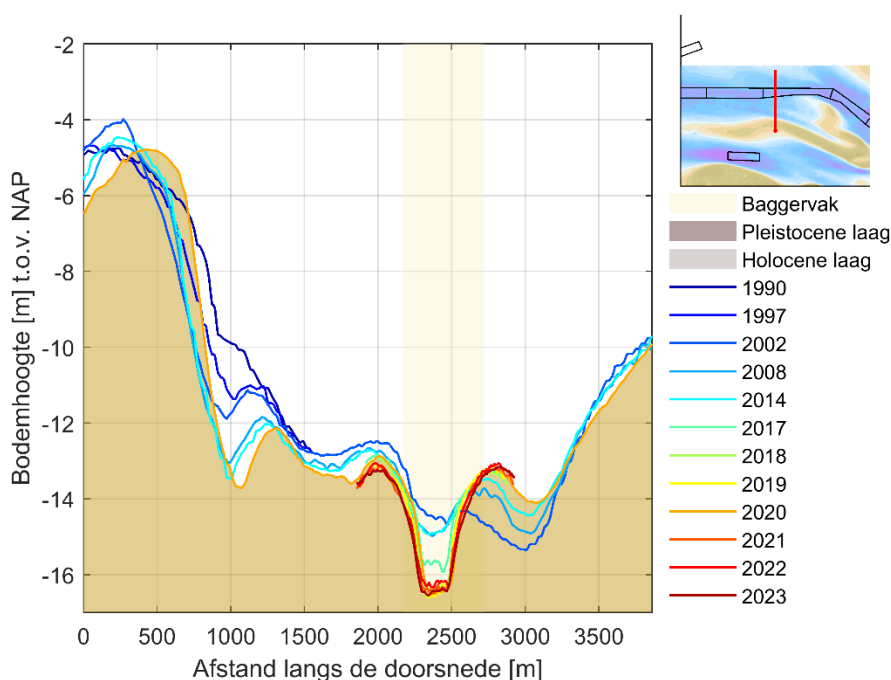


Figuur 3.6 Inschatting van het totale onderhoudsbaggerbezwaar per kilometersectie na vaarwegverruiming. Eemshaven ligt aan de linkerkant van het figuur en oplopende kilometers betekent verder zeewaarts. Uit: Arcadis (2013)

4 Morfologische dynamiek van het vaargeultracé

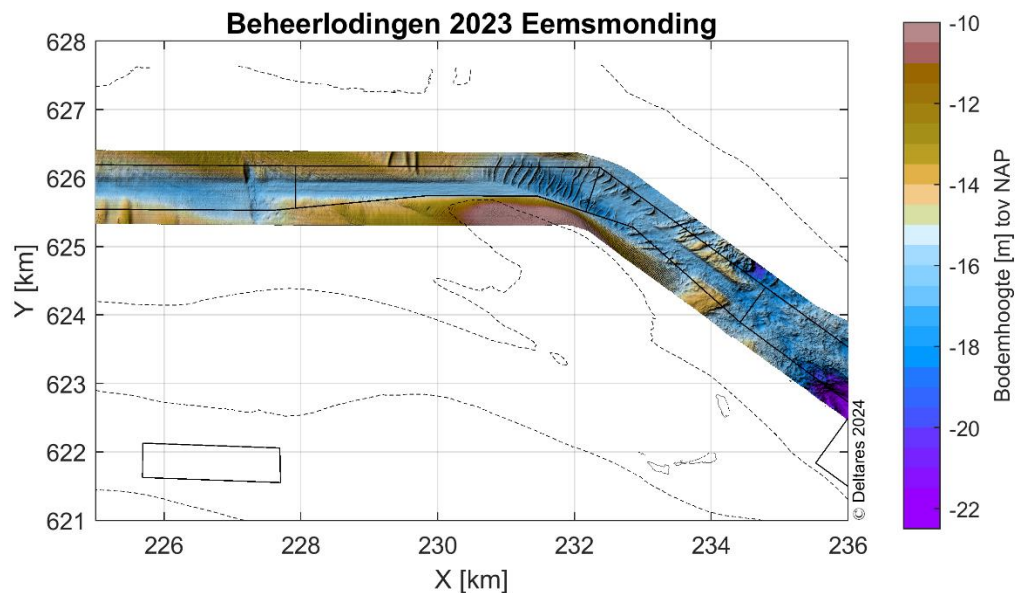
4.1 Huibertgat – Huibertplaat – Westereems

In het meest zeewaartse gedeelte van de vaargeul, baggervakken A1 tot A3, is het baggerbezwaar relatief laag (zie Figuur 3.2). De bodem rondom de vaargeul bevindt zich op een diepte van ca. -14 m NAP. Om de streefdiepte van -15 m NAP te bereiken is er een constante, lichte baggerinspanning nodig. In de bodemkaarten en doorsneden is de vaargeul duidelijk te zien als een smalle geul met platte bodem die uitgebaggerd wordt (Figuur 4.1).

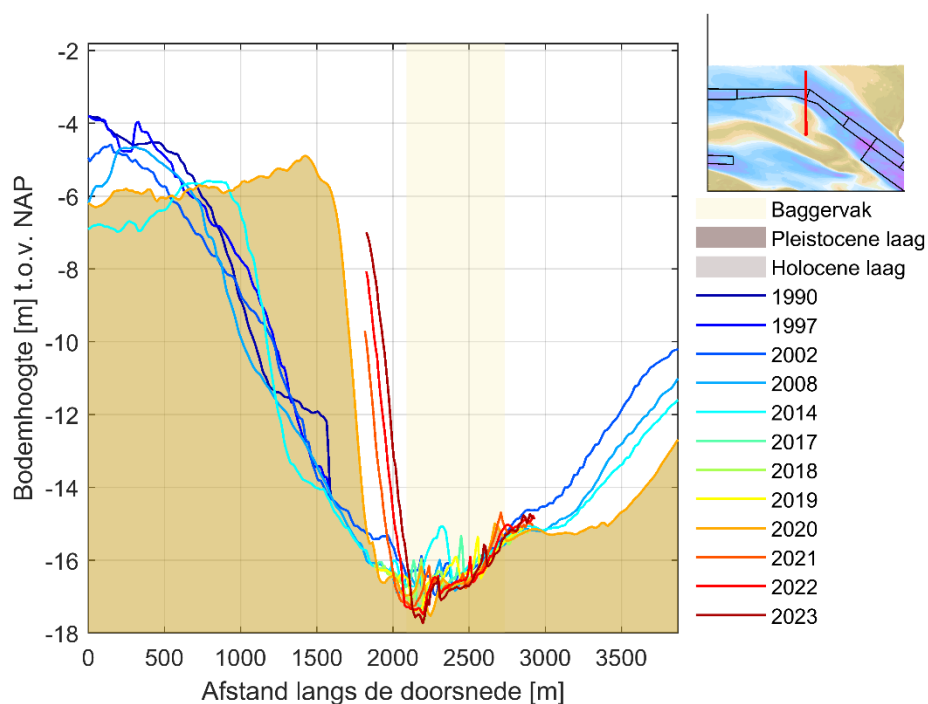


Figuur 4.1 Doorsnede door baggervak A3, waar relatief weinig gebaggerd wordt, op basis van beschikbare vaklodingen en beheerlodingen vanaf 2017. De verticale gele balk geeft de locatie van het baggervak. De bodemligging is stabiel en ter plaatse van de vaargeul wordt een smalle geul uitgebaggerd tot de streefdiepte.

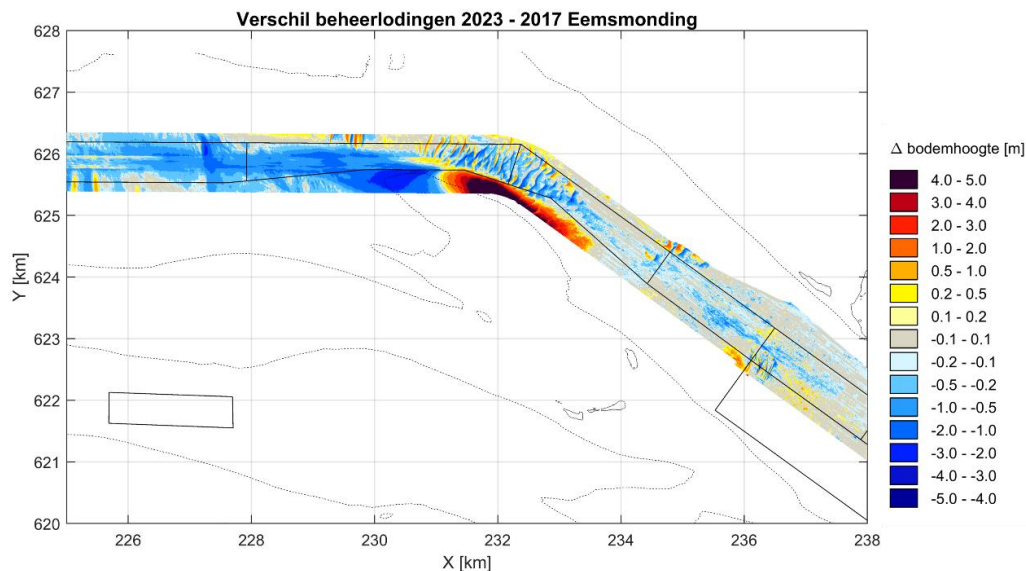
Verder naar het oosten, bij baggervak A4, neemt de baggerinspanning toe (ongeveer 0,4 Mm³/jaar – zie Figuur 3.2). Dit is te wijten aan de noordoostelijke punt van de Ballon Plate, die in noordoostelijke richting migreert en hierdoor het baggervak in beweegt (zie Figuur 2.7). De beheerlodingen van 2023 (Figuur 4.2) tonen een sterk diepteververschil aan de zuidkant van het baggervak A4. Dit wijst erop dat de plaatrand weggebaggerd moet worden om de geul op diepte te houden. In de doorsnede in Figuur 4.3 is de migratie van de plaatrand zichtbaar door de tijd, waarbij de beheerlodingen uit 2021, 2022 en 2023 tonen hoe de plaatrand richting de vaargeul opschuift met een migratiesnelheid van ca. 50 meter per jaar sinds 2014. Ook in de erosie-sedimentatiekaarten is een sterk sedimentatiegebied zichtbaar in de binnenbocht bij met name baggervak A4 (Figuur 4.4). De vorm van de baggervakken, die smaller zijn gemaakt in de binnenbocht, suggereert dat er in het verleden al plaats is gemaakt om te wijken voor de oprukkende plaatrand, hoewel dit niet in de MER rapportages vermeld staat.



Figuur 4.2 Beheerlodingen van 2023 van het gebied rondom baggervakken A4 en B met een resolutie van 5m. Aan de zuidrand van baggervak A4 (westelijk van de bocht) is een sterk verschil in diepte te zien waar het baggeronderhoud aan de rand van de Ballon Plate plaatsvindt. Zwarte lijnen geven de bagger- en verspreidingsvakken, de zwarte stippellijn geeft de -10m NAP contour uit de vaklodingen van 2020 ter referentie.



Figuur 4.3 Doorsnede door baggervak A4 op basis van beschikbare vaklodingen en beheerlodingen vanaf 2017. De verticale gele balk geeft de locatie van het baggervak. De Ballon Plate migreert steeds verder richting het baggervak (te zien in de bodem vanaf 2020).



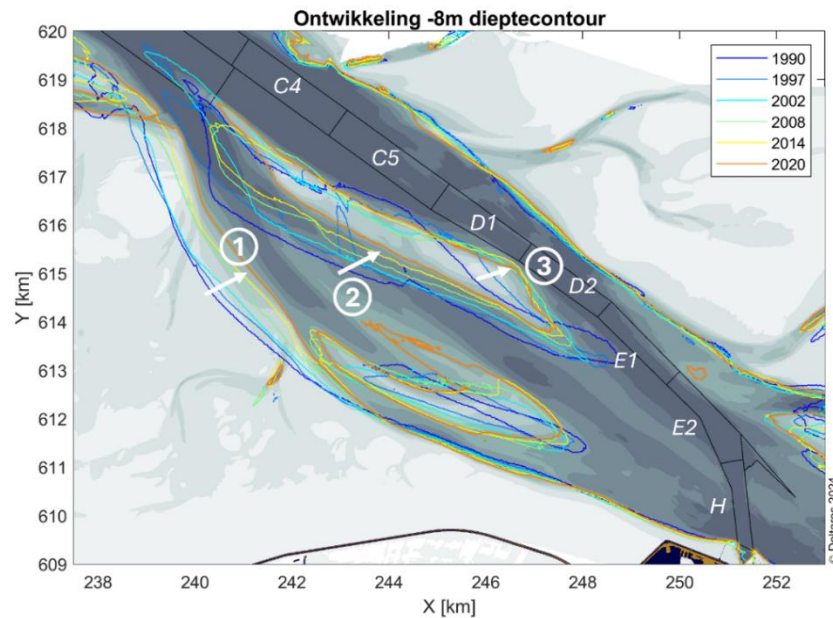
Figuur 4.4 Erosie-sedimentatiekaart van de beheerlodingen tussen 2017 en 2023. In de binnenbocht is een sterk sedimentatiegebied te zien, veroorzaakt door noordoostelijke migratie van de Ballon Plate. Zwarte lijnen geven de bagger- en verspreidingsvakken en de -10m NAP contour ter referentie.

4.2 Oude Westereems - Meeuwenstaart - Randzelgat

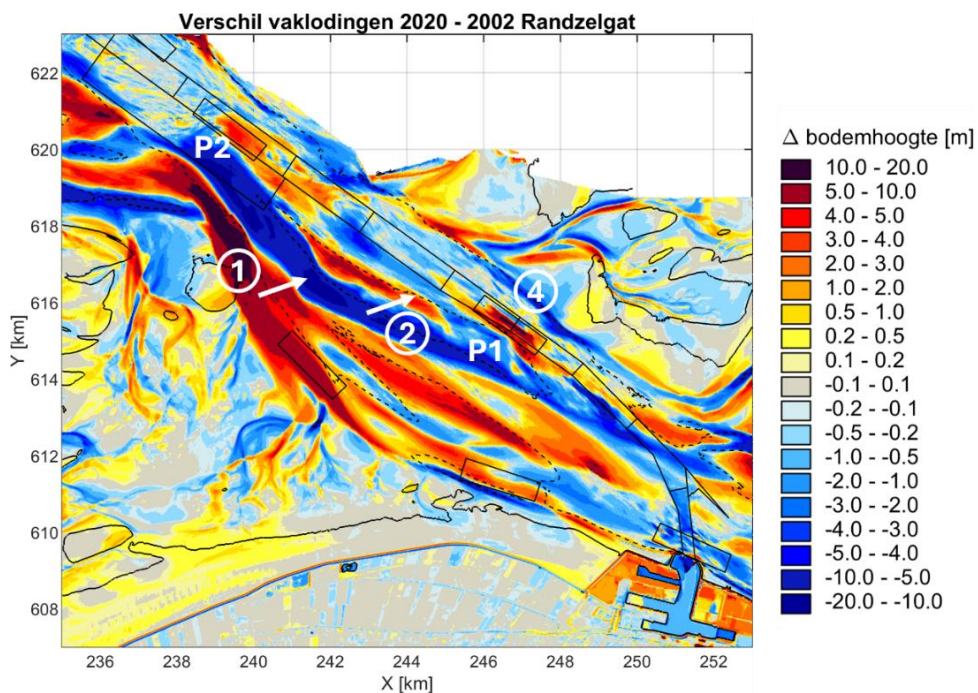
In het Randzelgat zijn de baggervolumes hoog, met name in de baggervakken D1 en E1 (ongeveer een 1,0 Mm³/jaar – zie Figuur 3.2). De ontwikkelingen op grotere schaal, die zijn beschreven in §2.2 hebben een grote invloed op de dynamiek van dit gebied. Door een combinatie van een groot sedimentaanbod vanuit de kustzone en het Groninger Wad en afnemende debieten wordt de Oude Westereems naar het oosten gedrukt en is er sprake van schaar- en drempelvorming. Hierdoor schuift de westelijke plaatrand van de Meeuwenstaart op en wordt de Meeuwenstaart smaller (zie (2) in Figuur 4.5). De oostelijke punt van de Meeuwenstaart wordt richting het oosten gedrukt, tot aan de rand van de vaargeul in het Randzelgat ter hoogte van verspreidingslocatie P1 (zie (3) in Figuur 4.5). De oostelijke geulwand van het Randzelgat is echter de afgelopen decennia opvallend stabiel. Het Randzelgat kan niet veel verder naar het oosten migreren door de aanwezigheid van harde lagen in de ondergrond (zoals te zien op de kaart in Figuur 2.2). In de volgende secties worden de redenen voor het verhoogde baggerbezwaar per deelgebied in meer detail besproken.

4.2.1 Verspreidingsvak P1

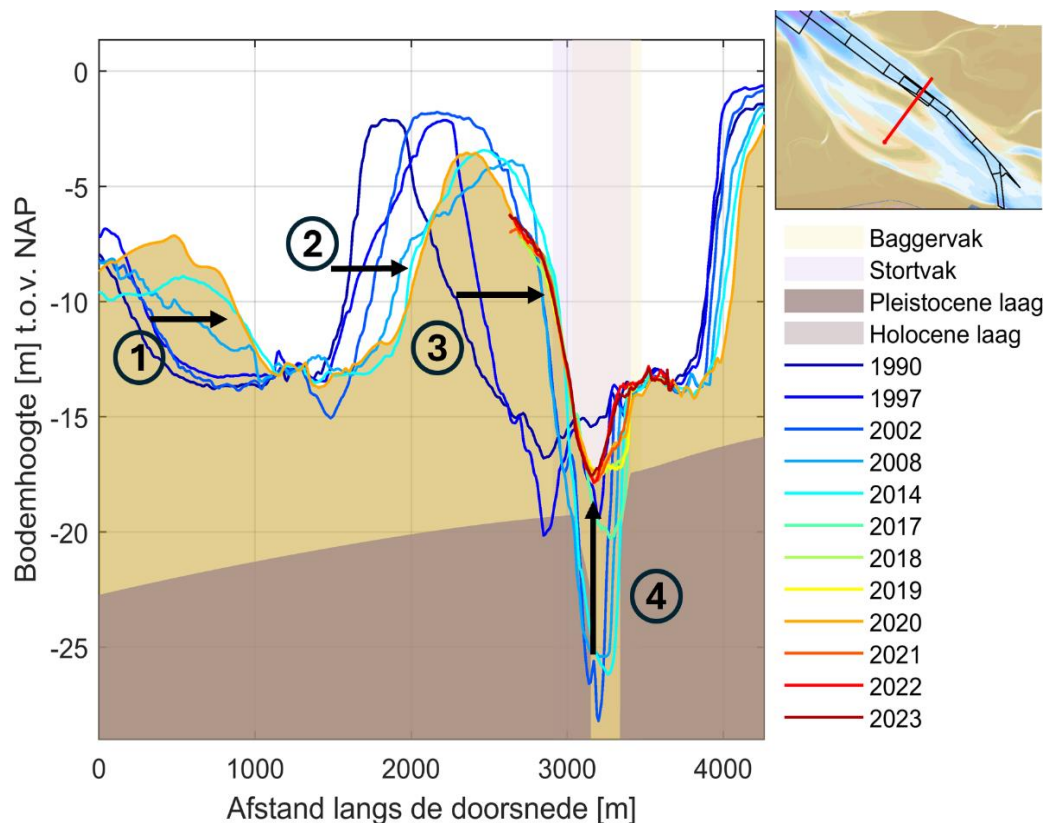
Ter hoogte van verspreidingslocatie P1 (tussen baggervak D1 en D2) bevond zich tussen ca. 2000 en 2017 een ontgrondingskuil met een diepte tot 25 m. Deze ontgrondingskuil is waarschijnlijk ontstaan doordat hier in het verleden door de keileemlaag heen gebaggerd is (Rijkswaterstaat, 2009) en het onderliggende (Pleistocene) zand daarna makkelijk kon worden geërodeerd. In de bodemopnames van 2017 en 2018 is te zien dat de ontgrondingskuil grotendeels opvult (Figuur 4.7). Dit is zeer waarschijnlijk het resultaat van het opvullen van deze kuil met keileem tijdens de aanlegfase van de vaarwegverruiming (Witteveen + Bos, 2023). In de periode 2017 – 2023 is er gemiddeld 2,5 Mm³/jaar op stortlocatie P1 verspreid (Figuur 3.3). Sinds 2019 vult de erosiekuil zich verder op, te zien aan de uitbouw van de Noordoostelijke geulwand op een diepte van ongeveer -17 m NAP (zie (4) in Figuur 4.6 en Figuur 4.7).



Figuur 4.5 Ontwikkeling van de -8 m NAP dieptecontour in het Randzelgat. (1) Sterke oostwaartse migratie van het plaatgebied ten westen van de Oude Westereems zorgt voor druk op de Oude Westereems. (2) Oostwaartse migratie van de westelijke plaatrand van de Meeuwenstaart, waardoor de plaat smaller wordt. (3) Oostelijk opschuiven van de Meeuwenstaart richting het Randzelgat ter hoogte van baggervak D1 en D2.



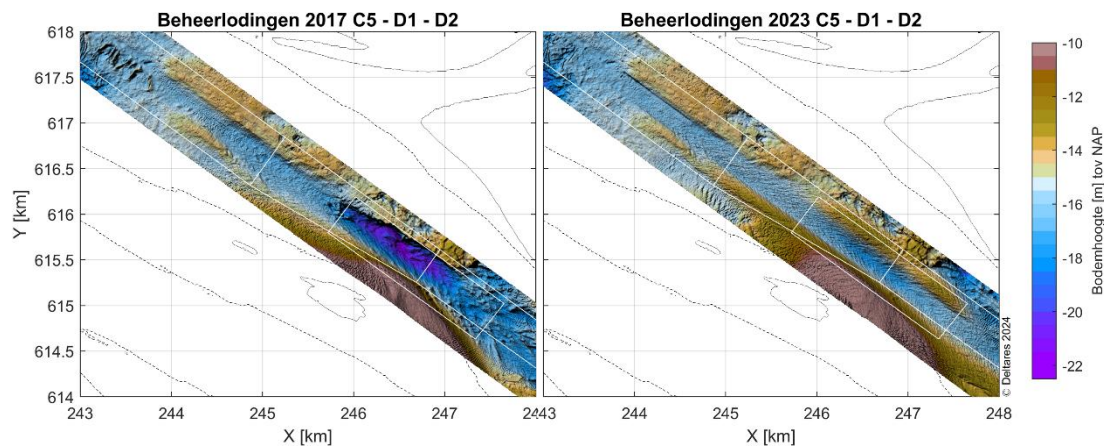
Figuur 4.6 Erosie-sedimentatiekaart van het gebied rondom het Randzelgat tussen 2002 en 2020. (1) Oostelijke migratie Oude Westereems. (2) Oostelijke migratie van de Meeuwenstaart. (4) Opvullen van verspreidingsvak P1. Stippellijn geeft de -8 m NAP contourlijn uit 2020 weer.



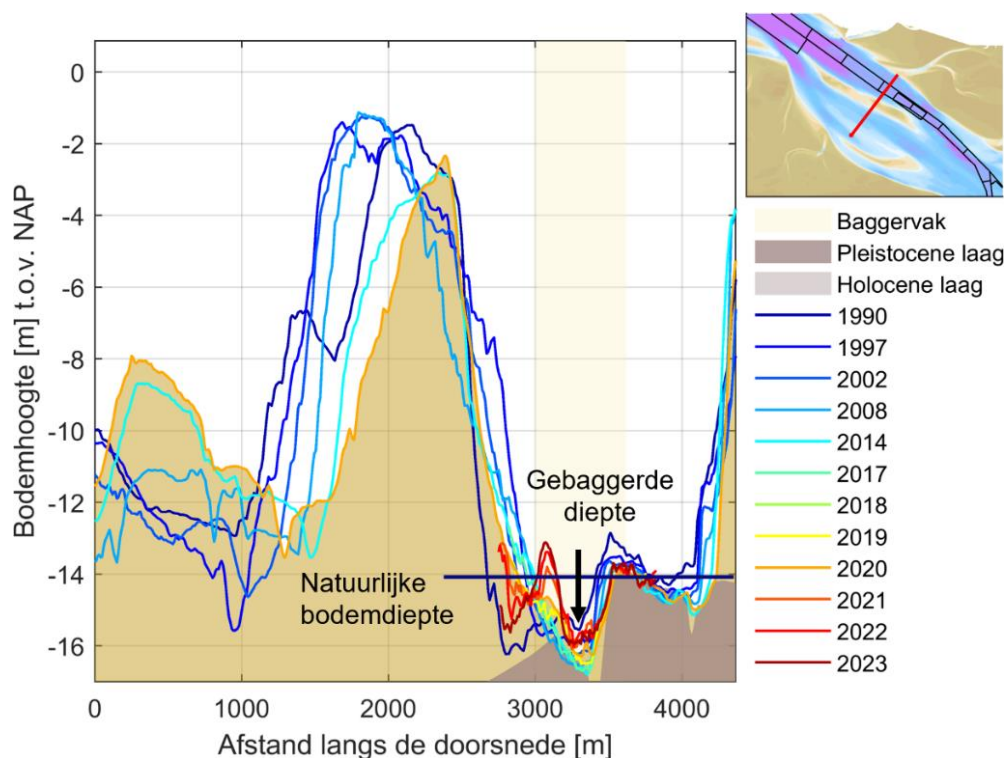
Figuur 4.7 Doorsnede door de Oude Westereems (links), de Meeuwenstaart (midden) en het Randzelgat (rechts) op basis van vaklodingen en beheerlodingen vanaf 2017. De verticale gele balk geeft de ligging van het baggervak, de verticale paarse balk de locatie van het verspreidingsvak. Het donkerbruine gebied toont de globale ligging van een pleistocene, moeilijk erodeerbare laag op basis van boringen (Pierik, 2019). (1) Oostelijke migratie Oude Westereems. (2) Oostelijk opschuiven en smaller worden van de Meeuwenstaart. (3), Opschuiven van de oostelijke plaatrand van de Meeuwenstaart richting het Randzelgat. (4) Opvullen van de diepe put in het Randzelgat ter hoogte van het verspreidingsvak.

4.2.2 Baggervakken C5 en D1

De grootste baggerinspanning in dit gebied vindt plaats in het noordelijke deel van baggervak D1, op de grens met C5. Figuur 4.8 toont de bodemligging van deze baggervakken in 2017 en 2023. Hier is het opvullen van de ontgrondingskuil in verspreidingslocatie P1 (als gevolg van de keileemstoringen) duidelijk te zien. Direct ten noorden en ten zuiden van het verspreidingsvak heeft het Randzelgat een relatief vlakke bodem die wordt begrensd door de aanwezigheid van harde lagen direct onder het oppervlak (Figuur 4.9). In deze vlakke bodem is het gebaggerde profiel duidelijk zichtbaar (zie Figuur 4.8 en Figuur 4.9).



Figuur 4.8 Bodemligging in het Randzelgat van baggervakken D1 en D2 en verspreidingsvak P1 uit 2017 (links) en 2023 (rechts) met een 5m resolutie. Merk op dat de ontgrondingskuil oorspronkelijk nog ca. 8m dieper was dan in het linker paneel te zien is, voor 2017 is deze al grotendeels opgevuld.

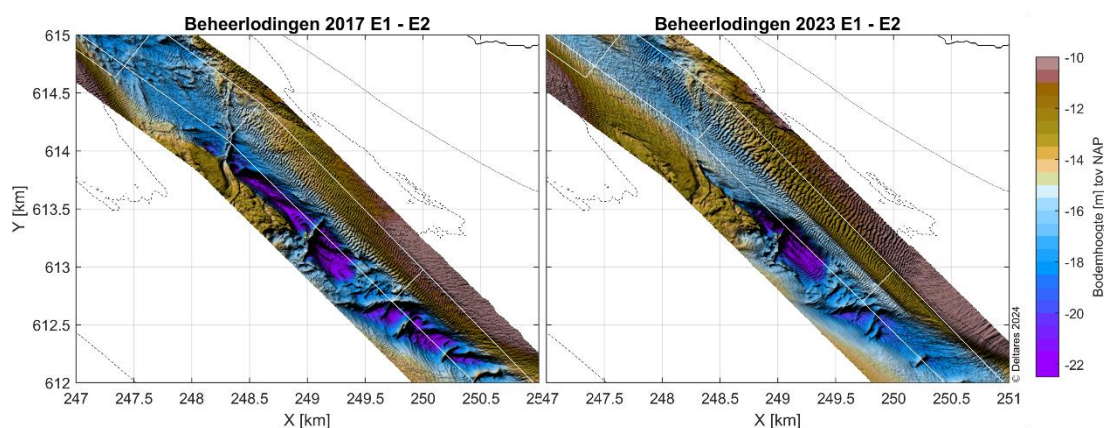


Figuur 4.9 Doorsnede door de Oude Westereems (links), de Meeuwenstaart (midden) en het Randzelgat (rechts) in baggervak D1 direct ten noorden van verspreidingslocatie P1 op basis van vaklodingen en beheerlodingen vanaf 2017. De verticale gele balk geeft de ligging van het baggervak. Het donkerbruine gebied toont de globale ligging van een Pleistocene, moeilijk erodeerbare laag op basis van boringen (Pierik, 2019). De bodem van het Randzelgat wordt begrensd door deze harde lagen. Het gebaggerde profiel is duidelijk zichtbaar in de doorsnede.

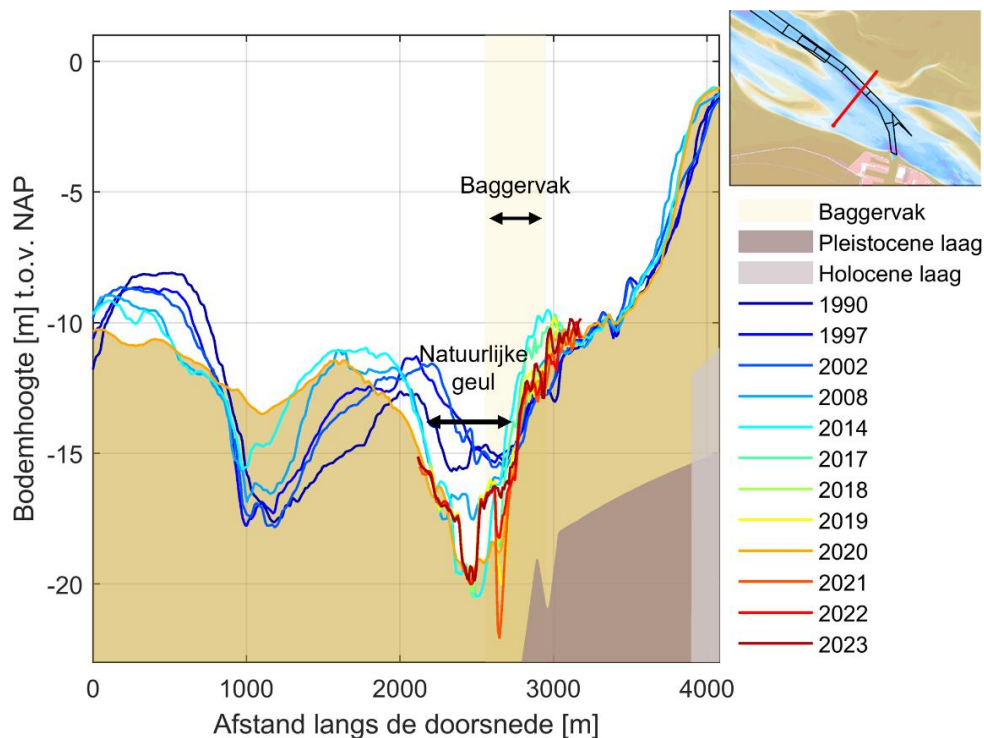
4.2.3 Baggervakken E1 en E2

In het Randzelgat ten zuiden van de Meeuwenstaart worden grote volumes gebaggerd in baggervak E1 en het noordelijke deel van vak E2 (samen meer dan 1.5 Mm³/jaar, zie Figuur 3.2). In het zuidelijke deel van baggervak E2 is ook sprake van hoge baggervolumes, maar hier speelt een andere morfologische dynamiek, welke wordt behandeld in Paragraaf 4.3.

Het baggervak bevindt zich hier op de noordoostelijke geulwand (Figuur 4.10 en Figuur 4.11). De ligging van deze geulwand is de afgelopen decennia zeer stabiel. Op basis van informatie uit baggertracks kan worden geconcludeerd dat de grootste baggerinspanningen plaatsvinden op de geulwand (Witteveen + Bos, 2023). Het diepe deel van de geul loopt enkele honderden meters zuidwestelijk van het baggervak en heeft een natuurlijke diepte dieper dan de streefdiepte.



Figuur 4.10 Bodemligging in het Randzelgat van baggervakken E1 en E2 uit 2017 (links) en 2023 (rechts) met een 5m resolutie.



Figuur 4.11 Doorsnede door het Randzelgat ter hoogte van baggervak E1 op basis van vaklodingen en beheerlodingen vanaf 2017. De verticale gele balk geeft de ligging van het baggervak. Het donkerbruine gebied toont de globale ligging van een pleistocene en het grijze gebied een holocene, moeilijk erodeerbare laag op basis van boringen (Pierik, 2019). Het baggervak bevindt zich op de geulwand net noordoostelijk van de natuurlijke diepe geul.

4.3 Doekegat – Doekeplaat – Emshörn Rinne

In het gebied voor de Eemshaven steekt de vaargeul het Doekegat over naar het Randzelgat. Dit knooppunt van het tweegeulensysteem uit het zuiden (bestaande uit Doekegat en de Emshörn Rinne) en uit het noorden (Randzelgat en Oude Westereems) is zeer complex en dynamisch, mede door de hoge sedimenttoevoer op dit kruispunt van vier geulen (zie ook Figuur 4.12 en Figuur 4.15).

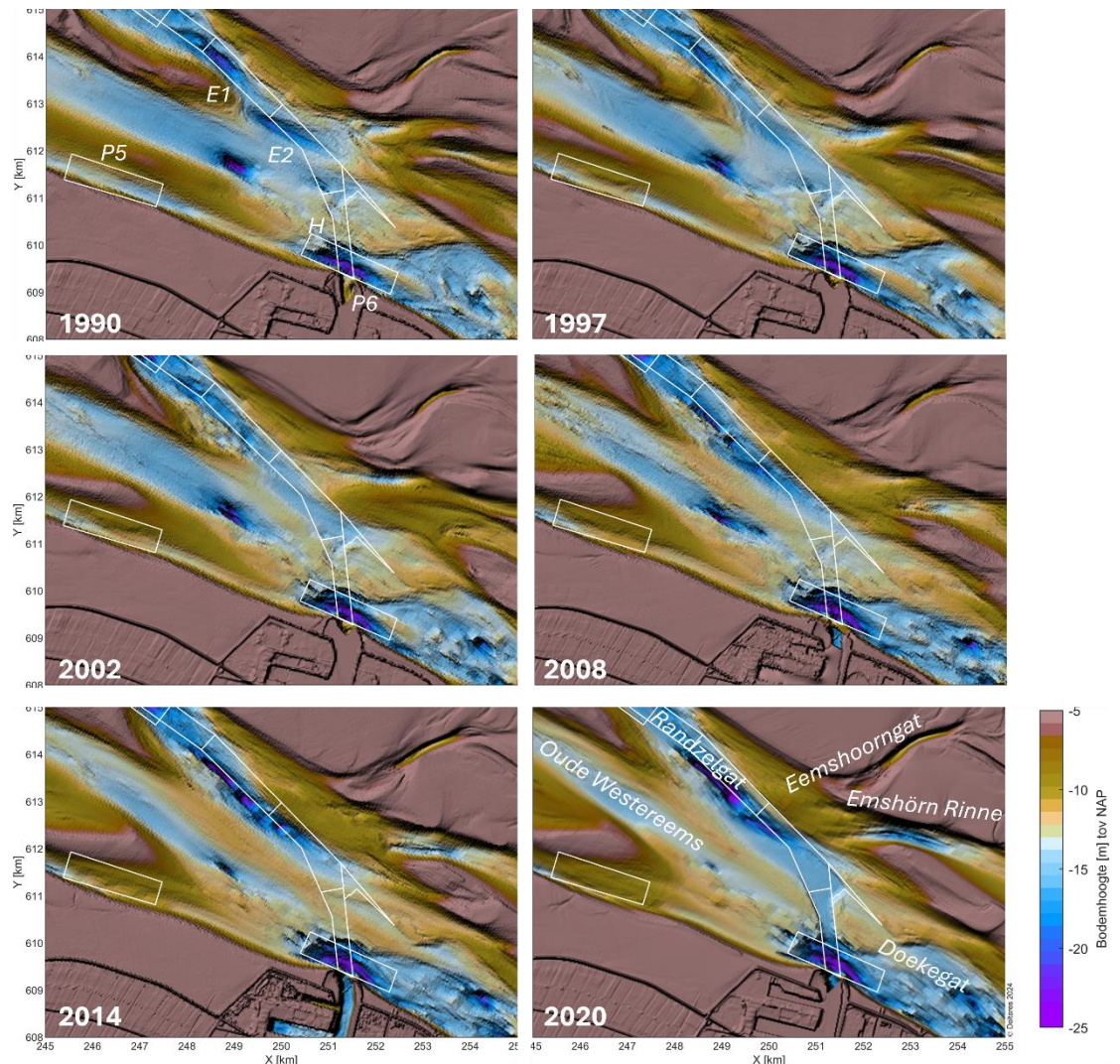
Opeenvolgende bodemkaarten en doorsneden laten een dynamisch gebied zien met een snel veranderende bodemligging, mede door de hoge sedimenttoevoer op dit kruispunt van vier geulen (zie ook Figuur 4.12 en Figuur 4.15). Het drempelgebied is ondieper geworden in het verlengde van de Oude Westereems en de Meeuwenstaart door verzanding en drempelvorming die gepaard gaat met het afnemende debiet door de Oude Westereems (Figuur 4.12). Deze verondieping loopt door de baggervakken E2 en H. Ook verspreidingslocatie P5 is ondieper geworden door aanzanding in de oude Westereems.

Tegelijkertijd is aan de noordkant van dit gebied sprake van uitbouw van de ebschilden van het Eemshoorn gat, die baggervak E2 in beginnen te lopen. Hierdoor wordt de hoofdgeul in zuidwestelijke richting gedrukt en zijn er vanaf de 2014 bodem diepe erosiekuilen zichtbaar direct zuidelijk van baggervakken E1 en E2. De uitstroom van het Eemshoorn gat migreert naar het Noorden, waarschijnlijk opzij geforceerd door de Emshörn Rinne die in noordelijke richting opschuift door de uitbouw van de Doekeplaat.

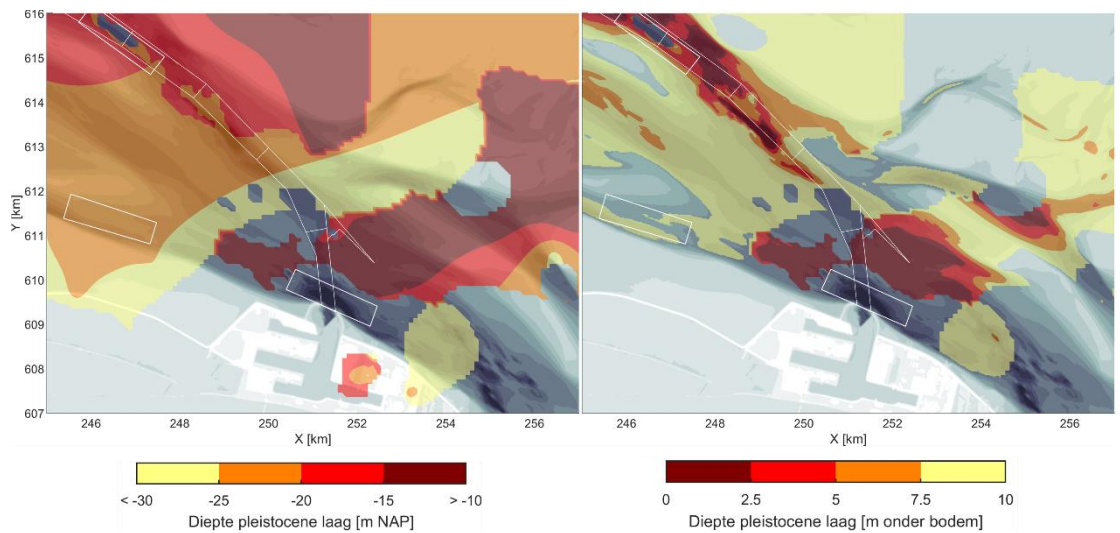
Daarnaast bestaat de ondergrond op verschillende plaatsen uit moeilijk erodeerbare pleistocene lagen (Figuur 4.13). Direct voor Eemshaven ligt een erosiekuil, omgeven door een gebied waarin harde lagen direct onder de ondergrond liggen. Op de locaties waar moeilijk

erodeerbare lagen zich vlak onder de bodem bevinden zijn de morfologische veranderingen kleiner vergeleken met de rest van het gebied. Een deel van deze Pleistocene lagen moest worden verwijderd tijdens de vaargeulverdieping.

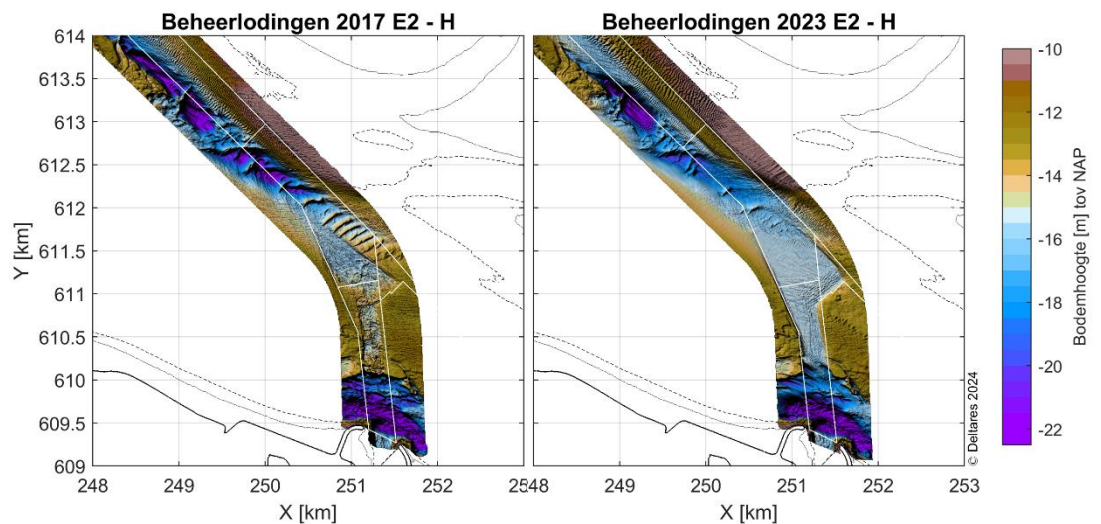
In het gebied waar de vaargeul doorheen loopt fluctueert de natuurlijke diepte tussen de -12m en -14m NAP. De verdieping tot -15m is duidelijk zichtbaar in de lodingen (Figuur 4.14 en Figuur 4.15). Dit deelgebied wordt gekenmerkt door een hoge dynamiek en grote sedimenttoevoer. Sinds de verdieping is de transportcapaciteit in de geulen verminderd en ligt de geul dieper dan de natuurlijke diepte.



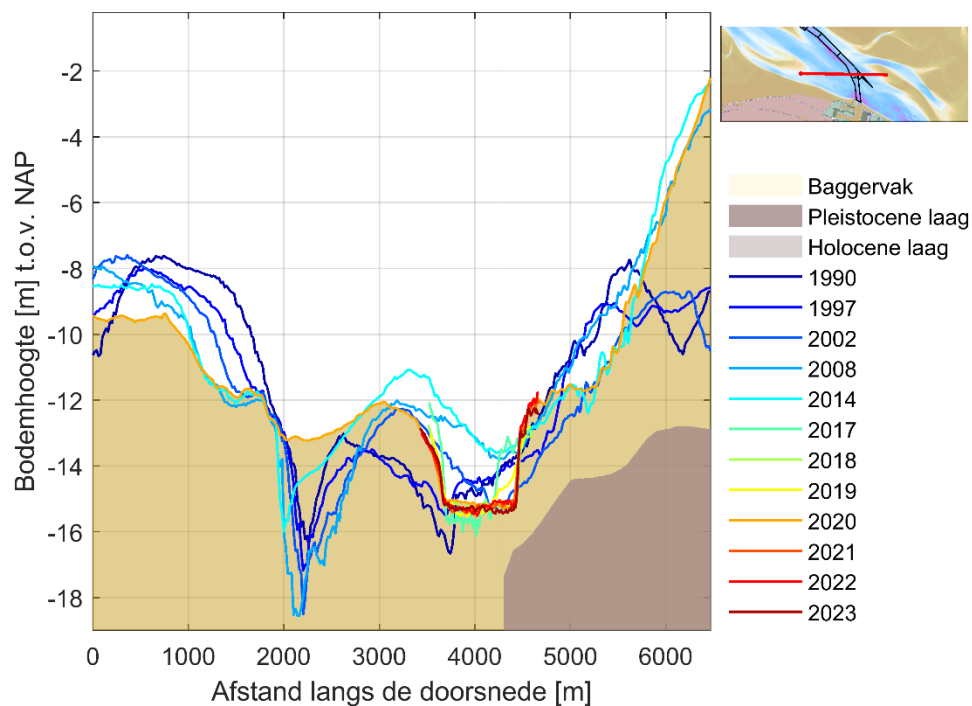
Figuur 4.12 Morfologische ontwikkeling van het Doekegat en het gebied voor de Eemshaven op basis van zes vaklodingen bodemkaarten uit 1990, 1997, 2002, 2008, 2014 en 2020. De bagger- en verspreidingsvakken staan aangegeven met witte lijnen.



Figuur 4.13 Overzicht van de ligging van moeilijk erodeerbare, pleistocene lagen rondom het Doekegat op basis van boringen (Pierik., 2019) . Links: de ligging van harde lagen tov NAP. Rechts: de diepte van harde lagen onder de 2020 bodem. Hoe donkerder rood, hoe dichter de laag bij de huidige bodem ligt.



Figuur 4.14 Bodemligging in het Doekegat van baggervakken E2 en H uit 2017 (links) en 2023 (rechts) op basis van beheerlodingen met een 5m resolutie. Het gebaggerde profiel is duidelijk zichtbaar in de 2023 bodemligging.



Figuur 4.15 Doorsnede door de vaargeul in het Doekegat op basis van vaklodingen en beheerlodingen vanaf 2017. Het donkerbruine gebied toont de globale ligging van een pleistocene, moeilijk erodeerbare laag op basis van boringen (Pierik, 2019). De vorm van de gebaggerde vaargeul op -15m NAP is duidelijk zichtbaar in de bodemopnames vanaf 2017.

5 Modelling getij- en sedimentdynamiek

5.1 Model- en simulatieoverzicht

Het doel van de modellering is om inzicht te krijgen in de historische (autonome) verandering van de hydrodynamica en sedimentdynamiek in de Buiten Eems en de drijvende processen achter de morfologische veranderingen. Analyse van hydrodynamische modelsimulaties helpt om de effecten van de morfologische geulontwikkelingen op de waterbeweging te kwantificeren. Er wordt geanalyseerd hoe de debietverdeling door het meergeulenstelsel van de Buiten Eems is veranderd en hoe de residuele stromings- en zandtransportpatronen zijn gewijzigd in de afgelopen decennia en met name sinds de vaarwegverruiming is uitgevoerd. Inzicht in deze ontwikkelingen helpt om het baggerbezwaar in de vaargeul te relateren aan de huidige sedimentdynamiek.

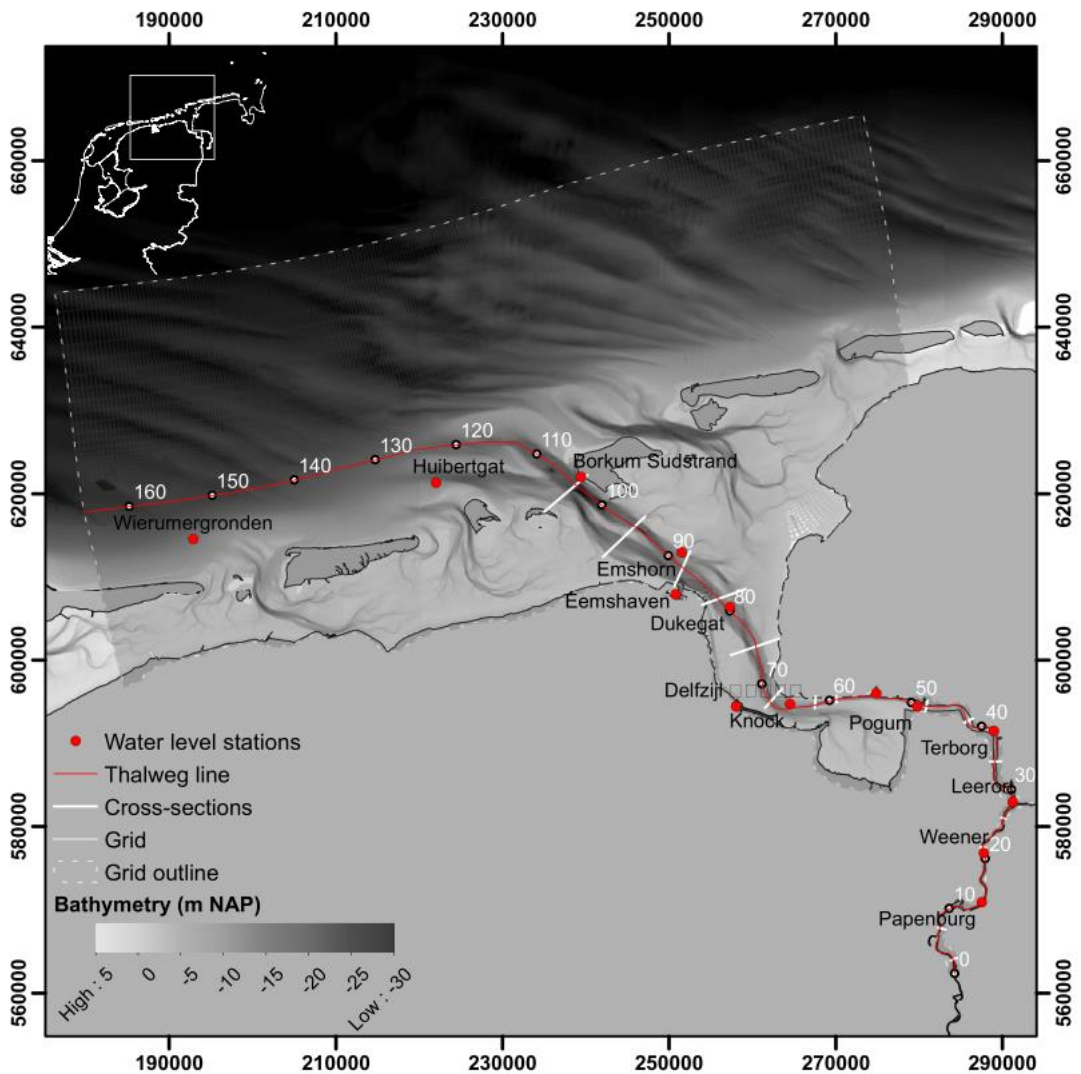
De modellering is uitgevoerd met een bestaand Delft3D – Flexible Mesh stromingsmodel (Schrijvershof et al., 2023). Het rekenrooster van het model beslaat de Noordzee en de Waddenzee vanaf het punt bij Ameland tot aan het punt bij het Duitse Waddeneiland Norderney (Figuur 5.1). Het model wordt aan de Noordzee- en Waddenzeeranden geforceerd met waterstands- en snelheidsinformatie welke afgeleid is uit een grootschalig waterbewegingsmodel dat de gehele Noordzee beslaat (Zijl & Groenenboom, 2019). Binnen het project REST-COAST (<https://rest-coast.eu/>) is het model doorontwikkeld om het bruikbaar te maken om de morfologische effecten van Nature-Based Solutions in het Eems estuarium te simuleren onder scenario's van zeespiegelstijging (Marijnissen et al., 2024). Hiervoor is een online golfmodel (Delft3D-WAVE) ontwikkeld dat geforceerd wordt met golfinformatie (significante golfhoogte, golfperiode en golfrichting) afkomstig van meetpunt Schiermonnikoog Noord (op de Noordzee). Meteorologische forcering (atmosferische druk, windsnelheid- en richting) is afkomstig van het KNMI HIRLAM model. Het model is hydrodynamisch gevalideerd aan de hand van de getijpropagatie in het estuarium en de Eems rivier (Schrijvershof et al., 2023) en de reproductie van golven op de Noordzee en het mondingsgebied (Marijnissen et al., 2024).

Voor de huidige toepassing is de roosterresolutie van het model verfijnd van een oorspronkelijke roosterresolutie van ongeveer 300 meter naar ca. 75 m in de Buiten Eems. De breedte van het Randzelgat is ter plaatse van de Meeuwenstaart ongeveer 1 kilometer. Met het verfijnde rekenrooster wordt de dwarsdoorsnede van deze geul in het model weergegeven met ca. 13 rekencellen. De beschikbare vaklodingen van de jaren 1985, 1990, 1997, 2001, 2005, 2008, 2014 en 2020 zijn gebruikt om voor ieder van deze jaren een modelbathymetrie op te stellen. Op deze modelbathymetrieën zijn vervolgens twee modelsimulatievarianten gedraaid. Ten eerste zijn de 'reële' getij-, opzet- en windcondities gebruikt, welke zijn afgeleid voor het eerste kwartaal van het jaar 2018 (ruim 7 springtij-doodtij cycli). Deze simulaties geven zo goed als mogelijk alle heersende hydrodynamische condities weer. Deze simulatievariant wordt gebruikt om de verandering in de debietverdeling in de Buiten Eems te analyseren (§5.2). Ten tweede is er een simulatievariant opgezet voor een korte periode met representatieve getij-, golf-, en windcondities. Deze simulatievariant wordt geforceerd met een synthetische springtij-doodtij cyclus (Schrijvershof et al., 2023) en een representatief golf- en windklimaat bestaande uit 12 klassen (Marijnissen et al., 2024). De representatieve simulatievariant wordt gebruikt om met frequente uitvoer van ruimtelijke stromingspatronen (§5.3) en residuele zandtransportpatronen te berekenen en te analyseren (§5.4). De zandtransportpatronen zijn berekend met zandtransportformuleringen van Van Rijn (2007) voor sediment met een uniforme korrelgrootte van 200 µm, en de modelresultaten na te bewerken met behulp van de

tool SedTRAILS (Pearson et al., 2021). Tabel 5-1 geeft een overzicht van de uitgevoerde simulaties.

Tabel 5-1 Overzicht van de uitgevoerde simulaties

Simulatie-variant	Randvoorwaarden	Bathymetrie	Nabewerking	Doel
Reëel	Getij: 1 Jan-20 April 2018 Opzet: 1 Jan-20 April 2018 Meteo: 1 Jan-20 April 2018	1985, 1990, 1997, 2001, 2005, 2008, 2014, 2020		Analyse debietverdeling meergeulenstelsel
Represen-tatief	Getij: synth. springtij-doodtij cyclus Opzet: geen Golven: Golfklimaat (12 klassen) Meteo: Windklimaat (12 klassen)	1985, 1990, 1997, 2001, 2005, 2008, 2014, 2020	SedTRAILS	Representatieve stromings- en zandtransportpatronen



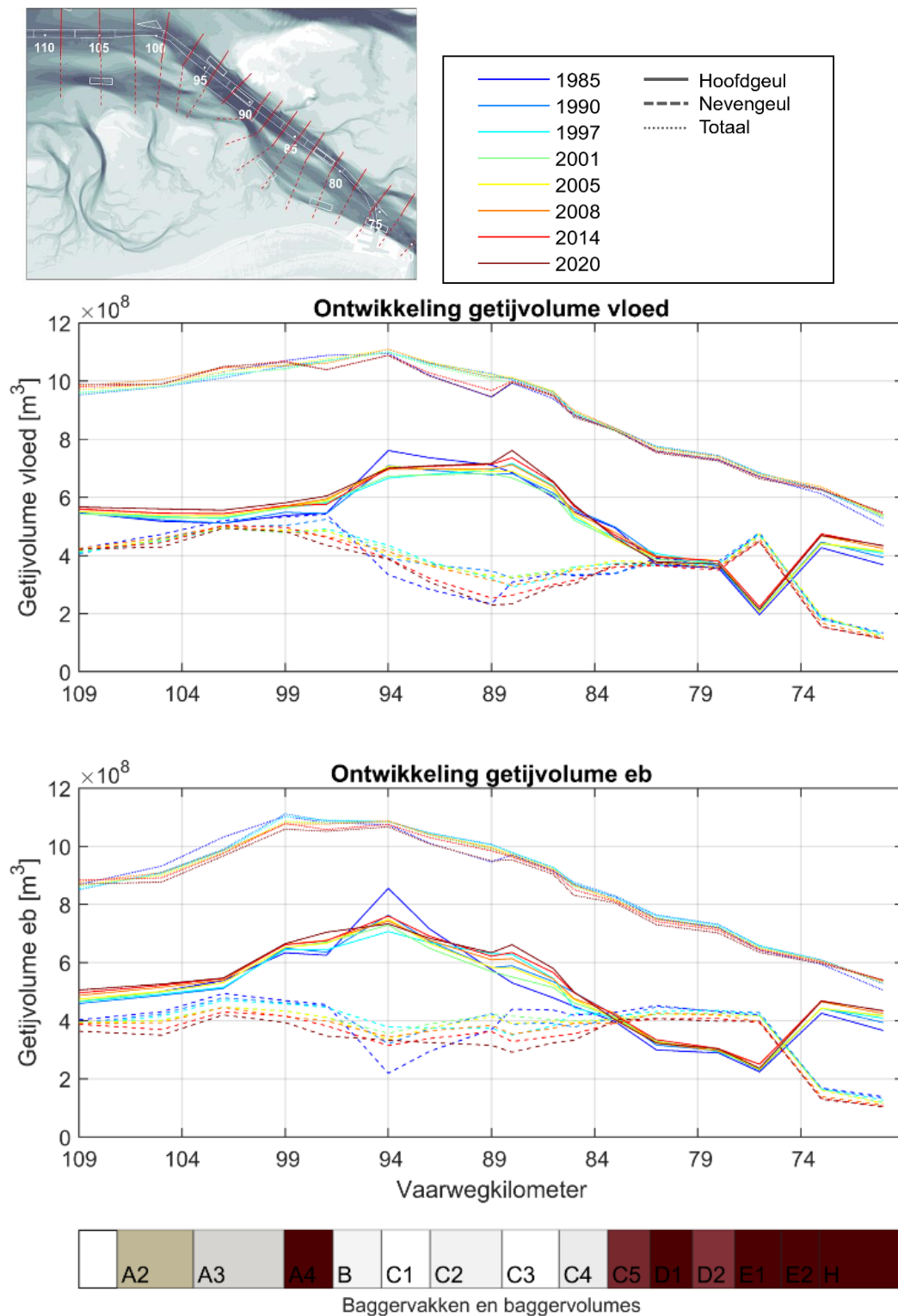
Figuur 5.1 Overzichtskaart van het Delft3D-Flexible Mesh model van het Eems-Dollard estuarium. De witte stippellijn geeft de omvang van het rekenrooster weer (figuur uit: Schrijvershof et al., 2023).

5.2 Debietverdeling

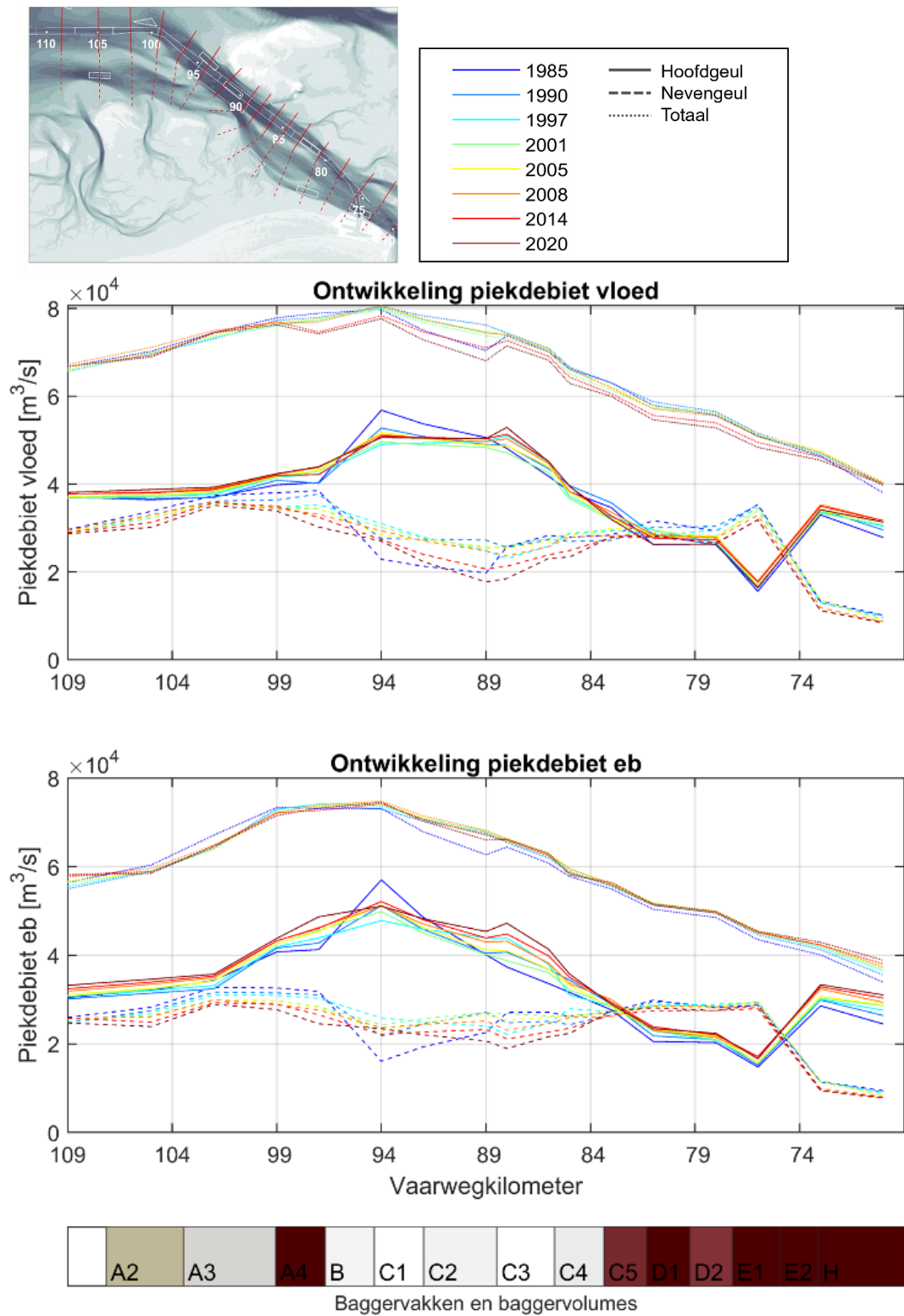
Met behulp van het hydrodynamische model is de ontwikkeling van getijvolumes geanalyseerd. De Buiten Eems bestaat op veel plekken uit een tweegeulensysteem (zie ook §2.2.2) en kan worden verdeeld in hoofdgeulen (Westereems en Randzelgat) en nevengeulen (Huibertgat en Oude Westereems). Met behulp van doorsneden kan de ontwikkeling en verdeling van debieten door de hoofd- en nevengeul gevolgd worden.

Het getijvolume wordt hier gedefinieerd als het totale watervolume dat tijdens 1 getij door de doorsnede stroomt in m^3 , gemiddeld voor alle getijden tijdens de simulatieperiode. Het totale getijvolume in de Buiten Eems is tussen 1985 en 2020 licht afgenomen (Figuur 5.2). Het getijvolume in de hoofdgeul is op de meeste plaatsen toegenomen, terwijl het getijvolume door de nevengeul afneemt. Ook het doorstroomoppervlak neemt licht toe voor doorsneden in de hoofdgeul en af voor de nevengeul (zie Bijlage A). Ook het totale getijvolume lijkt afgenomen – dit is het meest zichtbaar voor de getijvolumes tijdens eb.

Het piekdebiet wordt gedefinieerd als het maximale debiet (in m^3/s) dat tijdens een getij door de doorsnede stroomt, gemiddeld voor alle getijden tijdens de simulatieperiode. Het totale piekdebiet is licht afgenomen tijdens vloed, bij eb is er geen duidelijke trend te zien (Figuur 5.3). Piekdebieten in de hoofdgeul nemen toe, terwijl het piekdebiet in de nevengeul afneemt. De toename van piekdebiet in de hoofdgeul is het sterkst tijdens eb.



Figuur 5.2 Ontwikkeling van het gemiddelde getijvolume in de hoofdgeul (doorgetrokken lijn), nevengeul (gestreepte lijn) en het totale getijvolume (hoofdgeul en nevengeul opgeteld, stippellijn) op basis van doorsnedes. De kaart rechtsboven geeft de ligging van de doorsnedes en vaarwegkilometers. Het onderste paneel geeft de baggervakken tov de vaarwegkilometers met baggervolumes uit 2023, waarbij donkerdere kleuren hogere baggervolumes weergeven.



Figuur 5.3 Ontwikkeling van het gemiddelde piekdebiet in de hoofdgeul (doorgetrokken lijn), nevengeul (gestreepte lijn) en het totale getijvolume (hoofdgeul en nevengeul opgeteld, stippellijn) op basis van doorsnedes. De kaart rechtsboven geeft de ligging van de doorsnedes en vaarwegkilometers. Het onderste paneel geeft de baggervakken tov de vaarwegkilometers met baggervolumes uit 2023, waarbij donkerdere kleuren hogere baggervolumes weergeven.

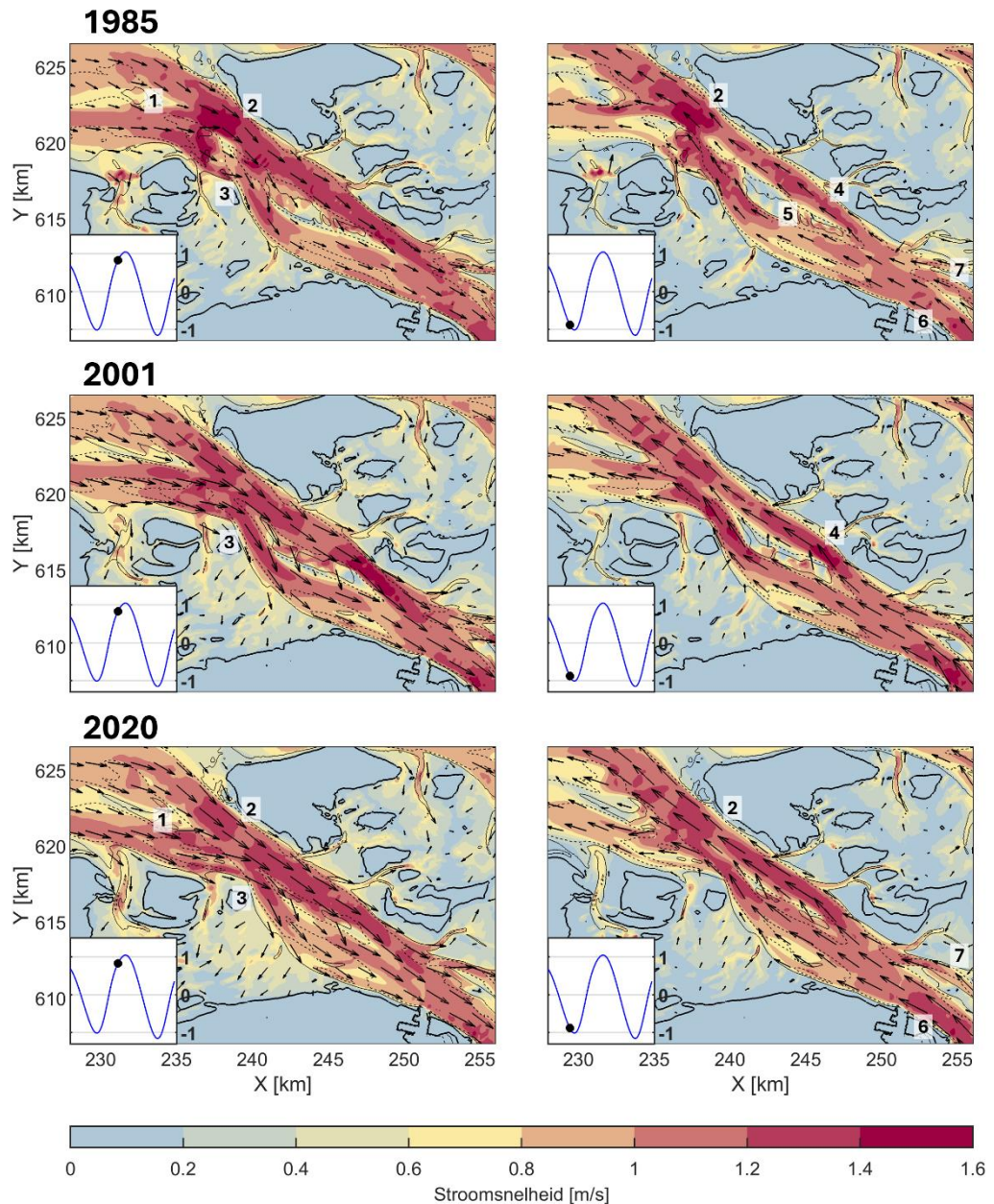
5.3 Stromingspatronen

De hydrodynamische simulaties voor de verschillende bodemcondities laten zien dat er op verschillende locaties veranderingen in de stromingspatronen zijn opgetreden. Deze worden geïllustreerd in Figuur 5.4 voor de momenten van piek eb- en piek vloedstroom voor 1985, 2001 en 2020. Deze jaren zijn geselecteerd om de verschillen op overzichtelijke wijze weer te kunnen geven. Stromingspatronen voor alle jaren en voor verschillende fasen in de getijcyclus zijn te vinden in Bijlage B.

De rotatie van het Huibergat, zoals beschreven in §2.2 is ook zichtbaar in de stromingspatronen (aangegeven als (1) in Figuur 5.4). Tussen de eilanden Borkum en Rottumeroog bevindt zich een 'knooppunt' waar de tweegeulensystemen Westereems – Huibergat en Randzelgat – Oude Westereems elkaar ontmoeten en stroomsnelheden toenemen (2). De maximale stroomsnelheden in dit knooppunt zijn sinds 1985 geleidelijk afgenomen.

Zuidelijk van dit knooppunt splitst het systeem zich weer in twee geulen, het Randzelgat en de Oude Westereems. Bij de noordelijke instroom van de Oude Westereems nemen tussen ca. 1985 en 2005 de stroomsnelheden toe, om vervolgens weer af te nemen (3). Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de geul werd geknepen door oostelijke migratie van het westelijk gelegen wadplaatgebied. Inmiddels is deze geul in zijn geheel naar het oosten gemigreerd (en heeft daarmee ook de Meeuwenstaart richting het oosten gedrukt) en heeft hierdoor weer meer ruimte gecreëerd. In het Randzelgat zijn de pieksnelheden tijdens eb toegenomen (4). Daarnaast is de stroming over de Meeuwenstaart zowel tijdens hoogwater als ook tijdens laagwater beduidend toegenomen (5) omdat de Meeuwenstaart smaller en lager is geworden. Daardoor is de hydrodynamische scheiding tussen Randzelgat en Oude Westereems minder sterk geworden. Tijdens vloed stroomt er water vanuit het Randzelgat richting de Oude Westereems over de Meeuwenstaart, en in omgekeerde richting tijdens eb.

Ook in de aanstroming naar de Eemshaven vanuit het zuiden zijn veranderingen opgetreden. Stroomsnelheden vanuit het Doekegat zijn toegenomen, met name tijdens eb (6). De smalle geul noordelijk van de Doekeplaat (Emshörn Rinne) is naar het noordoosten gemigreerd (7). Er vindt nu minder uitwisseling tussen de Emshörn Rinne en het Doekegat plaats.



Figuur 5.4 Ontwikkeling van het stromingspatroon tijdens piek vloed (links) en piek eb (rechts) voor een gemiddeld tij in de representatieve springtij-doodtijcyclus voor de bodems van 1985, 2001 en 2020. Forcing en fase in de getijcyclus zijn voor alle drie de vergeleken bodems gelijk.

5.4 Residuele zandtransportpatronen

Transportpaden zijn verkregen door de modelresultaten na te bewerken met de postprocessing tool SedTRAILS. Hiervoor is een synthetische springtij-doodtij cyclus doorberekend met een representatief getij en golfklimaat (zoals beschreven in §5.1). Met behulp van SedTRAILS kan de beweging van een sedimentdeeltje over de tijdsafhankelijke transportvectorvelden gevolgd worden (Pearson et al., 2021). Dit kan inzicht geven waar sediment vanuit een verspreidingslocatie heen kan bewegen, of waar sediment dat in de vaargeul terechtkomt vandaan kan komen. Daarnaast helpt het om inzicht te geven in de globale transportpatronen

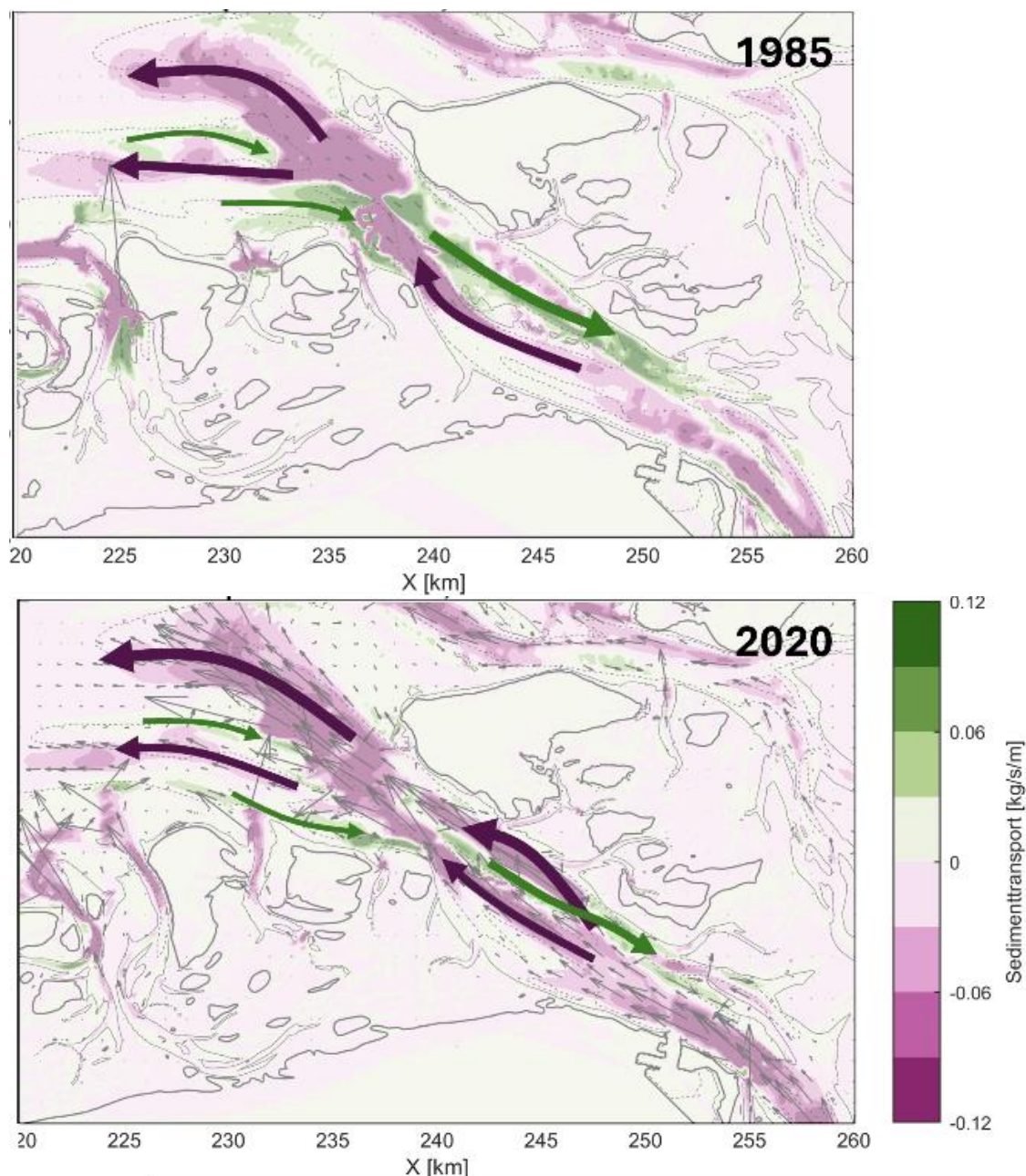
en hoe deze veranderen in verschillende modelsimulaties (worden paden bijvoorbeeld korter of langer, verandert de richting, etc.).

In deze nabewerkingsstap worden de gesimuleerde tijdsafhankelijke transportvelden meerdere malen herhaald, waarbij de nieuwe positie van een sedimentdeeltje iedere tijdstap wordt gebruikt om de nieuwe richting en stapgrootte te bepalen. Uiteindelijk geeft deze opeenvolging van bruto bewegingen zo het residuele netto transportpad vanaf een gegeven startpunt (in de figuren in deze paragraaf zijn de startpunten aangegeven met zwarte cirkels). Hierbij wordt de aanname gedaan van sedimentbeschikbaarheid op alle opgegeven startpunten. De transportpaden geven géén informatie over de gebieden waar erosie of sedimentatie plaatsvindt: een transportpad dat van locatie A naar B loopt hoeft niet te betekenen dat sediment van locatie A locatie B ook daadwerkelijk bereikt, er kan tussendoor sedimentatie plaatsvinden.

5.4.1 Globale transportpatronen

De transportpatronen in de Buiten Eems op basis van het residuele transportvectorveld zijn van karakter veranderd sinds 1985 (Figuur 5.5). In 1985 was het karakter van de residuele patronen vergelijkbaar met het patroon zoals gevonden in Cleveringa (2008) (zie Figuur 2.10). Hier was een duidelijk systeem te onderscheiden bestaande uit circulatiecellen met ebgedomineerde hoofdgeulen en vloed gedomineerde nevengeulen.

De verandering in transporten tussen 1985 en 2020 (zie Bijlage D voor de overige gemodelleerde jaren) laat een systeem in transitie zien. Het noordelijke deel van het Randzelgat heeft een omslag doorgemaakt van vloedgedomineerde naar ebgedomineerde transporten, terwijl het zuidelijke deel nog altijd vloedgedomineerd is. Ook in het Doekegat zijn de residuele transporten sterker ebdominant geworden. Er lijkt nog geen nieuwe evenwichtssituatie te zijn ontstaan. In de volgende paragrafen worden de veranderingen in transportpatronen per macrocel besproken aan de hand van de SedTRAILS transportpaden.

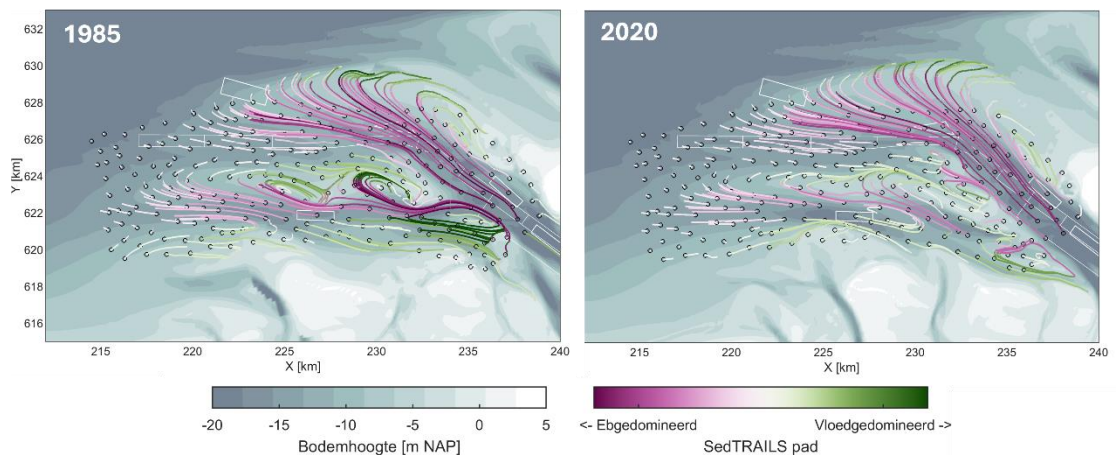


Figuur 5.5 Residuele sedimenttransportvectoren voor een representatieve springtij-doodtijcyclus voor de bodem van 1985 (links) en 2020 (rechts). Roze gearceerde gebieden geven residuele transporten in ebrichting, groen in vloedrichting.

5.4.2 Westereems – Huibertgat

De circulatiecel Westereems – Huibertgat bestaat afwisselend eb- en vloedgedomineerde geulen. Transportpaden in de Westereems zijn in ebrichting (Figuur 5.6). Tussen 1985 en 2020 zijn de algemene transportpatronen hier weinig veranderd. In het Huibertgat hebben zich wel enkele veranderingen voorgedaan. In 1985 was er een vloedgedomineerde strook te onderscheiden aan de zuidkant van het Huibertgat, langs de ebdelta's van de kombergingsgebieden Lauwers, Schild en Sparregat, en noordelijk daarvan een ebgedomineerde geul. Het Huibertgat had twee uitstroomgeulen richting de Westereems, waarvan de noordelijke ebgedomineerd en de zuidelijke vloedgedomineerd was. In 2020 is in grote lijnen nog altijd hetzelfde patroon te onderscheiden, maar de circulatiepatronen in het

drempelgebied tussen Huibertgat en Westereems zijn complexer geworden, met meer eb- en vloedscharen. Daarnaast zijn de transportpaden tussen 1985 en 2020 korter geworden, wat betekent dat de intensiteit van de netto transporten hier is afgenomen.

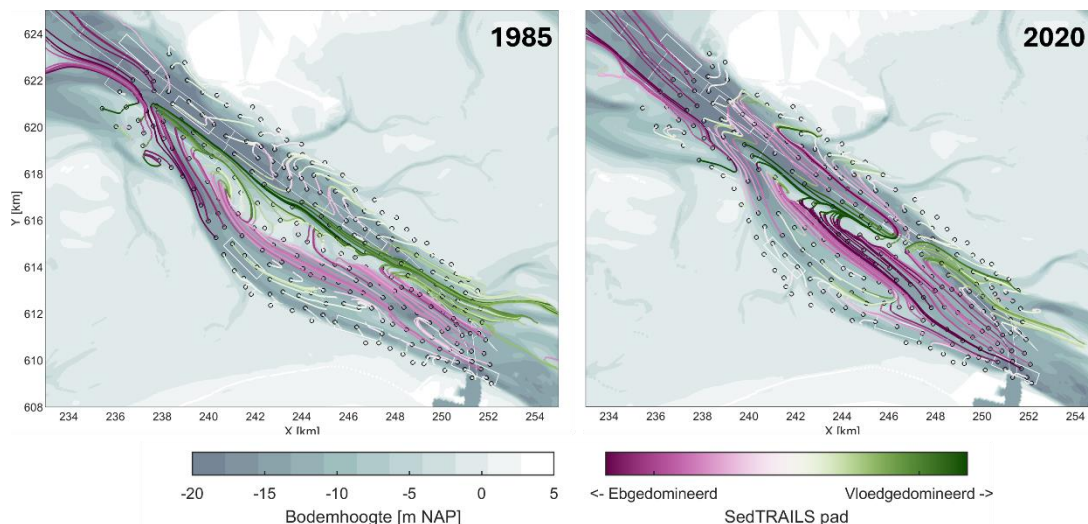


Figuur 5.6 SedTRAILS transportpaden van de 200 µm fractie in de Westereems en het Huibertgat voor de bodem van 1985 (links) en 2020 (rechts). Roze lijnen geven paden in ebrichting, groene lijnen in vloedrichting. Hoe donkerder de lijn, des te langer is het transportpad.

5.4.3 Randzelgat – Oude Westereems

In 1985 was er een duidelijk circulatiepatroon in het tweegeulensysteem Randzelgat – Oude Westereems, waarin het Randzelgat overwegend vloeddominant was en de Oude Westereems ebgedomineerd (Figuur 5.7). In dit gebied heeft een grootschalige verschuiving in transportpatronen plaatsgevonden.

In het noordelijke deel van het Randzelgat ($Y > 614$ km) zijn de transportpaden in het grootste deel van de geul nu in ebrichting, met uitzondering van een smalle strook direct langs de meeuwenstaart die in vloedrichting georiënteerd is. Ter hoogte van verspreidingsvak P1 bevindt zich een divergentiezone waarbij sediment ten noorden van dit gebied in ebrichting en sediment ten zuiden in vloedrichting beweegt. Ondanks dat dit verspreidingsvak zich in een snelstromende geul bevindt is de netto transportcapaciteit hier lokaal laag. Het zuidelijke deel van het Randzelgat is nog altijd vloedgedomineerd. Met het smaller en lager worden van de Meeuwenstaart is het transport over de Meeuwenstaart toegenomen. Transporten over de Meeuwenstaart zijn van de Oude Westereems naar het Randzelgat gericht.

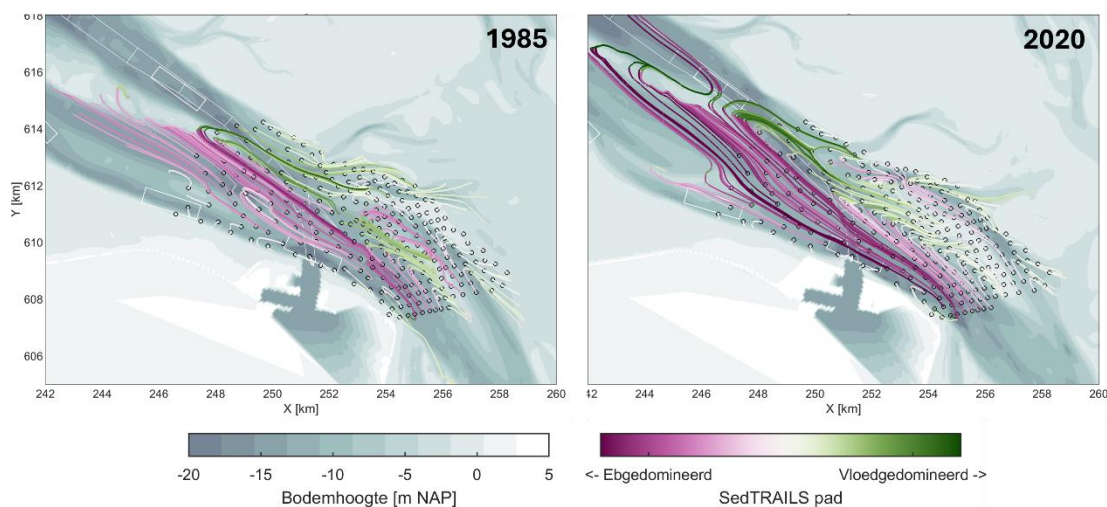


Figuur 5.7 SedTRAILS transportpaden van de 200 μm fractie in het Randzelgat en de Oude Westereems voor de bodem van 1985 (links) en 2020 (rechts). Roze lijnen geven paden in ebrichting, groene lijnen in vloedrichting. Hoe donkerder de lijn, des te langer is het transportpad.

5.4.4

Doekegat

Figuur 5.8 toont de transportpaden in het gebied rondom Eemshaven. Transportpaden in het Doekegat zijn overwegend in ebrichting. De algemene patronen zijn vergelijkbaar voor 1985 en 2020, maar de transportenpaden zijn de afgelopen decennia langer geworden, hetgeen duidt op een intensivering van de netto resttransporten in ebrichting. Daarnaast is opvallend dat er lange transportpaden vanaf Eemshaven zijn die, via de Oude Westereems en de Meeuwenstaart tot in het Randzelgat reiken.



Figuur 5.8 SedTRAILS transportpaden van de 200 μm fractie in het Doekegat voor de bodem van 1985 (links) en 2020 (rechts). Roze lijnen geven paden in ebrichting, groene lijnen in vloedrichting. Hoe donkerder de lijn, des te langer is het transportpad.

6 Conceptueel model

In dit hoofdstuk wordt een conceptueel denkmodel opgesteld waarmee de ontwikkelingen in de Buiten Eems worden omschreven, samen met de processen die hieraan ten grondslag liggen. Omdat ontwikkelingen op verschillende schaalniveaus elkaar beïnvloeden wordt gebruik gemaakt van een schaalcascade. Hierin worden de ontwikkelingen per schaalniveau beschreven, waarbij van grote schaal steeds verder wordt ingezoomd. Ontwikkelingen op grote tijd- en ruimteschaal scheppen de randvoorwaarden voor het gedrag op kleinere tijd- en ruimteschalen. Tegelijkertijd kan er ook sprake zijn van een terugkoppeling waarbij ontwikkelingen of processen op kleine schaal de grotere schaal beïnvloeden.

6.1 Megaschaal: Eems-Dollard estuarium en Groninger Wad

Landaanwinningen en stabiliteit meergeulenstelsel

In de afgelopen eeuwen heeft het Eems estuarium zich aangepast aan grootschalige landaanwinningen die het kombergingsvolume hebben verkleind. Hierdoor is het getijprisma afgenomen, zijn evenwichtsdoorsnedes van geulen kleiner geworden en is het estuarium sediment gaan importeren.

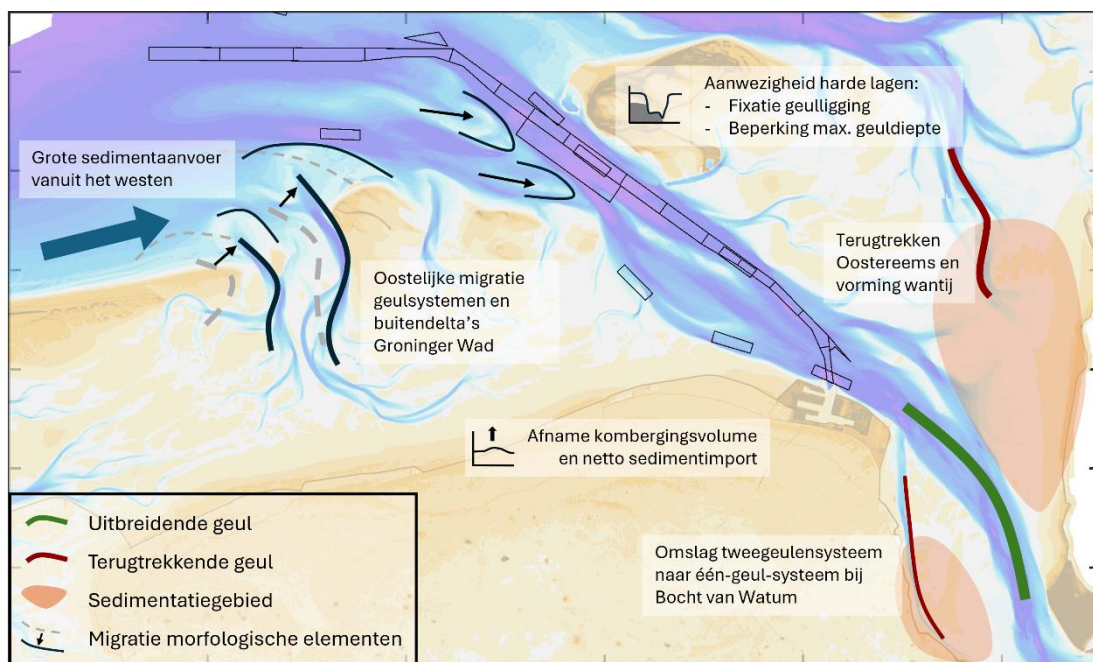
Dit heeft onder anderen geleid tot gevolgen voor de stabiliteit van het meergeulenstelsel (Figuur 6.1). Met het opvullen van de Bocht van Watum is in het centrale gedeelte van het estuarium het meergeulenstelsel verloren gegaan. In het mondingsgebied heeft de Oostereems zich teruggetrokken en is er een wantij gevormd over het Eemshornwad, een plaatgebied dat nog altijd in hoogte en volume toeneemt. Daarmee heeft er een omslag plaatsgevonden van een mondingsgebied met twee aangesloten zeegaten naar een mondingsgebied dat aangesloten is door een enkel zeegat. Doordat de Westereems de getijvolume-uitwisseling van de Oostereems heeft overgenomen is het totale geulvolume van de geulen in de Buiten Eems over de afgelopen eeuwen min of meer constant gebleven. In de afgelopen decennia neemt het totale geulvolume van de geulen in de Buiten Eems af.

Sedimentaanbod vanuit het westen

De morfologische veranderingen in de Buiten Eems zijn nauw gerelateerd aan de kustzone van Schiermonnikoog en de Rottums. Door de afsluiting van de Lauwerszee (in 1969) is in de decennia na de afsluiting veel zand beschikbaar gekomen door erosie van de buitendelta van het Friesche Zeegat. Dit grote sedimentaanbod heeft geleid tot sterke groei van de eilandstaart van Schiermonnikoog, oostelijke migratie van de geulsystemen in het Groninger Wad en uitbreiding van de buitendelta's van het Groninger Wad in oostelijke richting. Dit leidt tot een sedimentdruk in oostelijke richting op geulen in de Buiten Eems, met als gevolg de migratie van onder anderen het Huibertgat en de Oude Westereems.

Invloed harde lagen

Naast bovenstaand beschreven ontwikkelingen wordt de grootschalige morfologie in de Eems en de Buiten Eems beïnvloedt door de aanwezigheid van moeilijk erodeerbare Pleistocene lagen, die op verschillende locaties de maximale geuldiepte beperken en geulmigratie verhinderen. Dit is vooral relevant geweest voor de historische vorming van het estuarium.



Figuur 6.1 Conceptueel model van ontwikkelingen in de Buiten Eems die gerelateerd zijn aan naastgelegen bekkens en geulsystemen.

6.2 Macroschaal: Buiten Eems (Eemshaven – Noordzee)

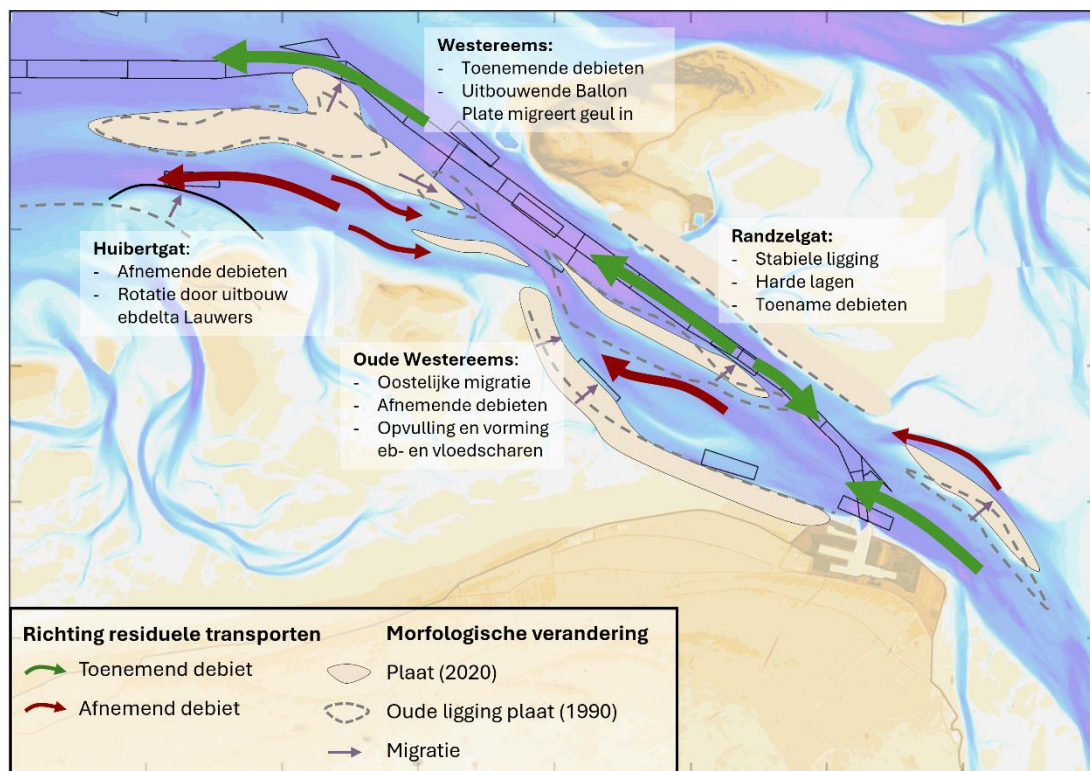
Het meergeulenstelsel van het Eems-Dollard estuarium kan worden onderverdeeld in verschillende sedimenttransportcellen (genaamd) macrocellen, bestaande uit hoofd- en nevengeulen die splitsen en weer samenkomen. Hierdoor zijn er afwisselend locaties met een tweegeulensysteem gescheiden door een ondiepte (zandplaat), met daartussen lokaal enkelgeulsystemen waar de twee geulen convergeren (Figuur 6.2).

De grootschalige veranderingen in het Eems-Dollard estuarium in de afgelopen eeuwen hebben invloed gehad op de stabiliteit van het meergeulenstelsel. Zo is zuidelijk van Eemshaven het meergeulenstelsel veranderd in een enkelgeulstelsel (zie ook §6.1). In de Buiten Eems is de laatste decennia een trend zichtbaar waarbij de getijvolumes door de Westereems en het Randzelgat (groene pijlen in Figuur 6.2) toenemen ten koste van Huibergat en Oude Westereems (rode pijlen). Met name de Oude Westereems, de oorspronkelijke hoofdgeul, degradeert. Debieten lopen terug, er vindt sedimentatie plaats en de geul begint steeds sterker te meanderen waarbij eb- en vloedscharen vormen, gescheiden door drempels. Daarnaast worden de Oude Westereems en het Huibergat door de grote sedimentaanvoer langs de kustzone in oostelijke richting gedrukt, wat de degradatie versterkt.

Deze transitie heeft invloed op de sedimentcirculaties, evenwichtsdieptes en -doorsnedes van de geulen en ligging en volumes van de platen. Zo is er bijvoorbeeld een omslag geweest in de netto transportrichting in het noordelijke deel van Randzelgat, van overwegend vloed- naar ebgedomineerd en neemt de intensiteit van de residuele transporten door het Huibergat af.

Samengevat nemen overal in de Buiten Eems de getijvolumes door de hoofdgeul toe, ten koste van de debieten door de nevengeulen. De transportpatronen worden over de gehele Buiten Eems meer ebdominant. Dit is een indicatie dat het plaat-geulstelsel in de Buiten Eems in transitie is richting een nieuwe (evenwichts-) situatie. Dit kan een tweegeulensysteem zijn waarbij Westereems en Randzelgat dominant zijn over Huibergat en Oude Westereems,

respectievelijk. Het is echter ook mogelijk dat een transitie plaats vindt richting een enkelgeulstelsel, waarbij de degraderende nevengeulen op termijn volledig verdwijnen. Met de huidige kennis is nog onbekend naar welke nieuwe evenwichtssituatie het systeem zich ontwikkelt.



Figuur 6.2 Conceptueel model van ontwikkelingen in de Buiten Eems (traject Eemshaven - Noordzee) op macroschaal

6.3 Mesoschaal: knelpunten

De ontwikkeling van de individuele geulen in het vaargeultraject Eemshaven – Noordzee wordt gestuurd door de ontwikkelingen op grotere schaal die in de twee voorgaande paragrafen zijn beschreven.

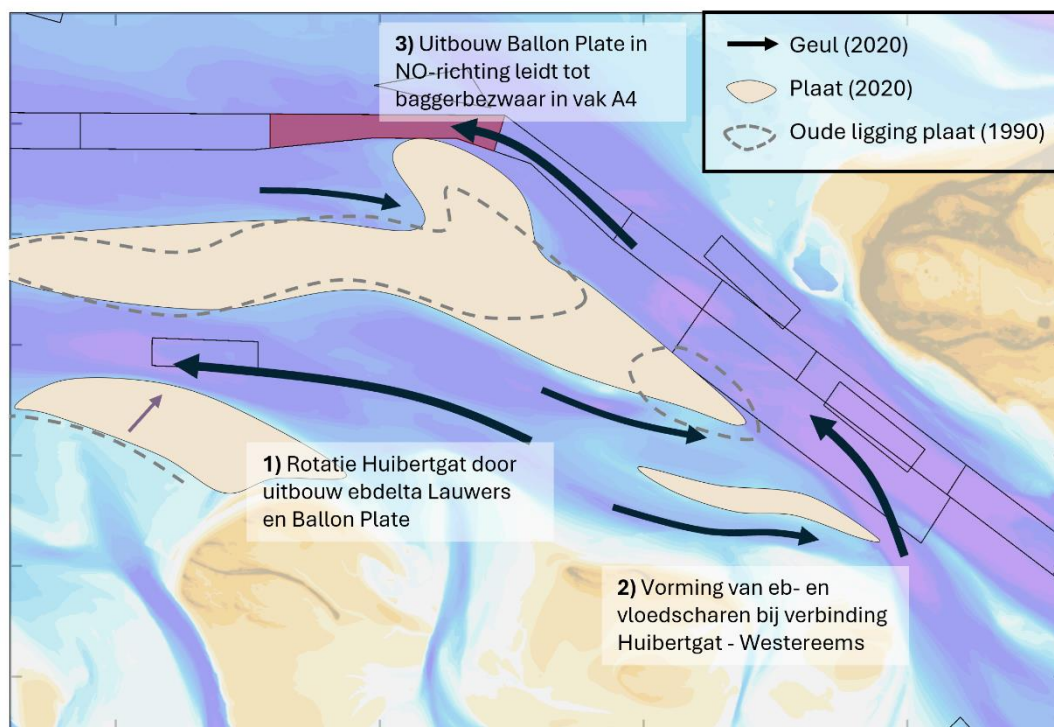
Westereems – Huibertgat

Dit gebied wordt sterk beïnvloed door de grote sedimenttoevoer vanuit het westen (zie ook §6.1)). Als gevolg hiervan bouwt de ebdelta van de Lauwers in noordoostelijke richting uit en kent de Ballon Plate, die Westereems en Huibertgat scheidt, een grote volumetoename. De getijvolumes door de hoofdgeul Westereems nemen toe, ten koste van de nevengeul Huibertgat.

Het Huibertgat roteert van een oost-west naar een zuidoost-noordwest oriëntatie door een combinatie van uitbouw van de ebdelta van de Lauwers in het zuidwesten en uitbouw van de Ballon Plate in het noordoosten ((1) in Figuur 6.3). Door een combinatie van afnemende debieten en veranderende oriëntatie van het Huibertgat ontstaat een complex systeem van eb- en vloedcharen bij de verbinding tussen Huibertgat en Westereems (2).

De groei van de Ballon Plate leidt tot een toenemend baggerbezwaar in baggervak A4 (gelegen in de Westereems) doordat de noordoostelijk migrerende plaatrand in de binnenbocht het

baggervak in beweegt (3). Het gebied ten noorden van de baggervakken kent juist een erosieve trend. Vanuit morfologisch perspectief zou het baggerbezwaar dus potentieel verlaagd kunnen worden door met de morfologische dynamiek mee te bewegen en de bocht ruimer te nemen.



Figuur 6.3 Conceptueel model van de ontwikkelingen op mesoschaal van het tweegeulensysteem Westereems – Huibertgat tussen 1990 en 2020. Baggervak A4, met het hoogste baggerbezwaar in dit gebied, is rood gearceerd.

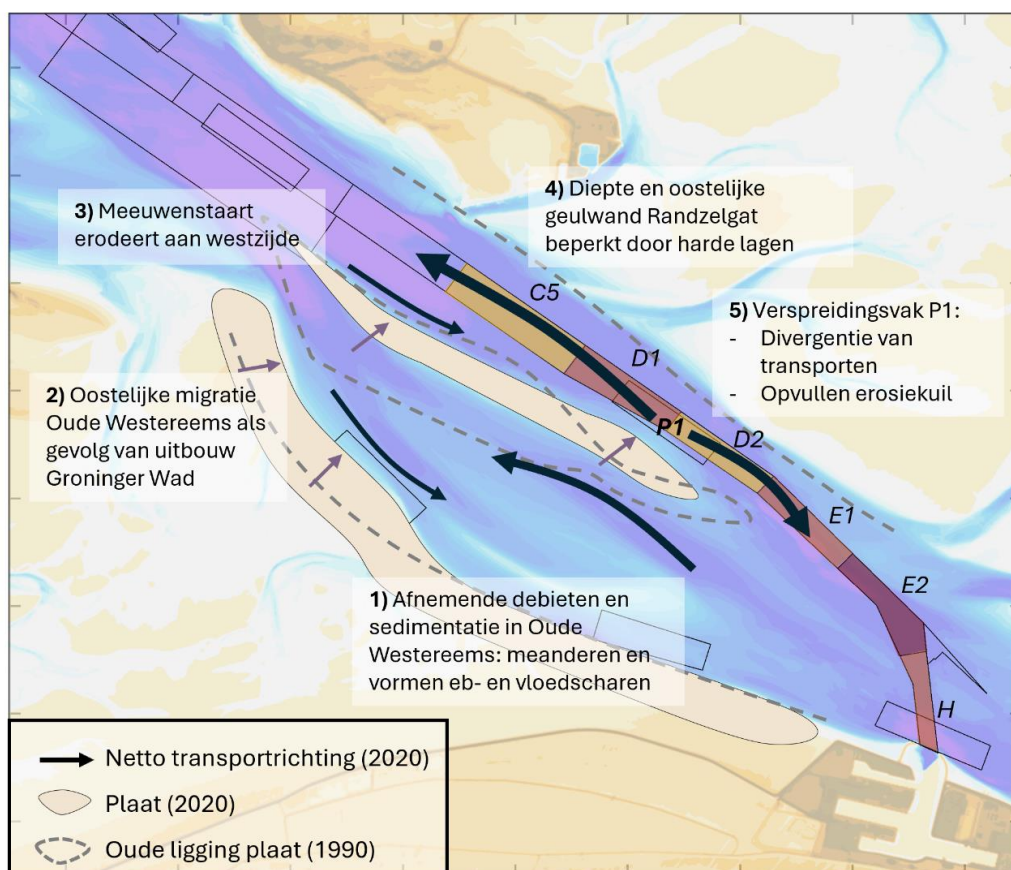
Randzelgat – Oude Westereems

Het getijvolume neemt toe door het Randzelgat en het neemt af door de Oude Westereems. Doordat de debieten door de Oude Westereems teruglopen begint deze te meanderen en eb- en vloedcharen te vormen, gescheiden door drempelgebieden ((1) in Figuur 6.4). Daarnaast migreert de Oude Westereems naar het oosten, onder invloed van de sedimentdruk vanuit de kustzone (2). Door de combinatie van oostwaartse migratie en toenemende meandering van Oude Westereems erodeert de plaat Meeuwenstaart aan de westzijde (3). Stromingen en residuele transporten over de Meeuwenstaart nemen hierdoor toe, vanuit de Oude Westereems naar het Randzelgat gericht.

Het Randzelgat maakt de omslag van nevengeul naar hoofdgeul: de debieten nemen toe en netto zandtransporten veranderen van richting van vloed- naar ebgedomineerd in het noordelijke deel van de geul. Op enkele locaties wordt de geul geknepen door de aanwezigheid van harde lagen en de oprukkende Meeuwenstaart, waardoor lokaal ontgrondingskuilen ontstaan. Verspreidingsvak P1 was oorspronkelijk een dergelijke ontgrondingskuil maar is de laatste jaren in hoog tempo opgevuld.

Baggervolumes zijn het hoogst in het zuidelijke deel van het Randzelgat rondom verspreidingsvak P1, waar ongeveer 2,5 miljoen m³/jaar verspreid wordt (5). Bovendien is de laatste jaren op deze locatie sprake van een divergentie in transportrichtingen en lokaal een lagere transportcapaciteit dan in omringende gebieden. Het is onduidelijk in welke mate de

verspreide volumes bij P1 bijdragen aan de hoge baggervolumes in dit gebied, maar het is niet uit te sluiten dat hier een relatie tussen zit.



Figuur 6.4 Conceptueel model van de ontwikkelingen op mesoschaal van het tweegeulensysteem Randzelgat – Oude Westereems tussen 1990 en 2020. In de gekleurde baggervakken vindt baggeronderhoud plaats waarbij donkerder rood hogere baggervolumes aangeeft.

Doekegat

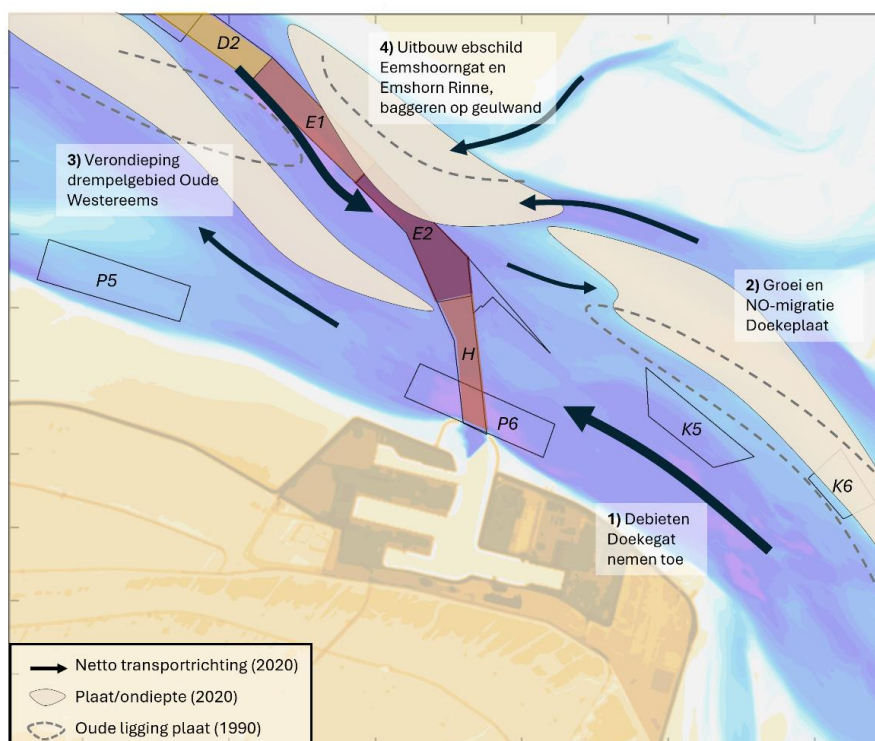
In het gebied voor Eemshaven steekt de vaargeul het Doekegat over naar het Randzelgat. Dit is een dynamisch drempelgebied waar de tweegeulsystemen uit het noorden (Randzelgat en Oude Westereems) en uit het zuiden (Doekegat en Emshörn Rinne) bij elkaar komen. Daarnaast wordt de diepte hier beperkt door harde lagen, waardoor op verschillende locaties ontgrondingskuilen zijn ontstaan waar deze harde lagen niet aanwezig zijn.

De debieten door het Doekegat nemen toe ((1) in Figuur 6.5), mede gedreven door de degeneratie van de Bocht van Watum die historisch gezien op de Emshörn Rinne aansloot. Tegelijkertijd groeit de Doekeplaat in sedimentvolume en migreert naar het noordoosten, waardoor de Emshörn Rinne naar het noordoosten beweegt (2). De oriëntatie van de Emshörn Rinne komt hierdoor meer dwars op het drempelgebied en de geul, die oorspronkelijk een belangrijke verbinding vormde naar de Oostereems, verliest aan belang.

In het verlengde van de Oude Westereems is het drempelgebied ondieper geworden door verzanding en drempelvorming die gepaard gaat met het afnemende debiet door de Oude Westereems (3). Deze verondieping loopt door de baggervakken E2 en H, waar het baggerbezwaar om die reden (zeer) hoog is ($\sim 2,0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$).

Verspreidingslocatie P5 is ondieper geworden door aanzanding in de Oude Westereems. Daarnaast is op basis van de transportpaden van verspreidingslocaties P5 en P6 bekend dat sediment dat hier wordt verspreid bijdraagt aan het opvullen van de Oude Westereems, en zo mogelijk ongewenst de transitie in het meergeulenstelsel versnelt.

Aan de noordkant van het gebied is sprake van uitbouw van de ebschilden van het Eemshoorn gat die baggervakken E1 en E2 in beginnen te lopen (4), waardoor de geul in zuidwestelijke richting migreert. Baggerwerkzaamheden vinden hier plaats op de noordelijke geulwand, waardoor de baggervolumes hoog zijn. Het diepste deel van de geul bevindt zich momenteel ten zuidwesten van de baggervakken E1 en E2. Vanuit morfologisch perspectief zou het baggerbezwaar lager kunnen zijn indien de geul iets zuidelijk van de huidige positie zou verlopen, echter zou dit vanuit de nautische randvoorwaarden waarschijnlijk ongunstig of zelfs onmogelijk zijn. Schepen kunnen in het huidige ontwerp 'oplijnen' om veilig de Eemshaven binnen te varen. Als vak E2 naar het zuidwesten verplaatst wordt, betekent dit dat de oplijn lengte om de haven binnen te varen afneemt. Het is voor sommige schepen niet mogelijk om al draaiende de haven binnen te varen. Dit is mede nodig vanwege de dwarsstroom die voorlangs de haven aanwezig is, en het invaren bemoeilijkt.



Figuur 6.5 Conceptueel model van de ontwikkelingen op mesoschaal van Doekegat tussen 1990 en 2020. In de gekleurde baggervakken vindt baggeronderhoud plaats waarbij donkerder rood hogere baggervolumes aangeeft.

7 Discussie

7.1 Redenen voor toename in baggerbezwaar

Het baggerbezwaar voor de verbinding Eemshaven - Noordzee is sinds de vaarwegverruiming 2016 – 2017 toegenomen van ongeveer 0,55 miljoen m³/jaar tot ongeveer 3,5 miljoen m³/jaar. De toename in baggerbezwaar is het gevolg van (1) autonome dynamiek van het plaat-geul systeem in de Buiten Eems, en (2) het gevolg van een verdiepte vaargeul.

Autonome dynamiek

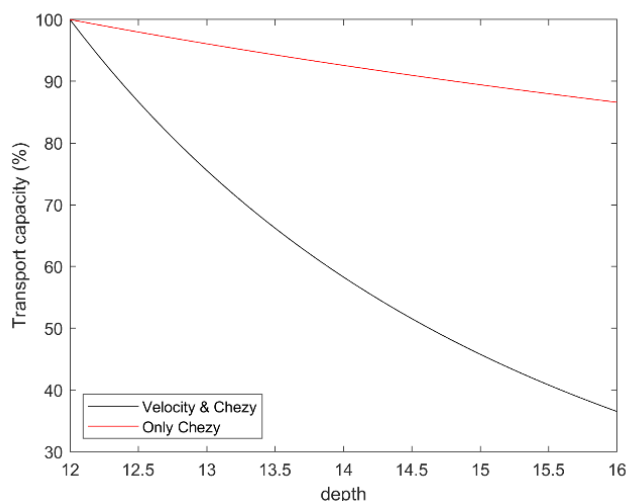
De autonome dynamiek van het plaat-geul systeem (1) wordt waarschijnlijk sterk gestuurd door de waargenomen transitie van hoofd- en nevengeulen en versneld door het aanbod van sediment vanuit de Noordzeekustzone en het Groningerwad. Deze dynamiek is een langjarige trend en het is onwaarschijnlijk dat het verdiepen van de vaargeul invloed heeft op deze morfologische ontwikkelingen. Een verdiepte vaargeul vraagt echter wel een grotere onderhoudsinspanning onder gelijke morfologische dynamiek. Er is immers een grotere diepte die onderhouden moet worden.

Impact verdiepte vaargeul

De impact van het verdiepen van de vaargeul (2) is een afname van (a) de transportcapaciteit door de toegenomen waterdiepte en (b) een verandering van de getijdynamiek. De afname van de transportcapaciteit (a) is (conceptueel weergegeven) tientallen procenten bij een vaargeulverdieping van 12 m naar 14 m waterdiepte (Figuur 7.1). De afname resulteert in een sterkere aanzanding, wat gefaciliteerd wordt door het ruime aanbod van sediment (zie punt 1). De natuurlijke diepte van het drempelgebied bij het Doekegat wordt, bijvoorbeeld, sinds de vaarwegverruiming overschreden. Een verdieping leidt hier dan ook al gauw tot een versnelde ontwikkeling terug naar evenwichtsdiepte omdat het drempelgebied een convergentiezone van transportpaden is vanuit de geulen van de aangrenzende macrocellen. De verandering van de getijdynamiek als gevolg van de vaarwegverruiming (b) omvat een toegenomen getijdebiet (toename transportcapaciteit) door de verruimde geul en een verandering in getij-asymmetrie (toe- of afname transportcapaciteit). Er wordt een toename van getijdebiet waargenomen in de hoofdgeulen (die gebruikt worden voor de vaarweg). Deze toename wordt echter gestuurd door de transitie van het geulensysteem. De impact van de vaarwegverruiming is waarschijnlijk klein geweest op deze ontwikkeling. Er wordt ook een (gemodelleerde) toegenomen ebdominantie waargenomen in de hoofdgeulen van de Buiten Eems. Deze ontwikkeling past echter in een aanpassing van de configuratie van het meergeulenstelsel van het Eems estuarium als geheel. Het is uit de huidige resultaten niet op te maken of de vaarwegverruiming een substantiële bijdrage heeft geleverd aan de toegenomen ebdominantie.

Reden voor toename van het baggerbezwaar

Een afweging van bovenstaande processen leidt tot de conclusie dat de voornaamste oorzaak van het baggerbezwaar de autonome morfologische dynamiek van het plaat-geul systeem in de Buiten Eems is. Deze dynamiek wordt aangedreven door de transitie van het eb-vloedgeulstelsel, versnelt door een ruim sedimentaanbod vanuit het Groningerwad. De vaarwegverruiming heeft geen (of nauwelijks) invloed gehad op deze autonome trends. Sinds de vaarwegverruiming moet er echter wel een grotere diepte onderhouden worden en wordt het aangevoerde sediment minder goed afgevoerd doordat de transportcapaciteit in de vaargeul is afgenomen.



Figuur 7.1 Impact van een vaargeulverdieping op de relatieve transportcapaciteit (in %) ten opzichte van de transportcapaciteit van een vaargeul met een waterdiepte van 12 m. De transportcapaciteit is hierbij aangenomen lineair te schalen met de bodemschuifspanning. De rode lijn toont de impact van afname in transport enkel als gevolg van alleen een grotere waterdiepte (dieptegemiddelde snelheid is gelijk gebleven; bodemschuifspanning neemt af doordat de waterdiepte toeneemt); de zwarte lijn toont de afname in transportcapaciteit wanneer het debiet door de geul gelijk blijft en daardoor de dieptegemiddelde snelheid ook afneemt.

7.2 Redenen voor onderschatting van de voorspellingen

De toename in baggerbezwaar werd ingeschat maximaal toe te nemen tot 1,5 Mm³/jaar (Arcadis, 2013). Deze toename van het baggerbezwaar (tot 1,5 Mm³/jaar) is berekend met een morfologisch Delft3D model, gevalideerd op de waterbeweging en sedimentconcentraties. Er zijn diverse redenen waarom een morfologisch numeriek model als Delft3D deze aanzanding in de vaargeul onderschat, welke deels generiek zijn en deels specifiek voor Delft3D. De volgende aspecten spelen hierbij een rol:

- **Evenwicht.** In werkelijk bestaat er in getijsystemen een subtiële balans tussen geuldimensies en getijprisma. Wanneer een geul verdiept wordt, heeft een geul de natuurlijke neiging hiervoor te compenseren. Dit leidt tot aanzanding en een toename in de baggerinspanning. In een numeriek model worden bodemveranderingen uitgerekend op basis van een sedimenttransportgradiënt, welke weer gegenereerd wordt door de waterbeweging. Morfologische modellen die starten vanaf een realistische bodemligging zijn meestal niet in morfologisch evenwicht, zelfs als het natuurlijke systeem wel in evenwicht zou zijn. Typisch gedrag van een morfologisch Delft3D model is dat het de neiging heeft om geulen in te snijden, zowel voor of na verdieping. Dergelijke modeltekortkomingen worden vaak beperkt door het model hiervoor te kalibreren met correctiefactoren. Door zowel het gebrek aan een morfologisch (model) evenwicht en de aanpassingen om hiervoor te corrigeren is het zeer lastig om de exacte aanzanding (of aanslibbing) als gevolg van een verdieping te voorspellen.
- **Autonome trends en cycli.** Het eb- en vloedscharensysteem in de Buiten Eems wordt gekarakteriseerd door autonome plaat- en geulmigraties en mogelijk cycliciteit in deze trends. Deze morfologische dynamiek is het resultaat van gradiënten in de netto sedimenttransporten. Een kleine fout in de gemodelleerde bruto sedimenttransporten zorgt ervoor dat er al snel een fout wordt gemaakt in de netto transporten. De huidige morfologische modellen zijn zeer beperkt in staat om dit soort trends en cycli op tijdschalen van decennia goed na te bootsen. Uitzonderingen hierop zijn systemen waar

een dergelijke cycliciteit (bijvoorbeeld de ebdelta van Ameland) geforceerd wordt door een sterk (golfgedreven) nettotransport.

- Rol van golven. De meeste numerieke modelstudies rondom aanzanding / aanslibbing zijn hydrodynamisch geforceerd met getij- en rivierstroming, soms aanvullend met windgedreven stroming. Golven kunnen echter tot een aanzienlijk hogere aanzanding / aanslibbing leiden. Ten eerste neemt de golforbitsnelheid snel af met de waterdiepte: hierdoor wordt sediment op ondiepe platen makkelijk in suspensie gebracht en de geul in getransporteerd terwijl golfopwoeling van sediment vanuit de geulen minimaal is. Ten tweede wordt autonome dynamiek van het plaat-geul systeem in de Buiten Eems sterk beïnvloed door golven. Deze dynamiek zorgt voor een zijdelings transport de vaargeul in. Een dergelijke dynamiek wordt slechts beperkt gereproduceerd in een model zonder golfberekeningen.

Uit deze rapportage blijkt dat de grotere toename in baggerbezwaar voornamelijk te wijten is aan de autonome dynamiek van het plaat-geul systeem in de Buiten Eems (Paragraaf 7.1). Samenvattend kan geconcludeerd worden dat de data-extrapolatie methode die gehanteerd is voor de MER in 2009 (Rijkswaterstaat, 2009) een te beperkt inzicht geeft in deze laterale morfodynamische trends. De periode waarover aanzanding is berekend (2001 – 2005) is te kort om een betrouwbare trend vast te stellen. De aanpak die gehanteerd is voor de MER in 2014 (Rijkswaterstaat, 2013), met een numeriek morfologisch model, geeft wel (beperkt) inzicht in laterale geul- en plaatmigratie maar is zeer onzeker door de hier boven benoemde redenen.

Sedimentatiestudies als gevolg van verdiepingen worden omgeven met een grote mate van onzekerheid. In de communicatie (rapportage, presentatie) rondom dit soort uitkomsten worden de resultaten van een enkele modeluitkomst gepresenteerd, vaak wel omgeven met een bepaalde onzekerheidsmarge. Deze onzekerheidsmarge verdwijnt echter vaak naar de achtergrond.

7.3 Transitie meergeulenstelsel

Aan het begin van de 19^e eeuw werd de ebgedomineerde hoofdgeul in het estuarium gevormd door (van landwaarts naar zeewaarts) het Vaarwater naar Emden – De Bocht van Watum – Emshörn Rinne – Oude Westereems (zie Figuur 2.4c). In de 20^e eeuw is in het centrale gedeelte van het estuarium deze configuratie gewisseld naar een hoofdgeul die gevormd wordt door het Oost Friesche Gaatje met de Bocht van Watum als sterk degenererende nevengeul (zie Figuur 2.4e,f). Een estuarien meergeulenstelsel kan beschreven worden door middel van meerdere macrocellen (zie Figuur 2.11) met een meanderende hoofdgeul die iedere macrocel van oever (oost of west) wisselt. Aansluitend op de ontwikkeling in het centrale gedeelte van het estuarium (landwaarts van Eemshaven) is het dus mogelijk dat er ook zeewaarts van Eemshaven een omslag plaatsvindt van hoofd- en nevengeul. Het Doekegat en het Randzelgat zouden dan de hoofdgeul worden. De morfologische trends en volumebalansen over de afgelopen 40 jaar (Elias et al., 2022) laten inderdaad zien dat het Doekegat toeneemt in belang ten opzichte van de Emshörn Rinne en dat het Randzelgat domineert over de Oude Westereems. De verandering in debietverdeling en residuele zandtransporten, gebaseerd op modelsimulaties, geven eveneens weer dat het Doekegat en het Randzelgat aan belang winnen en sterker ebgedomineerd zijn geworden. Deze trend lijkt nog niet te stagneren in de meest recente bodemopnames. Deze ontwikkelingen tezamen geven de suggestie dat het meergeulenstelsel in de Buiten Eems in transitie is. Het is onduidelijk of deze transitie leidt tot een situatie met een enkelgeulsysteem (zoals het Oost Friese Gaatje) of dat deze transitie een voortzetting is van de omslag van hoofd- en nevengeul zoals sinds het begin van de 19^e eeuw wordt waargenomen.

De gemodelleerde toename van ebdominantie in de geulen van de Buiten Eems lijkt tegenstrijdig met het sterk importerende (vloeddominante) gedrag van het Eems estuarium als geheel (e.g. Van Maren et al., 2016) wat leidt tot continue langjarige opvulling van de geulen (Pierik et al., 2019). Hiervoor zijn drie mogelijke verklaringen. Ten eerste is deze ogenschijnlijke discrepantie mogelijk een modeltekortkoming. Het model van bijvoorbeeld Pein et al. (2014) is, op basis van de stroomsnelheden, vloeddominant in geulen van de Buiten Eems. De gehanteerde modelleeraanpak met een dieptegemiddeld (2DH) waterbewegingsmodel en een enkele zandfractie van 200 μm (in tegenstelling tot een realistischere korrelgrootteverdeling) die tevens in het gehele modeldomein beschikbaar is voor transport kan mogelijk dit afwijkende gedrag verklaren. Een tweede verklaring is gerelateerd aan ruimtelijke variaties in transportcapaciteit. Wanneer een estuarium een lage transportcapaciteit heeft (door relatief lage stroomsnelheden) met een hoge aanvoer van sediment in de monding zal het systeem opvullen. De vloed- of ebdominantie zal dan vooral de snelheid van opvullen bepalen. Dit is zeker deels van toepassing op het Eems estuarium, omdat het getijdebiet tegenwoordig veel kleiner is dan enkele eeuwen terug (zie Schrijvershof et al., 2024). Systemen die opvullen als gevolg van een lage transportcapaciteit zijn gevoelig voor een verdere afname van die transportcapaciteit door verdieping. Een derde verklaring is dat de platen een grotere rol spelen in het netto transport dan over het algemeen wordt aangenomen. De modelresultaten tonen over de afgelopen 40 jaar een toegenomen vloedge domineerd transport over de platen. De geulen zijn dan mogelijk ebdominant qua waterbeweging, maar als hier vooral grof materiaal op de bodem ligt (of de bodem uit harde lagen bestaat, wat het geval is in het Randzelgat) zal het netto transport beperkt zijn. Aanvullend onderzoek is benodigd om de huidige (gemodelleerde) trends in de Buiten Eems te relateren aan de ontwikkelingen van het estuarium als geheel.

7.4 Impact storten op stabiliteit meergeulenstelsel

Jeuken et al. (2007) hebben berekend dat in het zeewaartse gedeelte van het meergeulensysteem (macrocel 1 & 2, zie Figuur 2.11) de kritische stortcapaciteit 0,6 – 2,0 miljoen m^3/jaar bedraagt. De totale stortvolumes als gevolg van het vaargeulonderhoud bedroegen over de periode 2017- 2023 ongeveer 3,0 – 3,5 Mm^3/jaar . Als het totale stortvolume op een enkele locatie in de nevengeul van een zeewaarts gelegen macrocel (zie Figuur 2.11) gestort zou worden wordt de kritische stortcapaciteit ruim overschreden. Met de stortstrategie die hoofdzakelijk is toegepast sinds de vaarwegverruiming (Figuur 3.4) wordt het merendeel van de vrijgekomen specie gestort op verspreidingslocatie P1 (gelegen in de hoofdgeul). Over de periode 2017 – 2023 was dit gemiddeld ongeveer 2,0 Mm^3/jaar (Figuur 3.3). De stortvolumes op stortlocatie P1 zijn dus gelijk aan de bovengrens van de kritische stortcapaciteit zoals berekend door Jeuken et al. (2007). Het volume wordt echter verspreid in de hoofdgeul terwijl het criterium voor de kritische stortcapaciteit van toepassing is op storten in de nevengeulen (Wang & Winterwerp, 2001, Jeuken & Wang, 2010). Er wordt echter wel een transitie waargenomen van het meergeulenstelsel, waarbij Randzelgat en Westereems in belang toenemen ten koste van Oude Westereems en Huibertgat (§5.2). Met betrekking tot de stabiliteit van het meergeulenstelsel is het daarom van belang om voorzichtig te zijn met het storten in de nevengeulen, om degeneratie van de nevengeulen niet onbedoeld te versnellen. Dit betreft de stortvakken P5, P5A, P3 en ook P6, omdat transportpaden vanuit stortlocatie P6 richting de Oude Westereems lopen (totale verspreidingswerk: ongeveer 1-2 Mm^3/jaar). Het is aan te raden om de baggerspecie die vrijkomt bij het vaargeulonderhoud veel evenwichtiger te verspreiden over het gehele geulenstelsel in de Buiten Eems dan hoofdzakelijk op een enkele verspreidingslocatie te storten, ook omdat P1 de laatste jaren in hoog tempo is opgevuld.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

De systeemkennis van de hydro-morfologie van de Buiten Eems, de analyse van de bagger- en stortvolumes van het vaargeultraject sinds de verruiming, de gedetailleerde morfologische trends afgeleid vanuit lodinggegevens en de verandering van de hydrodynamica en zandtransportpatronen over de afgelopen decennia afgeleid uit de modelresultaten zijn geïntegreerd om tot conclusies op de gestelde onderzoeksvragen te komen. Deze zijn hieronder weergegeven per onderzoeksvraag.

1. Wat zijn de dominante processen die de sedimentdynamiek in het gebied van het vaargeultracé bepalen?

Het vaargeultracé van de verbinding Eemshaven-Noordzee loopt door geulen die onderdeel zijn van een meergeulensysteem. Op basis van de getijgedreven residuele stromings- en zandtransportpatronen kan het systeem opgedeeld worden in meerdere transportcellen, genaamd macrocellen. Iedere macrocel bestaat uit een hoofdgeul (vaak ebgedomineerd) en een nevengeul (vaak vloedgedomineerd). Op de landwaartse en zeewaartse uiteinden van een macrocel bevindt zich een drempel omdat sedimenttransportpaden hier convergeren/divergeren.

Het meergeulenstelsel in de Buiten Eems is in transitie. Dit kan beredeneerd worden uit (1) de ontwikkeling van de historische configuratie van het geulenpatroon in het Eems-Dollard estuarium, (2) de geobserveerde verondieping van de Oude Westereems aangedreven door een zeer groot sedimentaanbod vanuit de Noordzeekustzone (via Horsborngemaal/Horsbornzand) en het Groningerwad, in combinatie met (3) de toegenomen ebdominantie in het Randzelgat en toegenomen vloeddominantie in de Oude Westereems. Of dit een transitie is naar een hoofdzakelijk enkelgeulsysteem (zoals in het Oost Friesche Gaatje) of een transitie naar een systeem waarin het Randzelgat de ebgedomineerde hoofdgeul wordt, is niet uit de analyses te concluderen.

2. Wat verklaart het onverwacht intensievere baggerbezwaar in het vaargeultracé?

a. In hoeverre is deze toename gerelateerd aan de ligging van het vaargeultracé en aan de gebruikte verspreidingslocaties?

Er zijn drie knelpunten geïdentificeerd met een hoog baggerbezwaar:

- Knelpunt 1 – Drempelgebied Westereems: 0,5 Mm³/jaar
De oorzaak van het hogere baggerbezwaar is de noordoostelijke uitbouw van de Ballon Plate welke gevolg is van uitbouw van de ebdelta van de Lauwers. De Ballon Plate migreert de vaargeul in met ca. 50 m per jaar. Het is onwaarschijnlijk dat de vaargeulverruiming deze migratietrend beïnvloedt heeft. De plaat zal dus verder de vaargeul in blijven migreren.
- Knelpunt 2 – Randzelgat: 1,5 Mm³/jaar
Er zijn twee locaties van verhoogd baggerbezwaar:
 - Baggervakken C5, D1 en D2: De oprukken Meeuwenstaart migreert de vaargeul in. Daarnaast is de ontgrondingskuil ter plaatse van verspreidingslocatie P1 tijdens de aanlegfase volgestort met keileem. Sinds de verruiming worden er jaarlijks grote volumes vanuit het vaargeulonderhoud

bijgestort, waarbij de verspreide volumes groter zijn dan de plaatselijke bodemvolumeveranderingen.

- Baggervak E1 en E2 zijn gelegen op de noordoostelijke geulwand van het Randzelgat. De ebschilden van het Eemshoorn gat en Emshorn Rinne lopen baggervakken E1 en E2 in. Dit resulteert in een verhoogd baggerbezwaar.

- Knelpunt 3 – Drempelgebied Doekegat: 2,0 Mm³/jaar

Dit is een drempelgebied tussen de noordelijke en zuidelijk gelegen geulsystem. Een drempelgebied is een van nature sterk aanzandend gebied doordat sedimenttransportpaden hier convergeren. Sinds de verruiming is de onderhoudsdiepte groter dan de natuurlijke diepte van dit drempelgebied. Het drempelgebied heeft de neiging snel terug te keren naar (evenwichts)diepte.

b. Waarom is de toename van de onderhoudsbaggervolumes hoger dan vooraf aan de verruiming was voorzien?

Voorafgaand aan de vaarwegverruiming is het onderhoudsbaggerbezwaar ingeschat met behulp van (empirische) modellen en data-extrapolatie. De analyses uit deze rapportage laten zien dat de vaargeul gelegen is in een dynamisch meergeulensysteem met migrerende geulen en platen en drempelgebieden die aanzanden. De data-extrapolatie methode die gehanteerd is voor de MER in 2009 (Rijkswaterstaat, 2009) geeft beperkt inzicht in deze laterale morfodynamische trends. De aanpak die gehanteerd is voor de MER in 2014 (Rijkswaterstaat, 2013), met een numeriek morfologisch model, geeft wel inzicht in laterale geul- en plaatmigratie. Dit soort numerieke morfologische modellen zijn echter (nog steeds) zeer slecht in staat om de impact van een (beperkte) vaargeulverdieping op de autonome morfologische trends na te bootsen (zie §7.2). Sedimentatiestudies als gevolg van vaargeulverdiepingen zijn daarom omgeven met een grote mate van onzekerheid die erkend en goed gecommuniceerd moet worden.

8.2 Aanbevelingen

Het kwantitatief inschatten van toekomstig baggerbezwaar in een gebied dat sterk beïnvloed wordt door (1) lateraal migrerende geulen en platen en (2) een afname in de transportcapaciteit door langjarige trends (verlies intergetijdengebieden) en verdieping van vaargeulen is bijzonder complex. Zowel de laterale migratie als de morfologische impact van subtiele veranderingen in transportcapaciteit zijn relatief zwakke punten van complexe morfologische modellen. De voorspellingen van het baggerbezwaar in voorgaande MER studies laten zien dat zulke modellen momenteel niet in staat zijn een accurate voorspelling te geven in dit soort complexe morfologische systemen. Er bestaat daardoor een grote onzekerheid rondom de voorspellingen die gedaan worden. Daarom wordt aanbevolen om

Inschattingen te bepalen op een combinatie van methodes (zoals extrapolatie van data-gebaseerde morfodynamische trends (Hartsuiker et al., 2007) en morfodynamisch modelleren (zoals in Arcadis, 2013) en gedetailleerde analyse van morfologische data in combinatie met hydrodynamische modellen, zoals deze rapportage).

- Morfologische modellen te ontwikkelen welke afgeregeld zijn op processen relevant voor baggerbezwaar, welke gevalideerd zijn op historische veranderingen in baggerbezwaar. In de meeste gevallen worden standaard morfologische modellen ontwikkeld en toegepast, zonder validatie van processen welke echt relevant zijn voor aanzanding. Voor het Eems estuarium zou veel aandacht moeten gaan naar (1) de laterale migratie van platen en geulen, (2) het relatieve belang van transport over platen (vaak vloedgedomineerd) en geulen (vaak ebgedomineerd) en (3) de relatie tussen opvulling en afname transportcapaciteit.

Literatuurlijst

- Arcadis (2013). Hydromorfologie Eems-Dollard estuarium. Achtergrondstudie t.b.v. OTB MER Vaarweg Eemshaven. 3 december 2013. Rapport 077141772:D.
- Cleveringa, Jelmer. 'Ontwikkeling Sedimentvolume Eems-Dollard En Het Groninger Wad - Overzicht van de Beschikbare Kennis En Gegevens.' Alkyon, December 2008.
- De Jonge, V. N., Schuttelaars, H. M., van Beusekom, J. E. E., Talke, S. A., & de Swart, H. E. (2014). The influence of channel deepening on estuarine turbidity levels and dynamics, as exemplified by the Ems estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 139, 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.12.030>
- Elias, E., Cleveringa, J. (2021). Kombergingsrapportage Lauwers en Groninger Wad. Deltares, Delft. Rapport 11206799-002.
- Elias, E., Colina Alonso, A., & Van Maren, B. (2021). Morfologische veranderingen Eems-Dollard en Groninger Wad. Report 11203742-000-ZKS-0003.
- 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.
- Jeuken, M. C.J.L., and Z. B. Wang. 'Impact of Dredging and Dumping on the Stability of Ebb-Flood Channel Systems'. *Coastal Engineering* 57, no. 6 (2010): 553–66. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.12.004>.
- Marijnissen, R.J.C., Van Maren, D.S., Schrijvershof, R.A., Van Weerdenburg, R.J.A. (2024). Role of morphological feedbacks on the effectiveness of Nature-based Solutions in the Ems Estuary. Chapter D2.3 Portfolio of restoration interventions, Project REST-COAST, <https://rest-coast.eu/>.
- Meijers, C., Van Weerdenburg, R., Grasmeijer, B., Lenstra, K., & Cleveringa, J. (2024). Knelpuntanalyse Glinder en Groote Siege. Conceptueel model en handelingsperspectief voor knelpunten in de vaargeul Lauwersoog-Schiermonnikoog. Deltares, Delft. Report 11209267-004-ZKS-0001.
- Mulder, H.P.J., 2013. Bagger- en stortgegevens Eems-Dollard estuarium voor de periode 1960-2011. Rijkswaterstaat. Memo 18 april 2013.
- Pein, Johannes Ulrich, Emil Vassilev Stanev, and Yinglong Joseph Zhang. 'The Tidal Asymmetries and Residual Flows in Ems Estuary'. *Ocean Dynamics* 64, no. 12 (2014): 1719–41. <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0772-z>.
- Pierik, H.J. 'GIS Dataset Historical Bathymetry and Resistant Layers in the Ems-Dollard Estuary'. Utrecht: DANS, 2019. <https://doi.org/10.17026/dans-x8w-wzsj>.
- Pierik, Harm Jan, Freek Busschers, and Maarten Kleinhans. 'De Rol van Resistente Lagen in de Historische Morfologische Ontwikkeling van Het Eems-Dollard Estuarium Vanaf de 19e Eeuw'. Utrecht: Utrecht University, Department physical geography, 2019.
- Pierik, H. J., Leuven, J. R. F. W., Busschers, F. S., Hijma, M. P., & Kleinhans, M. G. (2022). Depth-limiting resistant layers restrict dimensions and positions of estuarine channels and bars. *Depositional Record*, February, 1–20. <https://doi.org/10.1002/dep2.184>
- Quataert, E., Meijers, C., de Beer, A., Elias, E. (2024). Knelpuntanalyse Harlingen – Noordzee: conceptueel model en handelingsperspectief voor knelpunten in de vaargeul Harlingen – Noordzee. Deltares, Delft. Report 11210370-005-ZKS-0002.
- Rijkswaterstaat (2009). Verruiming Vaargeul Eemshaven-Noordzee Milieueffectrapport, deel A/B. 11 mei 2009. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Rijkswaterstaat (2013). Verruiming Vaarweg Eemshaven-Noordzee Milieueffectrapport. 9 december 2013. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Schrijvershof, R. A., Van Maren, D. S., Torfs, P. J. J. F., & Hoitink, A. J. F. (2023). A Synthetic Spring-Neap Tidal Cycle for Long-Term Morphodynamic Models. *Journal of Geophysical*

- Schrijvershof, R., Maren, D. S. V., Wegen, M. V. D., & Hoitink, A. J. F. (Ton). (2024). Land Reclamation Controls on Multi-Centennial Estuarine Evolution. <https://doi.org/10.22541/essoar.171405335.56595430/v1>
- Van Maren, D. S., van Kessel, T., Cronin, K., & Sittioni, L. (2015). The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 95, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.12.010>
- Van Maren, D. S., A. P. Oost, Z. B. Wang, and P. C. Vos. 'The Effect of Land Reclamations and Sediment Extraction on the Suspended Sediment Concentration in the Ems Estuary'. *Marine Geology* 376 (2016): 147–57. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.03.007>.
- Van Rijn, Leo C., Dirk-Jan R. Walstra, and Maarten van Ormondt. 'Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. IV: Application of Morphodynamic Model'. *Journal of Hydraulic Engineering* 133, no. 7 (2007): 776–93. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2007\)133:7\(776\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2007)133:7(776)).
- Vos, Peter C, and Egge Knol. 'De ontstaansgeschiedenis van het Dollardlandschap; natuurlijke en antropogene processen. In: K. Essink (Red.), Stormvloed 1509 - Geschiedenis van de Dollard.' Groningen: Stichting Verdrongen Geschiedenis, 2013.
- Vroom, J., de Vries, B., Dankers, P., van Maren, D.S. (2022). Cumulatieve effecten baggeren en verspreiden op habitatype H1130 in het Eems estuarium. Deltares, Delft. Report 11206835-000-ZKS-0005, 3 juni 2022.
- Wang, Zheng Bing, and Han Winterwerp. 'Impact of Dredging and Dumping on the Stability of Ebb-Flood Channel Systems', 2001.
- Winterwerp, J. C., Z.B. Wang, M. J. F. Stive, A. Arends, C. Jeuken, C. Kuijper, and P.M.C. Thoolen. 'A New Morphological Schematization of the Western Scheldt Estuary, The Netherlands' 6 (2001): 1–10.
- Witteveen en Bos (2022). 3-jaarlijkse tussenevaluatie verspreidingslocaties Waddenzee 2017 - 2019 (inclusief 2020 en 2021). Hoofdproduct 1. Rapport 127568/22-011.340. 1 augustus 2022.
- Witteveen en Bos (2023). Vervolgopdracht 3-jaarlijkse tussentijdse evaluatie verspreidingslocaties Waddenzee. Notitie spoor 2 – Baggeropgave Eems-Dollard. Rapport 134143/23-005.421. 28 maart 2023.

Appendices

Appendix A: Verandering van de gemodelleerde debietverdeling, stroomsnelheden en natte geuldoorsnede door het tweegeulensysteem van de Buiten Eems op basis van doorsnedes in de hoofd- en nevengeul.

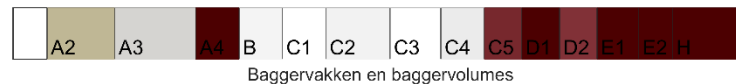
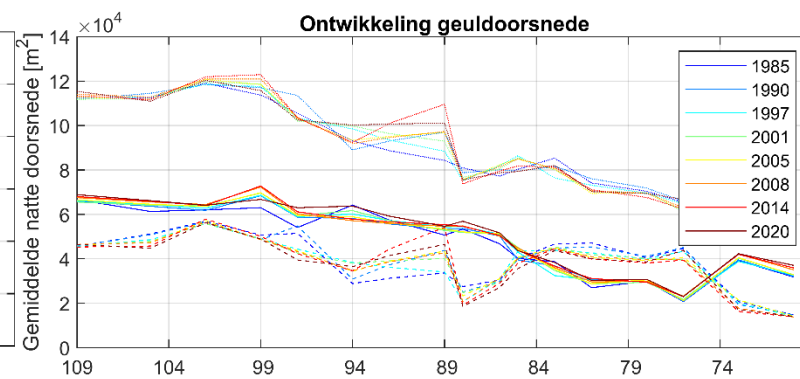
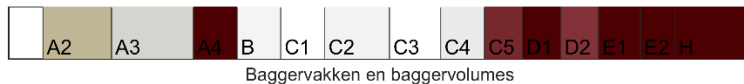
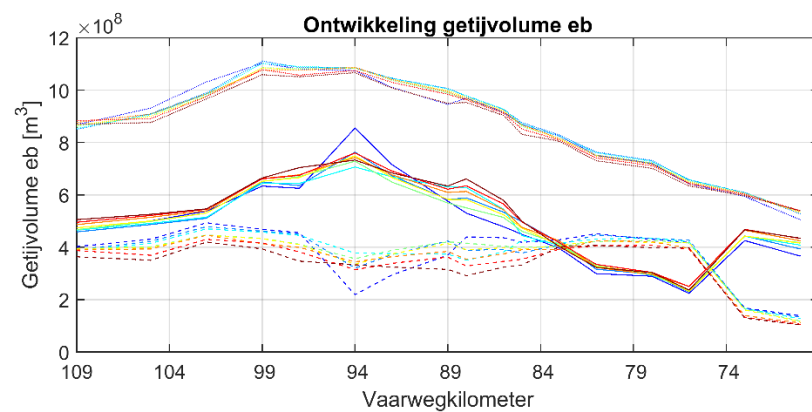
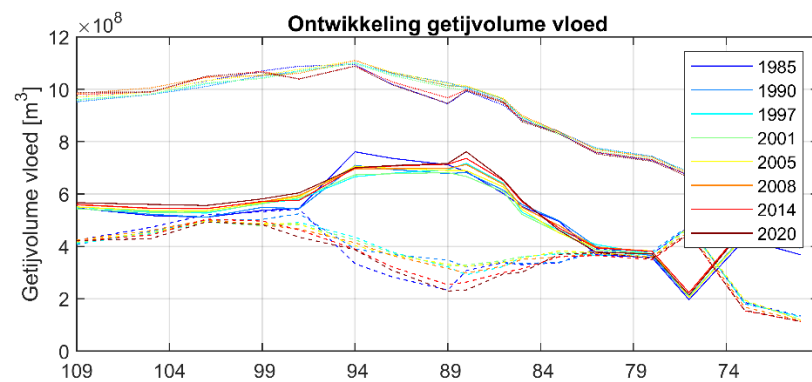
Appendix B: Verandering van de gemodelleerde stromingspatronen gedurende een getijcyclus.

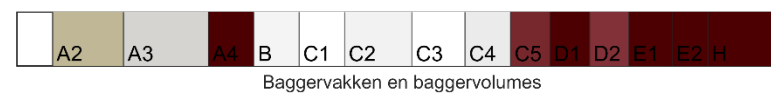
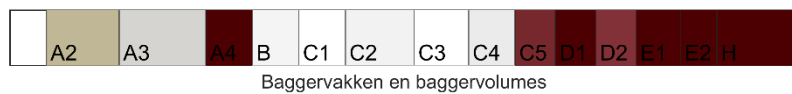
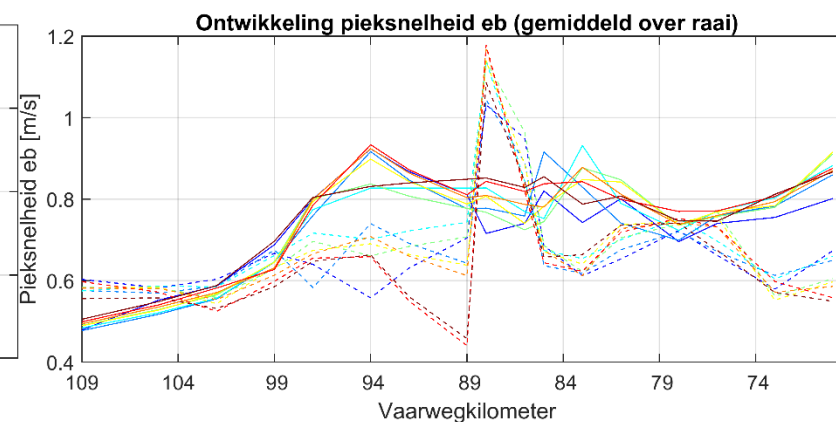
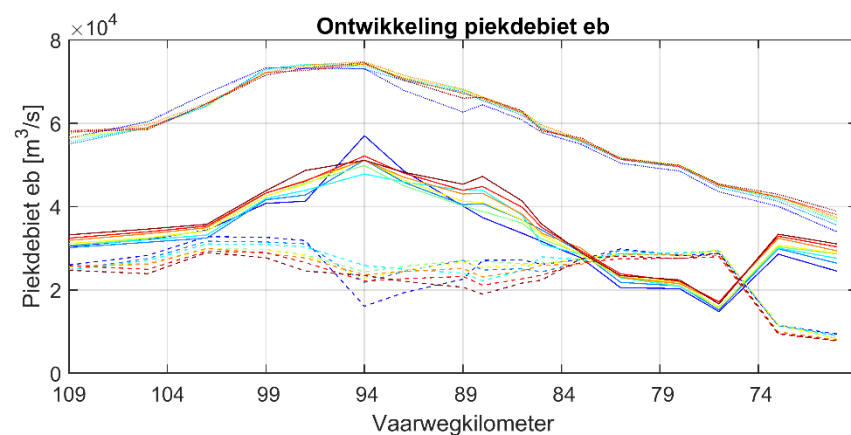
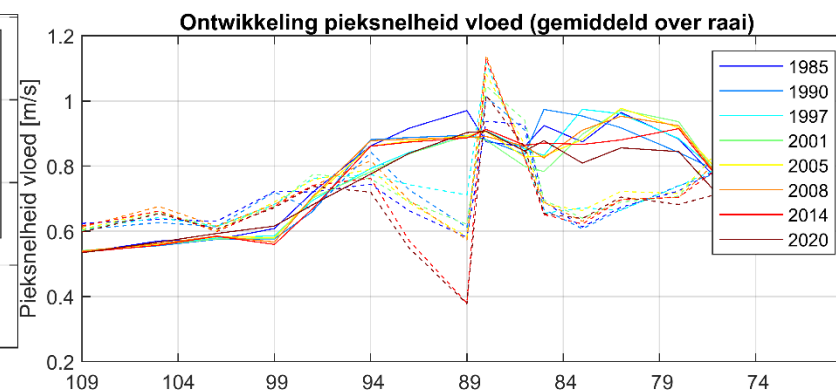
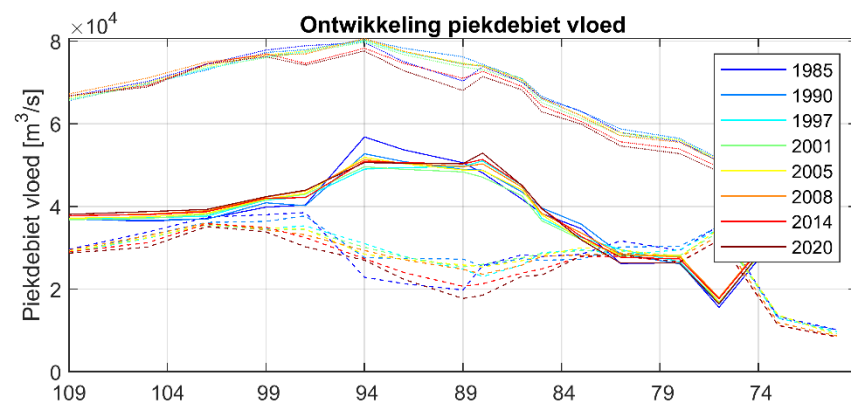
Appendix C: Verandering van residuele zandtransportpaden berekend met SedTRAILS.

Appendix D: Verandering van de residuele zandtransportvectorvelden.

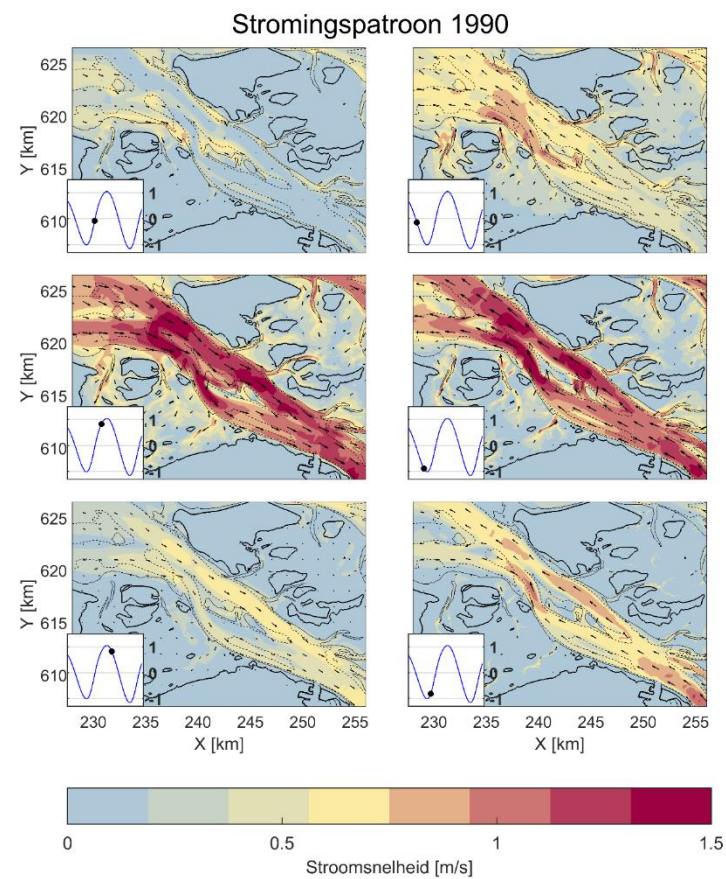
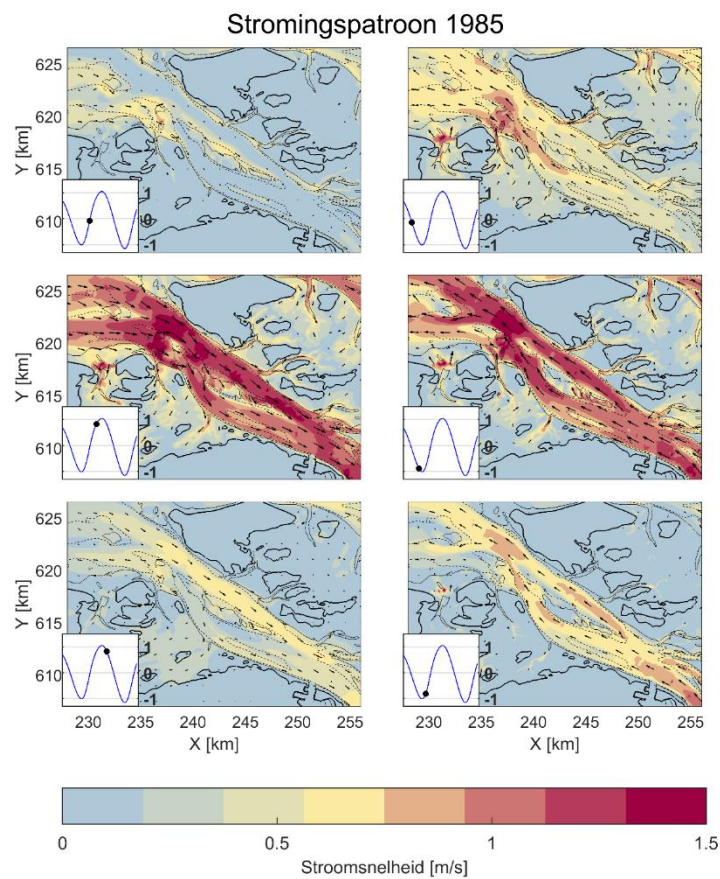
Knelpuntanalyse verbinding Eemshaven Noordzee

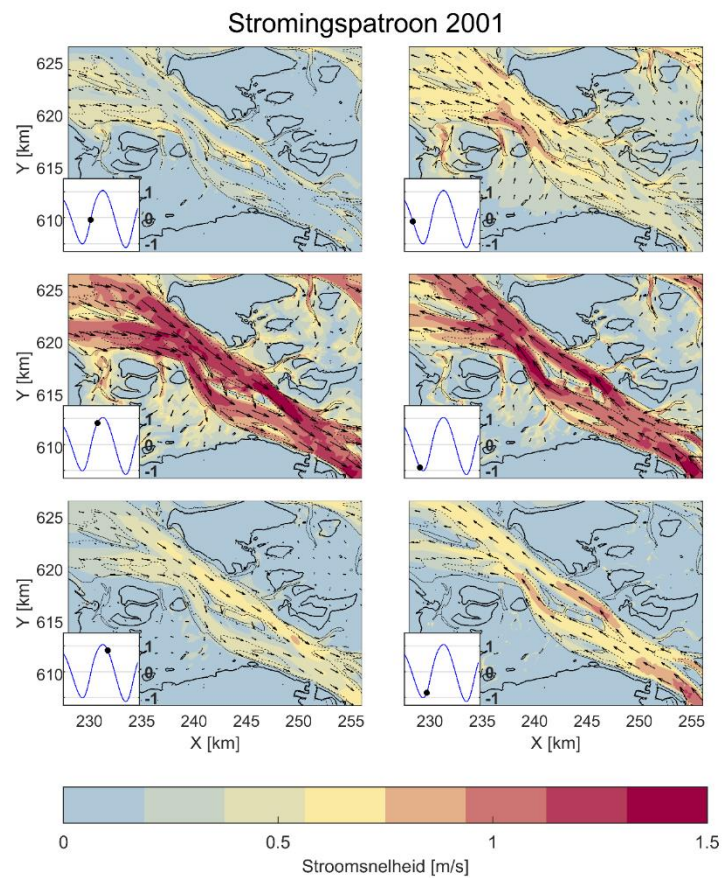
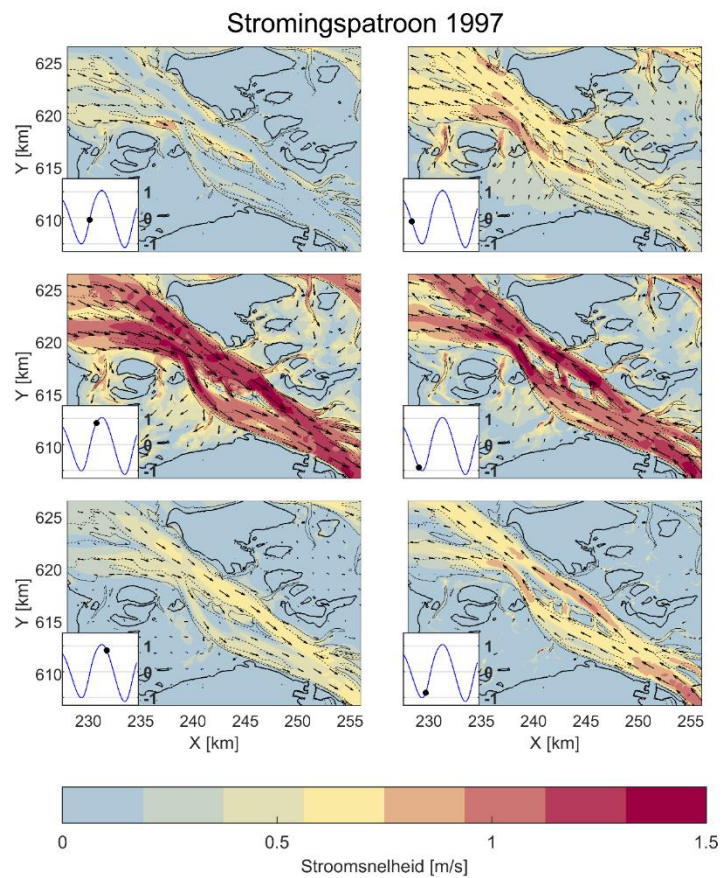
A Debietverdeling

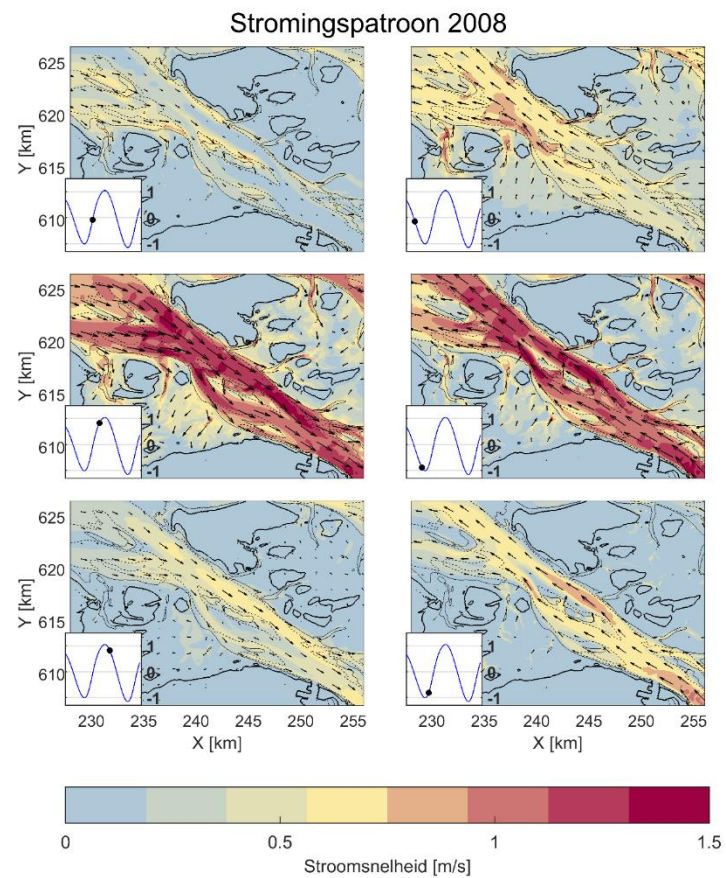
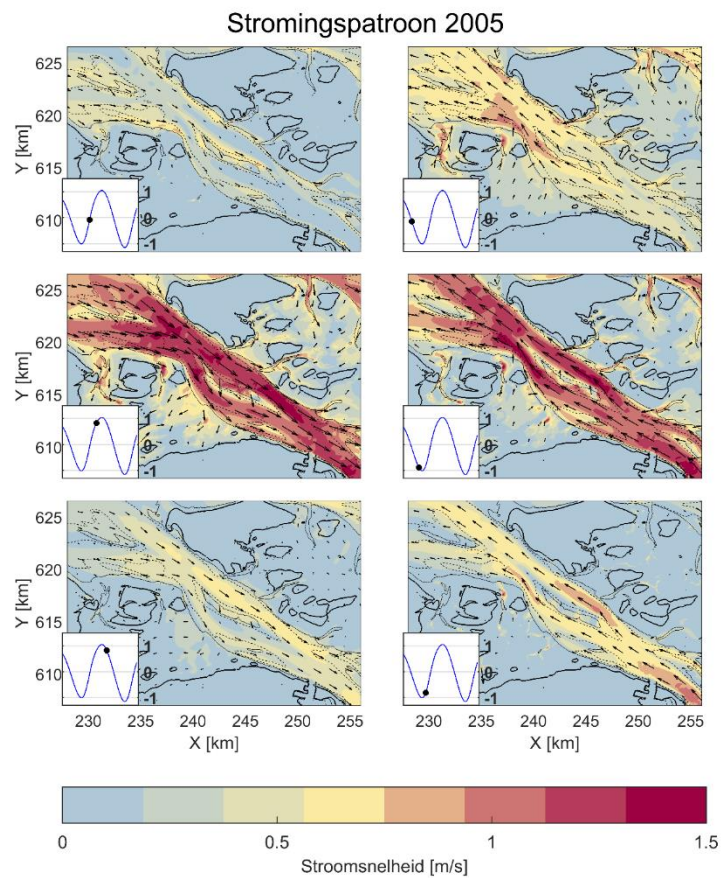




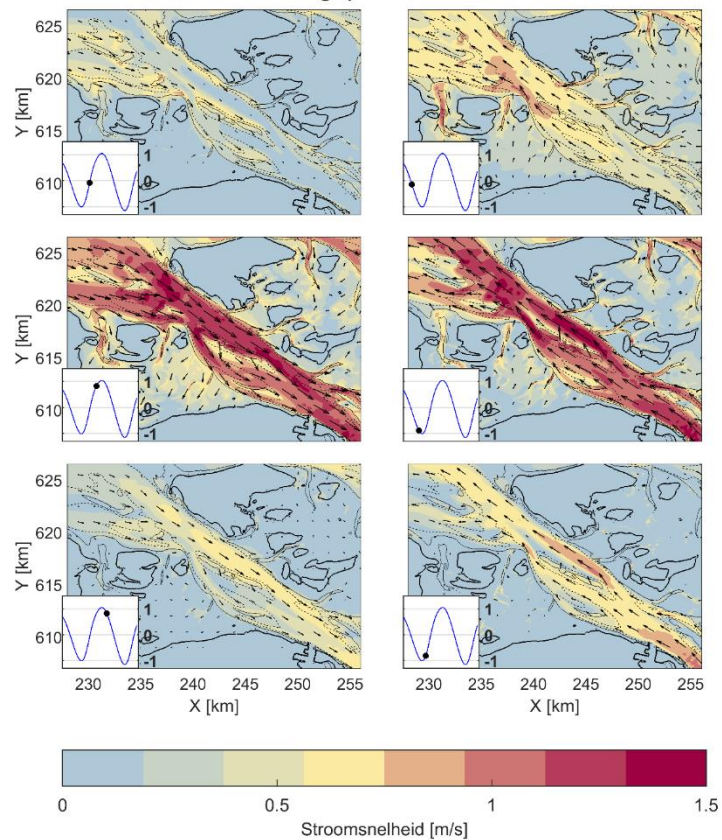
B Stromingspatronen



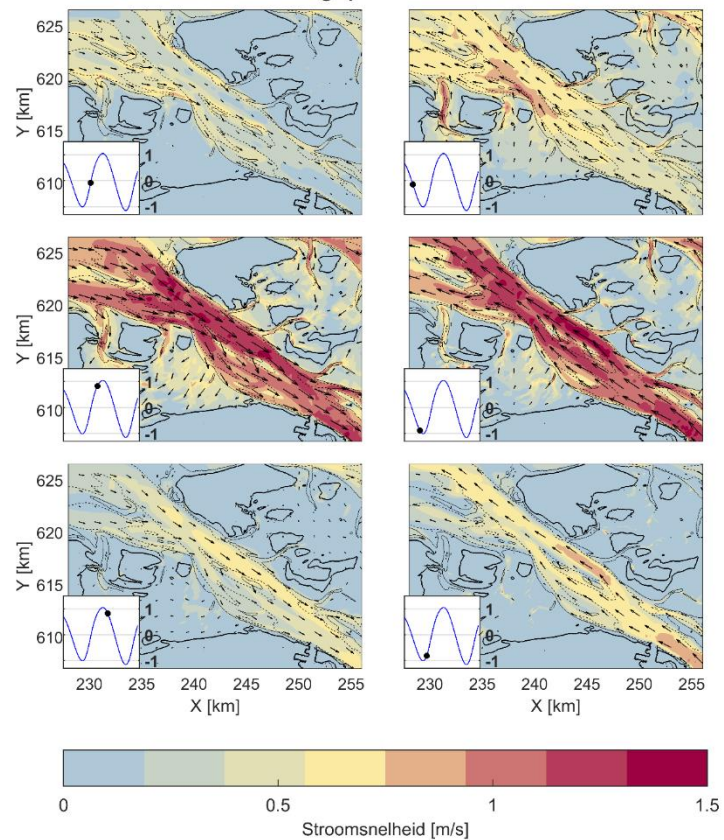




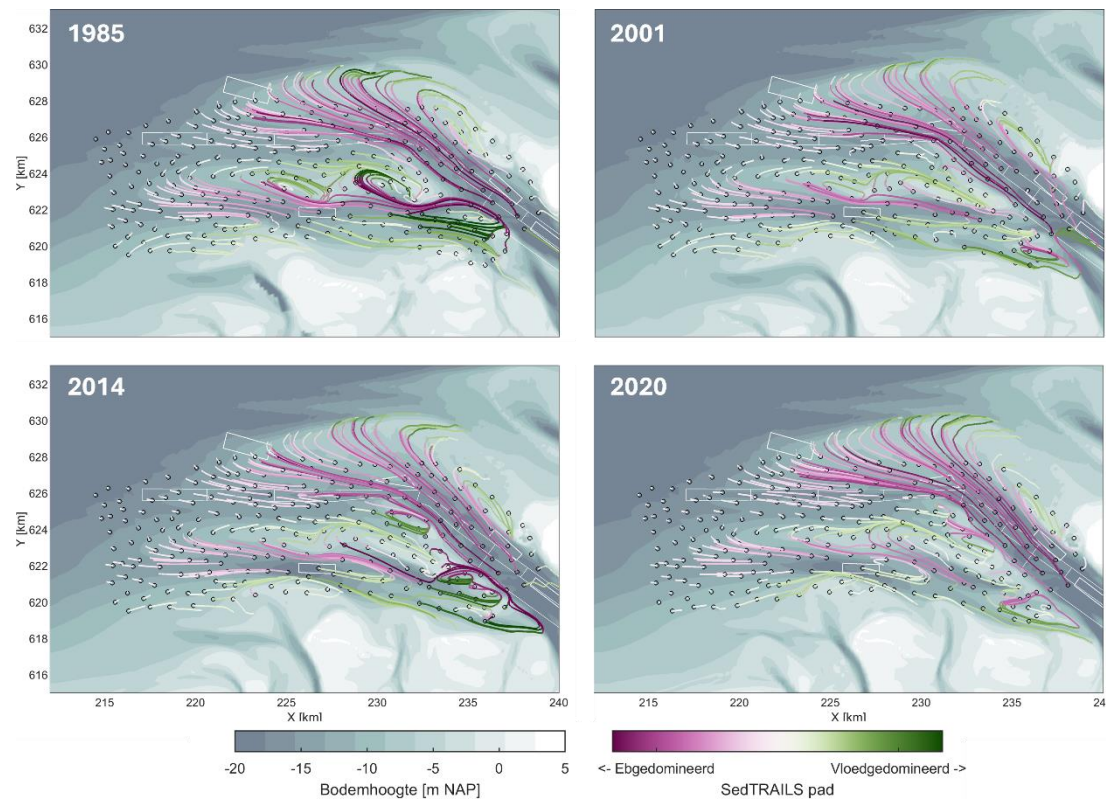
Stromingspatroon 2014

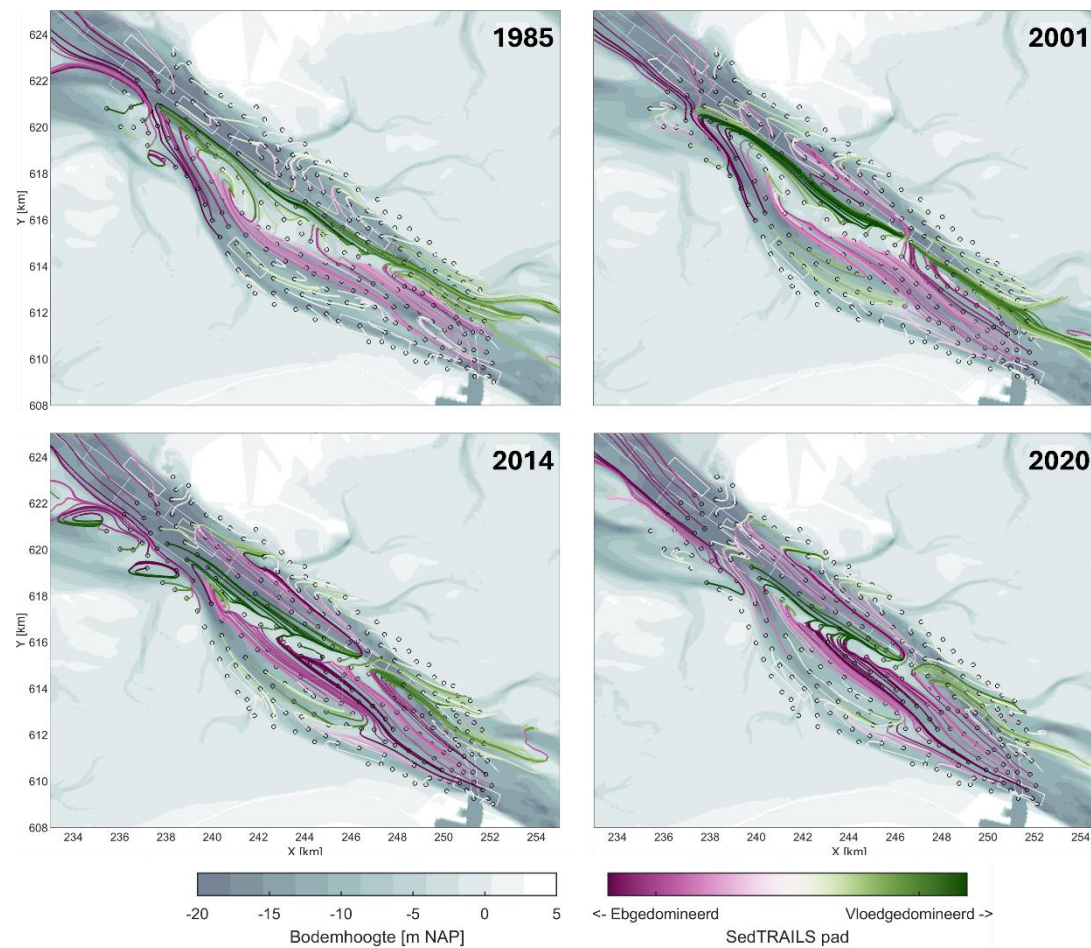


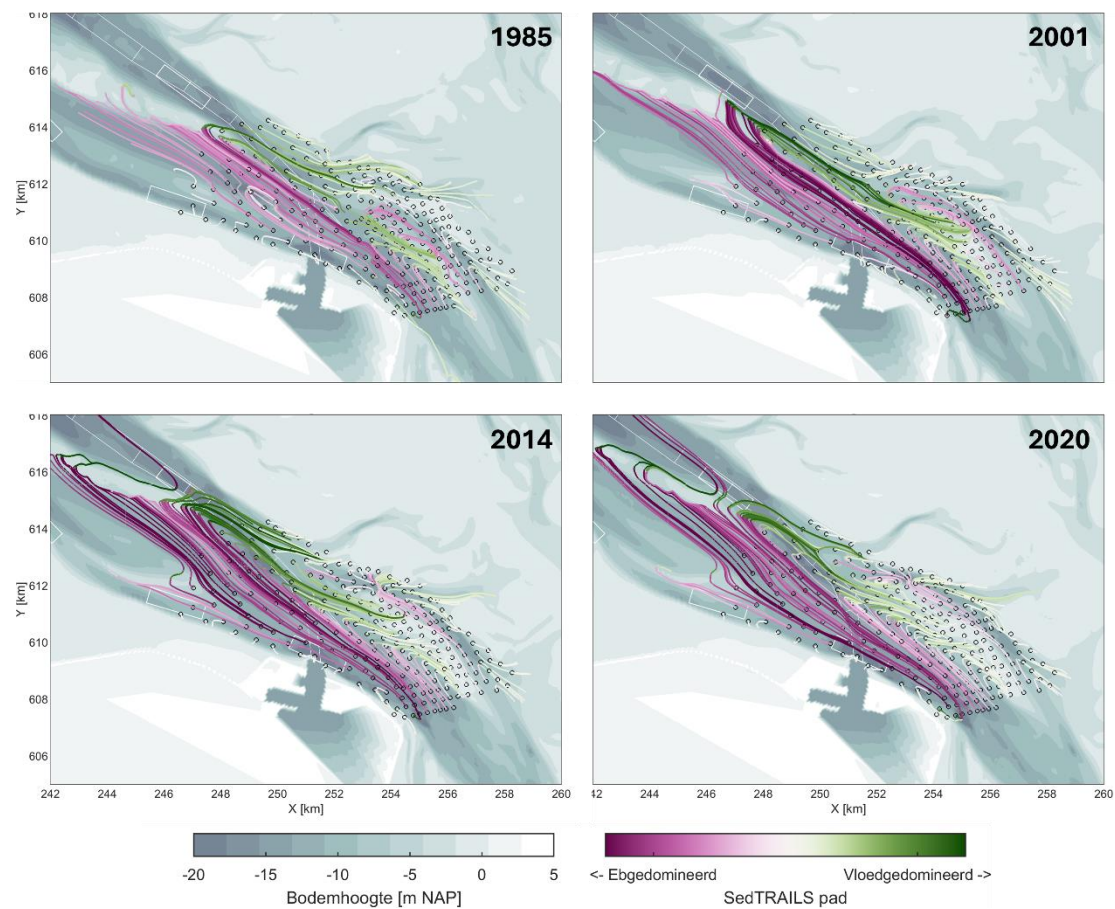
Stromingspatroon 2020

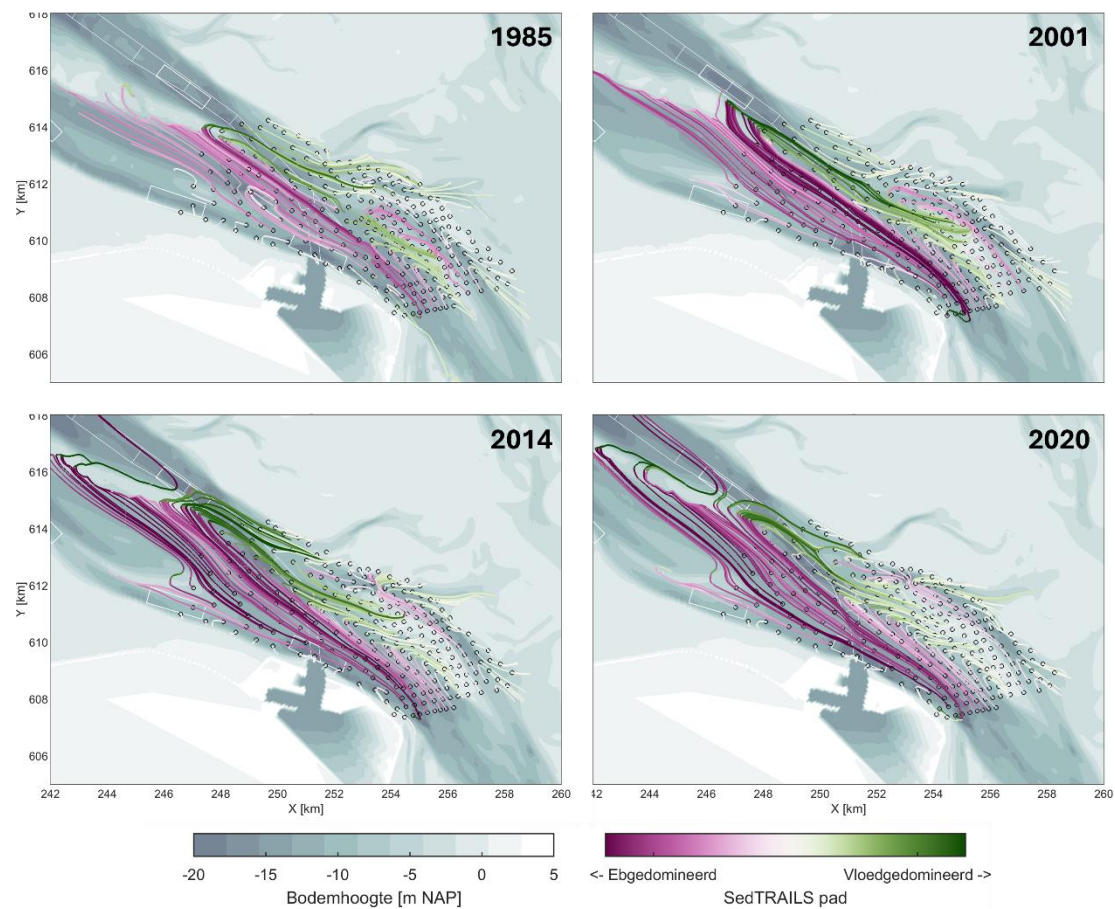


C Zandtransportpaden SedTRAILS









Knelpuntanalyse verbinding Eemshaven Noordzee

D Residuele zandtransportpatronen

