

Knelpuntanalyse Harlingen - Noordzee

Conceptueel model en handelingsperspectief voor knelpunten in de vaargeul
Harlingen - Noordzee



Knelpuntanalyse Harlingen - Noordzee

Conceptueel model en handelingsperspectief voor knelpunten in de vaargeul Harlingen - Noordzee

Auteur(s)

Ellen Quataert

Carlijn Meijers

Anne de Beer

Edwin Elias

Knelpuntanalyse Harlingen - Noordzee

Conceptueel model en handelingsperspectief voor knelpunten in de vaargeul Harlingen - Noordzee

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Freek Brils, Jurre de Vries en Ernst Lofvers
Referenties	WVH07 2024
Trefwoorden	Waddenzee, Vaargeul, Baggeren, Morfologie, Harlingen

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	12-09-2024
Projectnummer	11210370-005
Document ID	11210370-005-ZKS-0002
Pagina's	111
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Ellen Quataert Carlijn Meijers Anne de Beer Edwin Elias	

Samenvatting

Binnen het SITO Programmasubsidie project 'Kennis voor Beheer en Onderhoud Waddenzee' worden zogenaamde 'knelpuntanalyses' uitgevoerd. Een knelpunt is een locatie op een vaarroute waar de morfologische ontwikkeling leidt tot (substantieel of toenemend) baggeronderhoud. Het doel van een knelpuntanalyse is om inzicht te krijgen in de morfologische ontwikkeling van een knelpunt. Dit vormt de basis voor het doen van aanbevelingen voor huidig en toekomstig duurzaam vaargeulbeheer.

De voorliggende knelpuntanalyse van de vaarweg Harlingen - Noordzee in het bekken van het Vlie bevat de volgende knelpunten: het drempelgebied Pannengat, het drempelgebied Blauwe Slenk, en de geul langs Pollendam (streefdiepte -7.5m NAP). Daarnaast wordt het Kimstergat beschreven: een belangrijke locatie voor het verspreiden van baggerspecie nabij Harlingen. Het totale baggerbezwaar in het Vlie is tot 2010 toegenomen, mede door een verruiming van de vaarweg in 2007, en sinds 2010 wordt er gemiddeld 800.000 m³/jaar gebaggerd in het bekken.

Op de grootste tijd- en ruimteschaal heeft de aanleg van de Afsluitdijk in 1932 een vormende invloed gehad op de westelijke Waddenzee, en de effecten hiervan zijn nog altijd merkbaar in het bekken van het Vlie. Er heeft een heroriëntatie van de getijstrooming plaatsgevonden, waardoor de wantijen in noordoostelijke richting zijn verschoven en er grote sedimentatie optrad in oude geulen die oorspronkelijk naar de Zuiderzee liepen (Inschot) en op de plaatoppervlakten langs de Friese vastelandskust (Vlakte van Oosterbierum en Molenrak). Deze sedimentatie is nagenoeg gelijk verdeeld over de diepere delen van het bekken (< NAP -3 m) en de ondiepe platen, en bestaat voor een toenemend deel uit slibsedimentatie. Deze grootschalige ontwikkelingen hebben invloed op de knelpunten langs de vaarweg Harlingen – Noordzee.

Het **drempelgebied Pannengat** ontstaat door de aftakking van de hoofdgeul Vliestroom richting de Blauwe Slenk. De sedimentatie van de geul Inschot na de afsluiting van de Zuiderzee heeft ertoe geleid dat het relatieve belang van de Blauwe Slenk hier toeneemt. Op langere termijn is deze ontwikkeling waarschijnlijk positief voor de bevaarbaarheid van de geul, maar op korte termijn is periodiek baggeronderhoud noodzakelijk omdat dit een dynamisch en veranderlijk gebied is. Regelmatige monitoring van de bodem kan hier helpen het baggeronderhoud te optimaliseren door de meest gunstige vaarroute te identificeren.

Het zuidelijke **drempelgebied van de Blauwe Slenk** heeft het hoogste baggerbezwaar, veroorzaakt door de aanwezigheid van een relatief lange en ondiepe drempel. Wanneer de huidige morfologische ontwikkelingen doorzetten, zoals verdere uitbochtiging van de ebschaar, kan een kortsluiting door de bestaande vloedschaar mogelijk een alternatief zijn om tijdelijk het baggeronderhoud te verminderen. Dit zal echter aanzienlijke baggerinspanningen vergen, en op de langere termijn zal er weer een nieuwe eb- en vloedschaar ontstaan. In het noordelijk deel van de Blauwe Slenk vormt zich een tweede drempelgebied, welke op korte termijn kan resulteren in een nieuw baggervak. Het is mogelijk dat het sediment dat wordt geplaatst op de verspreidingslocatie, op de uitloper van de ebschaar, bijdraagt aan de ontwikkeling van deze drempel.

Baggeronderhoud in de **Geul langs de Pollendam** vindt plaats tussen het landwaartse einde van de Pollendam en de haven van Harlingen. Momenteel is er geen duidelijke toe- of afnemende trend in de baggervolumes. Echter, de sedimentatie en ophoging van de plaatgebieden langs de Friese kust zorgen voor een afname van het kombereingsvolume.

Hierdoor zullen op termijn de debieten door deze geul afnemen en is de verwachting dat het baggerbezwaar in de toekomst zal toenemen.

De grootschalige sedimentatie langs de Friese kust heeft ook een sterk effect op de afname van de gemiddelde geuldiepte, natte doorsnede en de komberging van **het Kimstergat**. Door uitbouw van de Ballastplaat wordt het Kimstergat steeds verder richting de dijk gedrukt, waardoor geuldieptes lokaal toenemen en de geulwand steiler wordt. De laatste dertig jaar kent het Kimstergat een lineaire afname van het geulvolume (watervolume onder -3m NAP), en het is de verwachting dat deze trend zich zal voortzetten. Het volume aan baggerspecie dat in het Kimstergat verspreid wordt is ruim tien keer zo groot als de jaarlijkse afname van het geulvolume. Hoewel dit hoge verspreidingsvolume zal bijdragen aan de sedimentatie, is het niet de primaire oorzaak. De autonome sedimentatietrend in het Kimstergat en op de Vlake van Oosterbierum maakt deel uit van de grootschalige aanpassingen die plaatsvinden in de westelijke Waddenzee na de afsluiting van de Zuiderzee. Optimalisatie van de sedimentverspreiding in het Kimstergat zou op korte termijn misschien een effect hebben op de snelheid waarmee het Kimstergat opvult, maar het is de vraag of dit opweegt tegen een grotere vaarafstand naar een verder gelegen verspreidingslocatie. Wanneer de huidige trend van opvulling wordt doorgetrokken zal het Kimstergat over enkele decennia niet meer geschikt zijn als verspreidingslocatie. De aanhoudende sedimentatietrend van het Kimstergat en op de Vlake van Oosterbierum zal leiden tot een afname of zelfs verdwijning van het kombergingsgebied van het Kimstergat. Hierdoor wordt verwacht dat het baggerbezwaar aan het einde van de geul, langs de Pollendam en in de Boontjes, in de toekomst zal toenemen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Context en aanleiding	9
1.2	Doel van de studie	10
1.3	Aanpak	10
1.4	Leeswijzer	12
2	Overzicht van het Vlie bekken	13
2.1	De ligging van de geulen en platen	13
2.2	De aanleg van de Pollendam en de vaargeul	14
2.3	Baggeronderhoud	15
3	Grootschalige ontwikkelingen van het bekken	20
3.1	Grootschalige morfologische ontwikkeling na afsluiting Zuiderzee	20
3.2	Grootschalige hydrodynamische ontwikkeling na afsluiting Zuiderzee	23
4	Recente volumeveranderingen in het bekken	27
4.1	Inleiding	27
4.2	Concept & Methode	27
4.3	Volumeverandering bekken	30
4.3.1	Totale kombergingsgebied	30
4.3.2	Hoofdgeulen	30
4.3.3	Ondiepe platen	32
4.3.4	Droogvallende platen	33
4.3.5	Droogvallende platen per zone	34
4.3.6	Droogliggende platen	36
4.4	Volumeontwikkeling buitendelta	38
4.5	Samenvatting	39
5	Morfologische ontwikkeling van de knelpunten	40
5.1	Drempelgebied Pannengat	42
5.2	Drempelgebieden Blauwe Slenk	48
5.3	Geul langs Pollendam	55
5.4	Kimstergat (verspreidingslocatie)	59
6	Conceptueel model knelpunt Harlingen – Noordzee	66
6.1	Schaal westelijke Waddenzee	66
6.2	Schaal bekken	67

6.3	Schaal knelpunten	69
7	Conclusies en aanbevelingen	72
7.1	Conclusies van deze studie	72
7.2	Aanbevelingen	74
7.2.1	Aanbevelingen vervolgonderzoek Harlingen – Noordzee	74
7.2.2	Aanbevelingen generieke aanpak knelpuntanalyse	74
	Referenties	76
A	Bepalen morfologisch wantij	79
A.1	Methodiek	79
A.2	Resultaten wantij Vlie – Marsdiep / Eierlandse Gat	80
B	Methode volumeanalyse	81
B.1	Concept volumebalans	81
B.2	Bodemdata	81
B.3	Opstellen volumebalans	82
C	Resultaten volumeanalyse	85
C.1	Hypsometrische curve	85
C.2	Tijdseries platen > NAP -3 m (absoluut)	87
C.3	Tijdseries geulen < NAP -3 m (absoluut)	87
C.4	Tijdseries specifieke platen < NAP -3 m (absoluut)	88
C.5	Tijdseries specifieke geulen < NAP -3 m (absoluut)	91
C.6	Tijdseries platen > NAP -1 m (absoluut)	92
C.7	Tijdseries specifieke platen > NAP -1 m (relatief)	93
C.8	Tijdseries specifieke platen > NAP -1 m (absoluut)	94
C.9	Veranderingen in volume, oppervlakte en hoogte in detail	97
C.10	Droogliggende platen	98
D	Extra figuren morfologische ontwikkeling knelpunten	100
D.1	Totaal	100
D.2	Pannengat	101
D.3	Blauwe Slenk	101
D.4	Geul langs Pollendam	102
D.5	Kimstergat	104
E	Hydrodynamische ontwikkeling: stroming	106
E.1	Vlie totaal	106
E.2	Blauwe Slenk	107

F	Hydrodynamische ontwikkeling: debieten	108
F.1	Vliestroom	108
F.2	Pannengat – Westmeep	108
F.3	Blauwe Slenk – Oude Inschot	109
F.4	Geul langs de Pollendam	110
F.5	Boontjes	110

1 Inleiding

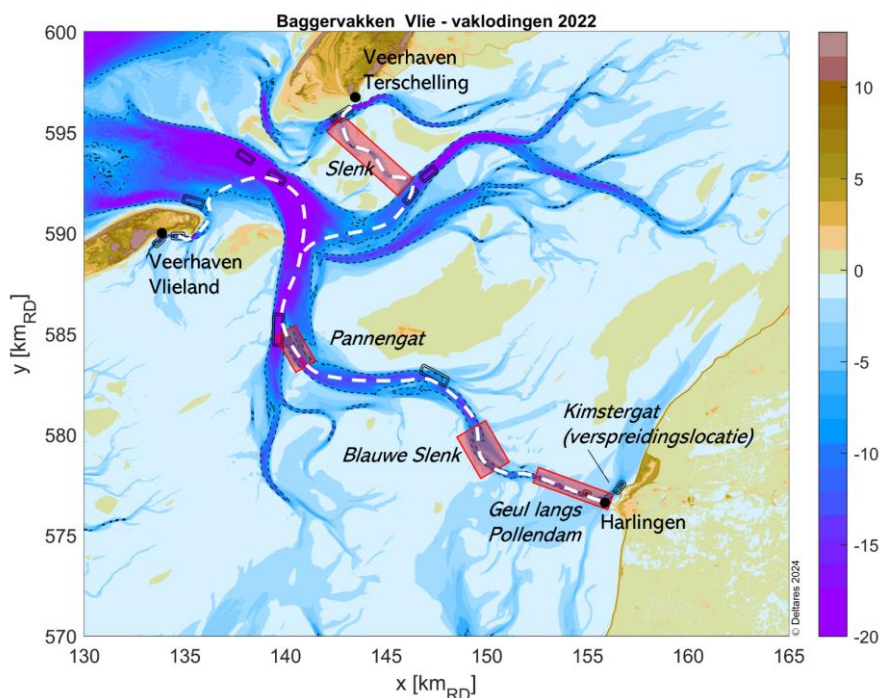
1.1 Context en aanleiding

Binnen het SITO Programmasubsidie project 'Kennis voor Beheer en Onderhoud Waddenzee' worden op basis van de ontwikkelde kennis over het systeem strategieën ontwikkeld waarmee de hoeveelheid baggerwerk en de invloed daarvan op het ecosysteem kunnen worden gereduceerd. Op deze wijze wordt invulling gegeven aan de ambitie van Agenda voor de Wadden 2050 en worden knelpunten in het vaargeulbeheer onderzocht, die veel en vaak toenemend onderhoud vergen. Door deze knelpunten proactief te monitoren en goed zicht te hebben op zowel de grootschalige ontwikkelingen als de lokale dynamiek, wordt maatwerkkennis geleverd om tijdig te kunnen ingrijpen.

In 2022 zijn alle verschillende knelpunten geïnventariseerd (Van der Vegt en Cleveringa, 2022). De inventarisatie toonde aan dat elk knelpunt uniek is en dat een gestructureerde, systematische aanpak noodzakelijk is om meer inzicht te krijgen in de lokale ontwikkeling en om effectief te kunnen ingrijpen. Daarnaast vinden er ook ingrepen plaats om het baggerbezwaar te reduceren; het is belangrijk om het effect en de effectiviteit van deze ingrepen te evalueren. Continu leren is een essentieel onderdeel van de PDCA cyclus (Plan, Do, Check, Act).

In het bekken van het Vlie bevindt zich de haven van Harlingen, die in verbinding staat met de Noordzee. Daarnaast staat Harlingen via de veerdienst in verbinding met de eilanden Vlieland en Terschelling. De vaarweg Harlingen – Noordzee kent verschillende knelpunten oftewel locaties waar de morfologische ontwikkeling leidt tot baggeronderhoud. Langs de vaarroute Harlingen – Noordzee vindt baggeronderhoud plaats in de geul langs Pollendam, de Blauwe Slenk, en het Pannengat (streefdiepte -7.5m NAP). Daarnaast wordt de Slenk op diepte gehouden voor de veerboot naar Terschelling (streefdiepte -5m NAP). Er zijn meerdere verspreidingsvakken in het Vlie (zwarte boxen in Figuur 1-1), het meeste baggerspecie wordt verspreid in de locaties Kimstergat, Blauwe Slenk en Schuitengat. Het Kimstergat is een belangrijke verspreidingslocatie nabij Harlingen. In het Kimstergat wordt naast baggerspecie uit het Vlie, ook veel gebaggerd materiaal uit de Boontjes (dus van buiten het bekken Vlie) en uit de haven van Harlingen verspreid.

Het totale baggerbezwaar in het Vlie is tot 2010 toegenomen, mede door de verruiming van de vaarweg in 2007 ten behoeve van de toegankelijkheid van de haven van Harlingen. Sinds 2010 wordt er gemiddeld 800.000 m³/jaar gebaggerd in het bekken. Er is inzicht nodig in de trends van geulontwikkeling en baggerbezwaar over de afgelopen decennia. Ook is het belangrijk om mogelijkheden voor optimalisatie te onderzoeken, zowel voor de korte als de lange termijn, om tot duurzamer vaargeulbeheer te komen.



Figuur 1-1 Overzichtskaart van het Vlie met de actuele baggerlocaties en de belangrijkste havens. De officiële verspreidingsvakken zijn aangegeven met zwarte lijnen. De geulen waar actueel baggeronderhoud plaatsvindt zijn aangegeven in rood, de veerroute met een witte stippellijn.

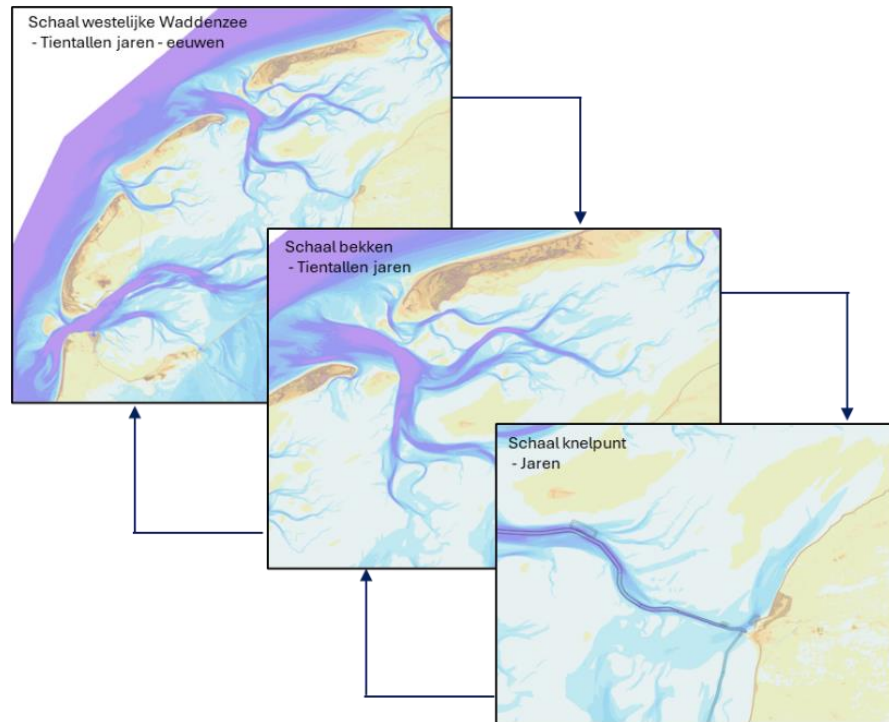
1.2 Doel van de studie

Het doel van de voorliggende knelpuntanalyse van de vaarweg Harlingen – Noordzee is:

- 1 **Ontwikkelen van systeembegrip:** Het verkrijgen inzicht in de morfologische ontwikkeling en het opstellen van een conceptueel model om betere voorspellingen te kunnen doen voor het vaargeulbeheer en andere functies.
- 2 **Inzicht in toekomstige ontwikkelingen:** Het verkrijgen van inzicht in de verwachte toekomstige ontwikkelingen en het bijbehorende handelingsperspectief voor de knelpunten langs de vaarweg Harlingen – Noordzee - eilanden, evenals de daarbij behorende monitoringsbehoefte.
- 3 **Ontwikkelen van een generieke methode:** Het ontwikkelen van een generieke methode en/of verfijnen voor het uitvoeren van knelpuntanalyses, die ook op andere locaties in de Waddenzee kan worden toegepast. De methode bouwt voort op de reeds uitgevoerde knelpuntanalyses voor Glinder en Grote Siege langs de vaarroute Lauwersoog-Schiermonnikoog (Meijers et al., 2024), en de hoogwaterroute Holwerd-Ameland (van Weerdenburg et al., 2023)

1.3 Aanpak

De morfologische ontwikkeling van het Vlie en de knelpunten wordt uitgewerkt op verschillende tijd- en ruimteschalen (Figuur 1-2). Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen ontwikkelingen op grote schaal (de Waddenzee) en veranderingen op de schaal van individuele geulen. Inzicht in de ontwikkelingen van de kombergingsvolumes op de schaal van het hele bekken en per geul verschaft informatie over trendmatige toe- en afnames in de omvang van de geulen. Uiteindelijk wordt de kennis van de werking van het morfodynamisch systeem samengevat in een conceptueel denkmodel, uitgewerkt per tijd- en ruimteschaal (Figuur 1-2).



Figuur 1-2 Overzicht van de drie schaalniveaus waaruit het conceptuele model wordt opgebouwd. De pijlen geven de interactie tussen de schaalniveaus aan.

De focus in het voorliggende rapport ligt op het aanvullen en verdiepen van de kennis op het schaalniveau van het bekken en de individuele knelpunten. Voor de ontwikkelingen op de grootste **schaal van de Westelijke Waddenzee** wordt gebruik gemaakt van bestaande kennis en literatuur. De Kombergingsrapportage van het Vlie (Oost et al, 2019 en Meijers et al, in voorbereiding, 2024) vormt een belangrijke basis.

Op de **schaal van het bekken** zijn de volgende analyses uitgevoerd:

- Grootschalige volume analyse van het bekken over de periode 1992 – 2022. Dit geeft inzicht in de volumeontwikkeling van het totale gebied van bekken en buitendelta, maar geeft ook de mogelijkheid morfologische elementen, zoals specifieke platen of banken, te volgen. Dit is een update van de volumebalans Waddenzee in Elias (2019) met de nieuwste bodemkaart (Vaklodning Vlie 2022), maar heeft ook als doel het verder ontwikkelen van de volumebalansmethodiek voor de Waddenzee.
- De hydrodynamica in het Vlie is geanalyseerd door Grasmeyer et al. (2022) door middel van een modelstudie. Hierbij zijn stromingen en debieten in de westelijke Waddenzee bepaald voor vier verschillende historische bodems uit de jaren 1976, 1991, 2003 en 2015. In deze studie is het door Grasmeyer et al. (2022) gebruikte model als basis genomen en aangevuld met de meest actuele bodem uit 2022 (Vaklodningen).

Op het **schaal van de knelpunten** is een detailanalyse van de morfologische ontwikkelingen van de individuele knelpunten uitgevoerd:

- Focus ligt op de vaarroute naar de haven van Harlingen, waarin zich de knelpunten Pannengat, Blauwe Slenk, Geul langs Pollendam en Kimstergat bevinden. De Slenk wordt niet in deze studie geanalyseerd, maar wel in de studie naar de morfologie van de eilandkoppen van het Zeegat van het Vlie (De Beer et al, 2024) uitgevoerd binnen het deelprogramma 'Systeemkennis Zeegaten' van het SITO-PS programma B&O Kust.
- Naast de bodemkaarten op basis van de Vaklodningen (6-jaarlijks), zijn ook de beheerlodningen gebruikt. De beheerlodningen zijn opnames van de bodemligging van de

geulen, die sinds 2011 of 2019 (afhankelijk van de locatie) jaarlijks op hoge resolutie worden ingemeten.

- Op basis van de analyses zal er meer inzicht worden verkregen in de werking van de knelpunten en de verwachte toekomstige ontwikkelingen, inclusief het bijbehorende handelingsperspectief.

1.4 Leeswijzer

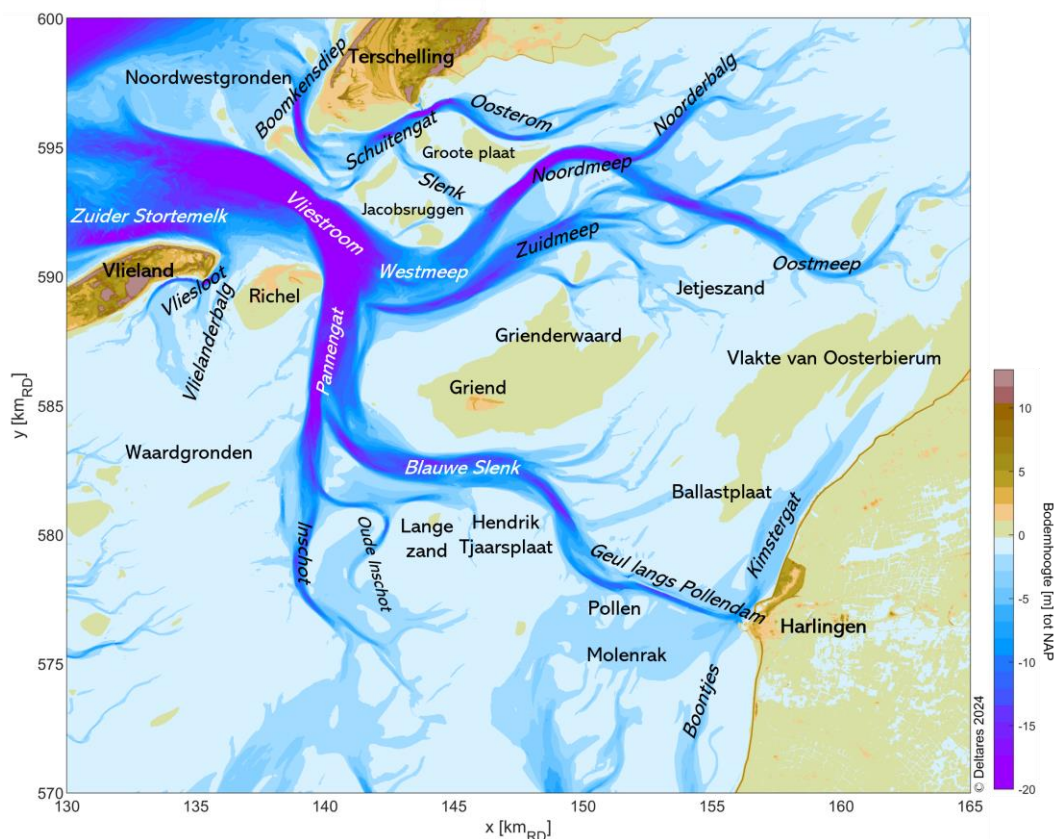
Eerst wordt in Hoofdstuk 2 een overzicht gegeven van het bekken van het Vlie, samen met de relevante ingrepen die van invloed zijn geweest op het kombergingsgebied. Hoofdstuk 3 gaat in op de morfologische en hydrodynamische ontwikkeling van het bekken, waarna in Hoofdstuk 4 de uitwerking van de grootschalige volumeanalyse wordt gepresenteerd. De detailanalyses van de individuele knelpunten komen aan bod in Hoofdstuk 5. In Hoofdstuk 6 wordt alle bestaande en nieuwe kennis van het morfologisch systeem samengevat in een conceptueel model, uitgewerkt per tijd- en ruimteschaal (Figuur 1-2). Tot slot worden in Hoofdstuk 7 de belangrijkste conclusies van de studie samengevat, samen met aanbevelingen voor vervolgonderzoek en handelingsperspectief voor de knelpunten.

2 Overzicht van het Vlie bekken

In dit hoofdstuk wordt een algemeen overzicht gegeven van de ligging en naamgeving van geulen en platen in het Vlie bekken (H2.1) en van de ingrepen (aanleg van de Pollendam in H2.2, en vaargeulbeheer in H2.3). De ingrepen toegelicht in dit hoofdstuk zijn van belang voor de analyses in dit rapport. Dit zijn niet de enige activiteiten in het bekken Vlie, onder meer ook gas- en zoutwinning, aanleg van havenbekkens, dijken en kwelderwerken spelen een rol in de ontwikkeling van het Vlie. Een overzicht van de overige activiteiten en ingrepen zijn te vinden in de kombergingsrapportage Vlie (Meijers et al. 2024).

2.1 De ligging van de geulen en platen

Het zeegat van het Vlie omvat drie geulsystemen. De centraal gelegen Vliestroom is de hoofdgeul. De andere geulsystemen zijn de Zuiderstortemelk-Vliestroom, die zich langs Vlieland uitstrekt, en het Boomkensdiep-Schuitengat, dat langs Terschelling loopt. In het bekken splitst de Vliestroom zich in twee grote geulenstelsels: de Mepen in het oosten en de Blauwe Slenk in het westen. Het diepe deel van de Vliestroom zet zich nog steeds zuidelijk door richting Inschot. Aan de westzijde van Griend is een tweede vertakking zichtbaar, waarbij de Blauwe Slenk via het vloodschaar Pannengat verbinding maakt met de Vliestroom. De Blauwe Slenk vormt via de Geul langs de Pollendam de nautische verbinding tussen de haven van Harlingen en de Noordzee, evenals de eilanden Vlieland en Terschelling. De belangrijkste wadplaatgebieden zijn de Grienderwaard, de Ballastplaat en de Vlakte van Oosterbierum, de Waardgronden (die worden gedeeld met het Eierlandse gat) en de verschillende platen ten zuiden van Terschelling.



Figuur 2-1 Komberging van het Vlie, met ligging van de geulen en platen op basis van de Vaklodingen bodemligging van 2022.

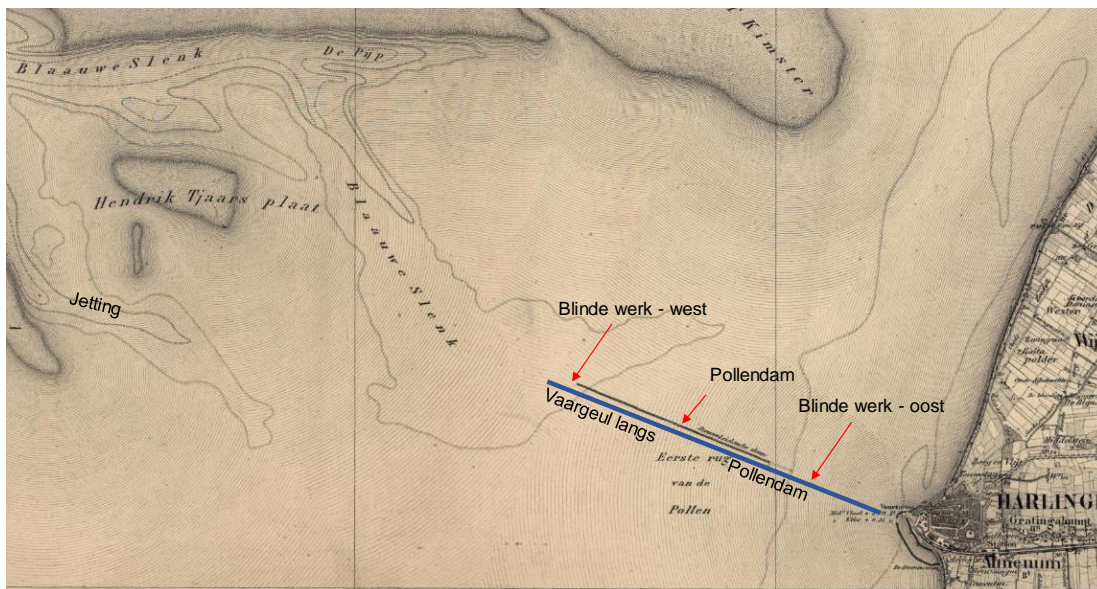
2.2 De aanleg van de Pollendam en de vaargeul

Onderstaande tekst komt uit de Kombergingsrapportage van het Vlie (Oost et al, 2019 en Meijers et al, in voorbereiding, 2024).

Tot ca. 1840 was de Jetting de vaarweg tussen het Vlie en Harlingen. Daarna wordt de route via de Blauwe Slenk en de vlakte der Pollen gevolgd. De geringe diepte van het nieuwe vaarwater door de Pollen van slechts NAP -2,9 m leidde ertoe dat veel schepen alleen bij hoogwater konden passeren. In de periode 1864-1866 werd een geul gebaggerd in de verwachting dat door stroming de vaarweg blijvend zou worden verbeterd. Dit bleek niet het geval en in 1874-1875 werd ten zuiden van de gebaggerde geul de ca. 4,5 km lange Pollendam aangelegd op zinkstukken op de wadbodem (Noordstra, 1992), met haar bodem (grondslag) op NAP -3,4 tot -4,4 m (door klink nu op NAP -4, tot -5,5 m). Tegen de verwachtingen in vormde zich echter een geul aan de zuidzijde van de dam, die vanaf 1878 tot de dag vandaag de vaargeul vormt.

Deze geul werd stapsgewijs dieper en breder gemaakt door baggeren. Voor 1900 was de streefdiepte NAP -3,6 m tot -3,9 m, vanaf 1900 bedroeg de streefdiepte NAP -6,6 m tot -6,8 m, met vanaf 1930 een breedte van 50m, tot een streefdiepte van NAP -7,5 m en breedte van 100 m sinds 2005 (zie Rijkswaterstaat, 1974; Noordstra, 1992; Rijkswaterstaat, 1998; ; Mulder et al., 2005). Onduidelijk is in hoeverre het oostwaarts verschuiven van het Marsdiep systeem bij heeft gedragen aan het mogelijk maken van een steeds grotere en bredere vaargeul.

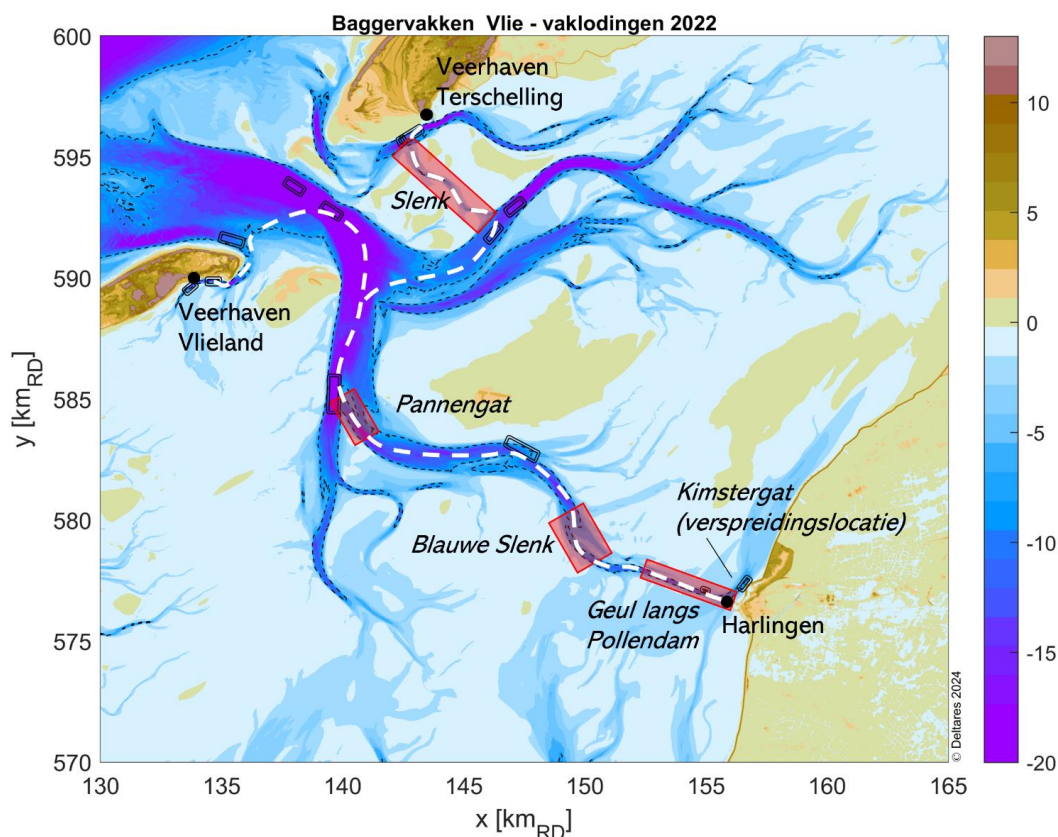
Ook aan de bestortingen zijn de nodige veranderingen aangebracht. Het westelijk Blinde werk werd na 1967 geleidelijk verhoogd van gemiddeld NAP -2,5 m naar NAP -2 m in 1972. Door geulverdieping en het steiler worden van het talud kwam de stabiliteit van de dam in gevaar, waarvoor in 1979 een teenverdediging aangebracht (Noordstra, 1992). Daarnaast werd het oostelijke Blinde werk opgehoogd. De doorgaande erosie werd in 1988 een halt toegeroepen door het aanbrengen van stroombestendig materiaal (Noordstra, 1992). In de 80-er jaren werd geconcludeerd dat het oostelijk blinde werk hindernissen oplevert in de vorm van een drempel in het vaarwater ten zuiden ervan. Ook bleek door de korte afstand tussen de havenmond van Harlingen en het oostelijk blinde werk de in- en uitvaart van de haven niet optimaal (Van der Molen, 1982). In september 1983 werd het oostelijk blinde werk van de Pollendam ingekort.



Figuur 2-2 Topografische kaart 1875 van de omgeving van Harlingen, met daarin de Pollendam.

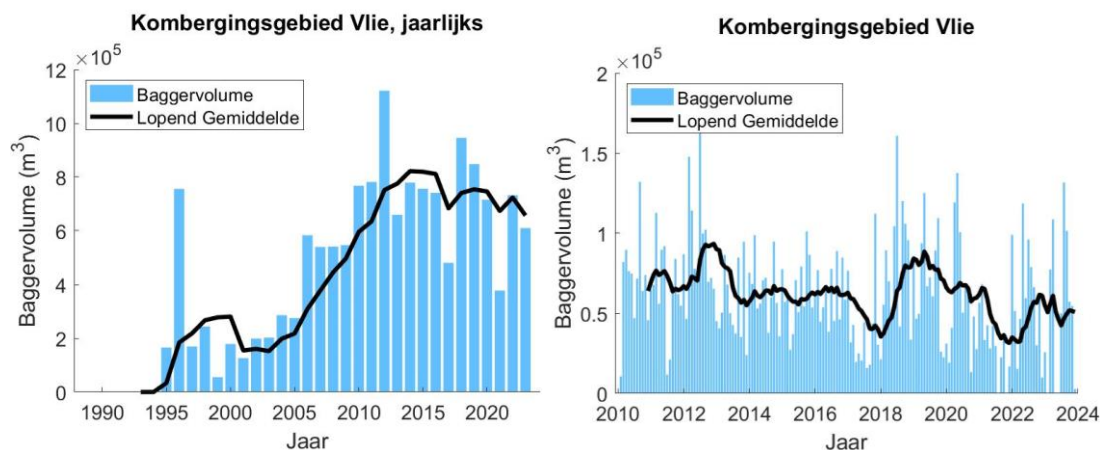
2.3 Baggeronderhoud

In het Vlie vindt er baggeronderhoud plaats in de Slenk, de geul langs Pollendam, de Blauwe Slenk, en het Pannengat (Figuur 2-3). De Slenk wordt op diepte gehouden voor de veerboot naar Terschelling (streefdiepte -5,0m NAP). De geul langs Pollendam, de Blauwe Slenk, en het Pannengat vormt de verbinding tussen haven van Harlingen, Noordzee en eilanden (streefdiepte -7,5m NAP). Er zijn meerdere verspreidingsvakken in het Vlie (zwarte boxen in Figuur 2-3), waarbij het meeste baggerspecie wordt verspreid in de locaties Kimstergat, Blauwe Slenk en Schuitengat 1-2.



Figuur 2-3 Overzichtskaat van het Vlie met de actuele baggerlocaties en de belangrijkste havens. De officiële verspreidingsvakken zijn aangegeven met zwarte lijnen. De geulen waar actueel baggeronderhoud plaatsvindt zijn aangegeven in rood, de veerroute met een witte stippellijn.

Het jaarlijkse baggervolume uitgevoerd door Rijkswaterstaat in het Vlie bekken is toegenomen naar gemiddeld 800.000 m³/jaar in 2010 (Figuur 2-4). Ruim de helft van het baggervolume komt uit de Blauwe Slenk (Tabel 2-1). De Slenk en de Vaargeul langs de Pollendam zijn de andere locaties waar significant wordt gebaggerd. In Figuur 2-5 is de ruimtelijke verdeling van de baggerinspanning en verspreidingsvakken weergegeven, op basis van het meest recente baggercontract vanaf 1 november 2021 tot eind 2023 van het Rijkswaterstaat areaal.



Figuur 2-4 Jaarlijks baggervolume 1989-2023 (linker figuur) en Maandelijks baggervolume 2010-2024 (rechter figuur) van Rijkswaterstaat in bekken Vlie, excl. havens, incl. ploegen (bron: jaarrapportage Rijkswaterstaat 2023).

Tabel 2-1 Jaarlijks baggervolumes 2019-2023 in bekken Vlie per baggerlocatie, incl. havens, in m³ (bron: jaarrapportage Rijkswaterstaat 2023). Tussen haakjes staat het baggervolume door methode ploegen.

Locatie	2019	2020	2021	2022	2023	Verwachting N2000-beheerplan
Rijkswaterstaat						
Veerdam Vlieland	-	-	(150)	(0)	(100)	1.000
Haven Terschelling (voormalige Rijkshaven)	-	2.075	1.500 (0)	2.853 (0)	550 (200)	20.000
Vaargeul langs Pollendam	80.088	123.995	6.160 (2.025)	66.165 (3.925)	109.523 (6.462)	65.000
Blauwe Slenk	456.529	417.376	257.316 (6.575)	468.611 (0)	356.706 (954)	400.000
Pannengat	-	-	(0)	1.582 (0)	3.377 (342)	25.000
Vliesloot	-	-	(50)	(0)	(100)	15.000
Slenk	311.492	172.310	112.610 (6.213)	194.253 (13.475)	139.668 (6.505)	320.000
<i>Totaal Rijkswaterstaat</i>	<i>848.109</i>	<i>715.756</i>	<i>377.586 (15.013)</i>	<i>733.464 (17.400)</i>	<i>609.824 (14.663)</i>	<i>846.000</i>
Lokale beheerders						
Aanloophaven Vlieland	7.797	5.023	7.255	7.255	3.465	9.000
Gemeentehaven Terschelling						60.000
Jachthaven Terschelling						15.000
Haven van Harlingen		1.161.274	1.031.414	1.014.302	734.595	1.400.000
Inschot - Zuidwal						20.000
<i>Totaal Lokale beheerders</i>	<i>7.797</i>	<i>1.166.297</i>	<i>1.038.669</i>	<i>1.021.557</i>	<i>738.060</i>	<i>1.504.000</i>
<i>Totaal Zeegat van het Vlie (exclusief ploegen)</i>	<i>855.906</i>	<i>1.882.053</i>	<i>1.416.255</i>	<i>1.755.021</i>	<i>1.347.884</i>	<i>2.350.000</i>

In 2007 is de vaarweg Harlingen-Noordzee verruimd om de toegankelijkheid van de haven van Harlingen te verbeteren (Mulder et al., 2005). Hierbij zijn de drempels bij Pannengat en Blauwe Slenk en de ondiepte bij de Pollendam verdiept tot NAP-7,5 m. Voor deze verdieping werd er nagenoeg niet gebaggerd op deze locaties (Figuur 2-6). Sinds de verdieping is baggeronderhoud noodzakelijk om de vaarweg op NAP -7,5 m te houden. Bij de drempel van Blauwe Slenk wordt jaarlijks 300.000 – 500.000 m³ gebaggerd, en bij de geul langs de Pollendam 40.000 – 120.000 m³. In het Pannengat werd er tussen 2007 en 2015 jaarlijks 40.000 – 90.000 m³ gebaggerd; sinds 2015 is baggeronderhoud niet meer noodzakelijk. In de

afgelopen 2 jaar heeft er echter weer een kleine hoeveelheid baggeronderhoud plaatsgevonden in het Pannengat.

De vaargeul door de Slenk is halverwege jaren 90 gebaggerd als alternatief voor de verbinding door het Schuitengat. Het baggeronderhoud van de route via het Schuitengat nam almaar toe door de dynamiek bij de drempel van het Schuitengat. Na de verdieping van Slenk in 1995 is het baggeronderhoud gestabiliseerd naar gemiddeld 200.000 m³ per jaar (Figuur 2-6). In 2018 is overwogen de verbinding met het Schuitengat opnieuw in gebruik te nemen. Geconcludeerd werd toen dat het verwachte baggerbezwaar in het Schuitengat te onvoorspelbaar was en de nautische condities minder gunstig dan de route via de Slenk (Arcadis 2018).

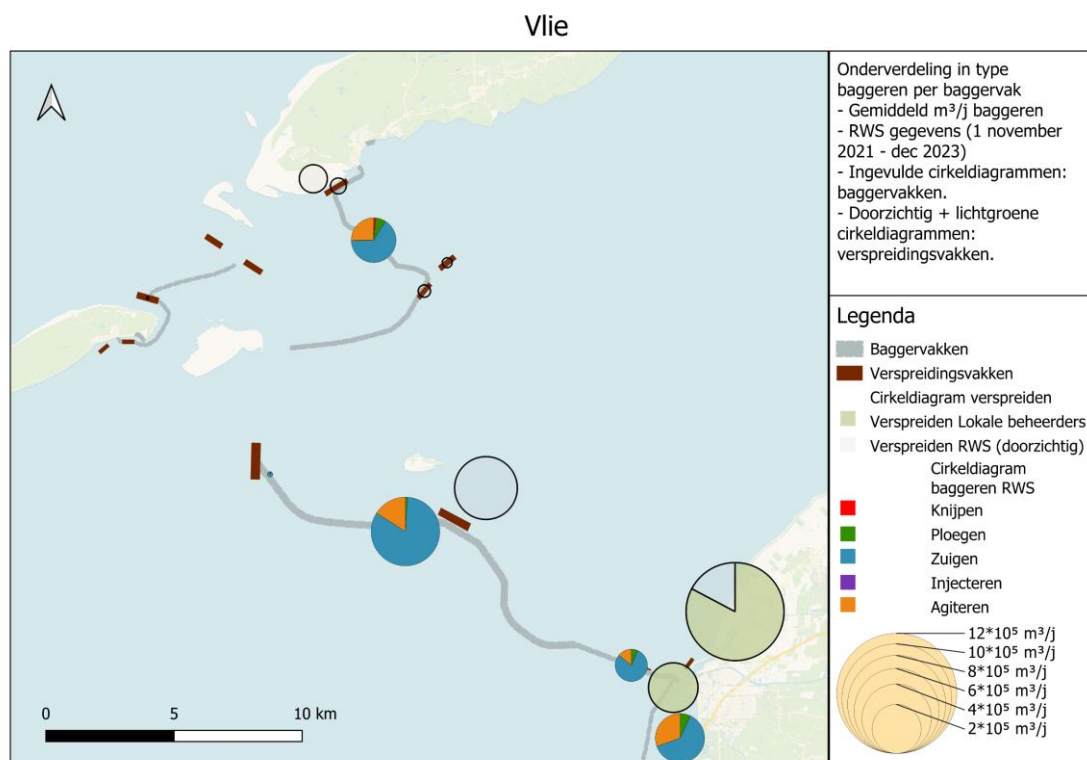
In het verleden is een significant deel (30-90% tussen 2005-2017) van het baggervolume uit het Vlie gebruikt voor zandwinning en niet verspreid (Arcadis en Deltares 2022). Na 2018 is de zandwinning bij vaargeulonderhoud in stappen afgebouwd van een maximaal toegestane hoeveelheid van 500.000 m³/jaar tot 0 m³/jaar in 2022. Sinds 2022 mag er dus geen zand meer gewonnen bij vaargeulonderhoud, en wordt dus alle baggerspecie op daartoe aangewezen verspreidingslocaties verspreid. De reden van dit beleid is gelegen in het kustbeleid, dat wil voorkomen dat door zand onttrekken de erosie van de Noordzeekustzone wordt aangewakkerd. In de baggervolumes in het Vlie (Figuur 2-4) is geen effect van de afbouw van zandwinning te zien.

Het baggervolume van de havens langs het kombergingsgebied van het Vlie is in het algemeen 1.5 tot 2.5 keer hoger dan het baggeronderhoud van de geulen door Rijkswaterstaat (Tabel 2-1). Het meeste wordt uit de haven van Harlingen gebaggerd, namelijk 0.7-1.2 miljoen m³/jaar tussen 2020-2023 en 1-1.4 miljoen m³/jaar tussen 2007-2018 (jaarrapportage Rijkswaterstaat 2023).

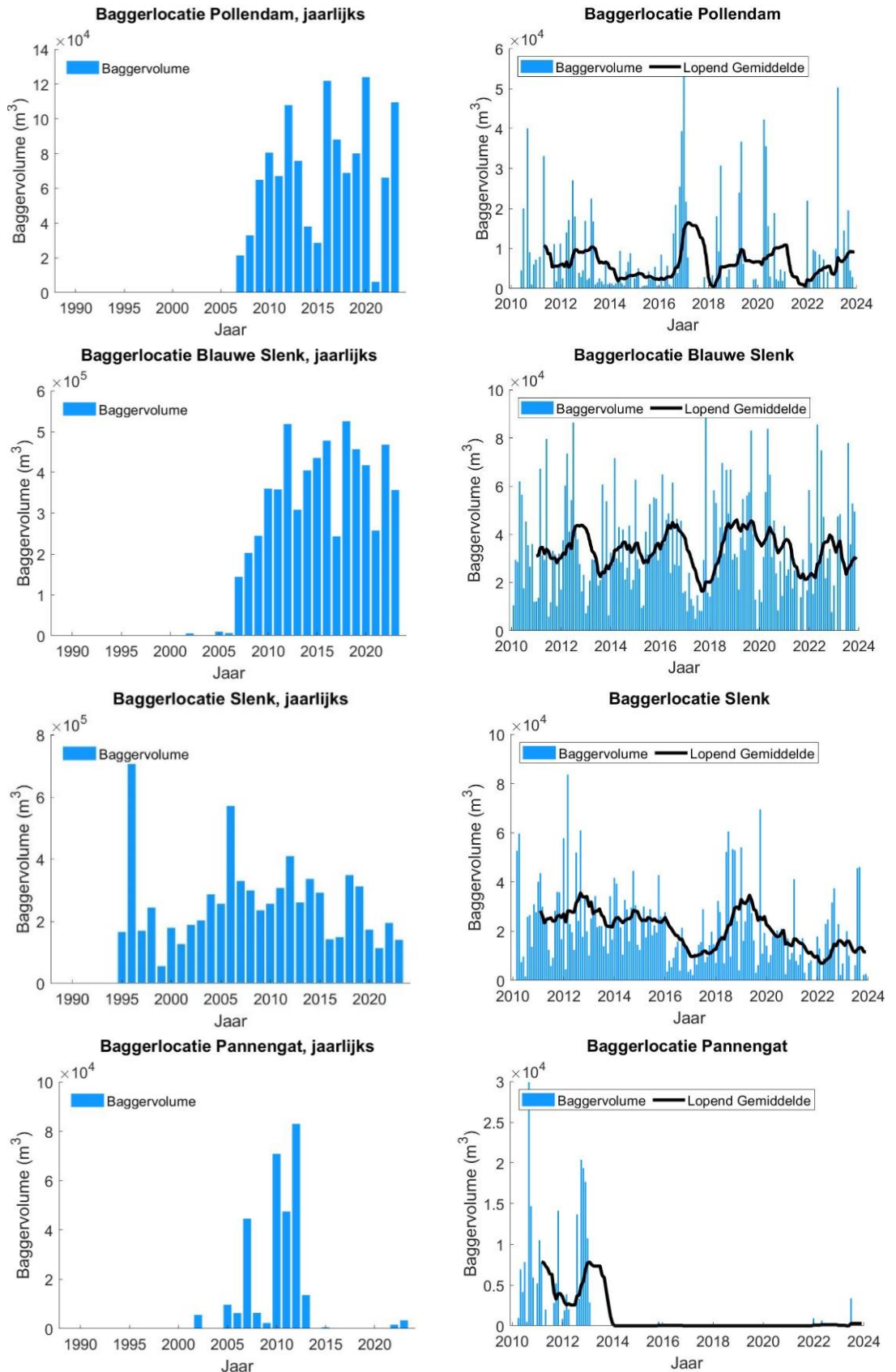
Tot 2021 werd in verspreidingsvak Kimstergat 1 de grootste hoeveelheid gebaggerd materiaal verspreid (Tabel 2-2). Verspreid volume van Rijkswaterstaat per verspreidingslocatie in de Waddenzee. Locaties waar de afgelopen 5 jaar geen volume verspreid is worden niet weergegeven, in m³ (bron: jaarrapportage Rijkswaterstaat 2023). Tabel 2-2). In Kimstergat 1 wordt naast baggerspecie uit het Vlie, ook veel gebaggerd materiaal uit de Boontjes (dus van buiten het bekken Vlie) verspreid. Het eerder genoemde baggervolume vanuit de haven van Harlingen van 0.7-1.2 miljoen m³/jaar, komt hier nog bovenop. Het verspreidingsvak Kimstergat 2 (langs de Pollendam) is in 2023 niet gebruikt vanwege de beperkte diepte (jaarrapportage Rijkswaterstaat 2023). Opmerkelijk is de sterke toename in 2022 en 2023 in volume bij verspreidingslocatie Blauwe Slenk, die van dezelfde orde-grootte is als de afname bij Kimstergat 1.

Tabel 2-2 . Verspreid volume van Rijkswaterstaat per verspreidingslocatie in de Waddenzee. Locaties waar de afgelopen 5 jaar geen volume verspreid is worden niet weergegeven, in m³ (bron: jaarrapportage Rijkswaterstaat 2023).

Verspreidingslocatie	2019	2020	2021	2022	2023
Blauwe Slenk	187.212	219.181	54.673	373.467	322.040
Kimstergat 1	406.152	282.894	114.363	181.975	110.193
NO-Meep 1	15.395	33.319	5.470	12.855	14.508
NO-Meep 2	11.536	18.795	5.100	7.063	10.436
Schuitengat 1	18.103	39.492	42.645	25.211	31.910
Schuitengat 2	32.954	46.803	9.045	84.765	57.373
Vliestroom 1	-	-	-	935	-
Totaal Rijkswaterstaat	671.352	640.484	231.296	686.271	546.460
Aanloophaven Vlieland	7.797	5.023	7.255	7.255	3.465
Haven van Harlingen		1.161.274	1.031.414	1.014.302	734.595
Totaal Lokale beheerders	7.797	1.166.297	1.038.669	1.021.557	738.060
Totaal Vlie	679.149	1.806.781	1.269.965	1.707.828	1.284.520
Totaal Waddenzee (excl. Eems)	2.157.522	2.090.065	1.347.827	1.739.271	2.123.393



Figuur 2-5 Ruimtelijke verdeling baggeren en verspreiden Rijkswaterstaat areaal Vlie (bron: de Wit et al., 2024).



Figuur 2-6 Jaarlijks baggervolume 1989-2023 (linker figuren) en Maandelijks baggervolume 2010-2024 (rechter figuren) van Rijkswaterstaat voor baggerlocaties Geul langs de Pollendam, Blauwe Slenk, Pannengat en Slenk, excl. havens, incl. ploegen (bron: jaarrapportage Rijkswaterstaat 2023).

3 Grootschalige ontwikkelingen van het bekken

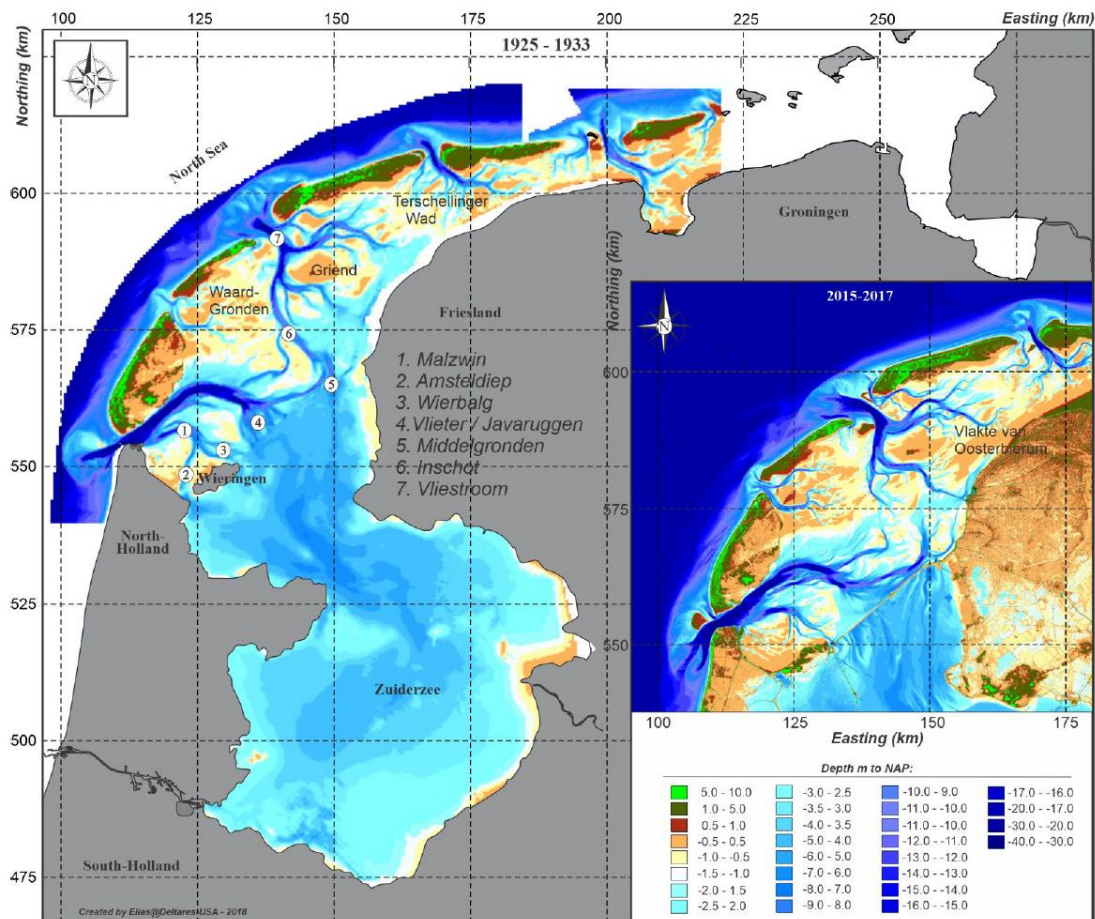
3.1 Grootschalige morfologische ontwikkeling na afsluiting Zuiderzee

Voor de aanleg van de Afsluitdijk (1932) stonden het Vlie en het Marsdiep nog in verbinding met de Zuiderzee (Figuur 3-1). Het Inschot maakte (via de Oude Vlie en Middelgronden) verbinding met de Zuiderzee en de bulk van het kombergingsgebied lag in het zuidelijke deel. Dit is ook de reden waarom de Vliestroom (nog steeds) een zuidelijke oriëntatie heeft. De Meepen zijn secundaire geulen die aantakken op de Vliestroom. Tussen deze twee systemen bevindt zich een groot drempelgebied.

De afsluiting had een groot effect op zowel de hydrodynamica als de morfologie van het bekken. De geulen in het zuidwestelijk deel van het bekken, die oorspronkelijk doorliepen naar de Zuiderzee, verloren hun functie en verzandden. Hierdoor veranderde ook het wantij tussen het Marsdiep en het Vlie van karakter. Vanwege de gemeenschappelijke verbinding met de Zuiderzee was er voor de afsluiting een sterke uitwisseling van water 'achterlangs' tussen beide bekkens. Na de afsluiting werd deze verbinding minder sterk, al is er vanwege de nog relatief grote diepte nog altijd een grotere uitwisseling van water en sediment vergeleken met andere wantijen in de Waddenzee.

In de 2022 bodem, 90 jaar na de afsluiting van de Zuiderzee, is het diepe deel van de Vliestroom nog steeds georiënteerd op het Inschot. In het bekken splitst de Vliestroom zich in twee grote geulenstelsels: de Meepen (Westmeep, Noordmeep en Zuidmeep) in het oosten en de Blauwe Slenk (Vliestroom, Inschot, Blauwe Slenk) in het westen. Deze geulenstelsels worden gescheiden door de grote platen van Griend/Grienderwaard en Ballastplaat/Vlakte van Oosterbierum. In de huidige situatie zijn deze twee delen qua oppervlakte vrijwel gelijk.

Aan de westzijde van Griend is dan een tweede vertakking zichtbaar. Hier maakt de Blauwe Slenk verbinding met de Vliestroom via een drempelgebied. De Blauwe Slenk is in 2022 qua omvang al veel groter dan het geulenstelsel van Inschot. Dit komt doordat het achterliggende kombergingsgebied van de Blauwe Slenk nu veel groter is dan dat van Inschot. Na afsluiting heeft Inschot vrijwel zijn gehele kombergingsgebied verloren. Een deel is opgevuld met sediment en een deel is overgenomen door het Marsdiepsysteem (Doove Balg).

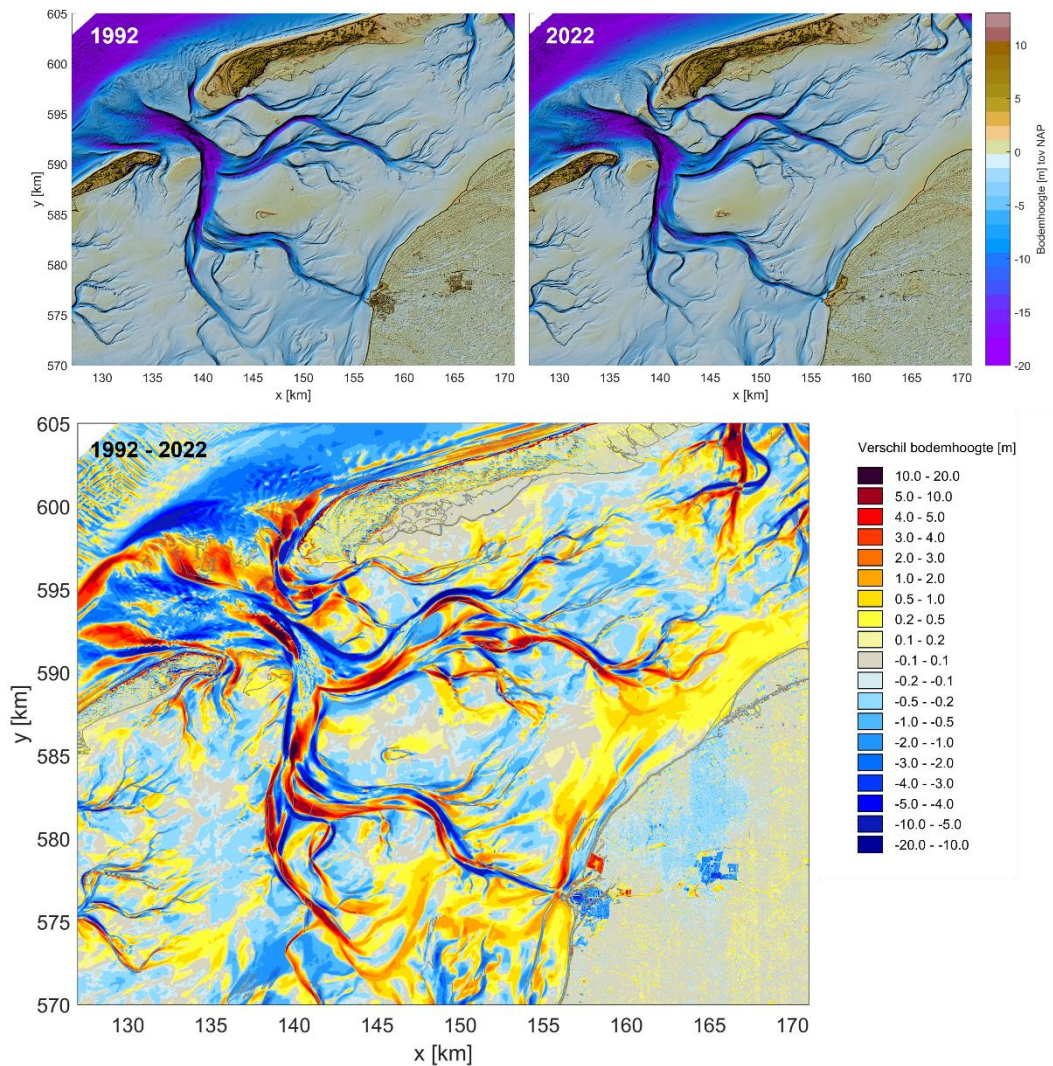


Figuur 3-1 Representatieve bodems voor de Westelijke Waddenzee net voor de afsluiting van de Zuiderzee (1926, met data van 1925-1933) en voor de huidige situatie (bodemdata 2015-2017). Bron: Elias (2021).

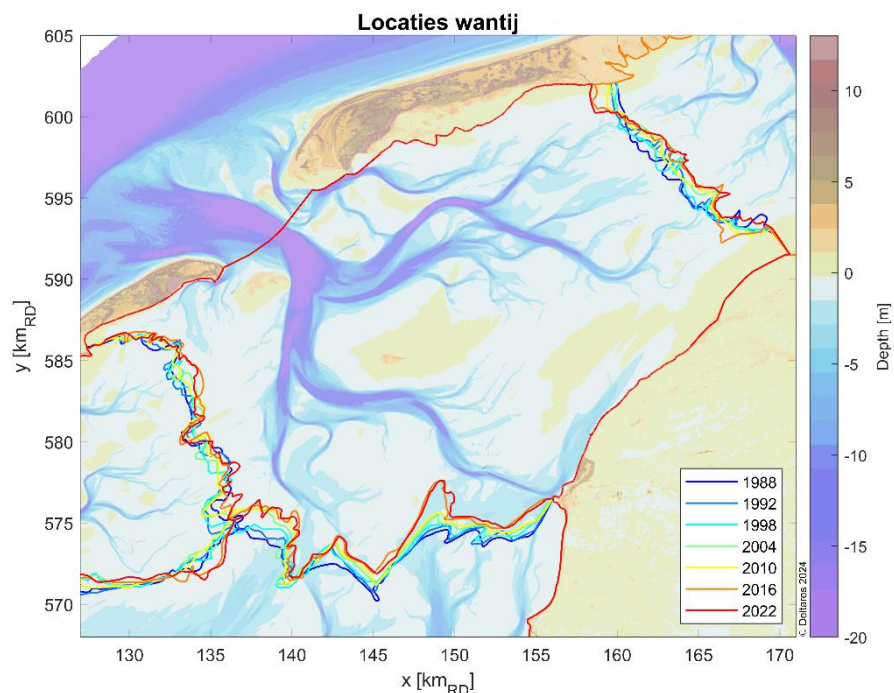
Sinds de afsluiting is er sprake van netto sedimentatie in het bekken van het Vlie. Deze sedimentatie was de eerste jaren na de afsluiting het sterkst met een netto sedimentimport van 2,3 miljoen m³/j over de periode 1933 – 2015 (Elias 2019). De laatste decennia is de sedimentatie minder sterk, al importeert het bekken nog steeds sediment (1,43 miljoen m³/j voor de periode 1991 – 2015; Elias 2019). Circa een kwart van dit geïmporteerde sediment bestaat uit slib en de slibgehalten nemen toe (Colina Alonso 2020).

Deze sedimentatie vindt vooral plaats langs de Friese vastelandskust. De plaatgebieden voor de kust, zoals de Vlakte van Oosterbierum en de Ballastplaat zijn sinds de afsluiting van de Zuiderzee sterk uitgebreid en verhoogd en hebben geulen zich hier teruggetrokken (zie Figuur 3-2). Met name in deze gebieden is het aandeel slib in de totale sedimentatie bijzonder hoog: 37 – 39% van de volumeveranderingen wordt veroorzaakt door slibsedimentatie (Colina Alonso 2020). Zuidelijk van de Geul langs Pollendam sinds afsluiting van de Zuiderzee een morfologisch wantij ontstaan tussen het Vlie en het Marsdiep. Voor de afsluiting bestond dit wantij niet, omdat de bekkens van het Vlie en Marsdiep beide in directe verbinding stonden met de Zuiderzee. Sinds de afsluiting verschuift het wantij tussen het Marsdiep en het Vlie noordoostwaarts, een ontwikkeling die nog altijd bezig is. Door de vorming van het wantij blijven de platen rondom de Boontjes zich nog steeds verhogen (Smits et al., 2022). Tegelijkertijd is er sprake van een erosieve trend dicht bij de eilanden, op het Terschellinger wantij en de Waardgronden bij het wantij tussen het Vlie en het Eierlandse gat. Een analyse van sedimentsamenstelling laat ook zien dat het Terschellinger wantij minder slibrijk lijkt te zijn geworden over de afgelopen 125 jaar (Colina Alonso, 2020).

Voor de bepaling van de recente volume- en areaalveranderingen in deze studie (Hoofdstuk 4), is een definitie van de kombergingsgrens nodig. Hiervoor wordt een morfologisch wantij gebruikt. De locatie van het morfologische wantij is vastgesteld voor de jaren 1988 – 2022 met behulp van bodemligging, gradiënt en afstroomanalyse (Figuur 3-3; Wagenaar, 2024). De ligging van de (hydrodynamische of morfologische) wantijen in de afgelopen eeuw is in verschillende studies steeds anders getrokken (Eysink 1979; Werkgroep I, 1981; Eysink & Biegel, 1992; Kragtwijk 2004; Hoeksema et al. 2004; Van Geer 2007; Vroom 2011; Wang et al. 2013). Het trekken van een sluitende conclusie over de ligging en het functioneren van het wantij is lastig. Uit de meeste studies volgt echter een verschuiving van het wantij tussen Marsdiep en Vlie naar het noordoosten na aanleg van de Afsluitdijk. Dit geldt ook voor uit het wantij afgeleid voor deze studie (Figuur 3-3). Het wantij tussen het Marsdiep en het Vlie verplaatst zich in noordelijke richting, waarbij het Marsdiep bekken groeit ten koste van het Vlie. Bij het Terschellinger wantij is een verplaatsing in oostelijke richting zichtbaar (Figuur 3-3).



Figuur 3-2 Boven: Bodemligging van het Vlie uit 1992 en 2022 naast elkaar. Onder: het verschil tussen de bodemliggingen in 2022 en 1992. Blauwe gebieden laten erosie zien, oranje/rode gebieden sedimentatie.



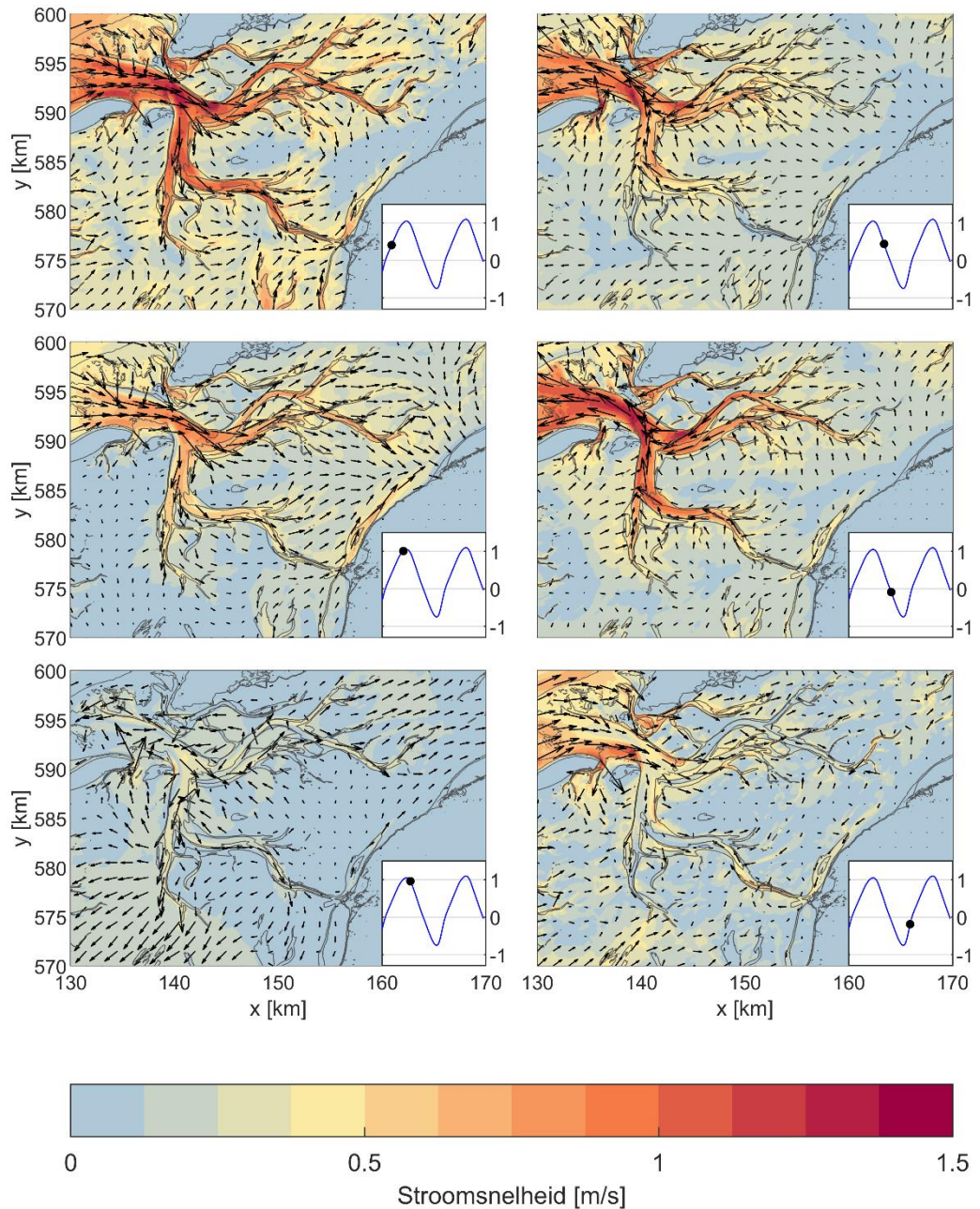
Figuur 3-3 Ontwikkeling van de morfologische wantijen die het Vlie scheiden van de omliggende bekkens. De ligging van de wantijen is bepaald met behulp van afstroomanalyse (Wagenaar, 2024).

3.2 Grootschalige hydrodynamische ontwikkeling na afsluiting Zuiderzee

De hydrodynamica in het Vlie is geanalyseerd door Grasmeyer et al. (2022) aan de hand van een modelstudie. Hierbij zijn stromingen en debieten in de westelijke Waddenzee bepaald voor vier verschillende historische bodems, uit de jaren 1976, 1991, 2003 en 2015. In deze studie is het door Grasmeyer et al. (2022) gebruikte model als basis genomen en aangevuld met de meest actuele bodem uit 2022. Op deze manier kunnen trends in de hydrodynamica in het bekken van het Vlie worden bepaald. Figuur 3-4 geeft een overzicht van de ruimtelijke stromingspatronen tijdens verschillende getijfasen.

Het gebruikte model is het 2D hydrodynamische Dutch Continental Shelf Model in Delft3D – Flexible Mesh (2D DCSM-FM 100m). Het model heeft een horizontale resolutie van 200m langs de Nederlandse kust en 100m in de Waddenzee. Voor een volledige omschrijving van het model wordt verwezen naar Zijl & Groenenboom (2020). Om de effecten van de bodem uit 2022 te kunnen vergelijken met de oude modelresultaten zijn de simulatieperiode, de forcering, het rekenrooster en de uitvoerpunten identiek gehouden aan Grasmeyer et al. (2022). Als simulatieperiode wordt het jaar 2017 gebruikt. In Grasmeyer et al. (2022) zijn de waterstanden voor 2017 gevalideerd. Een belangrijke kanttekening die volgt uit deze validatie is dat de getijamplitude zowel bij West-Terschelling als bij Harlingen licht wordt overschat door het model (ordegrootte centimeters). Bij West-Terschelling is de overschatting echter iets groter dan bij Harlingen, waardoor de gradiënt tussen de getijslag bij West-Terschelling en Harlingen (van enkele centimeters in totaal) in het model 30% kleiner is dan in werkelijkheid. Dit kan het verhang in waterstand over het bekken, en dus de stroomsnelheden beïnvloeden. Daarnaast is het gebruikte rekenrooster met een resolutie van 100m te grof om de stroming in de smallere geulen (zoals bijvoorbeeld de Slenk of de Geul langs Pollendam) goed te kunnen beschrijven, omdat deze geulen zijn geschematiseerd middels een enkele of een paar roostercellen. Hierdoor is het model minder geschikt voor detailanalyse van specifieke geulen. Desondanks heeft het model nog wel meerwaarde om inzicht te krijgen in de werking van het

kombergingsgebied op systeemniveau en om de trends gevonden in Grasmeyer et al. (2022) te kunnen updaten met de nieuwe bodem.

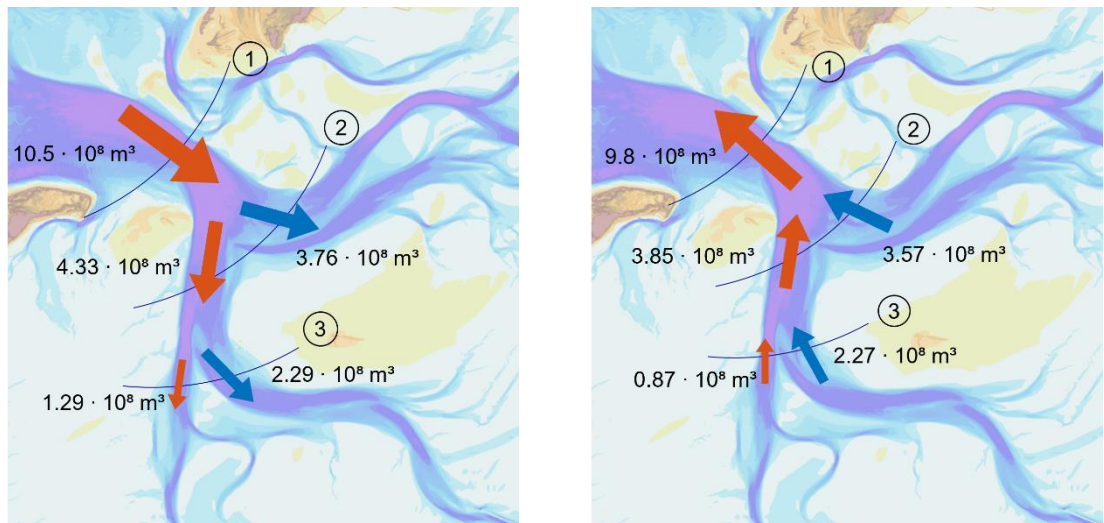


Figuur 3-4 Stroomsnelheden in het bekken van het Vlie bij verschillende getijfasen bij een bodem uit 2022.

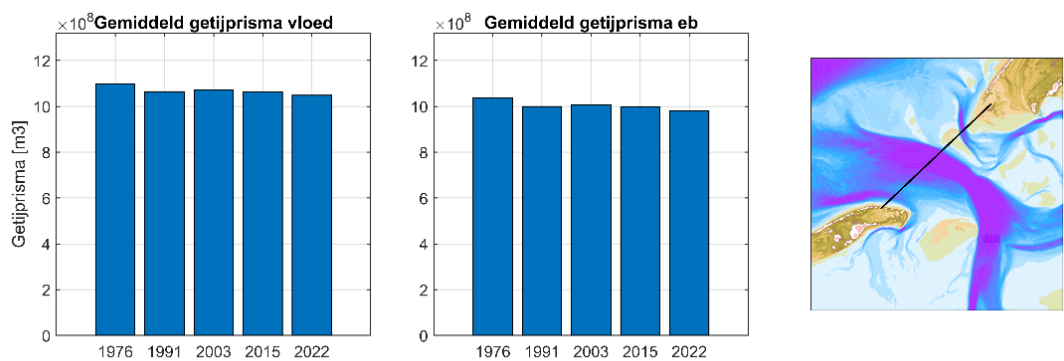
Voor verschillende doorsnedes in het model zijn getijvolumes en piekdebieten berekend. Het getijprisma is gedefinieerd als de totale hoeveelheid water die per eb- of vloedperiode door de doorsnede stroomt (in m^3). Het piekdebiet is het maximale instantane debiet (m^3/s) voor een eb- of vloedperiode. De getijprisma's en piekdebieten zijn bepaald voor ieder getij en vervolgens gemiddeld over alle getijperiodes in de simulatieperiode (1 januari – 31 december 2017).

De 'opbouw' van het bekken, bestaande uit een hoofdgeul (de Vliestroom) die zich meerdere keren splitst (zie H3.1 voor een meer uitgebreide beschrijving hiervan) is terug te zien in de debietverdeling (Figuur 3-5). Ontwikkelingen in het relatieve belang van de verschillende

geulen kunnen worden beschreven aan de hand van trends in de verdeling van het totale debiet over de verschillende geulen. Het totale getijprisma door het zeegat neemt licht af (Figuur 3-6). Dit werd al geconcludeerd door Grasmeijer et al. (2022) en deze trend lijkt zich ook met de nieuwste bodem door te zetten.

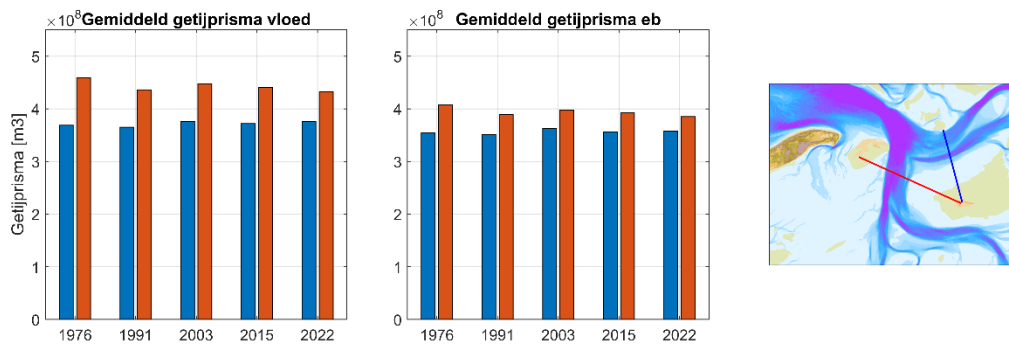


Figuur 3-5 Verdeling van debieten over het Vlie (links vloed, rechts eb). Rode pijlen geven afnemende debieten aan, blauwe pijlen gelijkblijvende debieten.



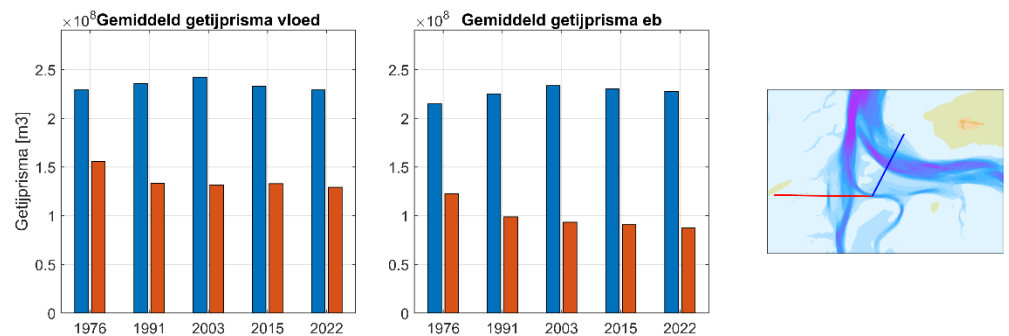
Figuur 3-6 Gemiddeld getijprisma door het zeegat van het Vlie van 1976 tot 2022.

Achter het zeegat splitst de Vliestroom zich in twee hoofdgeulen die respectievelijk het noordoostelijke en het zuidwestelijke deel van het bekken bedienen: de Westmeep en het zuidelijke Vliestroom - Blauwe Slenk. Iets meer dan de helft van het totale getijprisma stroomt door het zuidelijke Vliestroom: gemiddeld $4,33 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ tijdens vloed, en $3,85 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ bij eb, vergeleken met $3,76 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ bij vloed en $3,57 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ bij eb door de Westmeep (Figuur 3-7). Wanneer de verschillende jaren worden vergeleken dan lijken de debieten door de zuidelijke Vliestroom licht af te nemen, met name tijdens vloed, terwijl het getijprisma richting de Westmeep gelijk blijft, waardoor het verschil tussen de twee geulen afneemt.



Figuur 3-7 Gemiddeld getijprisma door het zuidelijke Vlietstroom (rood) en de Westmeep (blauw) van 1976 tot 2022.

Dieper in het bekken splitst de Vlietstroom vervolgens in de Blauwe Slenk, die doorloopt richting Harlingen, en het Inschot, dat vroeger doorliep richting de Zuiderzee. Het Inschot heeft zich sinds de afsluiting sterk teruggetrokken en opgevuld (zie paragraaf 3.1). Het merendeel van het getijprisma stroomt door de Blauwe Slenk. Tussen 1976 en 2003 nemen de debieten door het Inschot af. Dit is waarschijnlijk een gevolg van de terugtrekking van het Inschot die in diezelfde periode te zien is. Sinds 2003 neemt het verschil tussen de geulen niet meer duidelijk toe en zijn de getijprisma's in beide geulen relatief constant.



Figuur 3-8 Gemiddeld getijprisma door het Inschot (rood) en de Blauwe Slenk (blauw) van 1976 tot 2022.

4 Recente volumeveranderingen in het bekken

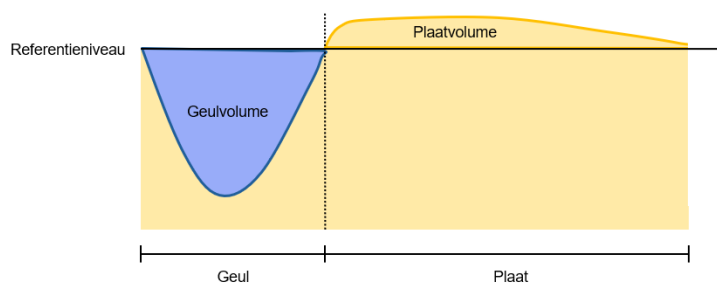
4.1 Inleiding

Inzicht in de huidige sedimenthuishouding van de Waddenzee stelt ons in staat om het sedimentmanagement beter te plannen voor de toekomst. Door trendmatige toe- en afnames van de sedimentvolumes in het bekken te analyseren krijgen we niet alleen inzicht in de ontwikkeling van het bekken, maar kunnen we ook morfologische elementen, zoals specifieke platen of banken, nauwgezet volgen. In dit hoofdstuk wordt de volumebalans van het Vlie uitgewerkt. Dit is een update van de volumebalans Waddenzee in Elias (2019) met de nieuwste bodemkaart (Vakloding Vlie 2022), en heeft tevens als doel de volumebalansmethodiek voor de Waddenzee verder te ontwikkelen. Dergelijke analyses maken het mogelijk de samenhang tussen grootschalige processen en de lokale knelpunten in vaargeulen steeds beter te begrijpen.

In Hoofdstuk 4.2 wordt kort de gehanteerde methodiek beschreven (voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar Bijlage B). De resultaten van de volumeanalyse voor het bekken worden beschreven in paragraaf 4.3. In (Elias, 2024) is een volumebalans voor de buitendelta van het Vlie beschreven, deze wordt in 4.4 samengevat om de verbinding tussen het bekken en de buitendelta te kunnen maken. Vervolgens worden de belangrijkste verbindingen gebundeld in Hoofdstuk 4.5. Voor een volledig overzicht van tabellen en figuren wordt verwezen naar Bijlage C.

4.2 Concept & Methode

Op basis van recente bodemkaarten kan een volumebalans van het bekken worden opgesteld. De volumebalans gebruikt een vast referentieniveau als basis. De referentieniveaus worden zo gekozen dat deze verschillende morfologische elementen zoals geulen of platen goed beschrijven. De volumes worden vervolgens bepaald t.o.v. dit referentieniveau. Dit geeft inzicht in het sedimentvolume van platen, gelegen boven het referentieniveau, of over het geulvolume, gelegen onder het referentieniveau (Figuur 4-1).



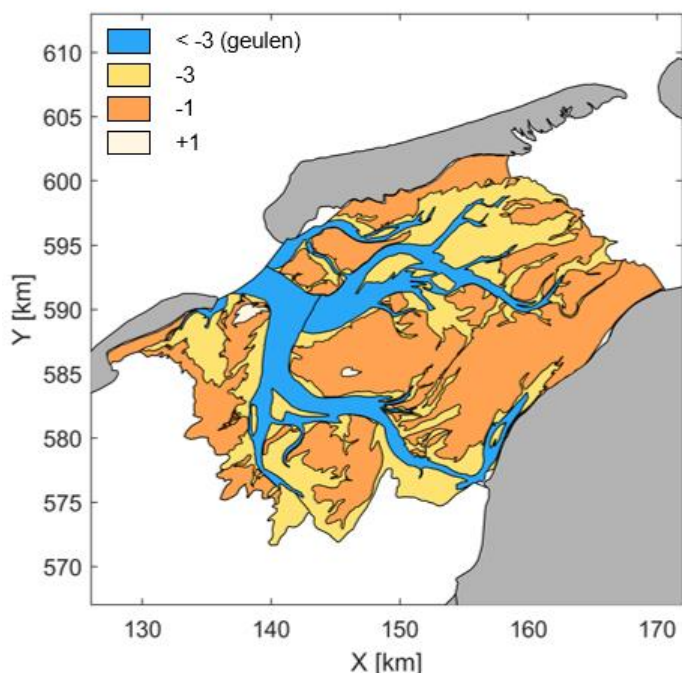
Figuur 4-1: Principe schets van de bepaling van plaat- en geulvolumes.

De referentieniveaus worden ook gebruikt om de ligging van verschillende morfologische elementen af te bakenen (zie Figuur 4-2). De ligging van deze morfologische elementen kan vervolgens over de tijd gevolgd worden. In deze studie zijn de dieptecontouren NAP -3 m, NAP -1 m en NAP +1 m gekozen als referentieniveau:

- De dieptecontour NAP -3 m maakt onderscheid tussen geulen en (ondiepe) platen;
- De NAP -1 m dieptecontour maakt onderscheid tussen ondiepe en droogvallende platen (bij benadering ligging van Gemiddeld Laag Water, GLW);

- De NAP +1 m contour omvat de permanent droog liggende platen (gemiddeld hoogwatervrij = begin van de kwelderzone).

N.B. deze methode houdt geen rekening met de ruimtelijke variatie in getijslag en daarmee de variatie in ligging van Laag Water en Hoog Water, of de variatie daarin over de tijd.



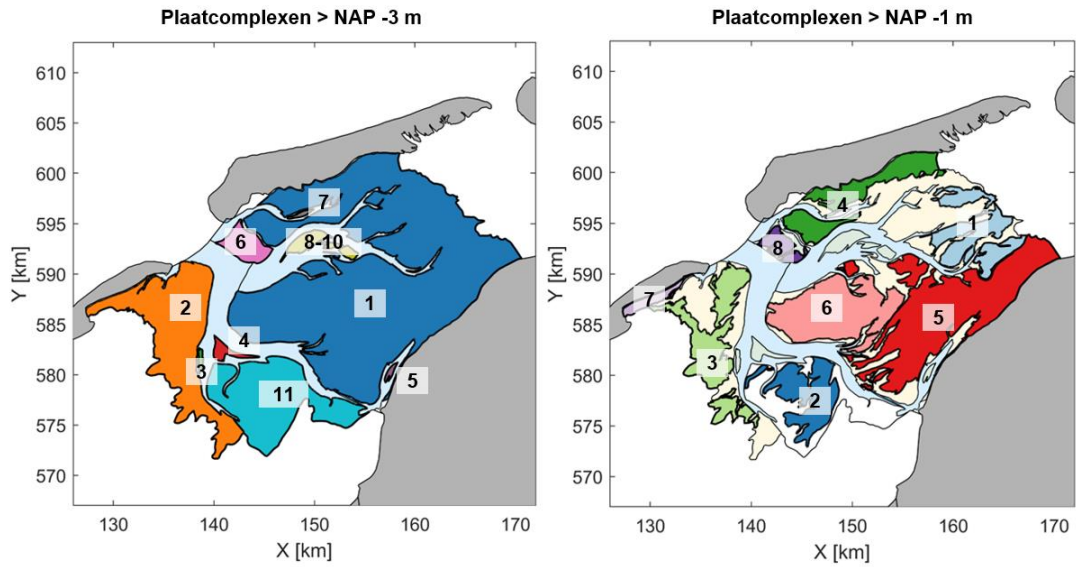
Figuur 4-2: Overzicht van de verschillende dieptecontouren waar de volumes voor zijn bepaald (voor het jaar 2022).

Als basis voor de volumebalans zijn de hoge-resolutie, 20x20m, bodemkaarten van de Westelijke Waddenzee gebruikt. Deze bodemkaarten zijn sinds 1985 beschikbaar. In een eerdere studie is geconstateerd dat de 1985 bodemkaart niet representatief lijkt te zijn en waarschijnlijk meetonauwkeurigheden bevat (Elias, 2016). De volumebalans is daarom beschouwd over de periode 1992-2022. De periode voor 1985 is hier niet opnieuw beschouwd, omdat deze in eerdere studies uitvoerig is behandeld (e.g. Elias et al., 2012; Elias, 2016; Wang et al. 2018).

De afbakening van het studiegebied is het morfologisch wantij voor de verschillende bodemkaarten. Hiermee varieert het balansgebied dus in grootte. Deze afbakening maakt het beter mogelijk om morfologische elementen over de tijd te volgen en zorgt er daarnaast voor dat plaatareaal bij het bekken gerekend wordt van waaruit het gevoed wordt. Het totale plaat- en geulareaal wordt vervolgens opgesplitst in deelgebieden, om in meer detail de ontwikkeling te kunnen beschrijven (Figuur 4-3). Aangezien dit een volumeanalyse van het gehele bekken op geaggregeerde schaal is, is de indeling in subgebieden dus ook op grote schaal gedaan:

- Het totale plaatareaal (> NAP -3 m) wordt onderverdeeld in de grote plaatcomplexen tegen de wantijen aan (1: Terschellinger Wad, Vlake van Oosterbierum, Grienderwaard; 2: Waardgronden; 11: Lange Zand en Hendrik Tjaarsplaat), Jacobsruggen (6) en de platen in de Meepen (8-10);
- Het areaal droogvallende platen (> NAP -1 m) wordt onderverdeeld in de platen tegen de vastelandskust (2, 5), de platen centraal in het bekken (1, 3, 6) en platen tegen de eilandkusten en in de keel van het zeegat (4, 7, 8). Deze drie groepen vertonen een ander morfologisch gedrag;

- Het geulenstelsel wordt in twee delen gesplitst: de hoofdgeul richting Harlingen (Vliestroom, Vliesloot, Blauwe Slenk, Inschot en Kimstergat) en het oostelijk gerichte geulenstelsel van de Meepen en Schuitengat. Dit om onderscheid te maken in het systeem richting het westelijk wantij en het oostelijk wantij.



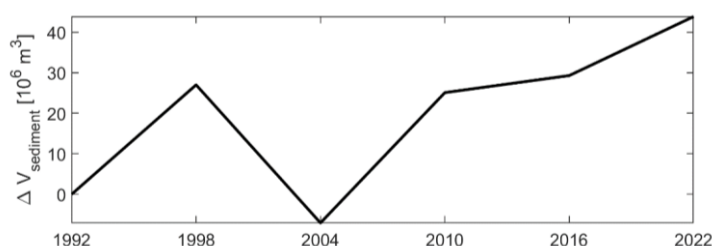
Figuur 4-3: Indeling van het plaatareaal in subgebieden.

4.3 Volumeverandering bekken

4.3.1 Totale kombergingsgebied

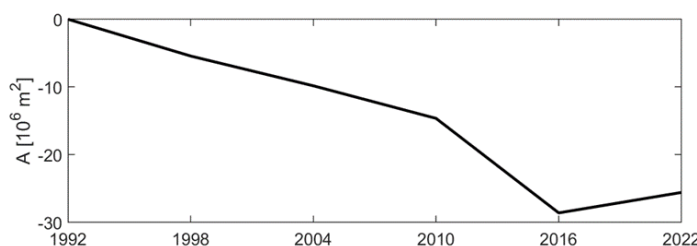
Het sedimentvolume van het bekken neemt toe tussen 1992 en 2022 (Figuur 4-4). Opvallend is de dip in volumeontwikkeling die in 2004 optreedt. Het volumeverloop, inclusief dip, is ook in de eerdere studie van Wang et al. (2018) geconstateerd. Het volume neemt toe met circa 44 Mm³ of 1,46 Mm³/jaar. Bij een lineaire trend door alle datapunten wordt een opvulsnelheid van 1,23 Mm³/jaar gevonden. Gemiddeld gezien vult het bekken zich dus op. De opvulsnelheid komt overeen met die gerapporteerd in (Elias, 2024), waar een toename van 1,43 Mm³/jaar werd gevonden. Op basis van de volumeverandering op bekkenschaal kan nog geen uitspraak worden gedaan over geul- en plaatveranderingen, aangezien deze sterk gerelateerd zijn aan de wantijligging. Dit wordt in de volgende secties besproken.

Voor de volumeontwikkeling van het bekken over de langere termijn (1935-2012) wordt verwezen naar Wang et al. (2018) en Elias (2012). In deze periode is het sedimentvolume in het Vlie met circa 225 miljoen m³ toegenomen.



Figuur 4-4: Ontwikkeling sedimentvolume van het bekken over de periode 1992-2022.

Zoals beschreven in Hoofdstuk 3.1, verschuift het morfologisch wantij aan zowel zuidwestelijke zijde (Eierlandse Gat en Marsdiep) als noordoostelijke zijde (Borndiep) naar het noordoosten (Figuur 3-3). De verschuiving aan zuidwestelijke zijde is groter dan aan noordoostelijke zijde, daarmee neemt het oppervlakte van het bekken van het Vlie netto af. De afname is 25,6 km² over de periode 1992-2022 oftewel 0,85 km²/jaar (zie Figuur 4-5 en Tabel 4-1). In de verdere analyse van de ligging en omvang van geulen en platen wordt rekening gehouden met het verschuiven van het wantij.



Figuur 4-5: Ontwikkeling oppervlakte van het bekken over de periode 1992-2022.

4.3.2 Hoofdgeulen

De hoofdgeulen worden hier gedefinieerd als het areaal onder NAP -3 m. Tussen 1992 en 2022 neemt het oppervlakte van de geulen met 6,2 km² (5%) af, zie Figuur 4-6 en Tabel 4-1. Het watervolume in het totale geulenstelsel neemt af met 25 miljoen m³ (4%) over de periode 1992-2022. Dit kan je ook interpreteren als een invulling van het geulenstelsel met 25 miljoen m³ aan sediment. Met het afnemende oppervlakte van het totale bekken blijft het percentage

geulareaal nagenoeg gelijk op ca. 18%¹. Bovengenoemde getallen gaan over het bekken als geheel en zeggen daarmee weinig over de ontwikkeling van individuele geulen.

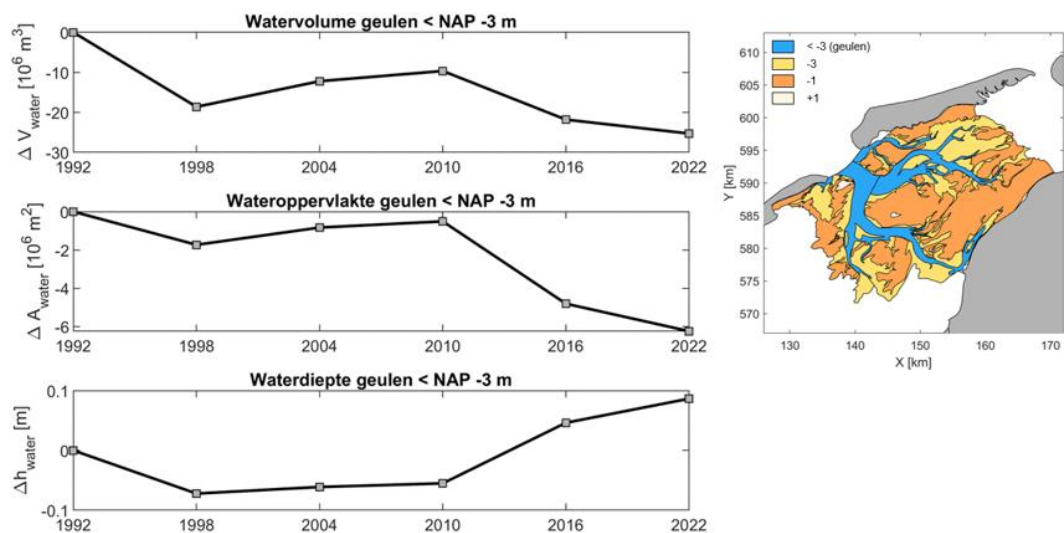
De grootste afname in oppervlakte, -10%, vindt plaats in het geulsysteem richting het wantij met Eierlandse Gat en Marsdiep (Vliestroom, Vliesloot, Blauwe Slenk, Inschot en Kimstergat: geulcomplex 1) . Hier vullen de oude getijgeulen richting de Zuiderzee (zoals Oude Vlie en Oude Inschot) nog steeds op met sediment. De afname in watervolume is kleiner dan de afname in oppervlakte, namelijk -3%. Dit komt omdat voornamelijk de ondiepere geulen zich opvullen. Dit betekent ook dat de gemiddelde waterdiepte van het geulensysteem toeneemt. Deze toename in diepte zit dan voornamelijk in de diepe delen. De geulen worden dus vooral smaller en iets dieper.

De Meepe en Schuitengat nemen licht toe in omvang (2%) en lijken daarmee dus stabielier dan geulcomplex 1. Het watervolume in de geul onder NAP -3 m, neemt met 4% af. De gemiddelde waterdiepte neemt dus af.

Voor de ontwikkeling van de twee geulsystemen over de tijd wordt verwezen naar Bijlage C.3 en C.5. Voor een overzicht van de ontwikkeling in tabelvorm wordt verwezen naar Bijlage C.97.2.2C.9.

Tabel 4-1: Ontwikkeling oppervlakte van het bekken, platen en geulen.

	Oppervlakte bekken [km ²]	Oppervlakte platen > NAP -3 m [10 ⁶ m ²]	Oppervlakte geulen < NAP -3 m [10 ⁶ m ²]	Oppervlakte platen > NAP -1 m [10 ⁶ m ²]
1992	690,4	562,8	123,6	344,3
1998	685,0	559,1	121,8	343,7
2004	680,6	553,2	122,7	320,1
2010	675,8	548,3	123,1	337,7
2016	661,8	538,5	118,8	323,5
2022	664,8	543,1	117,3	329,5



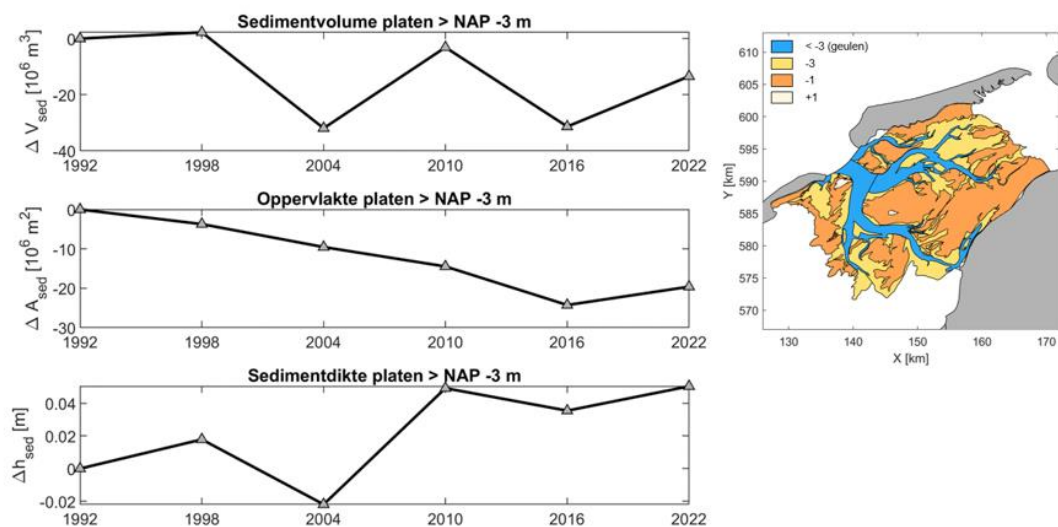
Figuur 4-6: Ontwikkeling geulvolume, geuloppervlakte en geuldiepte < NAP -3 m.

¹ Ten opzichte van een vast balansgebied zou het aandeel geulen dus afnemen.

4.3.3 Ondiepe platen

Onderscheid tussen het totale plaat- en geulareaal wordt gemaakt op basis van de NAP -3 m contour. De verandering in volume, oppervlak en gemiddelde hoogte van het totale plaatareaal is getoond in Figuur 4-7. Met de afname van het totale bekkenoppervlak wordt ook het oppervlak van de platen, die binnen de hier gedefinieerde grenzen van het Vlie liggen, kleiner. Het plaatoppervlak neemt af met 19,6 km². Het aandeel van de platen binnen het totale bekken blijft echter gelijk op 81 - 82% van het bekkenoppervlak, zie Tabel 4-1. Het sedimentvolume dat zich boven NAP -3 m in de platen en de kleine geulen bevindt, neemt af met 13,5 miljoen m³ tussen 1992 en 2022³. Deze afname komt ook door het verkleinen van het bekken: het wantij verschuift over de plaatgebieden. De gemiddelde sedimentdikte en dus de hoogte van de platen neemt daardoor toe met 5 cm. Ter referentie, in de periode 1992-2022 is de jaargemiddelde waarde van de zeespiegel in Nederland met circa 10 cm gestegen (bron: <https://www.knmi.nl/klimaatdashboard>). Bovengenoemde getallen gaan over het bekken als geheel en zeggen daarmee weinig over de ontwikkeling van individuele platen. Een individuele plaat kan toenemen in omvang, terwijl een andere plaat afneemt. In het geaggregeerde beeld zie je deze ontwikkelingen niet terug.

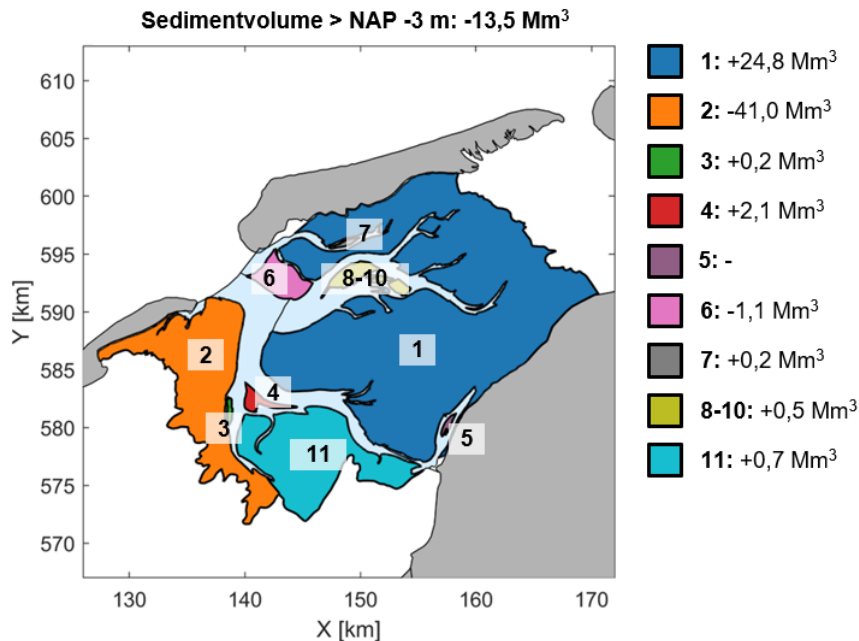
Het totale plaatareaal kan onderverdeeld worden in verschillende plaatcomplexen. Op hoofdlijnen worden hier de volgende complexen onderscheiden: de grote plaatcomplexen tegen de wantijen aan (Plaat 1, 2 en 11), Jacobsruggen (Plaat 6) en de platen in de Mepen (Plaat 8-10). De ligging van deze platen en hun respectievelijke volumeverandering worden getoond in Figuur 4-8. Door de verschuiving van het wantij in noordoostelijke richting neemt Plaat 2 af in volume (-41 miljoen m³), terwijl Plaat 1 juist toeneemt in volume (+24,8 miljoen m³). Van Plaat 5 (ondiepte in Kimstergat) kan geen trend worden bepaald, aangezien die alleen voor 2022 detecteerbaar is. Voor de ontwikkeling van de plaatcomplexen over de tijd wordt verwezen naar Bijlage C.27.2.2C.2 en C.4. Voor een overzicht van de ontwikkeling in tabelvorm wordt verwezen naar Bijlage C.9.



Figuur 4-7: Ontwikkeling sedimentvolume, plaatoppervlakte en sedimentdikte > NAP -3 m.

² Met een vast balansgebied zou het plaatareaal toenemen. Echter, dan wordt plaatareaal meegeteld dat gevoed wordt door een ander bekken.

³ Met een vast balansgebied zou het sedimentvolume in de platen toenemen. Echter, dan wordt plaatareaal meegeteld dat gevoed wordt door een ander bekken.



Figuur 4-8: Overzicht van de verandering in het plaatvolume > NAP -3 m en het geulvolume < NAP -3 m (tussen 1992 en 2022). De getoonde ligging van de platen en geulen is die van 2022.

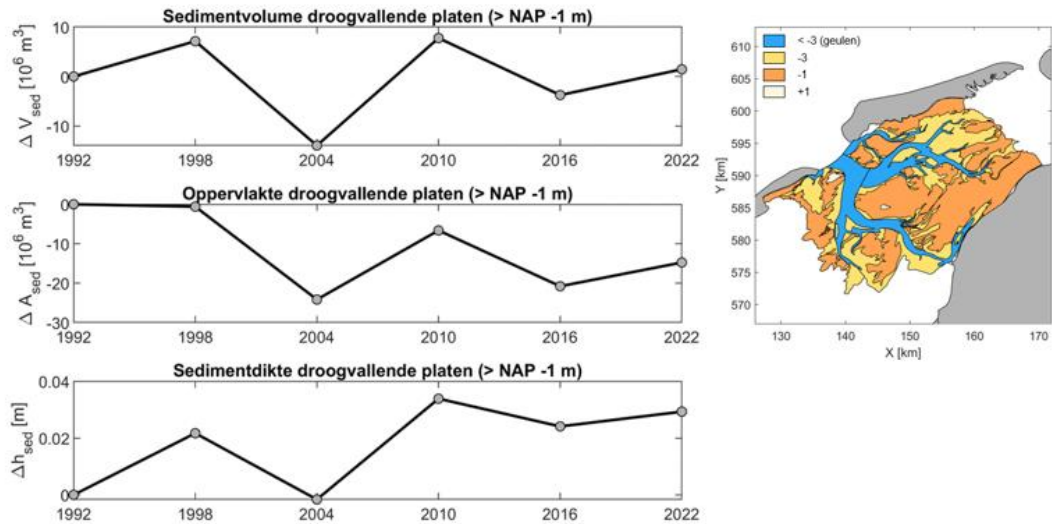
4.3.4 Droogvallende platen

De droogvallende platen worden gedefinieerd als het areaal gelegen boven NAP -1 m. De ontwikkeling van het sedimentvolume, het oppervlak en de gemiddelde hoogte van het gehele areaal is getoond in Figuur 4-9. Het oppervlak neemt tussen 1992 en 2022 af met 14,8 km², oftewel -4%⁴. Binnen het bekken met afnemende omvang blijft het aandeel droogvallende platen ongeveer constant rond 50%. Het sedimentvolume neemt tussen 1992 en 2022 toe met een beperkte +1,5 miljoen m³ (+1%)⁵, maar vertoont geen duidelijke stijgende of dalende trend. Met de afname van het oppervlakte en het nagenoeg gelijk blijven van het sedimentvolume neemt de gemiddelde hoogte van de droogvallende platen toe met 3 cm over de periode 1992-2022. Deze sedimentatie is goed te zien op de Vlake van Oosterbierum en Jacobsruggen (Figuur 3-2). Wederom vertoont het jaar 2004 een dip in de volume- en oppervlakteontwikkeling. Bovengenoemde getallen gaan over het bekken als geheel en zeggen daarmee weinig over de ontwikkeling van individuele platen. Een individuele plaat kan toenemen in omvang, terwijl een andere plaat afneemt. In het geaggregeerde beeld zie je deze ontwikkelingen niet terug.

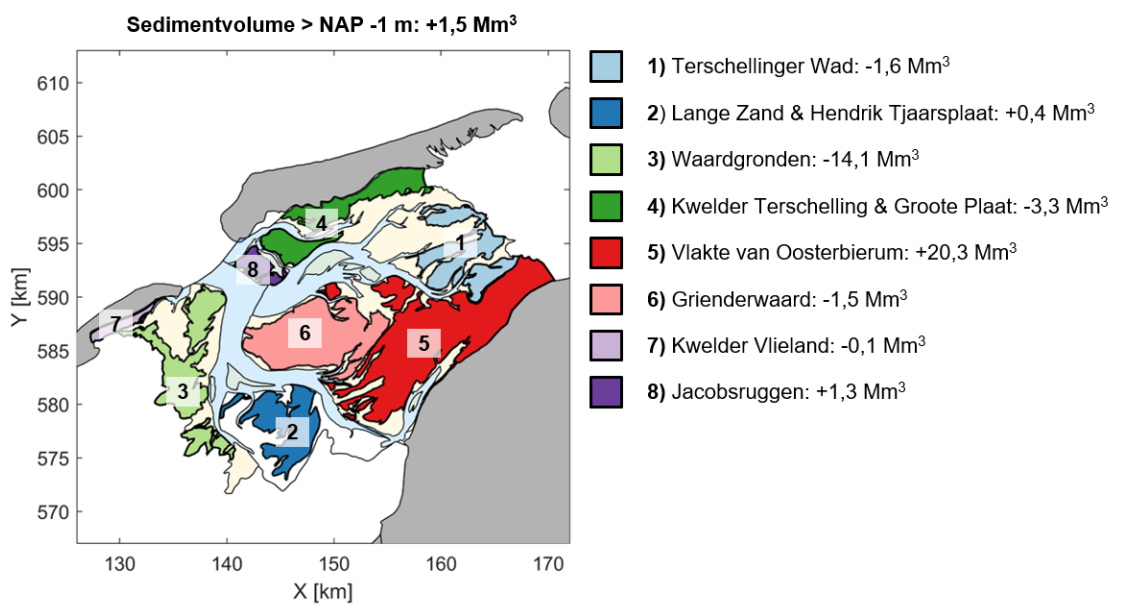
Ook het areaal droogvallende platen kan worden onderverdeeld in plaatcomplexen. De plaatcomplexen zijn te zien in Figuur 4-10 en bestaan op hoofdlijnen uit de platen tegen de vastelandskust, platen over de wantijen heen, en platen tegen de eilandkusten en in de keel van het zeegat. Over het algemeen nemen de platen bij de vastelandskust toe in volume, terwijl de platen centraal in het bekken en over de wantijen afnemen in volume. Hier wordt in Hoofdstuk 4.3.5 verder op ingegaan.

⁴ Met een vast balansgebied zou het plaatareaal toenemen.

⁵ Met een vast balansgebied zou het plaatvolume sterker toenemen.



Figuur 4-9: Ontwikkeling sedimentvolume, plaatoppervlakte en sedimentdikte > NAP -1 m.



Figuur 4-10: Overzicht van de verandering in plaatvolume > NAP -1 m (tussen 1992 en 2022). De getoonde ligging van de platen en geulen is die van 2022.

4.3.5 Droogvallende platen per zone

Op basis van het morfologisch gedrag kan het bekken op hoofdlijnen in drie zones worden onderscheiden (Oost et al., 2019 en Meijers et al., 2024):

- De zone langs de vastelandskust, waar vooral sedimentatie van slib en fijn zand plaatsvindt en de platen in hoogte groeien, nog in reactie op het afsluiten van de Zuiderzee;
- De zone centraal in het bekken, over de wantijen heen, waar erosie van de platen plaatsvindt.
- De zone langs de eilandkusten, waar sedimentatie van zand plaatsvindt op banken en platen.

In deze sectie beschouwen we in meer detail de volumeontwikkeling van de droogvallende platen binnen deze drie zones. Zoals hierboven beschreven is het areaal droogvallende platen

onderverdeeld in acht plaatcomplexen (Figuur 4-10). N.B. ook voor deze sub gebieden geeft het jaar 2004 veelal afwijkende resultaten.

Langs de vastelandskust

De ligging van de Hendrik Tjaarsplaat/Lange Zand (2) en Vlakte van Oosterbierum (5), langs de vastelandskust en het wantij met het Marsdiep, is te zien in Figuur 4-10. De ontwikkeling in sedimentvolume, oppervlakte en sedimentdikte van de betreffende droogvallende platen ten opzichte van 1992 is te zien in Figuur 4-11 en Bijlage C.7. Voor de absolute getallen wordt verwezen naar Bijlage C.8 en Bijlage C.9.

Het sedimentvolume van de droogvallende platen langs de vastelandskust neemt toe met 20,8 miljoen m³ tussen 1992 en 2022. Het merendeel van de volumetoename (+20,3 miljoen m³) vindt plaats op de Vlakte van Oosterbierum, ten opzichte van een toename van +0,4 miljoen m³ voor Lange Zand & Hendrik Tjaarsplaat. Wanneer een lineaire trend door alle datapunten wordt getrokken, neemt complex 2 toe met 0,03 miljoen m³/jaar en complex 5 met 0,68 miljoen m³/jaar. Ook in oppervlakte nemen beide complexen toe (totaal +14,9 km², complex 2 +4,9 km² en complex 5 +10,0 km²). Voor complex 2 is de groei in oppervlakte groter dan die in volume, en de gemiddelde hoogte neemt af met 4 cm. Complex 5 neemt juist toe in hoogte met 14 cm.

De groei van de platen hier komt vooral door sliedsedimentatie nog als gevolg van het afsluiten van de Zuiderzee.

Centraal in het bekken

De ligging van het Terschellinger Wad (1), Waardgronden (3) en Grienderwaard (6), centraal gelegen in het bekken, is te zien in Figuur 4-10. De ontwikkeling in sedimentvolume, oppervlakte en sedimentdikte van de betreffende droogvallende platen is te zien in Figuur 4-11 en Bijlage C.7. Voor de absolute getallen wordt verwezen naar Bijlage C.8 en Bijlage C.9.

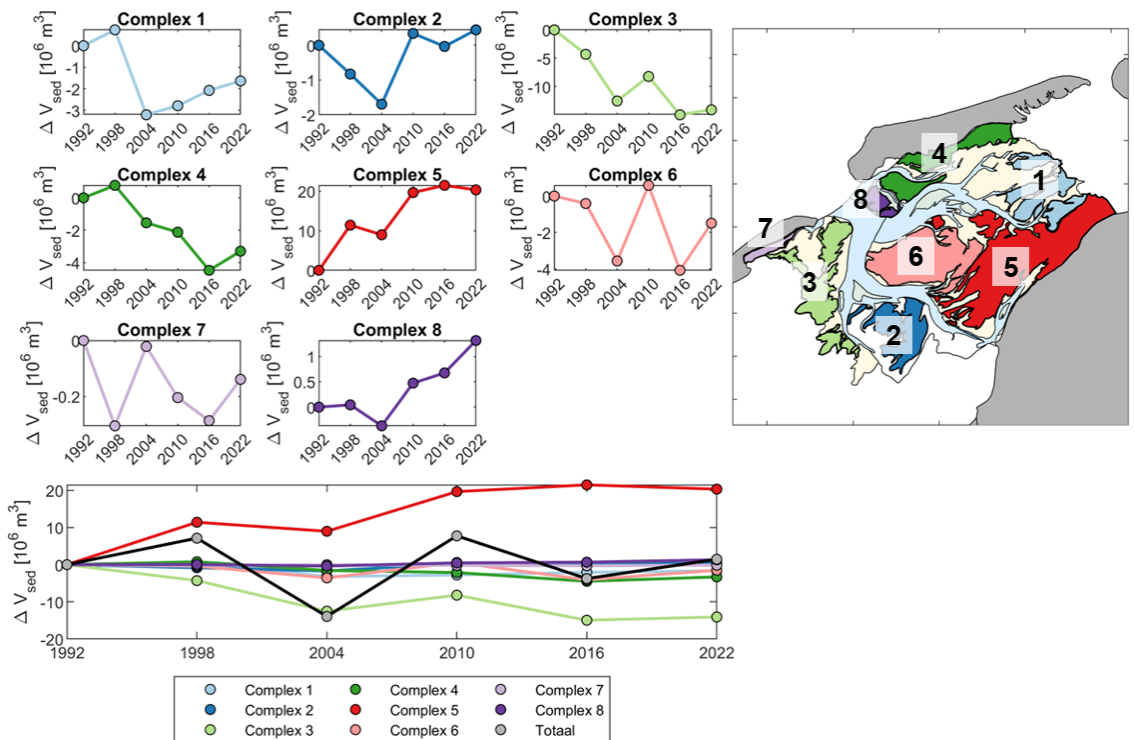
In deze zone neemt, in tegenstelling tot de zone langs de vastelandskust, het sedimentvolume van de droogvallende platen af. De totale afname is 17,2 miljoen m³ tussen 1992 en 2022, waarin complex 3 het grootste aandeel heeft (-14,1 miljoen m³). De afname van complex 1 en 6 is kleiner, respectievelijk -1,6 miljoen m³ en -1,5 miljoen m³. Ook het oppervlak van de droogvallende platen in deze zone neemt af, met in totaal -26,0 km² tussen 1992 en 2022 (-3,08 km² voor complex 1, -23,3 km² voor complex 3, +0,45 km² voor complex 6). De gemiddelde hoogte van de platen in deze zone neemt af met 2 cm voor complex 1, 3 cm voor complex 3 en 3 cm voor complex 6. Deze erosie is ook duidelijk te zien in sedimentatie-erosiepatronen van het gebied (zie Figuur 3-2). De erosie van plaat 3 komt door verdieping van het wantij, ofwel door sedimenttekort ofwel door meer uitwisseling over het wantij heen.

Langs de eilandkusten

De ligging van Groote Plaat en de kwelder van Terschelling (4), de kwelder van Vlieland (7) en Jacobsruggen (8), centraal gelegen langs de eilandkust en nabij de keel van het zeegat, is te zien in Figuur 4-10. De ontwikkeling in sedimentvolume, oppervlak en sedimentdikte van de betreffende droogvallende platen is te zien in Figuur 4-11 en Bijlage C.7. Voor de absolute getallen wordt verwezen naar Bijlage C.8 en Bijlage C.9.

Het totale sedimentvolume van de droogvallende platen in deze zone neemt licht af tussen 1992 en 2022 (-2,13 miljoen m³). Het volume van complex 4 neemt af met 3,3 miljoen m³ en van complex 7 met 0,1 miljoen m³. Voor complex 8 is juist een toename van 1,3 miljoen m³ te zien. Het oppervlak van de droogvallende platen in deze zone neemt af met 3,72 km², wederom neemt complex 8 juist in oppervlak toe (+1,25 km²). De gemiddelde plaathoogte neemt af voor complex 4 met 2 cm, toe voor complex 7 met 7 cm en toe voor complex 8 met 9 cm. De hoogtetoeename van Jacobsruggen is ook duidelijk herkenbaar in de sedimentatie-erosiekaarten (Figuur 3-2). Deze plaat groeit waarschijnlijk in hoogte door de sedimentaanvoer

het bekken in langs de eilandkop van Terschelling (De Beer et al., 2024). Naar verwachting zal dat proces in de komende 5-10 jaar doorzetten. Op lange termijn zal waarschijnlijk de sedimentaanvoer vanuit de buitendelta afnemen.



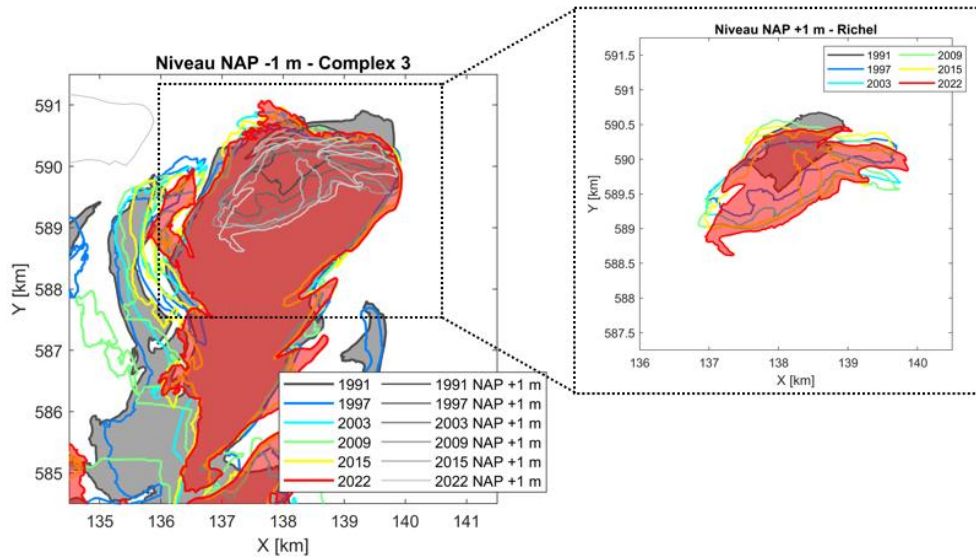
Figuur 4-11: Ontwikkeling van het sedimentvolume > NAP -1 m voor de verschillende complexen droogvallende platen.

4.3.6 Droogliggende platen

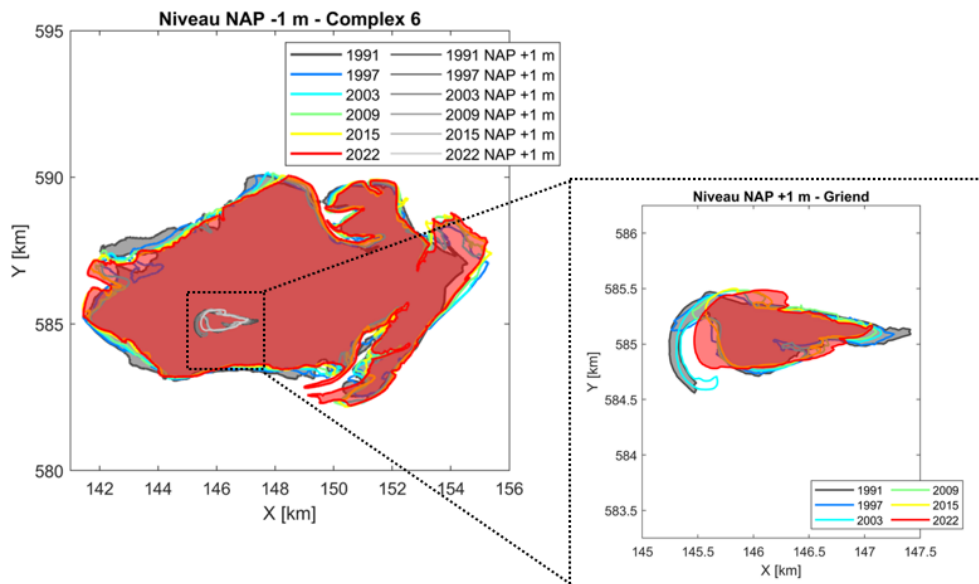
In het bekken liggen twee droogliggende platen (of eilanden), Richel en Griend. De ontwikkeling van het deel van deze platen gelegen boven NAP +1 m is getoond in Figuur 4-12, Figuur 4-13 en Bijlage C.10.

Richel is sinds 1992 toegenomen in omvang in zuidoostelijke richting. De ligging van de NAP +1 m contour aan noordwestelijke zijde is stabiel. Het oppervlakte van Richel neemt tussen 1992 en 2022 toe (+1,5 km²), het sedimentvolume met +0,4 miljoen m³. De gemiddelde hoogte van het droogliggende deel neemt toe met 4 cm tussen 1992 en 2022.

De ligging van Griend op de Grienderwaard is stabiel gebleven sinds 1992, mede door zanddijken en versterkingen die in 1988 en 2016 zijn aangelegd. De droogliggende plaat is wat compacter geworden in oost-westelijke richting, waarmee het oppervlakte afneemt met 0,03 km². Het sedimentvolume is nagenoeg gelijk gebleven. De gemiddelde plaathoogte neemt toe met 4 cm tussen 1992 en 2022.



Figuur 4-12: Ontwikkeling droogliggend deel van Richel (> NAP +1 m).



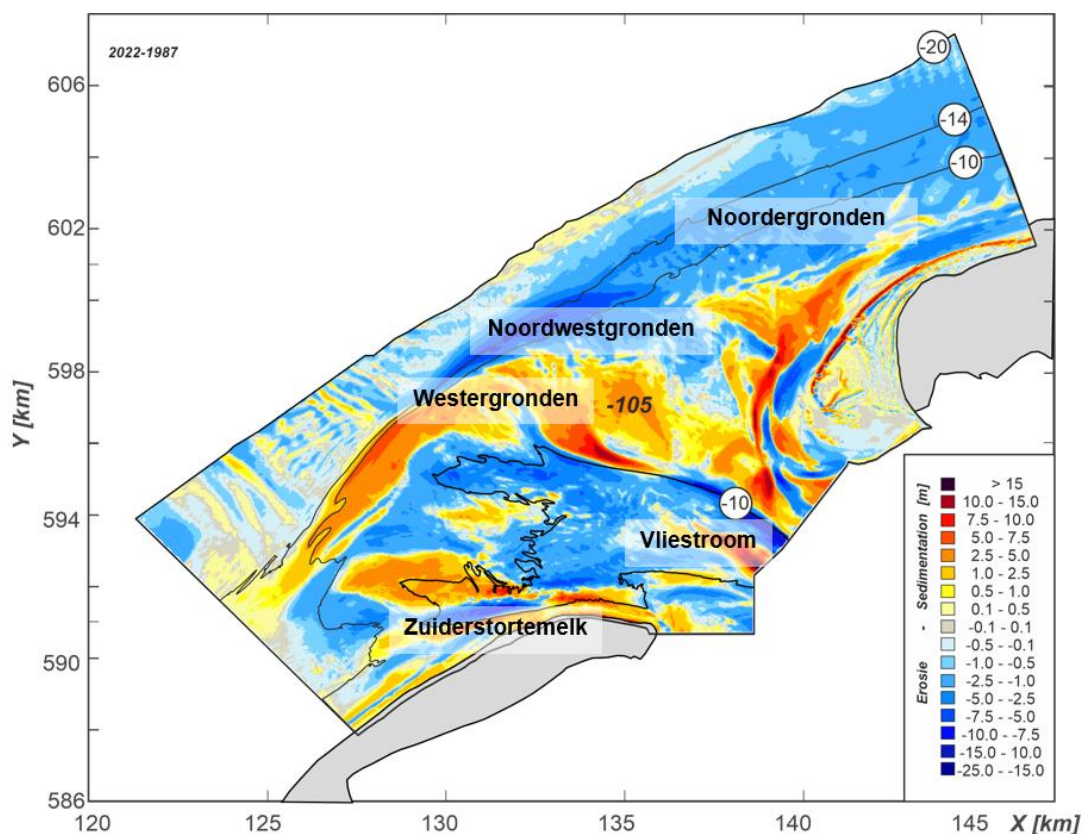
Figuur 4-13: Ontwikkeling droogliggend deel van Griend (> NAP +1 m).

4.4 Volumeontwikkeling buitendelta

De volumeontwikkeling van de buitendelta wordt beschreven in (Elias, 2024). Hier wordt een korte samenvatting gegeven. In de periode tussen 1987 en 2020 is het volume van het gehele kustvak van de buitendelta (Figuur 4-14) afgenomen met 89 miljoen m³, oftewel een gemiddelde afname van 2,7 miljoen m³/jaar. Deze afname wordt vooral veroorzaakt door een groot verlies aan de zeezijde van de buitendelta en door verdieping van de uitstroom van de Vliestroom.

De actieve buitendelta vertoont een duidelijke tweedeling in gedrag. De zeewaartse rand, de zone tussen de NAP -10 m en -6 m contouren, neemt sterk in volume af (37 miljoen m³). Het buitendeltaplatform van de Wester- en Noordwestgronden, gedefinieerd als de zone tussen de NAP -6 tot -1 m contouren neemt juist met 22,5 miljoen m³ in volume toe. Deze toename gebeurt met name in de grote bankgebieden, die bestaan uit de aanlandingsbanken en centraal gelegen hogere bank op de Westergonden (o.a. Engelschoek). De centrale bank vertoont een sterke groei in omvang en volume van 28 miljoen m³.

De aanliggende eilandkusten zijn afgebakend door de zeewaartse ligging van de NAP -1m contour tot de landwaartse grens van de actieve zone. De eilandkusten van Vlieland en Terschelling vertonen beiden een kleine toename in volume van 2 en 1 miljoen m³ respectievelijk.



Figuur 4-14: De opgetreden sedimentatie-erosie tussen 1987 en 2020 (contouren zijn op basis van de 2020 bodem). Overgenomen uit (Elias, 2024).

4.5 Samenvatting

De belangrijkste bevindingen uit de volumeanalyse zijn als volgt:

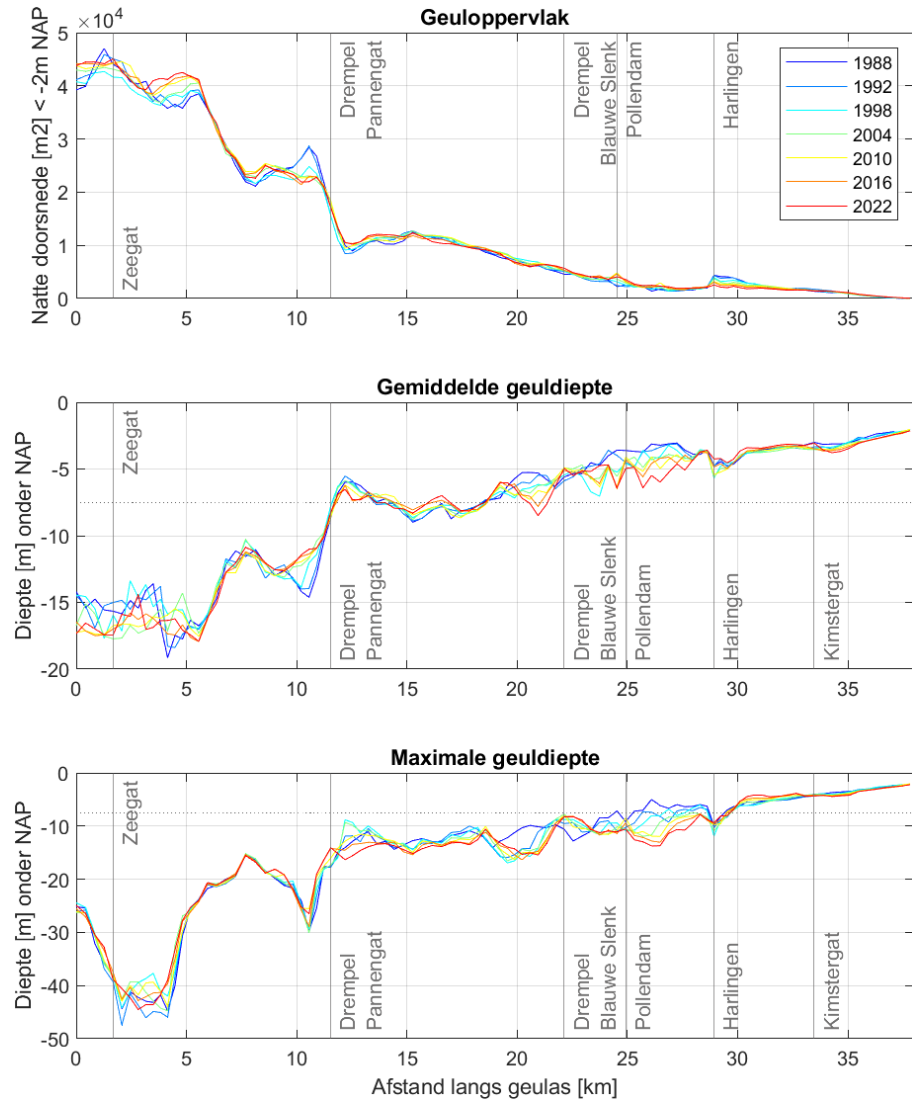
- Als geheel neemt de buitendelta sterk af in volume tussen 1987 en 2020 (-89 miljoen m³), vooral op de diepe vooroever, aan de rand van de buitendelta en in de diepe geulen. Het buitendeltaplatform, inclusief de aanlandingsbanken en de eilandkusten, neemt daarentegen in volume toe;
- Een deel van het sedimentverlies op de buitendelta wordt waarschijnlijk verklaard door sedimenttransport naar het bekken, waar het volume tussen 1992 en 2022 met 44 miljoen m³ is toegenomen. Op basis van een lineaire trend door alle datapunten wordt een opvulsnelheid van 1,23 Mm³/jaar vastgesteld;
- Door de verschuiving van het morfologisch wantij wordt het oppervlak van het Vlie bekken kleiner. Ook het plaat- en geulareaal neemt af in verhouding met het kleiner wordende bekken. Het geulvolume neemt af (of: opvulling vindt plaats in de geulen) en de gemiddelde plaathoogte neemt toe;
- Langs de vastelandskust nemen de platen in volume toe, voornamelijk door slibsedimentatie, als reactie op de afsluiting van de Zuiderzee. Centraal in het bekken vindt vooral erosie van de platen plaats, onder andere door verdieping van het wantij tussen het Vlie en het Eierlandse Gat. De platen langs de eilandkusten vertonen een wisselend gedrag, waarbij de platen in de keel groeien door uitwisseling met de buitendelta;
- Bevindingen op de schaal van het bekken als geheel geven weinig inzicht, omdat er verschil in gedrag is tussen verschillende plaatcomplexen. De ontwikkelingen moeten daarom op het niveau van individuele platen worden bekeken. Sommige platen, zoals de Vlake van Oosterbierum, groeien mee met zeespiegelstijging en zullen waarschijnlijk in de toekomst verder groeien. Voor andere platen is de toekomstige ontwikkeling moeilijk te voorspellen.

5 Morfologische ontwikkeling van de knelpunten

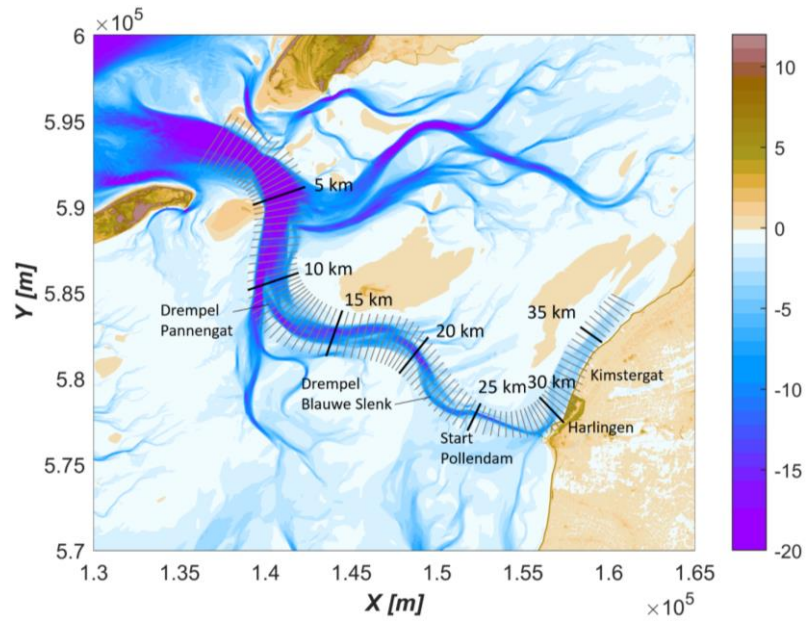
In de vorige twee hoofdstukken zijn de grootschalige ontwikkelingen in het bekken besproken. Deze ontwikkelingen vormen de context en randvoorwaarden om de individuele knelpunten in een breder perspectief te plaatsen. In dit hoofdstuk wordt ingezoomd op de morfologische ontwikkelingen van de knelpunten langs de vaarroute van Harlingen – Noordzee, waarin zich de knelpunten Pannengat, Blauwe Slenk, Geul langs Pollendam en Kimstergat bevinden.

De algemene ontwikkeling van de recente (1988-2022) geulkenmerken langs de vaarroute Harlingen – Noordzee is weergegeven in Figuur 5-1. Voor detailfiguren per deelgebied wordt verwezen naar Bijlage D. Vanaf het zeegat richting Harlingen nemen het geuloppervlak en de geuldiepte af. In het bekken neemt de maximale geuldiepte over het algemeen af van -20m (km. 7) naar -2 m aan het einde van het Kimstergat. De gemiddelde geuldiepte binnen de NAP -2m contour neemt af van rond de NAP -17m bij de keel naar NAP -2m in het meest landwaartse deel. De afname in diepte gaat sprongsgewijs tussen km 0 en 11. In dit deel splitst de geul zich in meerdere vertakkingen (zie Figuur 5-2).

Rond km 10 nemen zowel het oppervlak als diepte af over de jaren. Dit komt door de uitbreiding van het drempelgebied Pannengat en de afname van de komberging van het Inschot (zie Hoofdstuk 5.1). Na km 10 neemt het geuloppervlak en de gemiddelde/maximale geuldiepte significant af, hier is de overgang naar de aftakking richting Blauwe Slenk. Tussen km 11 en 19 blijft de geul constant in diepte (-7.5m), dit is ook de streefdiepte van de vaargeul en deze wordt met baggeren op peil gehouden. De drempel in de Blauwe Slenk (km 22) is met name zichtbaar waar de maximale geuldiepte de -7.5m streefdiepte raakt. Langs de Pollendam (tussen km 23 en 28) is de geul dieper geworden over de periode, dit is ook terug te zien in dwarsdoorsnedes van de geul langs Pollendam (deze worden besproken in hoofdstuk 0). Net voorbij Harlingen, richting het Kimstergat is een duidelijke afname van het geuloppervlak te zien door de sedimentatie langs de Friese vastelandskust en ophoging van de platen in dit gebied (dit wordt in hoofdstuk 5.4 toegelicht).



Figuur 5-1 Ontwikkeling van het geuloppervlak (< -2m NAP), gemiddelde en maximale geuldiepte voor doorsnedes langs de vaarroute Harlingen – Noordzee.



Figuur 5-2 Locaties van de doorsnedes weergegeven in Figuur 5-1.

5.1 Drempelgebied Pannengat

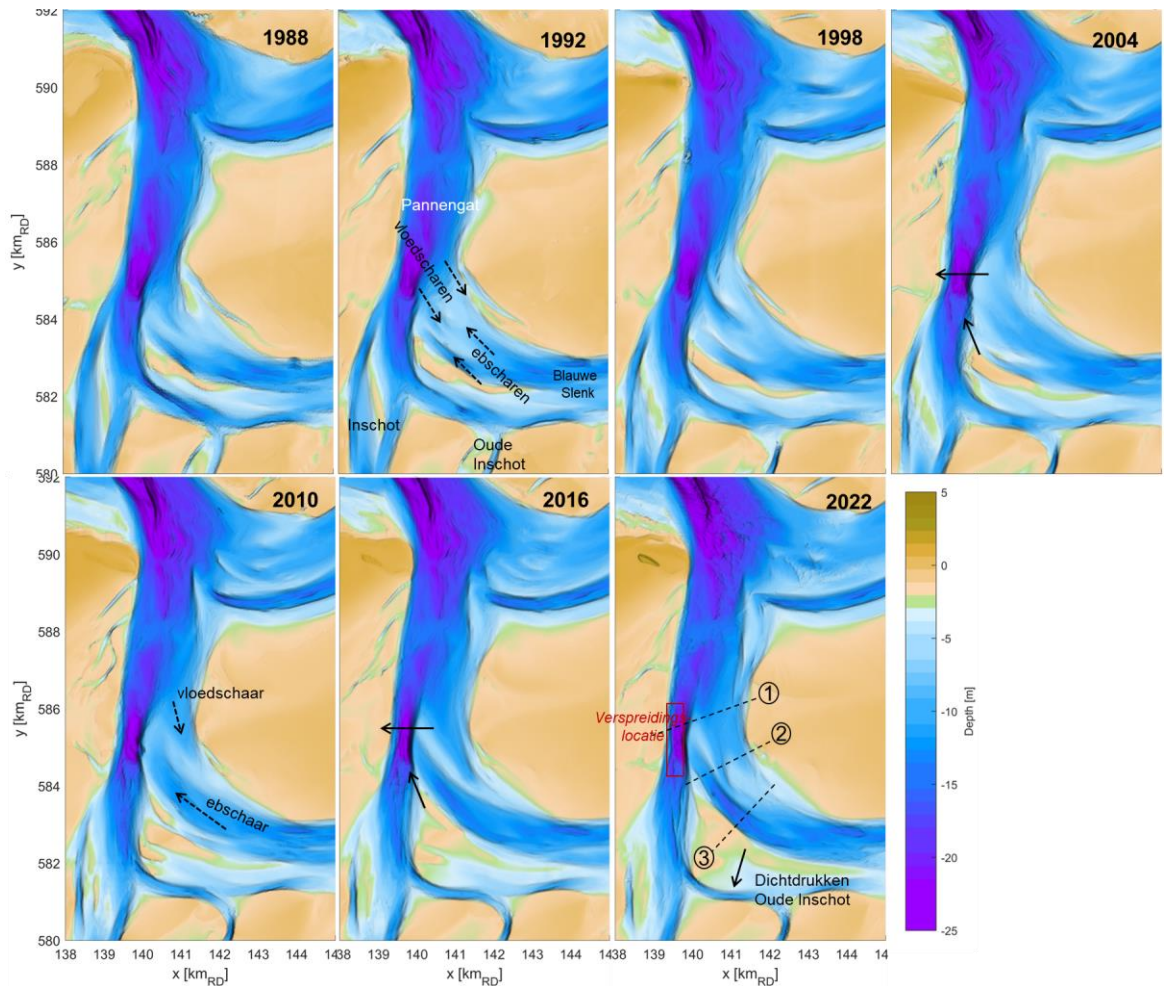
Via een breed drempelgebied maakt de Blauwe Slenk verbinding met de Vliestroom (voor de locatie, zie Figuur 5-3). De ebschaar van Blauwe Slenk ontmoet hier de vloedschaar Pannengat (aan de westzijde van Griend), waardoor het brede drempelgebied zich vormt. Het drempelgebied is in 2007 verdiept tot NAP-7,5 m om de toegankelijkheid van de haven van Harlingen te verbeteren (Mulder et al., 2005). Na de verdieping was tot 2015 baggeronderhoud nodig van 40.000 – 90.000 m³ per jaar. In de periode 2015-2022 was er geen onderhoud nodig, maar sinds 2022 wordt er weer een klein volume gebaggerd.

Ontwikkeling 1992 - 2022

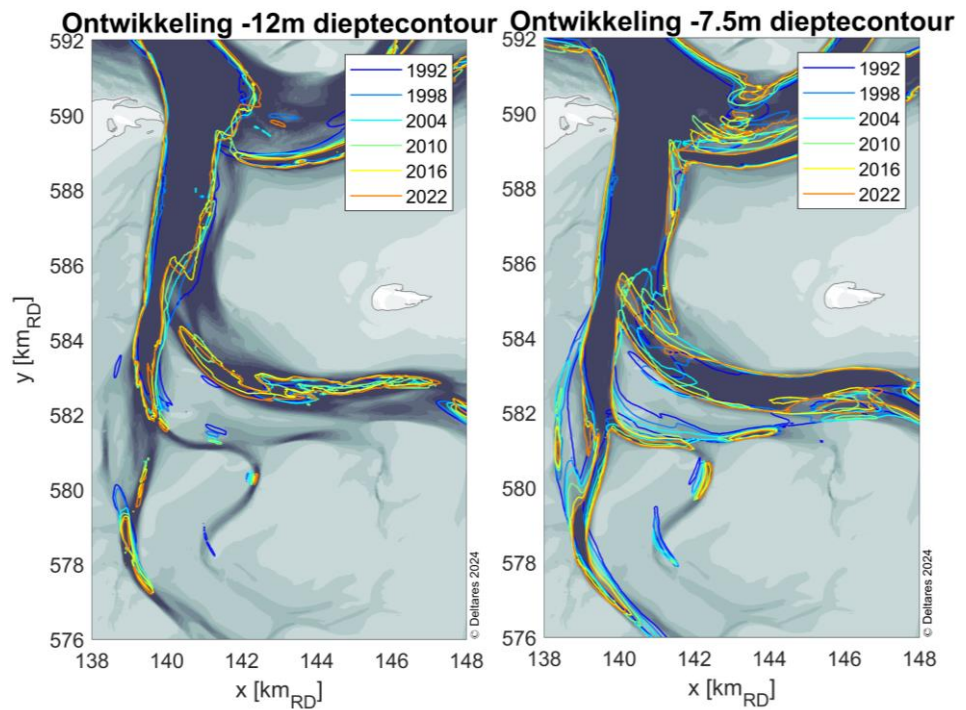
In kaarten van de bodemligging tussen 1992 en 2022 is het ondiepe drempelgebied bij Pannengat duidelijk zichtbaar als scheiding tussen de diepe delen van Vliestroom en Blauwe Slenk (Figuur 5-3). In 1992 is er een complex drempelgebied met twee ebscharen en twee vloedscharen gescheiden door drempelbanken. In de daarop volgende jaren doen zich grote veranderingen voor. Vanaf 2004 en 2010 is er een sterk ontwikkelde ebschaar, waardoor ook de diepere delen van de Blauwe Slenk direct verbinding maken met de Vliestroom. Dit kan een indicatie zijn dat de Blauwe Slenk-Vliestroom zich ontwikkelt als hoofdgeul. Vanaf 2010 begint er een vloedschaar te vormen ten noorden van de ebschaar, en vanaf 2016 vormt zich een duidelijke drempel tussen beide. Vanaf 2016 is de verbinding tussen de ebschaar en het Pannengat dieper. Dit heeft waarschijnlijk gezorgd voor de afname van het baggervolume in het Pannengat vanaf 2015.

Het drempelgebied tussen Blauwe Slenk met Vliestroom ontstaat doordat de stroming in Vliestroom en die in Blauwe Slenk elkaar hier ontmoeten (Figuur 5-5). De vloedstroming zoekt de weg van de minste weerstand, langs de westzijde van Griend en door de hoofdgeul. Relatief sterke ebstromingen zijn nog zichtbaar in het centrale deel van de Blauwe Slenk en komen samen met de ebstroming uit het Inschot bij het Pannengat. Er ontstaat zo een complex patroon van elkaar ontwijkende stromingen waardoor de kleine eb- en vloedscharen vormen (zie ook Van Veen, 1950). Deze kleine eb- en vloedscharen ofwel drempelgeulen en de tussenliggende drempelbanken karakteriseren het drempelgebied bij Pannengat.

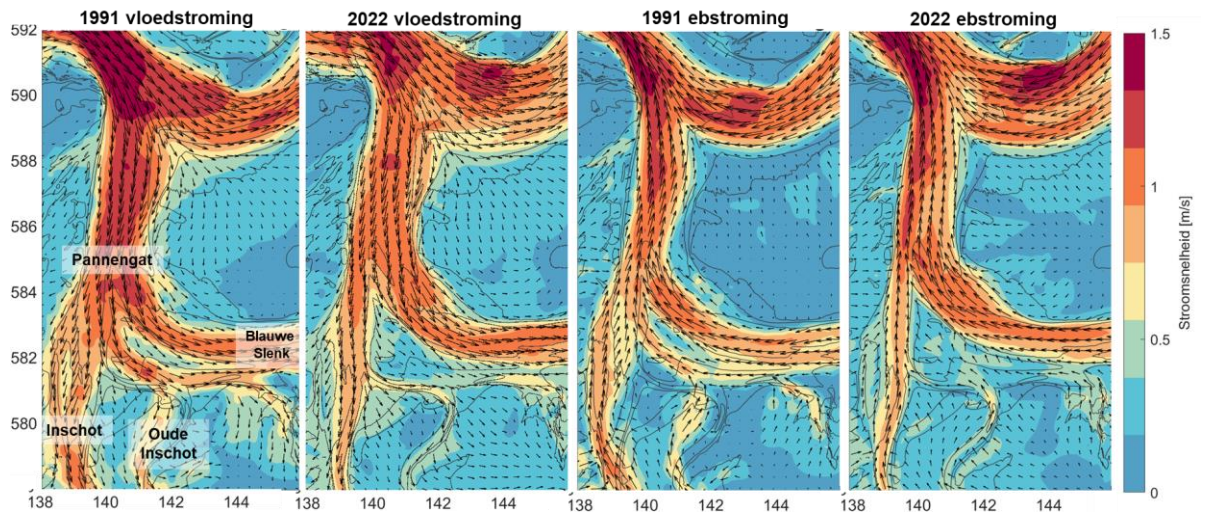
De ontwikkeling van het drempelgebied bij Pannengat hangt direct samen met de veranderingen in de aangrenzende geulensystemen. Het diepe deel van de Vliestroom loopt nog steeds in zuidelijke richting door, waarbij het vertakt in de geulen van het Inschot (zuidelijk gericht) en Oude Inschot (oostelijk gericht). Het ondiepe oostelijke deel van de Vliestroom vertoont een vertakking richting de Blauwe Slenk. Sinds 1988 wordt de geul het Oude Inschot opgevuld (Figuur 5-4) en nemen de debieten door de Inschot af doordat de komberging van het Inschot sterk aan het opvullen is (paragraaf 3.1 en Figuur 5-5). Na afsluiting van de Zuiderzee heeft het (Oude) Inschot zijn betekenis verloren en de rol is vrijwel geheel overgenomen door verbinding tussen Pannengat en Blauwe Slenk. De Inschot en met name het Oude Inschot zijn duidelijk ondieper geworden over de periode 1988 – 2022. De Oude Inschot wordt steeds verder opgevuld en dichtgedrukt door een grote bank die zich langs de noordzijde vormt (Figuur 5-3). Deze bank was al in 1992 zichtbaar, maar is duidelijk in omvang toegenomen in de 2022 bodem. Ook heeft de ontwikkeling van de eb- en vloedschaar gezorgd dat het drempelgebied zich heeft uitgebreid richting het westen, in de Vliestroom (Figuur 5-4). Hierbij verplaatst de westelijke geulwand van de Vliestroom ook richting het westen (dwarsdoorsnede 1 in Figuur 5-7), maar wordt het oppervlakte van de geul wel kleiner. Dit is het gevolg van de afname van de komberging en debiet van het Inschot.



Figuur 5-3 Bodemligging van de Blaauwe Slenk tussen 1988 en 2022 op basis van de Vaklodgingen.



Figuur 5-4 Ontwikkeling van de -12 m en -7,5 m dieptecontour van het gebied bij de drempel van Pannengat.

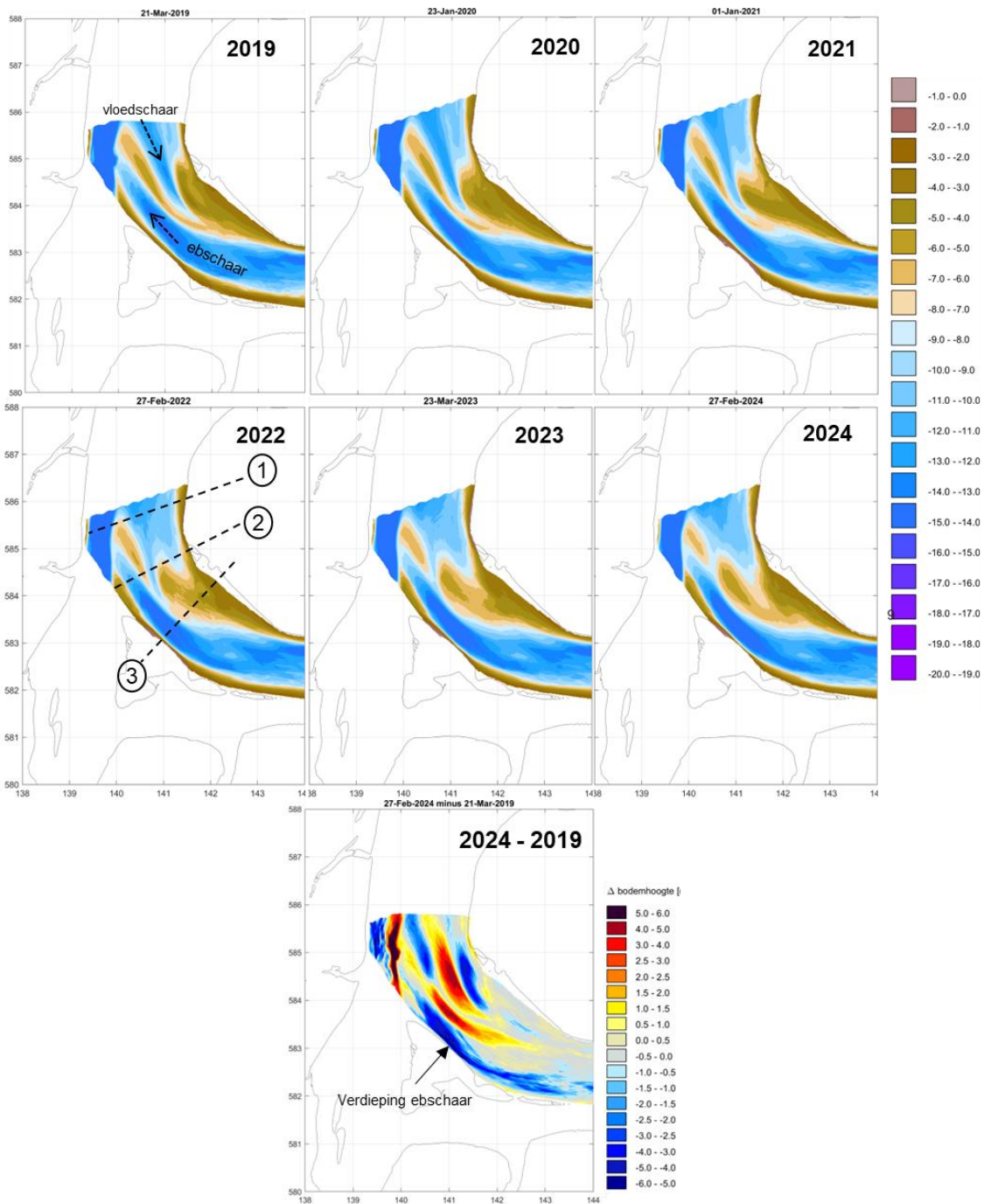


Figuur 5-5 Stroomsnelheden tijdens vloed (links) en eb (rechts) bij het drempelgebied Pannengat bij de bodem van 1991 en 2022.

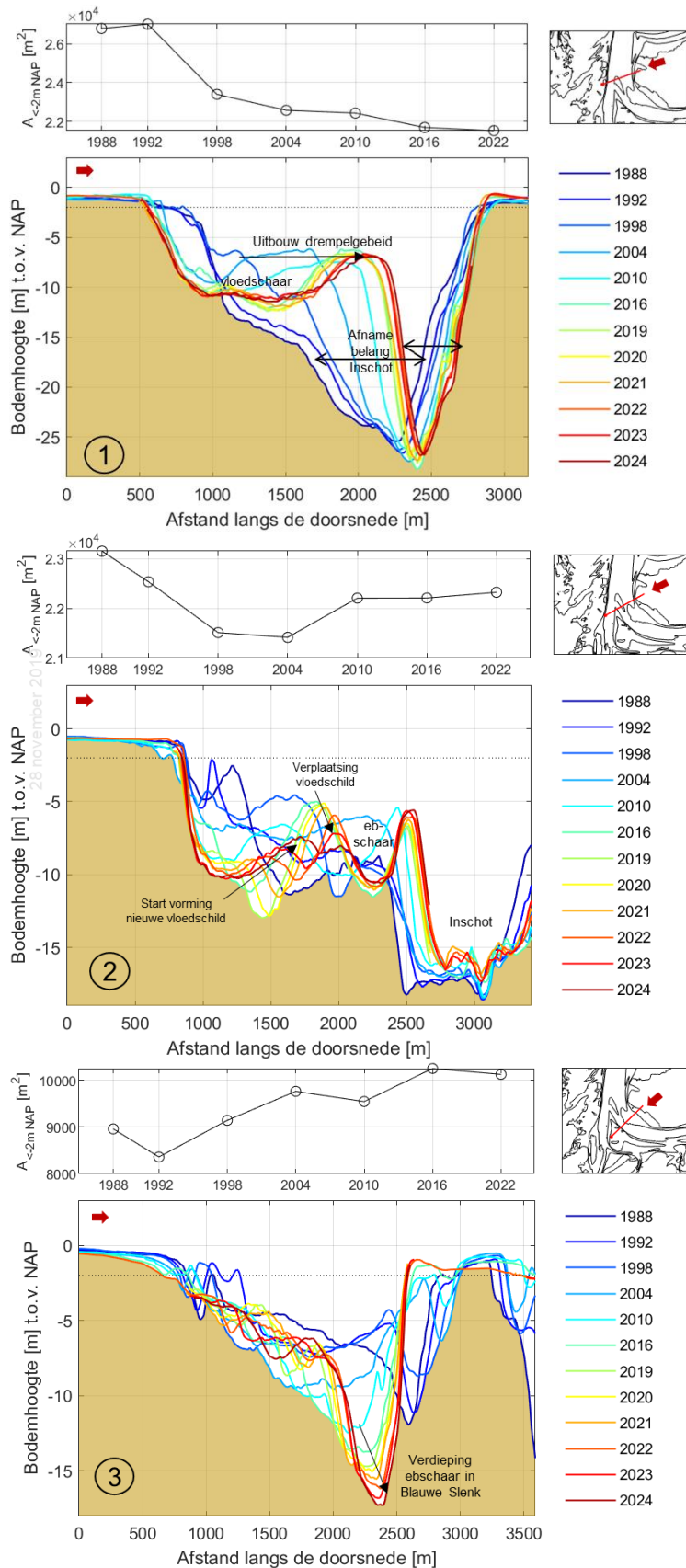
Recente ontwikkeling 2019 - 2024

Ook de huidige bodemontwikkelingen laten een actief drempelgebied zien (Figuur 5-6). In essentie bestaat de bodem (na het verzanden van het Inschot) in de periode 2019-2024 vrij consequent uit een dominante ebschaar aan de zuidzijde en een vloedschaar in het noordelijke deel. Hiertussen ligt een langgerekte drempelbank. De ebschaar vertoont over de gehele periode een verdieping van de buitenbocht en verondieping van de binnenbocht (Figuur 5-6 en Figuur 5-7, doorsnede 3). Het doorstroomoppervlakte van de geul nam tot 2016 toe, maar lijkt in de recente kaarten wel te stabiliseren.

De vloedschaar was in 2019 nog ver zuidelijk uitgebouwd. Er is dan slechts een kleine drempel tussen de eb- en vloedschaar aanwezig. Tussen 2019 en 2024 trekt de vloedschaar zich sterk terug en ontwikkelt er zich een breed en relatief ondiep drempelgebied als scheiding. Aan de noordzijde is de vloedschaar niet veel veranderd tussen 2019 en 2024 (Figuur 5-7, doorsnede 3). De oudere bodemkaarten (1988-2016, Figuur 5-3) laten zien dat de vloedschaar zich in deze periode vormde. Sinds 2016 treedt dan een vrijwel lineair gedrag op, waarbij de vloedschaar vrij stabiel in ligging en diepte blijft (Figuur 5-7, doorsnede 1). De drempel tussen de vloedschaar en het Inschot schuift wel steeds verder in westelijke richting op. Deze verplaatsing is groter aan de oostzijde van Inschot dan aan de westzijde, waardoor het Inschot iets smaller wordt. De diepte lijkt hierbij niet toe te nemen.



Figuur 5-6 Bodemligging van het drempelgebied bij Pannengat tussen 2019 en 2024 op basis van de Beheerlodingen. Onder: Sedimentatie – erosie kaart op basis van het verschil in bodemligging tussen 2024 en 2019.



Figuur 5-7 Doorsnede door het drempelgebied bij Pannengat, locaties van doorsnedes 1, 2 en 3 zijn weergegeven in Figuur 5-6. Doorsnedes zijn gemaakt van de Vaklodingen voor 1988 tot 2016, en de beheerlodingen van 2019 tot 2024. Het natte oppervlak (bovenste paneel) is berekend op basis van vaklodingen omdat de beheerlodingen niet de volledige doorsnede dekken.

Handelingsperspectief

Op lange termijn zou de overgang van hoofdgeul Vliestroom-Inschot naar Vliestroom-Blauwe Slenk als hoofdgeul een goede ontwikkeling kunnen zijn voor de bevaarbaarheid van de geul. Dit wil echter niet zeggen dat er op kortere termijn geen baggeronderhoud nodig is ten behoeve van de bevaarbaarheid.

In de recente bodemkaarten op basis van de Vak- en beheerlodingen zijn er twee voor het knelpunt ongunstige ontwikkelingen zichtbaar.

- 1 Het drempelgebied Pannengat neemt sterk in omvang toe, met een hoge uitloper die zich ver naar het noorden uitstrekt. Hierdoor wordt het drempelgebied veel langgerechter, met diepere en langere drempelgeulen en drempelbanken. Deze geulen zijn daardoor niet stabiel, wat resulteert in grote dynamiek in de drempelbanken, zoals te zien in Figuur 5-6. De grote dynamiek kan resulteren in leidt tot een grotere baggeropgave.
- 2 Aan de zuidzijde is de geul begrensd door een groot en daardoor robuust bankgebied, waardoor de geul zich niet makkelijk naar het zuiden kan verplaatsen. Aan de noordzijde van de ebschaar is een groot ondiep drempelgebied gevormd. Als de vloedschaar zich verder naar het zuiden ontwikkelt, zullen de banken ook naar het zuiden worden gedrukt, wat kan leiden tot het dichtdrukken van de ebschaar. Hierdoor ontstaan nieuwe, grotere drempels in de ebschaar en mogelijk nieuwe verbindingen met Inschot. In dit scenario zouden de drempels tijdelijk in omvang toenemen, wat zou resulteren in grotere baggervolumes.

Voor het drempelgebied Pannengat wordt verwacht dat periodiek baggeronderhoud in de komende jaren weer nodig kan zijn. Dit zal waarschijnlijk om een beperkt volume gaan vanwege de relatief diepe ligging van de drempelgeulen en -banken. De dynamiek van de drempel er echter ook voor zorgen dat de overgang tijdelijk verdiept, waardoor baggeronderhoud tijdelijk niet nodig is.

Gezien de dynamiek in de drempelbanken zal het nuttig zijn om te monitoren welke drempelgeul en drempelbank het meest gunstig zijn voor de vaarroute, en het baggeronderhoud daar op aan te passen.

5.2 Drempelgebieden Blauwe Slenk

De Blauwe Slenk strekt zich uit vanaf de Vliestroom richting Harlingen. De geul vertoont daarbij twee knikpunten. Het eerste knikpunt ligt tussen de Grienderwaard en Hendrik Tjaarsplaat. Hier verandert de oriëntatie van de geul van een oostelijke naar een zuidelijke richting. Ten zuiden hiervan roteert de geul dan terug naar een meer zuidoostelijke richting en sluit dan aan op de geul langs de Pollendam, waarvan de ligging door de Pollendam is gefixeerd. De geul neemt hierbij sterk in omvang, diepte en oppervlak af.

Op beide locaties waar de geul een sterke rotatie vertoont zijn drempelgebieden ontstaan. Het noordelijke drempelgebied tussen Grienderwaard en de Hendrik Tjaarsplaat wordt gekenmerkt door een kleinere vloedschaar aan de noordzijde en een grote ebschaar aan de zuidzijde. De gevormde drempel is relatief klein en diep. De uitloper van de ebschaar doet dienst als verspreidingslocatie voor de baggerspecie. Dit verklaart mede de grote sedimentatie die hier zichtbaar is (Figuur 5-8).

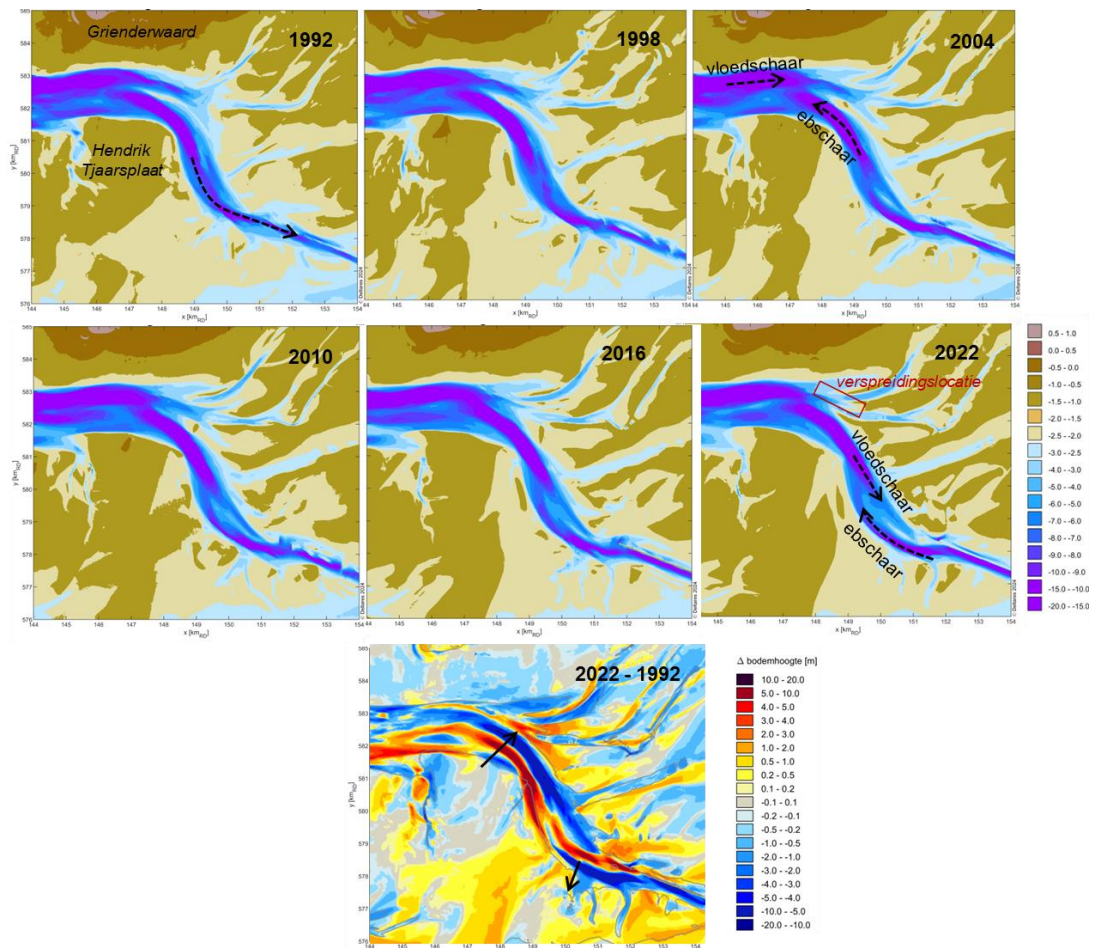
Bij de zuidelijke drempel van Blauwe Slenk wordt jaarlijks 300.000 – 500.000 m³ gebaggerd om de vaarweg op NAP-7,5 m te houden (Figuur 2-6). Het baggervolume is hier groot, ruim de helft van het totale jaarlijkse baggeronderhoud in dit kombergingsgebied, en varieert sterk. Een reden hiervoor is dat dit drempelgebied relatief lang en ondiep is en de geulen klein. Hierdoor zijn deze dynamisch en vergen veel onderhoud om de vaardiepte te behouden. Dit past bij de morfologische dynamiek van een drempelgebied (Van der Vegt en Cleveringa, 2022).

Zuidelijke drempelgebied ten westen van de Pollendam

Tussen 1992 en 2022 blijft de karakteristieke ligging van de geulen in dit gebied behouden, maar zijn er wel grote morfologische veranderingen zichtbaar (Figuur 5-8). De vaste ligging wordt veroorzaakt door twee ophangpunten. De noordzijde ligt ingeklemd tussen de grote platen Grienderwaard en Hendrik Tjaarsplaat die de geul hier in oostelijke richting houden. In het zuiden moet de geul aansluiten op de vaste ligging van de Pollendam.

In 1992 loopt de geul Blauwe Slenk nog als een vloeiende lijn richting de Geul langs de Pollendam en is het drempelgebied nog diep en nauwelijks ontwikkeld. In de opeenvolgende bodems is duidelijk de toename in omvang van het drempelgebied zichtbaar. In het knikpunt van de geul ontwikkelen zich een elkaar ontwijkende eb- en een vloedschaar met drempelbanken eromheen, waarbij de vaarroute door de ebschaar loopt. Waarschijnlijk speelt de uitbocht bij de kop van de Pollendam hierin een belangrijke rol. De Blauwe Slenk vormt niet langer een doorgaande geul, maar vertoont een duidelijke knik bij de Pollendam. Deze knik wordt mede veroorzaakt door de uitbouw van de aanliggende Ballastplaat, waardoor de Blauwe Slenk naar het zuiden gedrukt wordt. Er ontwikkelt zich een langgerekt drempelgebied, hetgeen een aanzienlijke baggerinspanning vereist om op de gewenste vaardiepte te behouden.

De baggerwerkzaamheden vinden plaats op het ebschild van de ebschaar. In 2007 is deze drempel verdiept tot NAP-7,5 m om de toegankelijkheid van de haven van Harlingen te verbeteren. Sinds de verdieping is baggeronderhoud nodig om de vaardiepte van NAP-7,5 m te behouden; voor de verdieping werd er niet gebaggerd op de drempel. De verdieping in 2007 heeft niet geresulteerd in een significante verandering of verdwijning van de drempel; uit de bodemkaarten van 2010, 2016 en 2022 blijkt dat het drempelgebied nog steeds aanwezig is (Figuur 5-8). Het is onduidelijk of de voortdurende uitbocht van de ebschaar het gevolg is van de verdieping of een autonome trend betreft.



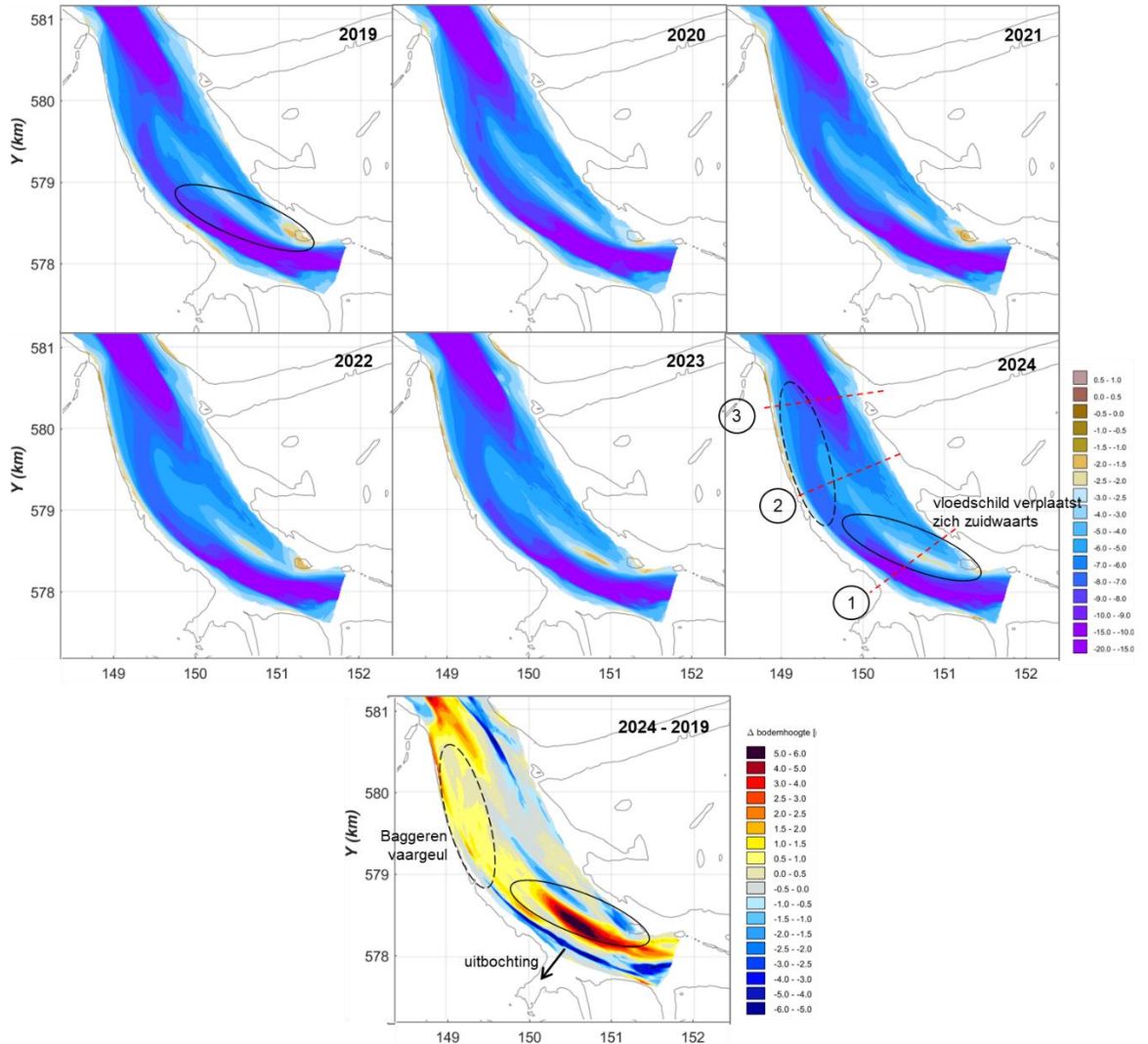
Figuur 5-8 Bodemligging van de Blauwe Slenk tussen 1992 en 2022 op basis van de Vaklodingen. Onder: Sedimentatie – erosie kaart op basis van het verschil in bodemligging tussen 2022 en 1992.

De bodemligging van de afgelopen 6 jaar laat zien dat de uitbocht van de ebschaar gestaag doorzet (Figuur 5-9 en doorsnede 1 in Figuur 5-10), en het vloedschild van de vloedschaar zich hierbij zuidwaarts verplaatst en de ebschaar wegdrukt. Op basis van de trend in de verplaatsing van het dwarsprofiel (doorsnede 1 in Figuur 5-10) wordt verwacht dat de uitbocht voorlopig zal aanhouden. Het verder uitbochten van vaarwegen leidt tot een toename van de lengte van de vaargeul. Tot op heden lijkt het verlengen van de vaarweg geen invloed te hebben op de omvang van het baggerbezwaar (Figuur 2-6). Ter hoogte van de uitbocht ligt de vaargeul op NAP -11m diepte, waardoor baggeronderhoud (nog) niet nodig is. Sinds 2019 neemt echter de breedte van de geul af (doorsnede 1 in Figuur 5-10), waarbij de geulwand aan de binnenzijde (bij de vloedschaar) zich meer verplaatst dan de geulwand aan de buitenzijde.

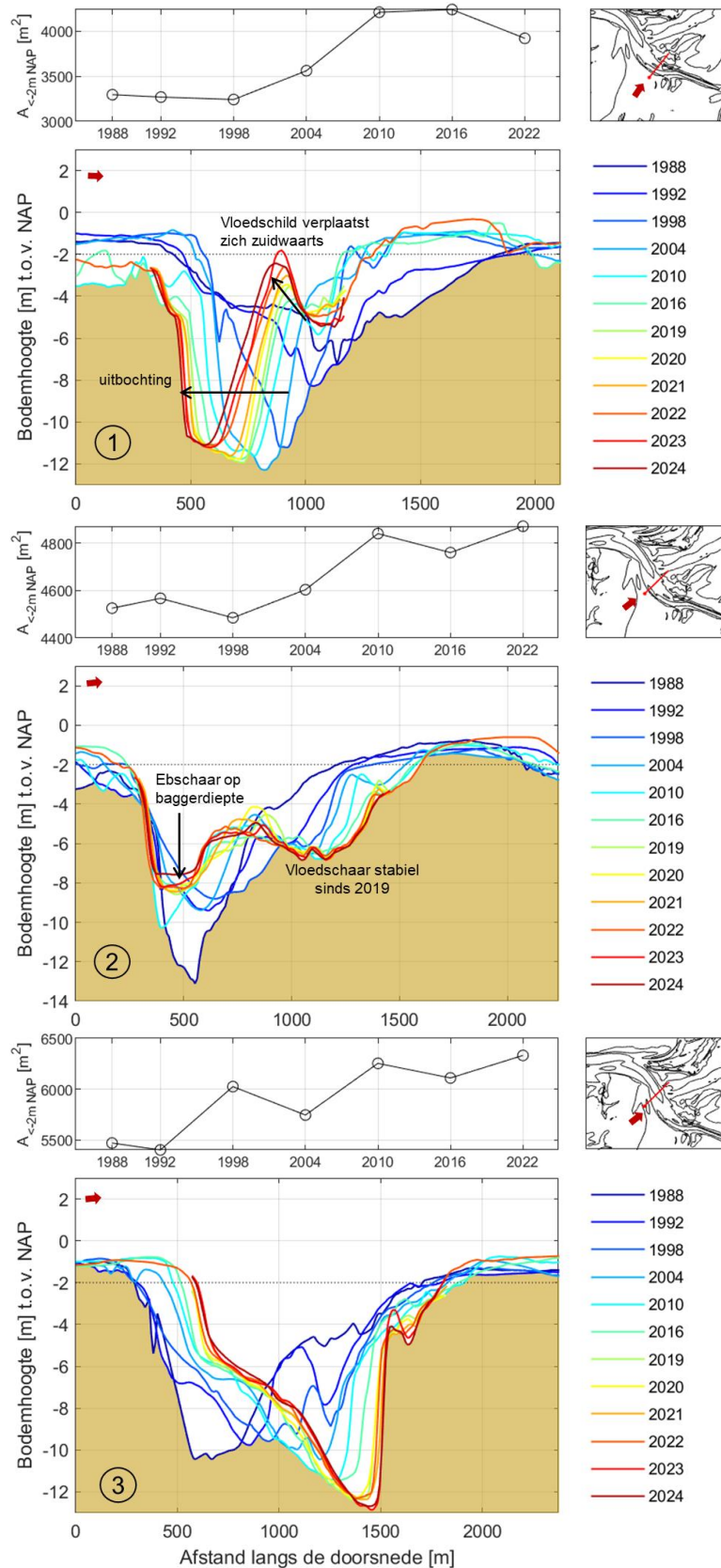
Ter hoogte van de drempel in de Blauwe Slenk waar wordt gebaggerd is geen uitbocht te zien (Figuur 5-9 en doorsnede 2 in Figuur 5-10). De verdieping in 2007 heeft geresulteerd in een toename van het doorstroomoppervlak. Sinds de verdieping is het oppervlak van de geul vrijwel constant en ligt het profiel stabiel. Ook de vloedschaar lijkt in recente jaren stabiel in positie en diepte (variërend tussen NAP-4 en -6 m, doorsnede 1 en 2 in Figuur 5-10). Het vloedschild en drempel zijn meer dynamisch.

Ten noorden hiervan, doorsnede 3 in Figuur 5-10, zijn de positie en het doorstroomoppervlak van de geul significant veranderd tussen 1988 en 2019 na vorming van de eb- en vloedschaar (Figuur 5-8). In recente jaren (sinds 2020) lijkt de geul stabiel.

Een mogelijk extra gevolg van het uitbochten van de ebschaar is gerelateerd aan de combinatie met de noordelijke verplaatsing van het wantij (Figuur 3-3). Ten zuiden van de uitbochting van de ebschaar is het morfologisch wantij in de laatste twee bodemkaarten (2016 en 2022) significant noordwaarts verplaatst. Het is de vraag of dit effect zal hebben op de stroming door de Blauwe Slenk, en potentieel significante morfologische ontwikkelingen zal veroorzaken. Op dit moment is het moeilijk om het effect van deze toekomstige ontwikkeling te kwantificeren.



Figuur 5-9 Bodemligging van het zuidelijk drempelgebied in de Blauwe Slenk tussen 2019 en 2024 op basis van de Beheerlodingen. Onder: Sedimentatie – erosie kaart op basis van het verschil in bodemligging tussen 2024 en 2019.



Figuur 5-10 Doorsnede door het zuidelijke drempelgebied bij Blauwe Slenk, locaties van doorsneden 1, 2 en 3 zijn weergegeven in Figuur 5-9. Doorsneden zijn gemaakt van de Vaklodingen voor 1988 tot 2016, en de beheerlodingen van 2019 tot 2024. Het natte oppervlak (bovenste paneel) is berekend op basis van vaklodingen omdat de beheerlodingen niet de volledige doorsnede dekken.

Handelingsperspectief

Sinds de verdieping in 2007 wordt er een significant volume gebaggerd in de Blauwe Slenk. Het volume varieert sterk per jaar, maar laat geen duidelijke toe- of afnemende trend zien. De reden voor het relatief hoge baggervolume is dat dit drempelgebied relatief lang en ondiep is en de drempelgeulen klein. De eb- en vloed-schaar hebben hier een vrij stabiele positie, welke waarschijnlijk in stand gehouden wordt door het baggeren van de drempel. Wanneer er niet gebaggerd zou worden, zou waarschijnlijk de autonome ontwikkeling van vloed- en ebscharen zorgen voor een nieuwe kortere geulverbinding (via de vloed-schaar). Het baggeren van de vaargeul beperkt deze autonome ontwikkeling. Deze ontwikkeling werd eerder ook geconstateerd bij de vaarweg Holwerd-Ameland (Van Til, 2018).

Het grote baggervolume en mogelijk de lengte van de vaarweg geeft motivatie voor een alternatieve strategie. Zoals ook geconstateerd door Van der Vegt en Cleveringa (2022), is een mogelijk alternatief het aanleggen (baggeren) van een kortsluiting door de bestaande vloed-schaar. Momenteel heeft de vloed-schaar een ondiepe drempel waarmee de aanleg van een kortsluiting een forse baggerinspanning zou kosten. Op basis van de recente bodemprofielen wordt ook niet verwacht dat de vloed-schaar zich autonoom verder ontwikkelt tot een diepere geul die de rol van de huidige vaargeul (ebschaar) overneemt. Een snelle en (zeer) grove berekening suggereert dat de ingreep ongeveer 0.4 - 0.8 miljoen m³ zal bedragen, gebaseerd op een lengte van 2 km, een diepte van 2-4 m en een breedte van 100 m. Het is echter moeilijk te voorspellen of het baggerbezwaar na een dergelijke inspanning voor langere tijd zal afnemen. Op de lange termijn kan zich opnieuw een eb- en vloed-schaar vormen, vergelijkbaar met wat in het verleden is gebeurd.

Het is de aanbeveling om de morfologische ontwikkeling van dit knelpunt (voorlopig) te blijven monitoren. Bij significante veranderingen in de morfologie (toename in baggerbezwaar, versnelling in uitbocht ebschaar, autonome verdieping van de vloed-schaar of vernauwing van de geul bij de aansluiting naar de Pollendam), kan de kortsluiting door de bestaande vloed-schaar een goed alternatief zijn.

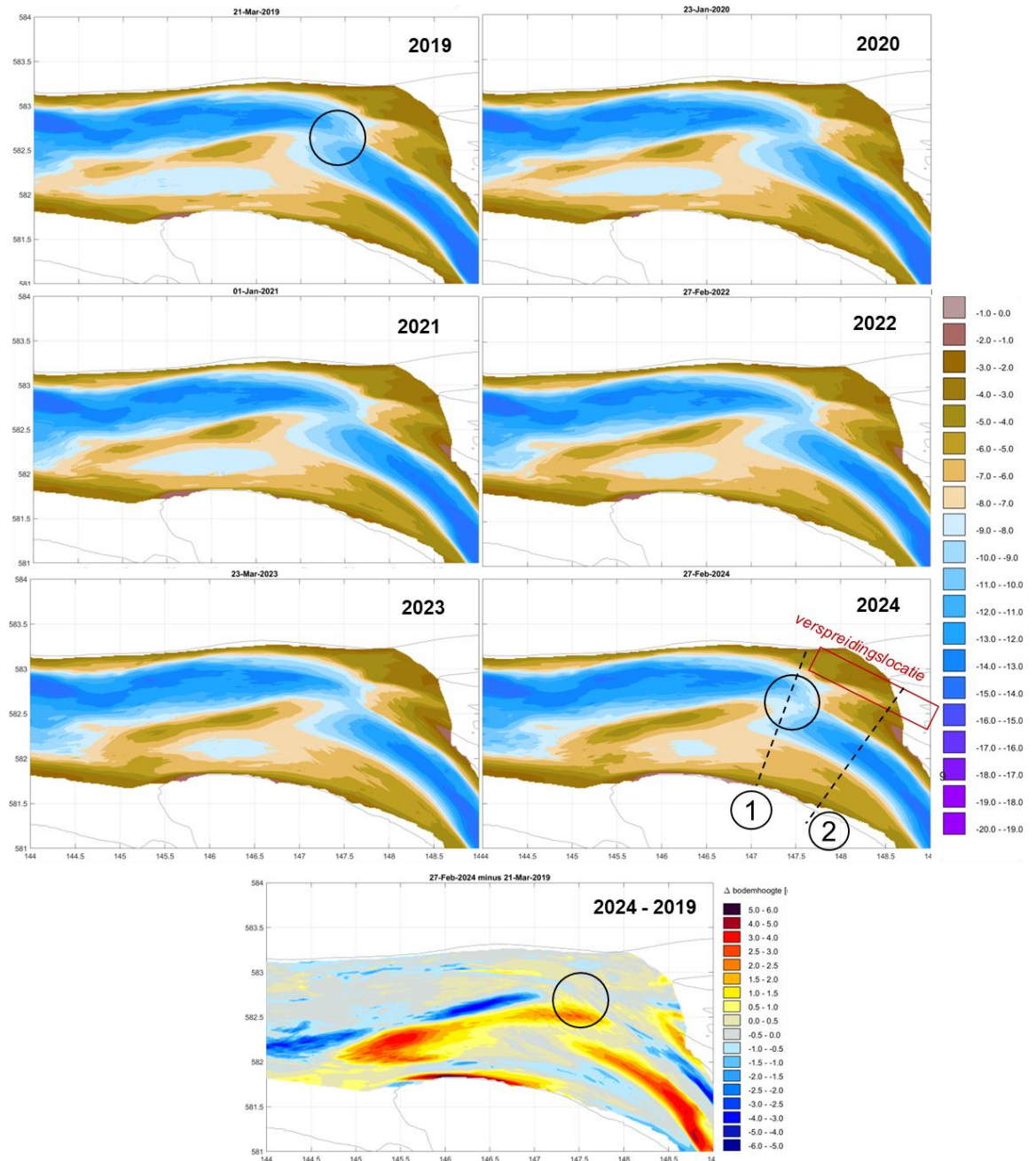
Tweede (noordelijke) drempelgebied

Naast het drempelgebied ten westen van de Pollendam is er in het noordelijk deel van de Blauwe Slenk een tweede drempelgebied, tussen de Grienderwaard en Hendrik Tjaarsplaat (Figuur 5-8). In 1992 is er een drempel aanwezig tussen de eb- en vloed-schaar. Deze drempel lijkt langzaam te verdiepen, en in 2016 is er een diepe en doorgaande verbinding tussen de eb- en vloed-schaar. In de meest recente bodemkaart van 2022 lijkt de drempel zich weer te vormen.

Recente bodemkaarten tussen 2019 en 2024 laten de ontwikkeling van de drempel en de bijbehorende eb- en vloed-schaar zien (Figuur 5-11). De verbinding tussen de eb- en vloed-schaar wordt ondieper door de vorming van een drempel (zwarte cirkel in Figuur 5-11). In dwarsdoorsnede 1 (Figuur 5-12) is te zien dat de bodemhoogte van de drempel zich heeft ontwikkeld van NAP-10 m in 2019 tot NAP-8,2 m in 2024. Als deze trend zich voortzet, zal baggeronderhoud nodig zijn in de komende 5 jaar om de vaarweg op NAP-7,5 m diepte te houden. Op korte termijn zal dit waarschijnlijk een beperkt baggervolume zijn, gezien het kleine oppervlak in vergelijking met de zuidelijke drempel van de Blauwe Slenk.

Op de lange termijn kan het baggerbezwaar toenemen als de drempel zich verder ontwikkelt en in hoogte en oppervlakte toeneemt. Er bestaat echter ook de mogelijkheid dat de drempel op natuurlijke wijze weer zal verdwijnen. In 1992 was er ook een drempel aanwezig, welke in 2016 was verdwenen (dwarsdoorsnede 1 in Figuur 5-12). De geul van de ebschaar verplaatst zich sinds 1998 in noordoostelijke richting (Figuur 5-8 en dwarsdoorsnede 2 in Figuur 5-12), en deze ontwikkeling zet zich voort in recente jaren (Figuur 5-11). Het doorstroomoppervlak is

afgenomen, terwijl de debieten door de Blauwe Slenk en in de modelsommen min of meer gelijk zijn gebleven.



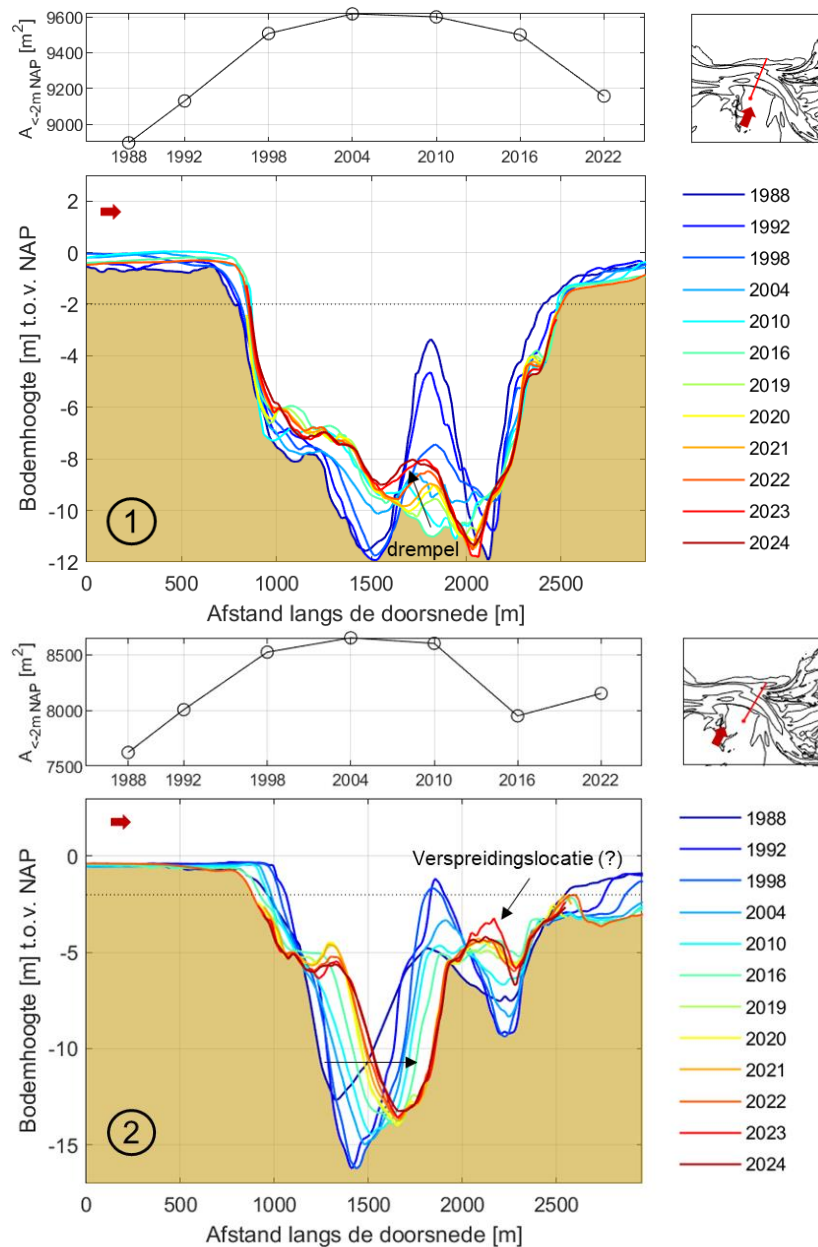
Figuur 5-11 Bodemligging van het noordelijk drempelgebied in de Blauwe Slenk tussen 2019 en 2024 op basis van de Beheerlodingen. Let op dat de kleurschaal zo is gekozen dat de overgang van de blauwe naar bruine kleur op de maximale vaardiepte van NAP -8 m ligt. Onder: Sedimentatie – erosie kaart op basis van het verschil in bodemligging tussen 2024 en 2019.

Voor de ontwikkeling van de drempel is het ook van belang dat ten noordoosten van de drempel, op de uitloper van de vloodschaar, de verspreidingslocatie Blauwe Slenk ligt. Het volume dat bij de verspreidingslocatie Blauwe Slenk wordt aangebracht varieert sterk, tussen de 55.000 en 373.000 m³ per jaar over de periode 2019 en 2023 (Tabel 2-2). In 2022 en 2023 is het verspreidingsvolume sterk toegenomen. In de bodemkaarten is het effect van de verspreidingsvolumes moeilijk waar te nemen. Mogelijk is het verspreidingsvolume in 2023 zichtbaar in dwarsdoorsnede 2 in Figuur 5-12.

Het is mogelijk dat het sediment dat wordt verspreid op de verspreidingslocatie, bijdraagt aan de ontwikkeling van de drempel. Op basis van de beschikbare metingen en modelsommen in deze studie is het niet mogelijk om hier een uitspraak over te doen.

Handelingsperspectief

Op korte termijn zou er een nieuw baggervak kunnen ontstaan bij de drempel ten zuiden van het verspreidingsvak Blauwe Slenk. Verwachting wordt dat dit initieel om een beperkt baggervolume zal gaan, wegens de relatief kleine en diepe gevormde drempel. Hoe de drempel en het bijbehorende baggerbezwaar zich in op lange termijn zullen ontwikkelen, is echter onzeker. Het is aan te raden om kritisch te kijken naar een mogelijke relatie tussen de aanwezigheid van het verspreidingsvak op deze locatie en de drempelvorming.



Figuur 5-12 Doorsnede door het noordelijke drempelgebied bij Blauwe Slenk, locaties van doorsneden 1 en 2 zijn weergegeven in Figuur 5-11. Doorsneden zijn gemaakt van de Vaklodingen voor 1988 tot 2016, en de beheerlodingen van 2019 tot 2024. Het natte oppervlak (bovenste paneel) is berekend op basis van vaklodingen omdat de beheerlodingen niet de volledige doorsnede dekken.

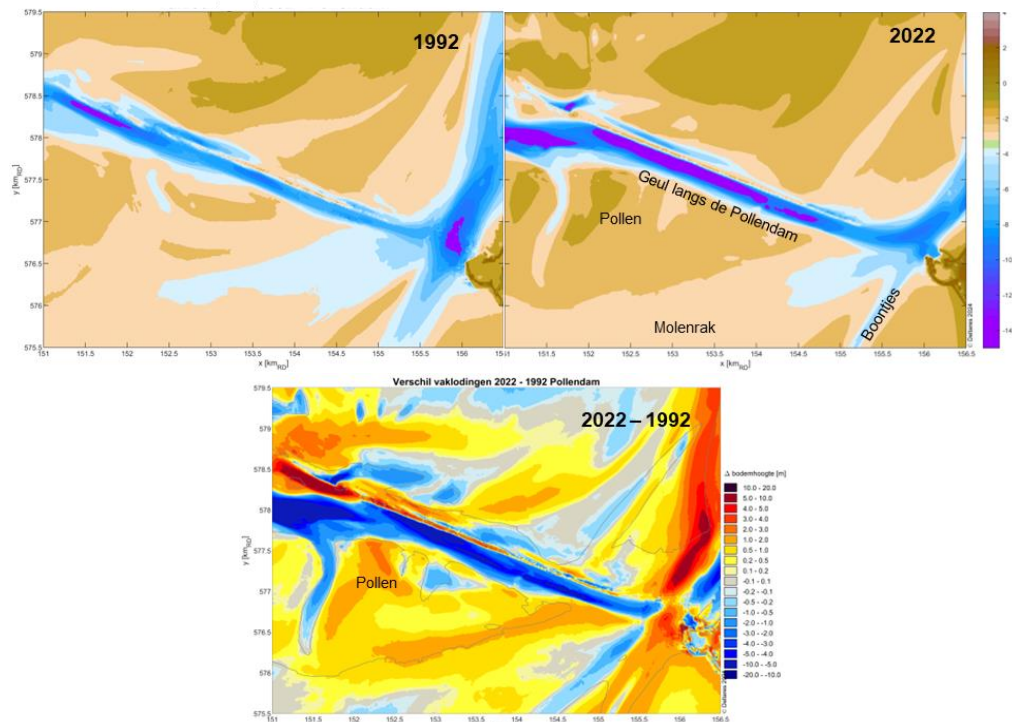
5.3 Geul langs Pollendam

De Pollendam ligt ten westen van de haven van Harlingen, en is in 1874-1875 aangelegd om de geul op diepte te houden (zie ook paragraaf 2.2.2). Er vormde een geul ten zuiden van de dam, de geul langs de Pollendam, die tot heden wordt gebruikt als vaargeul naar de haven van Harlingen. In 1930 was de diepte NAP -3,6 m tot NAP -3,9 m en de breedte 50 m. Sinds de verdieping in 2007 (Mulder et al., 2005) is de streefdiepte NAP -7,5 m en de breedte 100 m (Oost et al, 2019, Van der Vegt en Cleveringa, 2022). Aan het landwaartse einde van de dam nabij de haven van Harlingen is baggeronderhoud nodig om de vaargeul op diepte te houden, gemiddeld wordt er 60.000 tot 120.000 m³ per jaar gebaggerd bij de Geul langs de Pollendam.

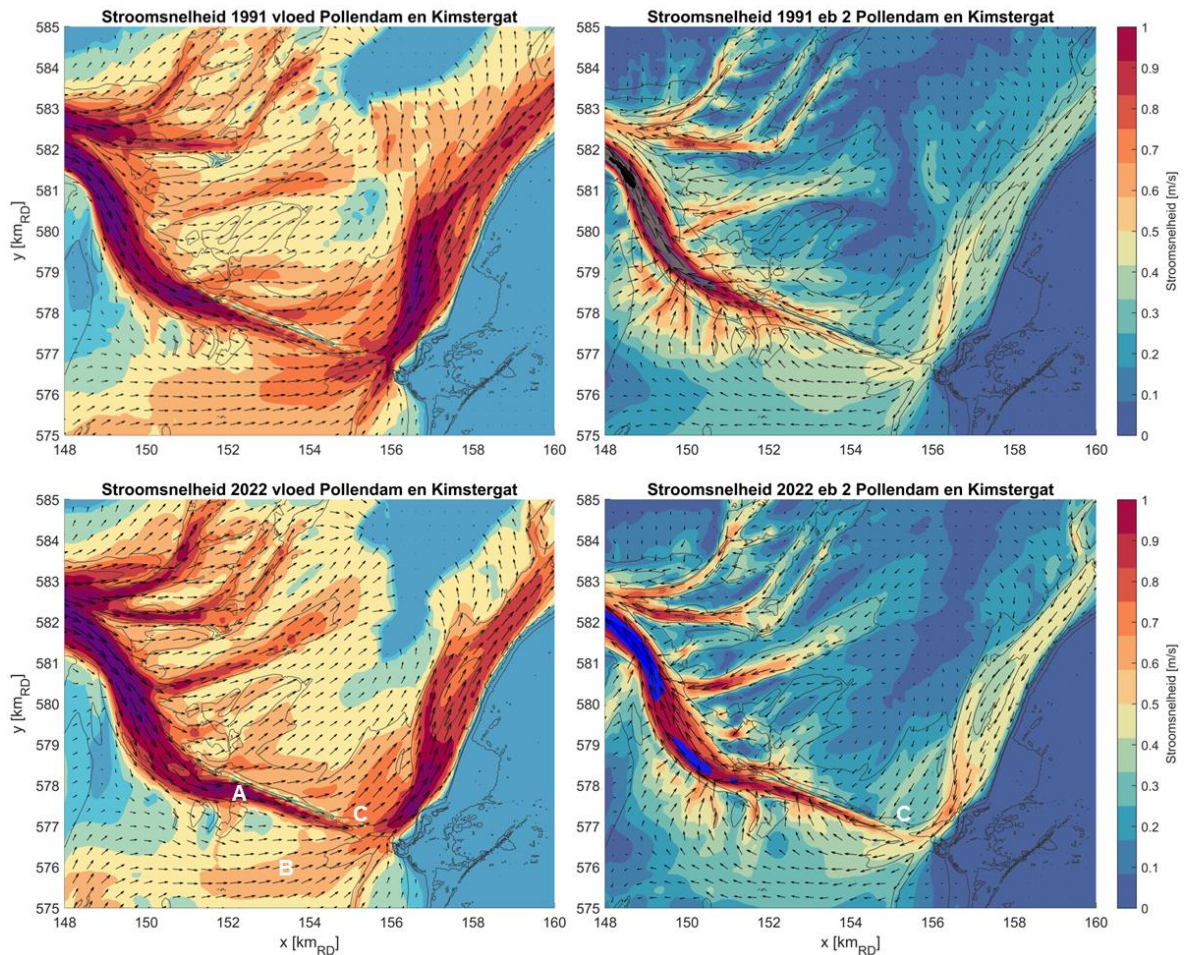
Ontwikkeling 1992 - 2022

De Geul langs de Pollendam ligt stabiel in positie door de aanwezigheid van de Pollendam (Figuur 5-13). De geul is flink verdiept sinds 1992. Ook zijn er ten westen van de Pollendam grote veranderingen in de bodemligging te zien door de uitbocht van de ebschaar bij de Blauwe Slenk, en de daardoor veranderde aansluiting met de Geul langs de Pollendam.

In het gebied ten zuiden en zuidwesten van de Pollendam treden de grootste verschillen op in het platengebied Pollen, dat toeneemt in hoogte en zich oostwaarts uitbreidt richting Harlingen (Figuur 5-13). Dit wordt ook gereflecteerd in het verplaatsen van het wantij tussen het Marsdiep en het Vlie (Hoofdstuk 3.2). Het Molenrak neemt over de periode 1992 en 2022 sterk in hoogte toe, waardoor de lokale komberging op termijn zal afnemen. De toename in hoogte van plaatgebied ten zuiden van de Pollendam resulteert in een afname van de stroming over het plaatgebied tussen 1991 en 2022 (B in Figuur 5-14).



Figuur 5-13 Bodemligging van de Geul langs de Pollendam tussen 1992 en 2022 op basis van de Vaklodingen. vaklodingen van 1998, 2004, 2010 en 2016 zijn hier niet weergegeven vanwege de slechte interpolatie van de smalle geul op het 20x20m Vaklodingen raster. In Bijlage D3 zijn de kaarten te vinden. Onder: Sedimentatie – erosie kaart op basis van het verschil in bodemligging tussen 2022 en 1992.



Figuur 5-14 Stroomsnelheden tijdens vloed (links) en eb (rechts) in het Kimstergat in 1991 (boven) en 2022 (onder).

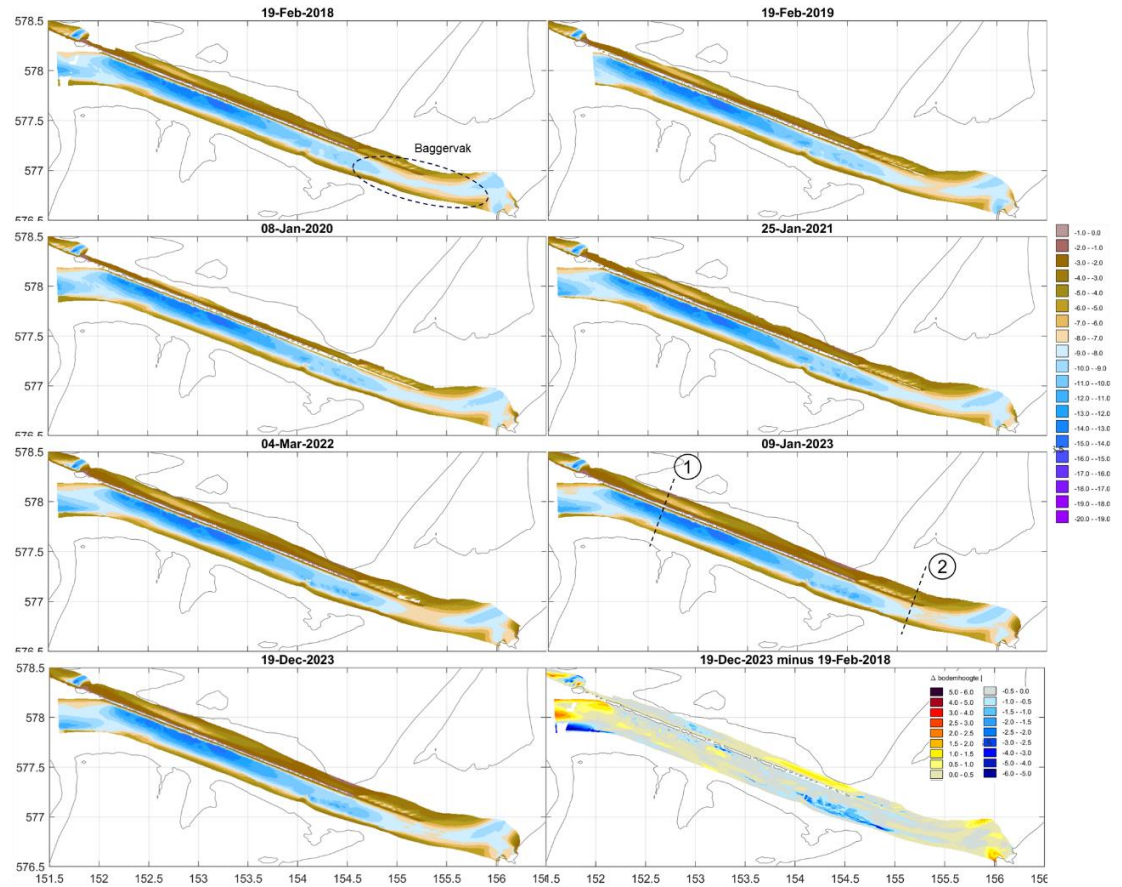
Recente ontwikkeling 2019 – 2024

De bodemligging van de Geul langs de Pollendam vertoont beperkte verschillen over de periode 2019 – 2024 (Figuur 5-15). Het westelijke deel van de geul is dieper, en is over de periode 1992 – 2022 sterk verdiept naar NAP-14 m langs de Pollendam (doorsnede 1 in Figuur 5-16). De verdieping wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een toename van de stroming langs de Pollendam (A in Figuur 5-14). In de afgelopen 5 jaar lijkt de verdieping gestopt, en is geuldiepte stabiel (Figuur 5-15). Extra doorsnedes van de geul langs Pollendam zijn te vinden in Bijlage D.4. Baggeronderhoud bij het westelijke deel van de geul langs de Pollendam is niet nodig geweest, en zal naar verwachting op korte termijn ook niet nodig zijn.

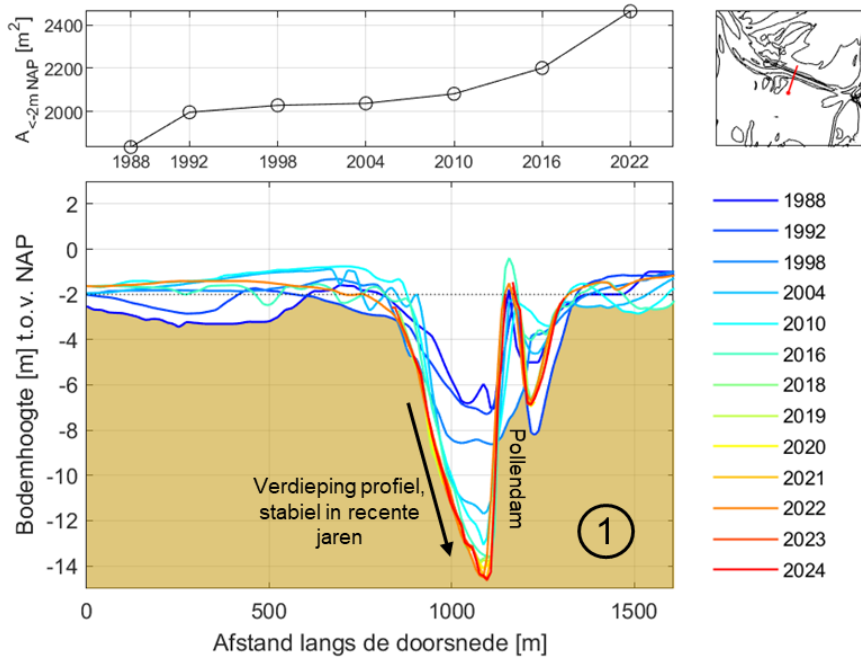
Richting het oosten, tussen het landwaartse einde van de Pollendam en de haven van Harlingen, vindt deze verdieping echter niet meer plaats en wordt de geul op diepte gehouden door baggeronderhoud (Figuur 5-15 en doorsnede 2 in Figuur 5-17). Bij dit deel van de geul is een afname (en gradiënt) in de stroomsnelheden te zien net voor de haven van Harlingen, zowel tijdens eb als vloed (C in Figuur 5-14). Tijdens vloed komt de stroming vanuit het Molenrak en Geul langs de Pollendam samen, en versnelt net voorbij Harlingen bij de ingang van het Kimstergat. Bij eb is er divergentie van de stroming net voor de haven, richting Molenrak en Pollendam. Dit zou kunnen verklaren waarom er op deze locatie depositie van sediment is, en er baggeronderhoud nodig is.

Het jaarlijks baggervolume bij de Geul langs de Pollendam varieert sterk, en laat geen duidelijke toe- of afnemende trend zien. Het ophogen van het plaatgebied ten zuiden van de

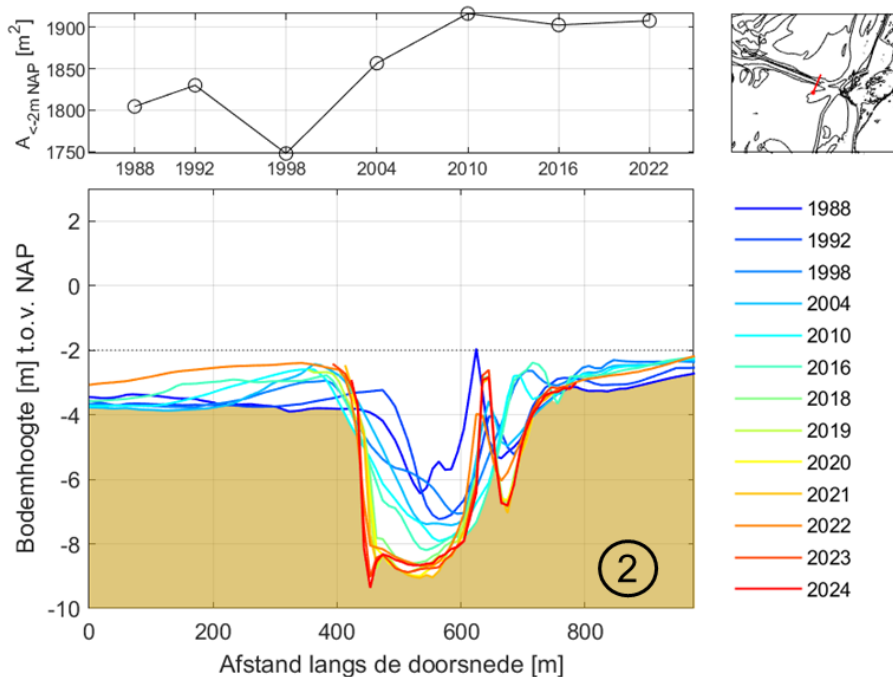
geul (Pollen en Molenrak) en afname van de omvang van het Kimstergat (zie volgende paragraaf), leidt tot een afname van het kombergingsvolume. Dit lijkt voorsnog nog niet te resulteren in een toename van het baggerbezwaar van de Geul langs de Pollendam. Het handelingsperspectief voor dit baggervak is sterk gerelateerd aan de ontwikkelingen in het Kimstergat, en zal in de volgende paragraaf worden toegelicht.



Figuur 5-15 Bodemligging van de Geul langs de Pollendam tussen 2019 en 2024 op basis van de Beheerlodingen. Let op dat de kleurschaal zo is gekozen dat de overgang van de blauwe naar bruine kleur op de maximale vaardiepte van NAP -8 m ligt. Onder: Sedimentatie – erosie kaart op basis van het verschil in bodemligging tussen 2024 en 2019.



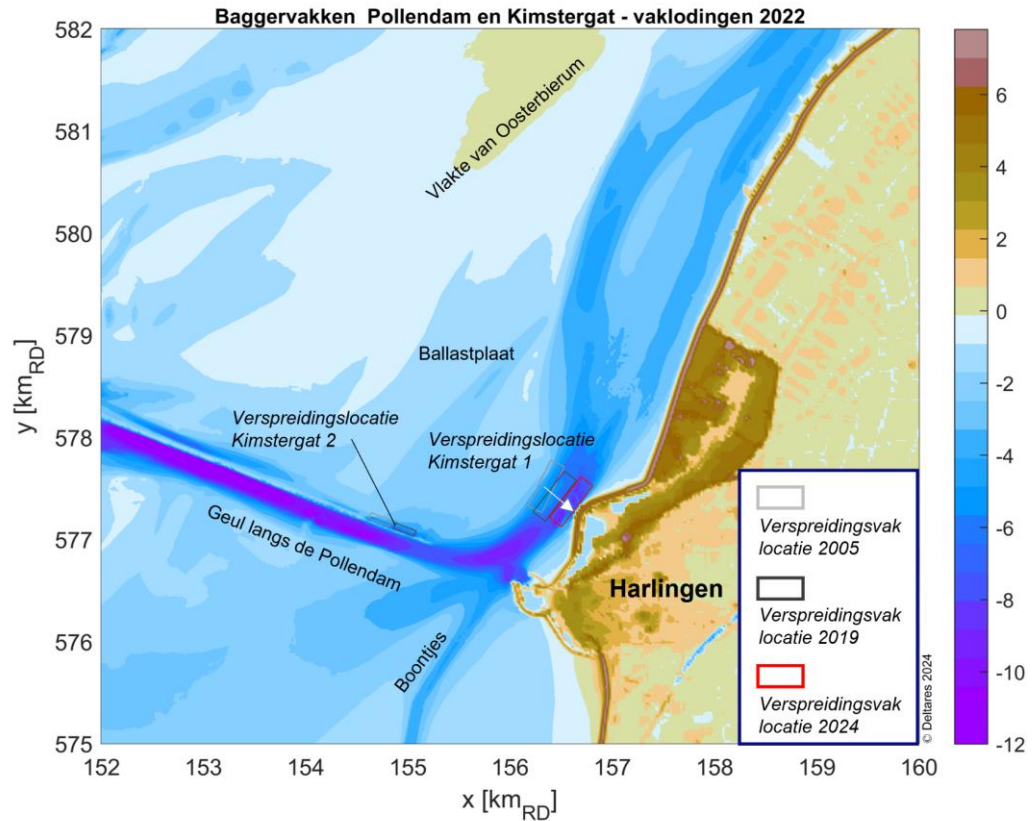
Figuur 5-16 Doorsnede door de Geul langs Pollendam langs de Pollendam tussen 1988 en 2024. Vanaf 2018 zijn beheerlodingen gebruikt waar beschikbaar. Het natte oppervlak (bovenste paneel) is berekend op basis van vaklodingen omdat de beheerlodingen niet de volledige doorsnede dekken.



Figuur 5-17 Doorsnede door de Geul langs Pollendam dichtbij Harlingen: de gebaggerde bodem is duidelijk in de doorsnede te zien op -8.5 m NAP. tussen 1988 en 2024. Vanaf 2018 zijn beheerlodingen gebruikt waar beschikbaar. Het natte oppervlak (bovenste paneel) is berekend op basis van vaklodingen omdat de beheerlodingen niet de volledige doorsnede dekken.

5.4 Kimstergat (verspreidingslocatie)

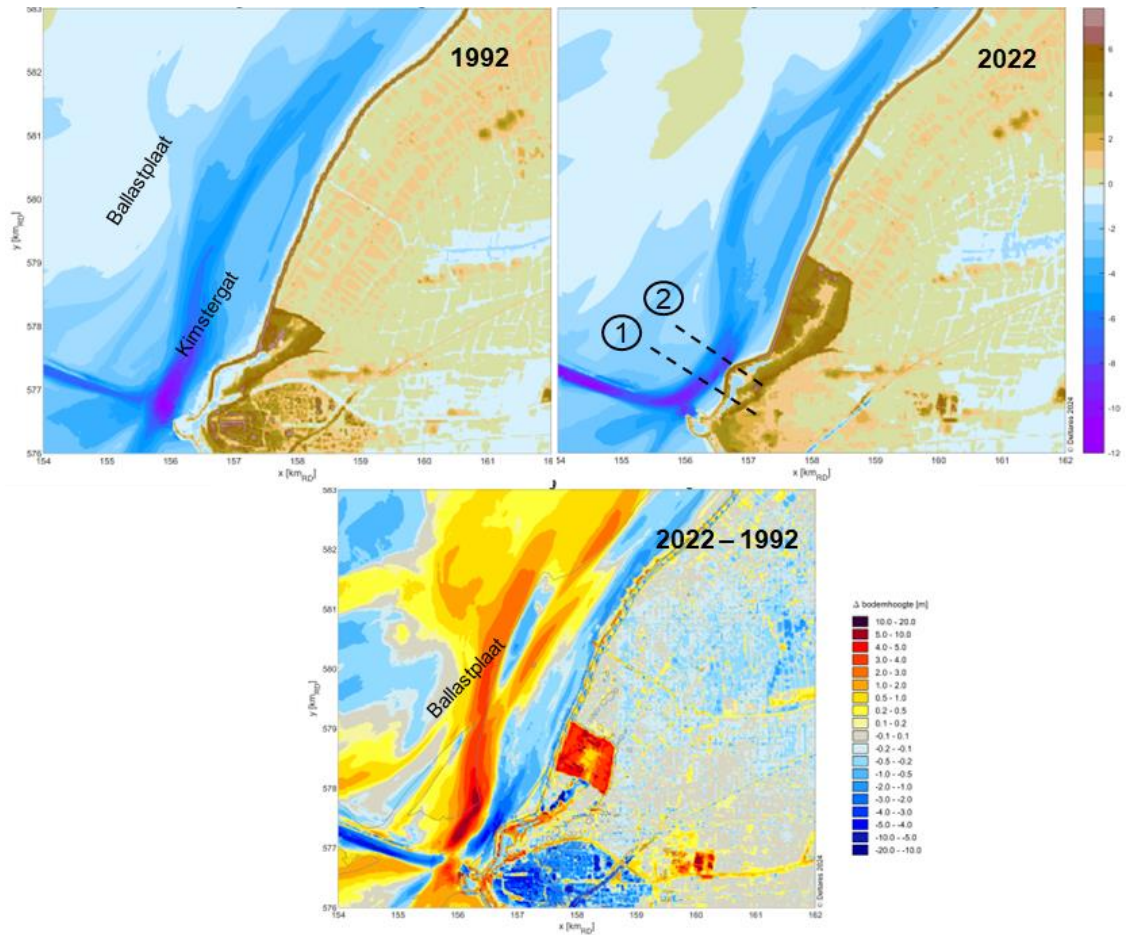
Het Kimstergat loopt van Harlingen naar het noordoosten langs de Friese vastelandskust. Bij de ingang van het Kimstergat ligt verspreidingslocatie Kimstergat (Figuur 5-18) dat veel gebruikt wordt voor het verspreiden van baggerspecie uit baggeronderhoud bij de Geul van Pollendam, Boontjes en door de haven van Harlingen. Jaarlijks wordt hier 110.000 - 406.000 m³/jaar zandige specie verspreid door Rijkswaterstaat. Daarnaast wordt 0,7 – 1,2 miljoen m³/jaar slibrijke specie verspreid door de haven van Harlingen (Cleveringa, 2024; Baptist et al., 2019). Verondieping van deze geul heeft ertoe geleid dat de verspreidingslocatie in de afgelopen jaren al meerdere keren is verplaatst. Vanwege de opvulling van het gebied zijn er zorgen over de geschiktheid van het Kimstergat als verspreidingslocatie in de toekomst.



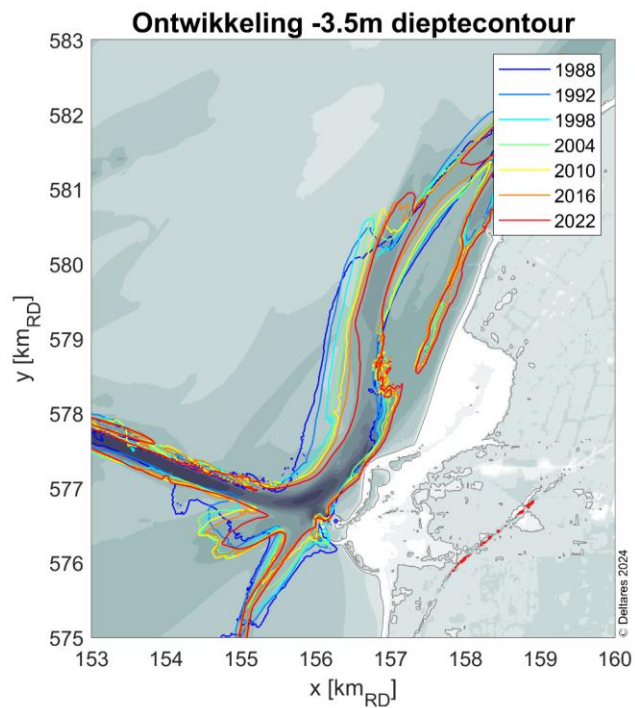
Figuur 5-18 Overzicht locatie verspreidingsvakken Kimstergat. Onderliggende bodemkaart is op basis van de 2022 Vaklodingen.

Ontwikkeling 1992 - 2022

Het Kimstergat ligt ingeklemd tussen de Friese kust in het oosten en het plaatcomplex Vlakte van Oosterbierum/Ballastplaat in het westen. De Ballastplaat, die naast het Kimstergat ligt, hoogt op en breidt in oostelijke richting uit, waardoor het Kimstergat steeds sterker tegen de kust gedrukt wordt (Figuur 5-19). Deze ontwikkeling maakt onderdeel uit van een grotere trend van sedimentatie langs de Friese vastelandskust. De omvang van het Kimstergat neemt al af sinds de afsluiting van de Afsluitdijk en gaat samen op met de afname van het kombergingsvolume in de Vlakte van Oosterbierum. Uit de volume-analyse blijkt dat het plaatcomplex bestaande uit de Vlakte van Oosterbierum en de Ballastplaat sinds 1992 toeneemt in volume, oppervlakte en hoogte (zoals beschreven in Hoofdstuk 4.3). De oriëntatie van het Kimstergat bij de haven van Harlingen roteert in recente jaren in noordoostelijke richting (Figuur 5-20). Het Kimstergat lijkt zich hiermee meer op de geul langs de Pollendam te oriënteren en minder op de Boontjes en het Molenrak.



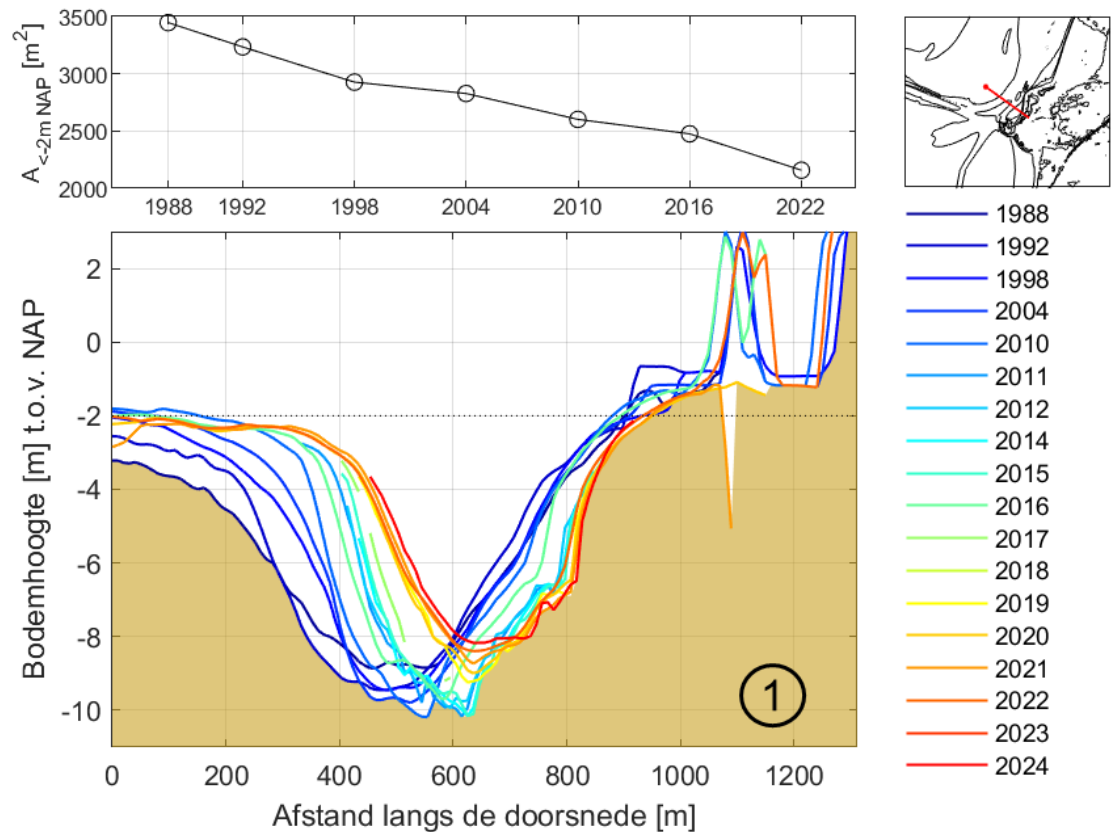
Figuur 5-19 Bodemligging van Kimstergat tussen 1992 en 2022 op basis van de Vaklodingen. Onder: erosie-sedimentatiekaart van het Kimstergat tussen de vaklodingen van 1992 en 2022.



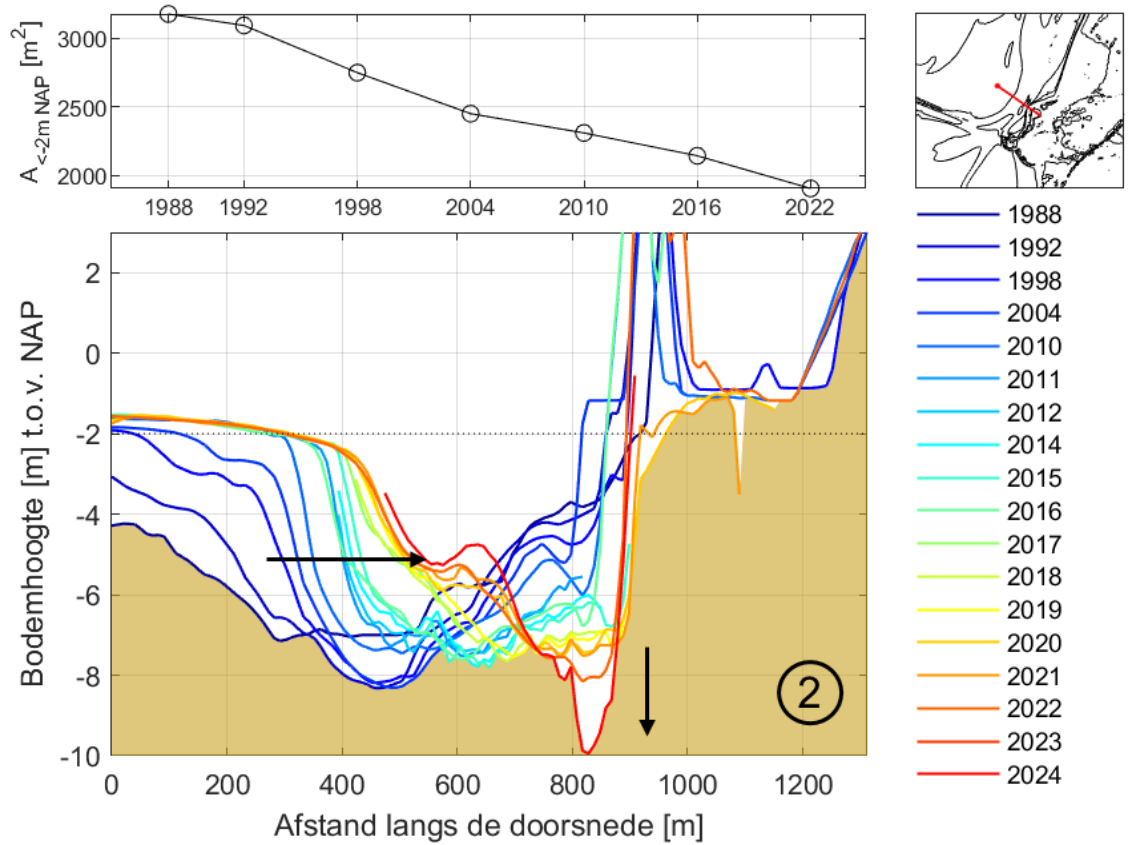
Figuur 5-20 Ontwikkeling van de -3.5 m dieptecontour van het gebied van het Kimstergat.

Door de oostelijke uitbreiding van de Ballastplaat wordt het Kimstergat richting de kust gedrukt. Hierbij neemt de natte doorsnede sterk af en wordt de geul ondieper (Figuur 5-21). Ter hoogte van het verspreidingsvak is het Kimstergat dusdanig ver richting het oosten gemigreerd dat deze inmiddels direct tegen de dijk aan ligt (Figuur 5-22). Hoewel de gemiddelde diepte afneemt, neemt de maximale geuldiepte hier lokaal toe en wordt de geulwand steiler. De grootste afname van natte doorsnede en geuldiepte vindt plaats in het zuidelijke deel van het Kimstergat, nabij het verspreidingsvak (Figuur 5-23). Het doorstroomoppervlakte in sinds 1988 gehalveerd, en verloopt vrijwel lineair. Extrapolatie van deze lineaire trend geeft aan dat over 30 – 40 jaar het doorstroomoppervlakte (onder de NAP -2 m) nihil is.

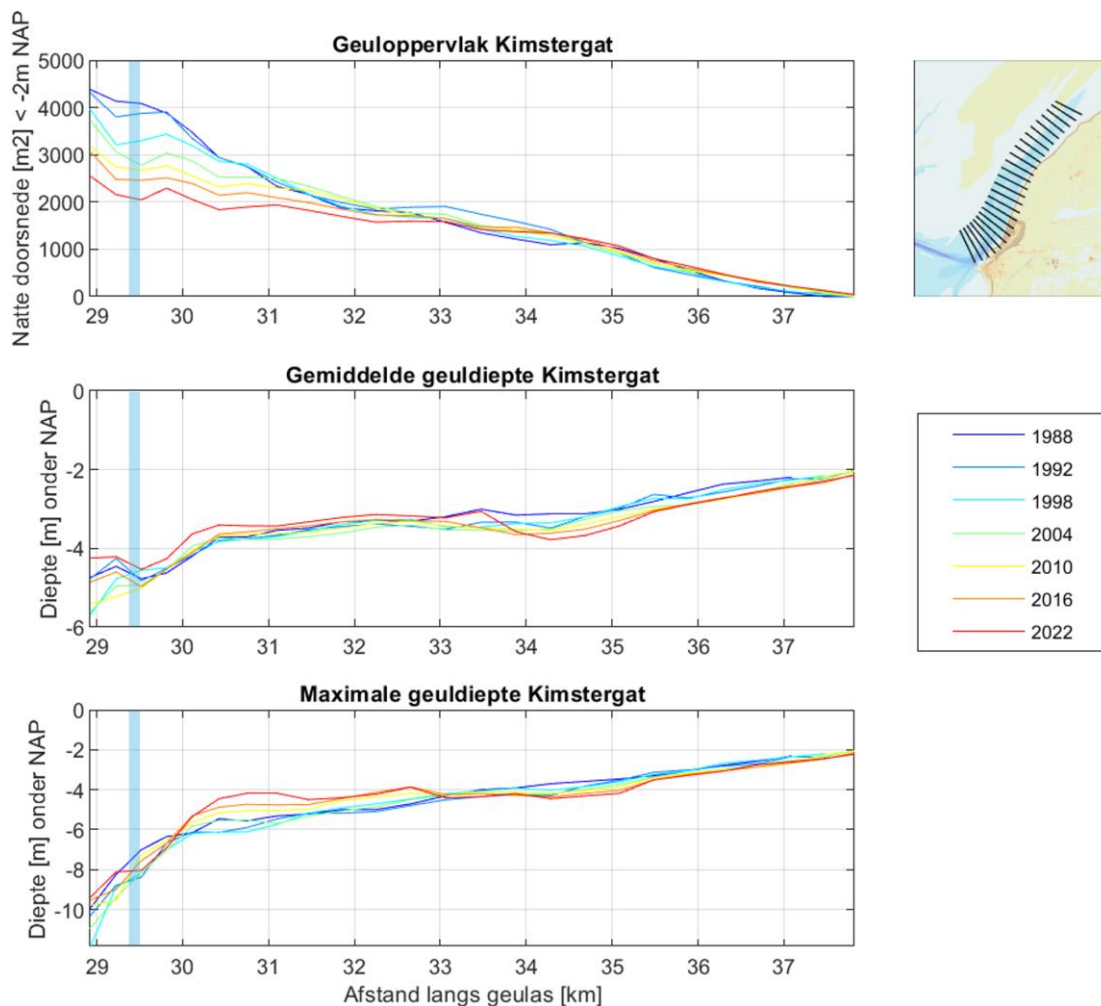
Tot het (volledig) opvullen van het Kimstergat, zal het oostelijk uitbreiden van de Ballastplaat nog wel voor lokale problemen kunnen zorgen bij de dijk van de haven van Harlingen. In de recente jaren is al een significante verdieping van de geul langs de dijk te zien (Figuur 5-22).



Figuur 5-21 Doorsnede door het Kimstergat, direct zuidelijk van de verspreidingslocatie. De oostwaartse uitbouw van de Ballastplaat is hier duidelijk te zien. Het Kimstergat migreert in oostelijke richting en wordt ondieper, de natte doorsnede neemt sterk af.



Figuur 5-22 Doorsnede door het Kimstergat over de verspreidingslocatie. Het Kimstergat is hier zover oostwaarts opgeschoven dat deze nu direct tegen de dijk aan ligt en wordt lokaal dieper.



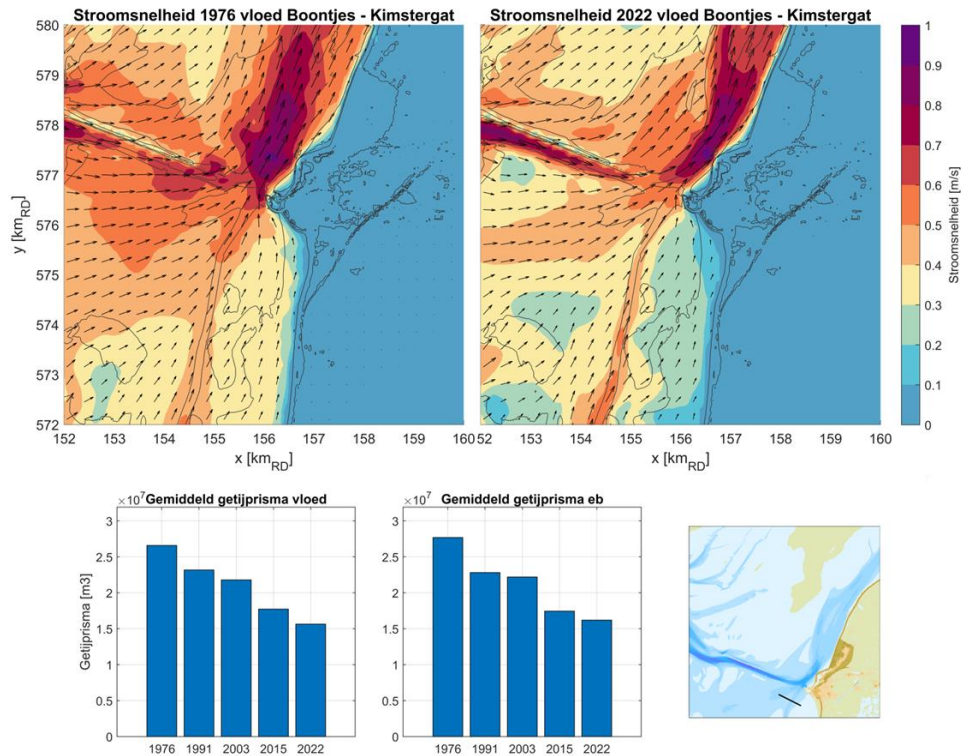
Figuur 5-23 Ontwikkeling van het geuloppervlak (< -2m NAP), gemiddelde en maximale geuldiepte voor doorsnedes langs het Kimstergat met links Harlingen en rechts het geuluiteinde. De blauwe box geeft de locatie van het verspreidingsvak weer.

De morfologische ontwikkeling van het Kimstergat is duidelijk terug te zien in de stroomsnelheden. Doordat de geul in oostelijke richting is gemigreerd en smaller is geworden, zijn de hoogste stroomsnelheden in 2022 geconcentreerd over een smaller gebied dan in 1991 (Figuur 5-24 en Figuur 5-14). De stroomsnelheden door het Kimstergat zijn over de periode nauwelijks afgenomen tijdens eb en vloedstroming, langs de haven zijn ze zelfs toegenomen tijdens eb.

De morfologie en ook berekeningen aan de waterbeweging laten zien dat het Kimstergat ook water uitwisselt met kombergingsgebied Marsdiep. De exacte relatie tussen de omvang van het Kimstergat en het bijbehorende kombergingsgebied en de omvang van de Geul langs de Pollendam en Boontjes is niet helemaal duidelijk. De Boontjes wordt tijdens vloed vooral gevoed vanuit het Marsdiep. De getijvulling van het Kimstergat vindt grotendeels plaats vanuit het Vlie via de Geul langs de Pollendam en daarnaast via het Molenrak, waarbij de uitwisseling met de Boontjes beperkt lijkt. Deze uitwisseling lijkt in 2022 ook minder dan in 1976 (Figuur 5-24). Dit komt overeen met bevindingen in Smits et al. (2022).

Smits et al. (2022) concluderen ook dat de huidige verspreidingsstrategie van specie uit Boontjes effectief lijkt te zijn. Hierbij wordt afhankelijk van de getijfase baggerspecie verspreid op de locaties bij de Pollendam of in het Kimstergat. Uit modelberekeningen volgde dat de retourstroom naar Boontjes van gebaggerd materiaal vanuit de verspreidingsvakken op korte termijn (< 3 maanden) marginaal zou zijn. Wel was er onzekerheid met betrekking tot

onderschatting van de retourstroom door het model vanwege de beperkte lengte van de simulatieperiode.

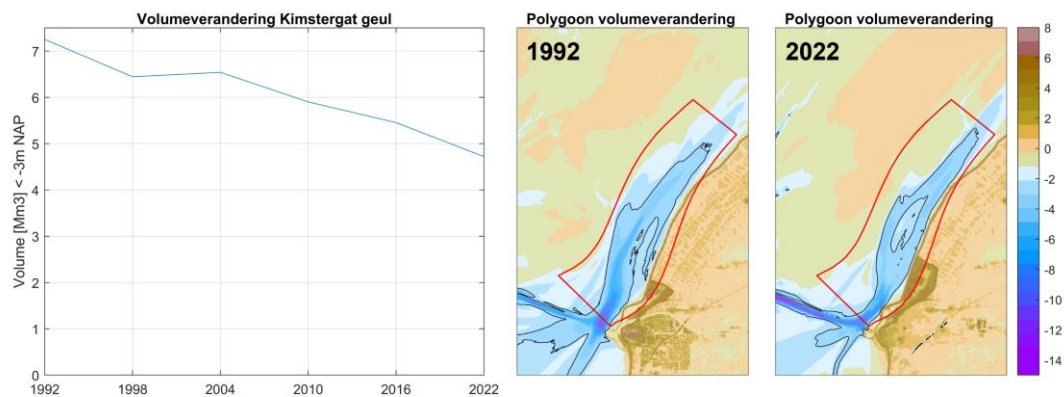


Figuur 5-24 Boven: Piek vloed stromingsnelheden voor 1976 en 2022. Onder: gemiddeld getijprisma tijdens vloed en eb in de Boontjes voor de volledige simulatieperiode (1 jaar).

Relatie tussen opvulling Kimstergat en verspreidingsvolumes

Om een beeld te krijgen van de volumeontwikkeling van de geul wordt voor diverse jaren het watervolume onder -3m NAP bepaald binnen de omhullende polygoon weergegeven in Figuur 5-25. Deze polygoon omhult voor alle jaren de volledige -3m contour, waardoor uitbreiding en terugtrekking van deze contour worden meegenomen in de volumeontwikkeling. De totale volumeafname van het Kimstergat tussen 1992 en 2022 bedraagt 2.53 miljoen m³, wat neerkomt op 84.000 m³ per jaar. Sinds 1992 heeft het Kimstergat 35% van zijn volume onder -3m NAP verloren. Het grootste deel van deze volume-afname vindt plaats in het zuidelijke deel, waar ook de natte doorsnede het sterkst afneemt (Figuur 5-23).

Wanneer de volume-afname van het Kimstergat wordt vergeleken met het baggermateriaal dat hier wordt verspreid, valt op dat de verspreide volumes significant zijn ten opzichte van de volumeverandering van het Kimstergat. Jaarlijks wordt hier 0,11 – 0,41 miljoen m³/jaar verspreid door Rijkswaterstaat, en daarbij nog 0,7 – 1,2 miljoen m³/jaar door de haven van Harlingen. Dit betekent dat het totale volume aan baggerspecie dat wordt verspreid in het Kimstergat circa 10 keer zo groot is als de autonome afname van het volume in het Kimstergat. Waarschijnlijk zal een groot deel van het verspreidingsvolume weer terug naar de haven van Harlingen worden getransporteerd, en wordt een deel verspreid over de plaatgebieden Molenrak en Ballastplaat/Vlakte van Oosterbierum. Het verspreiden van baggervolume in het Kimstergat zal bijdragen aan het afnemen van de komberging van het Kimstergat en aan de snelheid waarmee het Kimstergat opvult, maar is niet de primaire oorzaak.



Figuur 5-25 Links: Volumeveranderingen van de geul (watervolume onder -3m NAP). Rechts: in rood de omhullende polygoon waarbinnen de volumeveranderingen zijn berekend, voor de bodems van 1992 en 2022. De zwarte lijn geeft de -3m NAP contour in respectievelijk 1992 en 2022, deze valt geheel binnen de polygoon.

Handelingsperspectief

De sedimentatie en afname van de omvang van het Kimstergat betekent dat het lastiger zal worden om hier baggerspecie te verspreiden. Dit heeft voornamelijk te maken met de bereikbaarheid voor het lossen van de baggerspecie via de bodemluiken van het schip. Door afnemende diepte is het verspreidingsvak al meerdere malen verplaatst. Wanneer de huidige lineaire trends worden doorgetrokken, is het de verwachting dat over 30 – 40 jaar het doorstroomoppervlakte in het Kimstergat nihil is.

De sedimentatie in het Kimstergat en op de Vlakte van Oosterbierum is onderdeel van de langjarige aanpassingen die plaatsvinden in de westelijke Waddenzee na de afsluiting van de Zuiderzee. Het Kimstergat bevindt zich in een grootschalig sedimentatiegebied, waar de sedimentatie voornamelijk uit slib lijkt te bestaan. Het verspreiden van de baggerspecie in het Kimstergat zal bijdragen aan de sedimentatie en aan de snelheid van opvullen, maar is niet de primaire oorzaak.

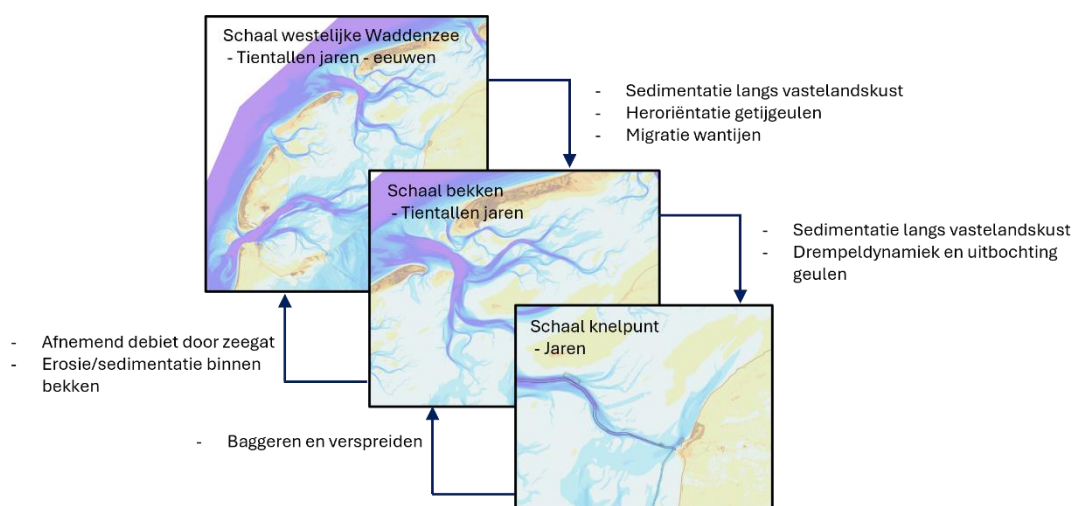
Op korte termijn zou verdere optimalisatie van de sedimentverspreiding in het Kimstergat de snelheid van het opvullen van het Kimstergat kunnen vertragen. Het is echter moeilijk te voorspellen of dit voor een significante vertraging van de autonome opvulling van het Kimstergat zal zorgen. Het is de vraag of een verlaging in retourstroming opweegt tegen een grotere vaarafstand richting een verder gelegen verspreidingslocatie en of dit haalbaar is voor Rijkswaterstaat en de haven van Harlingen.

Reeds nu leidt de sedimentatie van dit gebied tot een afname of verdwijning van het getijvolume dat door het Kimstergat stroomt. Dit heeft invloed op de debieten in de geulen richting de haven van Harlingen en leidt tot toenemende sedimentatie in de geulen (Molenrak, Boontjes en Geul langs de Pollendam). Hierdoor is te verwachten dat het baggerbezwaar in de geul langs de Pollendam en in de Boontjes in de toekomst zal toenemen.

6 Conceptueel model knelpunt Harlingen – Noordzee

Het conceptueel model is opgebouwd uit drie schaalniveaus: de grootste schaal omvat de westelijke Waddenzee, de middenschaal het bekken van het Vlie, en de kleinste schaal zoomt in op de knelpunten (Figuur 6-1). Op het schaalniveau van de westelijke Waddenzee spelen veranderingen op de tijdschaal van tientallen jaren tot eeuwen, die hebben gezorgd voor grootschalige veranderingen in het systeem van de Waddenzee, denk bijvoorbeeld aan de bouw van de Afsluitdijk en zeespiegelstijging. Deze grootschalige veranderingen werken door naar de schaal van het bekken van het Vlie. Op dit schaalniveau wordt bijvoorbeeld gekeken naar patronen van erosie en sedimentatie binnen het bekken, de verdeling van debieten en geulmigratie (voor een uitgebreidere beschrijving van de hoogste twee schaalniveaus, zie Meijers et al., 2024). Deze ontwikkelingen vormen op hun beurt de context en randvoorwaarden waarin de beschouwde knelpunten zich bevinden.

Voor de schaal van de knelpunten ligt de focus in deze studie op de vaarroute van de Noordzee naar de haven van Harlingen, waar zich de knelpunten Pannengat, Blauwe Slenk, Geul langs Pollendam en Kimstergat bevinden



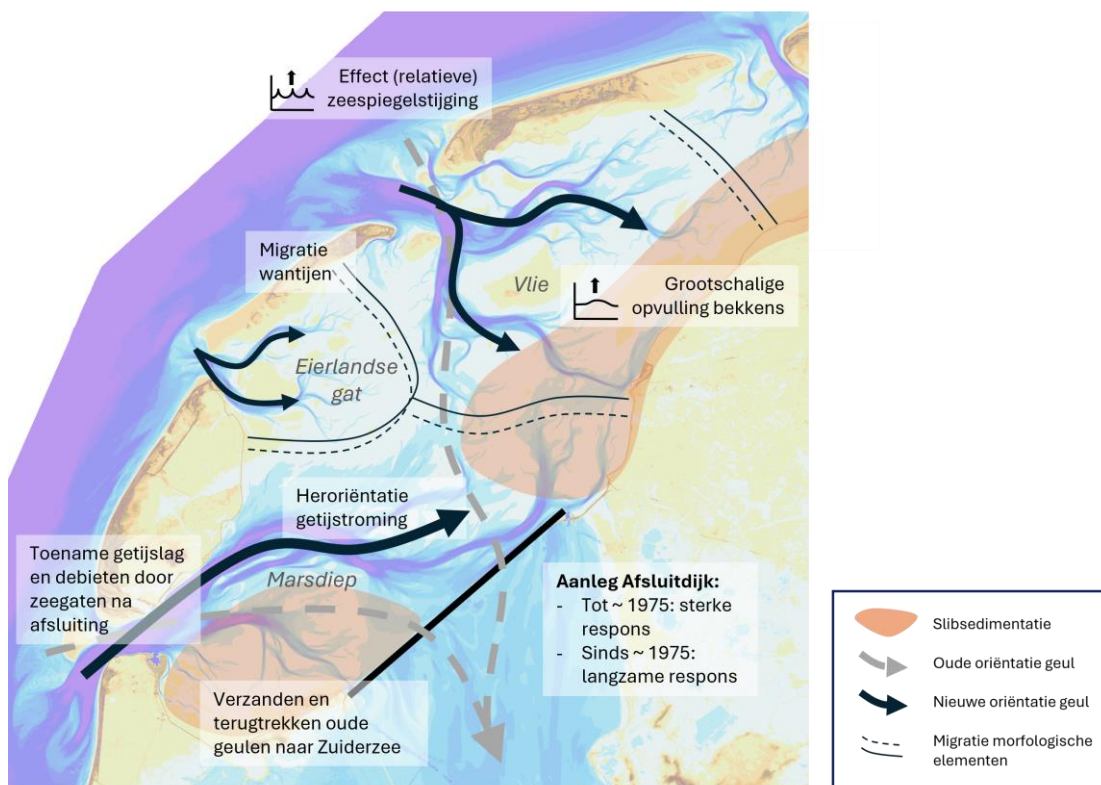
Figuur 6-1 Overzicht van de drie schaalniveaus waaruit het conceptuele model is opgebouwd. De pijlen geven de interactie tussen de schaalniveaus aan.

6.1 Schaal westelijke Waddenzee

De westelijke Waddenzee kent een andere ontstaansgeschiedenis dan de oostelijke Waddenzee. Hierdoor is het systeem van de westelijke Waddenzee relatief diep met een groot aandeel sublitoraal. Ook voor de afsluiting van de Zuiderzee werd de Waddenzee al steeds verder ingeperkt door opeenvolgende bedijkingen en landaanwinningen.

De aanleg van de Afsluitdijk in 1932 heeft een vormende invloed gehad op de westelijke Waddenzee. De effecten van de afsluiting waren het sterkst in de decennia na de afsluiting, tot ca 1975. In deze periode vult het bekken sterk op met sediment. Sinds 1975 is de respons minder sterk, maar de effecten werken nog wel altijd door (o.a. Thijsse, 1972; Elias et al., 2012).

- Heroriëntatie getijstroming en migratie wantijen: Voor de afsluiting liepen geulen vanuit het Marsdiep en het Vlie door naar de Zuiderzee. Als gevolg van de afsluiting heeft een heroriëntatie van de getijstroming plaatsgevonden, waardoor in het Vlie het zwaartepunt van het bekken van het zuiden naar het oosten is verschoven. Door het plotsklaps afgenomen oppervlak van het bekken nam de getijslag toe, waardoor ook de debieten door de zeegaten initieel toenamen. Als gevolg van de heroriëntatie van de getijstroming verschoven de wantijen in de westelijke Waddenzee in oostelijke richting. Het kombergingsgebied Marsdiep nam hierdoor in oppervlakte toe ten koste van het Vlie. Door de combinatie van de afname van het kombergingsgebied en de invulling van het bekken nemen de debieten door het zeegat in het Vlie nu weer af.
- Verzanden oude geulen naar Zuiderzee: In geulen die vroeger naar de Zuiderzee liepen zoals Inschot in het Vlie en Vlieter in het Marsdiep vond grootschalige sedimentatie plaats. Door deze opvulling van oude geulen is de debietverdeling binnen de bekkens veranderd. In het Vlie is dit proces bijvoorbeeld zichtbaar bij de splitsing tussen Inschot en Blauwe Slenk, waar debieten door Inschot afnemen en in de Blauwe Slenk toenemen.
- Grootschalige opvulling bekkens: De bekkens, die na de afsluiting plotseling veel kleiner geworden waren, begonnen sediment te importeren om tot een nieuwe evenwichtssituatie te komen (Elias et al., 2012). Initieel was deze respons van opvulling en netto sedimentimport het sterkst, in recente jaren neemt de trend in sedimentatie af van ca 2,3 Mm³/jaar over 1933 – 2015, naar 1,44 Mm³/jaar over 1991 – 2022 voor het Vlie (Elias, 2019). De toename in plaatvolume vindt met name plaats langs de Friese vastelandskust en bestaat voor een toenemend deel uit slibsedimentatie (Colina Alonso, 2020).

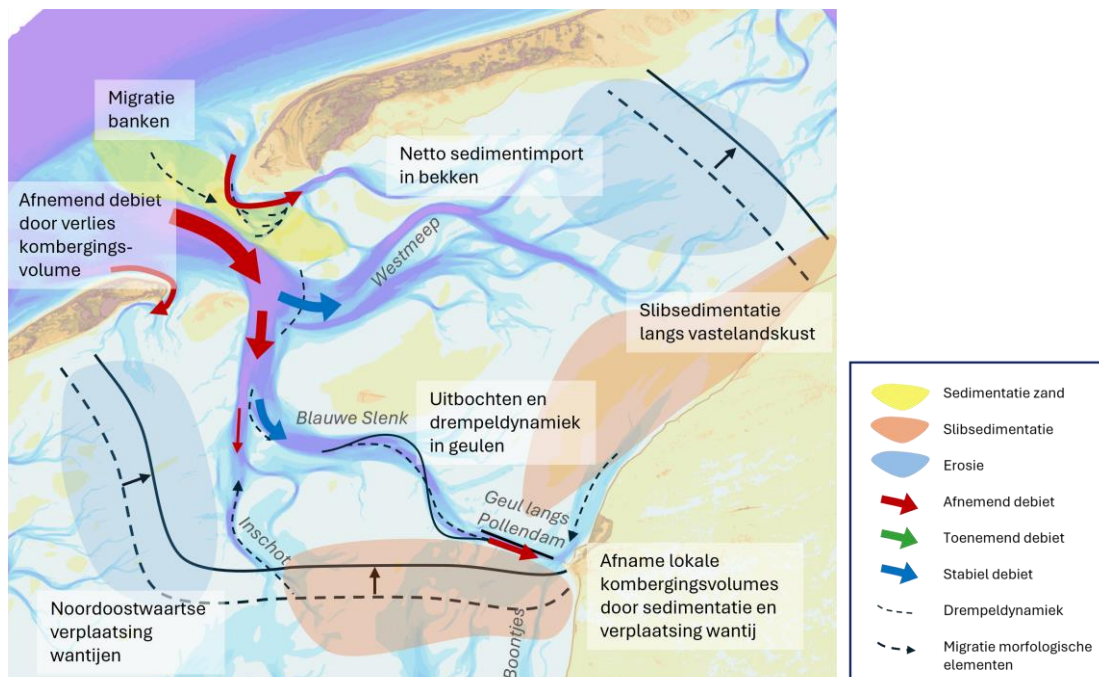


Figuur 6-2 Ontwikkelingen op de schaal van de westelijke Waddenzee, op de tijdschaal van tientallen jaren tot eeuwen.

6.2 Schaal bekken

De ontwikkelingen in de westelijke Waddenzee op de langere tijd- en ruimteschaal werken door op de schaal van het bekken.

- Sedimentimport en volumeveranderingen: de grootschalige sedimentimport als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee is ook zichtbaar in het Vlie. Vanwege de netto neemt het kombergingsvolume van het Vlie af, waardoor ook het debiet door het zeegat gestaag afneemt. Deze sedimentimport is echter niet overal even sterk merkbaar. In het bekken kunnen drie zones worden onderscheiden:
 - Met name de plaatgebieden langs de Friese vastelandskust nemen toe in volume en hoogte, voor een groot deel door sliedsedimentatie. Als gevolg hiervan nemen lokale kombergingsvolumes van de geulen in de buurt van de kust, zoals de Geul langs Pollendam, het Kimstergat en de Boontjes sterk af. Deze ontwikkeling werkt door op de schaal van de individuele knelpunten.
 - Centraal in het bekken vindt juist erosie plaats, met name rondom de wantijen.
 - Banken en plaatgebieden in de keel van het zeegat worden dan weer hoger vanwege zandtransport vanuit de buitendelta.
- Verplaatsing van de wantijen: Een andere ontwikkeling die van de grote schaal doorwerkt naar dit schaalniveau is de (noord)oostelijke verplaatsing van de wantijen. Door deze verplaatsing krimpt het Vlie in het westelijke deel en breidt het uit naar het oosten, waarbij het bekkenoppervlak netto afneemt.
- Ontwikkeling in hoofdgeulensysteem en debietverdeling: Vanwege de afname van het kombergingsvolume neemt het debiet door de Vliestroom gestaag af. Door de oostelijke verplaatsing van de wantijen en de heroriëntatie van het bekken van het Vlie richting het oosten nemen de debieten in het westelijke deel van het bekken licht af, terwijl de debieten in het oostelijke deel constant blijven. Het relatieve belang van de Meepen neemt hierdoor toe.
 - Door de afsluiting heeft Inschot haar debiet verloren, en trekt zich terug. Dit heeft invloed op de morfologische ontwikkeling van het drempelgebied tussen Inschot en Blauwe Slenk.
 - Het debiet door de Blauwe Slenk blijft (vooralsnog) relatief constant, al zal ook hier het debiet in de toekomst afnemen door het verlies van komberging vanwege de doorgaande ophoging van plaatgebieden nabij de Friese kust. In de Blauwe Slenk is nu al wel toenemende meandering zichtbaar en ontstaan drempelgebieden in de geulbochten tussen elkaar ontwijkende eb- en vloedscharen.



Figuur 6-3 Ontwikkelingen op de schaal van het kombergingsgebied Vlie, op de tijdschaal van tientallen jaren.

6.3 Schaal knelpunten

De ontwikkelingen op de schaal van de Waddenzee en het bekken Vlie hebben invloed op het schaalniveau van de knelpunten. In dit conceptueel model worden vier knelpunten beschouwd.

Drempelgebied bij verbinding Blauwe Stenk met Vliestroom

Het drempelgebied ontstaat doordat de stroming van de Vliestroom en die van Blauwe Stenk elkaar hier ontmoeten. Gestuurd door de ontwikkelingen op grotere tijd- en ruimteschaal trekt Inschot zich terug en verzandt. Het historische belang van Inschot is nog altijd zichtbaar in de morfologie; het diepe deel van de Vliestroom zet zich zuidwaarts door richting Inschot. Met het afnemen van het debiet door Inschot, en het daarmee toenemende relatieve belang van de Blauwe Stenk lijkt er ook morfologisch een steeds sterkere verbinding tussen Blauwe Stenk en Vliesloot te ontstaan over het drempelgebied, waarbij de ebschaar verdiept. Op kleinere tijd- en ruimteschaal wordt het drempelgebied gekarakteriseerd door grote dynamiek in de drempelgeulen en -banken. Voor het drempelgebied is de verwachting dat de komende jaren (periodiek) baggeronderhoud nodig kan zijn vanwege de hoge dynamiek.

Drempelgebied Blauwe Stenk

De Blauwe Stenk is de laatste decennia steeds sterker gaan meanderen. Waar deze geul ooit in een relatief vloeiende lijn aansloot op de Pollendam is deze steeds meer gaan uitbochten tot een S-vorm. Hierbij ontstaan in de bochten dynamische drempelgebieden met elkaar ontwikkende eb- en vloedscharen en drempels die relatief snel van hoogte en vorm veranderen.

- In de meer noordelijk gelegen bocht, ter hoogte van de verspreidingslocatie is een drempel aanwezig tussen de eb- en vloedschaar die de laatste jaren toeneemt in hoogte. Indien deze trend doorzet zou hier in de toekomst baggeronderhoud nodig kunnen zijn.
- Ook de aanhechting aan de kop van de Pollendam is steeds verder gaan uitbochten. De vaarroute loopt hier door een lange ebschaar die door baggeronderhoud op diepte gehouden moet worden.

Geul langs Pollendam

De Geul langs Pollendam is een staartgeul die zich bevindt in het grootschalige sedimentatiegebied langs de Friese kust. De ontwikkeling op de grotere tijd- en ruimteschaal heeft hier een duidelijk effect op de schaal van het knelpunt. Vanwege de ophoging van de omliggende plaatgebieden neemt het lokale kombergingsvolume af. Hierdoor zullen op termijn de debieten door de Geul langs Pollendam ook afnemen, waardoor de geuldoorsnede zal afnemen en meer baggeronderhoud nodig zal zijn. Deze ontwikkeling is al zichtbaar aan het oostelijke uiteinde van de Geul langs Pollendam, bij de ingang van de haven van Harlingen.

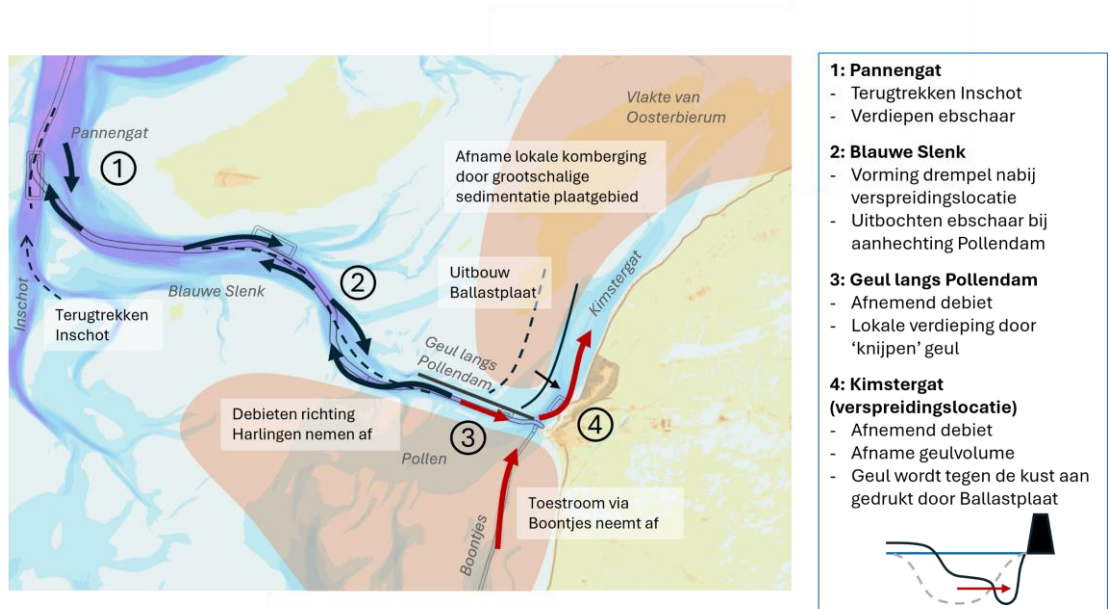
Langs de dam zelf is echter op dit moment sprake van lokale verdieping omdat de geul wordt 'geknepen' door de dam aan de noordzijde en de ophogende platen (de Pollen) aan de zuidzijde, waardoor stroomsnelheden lokaal toenemen. Dit leidt in eerste instantie tot verdiepen van de geul. Echter zal ook hier op termijn de diepte afnemen wanneer de debieten afnemen.

Kimstergat

De grootschalige sedimentatie langs de Friese kust beïnvloedt ook de lokale omstandigheden in het Kimstergat. Enerzijds leidt de groei van het intergetijdengebied tot afname van het getijdenvolume van de geul. Anderzijds leidt het ophogen en uitbouwen van de Ballastplaat ertoe dat het Kimstergat steeds meer in oostelijke richting tegen de dijk wordt gedrukt, waardoor het verspreidingsvak meerdere keren verplaatst moest worden. Door de afname van geulvolume nemen zowel de natte geuldoorsnede als de gemiddelde geuldiepte af. Gedurende de laatste dertig jaar vertoont het Kimstergat een lineaire afname van het geulvolume (watervolume onder -3m NAP), en het is de verwachting dat deze trend zich zal doorzetten.

De verspreide baggervolumes in het Kimstergat zijn ruim tien keer zo hoog als de jaarlijkse afname van het geulvolume onder -3m NAP. De opvulling van het Kimstergat wordt waarschijnlijk primair gedreven door de grootschalige sedimentatie in dit gebied; zo blijkt uit de volume-analyse dat de omliggende platen (Ballastplaat en Vlakte van Oosterbierum) op grotere schaal een toename in volume, oppervlakte en hoogte vertonen. Echter draagt het hoge verspreidingsvolume vermoedelijk wel bij aan de versnelde opvulling.

De sedimentatie en afname van de omvang van het Kimstergat zullen het moeilijker maken om de baggerspecie daar effectief te verspreiden. Anderzijds moet beseft worden dat het versneld opvullen van het Kimstergat ook consequenties zal hebben voor het debiet langs de Pollendam en in de Boontjes en daarmee gevolgen voor de langere termijn bereikbaarheid van Harlingen kan hebben.



Figuur 6-4 Ontwikkelingen op de schaal van de knelpunten, op de tijdschaal van jaren.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies van deze studie

Het doel van de voorliggende knelpuntanalyse van de vaarweg Harlingen – Noordzee is het ontwikkelen van een systeembegrip van de morfologische ontwikkelingen en het verkrijgen van inzicht in de te verwachten toekomstige ontwikkelingen. De verkregen inzichten zijn samengevoegd in een conceptueel denkmodel van de morfologische werking van het Vlie en de knelpunten langs de vaarroute Harlingen – Noordzee, dat per tijd- en ruimteschaal wordt uitgewerkt in Hoofdstuk 6.

Om herhaling te voorkomen, worden in deze paragraaf alleen de belangrijkste conclusies per knelpunt besproken, samen met het bijbehorende handelingsperspectief voor toekomstig vaargeulbeheer. Op de schaal van het bekken is de belangrijkste conclusie dat het netto kombergingsvolume van het Vlie trendmatig afneemt. Met name de plaatgebieden langs de Friese vastelandskust nemen toe in volume en hoogte, voor een toenemend deel door slibsedimentatie. Deze ontwikkeling werkt door op de schaal van de individuele knelpunten.

Drempelgebied Pannengat

Het drempelgebied Pannengat ontstaat door de aftakking van de Vliestroom richting de Blauwe Slenk. Door het terugtrekken van Inschot neemt het relatieve belang van de Blauwe Slenk in dit drempelgebied toe, wat op lange termijn de bevaarbaarheid van de geul zou kunnen verbeteren. Op korte termijn wordt echter verwacht dat periodiek baggeronderhoud nodig zal zijn vanwege het lange drempelgebied met dynamische drempelgeulen- en banken. Ook het mogelijk dichtdrukken van de huidige vaargeul, de ebschaar, zou tijdelijk kunnen leiden tot een toename van het baggerbezwaar door de groeiende drempels. Dit zal waarschijnlijk beperkt blijven tot een klein volume vanwege de relatief diepe ligging van de drempelgeulen en -banken. Monitoring van de bodem in het drempelgebied is essentieel om de meest gunstige vaarroute te identificeren en daar het baggeronderhoud op aan te passen.

Drempelgebieden Blauwe Slenk

Bij het zuidelijke drempelgebied in de Blauwe Slenk wordt jaarlijks 300.000 – 500.000 m³ gebaggerd vanwege de relatief lange en ondiepe drempel. Bij de kop van de Pollendam bocht de geul steeds verder uit omdat deze door de groeiende Ballastplaat zuidwaarts gedrukt wordt. De eb- en vloed-schaar hebben hier een vrij stabiele positie, welke waarschijnlijk in stand gehouden wordt door het baggeren van de drempel.

Een alternatieve strategie zou het aanleggen (baggeren) van een kortsluiting door de bestaande vloed-schaar zijn. Momenteel heeft de vloed-schaar een ondiepe drempel, waardoor de aanleg van een kortsluiting een aanzienlijke baggerinspanning zou vereisen. Dit zou aanvankelijk kunnen leiden tot een vermindering van het baggeronderhoud, maar op termijn kan er opnieuw een eb- en vloed-schaar ontstaan. Bij significante morfologische veranderingen, zoals een toename in baggerbezwaar, versnelling in uitbochting van de ebschaar, autonome verdieping van de vloed-schaar, of vernauwing van de geul bij de aansluiting naar de Pollendam), kan het aanleggen van een kortsluiting door de bestaande vloed-schaar een goed alternatief zijn.

In het noordelijk deel van de Blauwe Slenk vormt zich een tweede drempelgebied, gelegen tussen de Grienderwaard en Hendrik Tjaarsplaat. Op korte termijn zou op deze locatie een nieuw baggervak kunnen ontstaan, met aanvankelijk een beperkt baggervolume wegens de relatief kleine en diepe gevormde drempel. Echter, ten noordoosten van de drempel, op de

uitloper van de ebschaar, wordt een significant volume aan baggerspecie verspreid, variërend van 55.000 tot 373.000 m³ per jaar. Het is mogelijk dat het sediment dat wordt geplaatst op de verspreidingslocatie, bijdraagt aan de ontwikkeling van de drempel.

Geul langs de Pollendam

In de Geul langs de Pollendam wordt gebaggerd tussen het landwaartse einde van de Pollendam en de haven van Harlingen. Zowel de bodemligging als de baggervolumes laten geen duidelijke toe- of afnemende trend zien. Langs de Pollendam zelf vond juist een autonome verdieping plaats, die de afgelopen 5 jaar is gestagneerd.

Het kombergingsvolume van deze geul neemt gestaag af door ontwikkelingen op grotere schaal, zoals sedimentatie en ophoging van de plaatgebieden langs de Friese kust. Dit zal naar verwachting op termijn leiden tot een afname van de debieten in de Geul langs de Pollendam, waardoor het baggerbezwaar waarschijnlijk zal toenemen.

Kimstergat

Het Kimstergat is een belangrijke verspreidingslocatie nabij Harlingen. De gemiddelde geuldiepte en natte doorsnede nemen sterk af, met name in het zuidelijke deel van het Kimstergat, waar het verspreidingsvak zich bevindt. Door de uitbouw van de Ballastplaat wordt het Kimstergat steeds dichter tegen de dijk gedrukt, waardoor lokaal geuldieptes toenemen en de geulwanden steiler wordt.

Net als de Geul langs de Pollendam verliest het Kimstergat zijn kombergingsvolume door de grootschalige opvulling van de plaatgebieden Ballastplaat en Vlake van Oosterbierum. Hierdoor neemt de gemiddelde geuldiepte en geuloppervlakte af. Daarnaast zijn de volumes baggerspecie die in het Kimstergat worden verspreid aanzienlijk in vergelijking met de autonome ontwikkeling van de geul: tussen 1992 en 2022 nam het geulvolume (< -3m NAP) af met $8,4 \cdot 10^4$ m³/j terwijl er gemiddeld $1,0 \cdot 10^6$ m³/j wordt verspreid. Hoewel het in verhouding grote verspreidingsvolume bijdraagt kan bijdragen aan een versnelde sedimentatie in het Kimstergat, is het niet de primaire oorzaak. De autonome sedimentatietrend in het Kimstergat en op de Vlake van Oosterbierum maakt deel uit van de zeer langjarige aanpassingen die plaatsvinden in de westelijke Waddenzee na de afsluiting van de Zuiderzee.

Het is moeilijk te voorspellen of verdere optimalisatie van de sedimentverspreiding voor een significante vertraging van het opvullen van het Kimstergat zal zorgen. Daarbij moet worden aangemerkt dat de effecten van het baggeren en verspreiden, zoals verstoring en uitstoot, toenemen naarmate de afstand groter wordt. Op langere termijn zal de verspreidingslocatie echter hoe dan ook verplaatst moeten worden wegens afnemende bereikbaarheid voor het lossen van de baggerspecie via de bodemluiken van het schip.

De sedimentatie in het Kimstergat en op de Vlake van Oosterbierum zal uiteindelijk ook leiden tot een afname of verdwijning van het kombergingsgebied van het Kimstergat. Dit betekent dat het baggerbezwaar aan het einde van de geul langs de Pollendam en de Boontjes in de toekomst waarschijnlijk zal toenemen. Om opvullen van het lokale kombergingsvolume rond Harlingen niet te versnellen wordt aanbevolen om het verspreiden van grote hoeveelheden specie in het Kimstergat zoveel mogelijk te vermijden. Onderzoek is nodig om alternatieve locaties te vinden waarbij uitgesloten kan worden dat de activiteit zou kunnen leiden tot het versneld opvullen van het lokale kombergingsvolume rond Harlingen.

7.2 Aanbevelingen

7.2.1 Aanbevelingen vervolgonderzoek Harlingen – Noordzee

- De verspreidingsvakken Kimstergat 1 en Blauwe Slenk bevinden zich beide op locaties met overwegend sedimentatie. Vooral in het Kimstergat neemt het lokale geulvolume snel af. Het opvullen van het Kimstergat heeft directe gevolgen voor de bereikbaarheid van het verspreidingsvak, dat al meerdere malen is verplaatst door afnemende dieptes, en op grotere tijd- en ruimteschaal voor afname van debieten in de Geul langs de Pollendam en de Boontjes. Hoewel deze ontwikkeling autonoom is, en niet duidelijk is in hoeverre het verspreiden van baggerspecie in het Kimstergat deze opvulling versnelt kan wel worden aangenomen dat verspreiden van grote hoeveelheden specie niet bevorderlijk is voor het op langere termijn in stand houden van de geul. Daarom is het raadzaam om een verkenning uit te voeren naar alternatieve verspreidingslocaties voor Kimstergat en Blauwe Slenk. Op korte termijn is het nog onzeker of een alternatieve verspreidingslocatie haalbaar is, gezien de extra reistijd, verstoring en uitstoot die met een grotere afstand gepaard gaat. Echter, op lange termijn zal het noodzakelijk zijn om uit te wijken naar een andere verspreidingslocatie: wanneer de huidige lineaire trend van opvulling doorzet, is de verwachting dat het geulvolume van het Kimstergat over ongeveer 30 tot 40 jaar nihil zal zijn.
- De hoogste baggervolumes van het Vlie komen voor in het zuidelijke drempelgebied van de Blauwe Slenk, bij de aansluiting op de Pollendam. Hier wordt een relatief lange en ondiepe ebschaar gebaggerd. Een doorsteek van de vloedschaar richting de Geul langs de Pollendam zou mogelijk tijdelijk het baggeronderhoud kunnen verminderen en de vaarroute kunnen verkorten. Deze ingreep vereist echter een relatief hoog aanlegvolume. Door de effecten van een dergelijke doorsteek vooraf te verkennen, kan worden voorgesorteerd op mogelijke toekomstige morfologische veranderingen in het gebied, zoals een toename in het baggerbezwaar, versnelde uitbochting van de ebschaar of autonome verdieping van de vloedschaar. Uit de ervaringen met een bochtafsnijding of geulverlegging bij de vaarweg tussen Holwerd en Ameland volgt dat de effecten sterk kunnen variëren. Uit evaluatie van deze bochtafsnijding tussen Holwerd – VA13 in 2019 volgt dat de snelheden en debieten in de bochtafsnijding hier toenamen, en uiteindelijk iets minder netto aanslibbing plaatsvond in de eerste drie kilometer van de vaargeul bij Holwerd (Deltares 2020). Ook langs traject VA9 – VA13 is in september 2022 is een geulverlegging uitgevoerd, maar is de nieuwe geul door hoge stroomsnelheden sterk gaan uitbochten, met migratiesnelheden tot wel een meter per dag, waardoor de bevaarbaarheid in het gedrang kwam (Deltares 2023). De effecten van een bochtafsnijding zijn dus sterk locatieafhankelijk.
- Bij de geul langs de Pollendam en Noorderhavendam (bij verspreidingsvak Kimstergat) is een sterke lokale verdieping van de geul dicht langs de dam/dijk te zien. Dit zou effect kunnen hebben op de stabiliteit van de dijk en dam. Bij het Kimstergat is de Noorderhavendam recent (2022) ook al versterkt m.b.v. bestorting. Aanbevolen wordt om de morfologische ontwikkeling bij deze locatie te blijven monitoren. De autonome verdieping langs de Pollendam lijkt de laatste 5 jaar gestagneerd, maar ook hier is het raadzaam om de stabiliteit van de dam in de gaten te houden.

7.2.2 Aanbevelingen generieke aanpak knelpuntanalyse

Op basis van de inzichten uit voorliggende studie zijn de volgende aanbevelingen opgesteld voor een generieke methode bij het uitvoeren toekomstige knelpuntanalyses in de Waddenzee.

- In deze studie is de modelschematisatie van Grasmeyer et al. (2022) als basis gebruikt, aangevuld met de meest actuele bodemdata uit 2022. Het rekenrooster van dit model heeft een resolutie in de Waddenzee van 100 m. Voor een analyse van de grootschalige hydrodynamische ontwikkeling van het bekken geeft dit voldoende inzicht. Echter, voor een detailanalyse van specifieke knelpunten is dit rooster te grof. De Geul langs de Pollendam en de Slenk zijn bijvoorbeeld slechts ~120m breed, waardoor de stroming in deze geulen niet goed opgelost kan worden met de huidige modelresolutie. Bovendien is het gebruikte model gekalibreerd voor algemene toepassing in de westelijke Waddenzee en blijkt uit modelvalidatie dat het model specifiek in het Vlie minder goed presteert dan gewenst. Voor toekomstige knelpuntanalyses wordt aanbevolen om een lokale roosterverfijning (met een resolutie van ~25 m) te gebruiken voor een gedetailleerde beoordeling van de knelpunten en om de modelprestatie te valideren met een focus op het aandachtsgebied.
- Afhankelijk van de beschikbare kennis over elk knelpunt is het raadzaam om goed af te wegen welk detailniveau nodig is voor de uitwerking van de individuele knelpunten. Wanneer de focus ligt op één specifiek knelpunt, kan dit in meer detail worden uitgewerkt, bijvoorbeeld door gebruik te maken van modelsimulaties met een hogere resolutie, zoals is gedaan bij de knelpuntanalyse Holwerd – Ameland (Deltares, 2023). Voor een grootschaligere analyse, gericht op de ontwikkeling van het gehele bekken en het identificeren van potentiële nieuwe knelpunten, kan het voldoende zijn om in minder detail naar ieder knelpunt te kijken.
- Om de ontwikkelingen van de knelpunten beter in beeld te krijgen, is het van groot belang om een duidelijk overzicht te hebben van de exacte baggerlocaties. Bijvoorbeeld, de baggerwerkzaamheden bij de baggerlocatie 'Geul langs de Pollendam' vinden alleen plaats aan de landwaartse zijde van de Pollendam en niet in de rest van de geul, zoals afgeleid op uit geuldoorsnedes en beheerlodingen. Het is cruciaal om deze informatie over de precieze locaties van de baggerwerkzaamheden te hebben, zodat de ontwikkelingen van de knelpunten adequaat kunnen worden gemonitord.
- Deze studie is uitgevoerd parallel aan en in samenwerking met de update van de Kombergingsrapportage van het Vlie en de studie naar de morfologische ontwikkeling van de eilandkoppen van het Zeegat van het Vlie (De Beer et al, 2024) uitgevoerd binnen het deelprogramma 'Systeemkennis Zeegaten' van het SITO-PS programma B&O Kust. Door studies met een vergelijkbaar of samenhangend morfologisch/hydrodynamisch interessegebied gelijktijdig uit te voeren, wordt gezorgd voor een goede onderlinge samenhang en informatieoverdracht. Dit maakt het mogelijk om inspanningen, zoals bijvoorbeeld het updaten van een model, optimaal te benutten door de modelresultaten voor meerdere studies te gebruiken. Bovendien kan de nieuw opgedane kennis direct worden geïntegreerd in de kombergingsrapportage.
- Jaarlijks uitgevoerd beheerlodingen geven waardevolle informatie voor de analyse van recente knelpuntontwikkelingen. De hoge resolutie in tijd en ruimte levert extra informatie bovenop de zes-jaarlijkse vaklodingen-cyclus. Dit helpt bij het maken van voorspellingen voor toekomstig gedrag. Het wordt aanbevolen om de beheerlodingen van de knelpunten te gebruiken in toekomstige knelpuntanalyses. Het is cruciaal dat deze data compleet is en op gestructureerde wijze wordt opgeslagen en verwerkt, zodat de waardevolle extra informatie die deze beheerlodingen bieden, optimaal gebruikt kan worden. Momenteel zijn er grote verschillen in format, naamgeving, resolutie, meta-data per dataset, dit leidt tot veel voorwerk.

Referenties

Kombergingsrapportages:

Meijers, C.H., Oost, A., Cleveringa, J., Taal, M. (2024). Kombergingsrapportage Vlie: Overzicht van informatie en kennis van het fysisch systeem. Versie 2024

Oost, A., Cleveringa, J., Taal, M., (2019a), Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie: Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2019

Baptist et al. (2019). Beneficial use of dredged sediment to enhance salt marsh development by applying a 'Mud Motor': evaluation based on monitoring <https://doi.org/10.18174/500109>

Cleveringa, J. (2024). Ecosysteemgericht baggeren. Fase 2: Literatuuronderzoek t.b.v. beantwoording kennisvragen. Rapport 2024-02, Waddenacademie, Leeuwarden

Colina Alonso, A., (2020). Evolutie van het bodemslib in de Waddenzee. Data analyse. Kenmerk: 11205229-001-ZKS-0003, 20-10-2020

De Beer, A. Vermeer, N., Elias, E. en Löhr, J. (2024). Morfologie van de eilandkoppen van het Zeegat van het Vlie. Rapport kenmerk: 11210370-005-ZKS-0002

Grasmeijer, B., R. van Weerdenburg (2022). Evaluatie bochtafsnijding vaarweg Ameland. Kenmerk: 11205229 - 006 - ZKS – 0002, 4-12-2020

De Wit, L., Grasmeijer, B., van Kessel, T., Dees, N., Meijers, C., Quataert, E. (2024). Abiotische effecten baggeren en verspreiden in de Waddenzee: voorbereidende studie voor het opstellen van het tweede Natura2000 beheerplan Waddenzee. Deltares rapport 11210370-014-ZKS-0001

Doekes, J., (1985). Invloed van de afsluiting van de Zuiderzee op het getij in de Waddenzee. Rijkswaterstaat, Dienst getijdewateren, nota GWIO 85.001, 13 pp.

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B. & De Ronde, J.G., (2012). Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw* 91: 293–310.

Elias, E. (2019). Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Kenmerk: 11203683-001-ZKS-0002.

Elias, E.P.L., (2021). Morfologie van het Zeegat van het Vlie. Deltares rapport 11206794-004-ZKS-0003.

Elias, E., Quataert, E., Taal, M., Vermeer, N., (2024). Sedimentbalans Nederlandse Kust. Deltares rapport 11207897-002-ZKS-0007.

Eysink, W.D., (1979). Morfologie van de Waddenzee; gevolgen van zand-en schelpenwinning, WL|Delft Hydraulics, rapport R1336

Eysink, W.D. & E.J. Biegel, (1992). Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function; Investigations on empirical morphological relations, WL|Delft Hydraulics, rapport H1300

- Grasmeijer, B. (2022), Jaksic, L. en Vroom, J. Verkenning morfologische ontwikkeling westelijke Waddenzee. Deltares rapport kenmerk: 11208040-005-ZKS-0001
- Hoeksema, H.J., Mulder, H.P.J., Rommel, M.C., De Ronde, J.G. & De Vlas, J., (2004). Bodemdalingstudie Waddenzee 2004. Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. Rapport RIKZ/2004.025. Rijkswaterstaat
- Kragtwijk, N.G., Zitman, T.J., Stive, M.J.F. & Wang, Z.B., (2004). Morphological response of tidal basins to human interventions. Coastal Engineering 51: 207–221
- Mulder, H.P.J., E. Nuijen, G.A. Liek & D.C. van Maldegem, (2005). Drempelverwijdering vaarweg Harlingen-Noordzee; Baggerwerk en morfologische en ecologische gevolgen. Rijkswaterstaat RIKZ, Rapport RIKZ/2005.026, 87 pp.
- Noordstra, P., (1992). Verwachting toekomstig baggerwerk in de vaargeul langs de Pollendam. Rijkswaterstaat, Directie Friesland, notitie ANW 92.27, 3.
- Oost, A, Cleveringa, J., Taal, M., (2019). Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2019. Rapport 11203669-000-ZKS-0006, Deltares, Delft, 104 p.
- Rietveld, C.F.W., (1962). The natural development of the Wadden Sea after the enclosure of the Zuider Sea. Proceedings 8th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Mexico City: 765-781.
- Rijkswaterstaat, Arrondissement Friesland-West, (1974). Mogelijke verbetering vaarwegen in de Waddenzee in het bijzonder wat betreft de vaargeul langs de Pollendam, 30 pp.
- Rijkswaterstaat-NN, (1998). Instandhoudingsplannen Vaargeul Harlingen – Terschelling- Vlieland. Rijkswaterstaat Directie Noord-Nederland, Leeuwarden, maart 1998.
- Smits, B., L. Jaksic, J. Dijkstra en J. Vroom, (2023). Modelleren van abiotiek voor en na afsluiting Zuiderzee: relevantie voor herstelkansen ondergedoken Groot zee gras. Document: 11209267-006-ZKS-0001. Deltares, Delft.
- Thijssen, J.T., (1972). Een Halve Eeuw Zuiderzeewerken 1920-1970. Tjeenk Willink (Groningen).
- Van der Molen, P., (1982). Verhoging en verkorting oostelijk blinde werk van de Pollendam. Directie waterhuishouding en waterbeweging, district kust en zee, adviesdienst hoorn, notitie . WWKZ-82.HZ34, 12 pp.
- Van Geer, P.F.C., (2007). Long-term morphological evolution of the Western Dutch Wadden Sea. WL| Delft Hydraulics rapport Z4169.00
- Van Veen, J., (1950). Eb- en Vloedschaar Systemen in de Nederlandse Getijwateren. Tijdschrift Koninklijk Nederlansch Aardrijkskundig Genootschap, Volume 67, pp. 303-326.
- Van der Vegt, H., J. Cleveringa (2022). Dynamisch vaargeulbeheer Waddenzee, 11208040-009-ZKS-0003, definitief, 16-12-2022
- Van Til, S. & Cleveringa, J., (2018). Morfologische dynamiek Schuitengat; analyse tbv de scheepvaartfunctie. Arcadis, Zwolle.
- Van Weerdenburg, R., J. Vroom, C. Jeuken, B. Grasmeijer (2023). Knelpuntanalyse Hoogwaterroute Holwerd – Ameland. Kenmerk: 11209267-004-ZKS-0004, 6-9-2023

Vroom J., (2011). Tidal divide, a study on a simplified case and the Dutch Wadden Sea, Msc thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geo Sciences.

Wagenaar, M. (2024). Derivation morphological tidal divides of the Wadden Sea. Memo/Stageverslag

Wang Z.B., Vroom J., Van Prooijen B.C., Labeur R.J., Stive M.J.F., (2013). Movement of tidal watersheds in the Wadden Sea and its consequences on the morphological development, International. J. of Sed. Res., Vol. 28, No. 2, 2013, pp. 162–171

Wang, Z.B., Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Lodder, Q.L., (2018). Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea - impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. Netherlands Journal of Geosciences, October 2018.

Werkgroep 1; Stuurgroep hydrografisch-sedimentologisch en biologisch ecologisch onderzoek met betrekking tot de winning van zand in de Waddenzee, (1981). Zandwinning in de Waddenzee; Resultaten van een hydrografisch-sedimentologisch en biologisch-ecologisch onderzoek. Rapport

A Bepalen morfologisch wantij

Deze bijlage beschrijft de afleiding van het morfologisch wantij (methodiek en resultaten) in het kader van BenO Zeegaten (Morfologie van de eilandkoppen van het Zeegat van het Vlie) en BenO Wadden (Kombingingsrapportage het Vlie, Knelpuntenanalyse Harlingen-Noordzee). Dit morfologisch wantij dient als begrenzing van de grootschalige volumeanalyse van het bekken van het Vlie.

De gebruikte data zijn de vlakdekkende, samengestelde bodemhoogtekaarten van de Westelijke Waddenzee. Deze hebben een resolutie van 20x20 m en er zijn 6 kaarten beschikbaar (1991-1997, 1997-2002, 2003-2008, 2009-2014, 2015-2021 en 2022-2026).

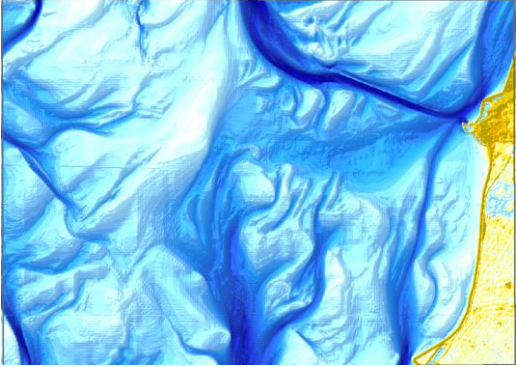
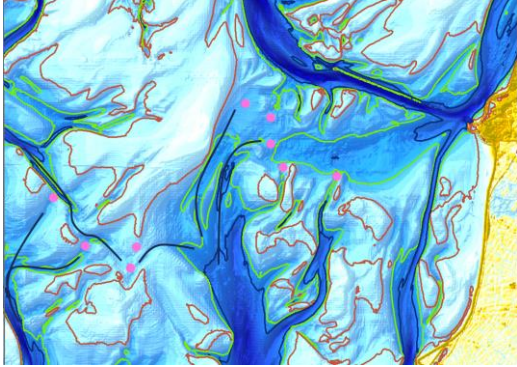
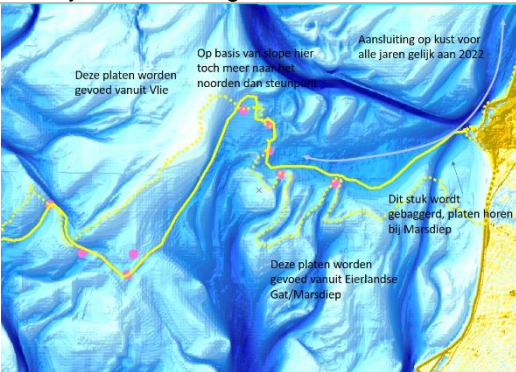
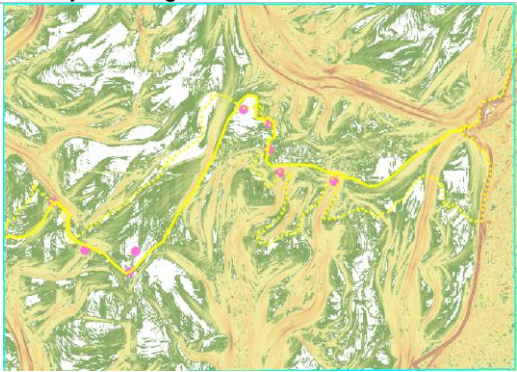
A.1 Methodiek

De stappen gevolgd om voor elk van deze 6 bodemhoogtekaarten het morfologisch wantij af te leiden zijn:

1. Bepalen drempelpunten (steunpunten) in doorlopende geulen aan de hand van de NAP -1, -2 en -3 m contour;
2. Bepalen wantij op basis van morfologische features aan de hand van de helling in de bodemhoogte. Een morfologische feature begint waar een knikpunt in de helling gevonden kan worden. Per plaat is bekeken vanuit welke geul deze gevoed wordt. Bij twijfelgevallen is gekeken naar de omliggende jaren om de ligging van het wantij te bepalen;
3. Op basis van dezelfde bodemhoogtekaarten is eerder op basis van een afstroomanalyse het wantij bepaald (Wagenaar, 2024). Wanneer op basis van morfologische features geen duidelijk beeld volgt over de ligging van het wantij, wordt het wantij op basis van de afstroomanalyse gevolgd.

In deze bijlage wordt de afleiding van het morfologisch wantij getoond voor één gebied en één jaar, alleen ter illustratie van de methode.

A.2 Resultaten wantij Vlie – Marsdiep / Eierlandse Gat

Box 3 – 2022		
Bathymetrie	Contouren & drempels	
		<p>Bodemhoogte [m NAP]</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ < -10 ■ -10 - -9 ■ -9 - -8 ■ -8 - -7,5 ■ -7,5 - -7 ■ -7 - -6,5 ■ -6,5 - -6 ■ -6 - -5,5 ■ -5,5 - -5 ■ -5 - -4,5 ■ -4,5 - -4 ■ -4 - -3,5 ■ -3,5 - -3 ■ -3 - -2,75 ■ -2,75 - -2,5 ■ -2,5 - -2,25 ■ -2,25 - -2 ■ -2 - -1,75 ■ -1,75 - -1,5 ■ -1,5 - -1,25 ■ -1,25 - -1 ■ -1 - -0,75 ■ -0,75 - -0,5 ■ -0,5 - -0,25 ■ -0,25 - 0 ■ 0 - 0,25 ■ 0,25 - 0,5 ■ 0,5 - 0,75 ■ 0,75 - 1 ■ 1,000000001 - 1,5 ■ 1,500000001 - 2 ■ 2,000000001 - 3
Wantij - bodemhoogte	Wantij - helling	
		<p>Helling [%]</p> <ul style="list-style-type: none"> □ 0 - 0,05 ■ 0,05 - 0,1 ■ 0,1 - 0,15 ■ 0,15 - 0,2 ■ 0,2 - 0,25 ■ 0,25 - 0,5 ■ 0,5 - 0,75 ■ 0,75 - 1 ■ 1 - 2 ■ 2 - 3 ■ 3 - 4 ■ 4 - 5 ■ 5 - 7,5 ■ 7,5 - 10 ■ 10 - 20 ■ 20 - 30 ■ 30 - 40 ■ 40 - 50 ■ 50 - 75 ■ 75 - 100
<p>Aansluiting op kust: op basis van morfologie, helling volgen. Zelfde aansluiting kiezen voor alle jaren, op basis van 2022.</p> <p>Steunpunten volgen</p> <p>Morfologische features volgen, dit komt redelijk goed overeen met afstroomlijn</p>		

B Methode volumeanalyse

B.1 Concept volumebalans

Op basis van reeksen vaklodingen kan een volumebalans van het bekken en buitendelta worden opgesteld. Deze methode geeft inzicht in het sedimentvolume van platen en het watervolume van geulen, beide ten opzichte van een gekozen referentieniveau. Het sedimentvolume geeft het positieve volume tussen het referentieniveau en het bodemniveau van het betreffende jaar (voor de platen). Het watervolume geeft het negatieve volume tussen het referentieniveau en het bodemniveau (voor de geulen).

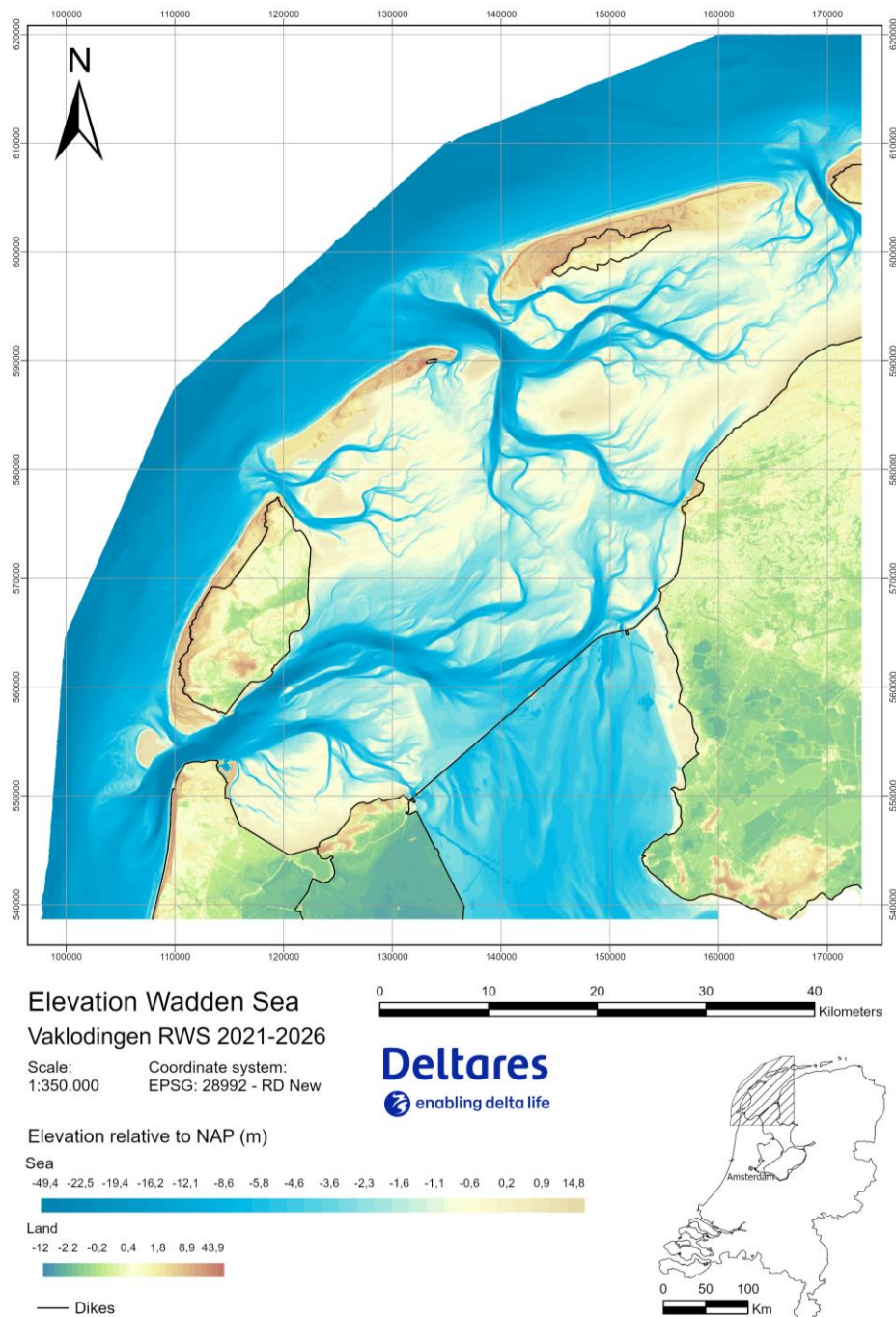
De referentieniveaus worden gekozen op basis van kenmerkende niveaus voor morfologische eenheden, bijvoorbeeld Gemiddeld Laag Water voor droogvallende platen. Het verschil tussen de gemeten bodemligging en het referentieniveau geeft een schatting van de hoeveelheid sediment of water dat zich in een bepaalde laag bevindt.

B.2 Bodemdata

Voor het uitwerken van de volumebalans moeten de dieptekaarten een volledige dekking hebben over het balansgebied. Daarom zijn de representatieve bodemkaarten van de Westelijke Waddenzee gebruikt, die het Eierlandse Gat, Vlieland, Zeegat van het Vlie en Terschelling omvatten. De basis van deze bodemkaarten zijn de Vaklodingen. Van west naar oost wordt jaarlijks één bekken ingemeten, na zes jaar is er dan een volledige opname van de Waddenzee. Naast de Vaklodingen zijn ook de jaarlijkse metingen beschikbaar (Jarkus en LiDAR datasets). Deze databronnen worden waar nodig gecombineerd om een volledige dekking van het interessegebied te verkrijgen. In de recente Vaklodingen zijn de Jarkus en LiDAR data al toegevoegd. Een volledige representatieve bodemkaart van de Westelijke Waddenzee bestaat dus uit metingen opgenomen over een periode van 6 jaar.

De Vaklodingen zijn gebiedsdekkend en beslaan de gehele kustzone tot ruwweg de -20 m contour, inclusief de bekkens van de Waddenzee en de estuaria (Eems-Dollard en Westerschelde). Na inwinning van de dieptelodingen worden per opnamegebied complete kaartbladen door RWS-CIV opgebouwd door de lodingen aan te vullen met de data van de droogvallende platen in de Waddenzee en de Jarkus-metingen van de kust. De opgevulde datasets worden met behulp van het programma Digipol (Digipol, 1997) geïnterpoleerd naar de hoekpunten van een 20x20m rooster en vervolgens opgeslagen als Vaklodingen kaartbladen.

De bodemdata van het Waddengebied wordt sinds pakweg 1985 digitaal ingewonnen en opgeslagen met een resolutie van 20x20m. Oudere data is wel beschikbaar, maar deze data is gereconstrueerd vanaf analoge kaarten. Hierdoor is de data van lagere resolutie (250 m in de westelijke Waddenzee). In deze studie is ervoor gekozen alleen de 20x20m datasets te gebruiken. Dit voorkomt onnauwkeurigheden door het gebruik van de lage resolutie datasets. Daarnaast is ervoor gekozen te focussen op de recente ontwikkeling, omdat deze minder sterk gestuurd worden door de grote ingrepen zoals de afsluiting van de Zuiderzee en meer inzicht geven in de huidige ontwikkeling. Voor inzicht in de morfologische veranderingen van de Waddenzee ten gevolge van de ingrepen wordt verwezen naar Elias et al. (2012). De bodemdata van de periode 1985-1990 bevat veel fouten en is daarom in deze analyse buiten beschouwing gelaten.



Figuur 7-1: Representatie bodemkaart voor de Westelijke Waddenzee, 2021-2026.

B.3 Opstellen volumebalans

De methode bestaat uit 5 stappen. Hieronder de stappen uitgewerkt voor het bekken van het Vlie, voor de buitendelta wordt verwezen naar (Elias, 2024).

Stap 1 – Optimalisatie van de bodemdata

De eerste stap is het maken van de representatieve bodemkaarten voor de Westelijke Waddenzee. De Vaklodingen zijn de basis voor de bodemkaarten. Missende datapunten zijn zo veel mogelijk ingevuld door het gebruik van aanvullende datasets (bijvoorbeeld Jarkus of LiDAR) of door interpolatie. De eilanden zijn hierbij verder ingevuld met het Algemeen

Hoogtebestand Nederland (AHN). Dit geeft 6 kaarten: 1991-1996, 1997-2002, 2003-2008, 2009-2014, 2015-2020 en 2021-2026. De lodingsdata voor het Vlie is opgenomen in de jaren 1992, 1998, 2004, 2010, 2016 en 2022.

Stap 2 – Afbakening van het studiegebied

De afbakening van het bekken en het balansgebied wordt gevormd door het morfologisch wantij tussen het Vlie en het Marsdiep, Eierlandse Gat en Borndiep en de kustwaartse begrenzing langs de eilandkusten en Friese kust:

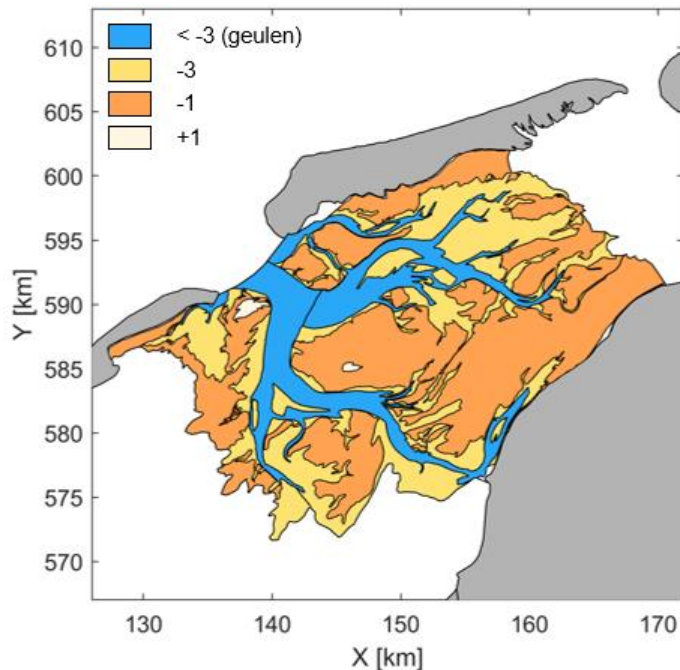
- De ligging van het morfologisch wantij is bepaald voor de zes representatieve bodemkaarten, zie Figuur 3-3. De gehanteerde methode wordt beschreven in Bijlage A. Naast de variërende wantijligging over de jaren heen, is ook de gemiddelde ligging van het wantij bepaald;
- Voor de begrenzing langs de eilandkusten en Friese kust is de ligging van de teen van de kering gehanteerd. Deze komt goed overeen met de NAP +1 m lijn.

Stap 3 – Berekening dikte sedimentpakket

Voor iedere gemeten bodem wordt het verschil in ligging met verschillende, vaste referentieniveau uitgerekend. Dit geeft voor de beschouwde meting de dikte van het sedimentpakket boven het referentieniveau (platen) en de diepte van de geulen beneden het referentieniveau.

Stap 4 – Kwantificering van de volumes per diepteklasse of polygoon

Nu worden de diepteklassen gekozen, waarbinnen de volumes bepaald zullen worden. Hiervoor zijn de dieptecontouren NAP -3 m, NAP -1 m en NAP +1 m gekozen. De dieptecontour NAP -3 m maakt onderscheid tussen geulen en (ondiepe) platen. De NAP -1 m dieptecontour maakt onderscheid tussen ondiepe en droogvallende platen (ligging van Gemiddeld Laag Water, GLW). De NAP +1 m contour omvat de permanent droog liggende platen. Voor elke representatieve bodemkaart wordt de ligging van de bovenstaande dieptecontouren bepaald. Op basis van de contouren worden sluitende polygonen geconstrueerd. Voor individuele banken zijn de contouren al sluitend. Voor diepere contouren of contouren die tegen het wantij of tegen de kust aanliggen worden deze sluitend gemaakt door de begrenzing van het bekken voor het betreffende jaar toe te voegen. Op deze manier kunnen verschillende morfologische eenheden in tijd en ruimte worden gevolgd.



Figuur 7-2: Overzicht van de verschillende dieptecontouren waar de volumes voor zijn bepaald.

De sedimentvolumes worden per jaar en per dieptecontour berekend. Dit is het totale volume dat zich binnen zo'n polygoon bevindt. Op basis van de volumes per contour kunnen dan ook de totale volumes per diepteklasse worden berekend. Naast het sedimentvolume kan ook het oppervlakte van een bepaalde dieptecontour bepaald worden. De combinatie van volume en oppervlakte geeft informatie over de hoogte van een bepaalde morfologische eenheid.

De kwantificering van de volumes wordt op verschillende ruimteschalen uitgevoerd:

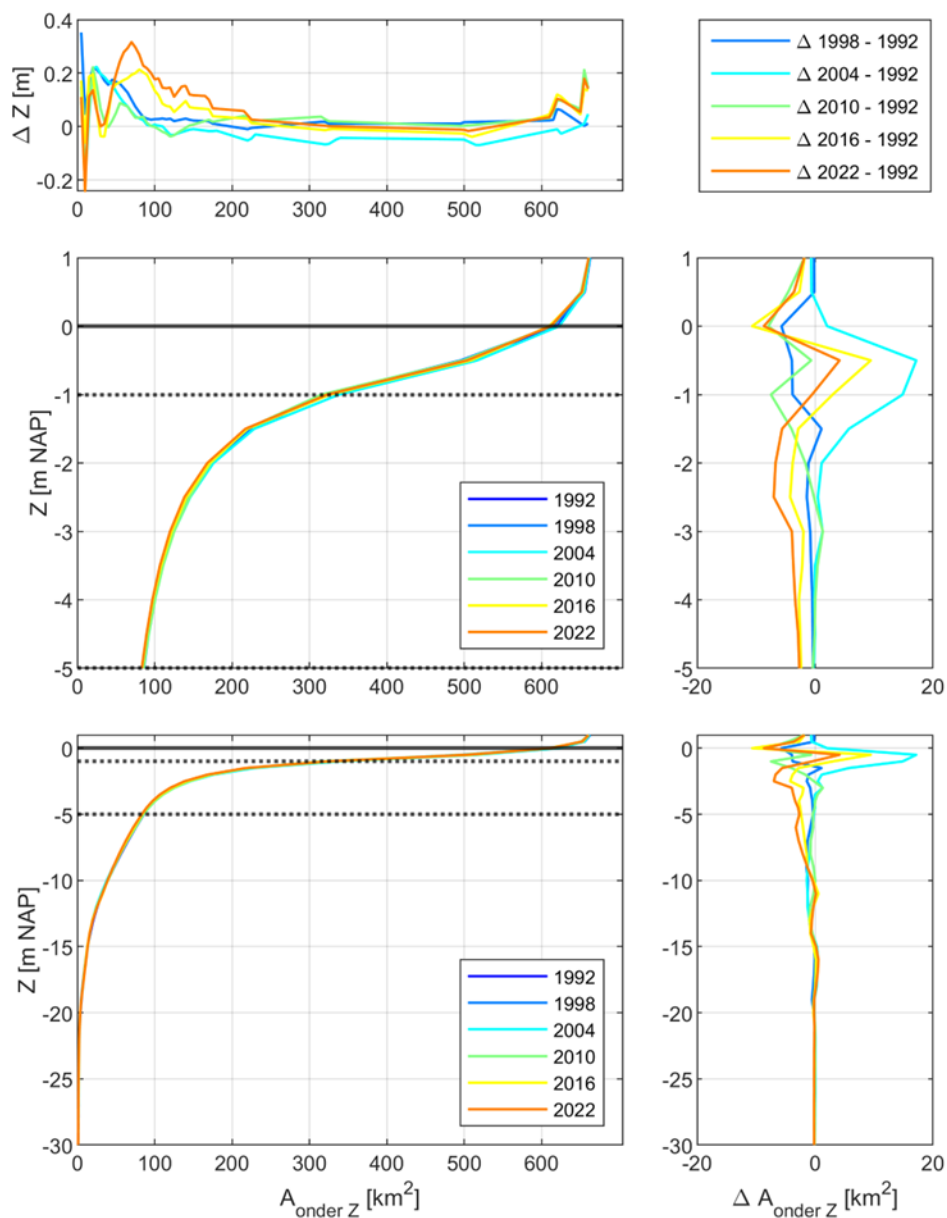
- **Bekken:** de grootschalige volumeverandering is bepaald voor het gehele bekken, waarbij de ligging van het wantij in 2022 is gehanteerd als begrenzing. Het balansgebied op deze schaal is dus vast en verandert niet van oppervlakte. De verandering in sedimentvolume zegt daarmee wat over de gemiddelde hoogteverandering binnen het bekken;
- **Hoofdgeulen en -platen:** de dieptecontour -3 m NAP maakt onderscheid tussen geulen en (ondiepe) platen en geeft de hoofdgeul en grote plaatgebieden. Hiervan kan het oppervlakte en de volumeverandering worden gevolgd. Bij deze analyse is als begrenzing de wantijligging per jaar gehanteerd, het balansgebied varieert dus in oppervlakte;
- **(Groepen) van individuele platen:** de dieptecontour -1 m NAP maakt onderscheid tussen ondiepe en droogvallende platen. Op dit niveau kan het oppervlakte en volume van individuele platen of groepen van individuele platen gevolgd worden;
- **Droogliggende platen:** de dieptecontour +1 m NAP omsluit de droogliggende platen, te weten Richel en Griend in het Vlie.

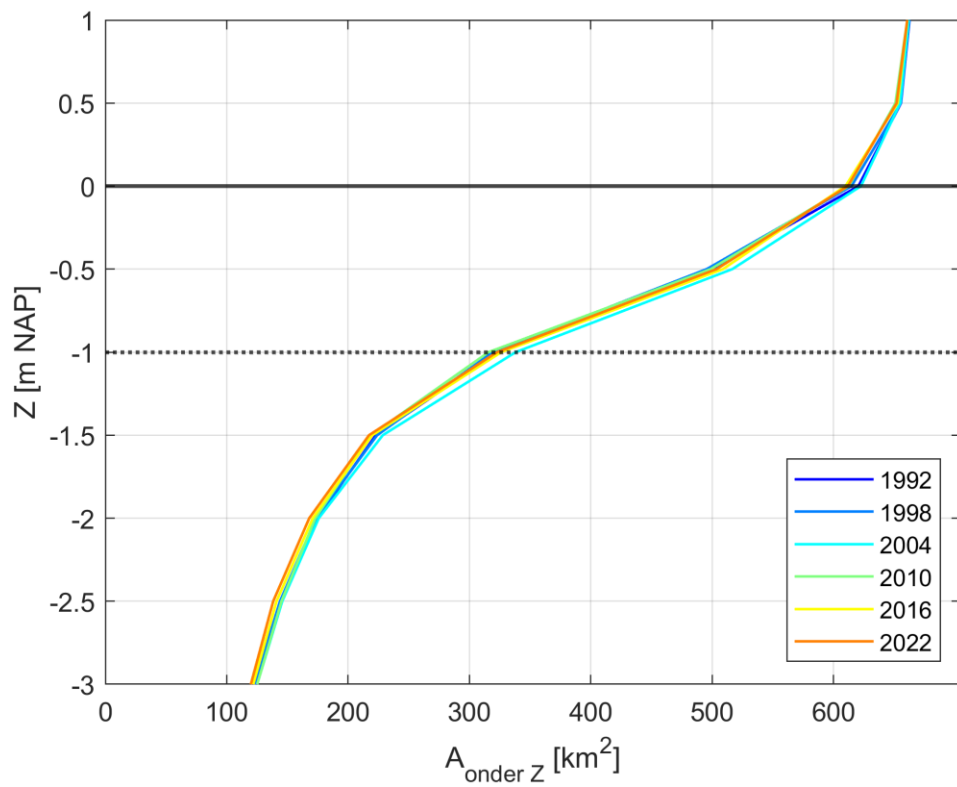
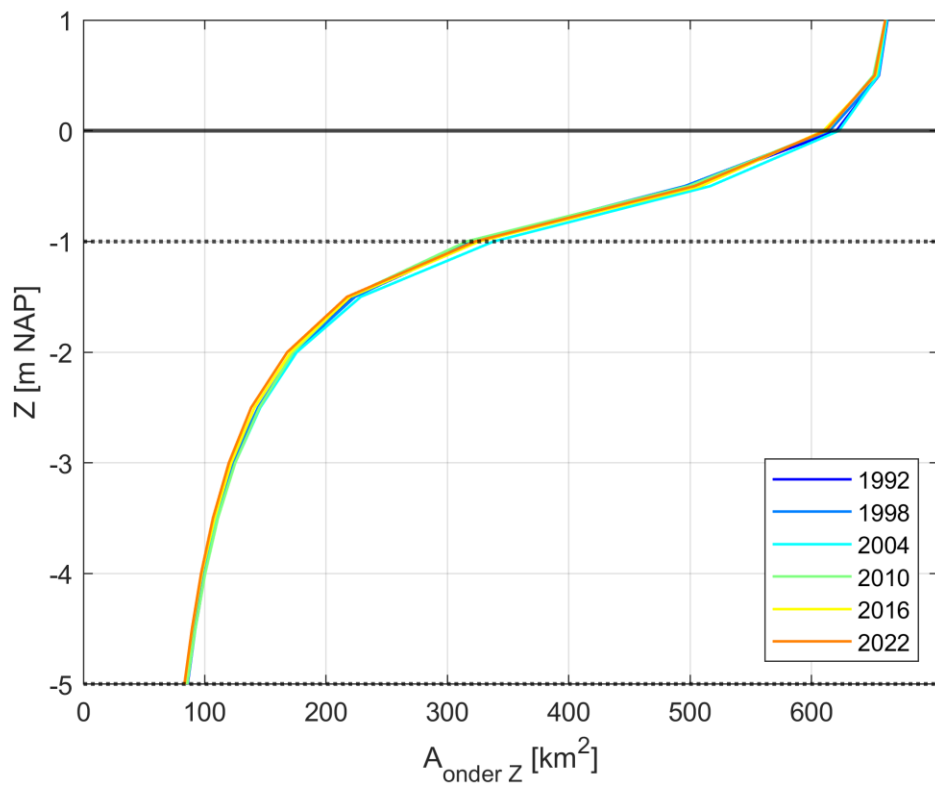
De hier uitgevoerde volumebalans is een analyse op geaggregeerde schaal. Dat betekent dat niet alle individuele, kleine polygoonen gevolgd worden. Het berekenen van de volumes gebeurt enkel voor polygoonen die groter zijn dan een bepaalde kritieke limiet.

C Resultaten volumeanalyse

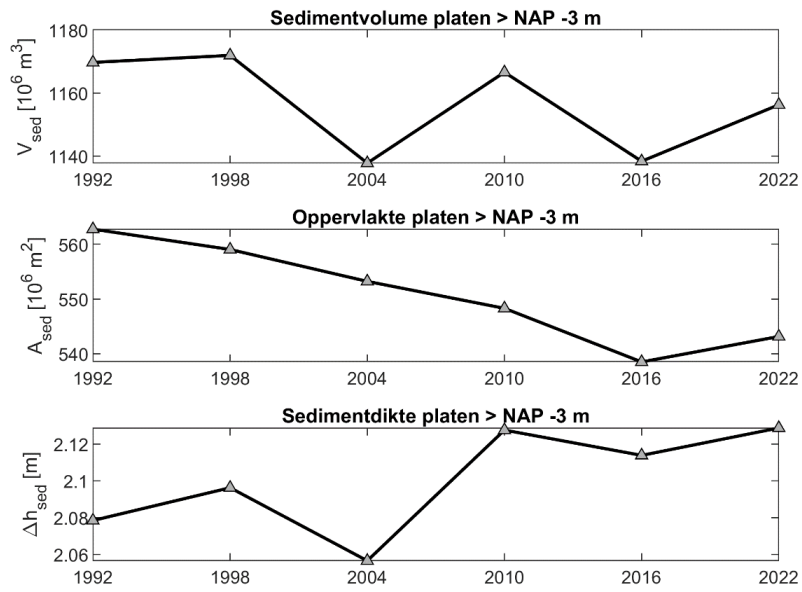
C.1 Hypsometrische curve

Hieronder zijn de hypsometrische curves getoond voor de bodemkaarten over de periode 1992-2022. De gehanteerde afbakening is de ligging van het wantij in 2022.

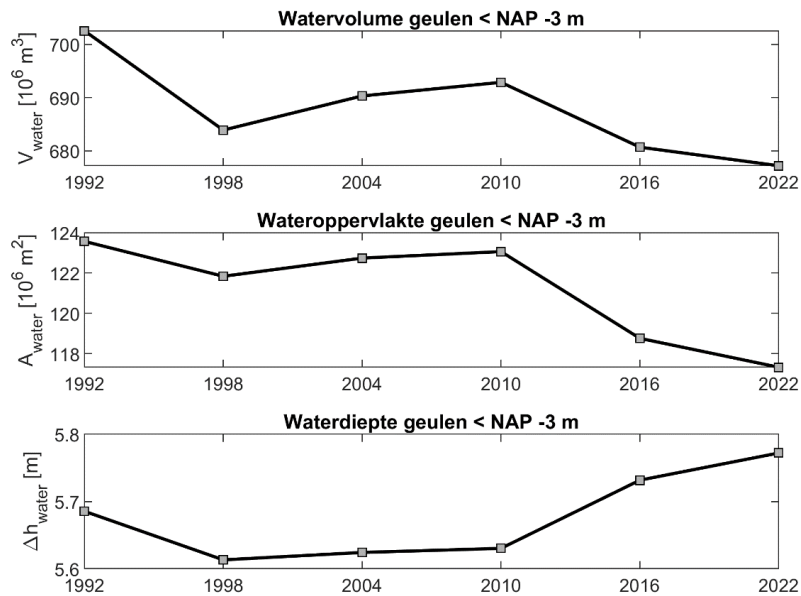




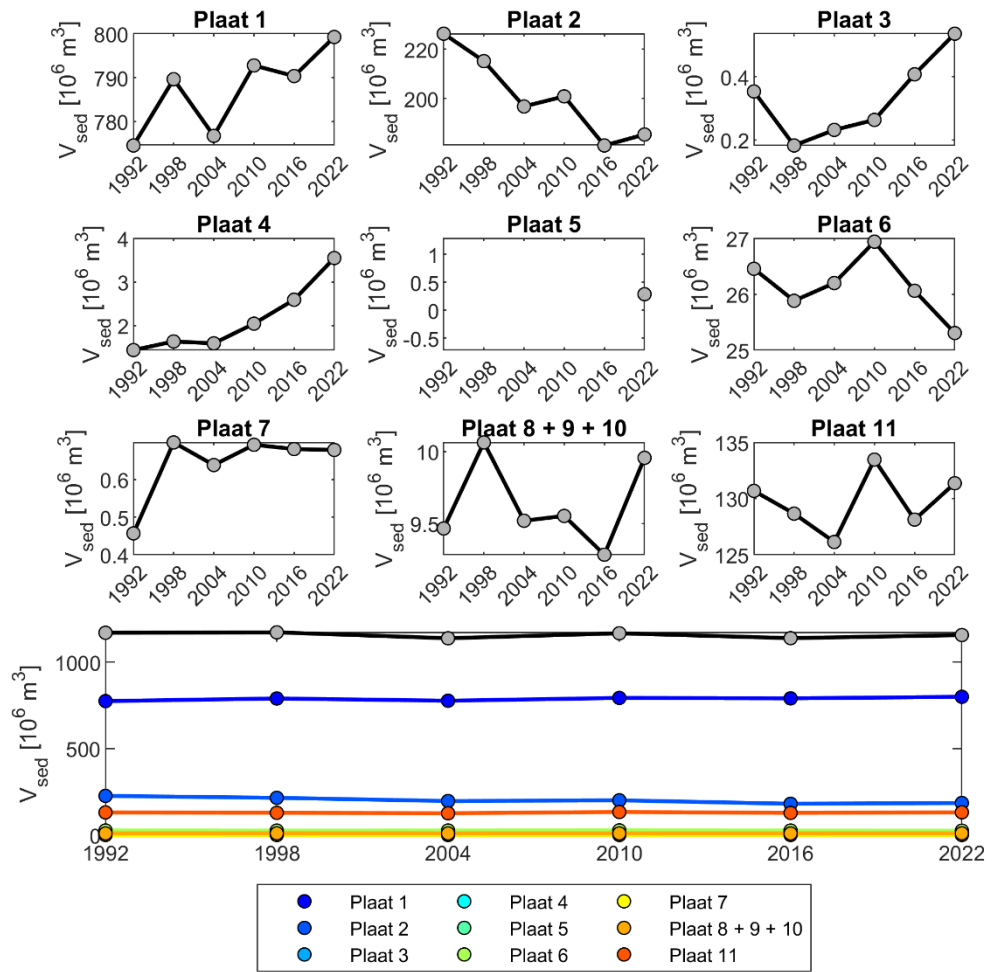
C.2 Tijdsreeksen platen > NAP -3 m (absoluut)

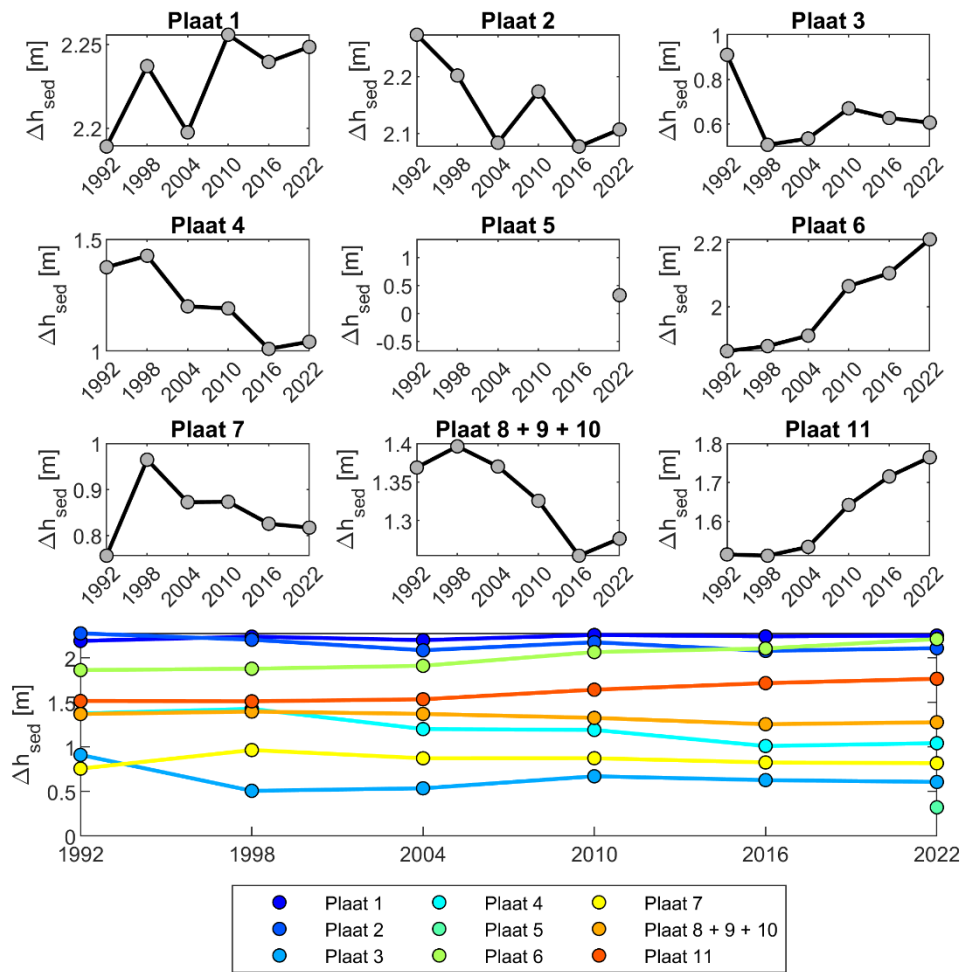


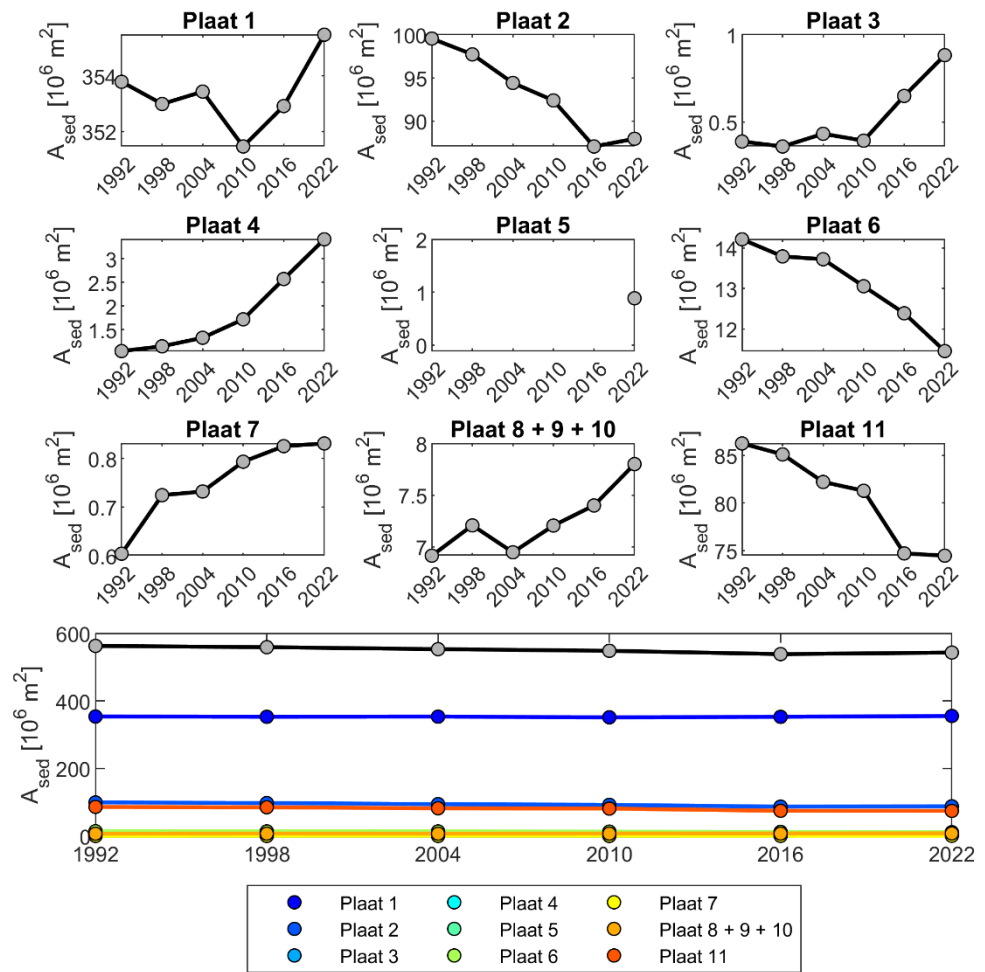
C.3 Tijdsreeksen geulen < NAP -3 m (absoluut)



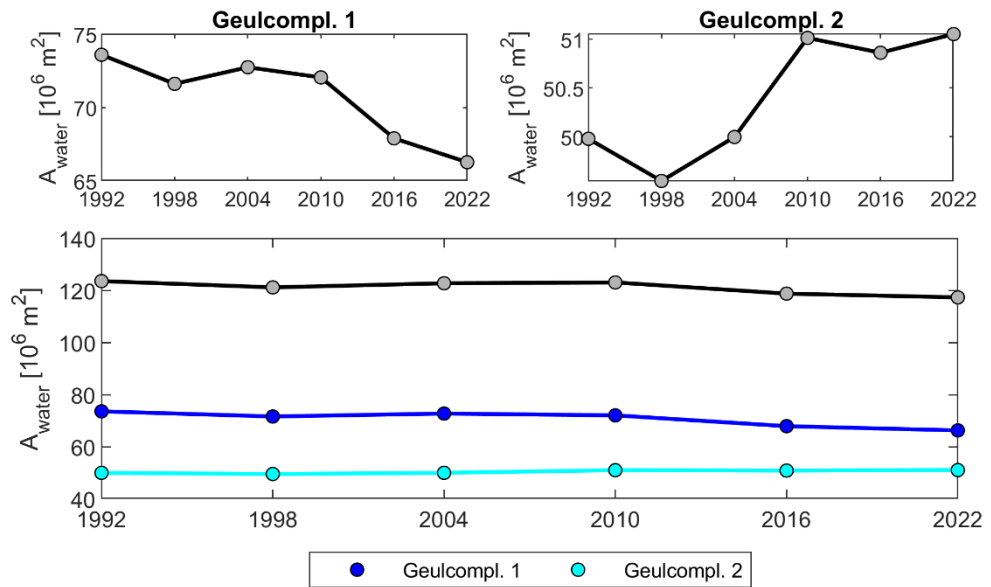
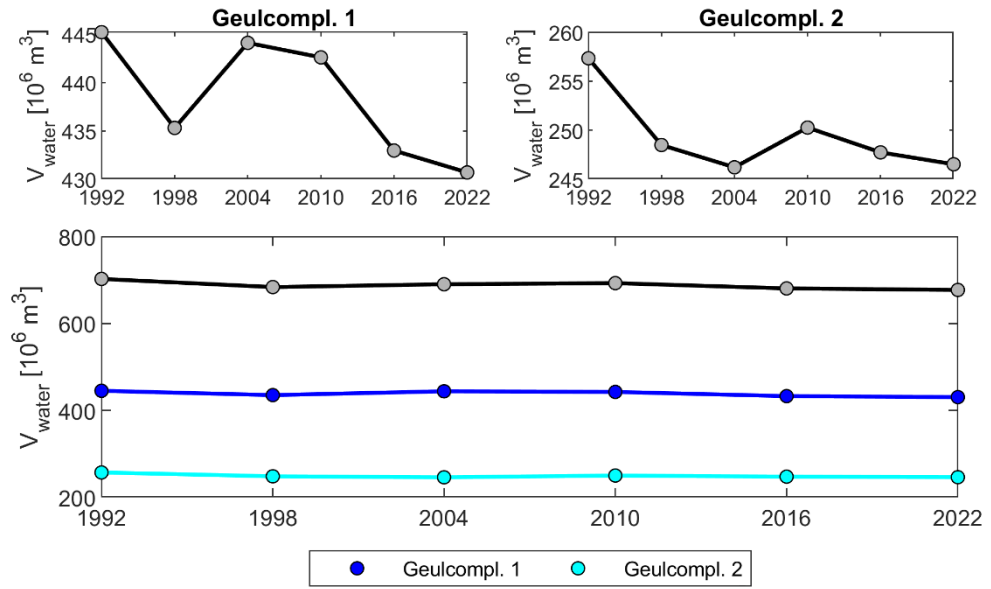
C.4 Tijdsreeks specifieke platen < NAP -3 m (absoluut)

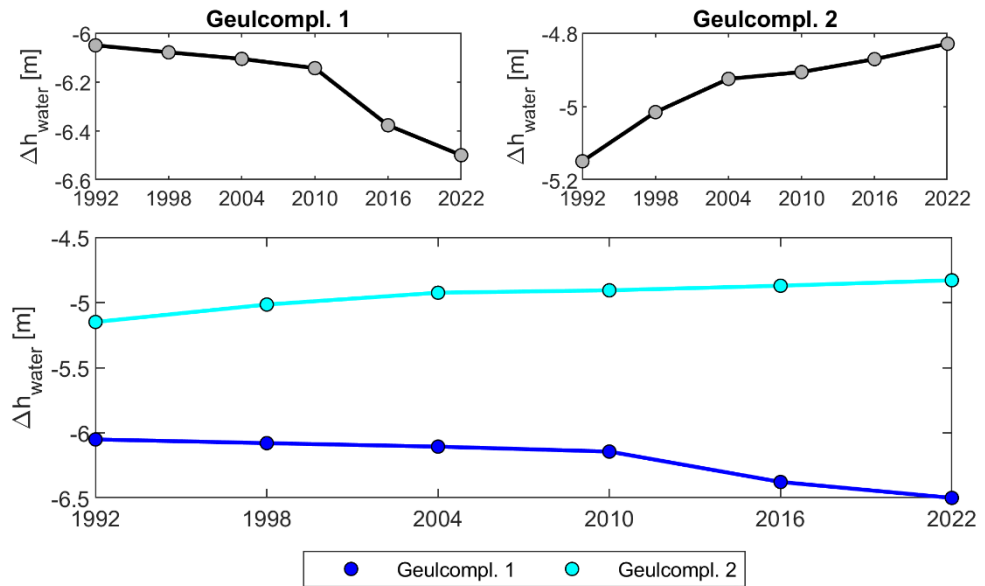




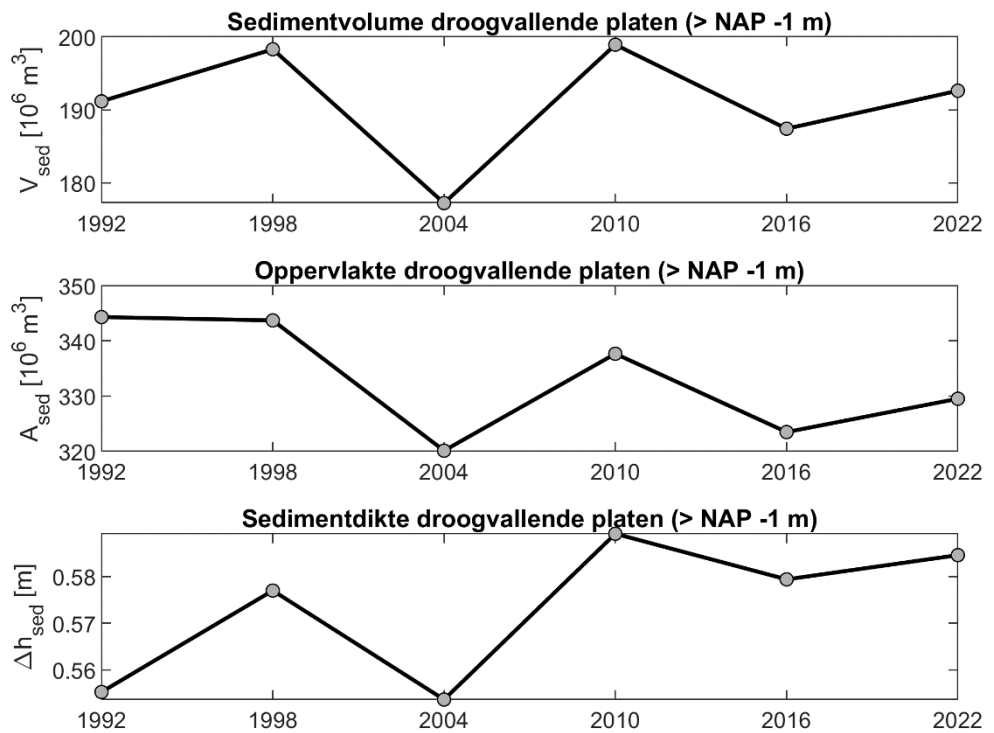


C.5 Tijdsreeksen specifieke geulen < NAP -3 m (absoluut)

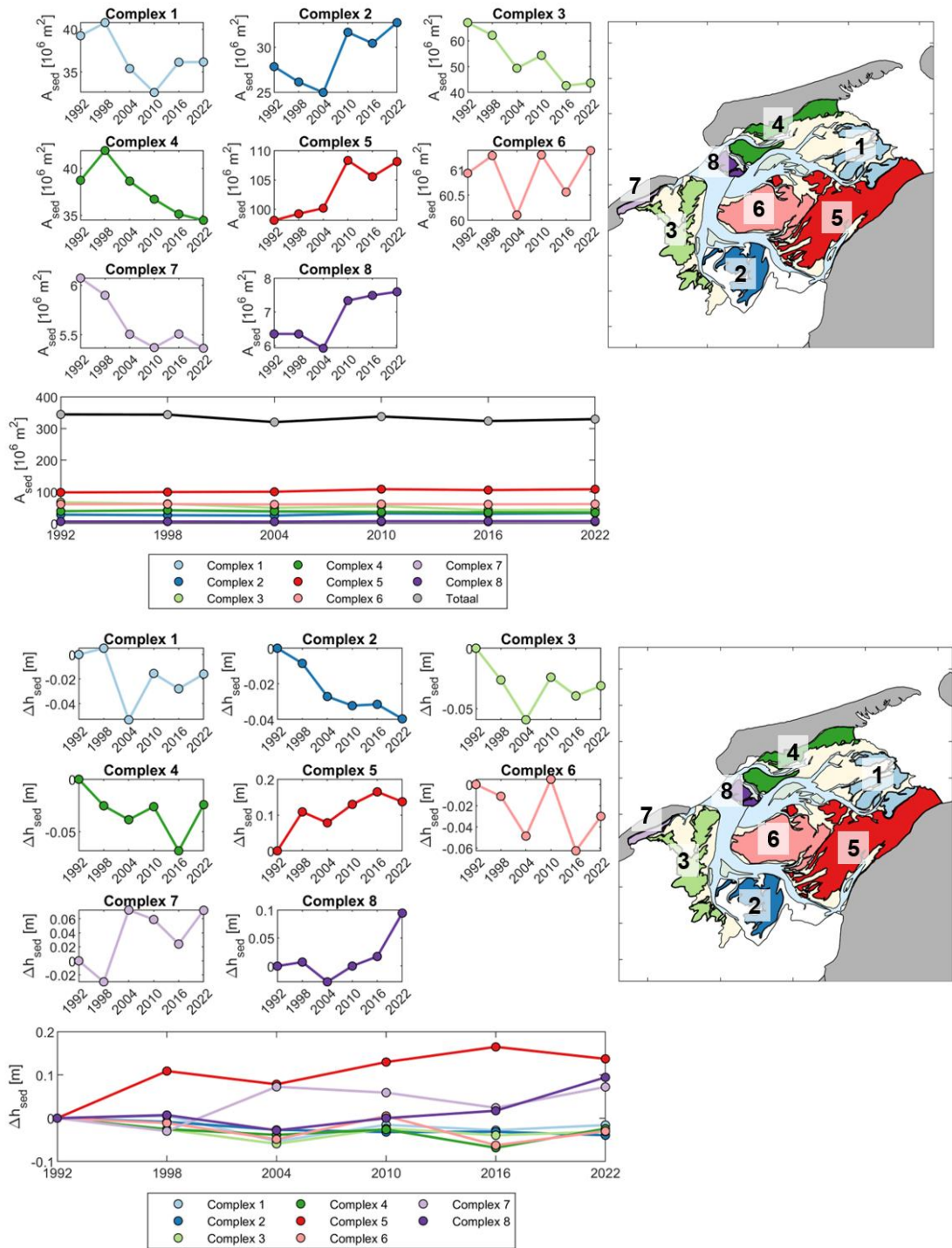




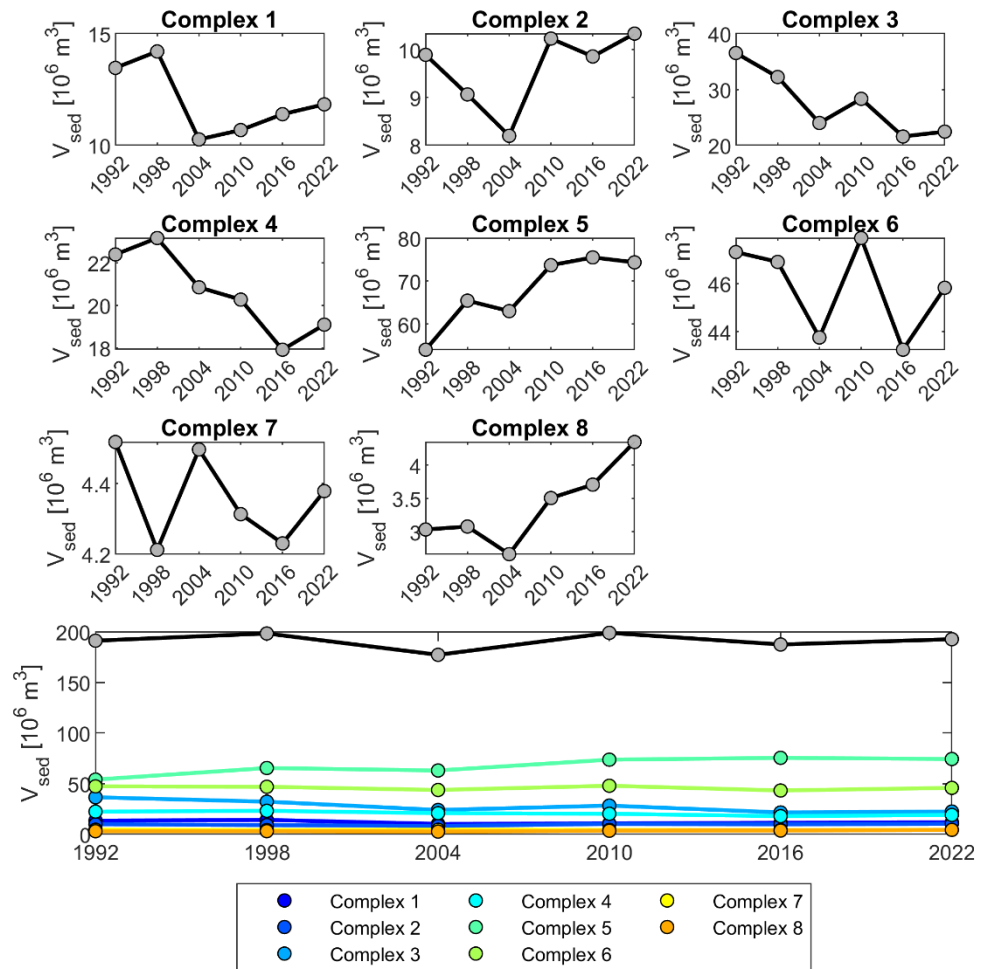
C.6 Tijdsreeksen platen > NAP -1 m (absoluut)

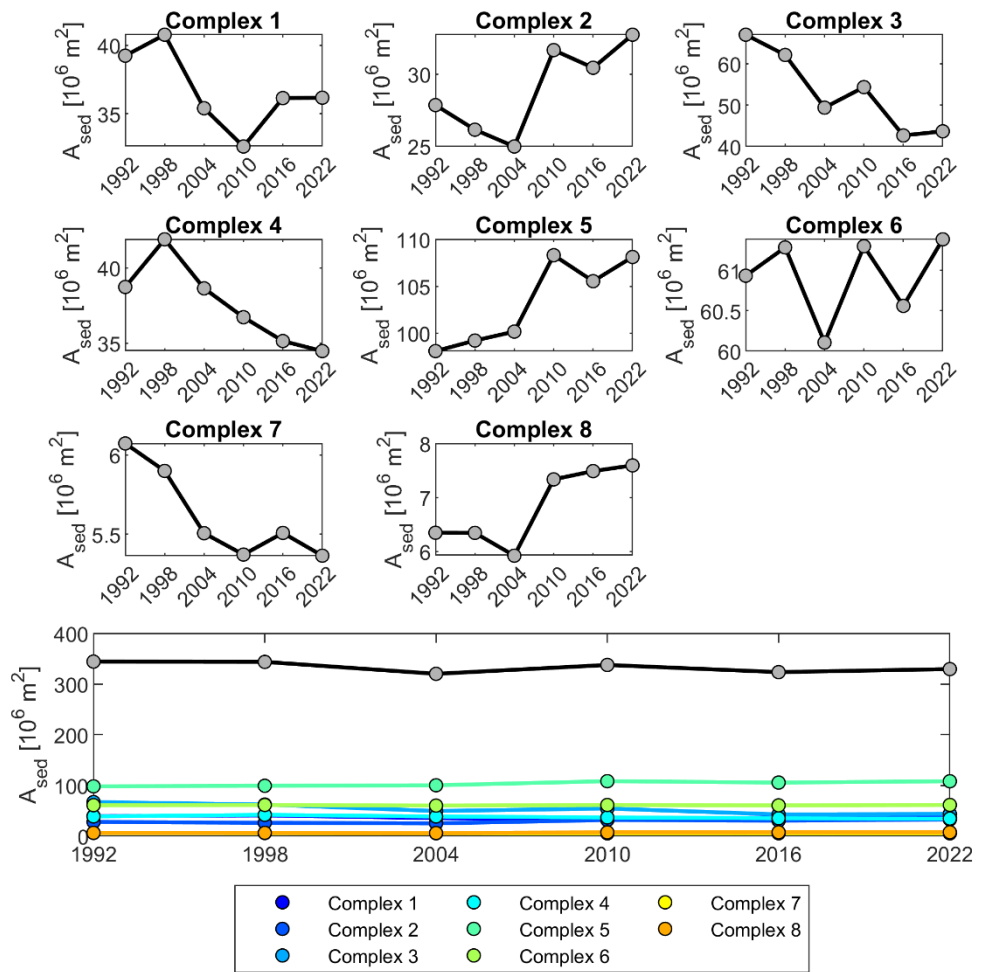


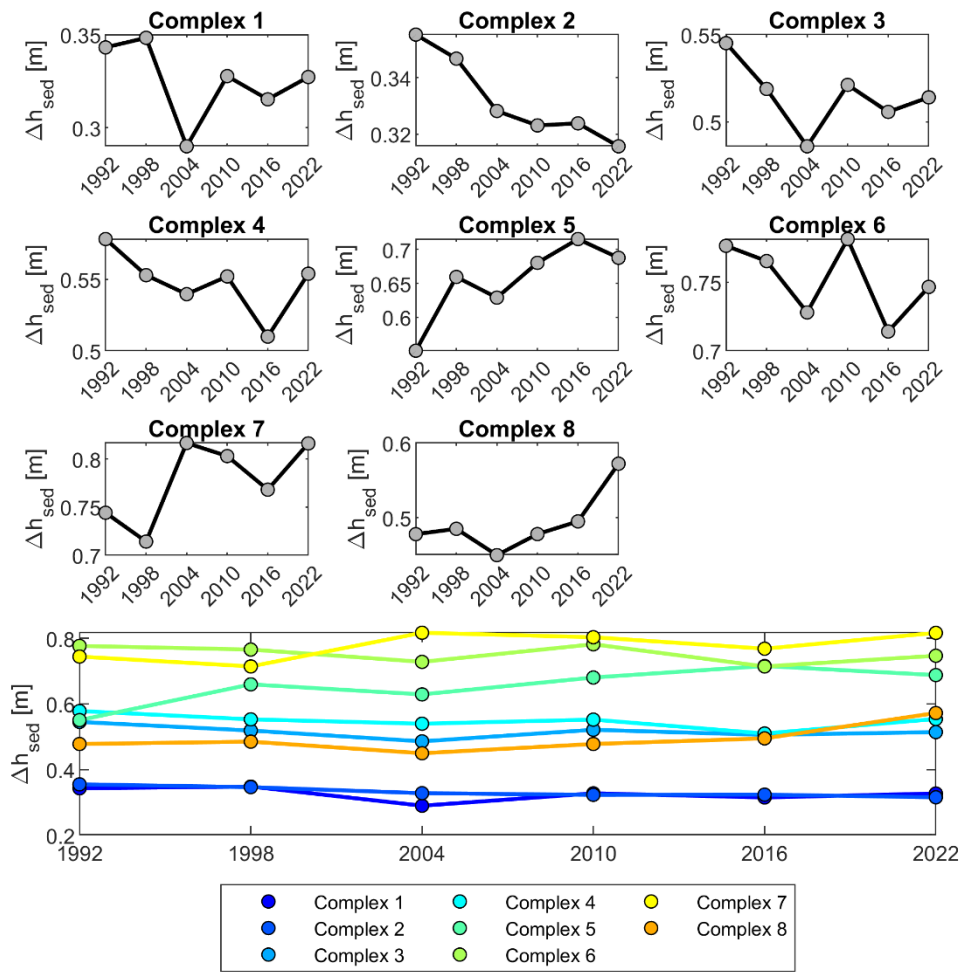
C.7 Tijdsreeks specifieke platen > NAP -1 m (relatief)



C.8 Tijdsreeks specifieke platen > NAP -1 m (absoluut)



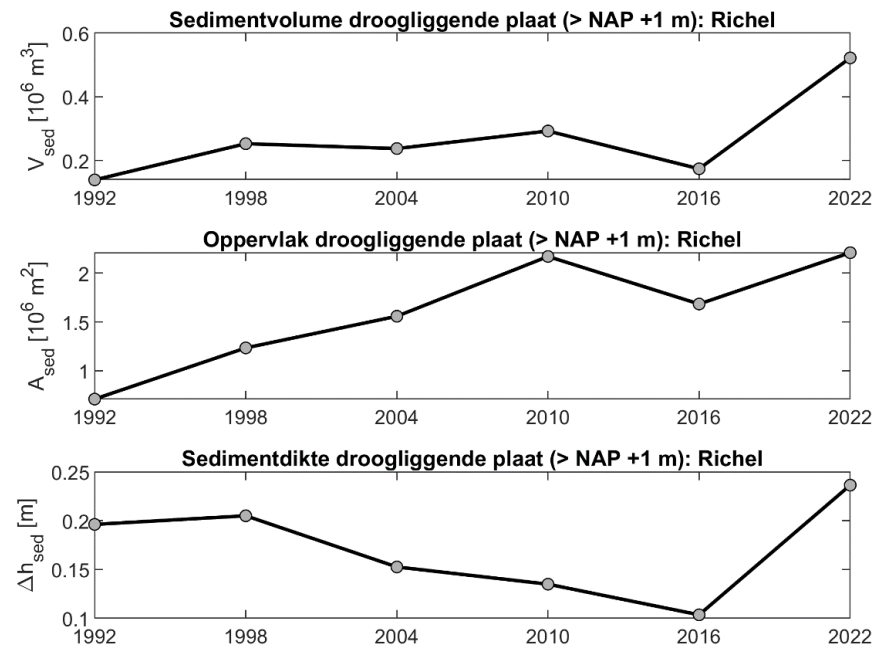
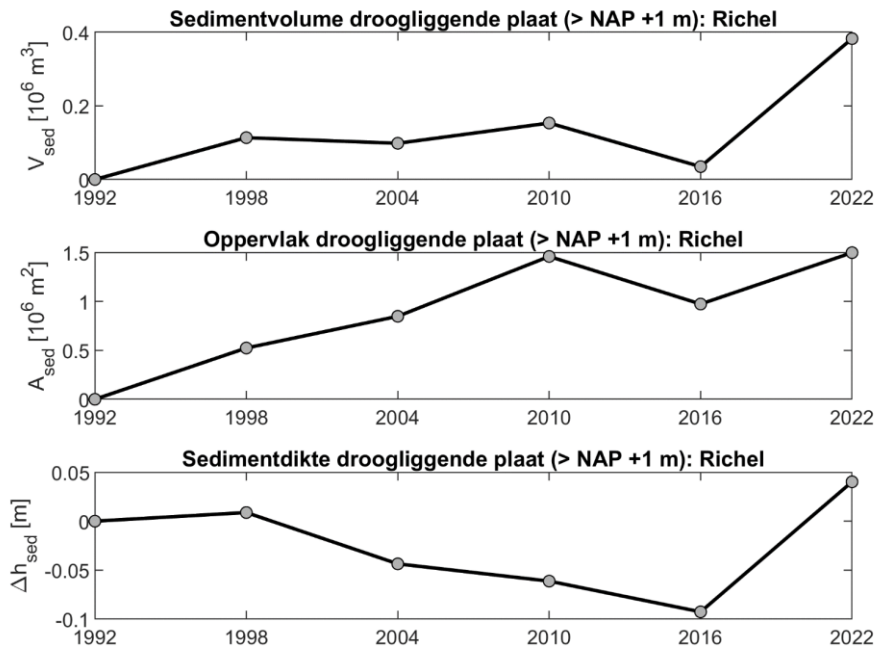


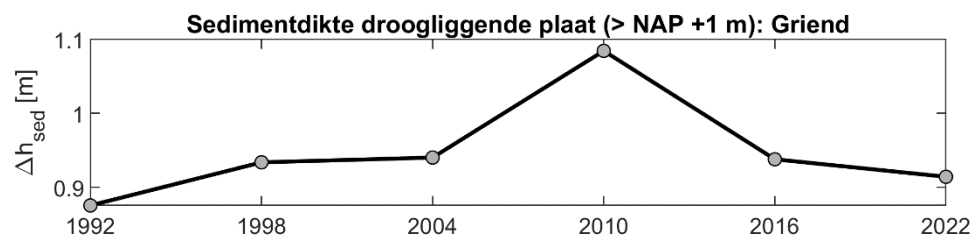
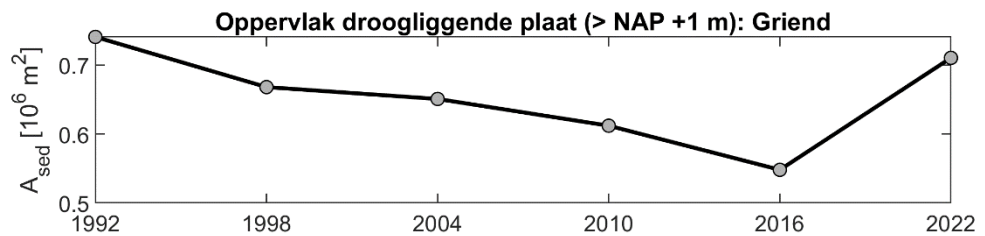
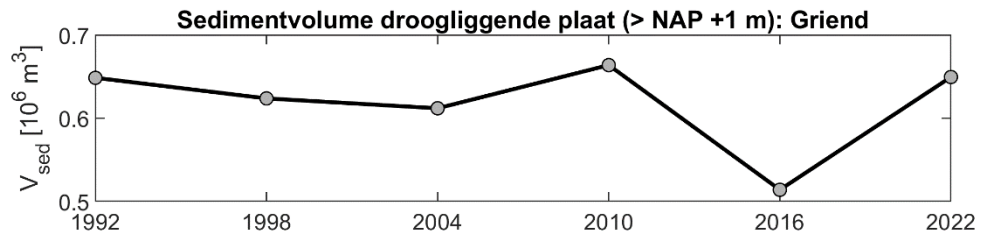
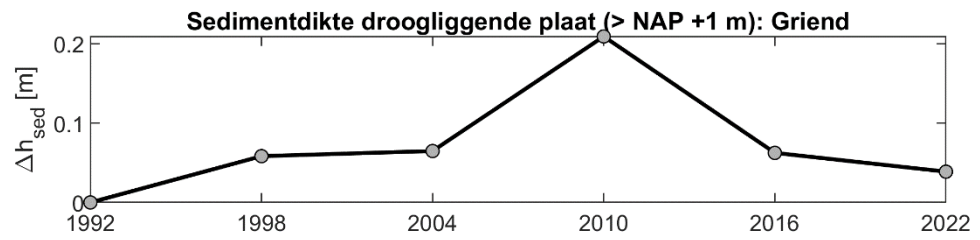
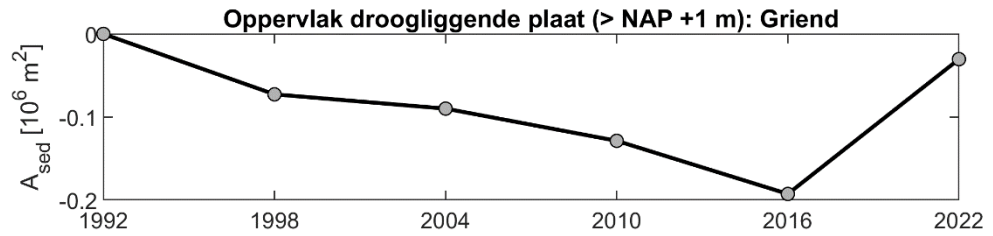
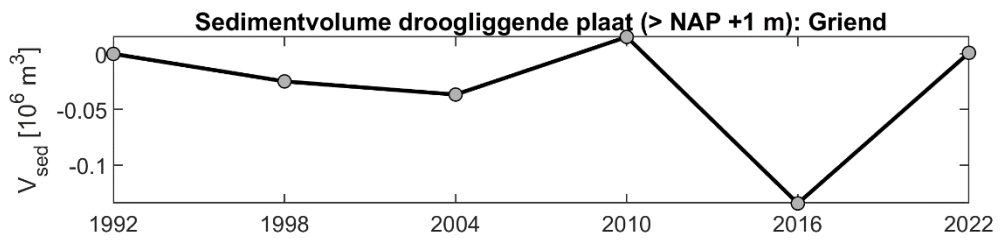


C.9 Veranderingen in volume, oppervlakte en hoogte in detail

	Volume			Oppervlakte			Hoogte		
	$dV_{2022-1992}$ [10^6 m ³]	dV/dt [10^6 m ³ /jr]	Lin. trend [10^6 m ³ /jr]	$dA_{2022-1992}$ [km ²]	dA/dt [km ² /jr]	Lin. trend [km ² /jr]	$dH_{2022-1992}$ [m]	dH/dt [m/jr]	Lin. trend [m/jr]
Platen > NAP -3 m									
Plaat 1	24,8	0,8	0,7	1,69	0,06	0,03	0,06	0,002	0,002
Plaat 2	-41,0	-1,4	-1,4	-11,6	-0,39	-0,44	-0,17	-0,006	-0,005
Plaat 3	0,2	0,01	0,01	0,49	0,02	0,02	-0,30	-0,010	-0,005
Plaat 4	2,1	0,07	0,07	2,36	0,08	0,08	-0,33	-0,011	-0,014
Plaat 5	-	-							
Plaat 6	-1,1	-0,04	-0,02	-2,76	-0,09	-0,09	0,35	0,012	0,012
Plaat 7	0,2	0,01	0,01	0,23	0,01	0,01	0,061	0,002	-0,001
Plaat 8-10	0,5	0,02	0,00	0,89	0,03	0,03	-0,092	-0,003	-0,004
Plaat 11	0,7	0,02	0,04	-11,8	-0,39	-0,43	0,25	0,008	0,009
Totaal	-13,5	-0,4	-0,7	-19,6	-0,7	-0,8	0,050	0,002	0,002
Platen > NAP -1 m									
Complex 1	-1,63	-0,05	-0,08	-3,08	-0,10	-0,15	-0,02	-0,001	-0,001
Complex 2	0,44	0,01	0,03	4,88	0,16	0,21	-0,04	-0,001	-0,001
Complex 3	-14,1	-0,47	-0,47	-23,3	-0,78	-0,81	-0,03	-0,001	-0,001
Complex 4	-3,30	-0,11	-0,16	-4,26	-0,14	-0,21	-0,02	-0,001	-0,001
Complex 5	20,3	0,68	0,68	10,0	0,33	0,37	0,14	0,005	0,004
Complex 6	-1,49	-0,05	-0,07	0,45	0,02	0,01	-0,03	-0,001	-0,001
Complex 7	-0,14	-0,005	-0,004	-0,71	-0,02	-0,02	0,07	0,002	0,002
Complex 8	1,31	0,04	0,04	1,25	0,04	0,05	0,09	0,003	0,003
Totaal	+1,5	+0,05	-0,02	-14,8	-0,5	-0,6	+0,03	+0,001	+0,001
Platen > NAP +1 m									
Richel	+0,38	+0,013	+0,008	+1,50	+0,05	+0,04	+0,04	+0,001	-0,001
Griend	+0,001	+0,00003	-0,001	-0,03	-0,001	-0,003	+0,04	+0,001	+0,002
Geulen < NAP -3 m									
Geul 1	-14,5	-0,48	-0,38	-7,31	-0,24	-0,23	0,45	0,01	0,02
Geul 2	-10,8	-0,36	-0,25	1,07	0,04	0,05	-0,32	-0,01	-0,01
Totaal	-25,3	-0,8	-0,6	-6,2	-0,2	-0,2	+0,09	+0,003	+0,004

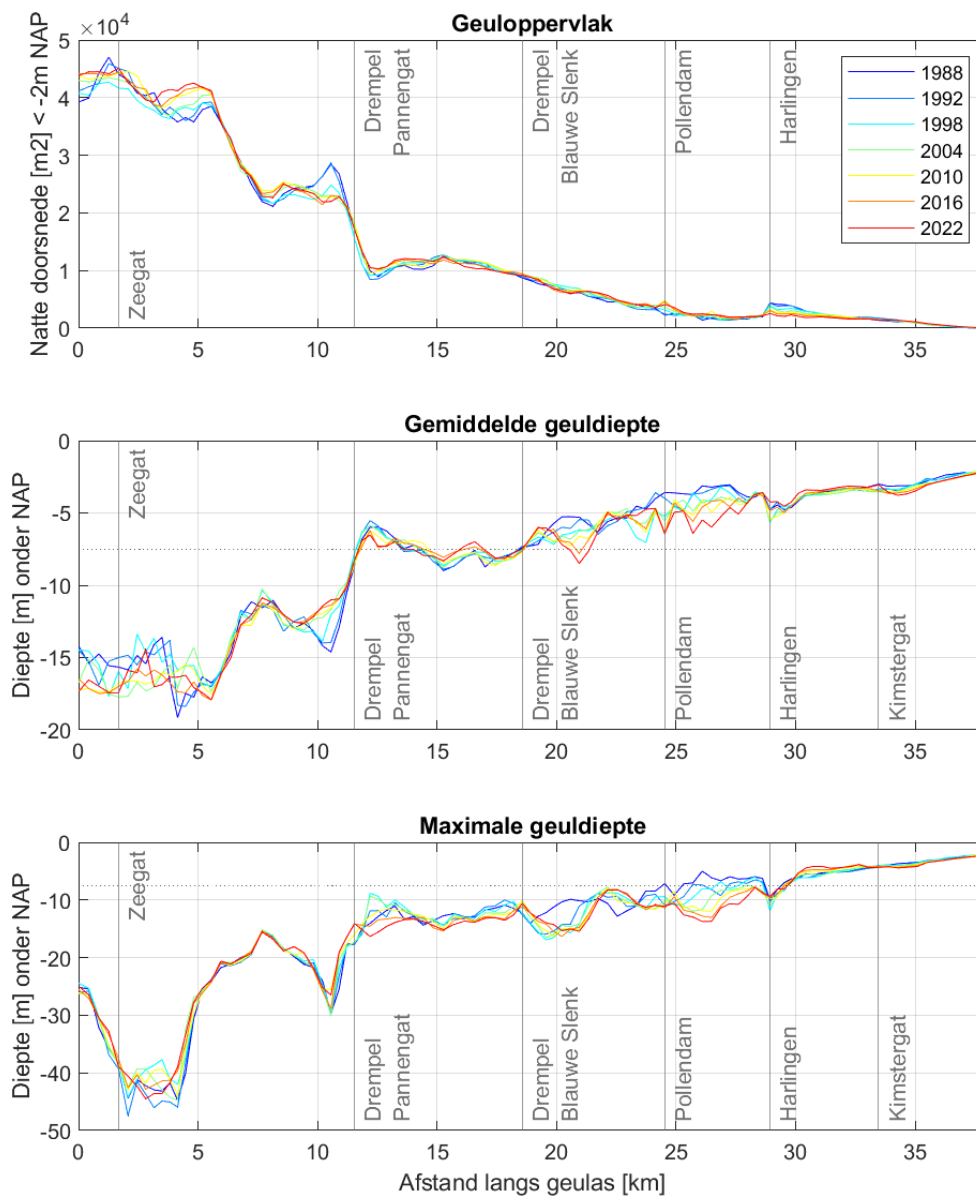
C.10 Droogliggende platen



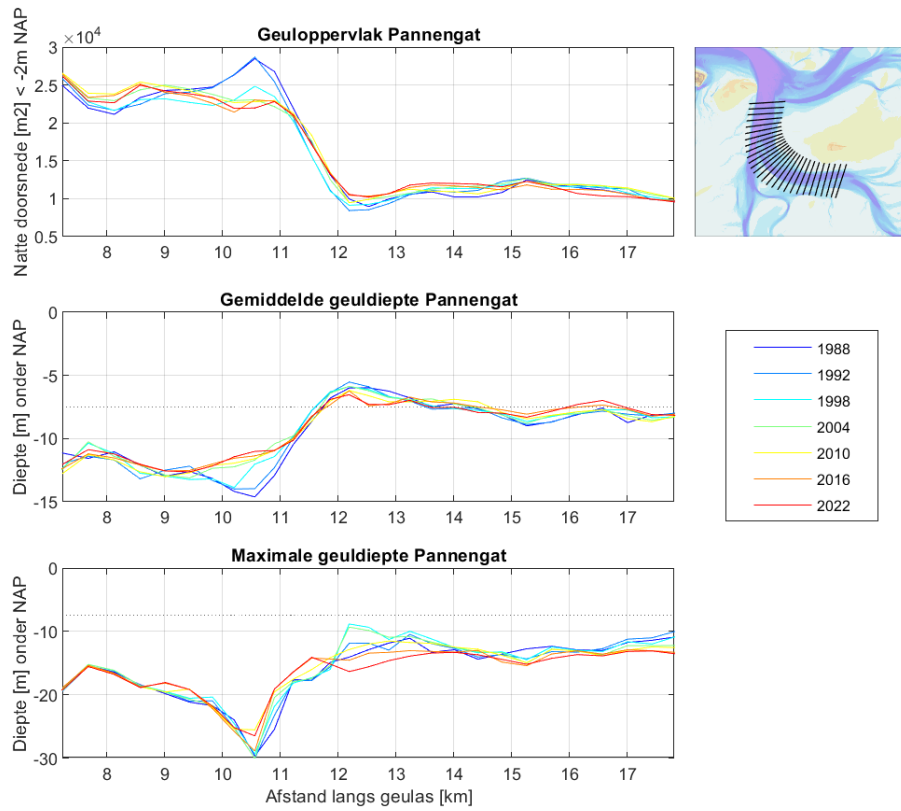


D Extra figuren morfologische ontwikkeling knelpunten

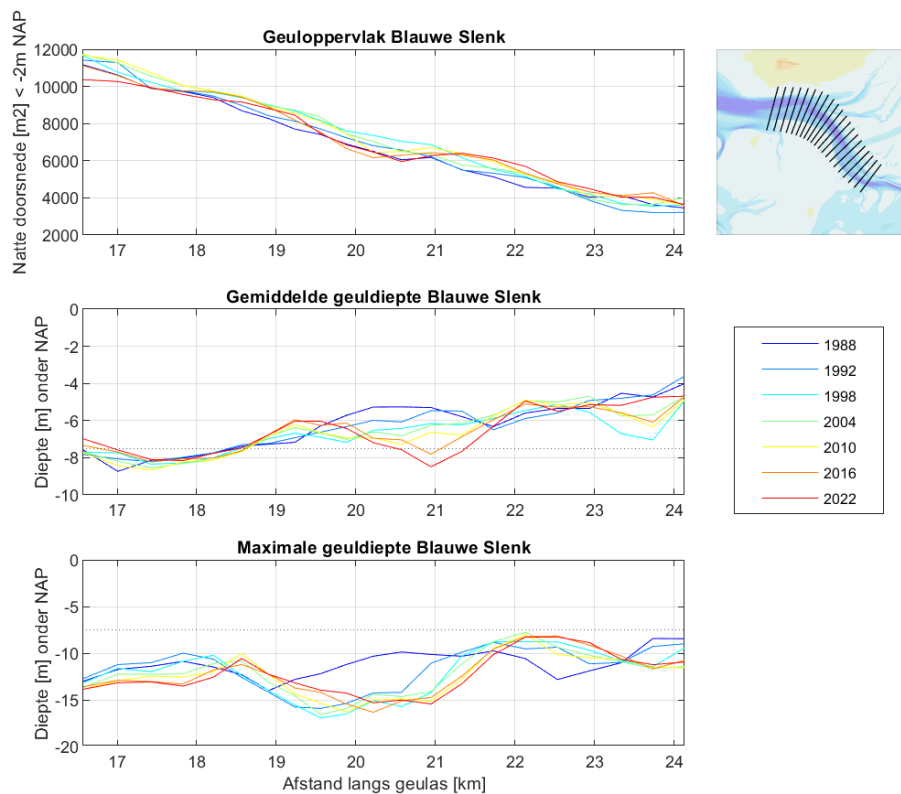
D.1 Totaal



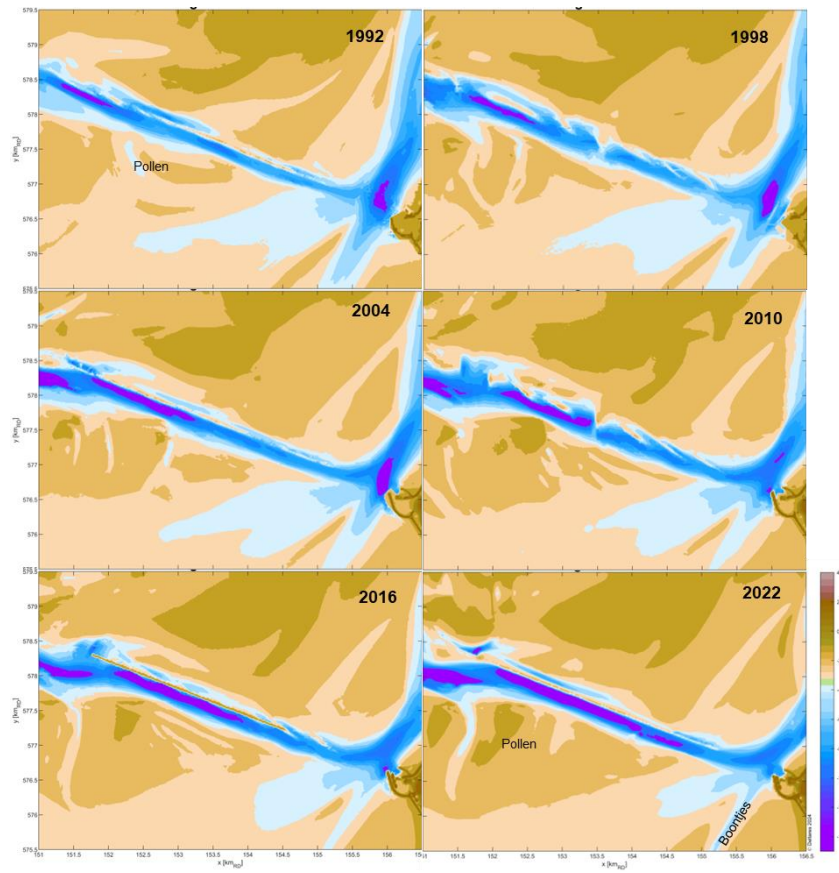
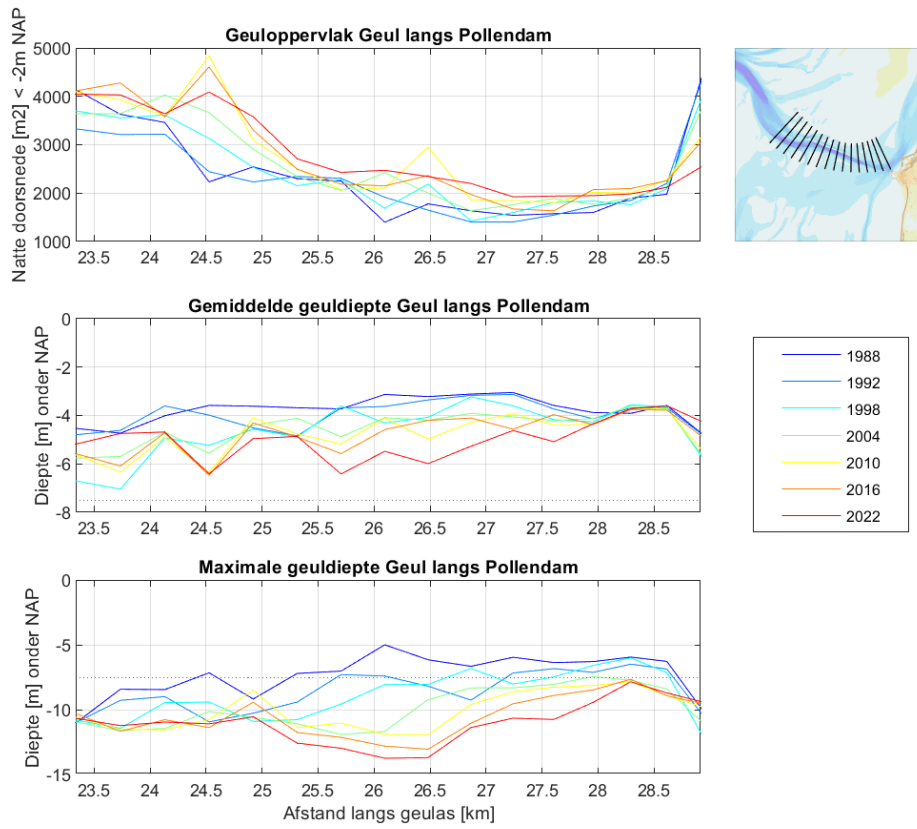
D.2 Pannengat

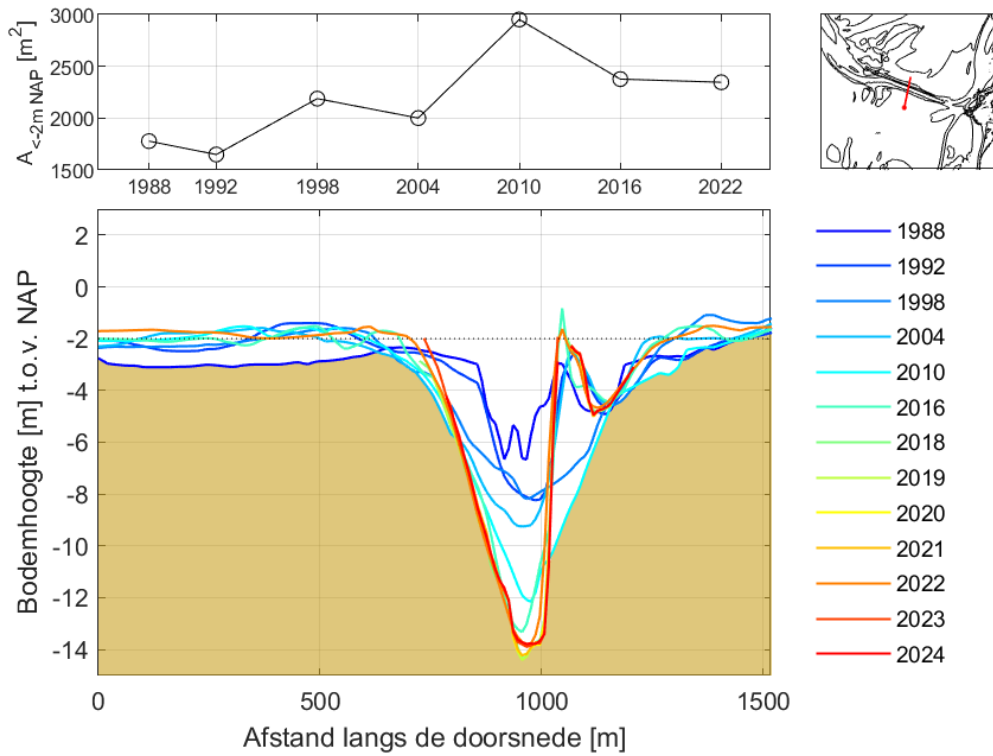


D.3 Blauwe Slenk

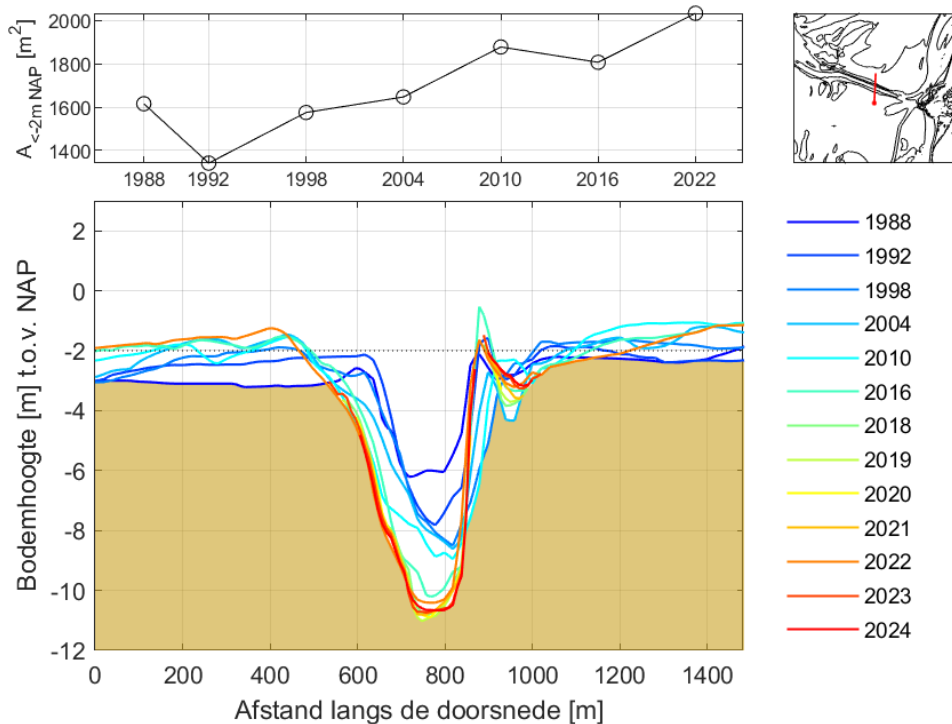


D.4 Geul langs Pollendam

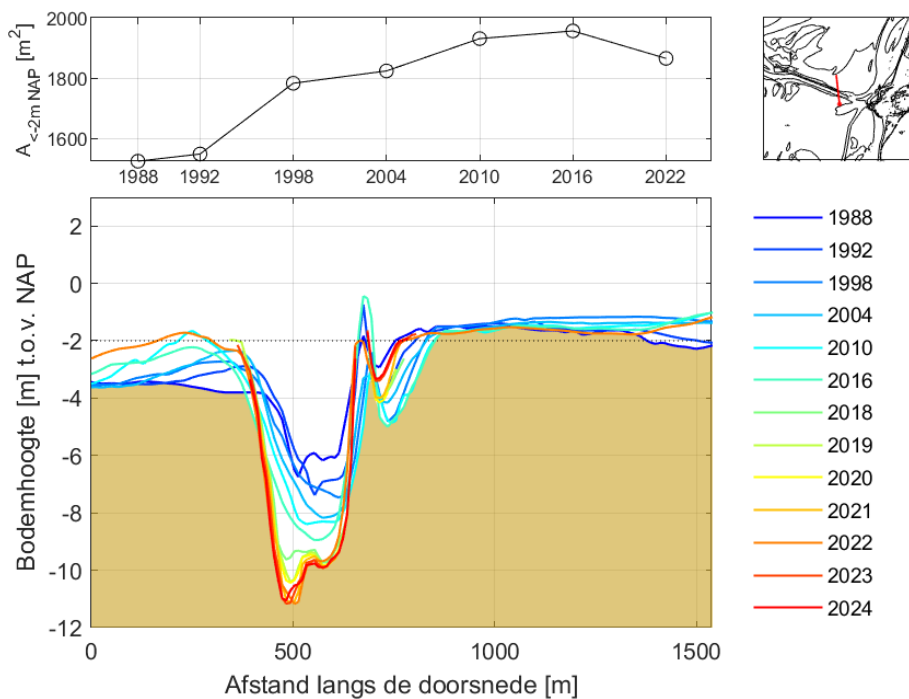




Figuur 7-3 Doorsnede van de Geul langs Pollendam tussen 1998 en 2024. Er vond verdieping plaats tot ca 2018, sindsdien is de diepte stabiel. Vanaf 2018 zijn beschikbare beheerlodingen gebruikt. Het natte oppervlak (bovenste paneel) is berekend op basis van vaklodingen omdat de beheerlodingen niet de volledige doorsnede dekken.

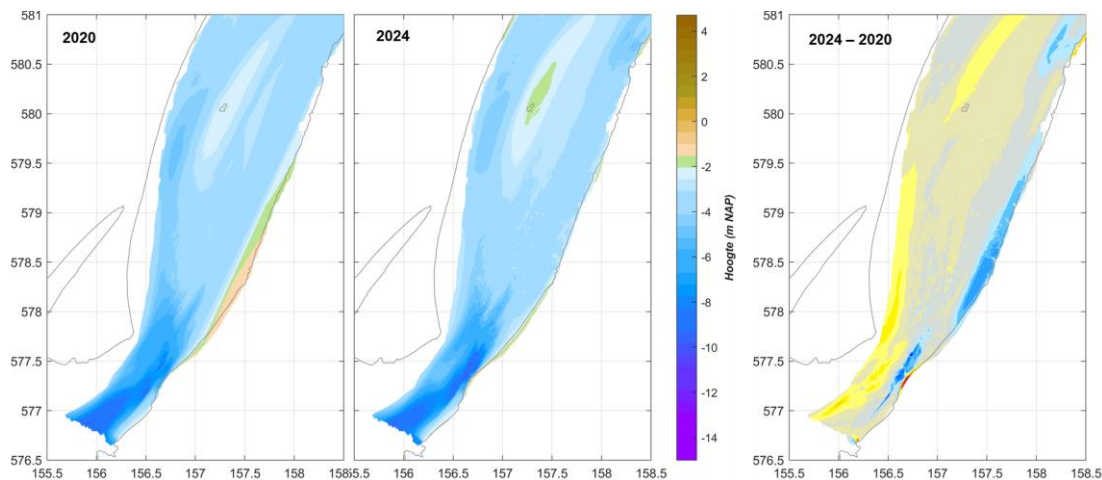


Figuur 7-4 Doorsnede van de Geul langs Pollendam tussen 1998 en 2024. Er vond verdieping plaats tot ca 2018, sindsdien is de diepte stabiel. Vanaf 2018 zijn beschikbare beheerlodingen gebruikt. Het natte oppervlak (bovenste paneel) is berekend op basis van vaklodingen omdat de beheerlodingen niet de volledige doorsnede dekken.

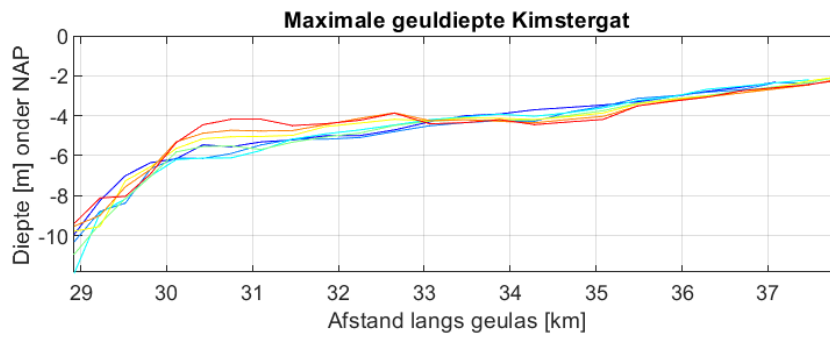
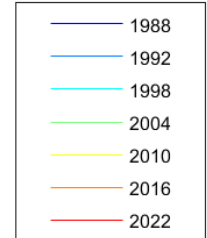
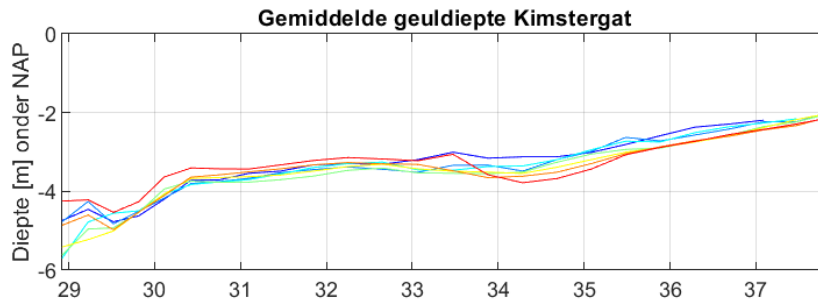
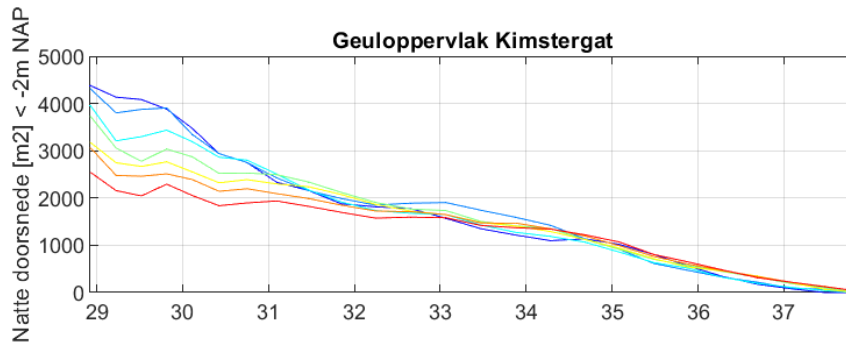


Figuur 7-5 Doorsnede van de Geul langs Pollendam tussen 1998 en 2024. Er vond verdieping plaats tot ca 2018, sindsdien is de diepte stabiel. Vanaf 2018 zijn beschikbare beheerlodingen gebruikt. Het natte oppervlak (bovenste paneel) is berekend op basis van vaklodingen omdat de beheerlodingen niet de volledige doorsnede dekken.

D.5 Kimstergat

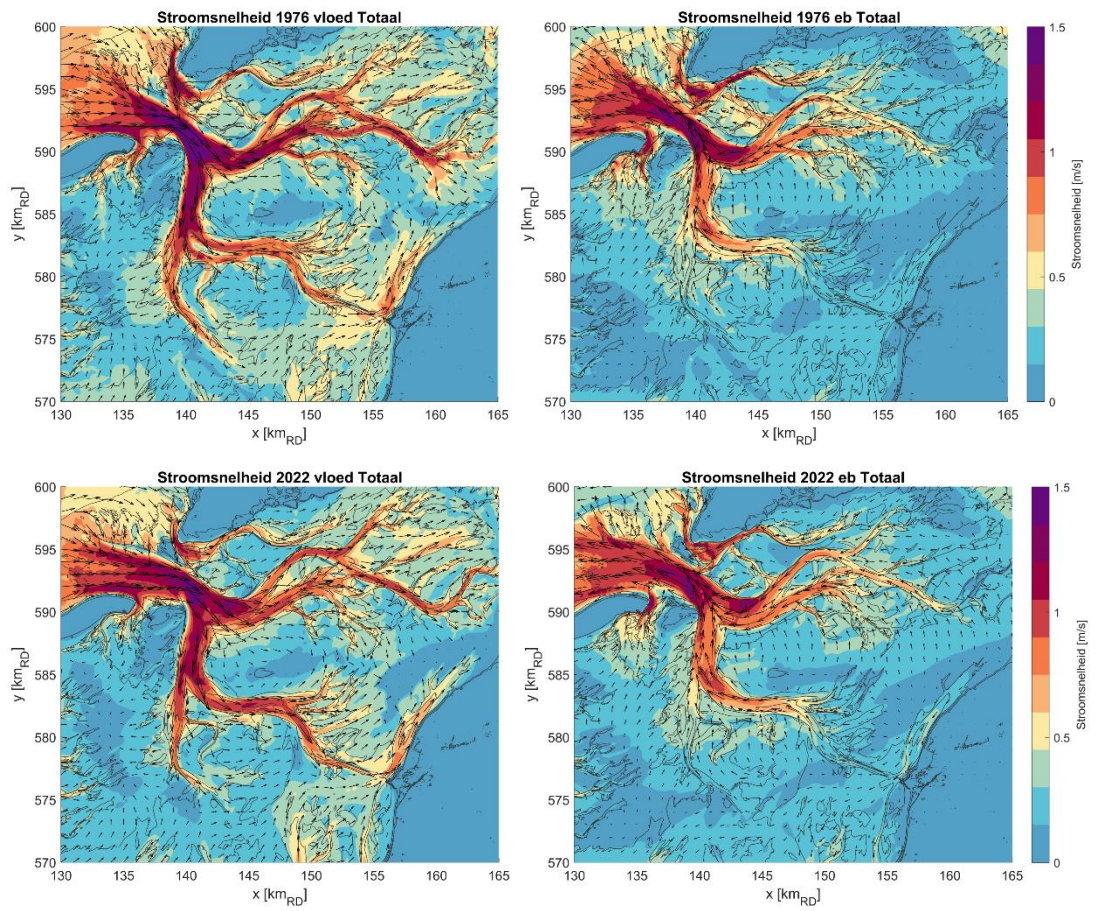


Figuur 7-6 Bodemligging van Kimstergat tussen 2020 en 2024 op basis van de Beheerlodingen. Rechts: Sedimentatie – erosie kaart op basis van het verschil in bodemligging tussen 2024 en 2020.

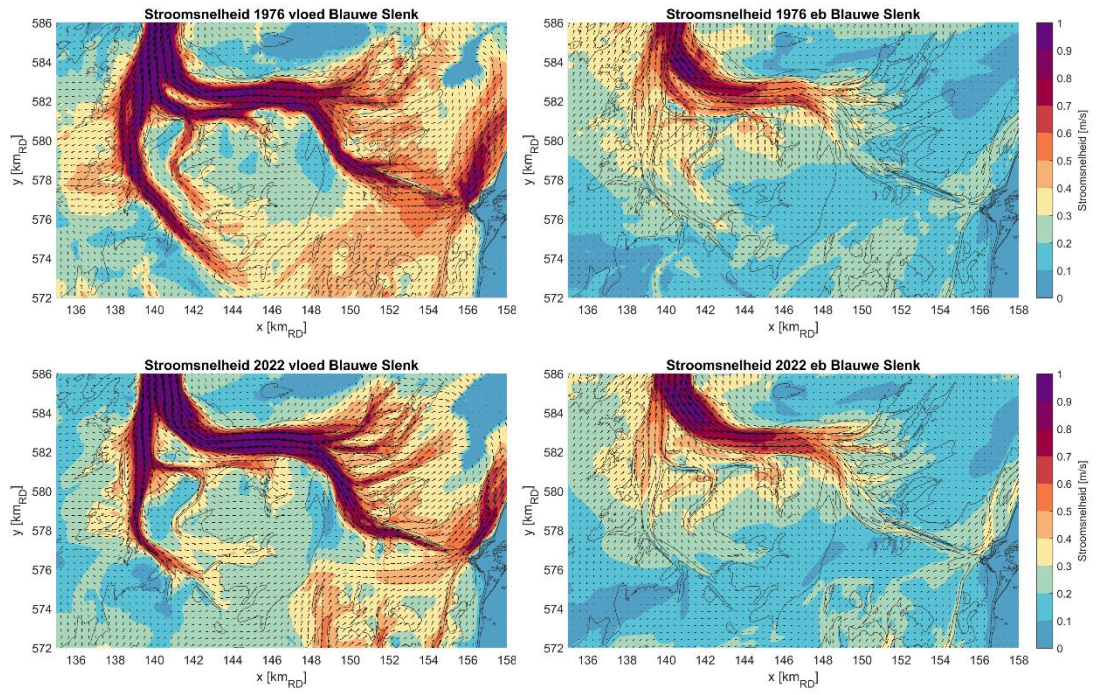


E Hydrodynamische ontwikkeling: stroming

E.1 Vlie totaal

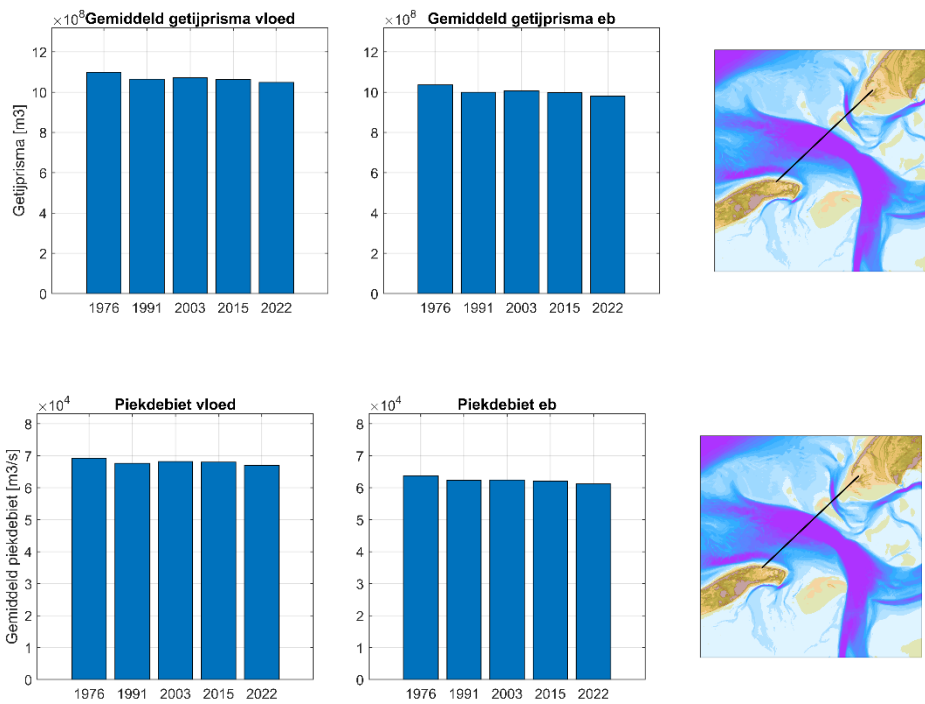


E.2 Blauwe Slenk

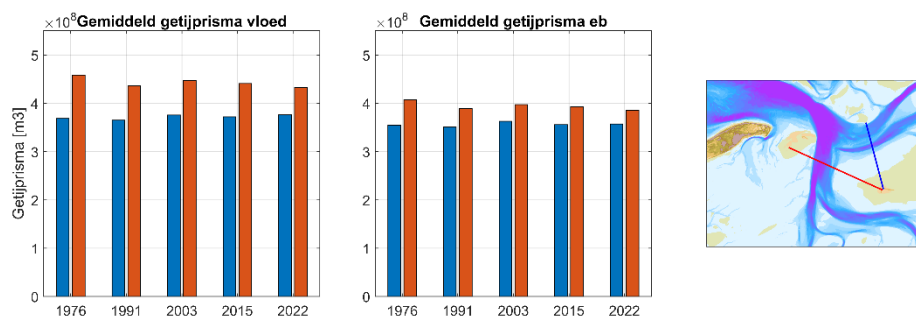


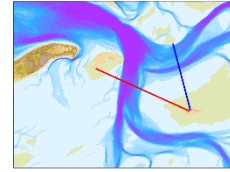
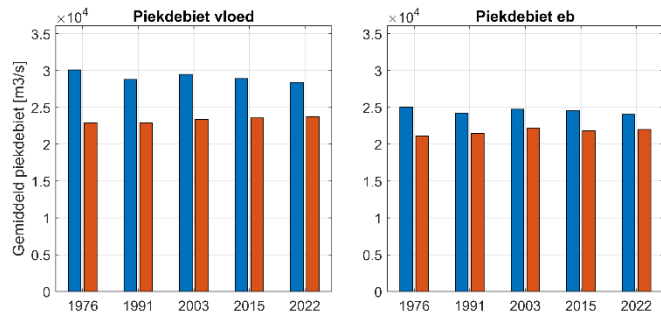
F Hydrodynamische ontwikkeling: debieten

F.1 Vliestroom

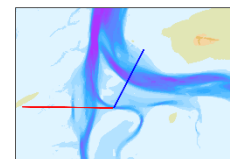
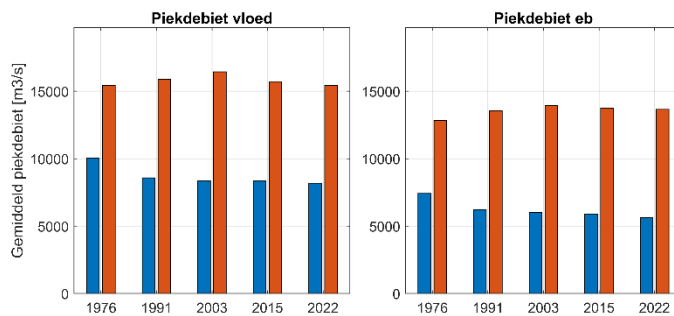
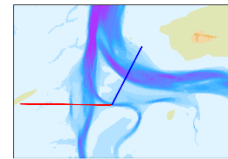
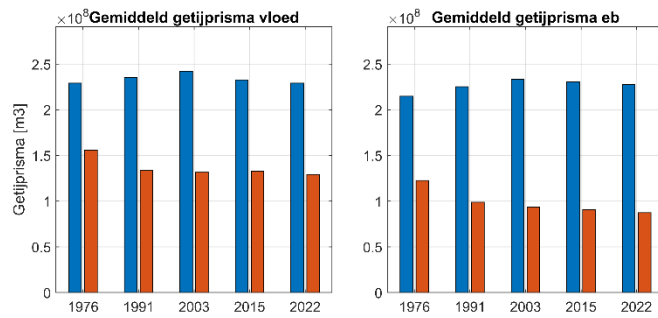


F.2 Pannengat – Westmeep

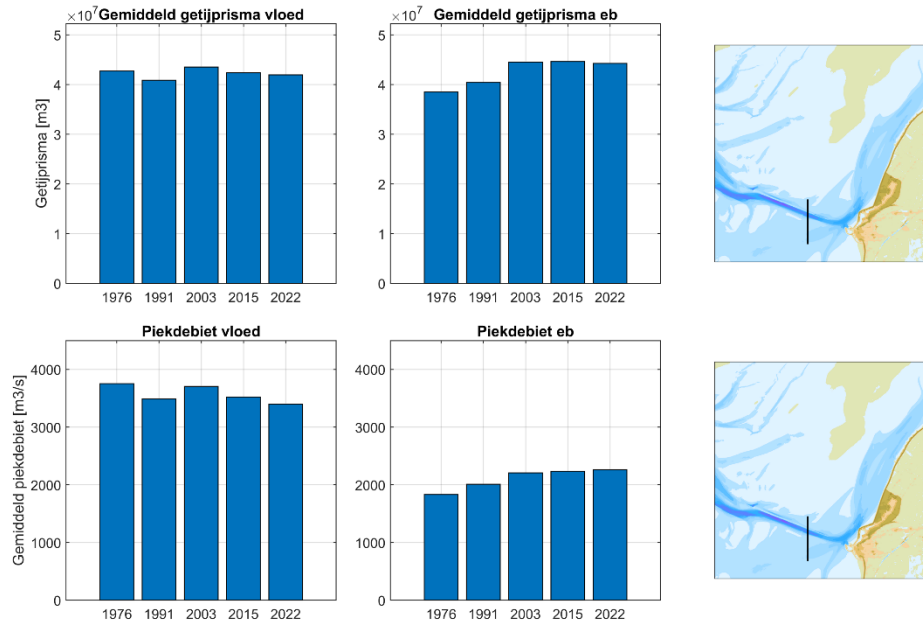




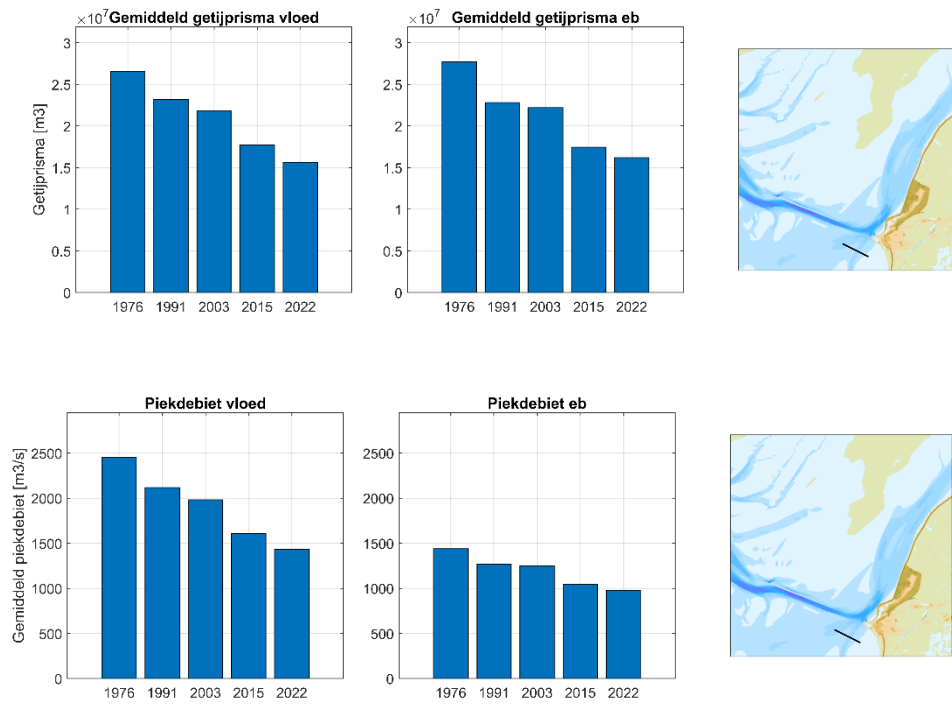
F.3 Blauwe Slenk – Oude Inshot



F.4 Geul langs de Pollendam



F.5 Boontjes



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl