

Knelpuntanalyse Glinder en Groote Siege

Conceptueel model en handelingsperspectief voor knelpunten in de vaargeul
Lauwersoog-Schiermonnikoog



Knelpuntanalyse Glinder en Grootte Siege

Conceptueel model en handelingsperspectief voor knelpunten in de vaargeul Lauwersoog-Schiermonnikoog

Auteur(s)

Carlijn Meijers

Roy van Weerdenburg

Bart Grasmeyer

Klaas Lenstra

Jelmer Cleveringa

Knelpuntanalyse Glinder en Groote Siege

Conceptueel model en handelingsperspectief voor knelpunten in de vaargeul Lauwersoog-Schiermonnikoog

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Noord-Nederland locatie Leeuwarden
Contactpersoon	Ernst Lofvers, Jurre de Vries
Referenties	Referenties
Trefwoorden	Waddenzee, Lauwersoog, Schiermonnikoog, Vaargeul, Baggeren. Morfologie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	16-02-2024
Projectnummer	11209267-004
Document ID	11209267-004-ZKS-0001
Pagina's	67
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Carlijn Meijers (Deltares)	
	Roy van Weerdenburg (Deltares)	
	Bart Grasmeijer (Deltares)	
	Klaas Lenstra (Arcadis)	
	Jelmer Cleveringa (Arcadis)	

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de morfologische ontwikkeling van de geulen Glinder en Grootte Siege ten zuidwesten van Schiermonnikoog. In beide geulen, die onderdeel uitmaken van de vaarroute van Lauwersoog naar Schiermonnikoog, wordt de laatste jaren onderhoudsbaggerwerk uitgevoerd. De Zoutkamperlaag is de hoofdgeul in het bekken van het Friesche Zeegat en loopt van het zeegat tot Lauwersoog. De Glinder vormt een verbinding tussen de hoofdgeul Zoutkamperlaag en het Gat van Schiermonnikoog. De Grootte Siege is een geuluiteinde op het laatste stuk van de veerroute en loopt tot aan de veerdam. Om inzicht te krijgen in de verwachte ontwikkelingen van deze twee knelpunten, worden eerst de grootschalige ontwikkelingen in het bekken Zoutkamperlaag vanaf de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 beschreven waarna wordt ingezoomd op de kleinere schaal van Glinder en Grootte Siege.

Sinds de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 is het getijvolume met 35 tot 43% afgenomen (Oost, 1995; Postma & Reenders, 1986) en is het zwaartepunt van het zuiden naar het oosten verplaatst. Als initiële reactie op de afsluiting is het wantij oostelijk verplaatst en hebben de geulsystemen zich oostwaarts uitgebreid. In de hoofdgeulen vond sterke sedimentatie plaats, met zand afkomstig uit de buitendelta en slib uit de Noordzee. Na geleidelijke morfologische aanpassing schuift het wantij weer deels terug.

Sinds het begin van de 21^{ste} eeuw is er sprake van een overgang naar een tweegeulenconfiguratie. De nieuwe geul Binnenplaatgat heeft zich oostwaarts van de oude hoofdgeul Zoutkamperlaag gevormd en is snel in diepte toegenomen. Tegelijkertijd is in de Zoutkamperlaag sprake van verzanding en steeds verdere uitbochtting. Modelberekeningen laten zien dat de debieten door de Zoutkamperlaag gestaag afnemen terwijl het Binnenplaatgat aan belang wint. Met het noordoostwaarts verschoven zwaartepunt na de afsluiting ligt het Binnenplaatgat gunstiger om het bekken te bedienen. Gezien de huidige ontwikkelingen is het waarschijnlijk dat het Binnenplaatgat op termijn de functie van de huidige hoofdgeul Zoutkamperlaag zal overnemen.

De morfologische ontwikkeling van de Glinder wordt sterk beïnvloed door deze grootschalige ontwikkelingen in het bekken. De Glinder is in de jaren '70 gevormd als verbinding tussen de Zoutkamperlaag en het Gat van Schiermonnikoog. Via de Glinder werd het noordelijk deel van het bekken door de hoofdgeul Zoutkamperlaag gevoed. Sinds 1994 is de stroming over de Glinder gestaag omgekeerd. Met de groeiende invloed van het Binnenplaatgat, dat de watertoevoer naar het noordelijke deel van het bekken heeft overgenomen, is de uitwisseling tussen de Zoutkamperlaag en het Gat van Schiermonnikoog gestagneerd. In de modelberekeningen met de bodem uit 2018 is zelfs de omgekeerde beweging zichtbaar: het zuidelijke deel van de Zoutkamperlaag wordt (deels) gevoed door het nieuw gevormde Binnenplaatgat. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid dat er op termijn geulvorming plaats zal vinden tussen het Binnenplaatgat en de Zoutkamperlaag, welke de bevaarbaarheid over het drempelgebied rondom de Glinder zou vergroten. De toekomstige ontwikkeling van de Glinder kan niet los worden gezien van deze grootschalige ontwikkelingen. De verwachting is dat de geplande verlegging van de Glinder voorgesteld door Lenstra (2023) zal zorgen dat de geul in lijn komt te liggen met de nieuwe stroomrichting en hierdoor op termijn het baggeronderhoud af zal nemen.

De geul Grootte Siege staat in verbinding met het zuidelijker gelegen geulstelsel Brakzandstergat. In de jaren '80 vond in het Brakzandstergat een oostwaartse uitbreiding plaats die gepaard ging met de oostwaartse verplaatsing van het wantij na de afsluiting van de Lauwerszee. In diezelfde periode trok het geuluiteinde van de Grootte Siege zich terug tot de

veerdam. Hoogstwaarschijnlijk zijn de Grootte Siege en het Brakzandstergat concurrerende geulsystemen, en is de uitbreiding van het Brakzandstergat ten koste gegaan van het kombergingsgebied van de Grootte Siege. De afgelopen twintig jaar zijn zowel de Grootte Siege als het Brakzandstergat relatief stabiel. Ook in de debieten die volgen uit modelberekeningen zijn tussen 1994 en 2018 geen grote ontwikkelingen zichtbaar. Er wordt verwacht dat de onderhoudsbehoefte van dit gebied de komende jaren stabiel blijft.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Probleemstelling	8
1.2	Doelen	8
1.3	Studiegebied	8
1.4	Aanpak	9
1.5	Leeswijzer	9
2	Historische ontwikkeling van het Friesche Zeegat	11
2.1	Historische ontwikkeling van het Friesche Zeegat	11
2.1.1	Sedimentbalans van de Zoutkamperlaag	14
2.2	Hydrodynamische effecten van de afsluiting van de Lauwerszee	15
2.3	Morfologische ontwikkeling sinds de afsluiting	17
3	Recente ontwikkeling van het bekken	21
3.1	Stromingspatronen	21
3.2	Veranderende balans tussen Zoutkamperlaag en Binnenplaatgat	22
4	Morfologische ontwikkeling van de knelpunten	27
4.1	Zoutkamperlaag	27
4.2	Glinder	29
4.3	Groote Siege	31
4.4	Baggeronderhoud	37
4.4.1	Glinder	38
4.4.2	Groote Siege	40
5	Conceptueel model	41
6	Conclusies en aanbevelingen	45
6.1	Conclusies	45
6.2	Aanbevelingen vervolgonderzoek Friesche Zeegat	46
6.3	Aanbevelingen generieke aanpak knelpuntanalyse	47
7	Bibliografie	49
A	Bijlagen	50
A.1	Bodemliggingskaarten	50
B	Modelberekeningen	53

B.1	Locaties dwarsdoorsnedes	53
B.2	Stroomsnelheden	53
B.2.1	Volledige kombergingsgebied	54
B.2.2	Zeegat	57
B.2.3	Glinder	60
B.2.4	Groote Siege	63
C	Kombergingsvolume	66
C.1	Groote Siege en Brakzandstergat	66
C.2	Zoutkamperlaag	66

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

De vaarweg Lauwersoog-Schiermonnikoog kent een aantal knelpunten, d.w.z. locaties waar de morfologische ontwikkeling leidt tot (toenemend) baggerbezwaar. In deze rapportage beschrijven we een onderzoek naar de knelpunten Glinder en Grootte Siege. De Glinder is een migrerende verbindingsgeul tussen de Zoutkamperlaag en het Gat van Schiermonnikoog (Figuur 1-1). De laatste jaren wordt er frequent baggeronderhoud uitgevoerd. Om het baggerwerk te verminderen wordt overwogen om de route via de Glinder te verleggen. De nabijgelegen Grootte Siege is een terugtrekkend geuluiteinde, waar de veerdam van Schiermonnikoog aan ligt. Het terugtrekken van de Grootte Siege heeft nog niet geleid tot een toename van het baggerbezwaar. De vraag is of dit in nabije toekomst wel zou kunnen gebeuren en op welke wijze de baggerstrategie geoptimaliseerd zou kunnen worden.

1.2 Doelen

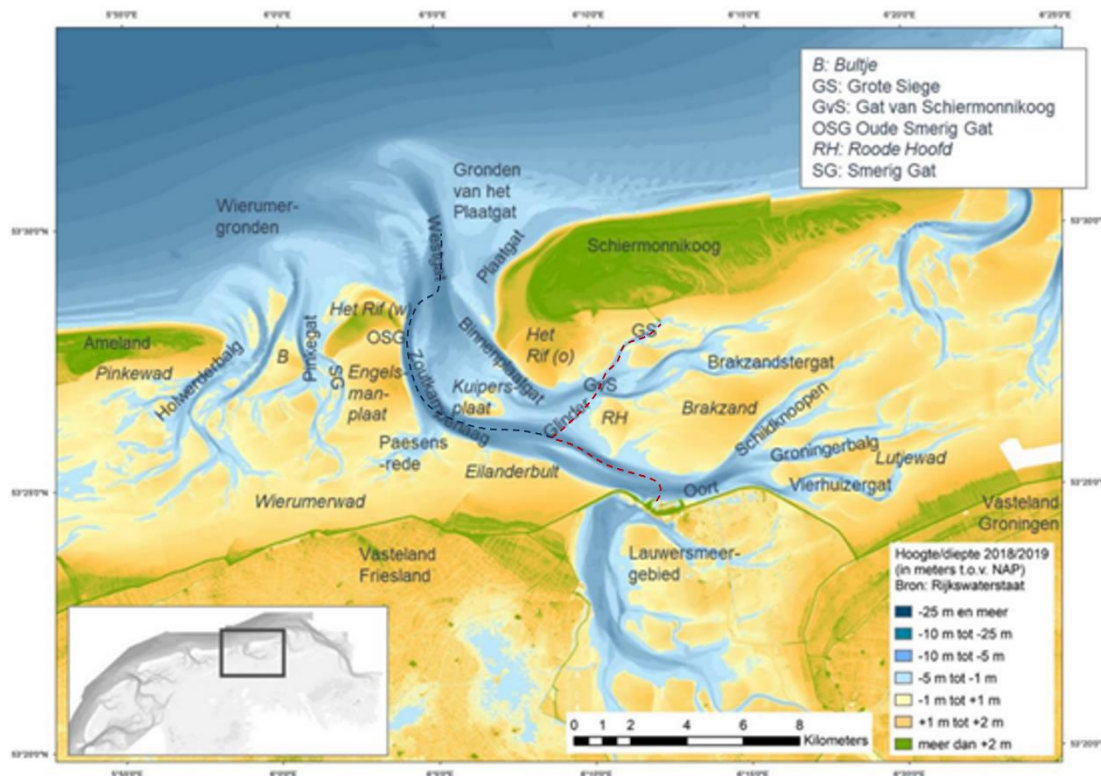
Deze knelpuntanalyse voor de Glinder en Grootte Siege heeft 3 doelen:

1. Ontwikkelen van systeembegrip van de morfologische ontwikkeling en komen tot een conceptueel model over de huidige ontwikkeling en voorspellingen voor de toekomstige ontwikkeling van de vaarweg en de bestaande en verwachte knelpunten;
2. Inzicht krijgen in het handelingsperspectief voor ingrepen in de knelpunten Glinder en Grootte Siege, en de daarbij behorende monitoringsbehoefte;
3. Een generieke methode ontwikkelen voor het uitvoeren van een knelpuntanalyse, die ook op andere locaties in de Waddenzee kan worden toegepast.

1.3 Studiegebied

In dit rapport worden veel namen van geul- en plaatgebieden gebruikt om de morfologie en de morfologische ontwikkeling van het Friesche Zeegat te beschrijven. Die namen worden hieronder geïntroduceerd.

Het Friesche Zeegat bestaat uit de geulsystemen Pinkegat in het westen en Zoutkamperlaag in het oosten (zie Figuur 1-1). De Glinder en de Grootte Siege zijn gelegen in het bekken van de Zoutkamperlaag. De Zoutkamperlaag is de hoofdgeul in dit bekken, ondanks dat deze sinds de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 in debiet en nat volume is afgenomen (Oost, 1995). De laatste jaren heeft zich oostelijk van de Zoutkamperlaag een nieuwe geul gevormd langs de kop van Schiermonnikoog: het Binnenplaatgat. Deze geul stelt het Gat van Schiermonnikoog en de bijbehorende geulsystemen van de Grootte Siege en het Brakzandstergat in directe verbinding met de buitendelta. De Zoutkamperlaag bedient vooral de zuidelijker gelegen geulen van het Lutjewad. Zowel de Zoutkamperlaag als het Binnenplaatgat staan via het Westgat in verbinding met de buitendelta.



Figuur 1-1 Belangrijkste geulen en platen in het Friesche Zeegat. Uit: Oost et al. 2020. De rode stippellijn geeft de veerbootroute van Lauwersoog naar Schiermonnikoog weer. De zwarte stippellijn is de vaarroute naar de Noordzee.

1.4 Aanpak

De ontwikkelingen van de morfologie en waterbeweging in het gebied worden beschreven op basis van literatuur, data-analyses en modelberekeningen. Om inzicht te krijgen in de morfologische ontwikkeling van het bekken zijn vaklodingen geanalyseerd over een periode van 1926 tot 2019. Hiermee zijn vaklodingen beschikbaar van zowel de periode voor de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 als van de periode na de afsluiting. Met behulp van erosie-sedimentatie kaarten en de ontwikkelingen van contourlijnen en doorsnedes is een beeld gevormd van de morfologische trends in het bekken voor de afsluiting, alsmede van de respons na de afsluiting.

Naast de morfologische analyse zijn ook de hydrodynamische ontwikkelingen beschouwd. Hiervoor zijn de resultaten gebruikt van het Delft3D FM model van het gebied dat is gedraaid door Arcadis (Lenstra, 2023). De stroomsnelheden en debieten voor de bodems van 1994, 2006 en 2018 uit deze modelberekeningen zijn gebruikt om een beeld te krijgen in de recente hydrodynamische ontwikkelingen.

1.5 Leeswijzer

Dit rapport begint met een beschrijving van de historische ontwikkeling van het gehele Friesche Zeegat in Hoofdstuk 2. Deze beschrijving op grote tijd- en ruimteschalen geeft de context en achtergrond die nodig is om de huidige ontwikkelingen in perspectief te plaatsen en te kunnen begrijpen.

Hoofdstuk 3 zoomt vervolgens één schaalniveau verder in en beschrijft de recentere ontwikkelingen op basis van hydrodynamische modelberekeningen. Hierbij wordt gefocust op

de grote verschuivingen die de afgelopen dertig jaar plaatsvinden in het hoofdgeulensysteem, die grote gevolgen hebben voor de beschouwde knelpunten.

De impact van deze ontwikkelingen op de knelpunten komt aan bod in Hoofdstuk 4, waar wordt ingezoomd op de morfologische ontwikkelingen van de deelgebieden. Eerst wordt het zuidelijk deel van de Zoutkamperlaag beschouwd (4.1), vervolgens de Glinder (4.2) en de Groote Siege (4.3). Ook wordt het baggeronderhoud besproken in 4.4.

Alle bevindingen worden bij elkaar gebracht in een conceptueel model (Hoofdstuk 5). Op basis van het systeembegrip dat in de eerdere hoofdstukken is opgebouwd wordt een voorspelling gedaan voor de toekomstige ontwikkeling van de knelpunten, waarbij ook de implicaties voor beheer worden besproken. Tot slot worden aanbevelingen gedaan met betrekking tot de monitoringsbehoefte en voor een generieke methode voor het uitvoeren van knelpuntanalyses, op basis van de ervaringen die in deze en eerdere knelpuntanalyses zijn opgedaan.

2 Historische ontwikkeling van het Friesche Zeegat

Dit hoofdstuk beschrijft de historische ontwikkelingen in het Friesche Zeegat. De grote veranderingen die zich hier de afgelopen eeuwen hebben voorgedaan, met als meest recente en meest ingrijpende de afsluiting van de Lauwerszee, hebben nog altijd een grote invloed op de ontwikkeling van het bekken. Dit hoofdstuk schetst de context die nodig is om de huidige ontwikkelingen rondom de knelpunten in de vaarroute te begrijpen en in breder perspectief te kunnen plaatsen.

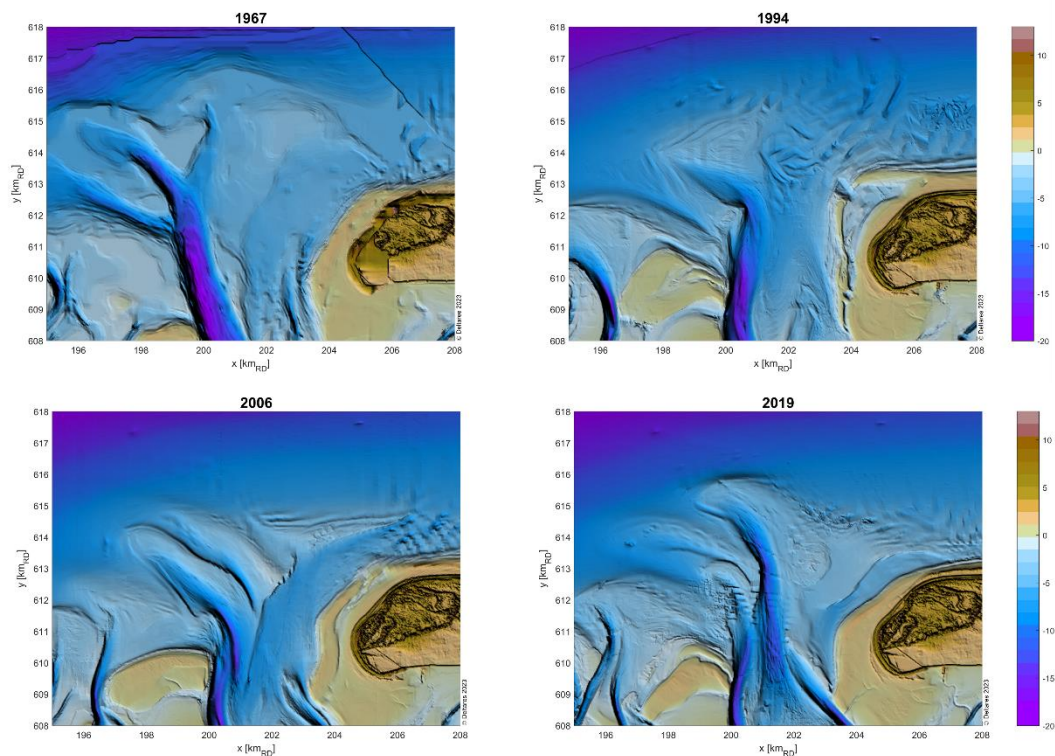
Het hoofdstuk begint met een beschrijving van de historische ontwikkelingen op grote tijd- en ruimteschalen (paragraaf 2.1). Daarna wordt ingezoomd op de gevolgen van de afsluiting van de Lauwerszee in 1969, waarbij respectievelijk de hydrodynamische (paragraaf 2.2) en de morfologische (paragraaf 2.3) gevolgen besproken worden.

2.1 Historische ontwikkeling van het Friesche Zeegat

Het Friesche Zeegat omvat de geulsystemen van de Zoutkamperlaag in het oosten en het Pinkegat in het westen. Vanwege de sterke uitwisseling van sediment tussen de twee buitendelta's zijn de morfologische ontwikkelingen van beide geulsystemen aan elkaar gekoppeld.

Voorafgaand aan de afsluiting van de Lauwerszee werd het bekken gekenmerkt door honderden jaren aan bedijkingen en landaanwinningen, die geleidelijk het kombergingsvolume steeds verder hebben verkleind. De afsluiting van de Lauwerszee heeft het bekkenareaal in één keer met 9100 ha verkleind, wat neerkomt op 30% (Oost, 1995) tot 42% (Postma & Reenders, 1986) van het oorspronkelijke areaal. Tot de afsluiting vormde de Zoutkamperlaag een relatief stabiele hoofdgeul. Vanaf de afsluiting vond sterke verkleining en uitbochtiging van de geul plaats. Door een dikke holocene kleilaag onder de Engelsmanplaat verloopt de uitbochtiging betrekkelijk traag.

De buitendelta vertoont herhalend geulgedrag zonder vaste herhalingsperiode (Elias & Oost, 2021). De hoofdgeul roteert van west naar oost, waarbij aan de westzijde banken worden gevormd die onder invloed van golven oostwaarts migreren (Figuur 2-1). Een één-geul-configuratie en een tweegeulenconfiguratie wisselen elkaar af. In sommige perioden strekt de hoofdgeul zich verder richting de Noordzee uit dan in andere perioden.



Figuur 2-1 Ontwikkeling van de buitendelta tussen 1967 (vlak voor de afsluiting) en 2019.

Historische geulconfiguraties in het bekken

De ontwikkeling van de buitendelta en de dominante geulen binnenin het kombergingsgebied kunnen aan elkaar gekoppeld worden met behulp van oude kaarten.

Figuur 2-2 laat zien hoe een één-geul-configuratie en een tweegeulenconfiguratie elkaar in de afgelopen twee eeuwen hebben afgewisseld. In periodes waarin de buitendelta wordt gekenmerkt door een één-geul-configuratie bevindt zich in het kombergingsgebied één dominante hoofdgeul, die het volledige bekken afwatert. Tijdens periodes met een tweegeulenconfiguratie in de buitendelta bevinden zich ook binnenin het bekken twee geulen. Ten oosten van de hoofdgeul ontstaat er in deze periodes een geul die het noordelijk deel van het bekken afwatert. Het debiet door de oorspronkelijke hoofdgeul wordt hierdoor kleiner.

Figuur 2-2 wordt deze samenhang geïllustreerd aan de hand van 4 periodes:

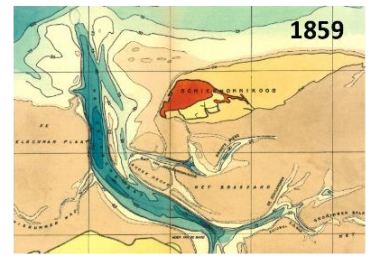
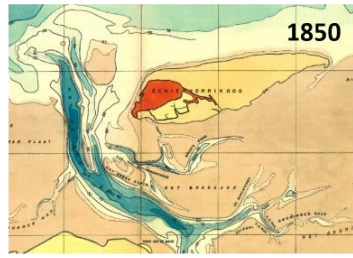
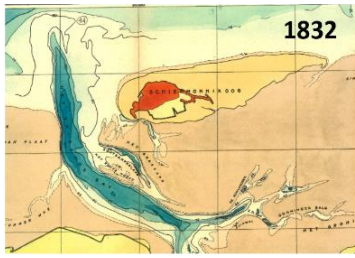
- **Bovenste paneel - één-geul-configuratie:** van 1832 tot 1859 was er sprake van een één-geul-configuratie in de buitendelta. Gedurende deze periode werd het bekken gekenmerkt door een brede en diepe hoofdgeul die het volledige bekken bediende. Het Gat van Schiermonnikoog waterde hierbij af via deze hoofdgeul.
- **Tweede paneel - tweegeulenconfiguratie:** kaarten uit 1873 laten een overgang zien naar een tweegeulenconfiguratie in de buitendelta, welke wordt beschreven in Elias & Oost (2021). Ook binnenin het bekken vindt een transitie plaats van één naar twee geulen. Het Gat van Schiermonnikoog vormt zijn eigen uitstroom oostelijk van de hoofdgeul en sluit aan op de oostelijke geul in de buitendelta. De oorspronkelijke hoofdgeul verliest aan belang. Deze wordt smaller en ondieper en begint uit te bochten, maar behoudt zijn functie als hoofdgeul.

- Derde paneel – één-geul-configuratie: vanaf ca 1927 centreert de buitendelta zich weer rond één hoofdgeul, die zich verder zeewaarts uitstrekt (Elias & Oost, 2021). De hoofdgeul Zoutkamperlaag wordt weer breder en dieper en de uitbochting wordt deels teruggedraaid. Gedurende deze één-geul-configuratie lijkt het bekken weer meer op de situatie voor 1859.
- Onderste paneel – tweegeulenconfiguratie: in de tweede helft van de twintigste eeuw is zichtbaar hoe de Zoutkamperlaag weer in omvang afneemt en begint uit te bochten. Deze ontwikkeling wordt in gang gezet na de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Vanaf het begin van deze eeuw is er weer sprake van een tweegeulenconfiguratie. Het Gat van Schiermonnikoog vormt via het Binnenplaatgat een nieuwe uitstroom en watert niet meer af via de Zoutkamperlaag.

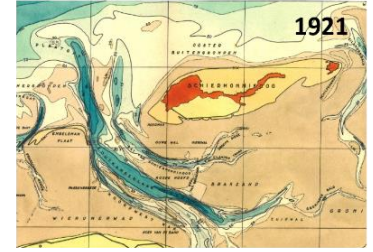
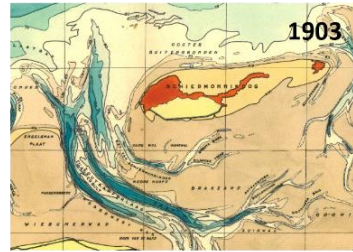
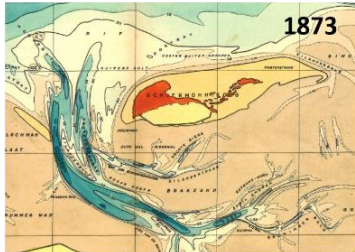
De meest recente overgang naar een tweegeulensysteem wordt gestuurd door het verlies aan kombergingsvolume na de afsluiting van de Lauwerszee. Met de afsluiting nam het getijprisma af en verschoof het zwaartepunt van het bekken van het zuiden naar het oosten. Het nieuw gevormde Binnenplaatgat in het oostelijk deel van het bekken ligt gunstiger dan de Zoutkamperlaag om onder deze nieuwe omstandigheden het bekken te bedienen. Op deze wijze lijkt de afsluiting de overgang naar een tweegeulenconfiguratie die op dit moment plaatsvindt te stimuleren.

In algemene zin is er wel iets bekend over het effect van een bekkenverkleining op cyclisch gedrag van de buitendelta, en de daaraan gerelateerde alternerende één- en tweegeulenconfiguraties. Lenstra & van der Vegt (2021) heeft dit onderzocht met lange termijn modelsimulaties. Een belangrijk verschil tussen hun geval en het Friesche Zeegat is dat het zwaartepunt van het bekken bij bekkenverkleining niet verschoven is. Uit de modelresultaten blijkt dat een bekkenverkleining tot gevolg heeft dat de morfodynamiek van de buitendelta en hoofdgeulen tijdelijk vertraagt of tot stilstand komt. Dit komt doordat de getijstroom in het zeegat sterk afneemt, wat ook bij het Friesche Zeegat is geobserveerd. Daardoor is het (natte) oppervlak van de geul te groot en wordt het ontstaan van nieuwe geulen belemmerd. Tegelijkertijd neemt ook het volume van de buitendelta af, waarbij het beschikbare zand (net als bij het Friesche zeegat) verdeeld wordt over het bekken en een zandbank die aangroeit aan het eiland (Schiermonnikoog). Na deze initiële aanpassingsperiode zorgt het afnemende getijprisma uiteindelijk voor de versnelling van cyclisch gedrag. Voor het Friesche Zeegat suggereert dit dat de buitendeltadynamiek (geulrotatie en doorbraak) versnelt, wat de geulendynamiek in het zeegat versnelt.

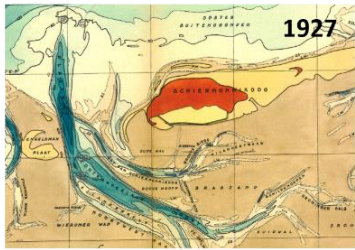
1 geul configuratie



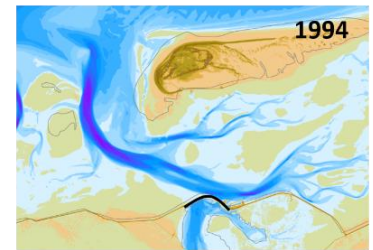
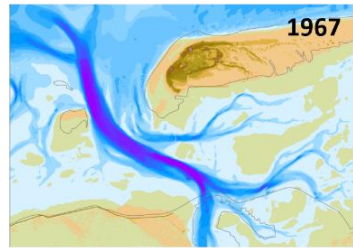
2 geulen configuratie



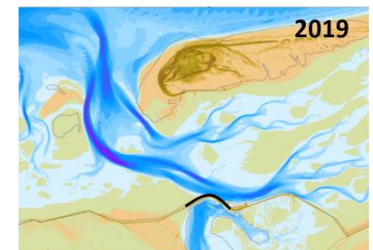
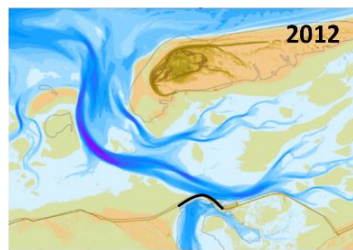
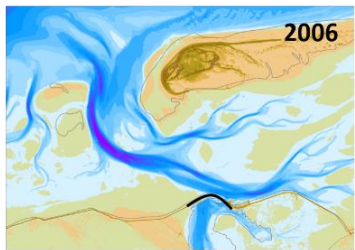
1 geul configuratie



Afsluiting Lauwerszee



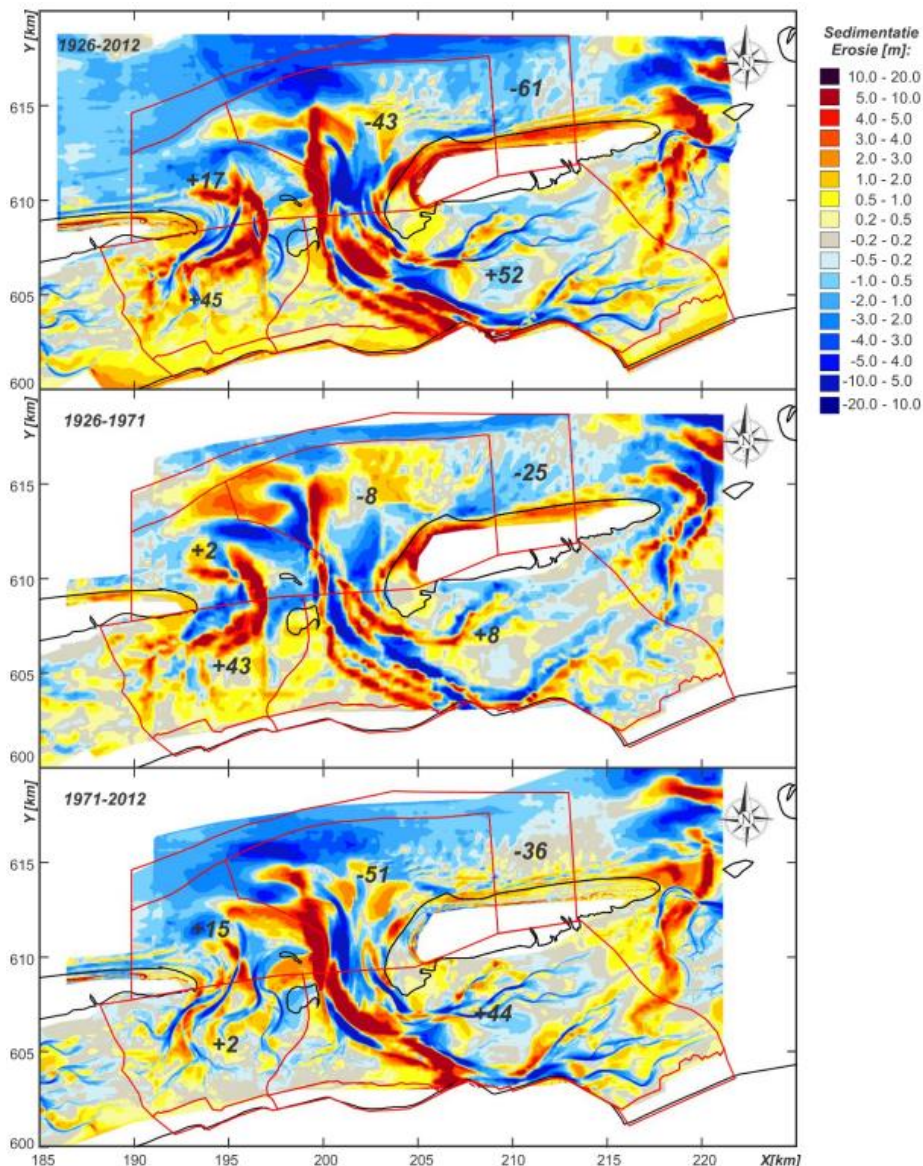
2 geulen configuratie



Figuur 2-2 Historische ontwikkeling van de komberging en buitendelta.

2.1.1 Sedimentbalans van de Zoutkamperlaag

De sedimentbalans van de Zoutkamperlaag tussen 1926 en 2012 is uitgewerkt door Elias (2018; Figuur 2-3) en later bijgewerkt met recente data tot 2019 door Van der Lugt et al. (2020). Sinds de afsluiting van de Lauwerszee is 44 miljoen m³ in het bekken gesedimenteerd. Na grote initiële effecten is er sinds 1989 een vrij constante trend van gemiddeld ruim 0.5 miljoen m³ per jaar (Van der Lugt, et al., 2020). Deze toename is de afgelopen 30 jaar ongeveer lineair verlopen en zet zich waarschijnlijk ook door in de toekomst. Sedimentatie in het bekken is vooral opgetreden in de geulen en in het lagere deel van het intergetijdengebied (lager dan NAP – 0.5 m). Hierdoor is het plaatareaal in het gehele zeegat toegenomen en het subtidale gebied licht afgenomen (Nederhoff, et al., 2017).

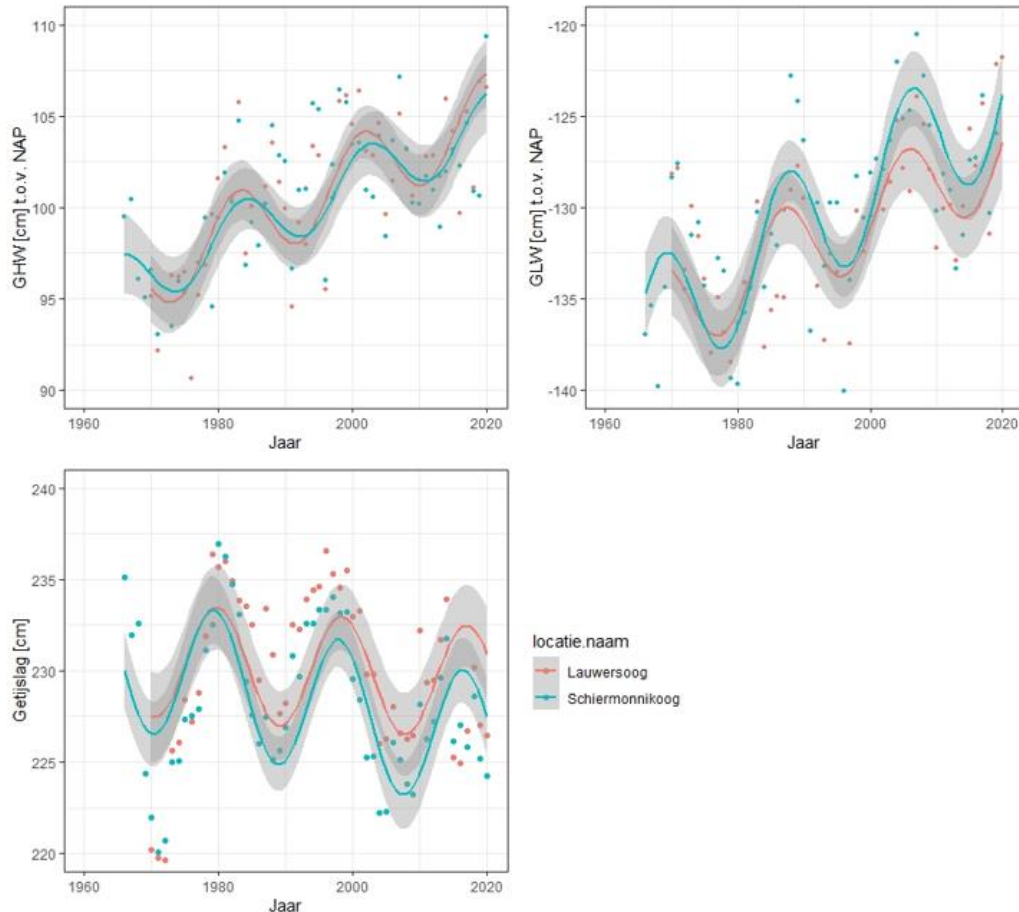


Figuur 2-3 Erosie-/sedimentatiekaart van het Friesche Zeegat voor de periodes voor (midden) en na afsluiting van de Lauwerszee (onder) en voor de gehele periode waarvoor Vaklodings data beschikbaar is (boven). De getallen geven de totale volumeveranderingen binnen de polygoenen weer in miljoen m³. Overgenomen uit Elias (2018).

2.2 Hydrodynamische effecten van de afsluiting van de Lauwerszee

De afsluiting van de Lauwerszee heeft het getijvolume met ca. 35% verkleind (Oost, 1995), ongeveer evenveel als de afname van de bekkenoppervlakte. Debietmetingen in het zeegat door Postma & Reenders (1986) wijzen op een afname van het getijvolume van ca. 43% (van 350 naar 200 miljoen m³ per getij).

Anders dan bij de afsluiting van de Zuiderzee nam de getijslag niet wezenlijk toe door de afsluiting (Wang, et al., 1995). De beschikbare meetreeksen van de waterstanden bij Schiermonnikoog gaan echter niet veel verder terug dan de afsluiting. Figuur 2-4 toont het jaargemiddeld hoogwater, laagwater en de getijslag sinds het begin van de metingen bij Lauwersoog en Schiermonnikoog. Zowel de hoogwaters als de laagwaters nemen toe. GHW neemt met ca. 2 mm/j toe, vergelijkbaar met de zeespiegelstijging. Omdat de laagwaters iets sterker toenemen dan de hoogwaters, neemt de getijslag licht af. Op Schiermonnikoog neemt deze het sterkst af, met ca. 1 mm/j.

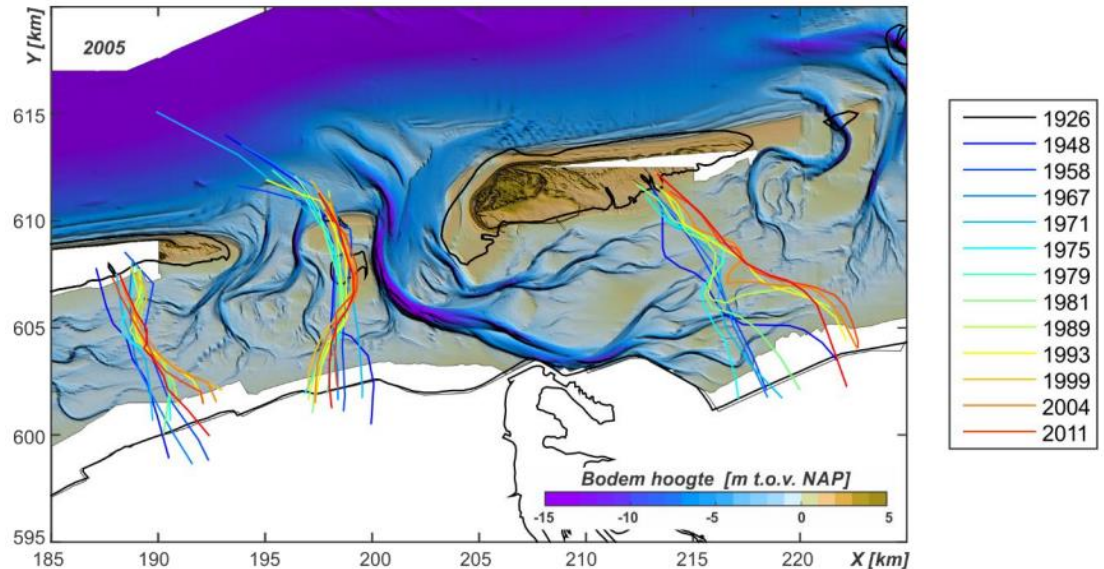


Figuur 2-4 Jaargemiddeld hoogwater (GHW), jaargemiddeld laagwater (GLW) en getijslag bij Lauwersoog (rood) en Schiermonnikoog (groen). Punten geven de jaargemiddelden, de doorgetrokken lijn toont de trend inclusief variatie als gevolg van de 18,6-jarige cyclus. Aangepast van Digitale Systeemrapportage Waddenzee (systeemrapportage.nl/wadden).

Omdat de geulen na de afsluiting in eerste instantie nog te groot waren voor het kleiner geworden getijvolume, en de relatieve weerstand dus afnam, kon het getij verder oostwaarts doordringen en verschoof het wantij tussen de Zoutkamperlaag en het Groninger Wad meerdere kilometers naar het oosten (Postma & Reenders 1986; Oost 1995; Figuur 2-5). In het noorden, direct ten zuiden van Schiermonnikoog, bedroeg de verschuiving ca. 1 km. Nabij de vastelandskust van Groningen was dat 3-4 km (Oost, 1995; Figuur 2-5). Het oostwaarts verplaatsen van het wantij hangt mogelijk ook samen met het aangroeien van de oostpunt van Schiermonnikoog. Het kombergingsgebied breidde door de oostwaartse verplaatsing van het wantij met ca. 1400 ha uit tussen 1969 en 1984, wat neerkomt op 11% van het kombergingsgebied van na de afsluiting. Het getijvolume nam evenredig toe (Postma & Reenders, 1986). Een groot gebied werd hierdoor niet meer gevuld door de Eilanderbalg, maar vanuit de Zoutkamperlaag.

Na de geleidelijke morfologische aanpassing nam de omvang van de geulen af en kon het getij minder diep doordringen, waardoor het wantij deels terugschoof, met name in het zuidelijke deel van het kombergingsgebied. Dit terugschuiven van het wantij is vanaf het jaar 2000 te zien in Figuur 2-5 en Bijlage C.2.

In 1968 bedroegen de maximale stroomsnelheden in het zeegat ca. 1,3 m/s. Na de afsluiting halveerden deze ongeveer om vervolgens door het oostwaarts migreren van het wantij weer geleidelijk toe te nemen tot boven de 1 m/s tijdens eb (Postma & Reenders, 1986).



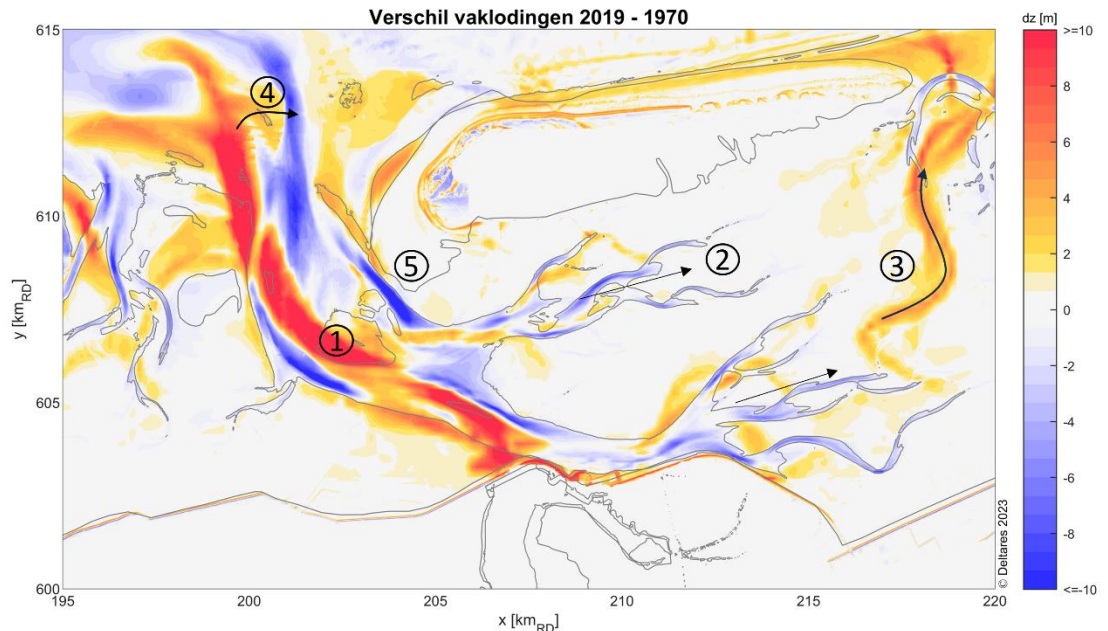
Figuur 2-5 Morfologische wantijen zoals bepaald in Elias (2018). De locatie van het wantij is hierin bepaald op basis van de minimale waterdiepte en vormen en oriëntatie van de geulen.

2.3 Morfologische ontwikkeling sinds de afsluiting

Na de afsluiting van de Lauwerszee trad sterke sedimentatie in de getijgeulen op ((1) in Figuur 2-6) door de afname van het getijvolume. De buitendelta was hierbij de leverancier van het zandige deel van het sediment. Vooral rond het wantij is ook veel slib bezonken (Colina Alonso, 2020). Na ongeveer 10 jaar nam de sedimentatiesnelheid sterk af. Postma & Reenders (1986) berekenen een afname van het natte volume van 30 miljoen kuub tussen 1969 en 1981, voornamelijk onder de -4 m GLW. Dit is ongeveer consistent met het verschil tussen het sedimentatievolume in het bekken van de Zoutkamperlaag tussen 1989 en 2020 (16 miljoen m³) berekend door Van der Lugt et al. (2020) en dat tussen 1971 en 2012 (44 miljoen m³) berekend door Elias (2018).

Door de verminderde hydraulische weerstand na de afsluiting, zoals beschreven in 2.2, breidden de geulen in het oostelijke deel van het bekken oostwaarts uit ((2) in Figuur 2-6). Deze uitbreiding vond vooral plaats in de eerste jaren na de afsluiting en is sinds de jaren '90 gestagneerd. De geul Eilanderbalg in het oostwaarts gelegen zeegat trok zich ver oostwaarts terug (3).

In de buitendelta vond ondertussen kloksgewijze rotatie van de hoofdgeul plaats. De noordelijke tak van de Zoutkamperlaag (bij de aansluiting met het Westgat) migreerde in oostelijke richting ((4) in Figuur 2-6). Deze ontwikkeling past in het herhalende geulgedrag van de buitendelta beschreven in paragraaf 2.1. Deze rotatie wordt mogelijk versneld door de afname van het debiet na de afsluiting, waardoor golven dominantier worden en golfgedreven zandtransport vanuit de buitendelta van het Pinkegat vermoedelijk een grotere rol is gaan spelen, een fenomeen beschreven in Lenstra & van der Vegt (2021).

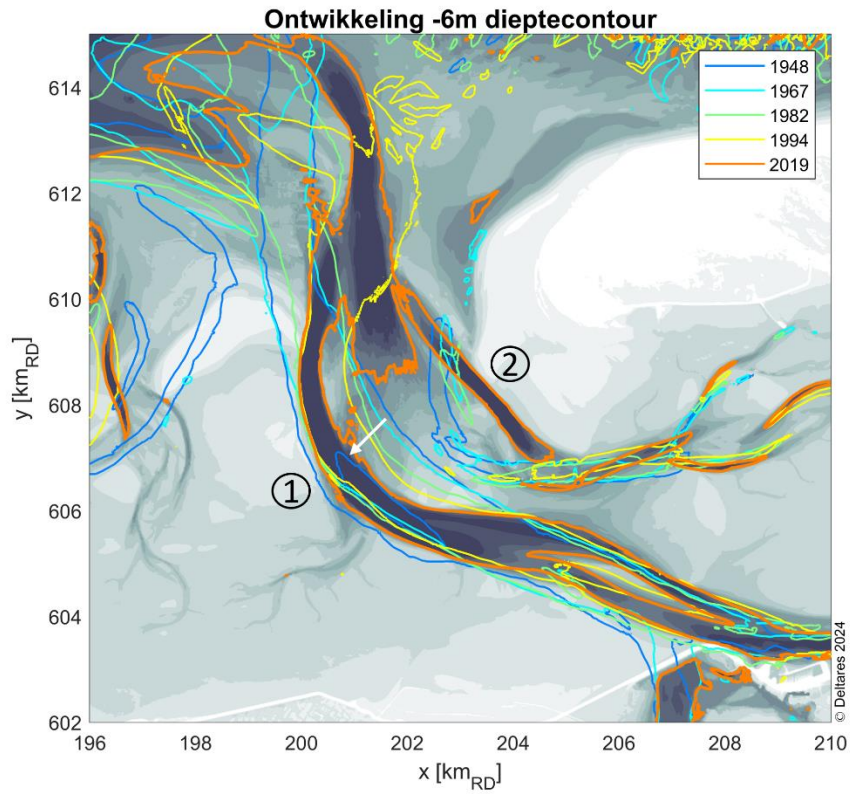


Figuur 2-6 Erosie en sedimentatie tussen 1970 en 2019. (1) Sterke sedimentatie in de Zoutkamperlaag. (2) Uitbreiden geulen Brakzandstergat en Lutjewad. (3) Terugtrekken Eijlanderbalg. (4) Oostelijke verschuiving en kloksgewijze rotatie zeegat buitendelta. (5) Vorming van het Binnenplaatgat.

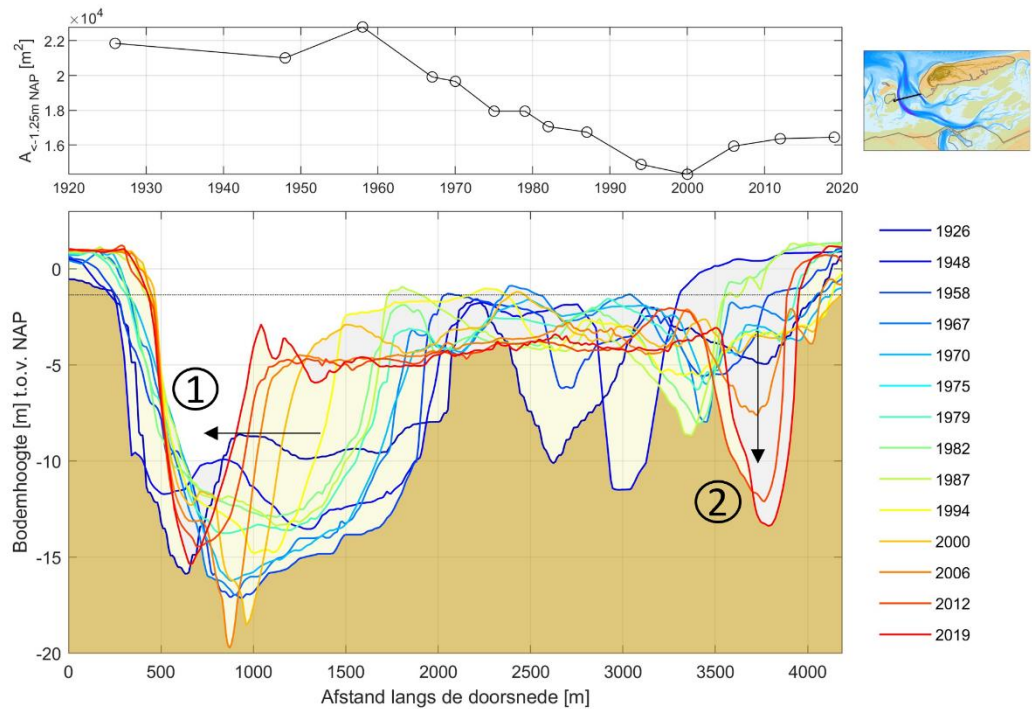
Sinds de afsluiting van de Lauwerszee is de hoofdgeul Zoutkamperlaag aanmerkelijk smaller geworden en is deze steeds meer gaan uitbochten, vooral door sedimentatie in de binnenbocht. Dit is zichtbaar bij nummer (1) in Figuur 2-7 en Figuur 2-8.

Aan de oostzijde, tegen de kust van Schiermonnikoog, is de nieuwe geul Binnenplaatgat ontstaan, gescheiden van de geul Zoutkamperlaag door de Kuipersplaat (5). Deze geul vormt inmiddels een directe verbinding tussen het Gat van Schiermonnikoog en het zeegat, waardoor het Gat van Schiermonnikoog niet meer via de Zoutkamperlaag afwatert. In de doorsnede in Figuur 2-8 is duidelijk te zien hoe het Binnenplaatgat tussen 2000 en 2020 in hoog tempo is ontstaan en steeds verder uitdiept.

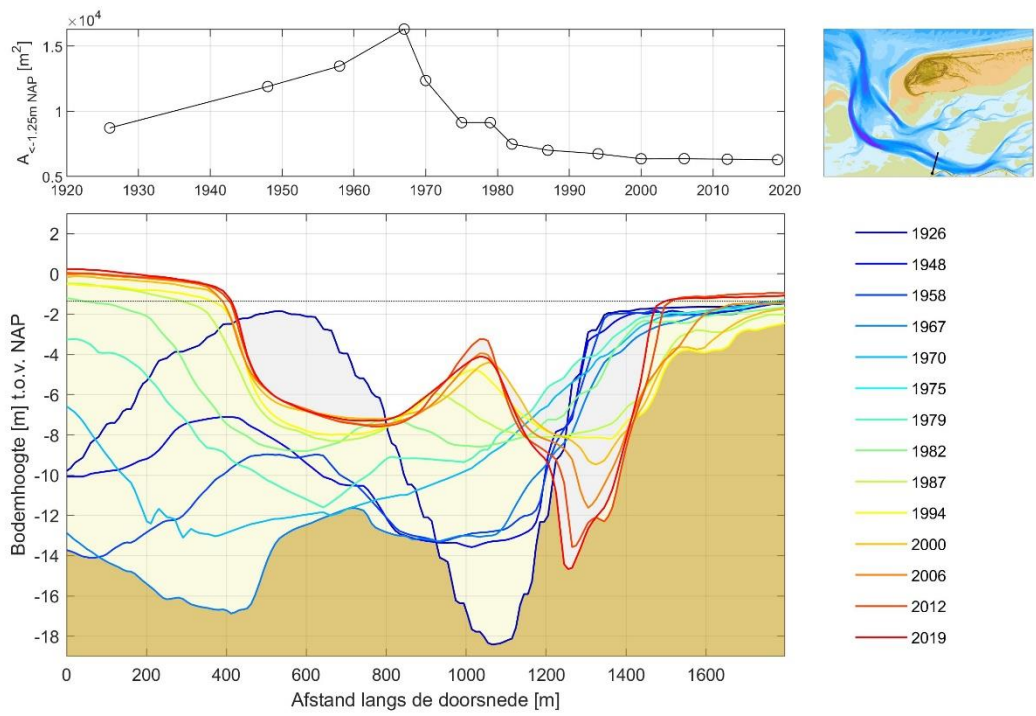
Ter vergelijking toont Figuur 2-9 de ontwikkeling van een doorsnede door een zuidelijker deel van de Zoutkamperlaag. Deze figuur toont van 1926 tot het jaar van de afsluiting van de Zuiderzee in 1969 een toename van de natte doorsnede van de Zoutkamperlaag. Na de afsluiting neemt deze af. Dit duurt tot eind jaren '80 waarna de veranderingen betrekkelijk klein blijven maar de afname heel geleidelijk door lijkt te gaan.



Figuur 2-7 De ontwikkeling van de -6 m dieptecontour in het Zeegat. (1) Uitbochtiging en smaller worden van de Zoutkamperlaag. (2) Snelle vorming van het Binnenplaatgat (na 1994).



Figuur 2-8 Ontwikkeling van de doorsnede door Zoutkamperlaag en Binnenplaatgat. (1) Verplaatsen en smaller worden Zoutkamperlaag. (2) Snelle vorming Binnenplaatgat. Bovenste paneel: ontwikkeling van het natte oppervlak van de doorsnede. De toename in natte oppervlak vanaf 2000 wordt veroorzaakt door de groei van het Binnenplaatgat.



Figuur 2-9 Ontwikkeling van een doorsnede door het zuidelijke deel van de Zoutkamperlaag.

3 Recente ontwikkeling van het bekken

De grootschalige ontwikkelingen die plaatsvonden na de afsluiting van de Zuiderzee, import van sediment en een verschuiving van het zwaartepunt van het zuidelijke naar het oostelijke deel van het bekken met een oostelijke verplaatsing van het wantij, vormen de context en randvoorwaarden voor de huidige ontwikkelingen in het bekken.

Paragraaf 3.1 beschrijft de stromingspatronen in het bekken van 1994 tot 2018. Zoals in het vorige hoofdstuk is besproken vindt de laatste decennia verzanding en uitbochtting plaats in de Zoutkamperlaag en is tegelijkertijd het Binnenplaatgat gevormd en snel gegroeid. Dit leidt ertoe dat grote verschuivingen plaatsvinden in het hoofdgeulensysteem. Deze ontwikkelingen worden besproken in paragraaf 3.2.

3.1 Stromingspatronen

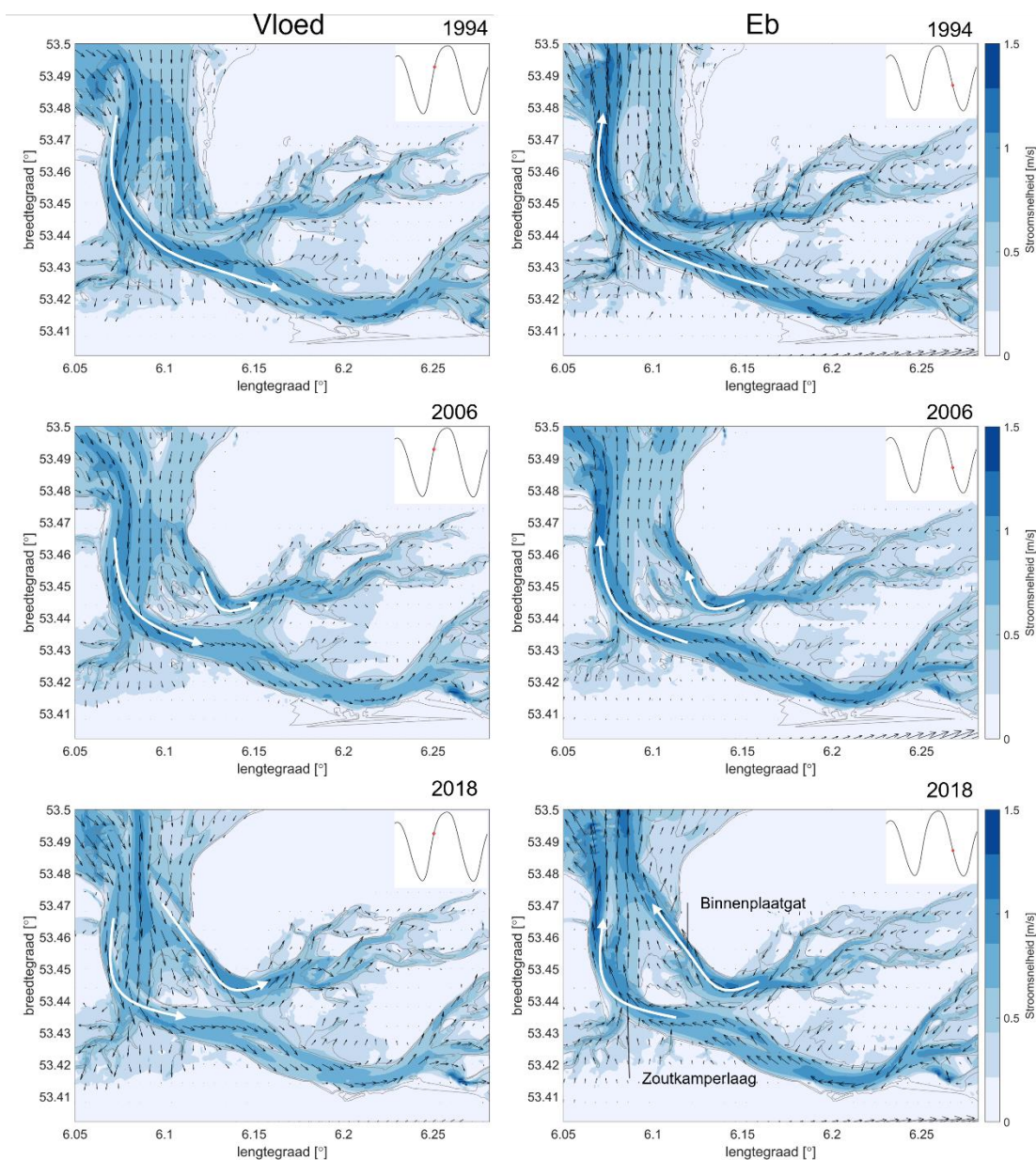
Om de recente ontwikkelingen in hydrodynamica te kunnen beschrijven heeft Arcadis modelberekeningen uitgevoerd waarbij stroomsnelheden, debieten en waterstanden zijn bepaald. Dit is gedaan voor de bodems van 1994, 2006 en 2018 op basis van de vaklodingen uit deze jaren (Lenstra, 2023).

Op basis van het Delft3D FM model *dflowfm3d_dwaq_slib-waddenzee_200m-j17_6-v1* is een stapsgewijze roosterverfijning toegepast voor het Friesche Zeegat naar een resolutie van 25 x 25 m. De dwarsdoorsnedes die in dit model zijn gebruikt om de debieten en getijprisma's te bepalen zijn te vinden in Bijlage B.1.

Voor alle drie de bodems is gebruik gemaakt van dezelfde forcering. Hiervoor is de periode van 1 t/m 15 juni 2016 gebruikt, een springtij-doodtij cyclus in een periode met relatief kalm weer, waardoor de forcering zo dicht mogelijk overeenkomt met het astronomisch getij.

De stroomsnelheden voor de drie gemodelleerde jaren zijn weergegeven in Figuur 3-1. Gedetailleerde stroomsnelheden voor de deelgebieden Zoutkamperlaag, Glinder en Grootte Siege staan in Bijlage B.2. Hier is te zien dat in 1994 zowel tijdens eb als tijdens vloed de hoogste stroomsnelheden te vinden waren in de hoofdgeul Zoutkamperlaag. Stroomsnelheden tijdens eb zijn (iets) groter dan tijdens vloed.

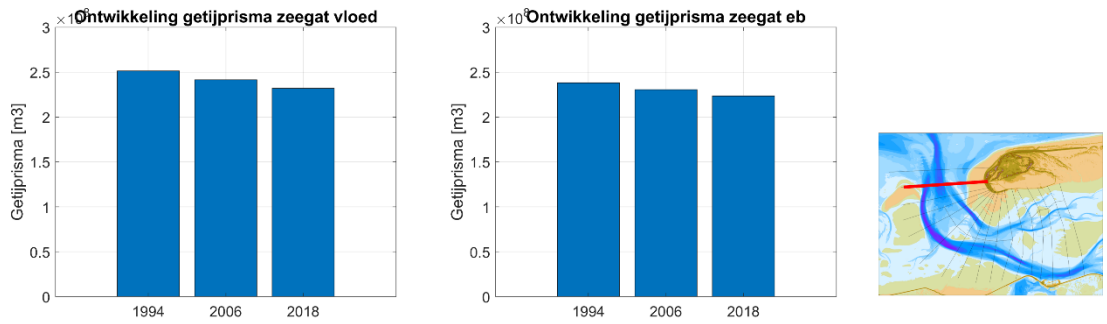
Tussen 1994, 2006 en 2018 vindt een verschuiving in de stromingspatronen plaats (Figuur 3-1). De stroomsnelheden nemen af in de Zoutkamperlaag en nemen juist toe in het Binnenplaatgat, de geul die tussen 1994 en 2018 oostelijk van de Zoutkamperlaag ontstaat en vlak langs de kop van Schiermonnikoog loopt. Deze geul verbindt het Gat van Schiermonnikoog direct met het zeegat. Waar in 1994 de stroming nog geconcentreerd is op de Zoutkamperlaag is er in 2018 duidelijk sprake van twee geulen (Zoutkamperlaag en Binnenplaatgat) met hogere stroomsnelheden.



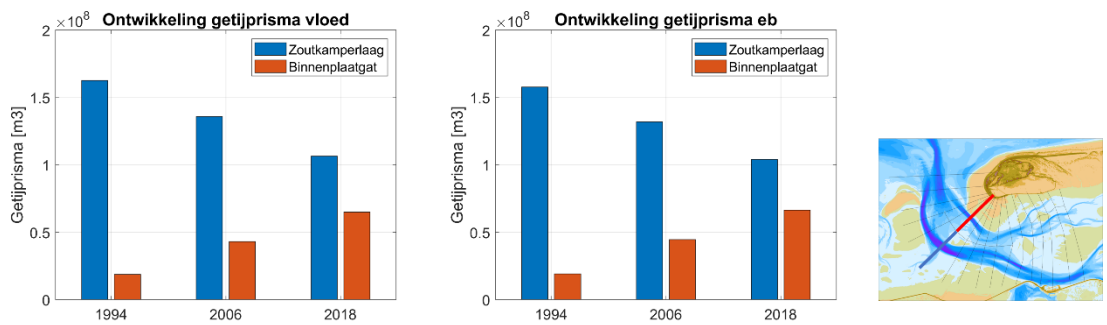
Figuur 3-1 Stroomsnelheden voor de jaren 1994, 2006 en 2018 zoals gemodelleerd door Arcadis.

3.2 Veranderende balans tussen Zoutkamperlaag en Binnenplaatgat

Wanneer het getijprisma door de Zoutkamperlaag wordt vergeleken met het getijprisma door het Binnenplaatgat, wordt duidelijk dat hier een sterke verschuiving heeft plaatsgevonden. In 1994 was de Zoutkamperlaag nog dominant in de afwatering van de komberging en was het getijprisma met 163 miljoen m³ tijdens vloed en 158 miljoen m³ eb meer dan acht keer zo groot als dat van het Binnenplaatgat (19 miljoen m³ gedurende zowel eb als vloed, Figuur 3-3). De afgelopen twee decennia nam het getijprisma van de Zoutkamperlaag sterk af tot 106 en 104 miljoen m³ bij respectievelijk vloed en eb, terwijl dat door het Binnenplaatgat steeg tot 65 en 66 miljoen m³. Er vindt een verschuiving plaats van een één-geul-configuratie in het bekken met de Zoutkamperlaag als dominante geul naar een tweegeulenconfiguratie waarin het getijprisma van het Binnenplaatgat inmiddels dezelfde orde grootte heeft als dat van de Zoutkamperlaag. De modelberekeningen geven geen indicatie dat deze trend de komende jaren af zal zwakken



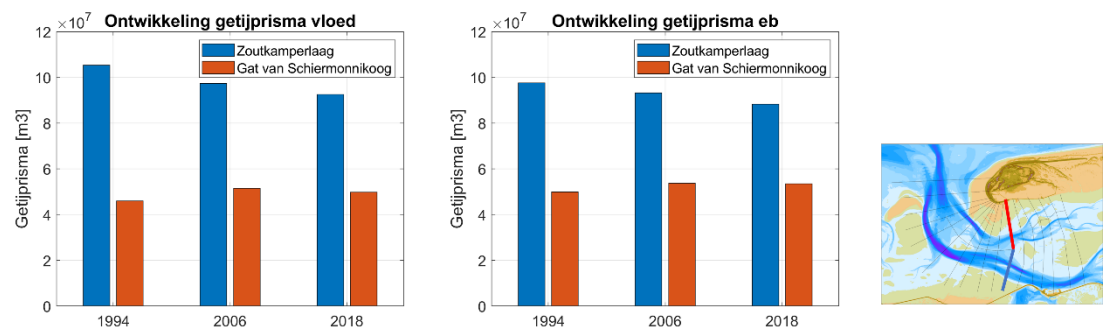
Figuur 3-2 Ontwikkeling van debieten door de keel van het zeegat, zoals gemodelleerd door Arcadis. Het getijprisma neemt geleidelijk af.



Figuur 3-3 Ontwikkeling van debieten door de Zoutkamperlaag (blauw) en het Binnenplaatgat (rood) zoals gemodelleerd door Arcadis. Van 1994 naar 2018 neemt het getijprisma van het Binnenplaatgat toe, terwijl dat van de Zoutkamperlaag afneemt.

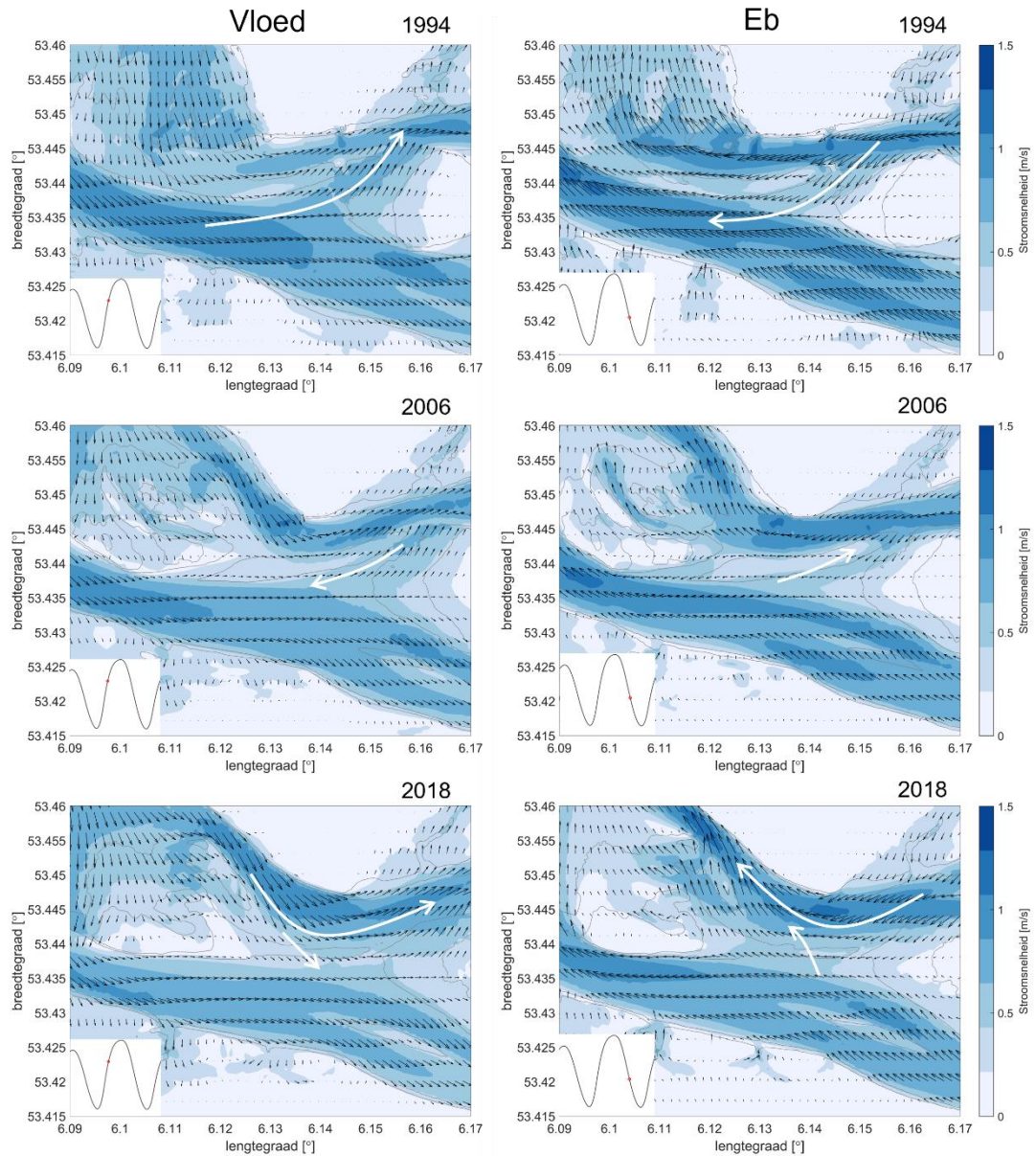
Naast een herverdeling van de debieten tussen Zoutkamperlaag en Binnenplaatgat is er ook een lichte dalende trend in het totale getijprisma van 251 bij vloed en 238 miljoen m³ tijdens eb in 2018, naar respectievelijk 232 en 224 miljoen m³ (Figuur 3-2). Dit zou kunnen komen door het terugschuiven van het wantij zoals beschreven in paragraaf 2.2.

Deze afname van getijvolume heeft vooral effecten in het zuidelijk deel van het bekken. Tussen 1994 en 2018 zijn de debieten door het Gat van Schiermonnikoog, dat de verbinding vormt met de geulsystemen Groote Siege en Brakzandstergat in het noordelijke deel van het bekken, gelijk gebleven of zelfs licht toegenomen (Figuur 3-4; van 46 tot 50 miljoen m³ bij vloed en van 50 tot 54 miljoen bij eb). Het getijvolume door het zuidelijk deel van de Zoutkamperlaag neemt geleidelijk af; van 105 naar 93 miljoen m³ vloed en van 98 tot 88 miljoen m³ eb.



Figuur 3-4 Ontwikkeling van debieten door het zuidelijk deel van de Zoutkamperlaag (Blauw) en het Gat van Schiermonnikoog (rood). Het getijprisma in het Gat van Schiermonnikoog blijft constant/neemt licht toe, terwijl de debieten in de Zoutkamperlaag afnemen.

De verschuiving die plaatsvindt in het systeem wordt verder duidelijk wanneer de debieten in het drempelgebied rondom de Glinder meer in detail worden bekeken. Tussen 1994 en 2018 heeft er een duidelijke verschuiving plaatsgevonden in de stroomrichting rondom Glinder, zoals te zien is in Figuur 3-5. In 1994 liep er tijdens vloed een noordoostelijk gerichte stroming vanuit de Zoutkamperlaag naar het Gat van Schiermonnikoog, via de Glinder die toen een vloedgeul was. Met de vorming van het Binnenplaatgat is de stroomrichting over de drempel bij de Glinder in 2018 veranderd. De noordoostelijk gerichte stroming van de Zoutkamperlaag naar het Gat van Schiermonnikoog is verdwenen. Het Gat van Schiermonnikoog stroomt tijdens eb nu niet meer uit via de Zoutkamperlaag maar direct via het Binnenplaatgat. De stroming over de drempel is duidelijk afgenomen.

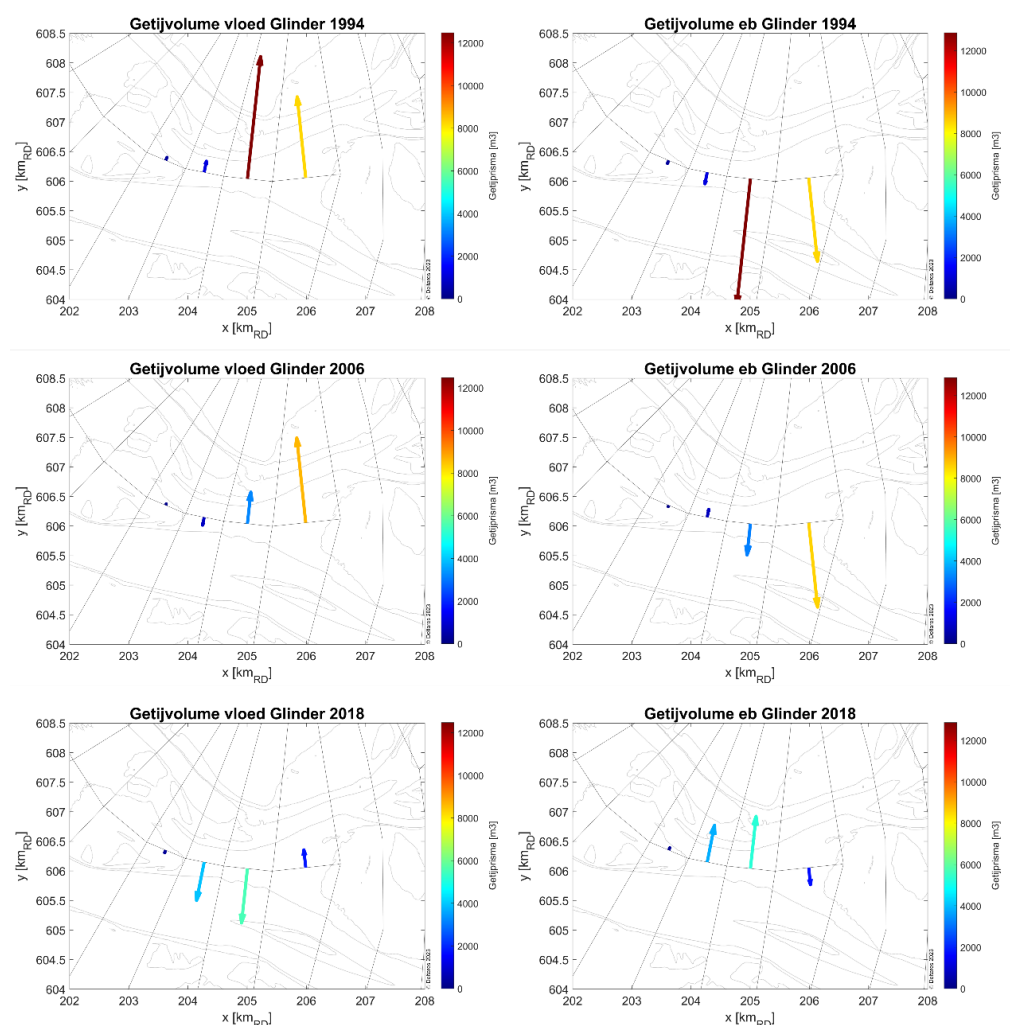


Figuur 3-5 Stromingsvectoren en stroomsnelheden in het gebied rondom de Glinder voor 1994, 2006 en 2018 tijdens vloed (linker paneel) en eb (rechter paneel). In 1994 werd het Gat van Schiermonnikoog gevoed via de Zoutkamperlaag (witte pijlen bovenste paneel). In 2018 wordt het Gat van Schiermonnikoog gevoed via het Binnenplaatgat en is de stroming van de Zoutkamperlaag over de Glinder verdwenen (witte pijlen onderste paneel).

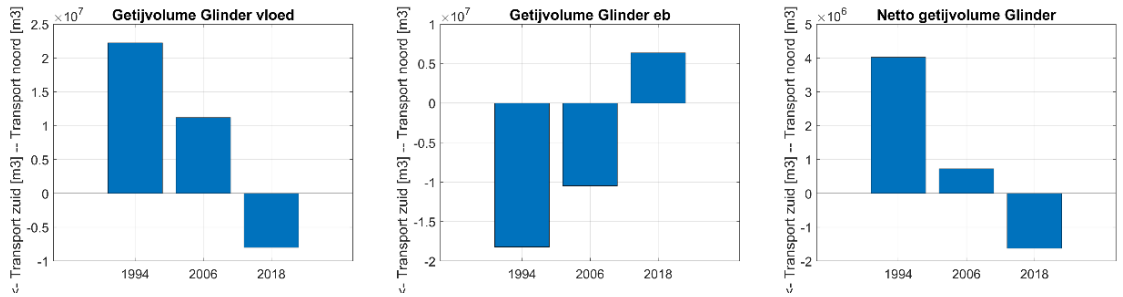
Deze verandering is ook duidelijk zichtbaar wanneer het getijvolume over de drempel wordt beschouwd (Figuur 3-6 en Figuur 3-7). In 1994 was het getijvolume tijdens vloed noordelijk gericht en tijdens eb zuidelijk: het water stroomde via de Zoutkamperlaag naar het Gat van Schiermonnikoog en op dezelfde wijze weer terug.

In 2018 wordt het noordelijk deel van het bekken niet meer gevoed via de Zoutkamperlaag en een omgekeerde beweging wordt zichtbaar: tijdens vloed is de waterverplaatsing over de drempel zuidwaarts gericht vanuit het Binnenplaatgat richting de Zoutkamperlaag, en tijdens eb noordwaarts. Ook de richting van de netto waterbeweging over de volledige getijcyclus is omgedraaid (in 1994 noordelijk gericht, nu zuidelijk) en de netto debieten over de drempel zijn afgenomen, zoals de rechter grafiek in Figuur 3-7 laat zien.

Deze omkerende stroomrichting past in de ontwikkelingen op de schaal van het bekken, waarin het Binnenplaatgat aan belang wint en de Zoutkamperlaag gestaag krimpt. De verandering in transportrichting over de drempel laat zien dat het systeem zich aan het heroriënteren is en er grote verschuivingen plaatsvinden.



Figuur 3-6 Schematische weergave van het getijvolume over de doorsnedes verbinding tussen de Zoutkamperlaag en het Binnenplaatgat/Gat van Schiermonnikoog tijdens vloed (links) en eb (rechts). Het getijvolume is gedefinieerd als de som van alle debieten door de doorsnede gedurende de tijdstappen waarin de waterstand stijgt (vloed) en de waterstand daalt (eb). De pijlen staan loodrecht op de doorsnede en geven aan in welke richting het transport over de doorsnede positief is; ze geven dus niet de stroomrichting weer.



Figuur 3-7 Som van het getijvolume over de vier doorsnedes weergegeven in Figuur 3-6. Het getijvolume gedurende de vloed is in 1994 nog noordwaarts gericht en in 2018 zuidwaarts. De verschuiving gedurende eb is andersom.

De belangrijkste bevindingen uit de afgelopen twee hoofdstukken voor de knelpunten kunnen als volgt worden samengevat:

- Grote tijd- en ruimteschaal: de afsluiting van de Lauwerszee heeft geleid tot een verschuiving van het zwaartepunt van het zuidelijke naar het oostelijke deel van het bekken en een afname van het kombergingsgebied. Hierdoor namen de debieten af en vond er import van sediment plaats.
- Op een kleinere schaal vindt er op dit moment een verschuiving plaats van een één- naar een tweegeulenconfiguratie in het bekken. De debieten door de Zoutkamperlaag nemen af terwijl het Binnenplaatgat aan invloed wint.
- Deze verschuivingen in het hoofdgeulensysteem beïnvloeden de knelpunten op de volgende wijze:
 - De debieten door het zuidelijke deel van de Zoutkamperlaag nemen af (Figuur 3-4);
 - De stroming over het drempelgebied waarin de Glinder zich bevindt verandert van richting (Figuur 3-5, Figuur 3-6 en Figuur 3-7);
 - Het debiet naar het Gat van Schiermonnikoog, en daarmee naar het gecombineerde geulensysteem Grote Siege en Brakzandstergat blijft grofweg gelijk (Figuur 3-4). Dit gebied wordt niet meer gevoed vanuit de Zoutkamperlaag maar via het Binnenplaatgat.

4 Morfologische ontwikkeling van de knelpunten

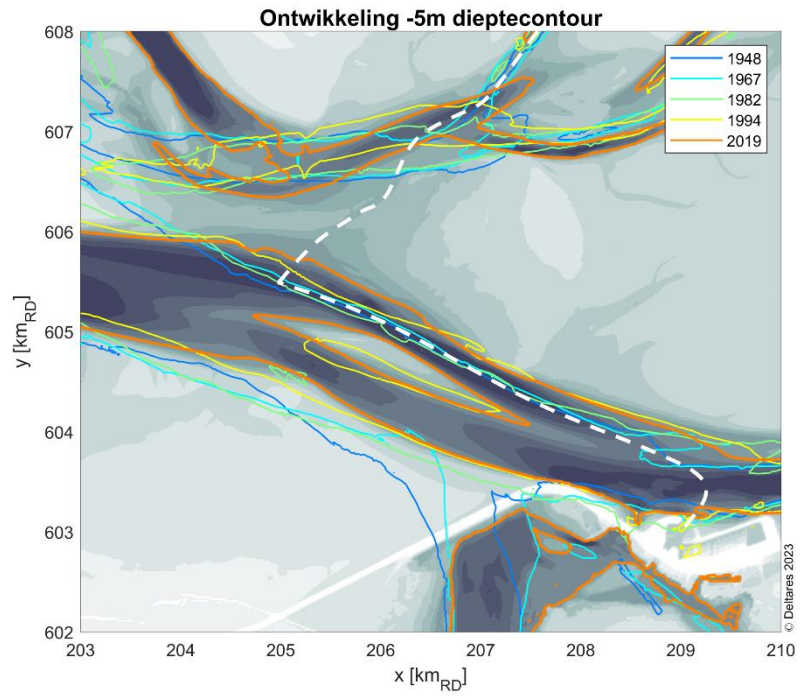
In de vorige twee hoofdstukken zijn de grootschalige ontwikkelingen in het bekken besproken. Deze ontwikkelingen vormen de context en randvoorwaarden om de individuele knelpunten in een breder perspectief te plaatsen. In dit hoofdstuk wordt ingezoomd op de morfologische ontwikkelingen van de deelgebieden langs de vaarroute van de veerboot, op de volgorde waarop ze gepasseerd worden op de route van Lauwersoog naar Schiermonnikoog. Eerst wordt het zuidelijke deel van de Zoutkamperlaag besproken in paragraaf 4.1. Vervolgens wordt gekeken naar de Glinder en de Groote Siege (respectievelijk in paragraaf 4.2 en 4.3). Tot slot wordt de ontwikkeling in baggervolumes op de vaarroute besproken in 4.4.

4.1 Zoutkamperlaag

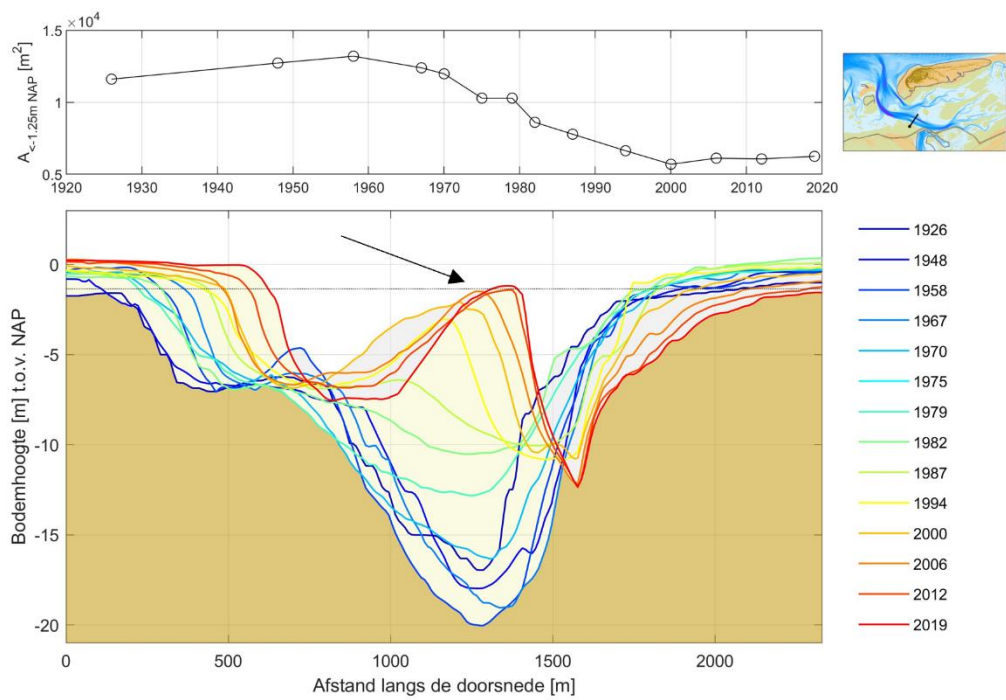
De veerboot naar Schiermonnikoog vertrekt vanuit Lauwersoog. De route leidt na vertrek richting het westen over het zuidelijke deel van de geul Zoutkamperlaag (Figuur 4-1). Een paar kilometer westelijk van Lauwersoog is een zandplaat in de Zoutkamperlaag ontstaan, welke de geul splitst in een eb- en vloodschaar. De vaargeul loopt noordelijk van deze zandplaat. Het ontstaan van de plaat is goed zichtbaar in Figuur 4-1.

Vanwege de ontwikkelingen op grotere schaal nemen de debieten door dit zuidelijke deel van de Zoutkamperlaag tussen 1994 en 2018 geleidelijk af (Figuur 4-3). Hoewel de veranderingen van het zuidelijke deel van de Zoutkamperlaag vanaf eind jaren '80 betrekkelijk klein blijven lijkt deze wel een neiging te houden om af te nemen (zie par. 2.3).

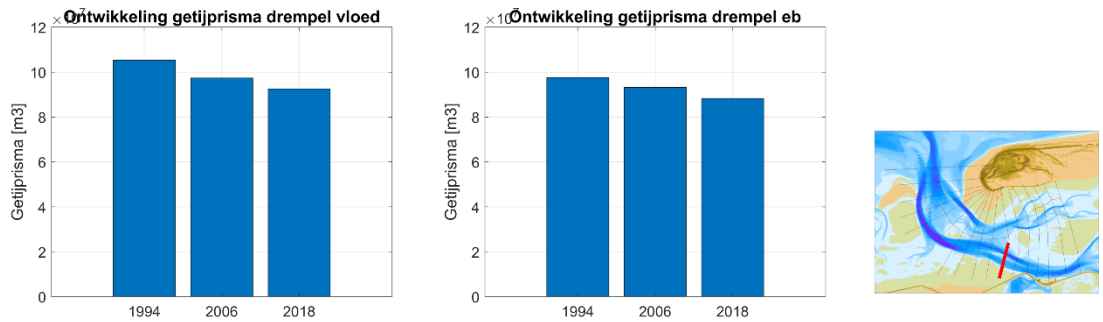
Figuur 4-2 toont de ontwikkeling van de doorsnede over de drempel. De diepte van de geul is sinds omstreeks 1970 aan het afnemen. Gelijktijdig neemt ook het natte oppervlak van de geul af (zie bovenste paneel Figuur 4-2). Sinds de eeuwwisseling lijkt de drempelvorming enigszins gestagneerd en lijken de diepte en natte doorsnede niet verder af te nemen.



Figuur 4-1 Ontwikkeling -5 m dieptecontour tussen 1948 en 2019 bij Lauwersoog. De witte stippellijn toont de route van de veerboot.



Figuur 4-2 Ontwikkeling van de drempel in het Zoutkamperlaag tussen 1926 en 2019. De pijl geeft de locatie van de drempel aan. Bovenste paneel: ontwikkeling van het natte volume over de dwarsdoorsnede.



Figuur 4-3 Ontwikkeling van het getijprisma over de drempel, op basis van de modelberekeningen van Arcadis.

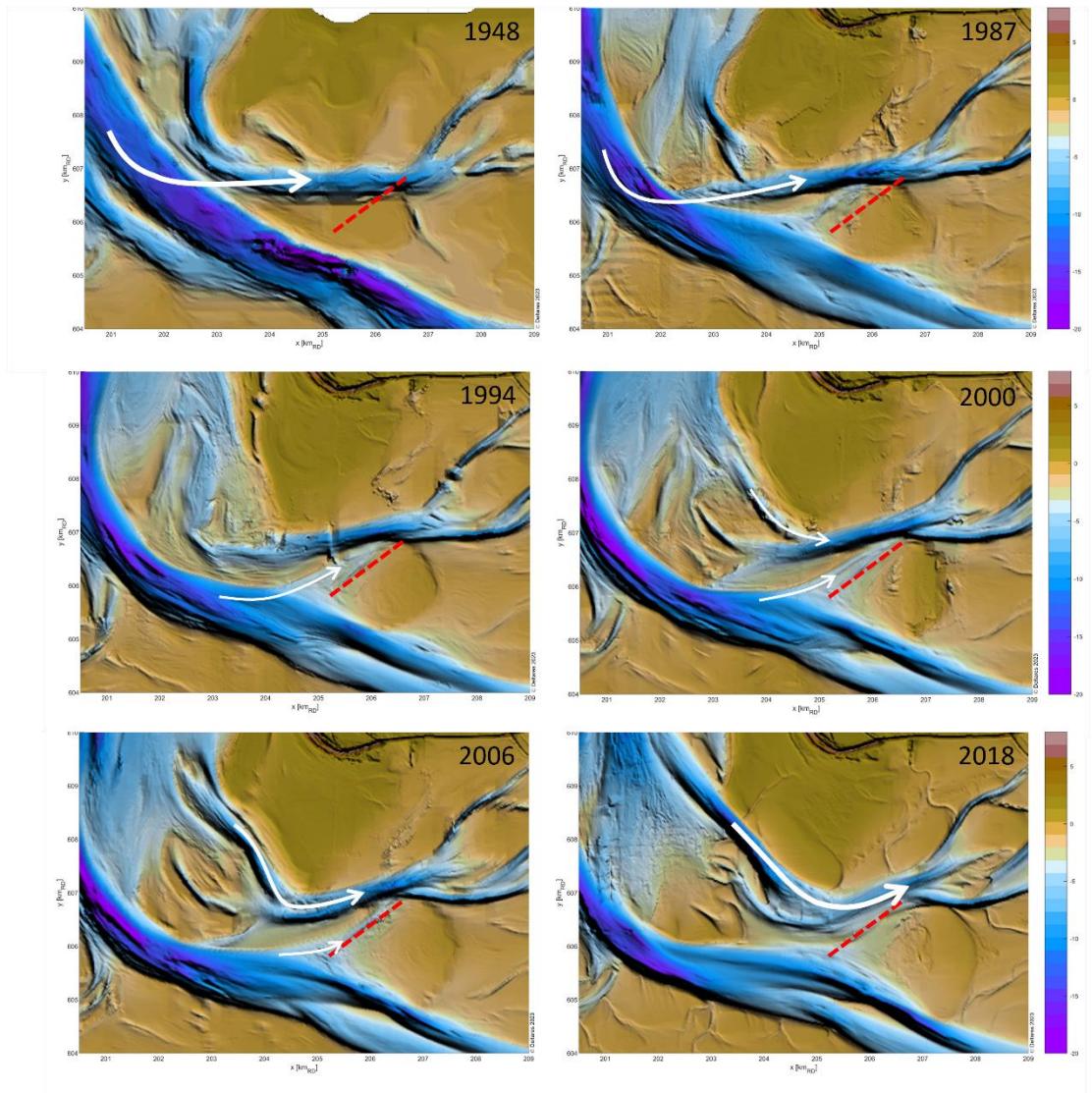
4.2 Glinder

De vloedgeul Glinder verbindt de Zoutkamperlaag met het Gat van Schiermonnikoog en is daarmee essentieel in de veerroute. De Glinder bevindt zich in een dynamisch drempelgebied dat sterk verbonden is met de ontwikkelingen van de hoofdgeulen eromheen. Zowel de omvang en locatie van de Glinder zelf als het gebied eromheen zijn aan sterke veranderingen onderhevig. De geul is ontstaan in de jaren '70 en over de jaren steeds verder oostwaarts gemigreerd en in de verdrinking gekomen.

Om de Glinder bevaarbaar te houden voor de veerboot wordt deze geul gebaggerd. Het baggerbezwaar is tussen 2005 en 2015 toegenomen en lijkt sindsdien weer stabiel. Mogelijke ingrepen in de Glinder zijn bestudeerd door Lenstra (2023), waarbij een aantal opties voor een doorsteek zijn gepresenteerd, met verschillende oriëntaties ten opzichte van de drempel en de overheersende stroomrichting. Deze voorgestelde ingrepen worden besproken in paragraaf 4.4.

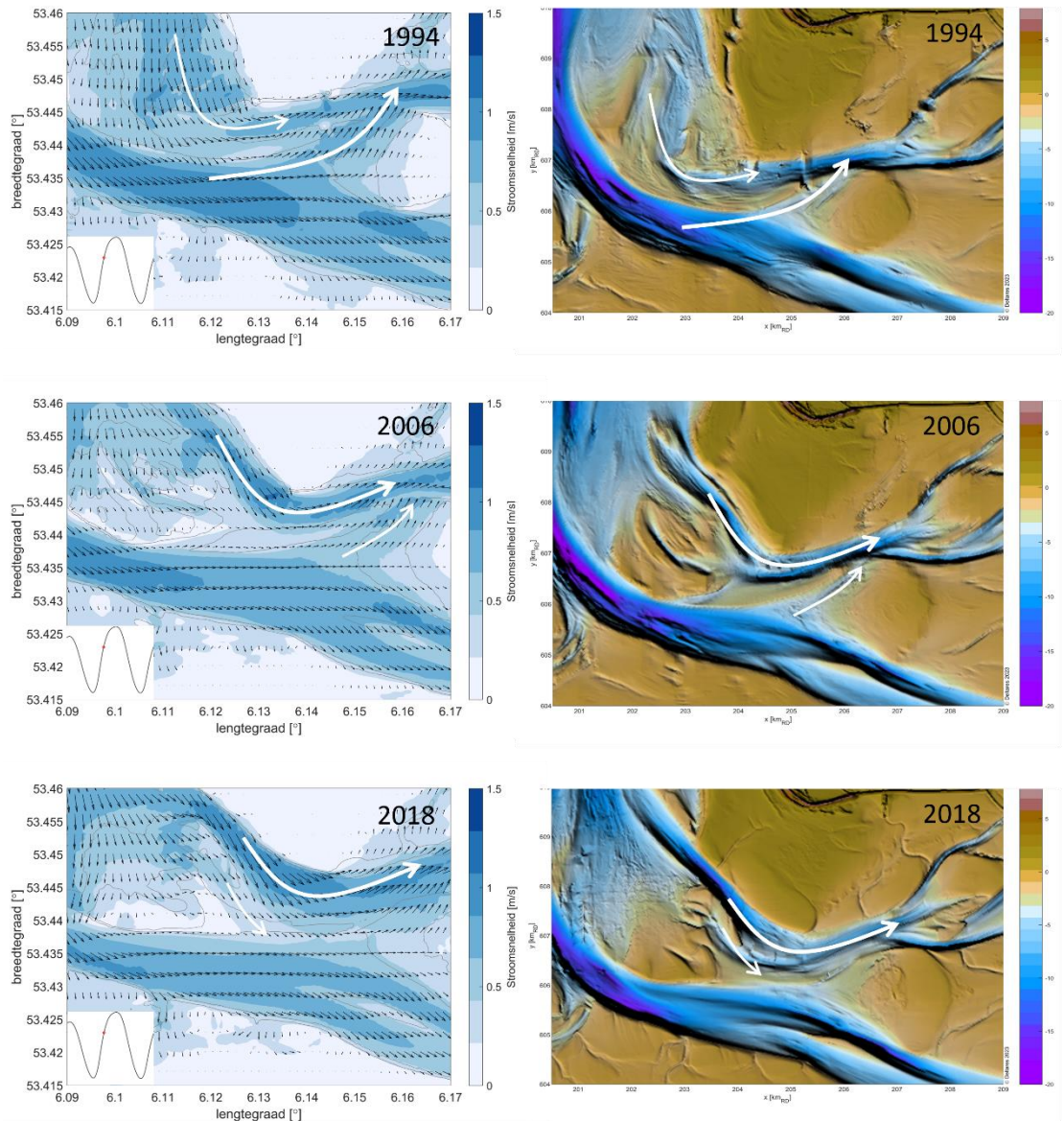
Voor de afsluiting van de Lauwerszee sloot het Gat van Schiermonnikoog aan op de Zoutkamperlaag, zoals het paneel linksboven in Figuur 4-4 laat zien (1948). De kaart uit 1987 laat een vroege variant van de Glinder zien als vloed-schaar van de Zoutkamperlaag, nog westelijk van zijn huidige locatie.

De kaarten uit 1994 en 2000 tonen hoe het Gat van Schiermonnikoog steeds verder afkoppelt van de Zoutkamperlaag en zich meer op het Binnenplaatgat gaat oriënteren. Tussen 2000 en 2018 is de razendsnelle vorming en uitdieping van het Binnenplaatgat duidelijk zichtbaar. Door deze ontwikkeling komt de Glinder in een depositiegebied te liggen. De platen rondom de Glinder (de Kuipersplaat ten westen en het Roode Hoofd ten oosten) migreren beiden richting het zuidoosten en ook de Glinder beweegt steeds verder oostwaarts.



Figuur 4-4 Morfologische ontwikkeling van het gebied rondom de Glinder. De rode stippellijn geeft de huidige locatie van de Glinder. De witte pijlen geven een indicatie van de voornaamste watertoevoer naar het Gat van Schiermonnikoog; eerst via de Zoutkamperlaag en sinds 2006 via het Binnenplaatgat.

De hydrodynamische ontwikkelingen in dit gebied zijn besproken in 3.2. Wanneer de gemodelleerde stromingsvelden en de historische bodems naast elkaar gelegd worden valt op dat de morfologie in dit gebied de hydrodynamica nauw volgt (Figuur 4-5). In 1994 is er sprake van een stroming door de Glinder vanuit de Zoutkamperlaag richting het Gat van Schiermonnikoog. Naarmate deze stroming afzwakt (2006) wordt ook de Glinder kleiner en komt deze meer in de verdrukking. Ondertussen nemen zowel de stroomsnelheid als de diepte in het Binnenplaatgat toe. In 2018 is het Binnenplaatgat de voornaamste leverancier van water aan het Gat van Schiermonnikoog en is er zelfs een kleine stroming vanuit het Binnenplaatgat richting het zuidoosten te ontdekken. Dit springt in de stromingsvelden nog niet in het oog, maar in de debieten is al een zuidwaartse beweging tijdens vloed zichtbaar voor 2018 (besproken in 3.2 en Figuur 3-6).

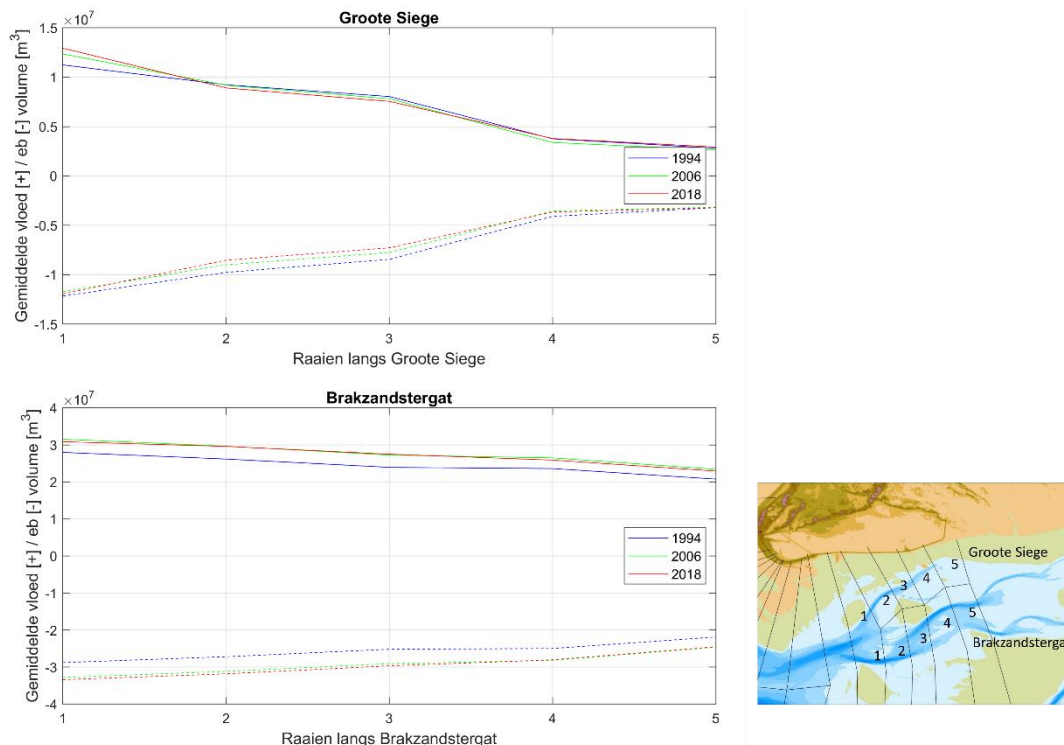


Figuur 4-5 Koppeling hydrodynamische en morfologische ontwikkelingen van de Glinder. Links de stromingsvelden, rechts de bathymetrie voor de gemodelleerde jaren. De witte pijlen laten de overheersende stromingsrichtingen zien.

4.3 Grote Siege

De Grote Siege vormt het laatste deel van de veerroute naar Schiermonnikoog. Deze geul loopt vanaf het Gat van Schiermonnikoog tot aan de veerdam. In het verleden liep de Grote Siege door achter de veerdam, maar in de jaren '80 en '90 heeft het geuluiteinde zich teruggetrokken en de geul eindigt nu bij de veerdam. Indien de natuurlijke geul zich nog verder terug zou trekken zou dit leiden tot een flinke toename van het baggerbezwaar. Er lijkt echter geen trend te zijn tot verdere terugtrekking in recente jaren.

De gemodelleerde hydrodynamica door Arcadis laat geen grote verschillen zien in stromingen en debieten tussen 1994 en 2018. De stromingen zijn relatief constant in snelheid en patroon (Bijlage B.2.4). Ook de debieten door de doorsnedes over de Grote Siege en het Brakzandstergat voor de jaren 1994, 2006 en 2018 zijn relatief constant (Figuur 4-6). Voor deze periode is in de Grote Siege geen afname van stroomsnelheid of debiet te zien.

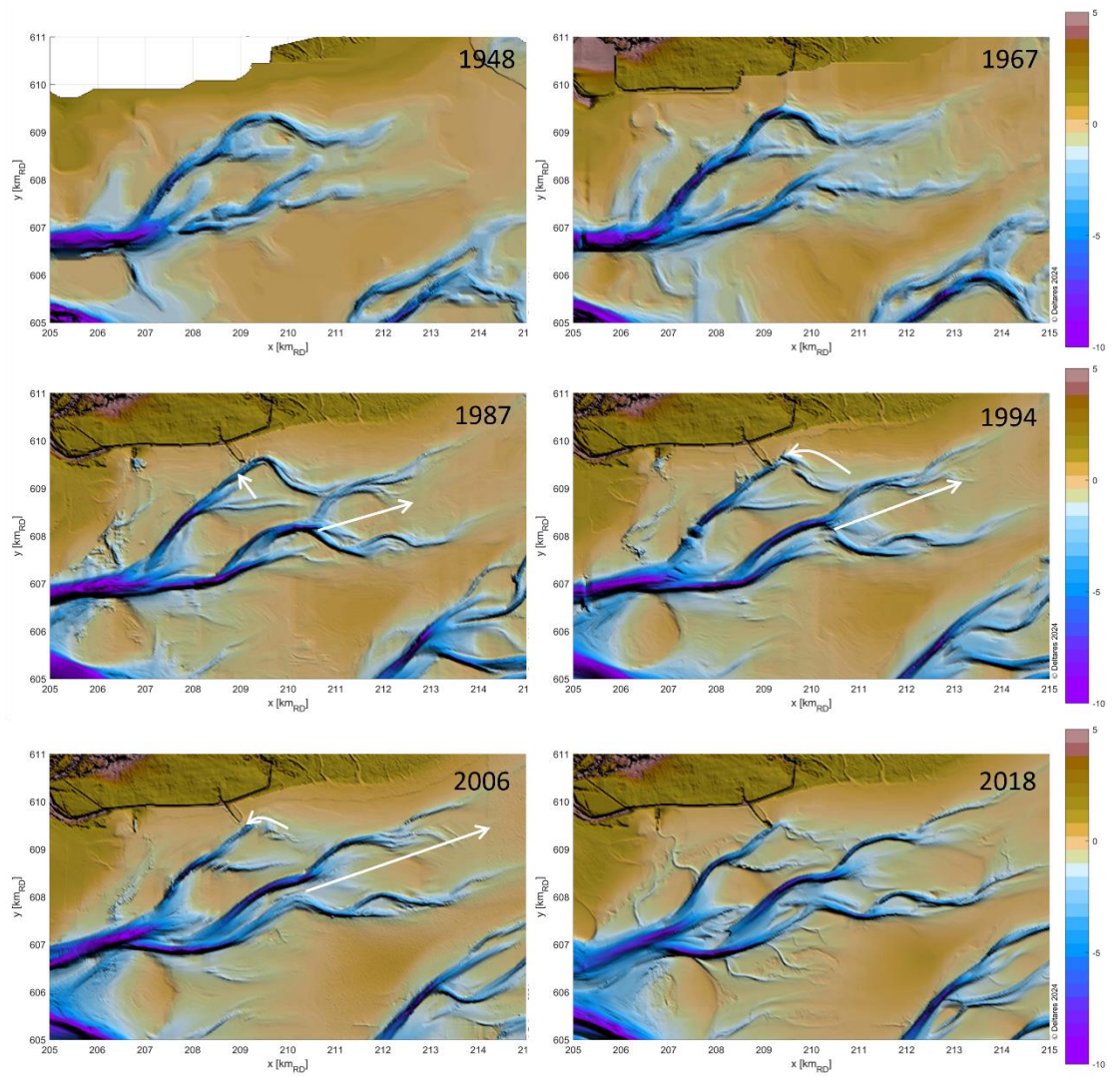


Figuur 4-6 Ontwikkeling van debieten door de Grootte Siege en het Brakzandstergat tussen 1994 en 2018 zoals gemodelleerd door Arcadis. De getijprisma's van zowel Grootte Siege als Brakzandstergat blijven relatief constant over de gemodelleerde periodes.

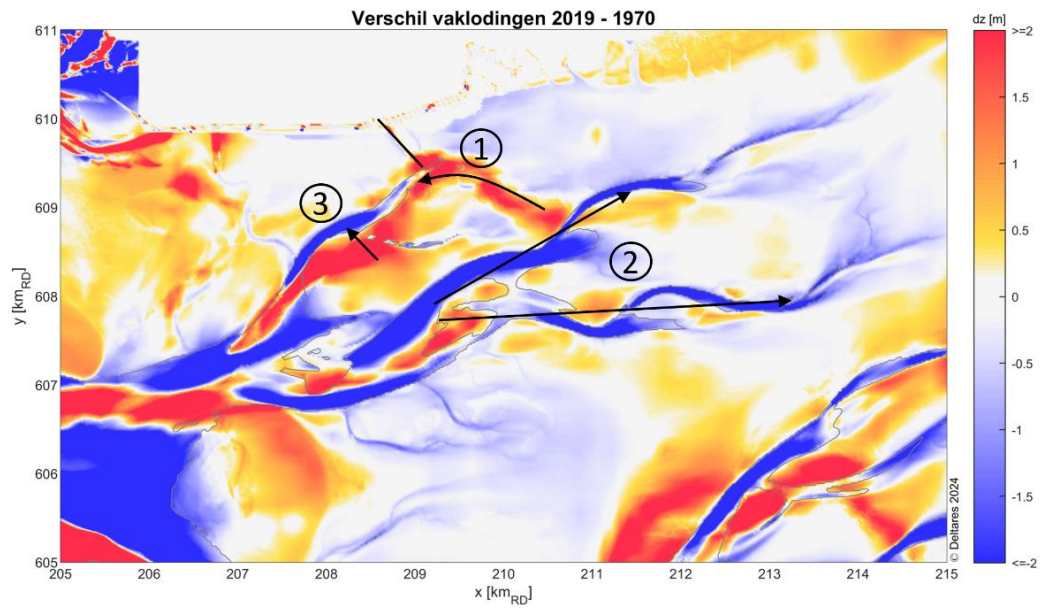
Er zijn drie morfologische ontwikkelingen die opvallen in het gebied van de Grootte Siege en het Brakzandstergat. De bodemkaarten laten zien dat de Grootte Siege tot in de jaren '80 doorliep tot ver na de huidige locatie van de veerdam (Figuur 4-7). Dit is ook te zien bij cijfer (1) in Figuur 4-8 en Figuur 4-9). De ontwikkeling van de dieptecontouren in Figuur 4-9 toont dat de geul Grootte Siege tot 1982 achter de veerdam verder doorliep en in zuidelijke richting afboog, tot in het gebied dat nu is overgenomen door het Brakzandstergat.

Tegelijkertijd heeft het Brakzandstergat zich uitgebreid: de geulen hier zijn dieper geworden en strekken zich verder oostwaarts uit, zoals te zien bij (2) in Figuur 4-8 en Figuur 4-9. De doorsnede van het Brakzandstergat in Figuur 4-11 toont hoe deze geulen zich tussen 1970 en 2000 steeds dieper hebben ingesneden. De uitbreiding van het Brakzandstergat die gelijk opgaat met het terugtrekken van de Grootte Siege roept de vraag op of dit concurrerende geulsystemen zijn en de uitbreiding van het Brakzandstergat ten koste gaat van de Grootte Siege.

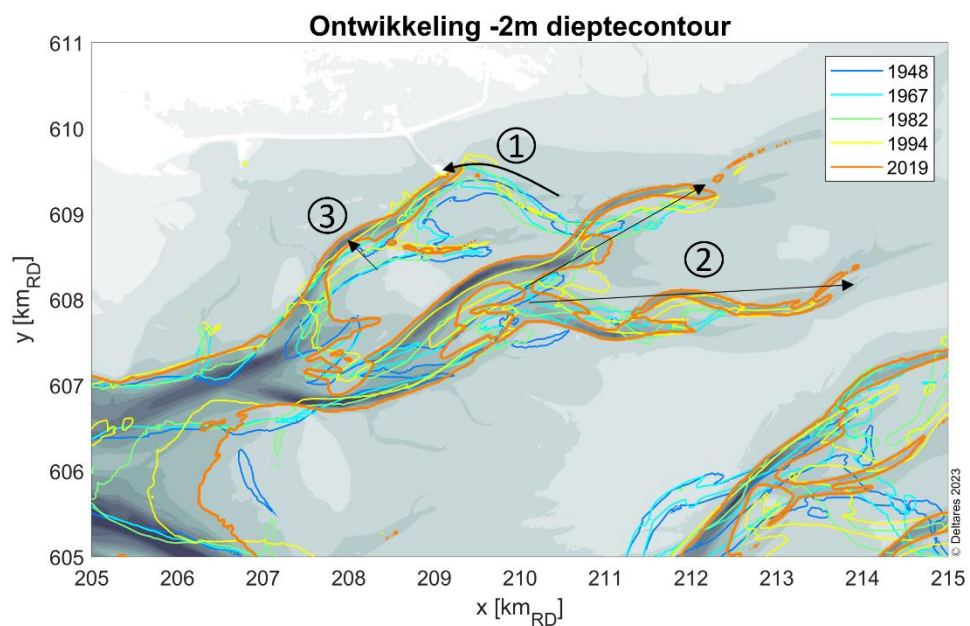
Sinds 1980 is de Grootte Siege steeds verder noordelijk gemigreerd richting het vasteland van Schiermonnikoog, te zien bij (3) in Figuur 4-8 en Figuur 4-9. Ook in de doorsnede van de Grootte Siege in Figuur 4-10 is dit zichtbaar. Dit hangt vermoedelijk samen met de aanleg van de nieuwe veerdam in 1962. Deze harde constructie kan hebben geleid tot contractie van stroming. De kaart van 1987 in Figuur 4-7 laat zien hoe de geul na de aanleg van de veerdam strak langs de veerdam loopt en de bocht naar het zuiden achter de veerdam hierdoor veel scherper wordt. Het uitbreidende Brakzandstergat sluit in deze periode steeds beter aan op deze uitloper van de Grootte Siege. Het is mogelijk dat de aanleg van de veerdam indirect de overname van deze geulstaart door het Brakzandstergat heeft gefaciliteerd. Doordat de geul na de aanleg van de veerdam noordwaarts is gemigreerd heeft de scherpere bocht mogelijk de afwatering van dit gebied via de Grootte Siege bemoeilijkt, waardoor het kon worden overgenomen door het Brakzandstergat.



Figuur 4-7 Morfologische ontwikkeling van het gebied Groote Siege - Brakzandstergat. Het terugtrekken van de Groote Siege en de uitbreiding van het Brakzandstergat is op deze figuren goed te zien, evenals het landwaarts verplaatsen van de Groote Siege na de aanleg van de veerdam (te zien in de kaart van 1987).

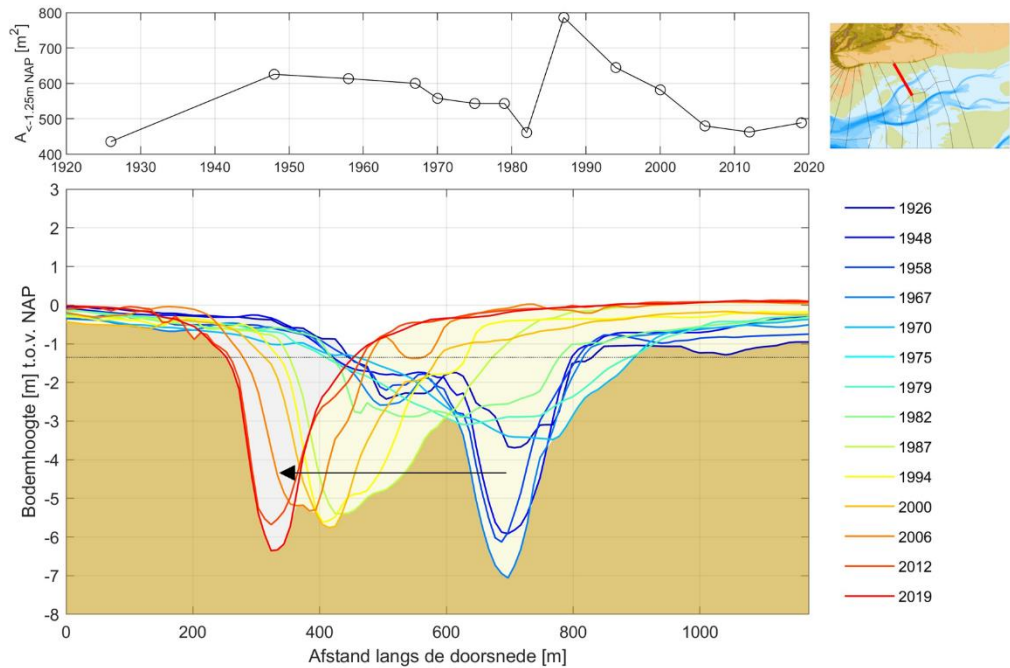


Figuur 4-8 Erosie en sedimentatie tussen 1970 en 2019 voor de Grootte Siege en het Brakzandstergat. (1) Het geuluiteinde van de Grootte Siege heeft zich teruggetrokken tot aan de veerdam. (2) De Grootte Siege is richting het eiland Schiermonnikoog gemigreerd. (3) Het Brakzandstergat heeft zich uitgebreid.

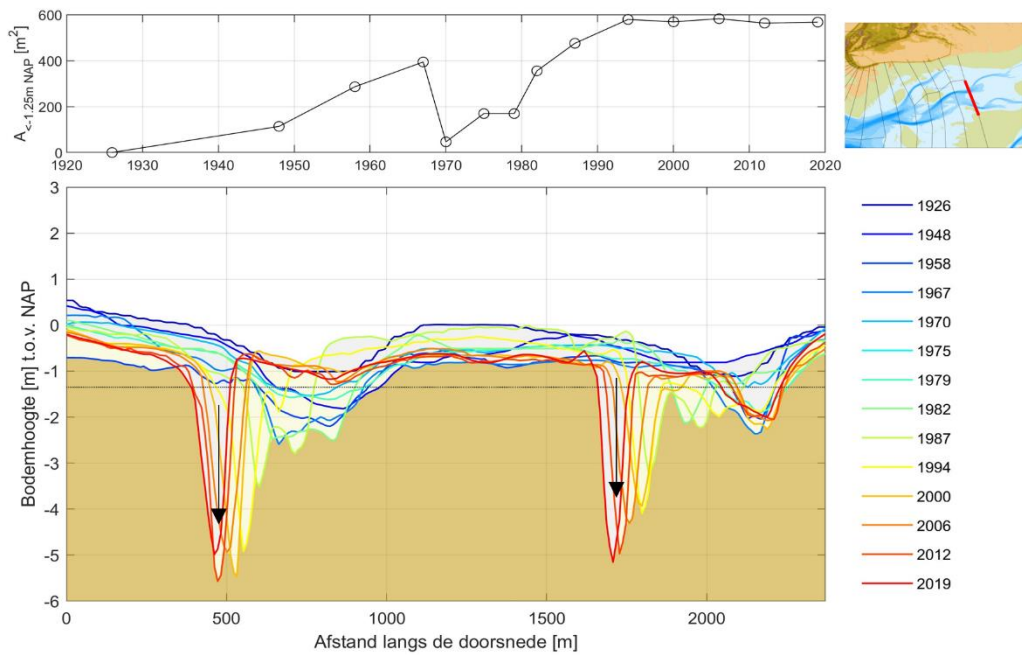


Figuur 4-9 Ontwikkeling van de -2 m dieptecontour voor de Grootte Siege en het Brakzandstergat. (1) Het geuluiteinde van de Grootte Siege heeft zich teruggetrokken tot aan de veerdam. (2) De Grootte Siege is richting het eiland Schiermonnikoog gemigreerd. (3) Het Brakzandstergat heeft zich uitgebreid.

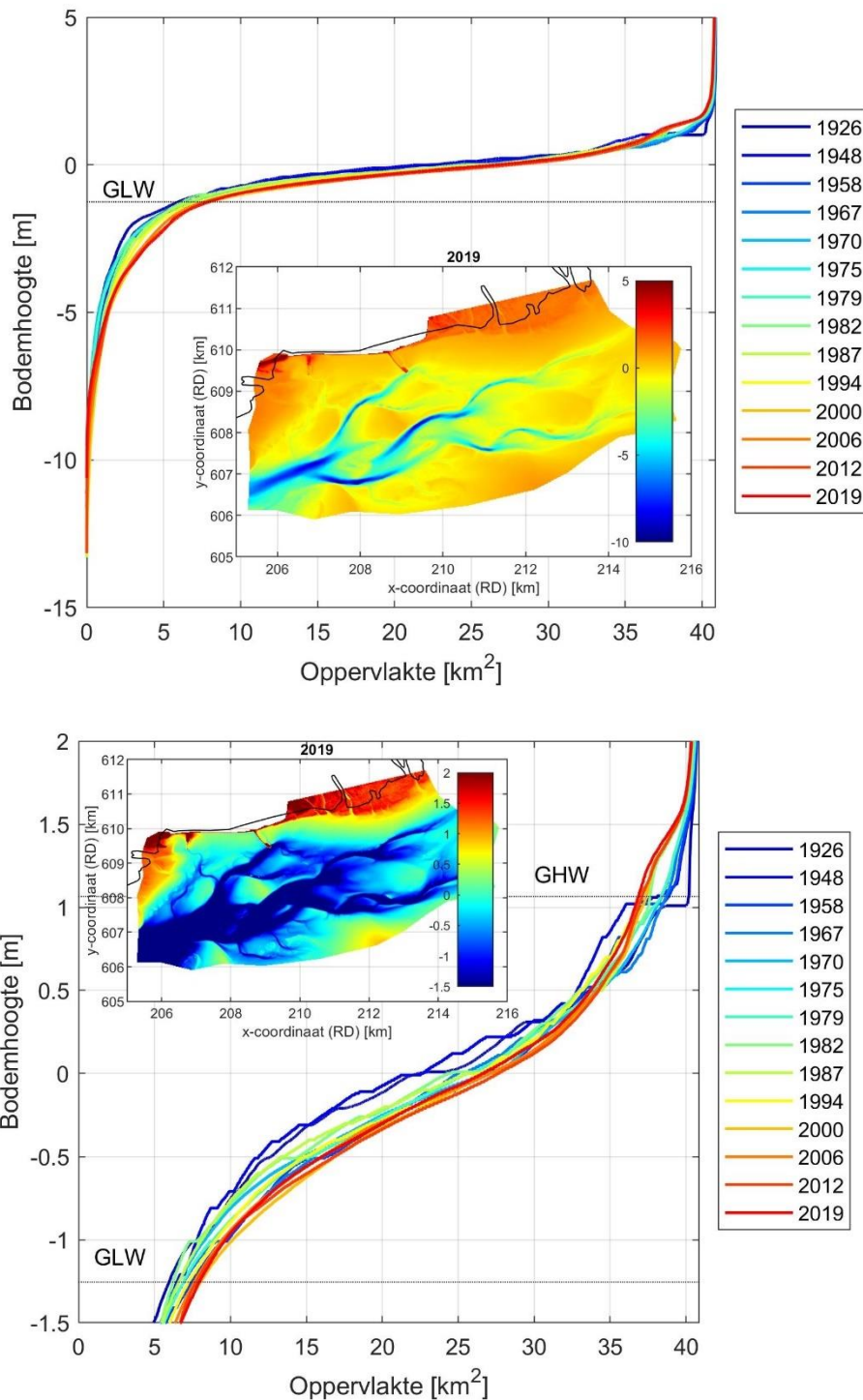
Figuur 4-12 toont de hypsometrische curve voor het gebied van de Grote Siege en het Brakzandstergat, die laat zien dat het gebied lager is komen te liggen, vooral in het intergetijdegebied. Rond de hoogwaterlijn lijkt een toename van de hoogteligging te zijn opgetreden, maar dit kan ook een artefact zijn als gevolg van veranderingen in de data-inwinning over de tijd. De verandering in bodemhoogte komt overeen met het beeld uit de erosie-sedimentatiekaarten, dat vooral rond het Brakzandstergat erosie laat zien. De afname van de geulomvang en lengte van de Grote Siege lijkt dus niet zozeer het gevolg van een grootschalige verlandende trend.



Figuur 4-10 Doorsnede van de Grote Siege. De geul is noordwaarts gemigreerd (zie zwarte pijl). Tussen 1985 en 2005 is het natte volume (onder de laagwaterlijn, -1,25m NAP) sterk afgenomen, sindsdien blijft het natte volume stabiel.



Figuur 4-11 Doorsnede van twee geulen in het Brakzandstergat. Tussen 1980 en 2000 is het natte volume (onder de laagwaterlijn, -1,25m NAP) sterk toegenomen en hebben de geulen diep in de wadplaat ingesneden.



Figuur 4-12 Hypsometrische curve voor het deelgebied Groote Siege-Brakzandstergat voor alle hoogtepunten (boven) en ingezoomd op het intergetijdengebied (onder).

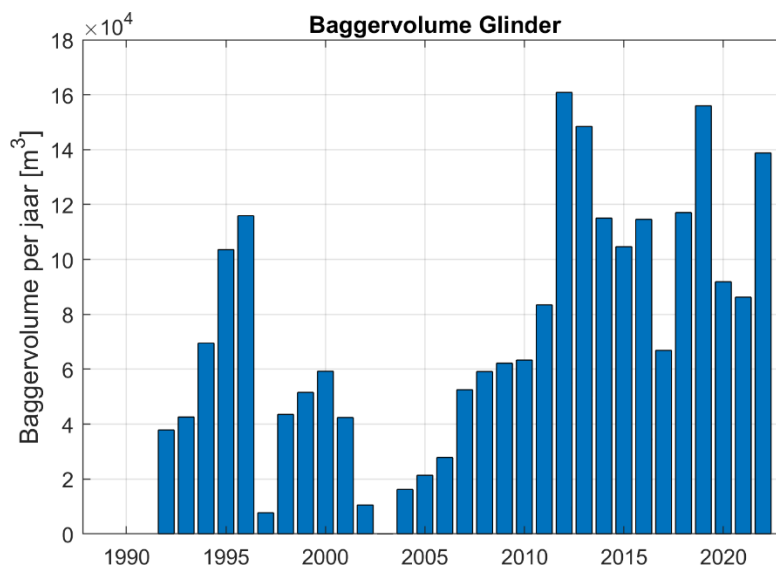
4.4 Baggeronderhoud

Bij de knelpunten Glinder en Groote Siege vindt baggeronderhoud plaats om de veerroute bevaarbaar te houden en te zorgen dat deze aan de wettelijke minimumbreedte- en diepte voldoet. De baggervolumes van de afgelopen 30 jaar zijn geanalyseerd om een beter beeld te krijgen van de gevolgen van de morfologische ontwikkelingen die in de vorige paragrafen beschreven zijn voor het vaargeulonderhoud en de bevaarbaarheid.

4.4.1 Glinder

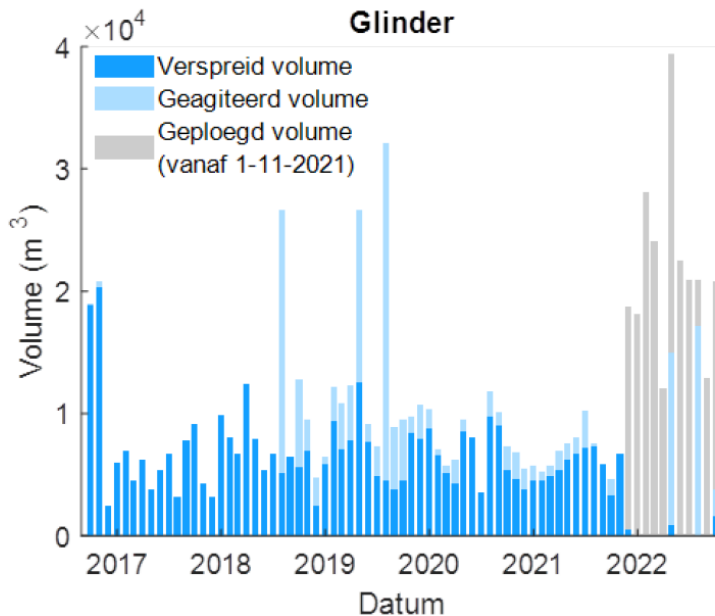
Voor de Glinder is er data over het baggeronderhoud beschikbaar vanaf 1992. De jaarlijkse baggervolumes zijn weergegeven in Figuur 4-13. Tot 2005 waren de baggervolumes in de Glinder relatief laag. Tussen 2004 en ca 2012 is er sprake van een stijgende trend, die daarna weer lijkt te stagneren. Deze ontwikkeling is in lijn met de verandering in dominante stroomrichting die in deze periode in het gebied rondom de Glinder wordt geobserveerd, zoals beschreven in paragraaf 4.2. Volgens Van der Vegt & Cleveringa (2022) is de invloed van de uitgebreide morfologische veranderingen op dit kortsluitgebied tussen de Zoutkamperlaag en het Gat van Schiermonnikoog niet helemaal duidelijk.

De afgelopen 10 jaar schommelen de jaarlijkse baggervolumes tussen de 80.000 en 120.000 m³/jaar, met uitschieters naar 160.000 m³/jaar. Er is er geen eenduidige trend in de baggervolumes te herkennen (Van der Vegt & Cleveringa, 2022; Luiks, 2021). Er wordt hier voornamelijk zand gebaggerd. De reden van variatie in baggervolumes kan liggen in het gebruik van verschillende baggertechnieken, veranderende baggercontracten of jaarlijks variërende condities. Volgens Van der Vegt & Cleveringa (2022) is Glinder een aandachtsgebied voor dynamische vaargeulbeheer vanwege de relatief grote morfologische veranderingen in de omgeving, die in potentie gevolgen hebben voor de baggerinspanningen.



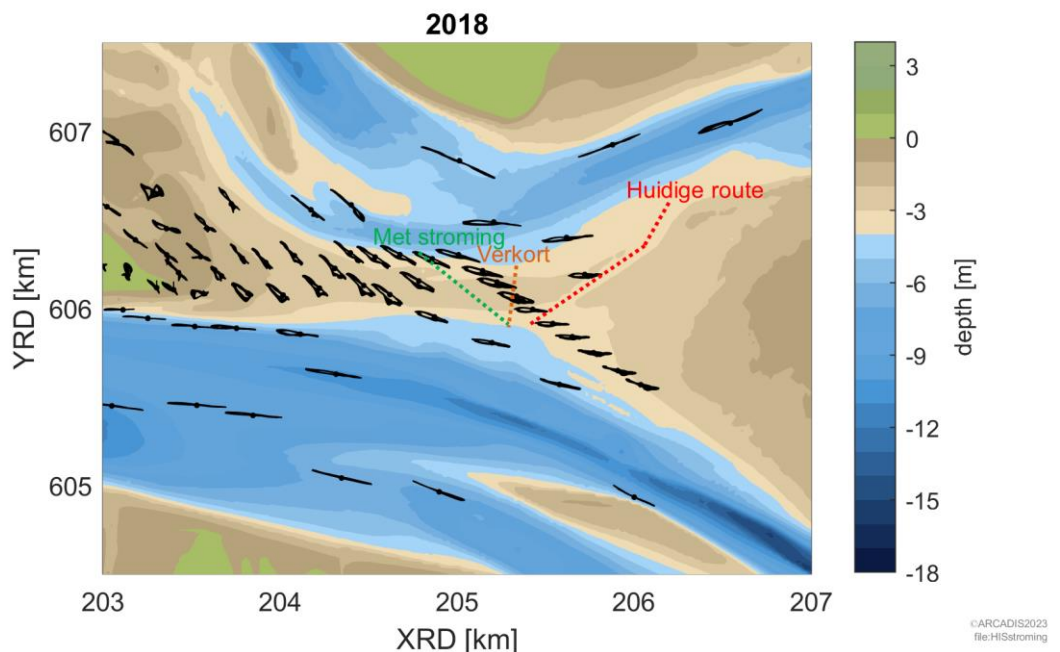
Figuur 4-13 Baggervolumes in de Glinder tussen 1992 en 2022.

Vanaf november 2021 wordt er in de Glinder voornamelijk gebruik gemaakt van ploegen als baggermethode (Figuur 4-14). De totale volumes lijken hierdoor sterk te zijn toegenomen (De Wit & Mastbergen, 2022)



Figuur 4-14 Geregistreerde volumes per methode voor baggervak Glinder 2017 - 2022 (figuur overgenomen uit de Wit & Mastbergen (2022)).

Lenstra (2023) suggereert een vaargeuloptimalisatie om de Glinder ook in de komende jaren bevaarbaar te kunnen houden. Verschillende mogelijke ingrepen zijn bestudeerd en een aantal opties voor een doorsteek gepresenteerd, met verschillende oriëntaties ten opzichte van de drempel en de overheersende stroomrichting (Figuur 4-15). Een verkorte versie, waarbij de drempel op het smalste deel wordt overgestoken, en een alternatief dat de huidige overheersende stroomrichting volgt. Er wordt verwacht dat een doorsteek in de stroomrichting (groen in Figuur 4-15) op termijn het beste aansluit bij de morfologische ontwikkeling in het gebied en zal leiden tot de laagste onderhoudsvolumes, ondanks dat het aanlegvolume groter is en de lengte van de vaarroute hierdoor (beperkt) toeneemt.

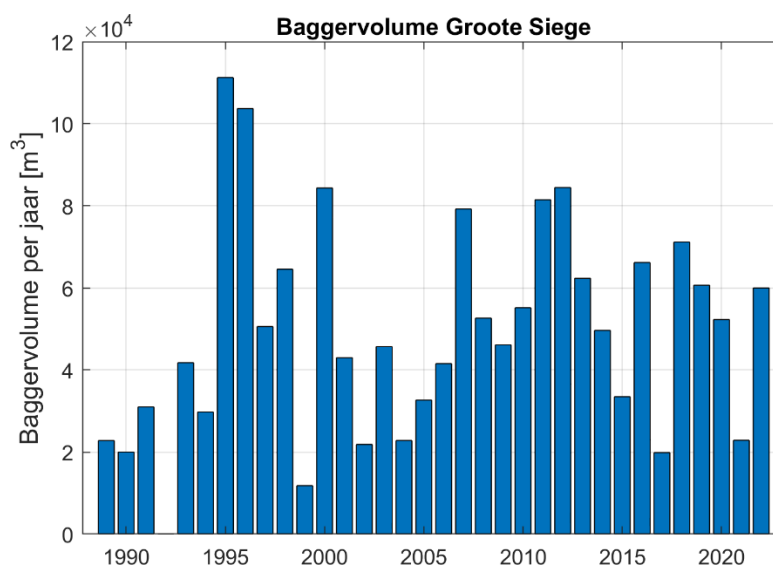


Figuur 4-15 Voorgestelde alternatieven voor vaargeuloptimalisatie uit Lenstra (2023).

4.4.2 Groote Siege

De baggervolumes in de Groote Siege zijn zeer variabel (Figuur 4-16) en fluctueren tussen 20.000 en 80.000 m³ per jaar. Hoewel er grote jaarlijkse schommelingen zijn, is er geen eenduidige trend te herkennen (Luiks, 2021). Dit is in lijn met het feit dat de debieten in Groote Siege sinds 2000 relatief stabiel zijn. Zoals in paragraaf 4.3 is beschreven heeft de terugtrekking van de Groote Siege vooral plaatsgevonden in de jaren '80 en het begin van de jaren '90 en is de afname van natte geuloppervlak de laatste 20 jaar gestagneerd. De hoge pieken in baggervolume in 1995 en 1996 zouden hiermee geassocieerd kunnen worden, echter is dit niet zeker en zou ook van veel andere factoren af kunnen hangen. Net zoals in de Glinder wordt ook in de Groote Siege voornamelijk zand gebaggerd.

Van der Vegt & Cleveringa (2022) verwachten dat de omvang van de Groote Siege ten westen van de veerdam verder zal afnemen. Het gevolg van zo'n afname van een geulstaart is een toename van de baggervolumes. Een dergelijke trend is echter nog niet opgetreden in Groote Siege; de natte doorsnede en debieten van de Groote Siege zijn sinds 2000 betrekkelijk stabiel (Figuur 4-6 en Figuur 4-10).



Figuur 4-16 Baggervolumes in de Groote Siege tussen 1989 en 2022.

5 Conceptueel model

De beschreven ontwikkelingen uit de vorige hoofdstukken leiden tot een conceptueel model voor de morfologische ontwikkeling van het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag. Dat conceptueel model wordt in dit hoofdstuk toegelicht. Het is opgesplitst in drie fases, namelijk (1) de gevolgen van de afsluiting van de Lauwerszee, (2) de recente morfologische ontwikkelingen en (3) een prognose voor toekomstige ontwikkelingen, waarbij ook de implicaties voor beheer worden besproken.

Gevolgen van de afsluiting van de Lauwerszee

Het bovenste paneel in Figuur 5-1 laat de eerste effecten zien in de jaren na de afsluiting van de Lauwerszee. In deze periode was de Zoutkamperlaag nog de dominante geul die zowel het zuidelijke als het noordelijke deel van het bekken bediende, via het Gat van Schiermonnikoog en het gebied waar nu de Glinder ligt. Voorafgaand aan de afsluiting van de Lauwerszee werd het bekken gekenmerkt door honderden jaren aan bedijkingen en landaanwinningen, die geleidelijk het kombergingsvolume steeds verder hebben verkleind. Door de afsluiting van de Lauwerszee nam het getijvolume sterk af en kon het getij verder naar het oosten doordringen doordat de geulen te groot waren voor het afgenomen getijvolume. Als reactie hierop breidden de geulsystemen Brakzandstergat en Lutjewad oostelijk uit en verplaatste het wantij in oostelijke richting. Gelijktijdig met de uitbreiding van het Brakzandstergat trok de Groote Siege zich terug tot de veerdam.

In de jaren na de afsluiting begon het gebied zich morfologisch aan te passen aan de nieuwe omstandigheden. In de getijdegeulen vond veel sedimentatie plaats. Sedimentatie in de Zoutkamperlaag ging gepaard met een afnemend debiet en uitbochting naar het westen, voornamelijk door sedimentatie in de binnenbocht.

Recente morfologische ontwikkelingen

Het tweede paneel in Figuur 5-1 laat de ontwikkelingen van 1995 tot nu zien. De eerste effecten van de afsluiting, zoals de verplaatsing van het wantij naar het oosten, stagneren. De sedimentatie in de Zoutkamperlaag zet door, door een combinatie van verlies aan getijvolume na de afsluiting en concurrentie met het nieuwe Binnenplaatgat. Vanwege de afname aan debiet beginnen zich in de Zoutkamperlaag systemen van eb- en vloedscharen te vormen met drempels ertussen, die op termijn gevolgen kunnen hebben voor de bevaarbaarheid.

Omstreeks 2000 ontstaat de nieuwe geul Binnenplaatgat oostelijk van de Zoutkamperlaag, die een directe verbinding vormt tussen het Gat van Schiermonnikoog en het zeegat. In de jaren die volgen diept het nieuwe Binnenplaatgat in hoog tempo uit en begint een steeds groter deel van het debiet van de oorspronkelijke hoofdgeul Zoutkamperlaag over te nemen. Met zijn oostelijke ligging vormt het Binnenplaatgat een efficiëntere route voor het nieuwe bekkenzwaartepunt, dat na de afsluiting van de Lauwerszee van het zuiden richting het oosten is verschoven.

Deze ontwikkelingen hebben een sterke invloed op de ontwikkeling van de Glinder. De Glinder is in de jaren '70 ontstaan als verbindingsgeul tussen de Zoutkamperlaag en het Gat van Schiermonnikoog en de aanwezigheid, locatie en diepte van de Glinder wordt bepaald door de balans tussen de hoofdgeulen in het bekken. Met de ontwikkeling van het Binnenplaatgat verandert de stroomrichting over het drempelgebied waarin de Glinder ligt. Het Gat van Schiermonnikoog wordt niet meer gevoed vanuit de Zoutkamperlaag en de stroming parallel aan de Glinder verdwijnt en maakt plaats voor een waterbeweging van het Binnenplaatgat naar het zuiden, haaks op de huidige oriëntatie van de Glinder. Door een combinatie van deze

veranderende stroomrichting en buitenbochtafzettingen van het Gat van Schiermonnikoog en de Zoutkamperlaag is er sprake van toenemende sedimentatie in de Glinder.

Met het gedeeltelijk terugschuiven van het wantij stagneert de uitbreiding van het Brakzandstergat, en ook de Groote Siege trekt zich niet verder terug. De laatste jaren is dit gebied zowel in debieten als wat betreft morfologische ontwikkeling betrekkelijk stabiel. In grote lijnen is een patroon te zien van opvulling aan de zuidzijde van het bekken en erosie aan de noordzijde.

Toekomstige ontwikkelingen en implicaties voor beheer

Het onderste paneel in Figuur 5-1 schetst de verwachte morfologische ontwikkeling in de komende jaren tot decennia. Gezien de huidige trends in de debieten en natte volumes is de verwachting dat het Binnenplaatgat een steeds groter gedeelte van het debiet van de Zoutkamperlaag over gaat nemen. Dit heeft grote gevolgen voor de bevaarbaarheid van de Zoutkamperlaag, alsmede van de beschouwde knelpunten.

Indien de Zoutkamperlaag haar functie als hoofdgeul verliest wordt verwacht dat de debieten verder af zullen nemen. Met een afnemend debiet is het waarschijnlijk dat de huidige ontwikkelingen van drempelvorming, vorming van eb- en vloedcharen, verzanding en uitbochting, worden versterkt. Dit zal leiden tot een toename van baggerbezwaar nabij Lauwersoog.

In het zuiden van het bekken, waar de watertoevoer afneemt en de laatste jaren sprake is van sedimentatie, wordt een verdere terugtrekking verwacht. Echter kan een mogelijke doorbraak van het Binnenplaatgat als hoofdgeul grote effecten hebben op de watertoevoer naar deze gebieden. Op langere termijn hangt de ontwikkeling van deze deelgebieden af van de grote schaal ontwikkelingen van het bekken.

Als bovenstaande verwachting uitkomt zou het Friesche Zeegat veel overeenkomsten vertonen met het westelijker gelegen Amelandse Zeegat (Oost & Cleveringa, 2017). Beide systemen hebben dan een dominante geul in het oosten van het Zeegat (Borndiep/Binnenplaatgat) met een secundaire geul in het westen (Boschgat/Zoutkamperlaag). Deze gelijkenis is het gevolg van het feit dat beide getijsystemen worden gekenmerkt door een bekken met een relatief oostelijk zwaartepunt met vergelijkbare afmetingen.

Op de buitendelta is het meest waarschijnlijke scenario dat het Westgat verder oostwaarts migreert en aanhaakt op het Binnenplaatgat. Dit zal afwatering via het Binnenplaatgat verder faciliteren. Echter kan op langere termijn het cyclisch gedrag van de buitendelta effect hebben op de ontwikkelingen in het bekken. Sinds de afsluiting is de uitstroom steeds verder richting het oosten gemigreerd. Indien het cyclisch gedrag wordt hervat is het mogelijk dat er op termijn weer een nieuwe geul richting westen ontstaat (Elias & Oost, 2021).

Glinder

Er worden in de komende jaren tot decennia grote morfologische veranderingen rondom de Glinder verwacht, gestuurd door de grotere schaal ontwikkelingen in het bekken. Het is te verwachten dat de stroming over de drempel vanuit het Binnenplaatgat richting het zuiden (Zoutkamperlaag) zal toenemen. Deze stroming staat haaks op de huidige oriëntatie van de Glinder. Zonder ingrepen zal de Glinder in haar huidige vorm steeds verder dichtslibben, wat zou leiden tot een toename van het baggeronderhoud. De nieuwe stroomrichting is echter in lijn met de richting van de ingreep die is gepland op basis van het onderzoek door Arcadis (Lenstra, 2023). Het is te verwachten dat deze ingreep op termijn het baggerbezwaar zal verlagen, omdat de noordwest-zuidoost gerichte stroming door groei van het Binnenplaatgat verder toe zal nemen.

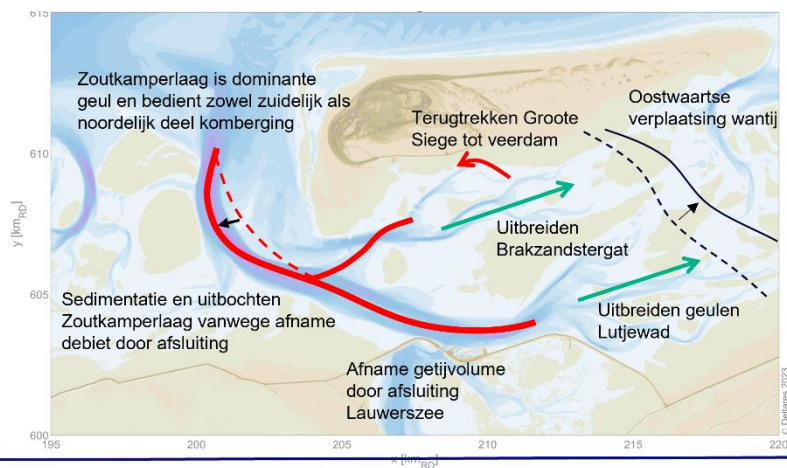
Een toename van deze stroming kan mogelijk leiden tot een doorbraak over de drempel rondom de Glinder. In andere woorden: er kan op de locatie van de drempel een nieuwe geul ontstaan die het Binnenplaatgat met de Zoutkamperlaag verbindt. Indien dit gebeurt zal het baggeronderhoud bij dit knelpunt nog verder afnemen.

Een doorbraak van dit drempelgebied hangt sterk samen met de continue verzanding (smaller en ondieper) en uitbochting van het zeewaartse gedeelte van de Zoutkamperlaag waarbij beide morfologische processen elkaar zullen versterken. In het geval van een doorbraak zal een afname van het baggerbezwaar rondom de Glinder dus gepaard gaan met een toenemende onderhoudsvraag in de Zoutkamperlaag.

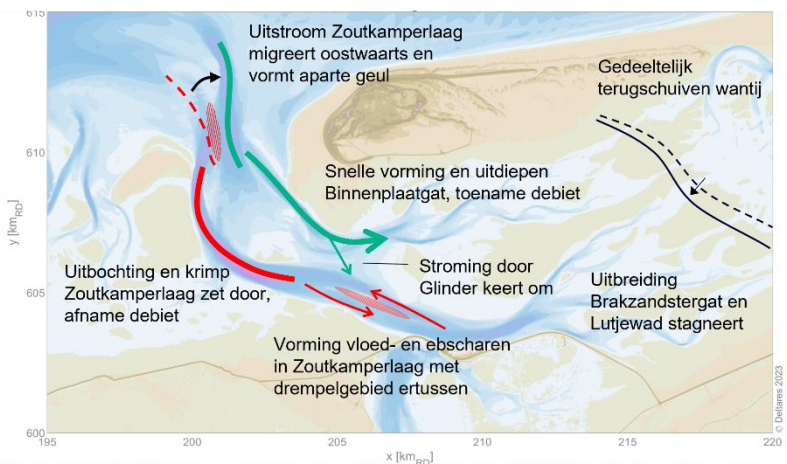
Groote Siege

Met de huidige trends in erosie/sedimentatie en getijvolumes van de geulsystemen dieper in het bekken is het waarschijnlijk dat het noordelijk deel van het bekken (Brakzandstergat / Groote Siege) de komende jaren stabiel blijft. Tot 2000 nam de natte inhoud van dit gebied toe, maar deze trend is de laatste 20 jaar gestagneerd. Zowel de Groote Siege als het Brakzandstergat zijn sinds 2005 qua omvang en diepte betrekkelijk stabiel. Ook het debiet door deze geulen en door het Gat van Schiermonnikoog, dat deze gebieden voedt, is in de modelberekeningen constant. De verwachting is dat de baggervolumes hier in de nabije toekomst stabiel blijven. Het is wel belangrijk om de watertoevoer naar dit gebied door het Gat van Schiermonnikoog scherp in de gaten te houden. Een veranderende balans tussen de Zoutkamperlaag en het Binnenplaatgat kan in de toekomst effect hebben op deze debieten.

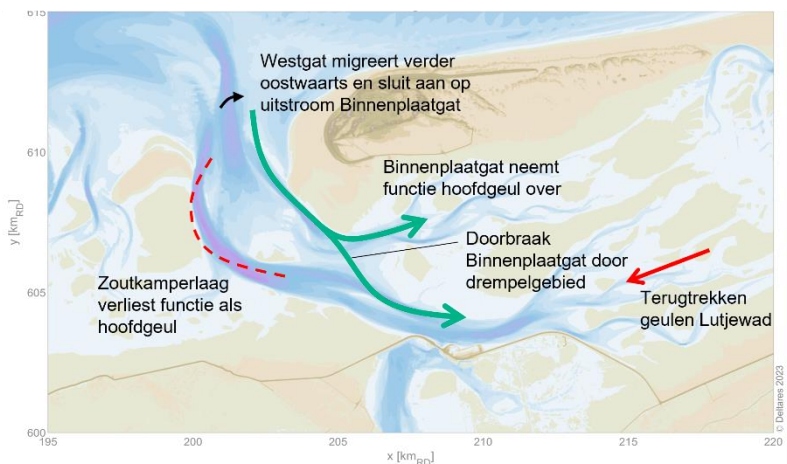
Gevolgen afsluiting: 1970 - 1995



1995 - heden



Verwachte toekomstige ontwikkeling



Figuur 5-1 Conceptueel model van de ontwikkeling van het getijdebekken Zoutkamperlaag. Groene lijnen geven vormende en uitbreidende geulen weer, rode lijnen krimpende/terugtrekkende geulen.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De vaarweg Lauwersoog-Schiermonnikoog kent een aantal knelpunten, d.w.z. locaties waar de morfologische ontwikkeling leidt tot (toenemend) baggerbezwaar. Deze knelpuntanalyse beschouwt de knelpunten van de Glinder en de Groote Siege. De morfologische ontwikkelingen van deze knelpunten spelen zich af op relatief korte tijd- en ruimteschalen (jaren, kilometers). Deze ontwikkelingen worden gestuurd door veranderingen op grotere tijd- en ruimteschalen.

Grote tijd- en ruimteschaal: veranderende balans in het hoofdgeulensysteem

Het bekken bevindt zich in een overgangssituatie waarbij het Binnenplaatgat in omvang en debiet toeneemt en de Zoutkamperlaag steeds kleiner wordt, meer gaat meanderen en sedimenteert. Deze ontwikkeling wordt deels gestuurd door de gevolgen van de afsluiting van de Lauwerszee. Met de afsluiting nam het getijprisma af en verschoof het zwaartepunt van het bekken van het zuiden naar het oosten. Het nieuw gevormde Binnenplaatgat ligt gunstiger dan de Zoutkamperlaag om onder deze nieuwe omstandigheden het bekken te bedienen.

De verwachting is dat de oostelijke geul (Binnenplaatgat) relatief dominanter wordt vergeleken met de huidige situatie. Bij de drempel in het zuidelijke gedeelte van de Zoutkamperlaag is momenteel geen onderhoud nodig, maar als de verzandende trend doorzet kan dit op termijn een knelpunt worden. Dit proces kan significant versnellen bij een doorbaak of andere grote systeemveranderingen, maar de gevolgen zijn nog onduidelijk. Het is nog onzeker hoe deze grootschalige morfologische verandering zich verder gaat ontwikkelen, d.w.z. of het Binnenplaatgat de functie van de Zoutkamperlaag geheel gaat overnemen of dat er een tweegeulensysteem ontstaat. Het is van belang de morfologische ontwikkeling goed te blijven monitoren.

Glinder

De ontwikkeling van de drempel wordt sterk beïnvloed door de grootschalige ontwikkeling in het hele kombergingsgebied. Door een belangrijkere rol van het Binnenplaatgat ten opzichte van de Zoutkamperlaag oriënteert de Glinder zich nu meer op het Binnenplaatgat in plaats van voorheen de Zoutkamperlaag. De stroming over het drempelgebied is dan ook van richting veranderd ten opzichte van de situatie waarin de Zoutkamperlaag dominant(er) was.

De toekomstige ontwikkeling van de Glinder hangt nauw samen met de ontwikkeling van het Binnenplaatgat. Een mogelijke geuldoorbraak zal op termijn de bevaarbaarheid van de Glinder vergroten. Op korte termijn is de verwachting dat met de huidige oriëntatie de Glinder verder dicht zal slibben, vanwege de veranderde stroomrichting. De geplande ingreep over de drempel sluit beter aan bij de nieuwe stroomrichting en de verwachting is dat met deze ingreep het baggerbezwaar zal verminderen.

Groote Siege

Op basis van zowel morfologische trends als van gemodelleerde geuldebieten blijkt het noordelijke deel van het bekken (Brakzandstergat / Groote Siege) momenteel stabiel, terwijl het zuidelijke deel (zuidelijke Zoutkamperlaag / Lutjewad) een terugtrekking vertoont. Hypsometrische curves en erosie-sedimentatieplots laten zien dat de natte inhoud van het noordelijke deel tot 2000 toenam maar deze trend de laatste 20 jaar is gestagneerd.

Uit de morfologische analyse is gebleken dat de geulvolumes en de doorsnedes van zowel de Groote Siege als het Brakzandstergat sinds 2005 betrekkelijk stabiel zijn. Daarnaast vertonen de berekende debieten ook geen grote veranderingen in de afgelopen tientallen jaren. De verwachting is dat de Groote Siege qua onderhoudsbehoefte stabiel zal blijven. Tenzij op grotere schaal morfologische veranderingen plaatsvinden, zoals het doorbreken van de drempel rondom de Glinder, worden hier ook geen grote significante morfologische veranderingen verwacht.

6.2 Aanbevelingen vervolgonderzoek Friesche Zeegat

Monitoringsbehoefte

Uit de knelpuntanalyse is gebleken dat op dit moment in het bekken grote verschuivingen in het hoofdgeulensysteem gaande zijn. Deze ontwikkelingen beïnvloeden alle drie de knelpunten, zij het op verschillende wijze. Om grip te krijgen op deze veranderende dynamiek is de monitoringsbehoefte verdeeld in twee schaalniveaus.

- Schaal van het bekken: De balans tussen de Zoutkamperlaag en het Binnenplaatgat dient nauwlettend in de gaten gehouden te worden. Deze grote systeemverandering is sturend voor alle andere ontwikkelingen in het bekken. Een belangrijke vraag is of de huidige trends (toenemende debieten in het Binnenplaatgat ten koste van de debieten door de Zoutkamperlaag) doorzetten. Debietmetingen in de Zoutkamperlaag en het Binnenplaatgat zouden hier waardevol bij zijn.
Om deze vraag te beantwoorden en inzicht te krijgen in lange termijn ontwikkelingen moeten ook de trends van volumeverandering in verschillende subgebieden van het bekken worden beschouwd. Op dit moment ontwikkelt het noordelijke deel (dat stabiel blijft) zich anders dan het zuidelijke deel, dat sedimentatie en terugtrekking kent. Deze volumeveranderingen geven een beeld van de verdeling van debieten in het bekken.
- Schaal van de individuele knelpunten:
 - o Het eerste gedeelte van de veerroute loopt na afvaart vanuit Lauwersoog door het zuidelijke deel van de Zoutkamperlaag. Dit stuk is momenteel geen knelpunt, maar in potentie kan dit het wel worden. De vereiste diepgang (NAP-5m) in dit stuk van de vaarroute is groter dan bij de Glinder en Groote Siege aangezien hier ook de vaarroute richting de Noordzee passeert. In deze knelpuntanalyse is niet gefocust op deze ontwikkelingen, maar er zijn wel aanwijzingen dat het een punt van aandacht is en er een monitoringsbehoefte is. De toekomstige morfologische ontwikkelingen van dit gedeelte van de vaarroute zijn lastig te voorspellen doordat het sterk samenhangt met andere ontwikkelingen. Deze complexiteit blijkt uit het feit dat de drempelvorming en verzanding hier samenhangen met onder andere de verzanding/uitbochting van het noordelijk deel Zoutkamperlaag, een eventuele doorbraak over de drempel rondom de Glinder, verschuiving wantij en ontwikkelingen Oort en het gebied rond Lutjewad gat. Een vervolgstudie specifiek gericht op het in kaart brengen van de hier spelende morfodynamica is ook aanbevolen, bijvoorbeeld door middel van data-analyse van het zuidelijke deel van het bekken, dat in deze studie niet is beschouwd.
 - o Ook de ontwikkeling van de Glinder na de geplande ingreep dient gemonitord te worden. Indien de huidige trend in stromingspatronen doorzet is de verwachting dat de onderhoudsbehoefte van deze nieuwe geul lager zal zijn dan die van de huidige Glinder. Door regelmatige beheerlodingen en registratie van baggerhoeveelheden kan gecontroleerd worden of de ingreep inderdaad het verwachte effect heeft.

Volumeveranderingen van deelgebieden in kaart brengen.

Voor een volledig beeld van de ontwikkelingen voor het hele bekken is het van belang de volumeveranderingen van de verschillende deelgebieden en het volledige bekken in kaart te brengen.

Door de volumeveranderingen van het noordelijke deel (Brakzandstergat – Groote Siege) en het zuidelijke deel (Lutjewad) apart te beschouwen kan de hypothese uit deze knelpuntanalyse – dat het noordelijke deel van de kombergings stabiel is terwijl het zuidelijke deel sedimentatie vertoont – worden getoetst.

Door de volumeveranderingen in het noordelijke en zuidelijke deel van het bekken bij elkaar op te tellen kan een beeld worden gevormd van de trend in het gehele kombergingsgebied. Deze kan worden vergeleken met de modelresultaten om te zien of de ontwikkeling van het kombergingsvolume voor het hele bekken overeenkomt met de afname van het getijprisma door het zeegat, zoals beschreven in paragraaf 3. Deze vergelijking geeft inzicht in de relatie tussen de veranderingen in het bekken en het effect op het getijprisma, wat belangrijk is voor het begrijpen en voorspellen van toekomstige morfologische veranderingen bij de knelpunten.

In een verdiepende analyse kunnen de ontwikkeling van de Groote Siege en het Brakzandstergat apart worden bekeken. Hierbij is het van belang om de grenzen tussen Groote Siege en Brakzandstergat met zorg vast te stellen, vooral in de periode waarin de Groote Siege zich terugtrok en het Brakzandstergat uitbreidde. Idealiter zou de afbakening van de Groote Siege gebaseerd moeten zijn op een stromingsmodel, zowel voor recente als oudere bodems. Dit zal een beter inzicht geven in de specifieke veranderingen die in elk van deze gebieden hebben plaatsgevonden en het effect van de concurrentie tussen de geulsystemen op de respectievelijke kombergings- en geulvolumes.

Verkennde morfologische modelberekeningen

Morfologische modelberekeningen in complexe kustsituaties geven vaak onbetrouwbare resultaten, zeker voor langere termijn (>5 jaar). Echter, voor korte termijn (1-2 jaar) kunnen ze een kwalitatieve indicatie geven van erosiepatronen en welke feedback er is bij een veranderende bodem.

Morfologische modelberekeningen kunnen helpen om meer zekerheid over de drempeldoorbraak rondom de Glinder te geven. Bovendien kunnen de effecten van drempelvorming in de Zoutkamperlaag op de vaarroute in kaart worden gebracht. Ten slotte zou de impact van toekomstige grootschalige veranderingen getoetst kunnen worden. Voorbeelden hiervan zijn verdere verschuivingen van het wantij, verdere verzanding Zoutkamperlaag in combinatie met groei Binnenplaatgat of eventueel zelfs van een doorbraak door de drempel bij de Glinder.

Het advies is om deze morfologische modelberekening uit te voeren zodra de nieuwe serie vaklodingen (2024-2025) beschikbaar zijn als input.

6.3 Aanbevelingen generieke aanpak knelpuntanalyse

Op basis van de inzichten uit voorliggende studie en de knelpuntanalyse hoogwaterroute Holwerd-Ameland hebben we de volgende aanbevelingen opgesteld voor toekomstige knelpuntanalyses.

- Allereerst wordt de grootschalige ontwikkeling van het bekken beschreven. Afhankelijk van de ontwikkelingen in een bekken kan deze beschrijving beknopt gehouden worden. Vanwege de grote veranderingen in het Friesche Zeegat (de afsluiting van de

Lauwerszee en de verschuiving tussen de Zoutkamperlaag en het Binnenplaatgat) is er hier voor gekozen deze grootschalige ontwikkeling van het bekken uitgebreider te beschouwen.

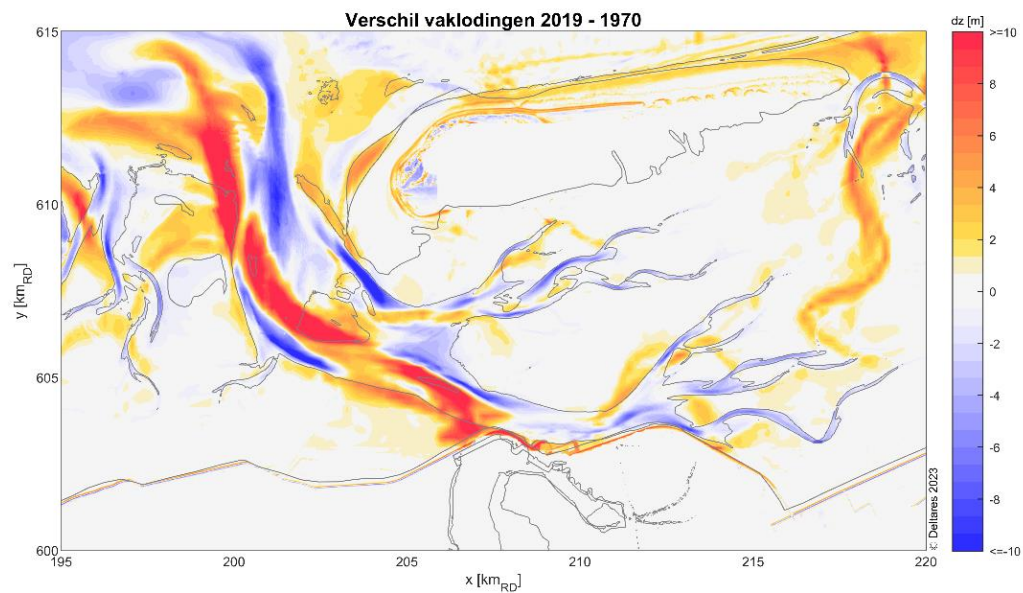
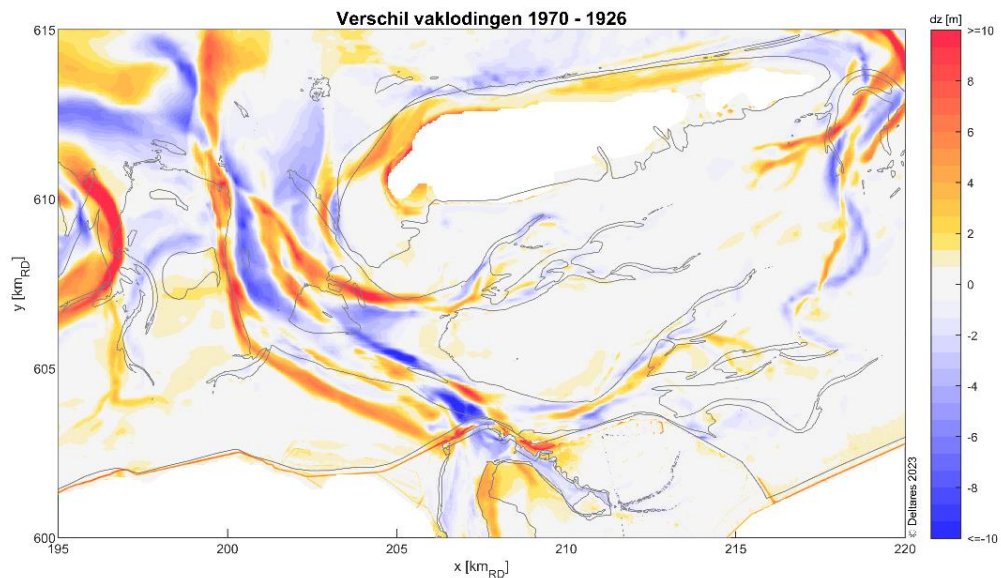
- Vervolgens wordt ingezoomd op morfologische ontwikkeling op kleinere schaal, d.w.z. de knelpunten en andere belangrijke geulen zoals de hoofdvaarroutes en geulen die de knelpunten voeden. In voorliggende studie kunnen de ontwikkelingen van Glinder en Groote Siege bijvoorbeeld niet los gezien worden van de ontwikkelingen van de Zoutkamperlaag en het Binnenplaatgat.
- De volgende visualisaties geven goed inzicht in de ontwikkeling van de geulen, met voorbeelden:
 - Ontwikkelingen van dwarsdoorsneden en natte volume in relevante geulen en op knelpunten. Voorbeelden zijn Figuur 2-8, Figuur 4-2, Figuur 4-10 en Figuur 4-11.
 - Ontwikkeling van dieptecontouren in verschillende jaren voor een beeld van verplaatsing van geulen. Voorbeelden hiervan zijn Figuur 2-7, Figuur 4-1 en Figuur 4-9.
 - Erosie-sedimentatiekaarten. Voorbeelden hiervan zijn Figuur 2-6 en Figuur 4-8.
 - Volumebalansen in verschillende deelgebieden om zo de ontwikkeling van het geulvolume en kombergingsvolume over tijd te kunnen volgen. Dit is gedaan bij de knelpuntanalyse hoogwaterroute Holwerd-Ameland. Deze analyse is hier niet uitgevoerd maar kan veel inzicht geven in de trends voor verschillende kombergingsgebieden.
- Het bepalen van stroomsnelheden en debieten door belangrijke geulen met behulp van een stromingsmodel is zowel in deze studie als bij de knelpuntanalyse Holwerd-Ameland erg waardevol geweest. De hydrodynamische simulaties helpen de morfologische ontwikkelingen te duiden en te verklaren. Door bodems voor verschillende jaren door te rekenen kunnen bovendien trends in debieten en veranderingen in stroomsnelheden- en stroomrichting worden gevonden, welke van groot belang zijn om uitspraken te kunnen doen over de verwachte toekomstige ontwikkeling van de knelpunten. In deze studie waren bijvoorbeeld de bevindingen over de ontwikkelingen in debieten tussen de Zoutkamperlaag en het Binnenplaatgat en de veranderende stroomrichting over het gebied van de Glinder van essentieel belang om de grotere schaal ontwikkelingen in het bekken te begrijpen.
- Een analyse van baggervolumes is waardevol om de ontwikkelingen in de knelpunten in kaart te brengen en als validatie voor de morfologische en hydrodynamische analyses die gedaan worden op basis van vaklodgingen en modelresultaten. Vooral in gebieden met snelle morfologische veranderingen waar veel gebaggerd wordt, zoals op het tracé Holwerd-Ameland geven baggervolumes en -locaties een waardevol inzicht in de ontwikkelingen.

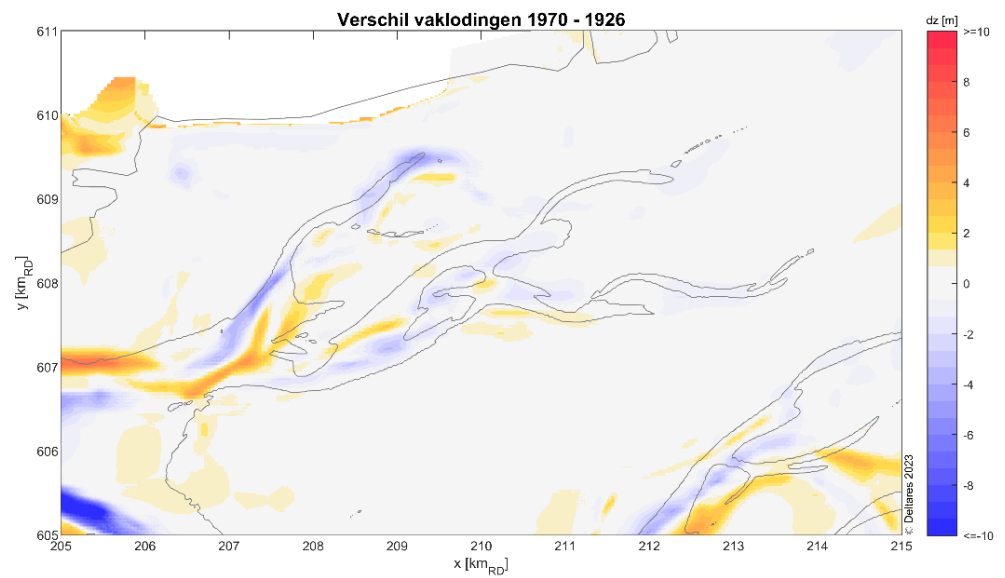
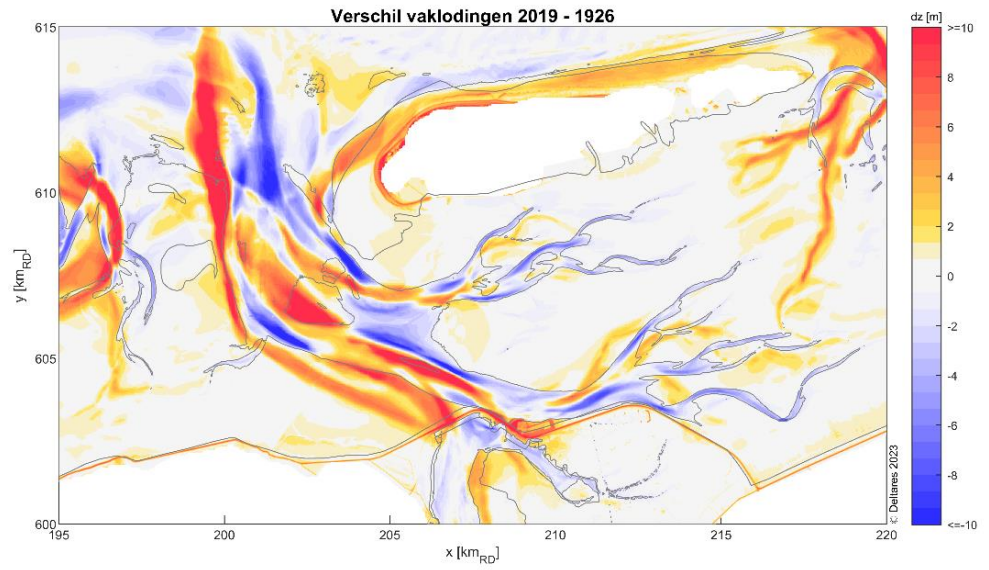
7 Bibliografie

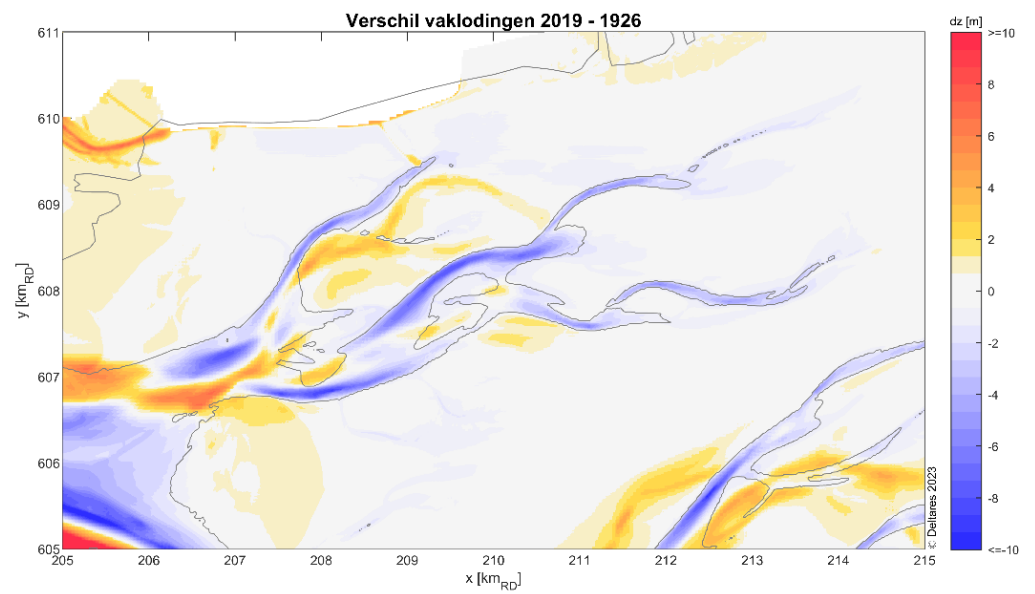
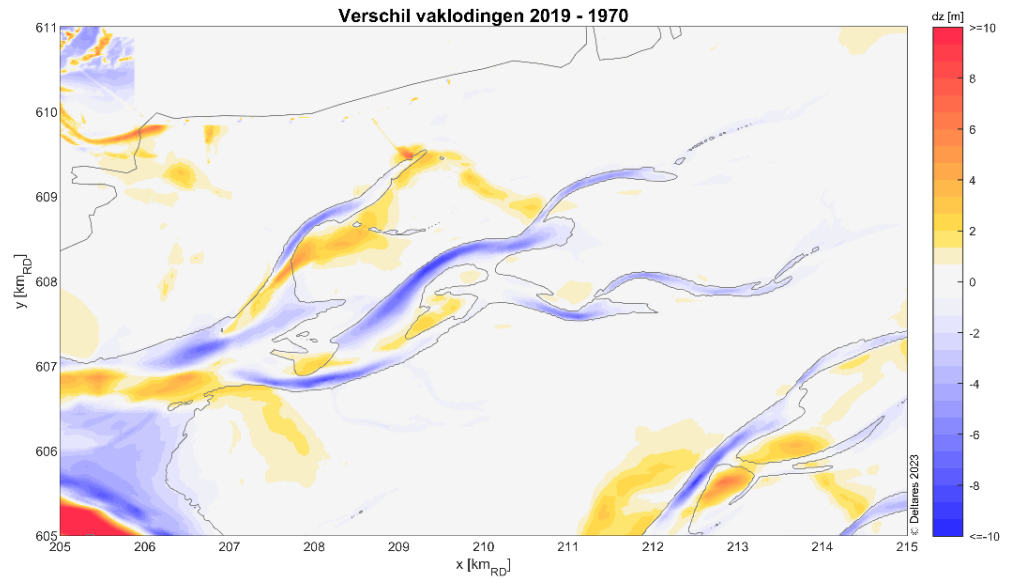
- Cleveringa, J., 2018. *Slibsedimentatie in de kwelders van de Waddenzee: bijdrage aan de kwantificering van sinks voor slib in de Waddenzee in het kader van project KRW Slib*, Zwolle: Arcadis.
- De Wit, L. & Mastbergen, D., 2022. *Registratie baggerwerkzaamheden in de Waddenzee*, Delft: Deltares.
- Elias, E., 2018. *Een actuele sedimentbalans van het Friesche Zeegat*. 11202190-000-ZKS-0017, Delft: Deltares.
- Elias, E. & Oost, A., 2021. *Morfologische processen van het Friesche Zeegat; een conceptueel model*. 11205236-003, Delft: Deltares.
- Lenstra, K., 2023. *Verkenning vaargeoptimalisatie Glinder*, Amersfoort: Arcadis Nederland B.V..
- Lenstra, K. J. H. & van der Vegt, M., 2021. The impact of sea-level rise and basin area reduction on the cyclic behavior of tidal inlet systems. *Continental Shelf Research*, Volume 214.
- Luiks, T., 2021. *De toekomstige bereikbaarheid van Schiermonnikoog*. MSc thesis, Groningen: Hanzehogeschool Groningen.
- Nederhoff, K., Smits, B. & Wang, Z. B., 2017. *KPP Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden: data analyse hypsometrie en getij*, Delft: Deltares.
- Oost, A. & Cleveringa, J., 2017. *Morfologie Kombergingsgebied Borndiep*, Delft: Deltares.
- Oost, A., Cleveringa, J. & Taal, M., 2020. *Kombergingsrapport Friesche Zeegat: Pinkegat en Zoutkamperlaag*. 11205229-001-ZKS-0002, Delft: Deltares.
- Oost, A., Cleveringa, J. & Taal, M., 2020. *Kombergingsrapport Friesche Zeegat: Pinkegat en Zoutkamperlaag*. 11205229-001-ZKS-0002, Delft: Deltares.
- Oost, A., Cleveringa, J. & Taal, M., 2020. *Kombergingsrapportage Friesche Zeegat: Pinkegat en Zoutkamperlaag*, 11205229-001-ZKS-0002, Delft: Deltares.
- Oost, A. P., 1995. *Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet: a study of the barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins*, Utrecht: Universiteit Utrecht, Faculteit Aardwetenschappen.
- Oost, A., Vermaas, T. & Vonhögen-Peeters, L., 2015. *Morfologische beschouwing ontwikkeling vaarweg buitendelta Zoutkamperlaag*. 1220040-002-ZKS-0015, Delft: Deltares.
- Postma, J. T. & Reenders, R., 1986. *Morfologische en hydraulische gevolgen van de afsluiting van de Lauwerszee voor het stroomgebied van het Friesche Zeegat en de vaarweg naar Lauwersoog in het bijzonder*, Delfzijl: Rijkswaterstaat Meet- en Adviesdienst. Nota 83-29.
- Van der Lugt, M., Cleveringa, J. & Wang, Z. B., 2020. *Integrale analyse morfologie Ameland-Oost*. Rapport 11203910-002-ZKS-0003, Delft: Deltares.
- Van der Vegt, H. & Cleveringa, J., 2022. *Dynamisch vaargeulbeheer Waddenzee*. Rapport 11208040-009-ZKS-0003, Delft, The Netherlands: Deltares.
- Van Veen, J., 1950. Eb- en Vloedschaar Systemen in de Nederlandse Getijwateren. *Tijdschrift Koninklijk Nederlansch Aardrijkskundig Genootschap*, Volume 67, pp. 303-326.
- Wang, Z. B., Louters, T. & de Vriend, H. J., 1995. Morphodynamic modelling for a tidal inlet in the Wadden Sea. *Marine Geology*, Volume 126, pp. 289 - 300.

A Bijlagen

A.1 Bodemliggingskaarten

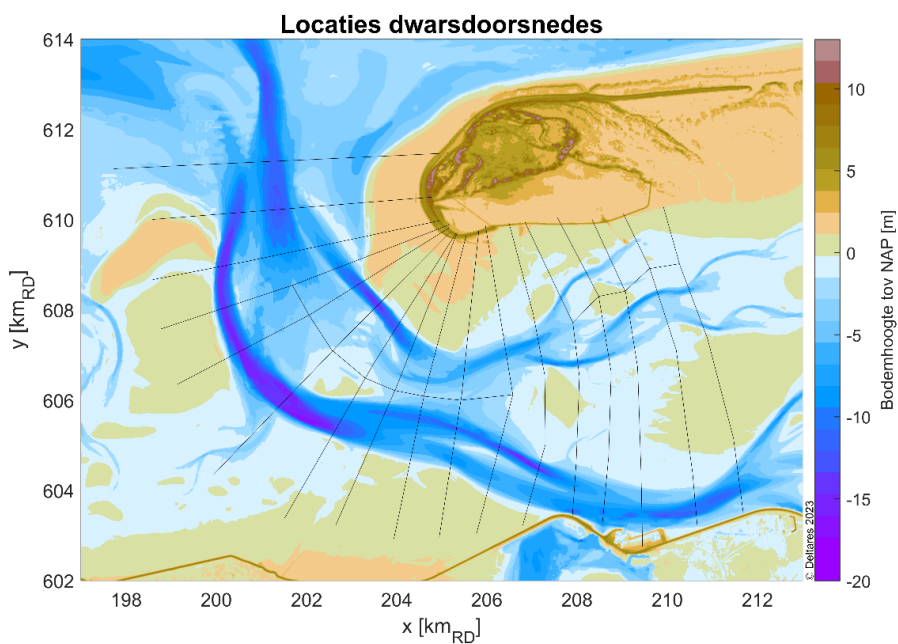






B Modelberekeningen

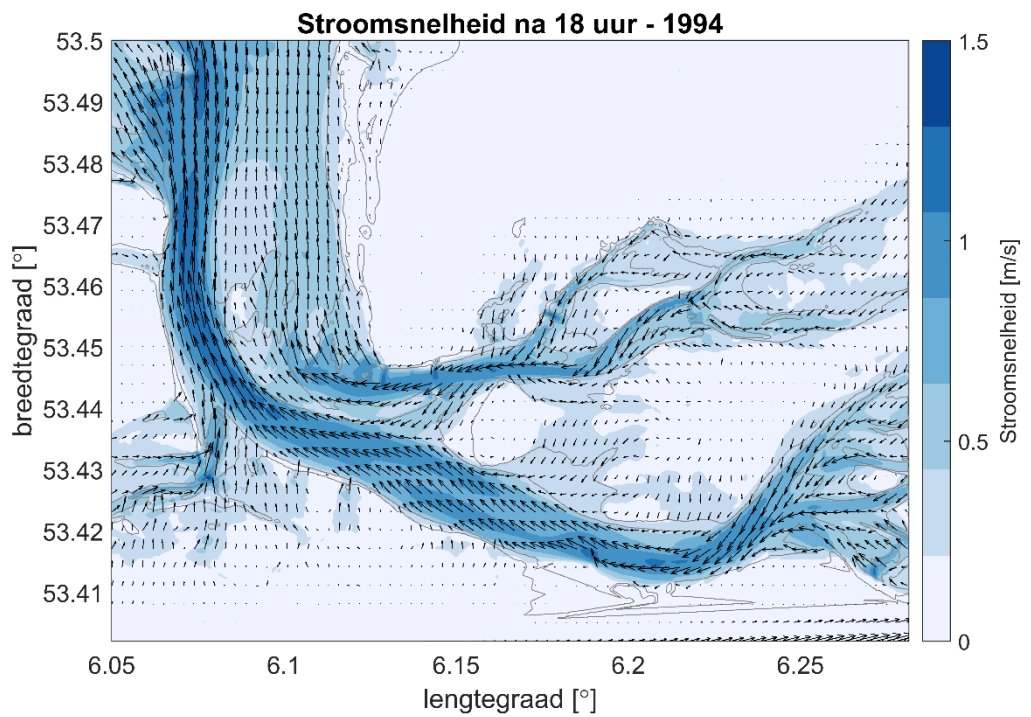
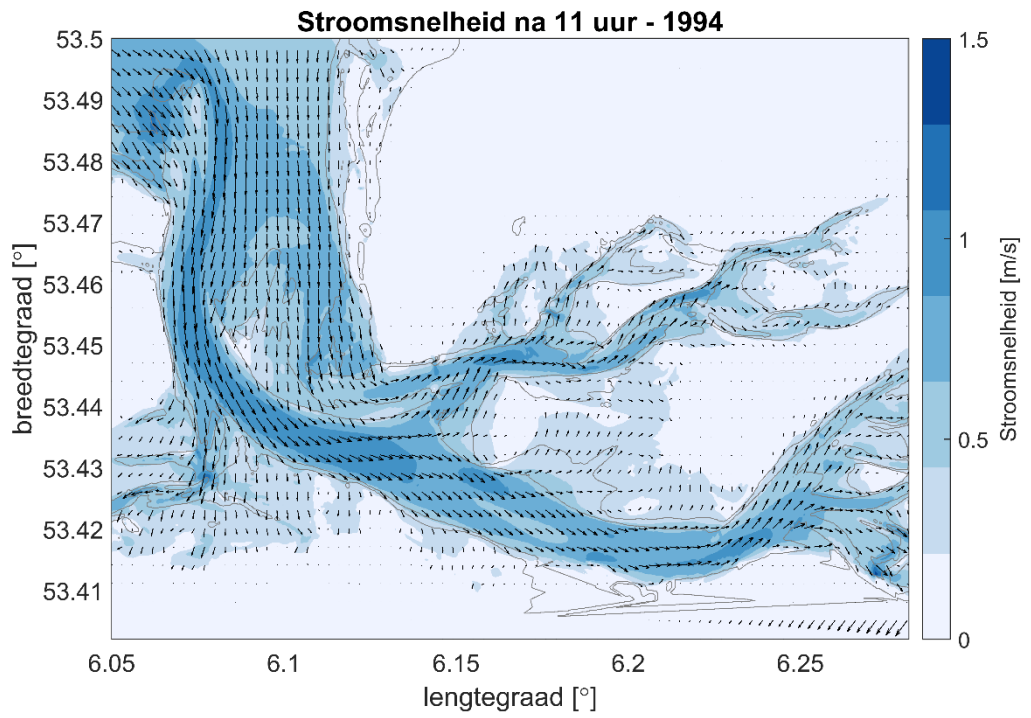
B.1 Locaties dwarsdoorsnedes

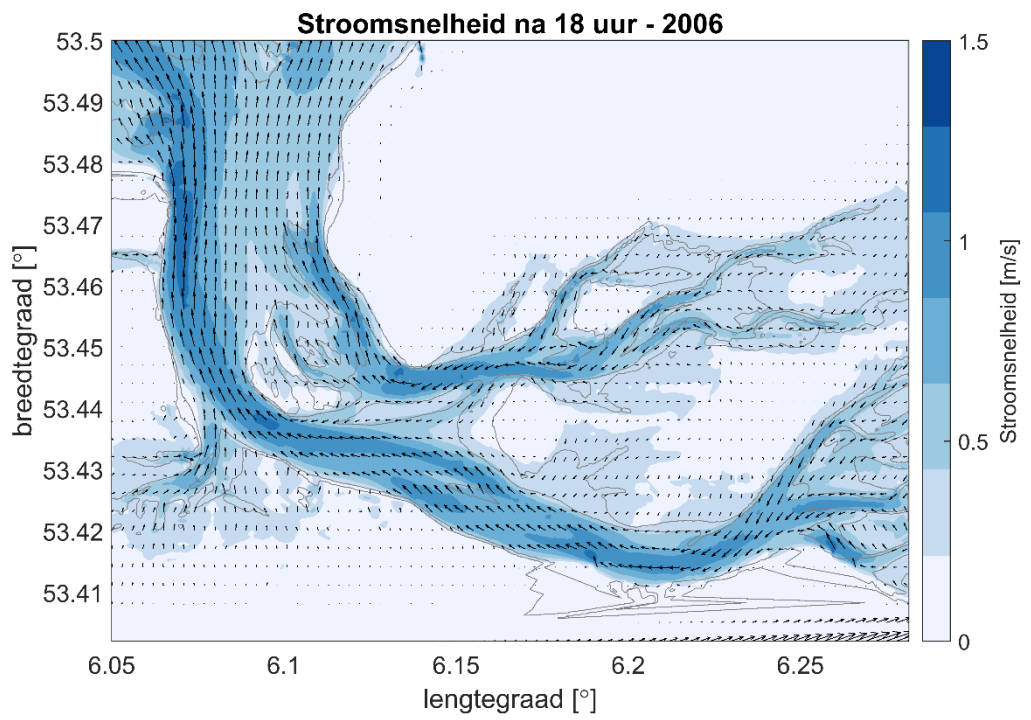
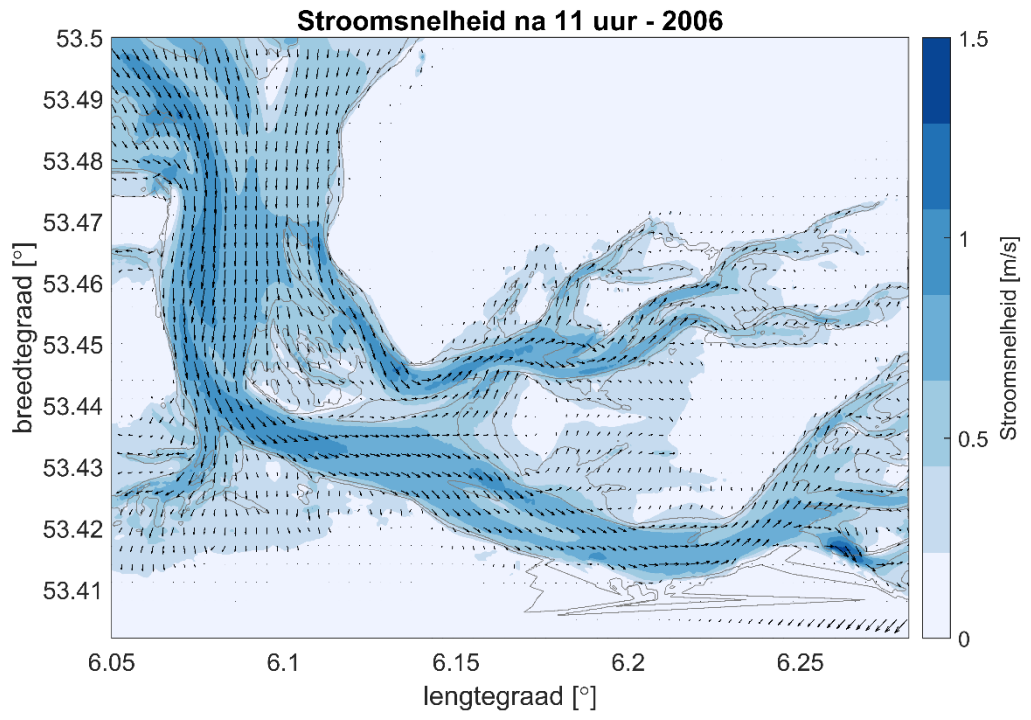


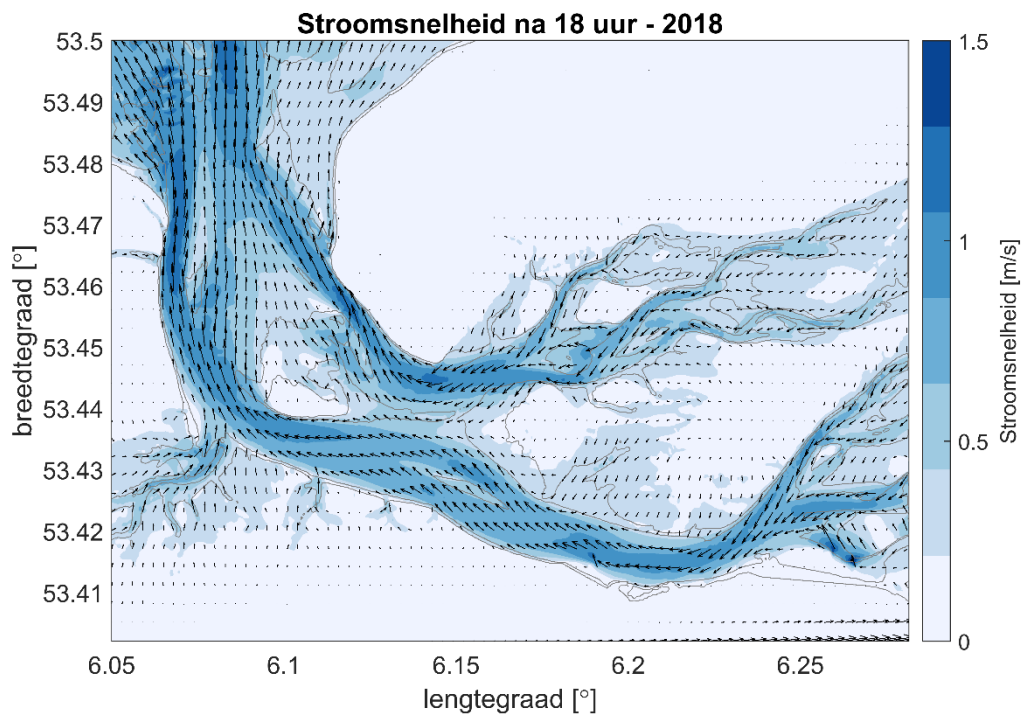
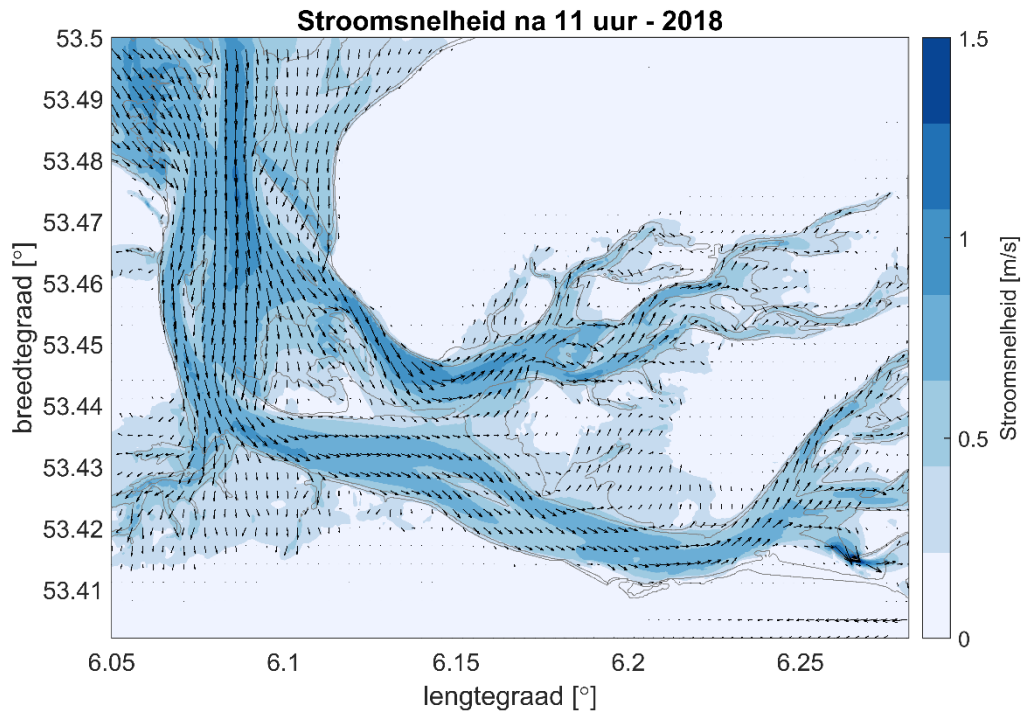
B.2 Stroomsnelheden

Onderstaande kaarten geven de stroomsnelheden die volgen uit het hydrodynamische model. De figuren met de stroomsnelheid na 11 uur geven de stroming tijdens maximum vloed; 18 uur geeft maximum eb weer.

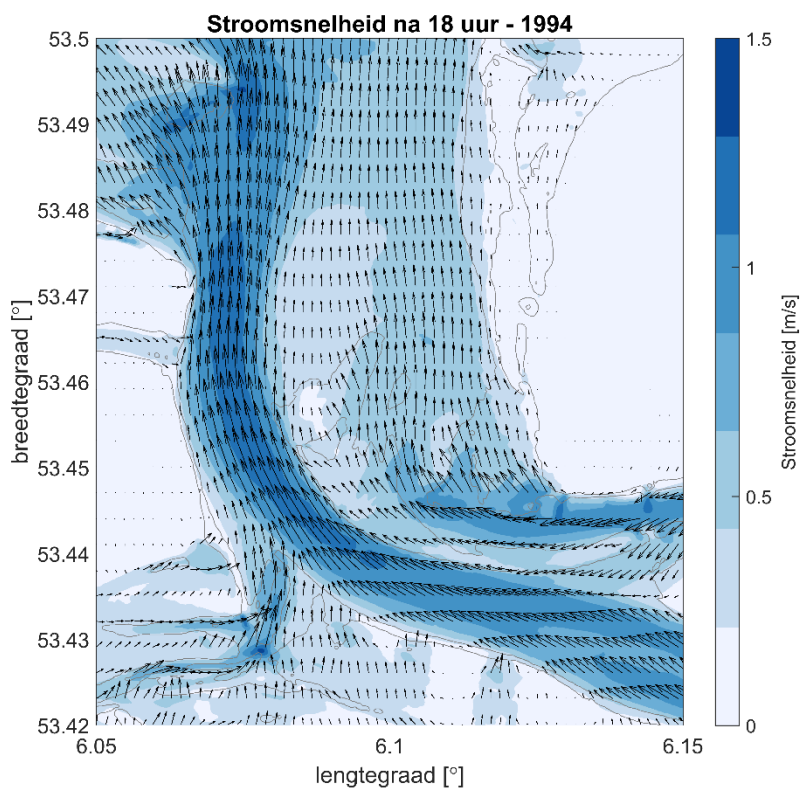
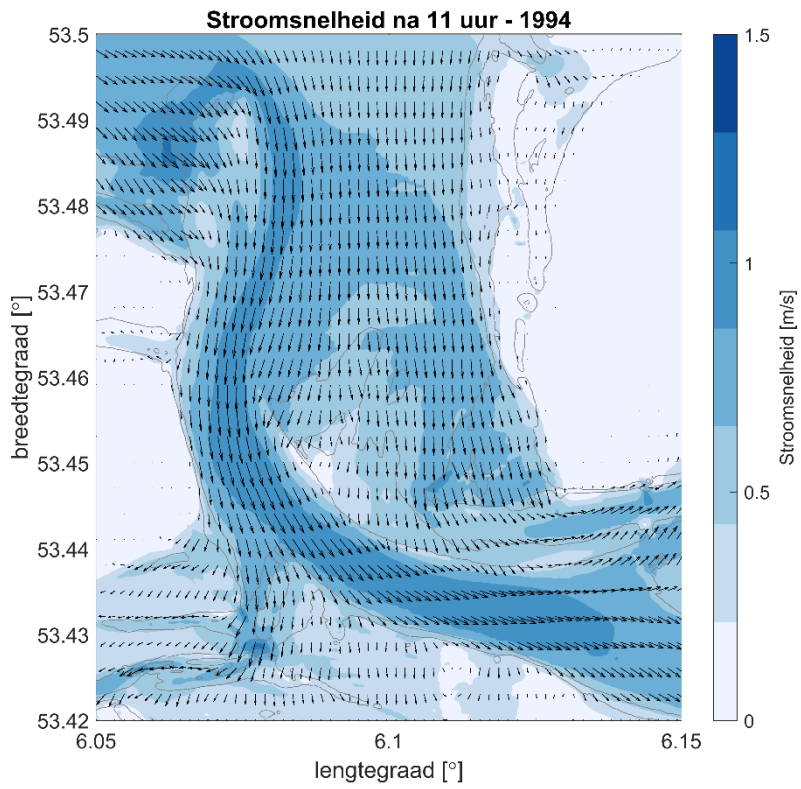
B.2.1 Volledige kombergingsgebied

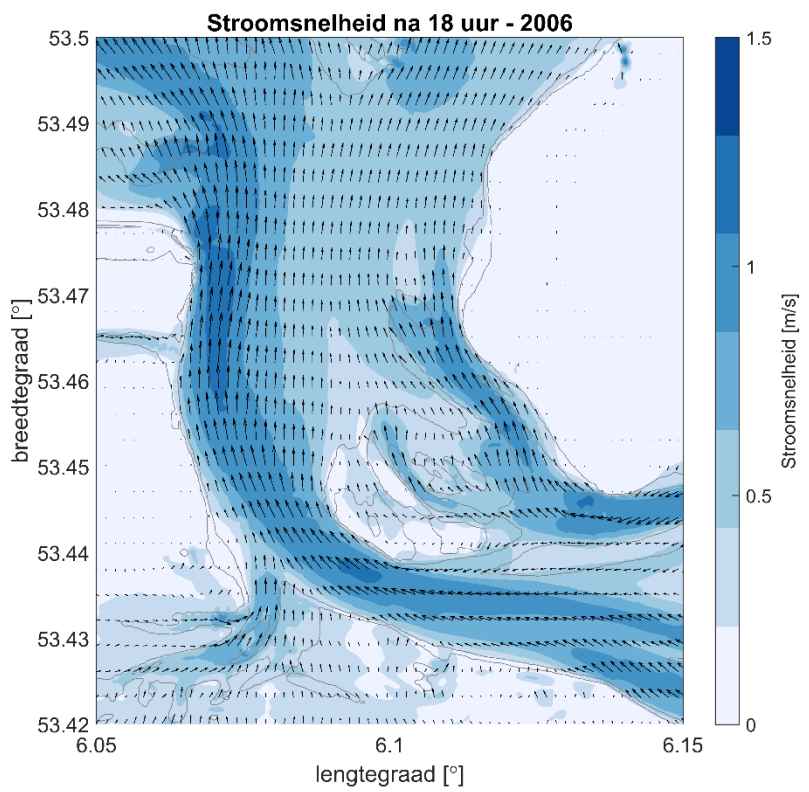
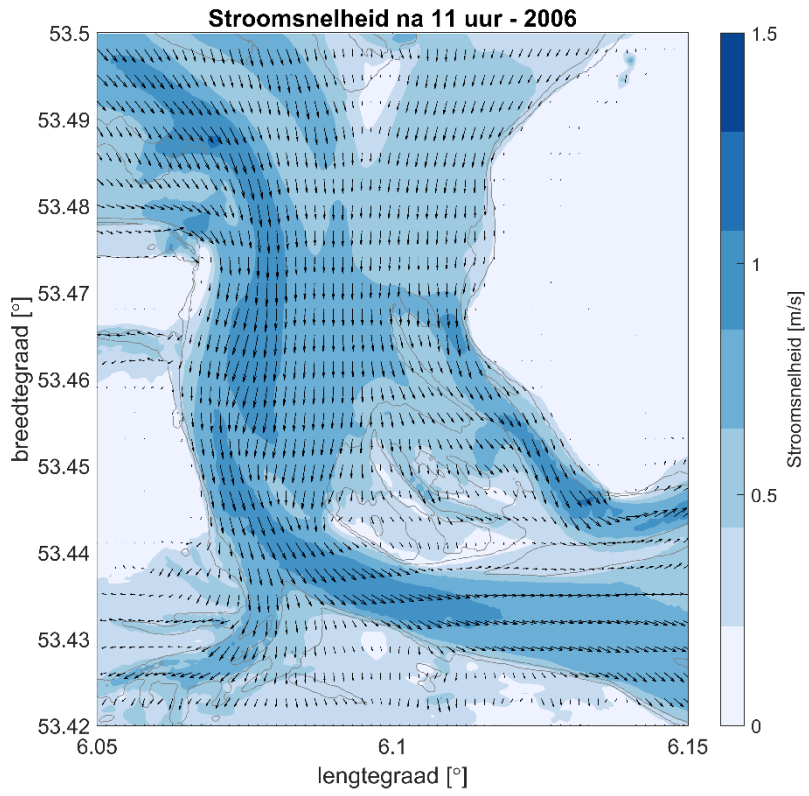


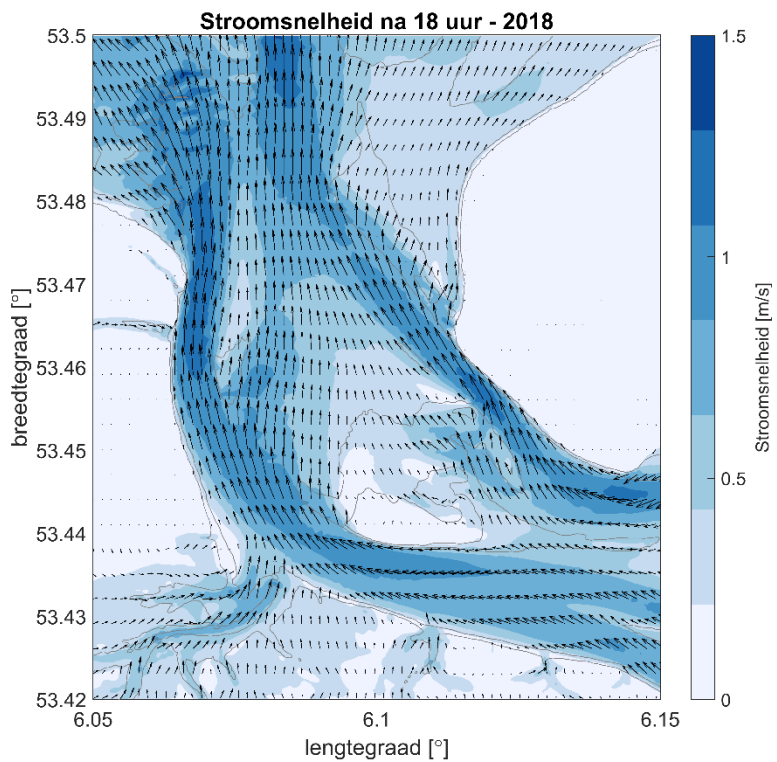
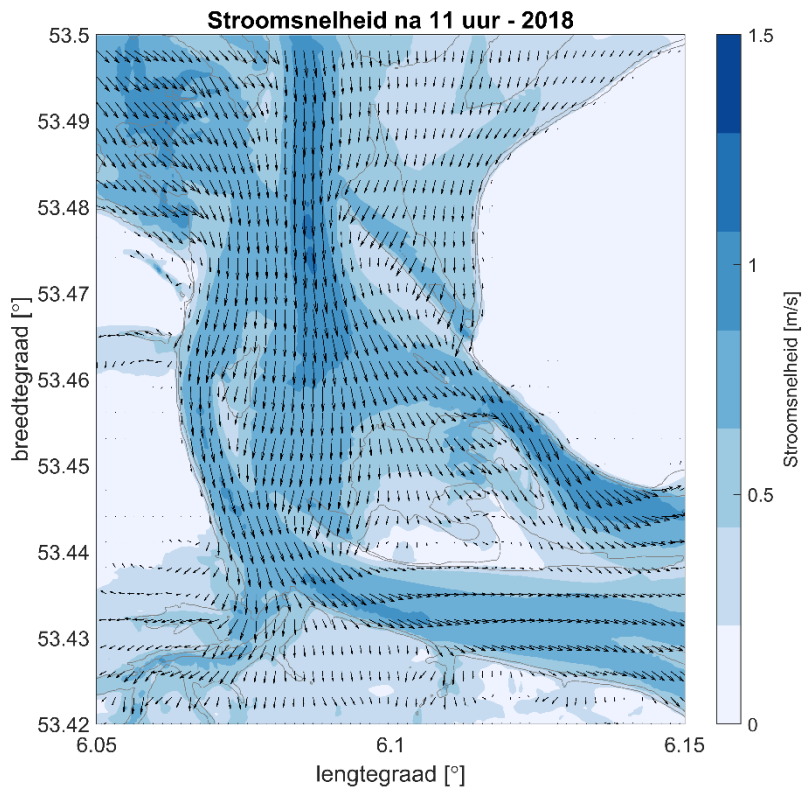


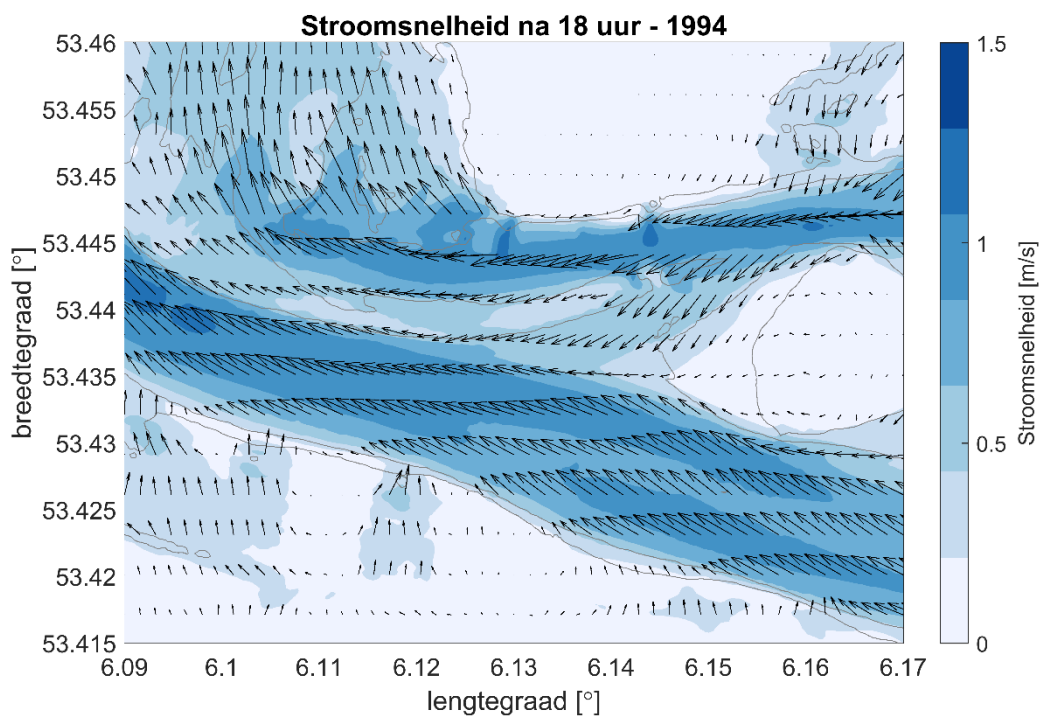
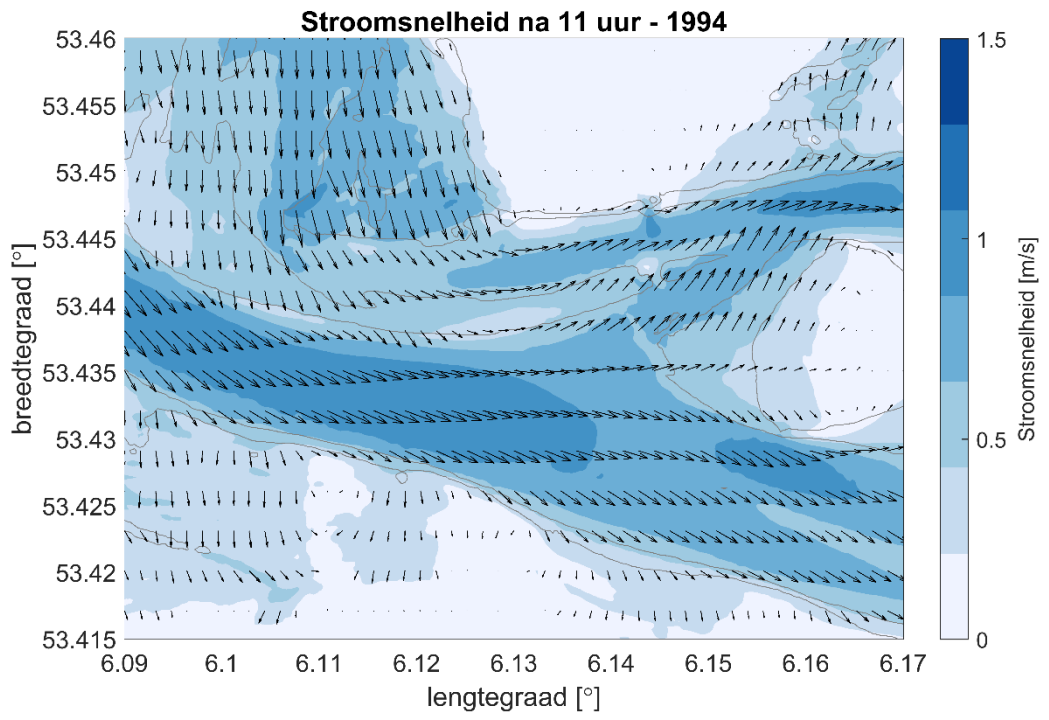


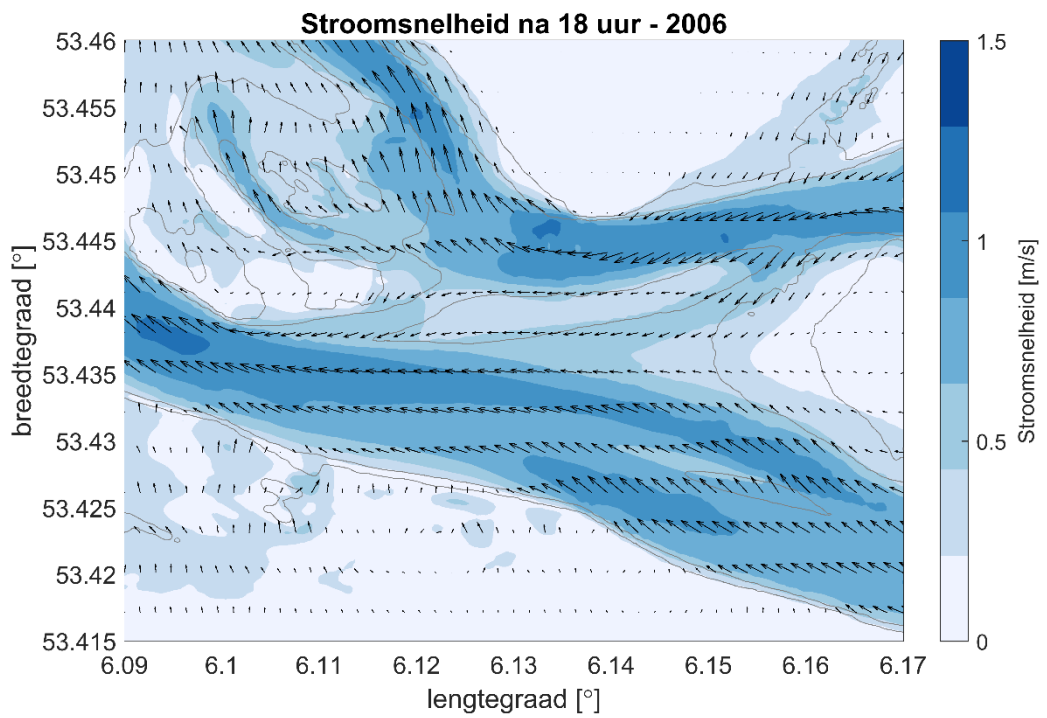
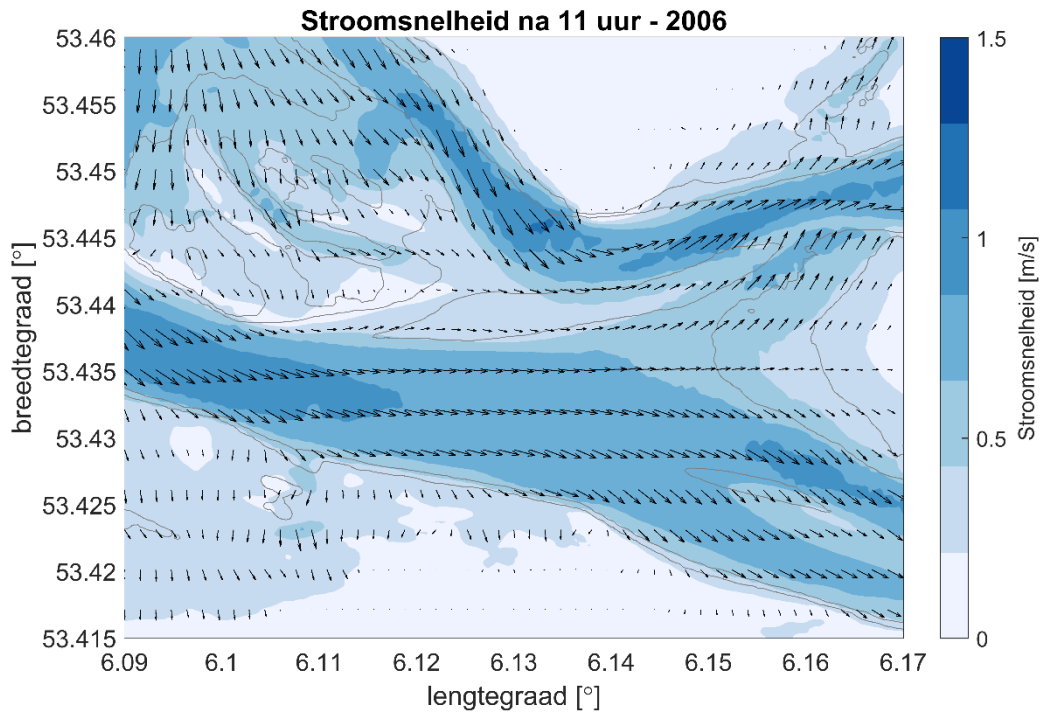
B.2.2 Zeegat

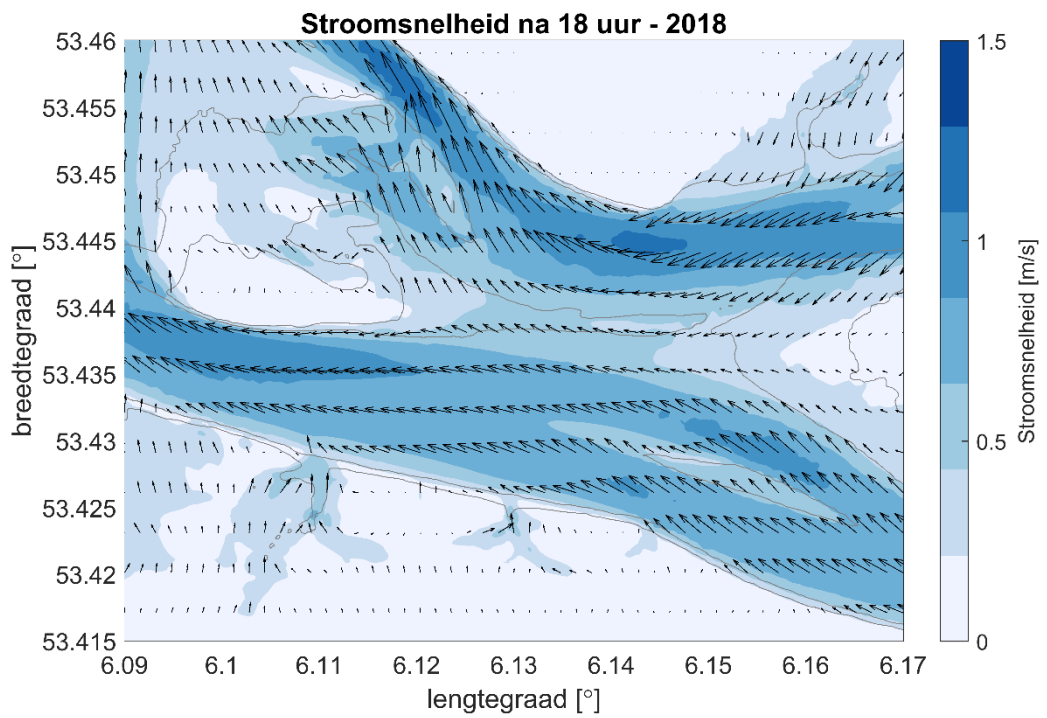
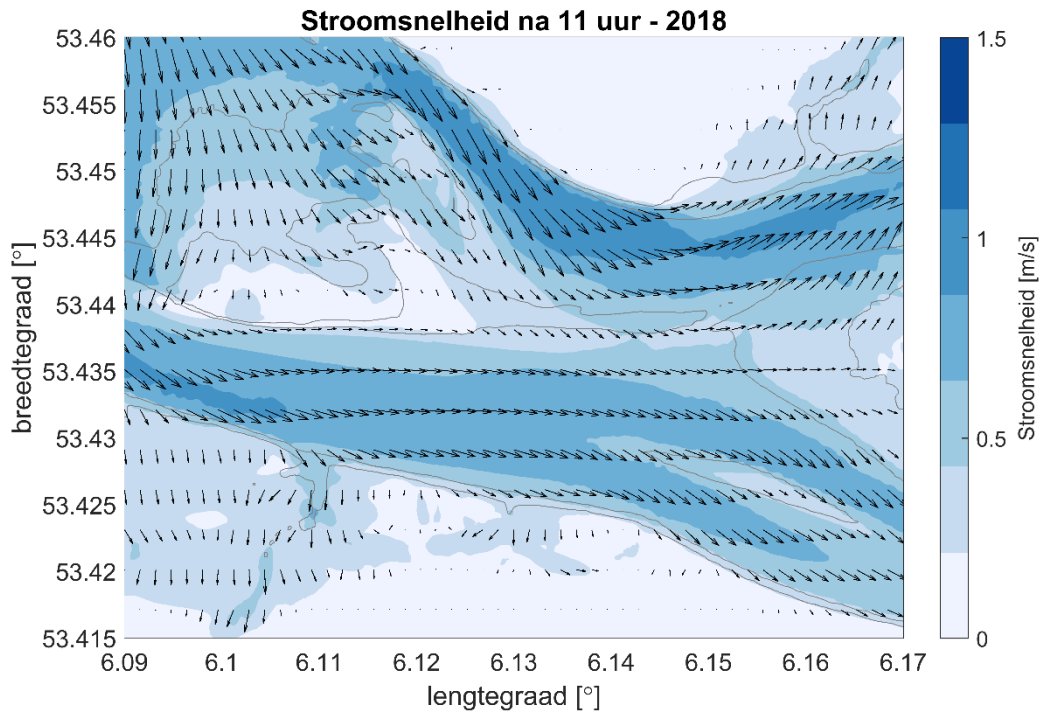


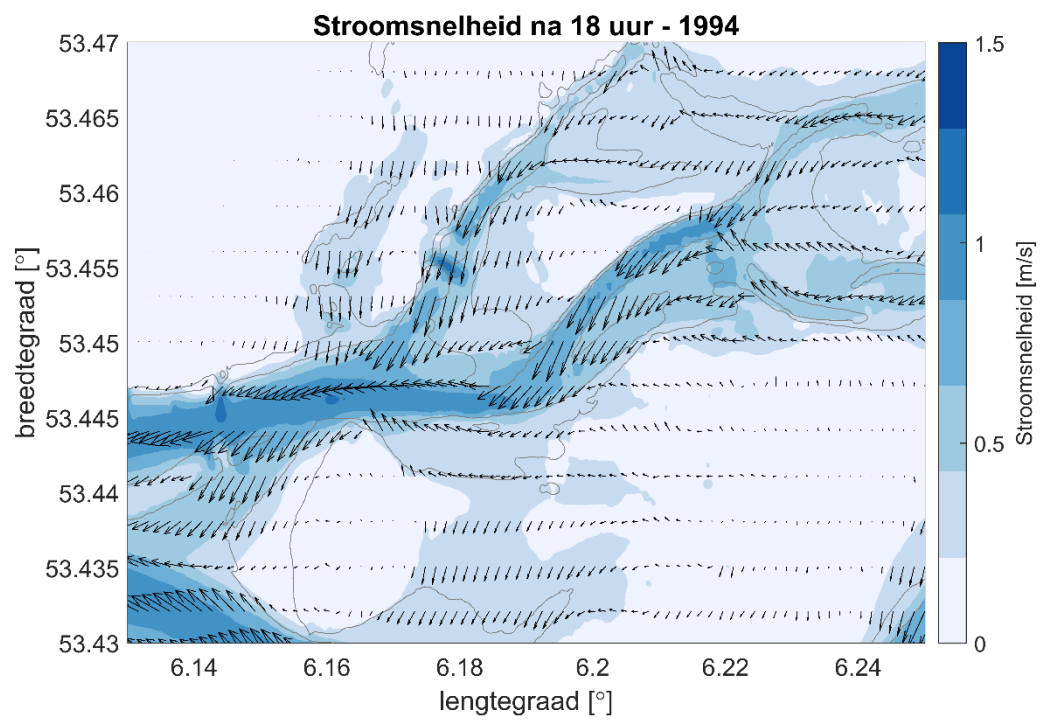
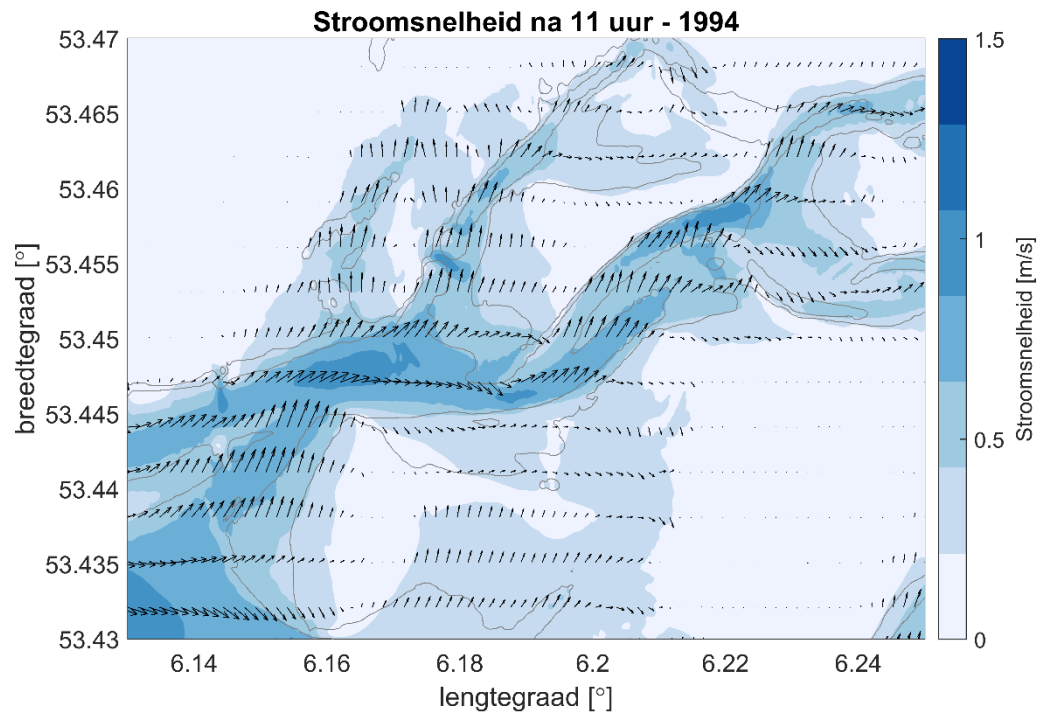


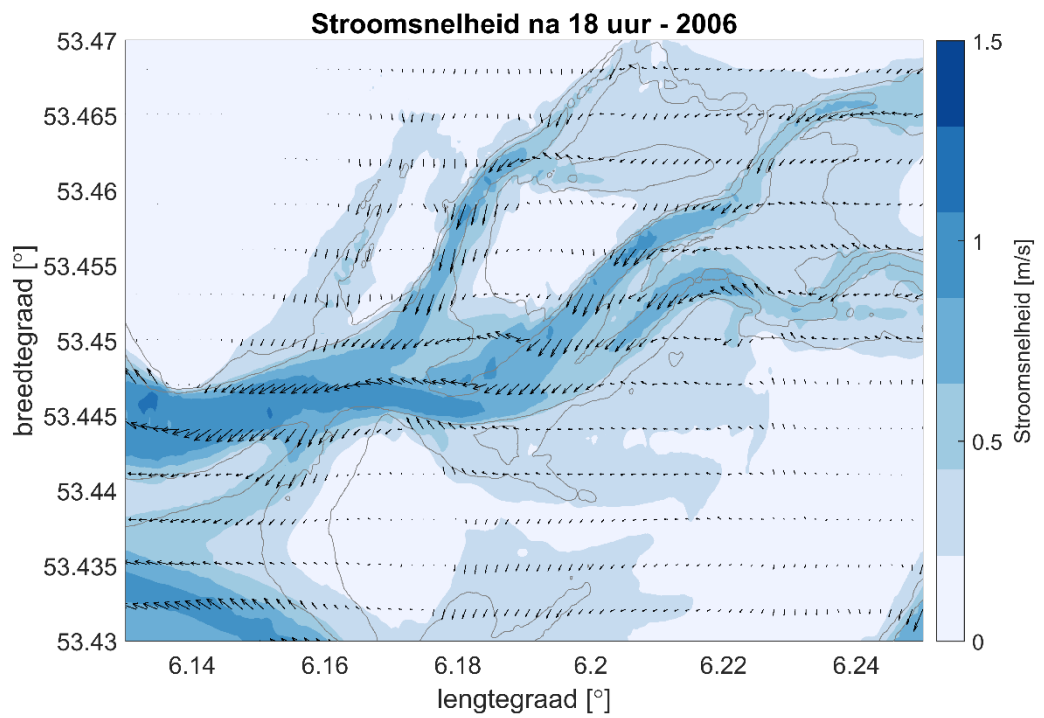
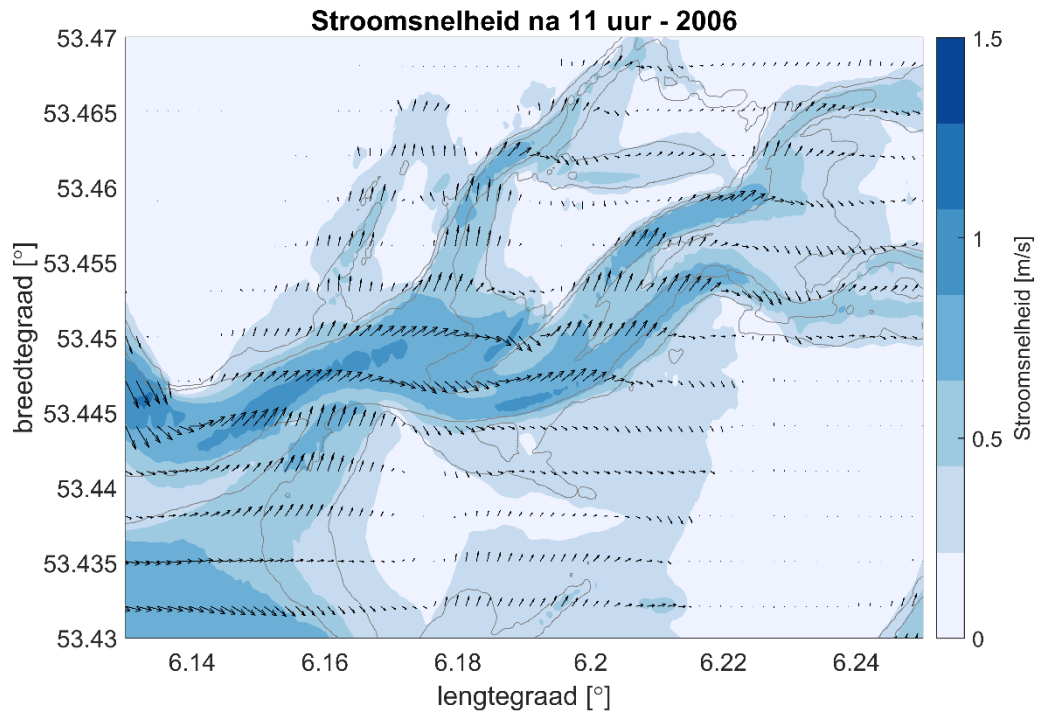


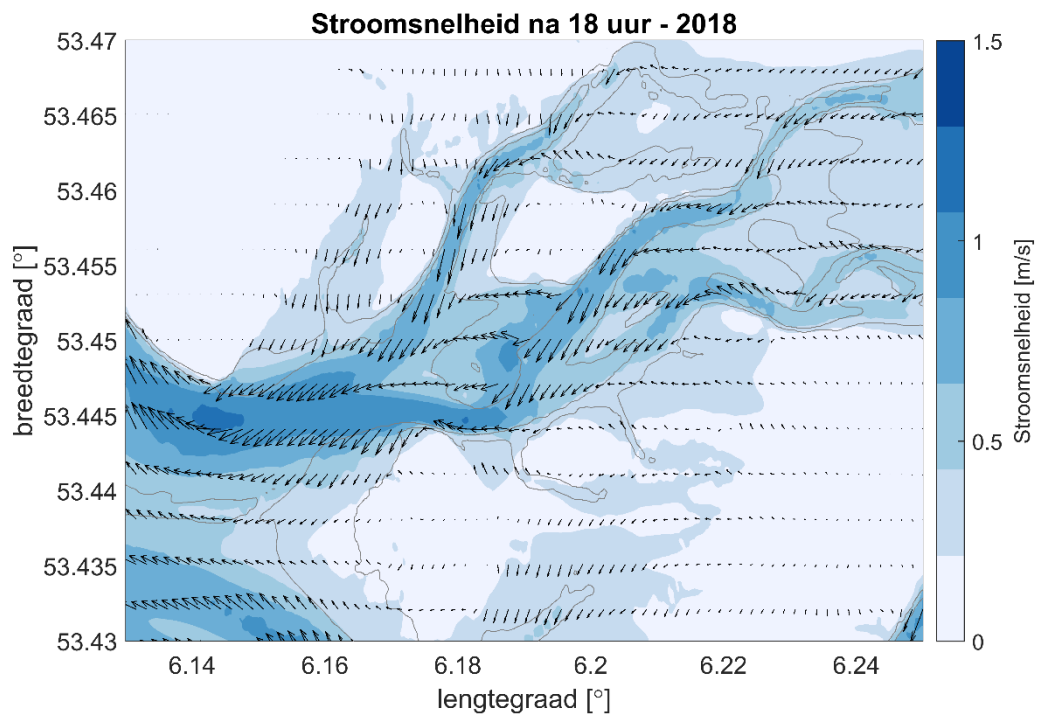
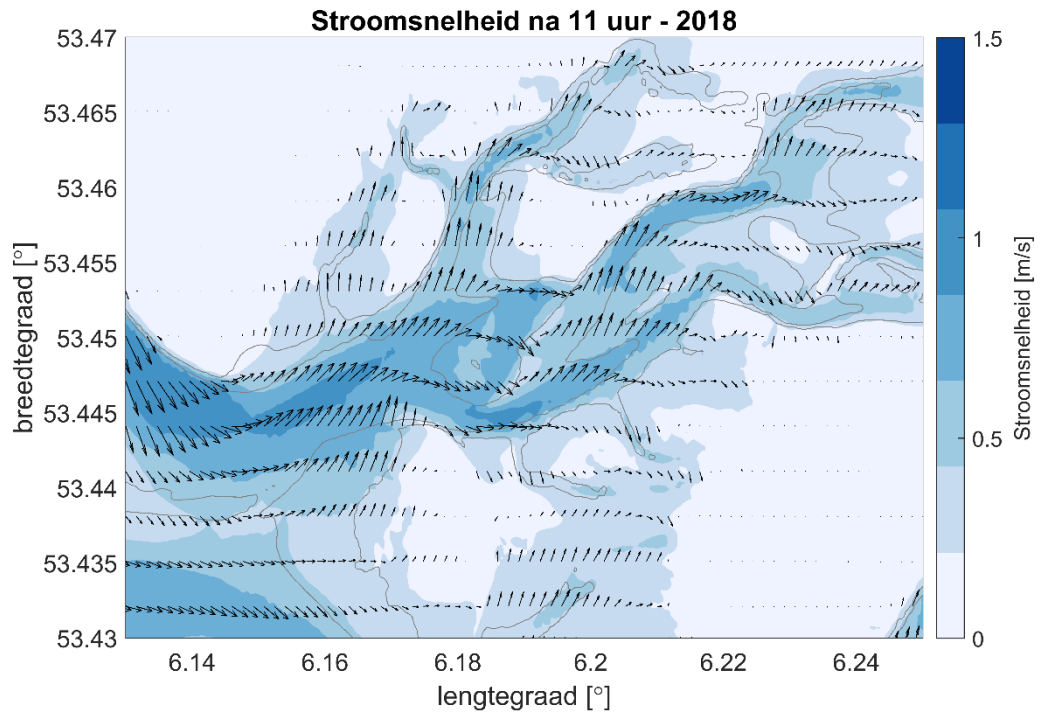






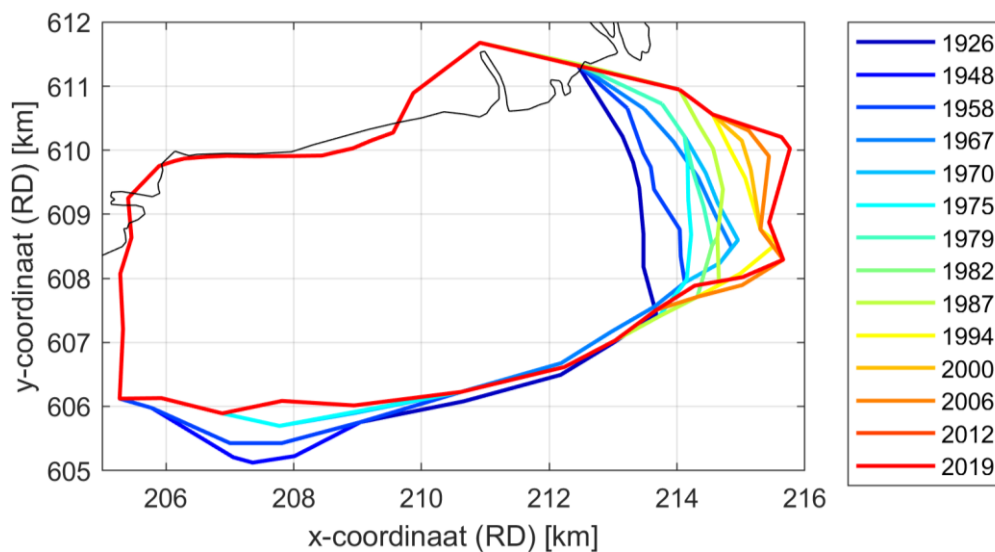




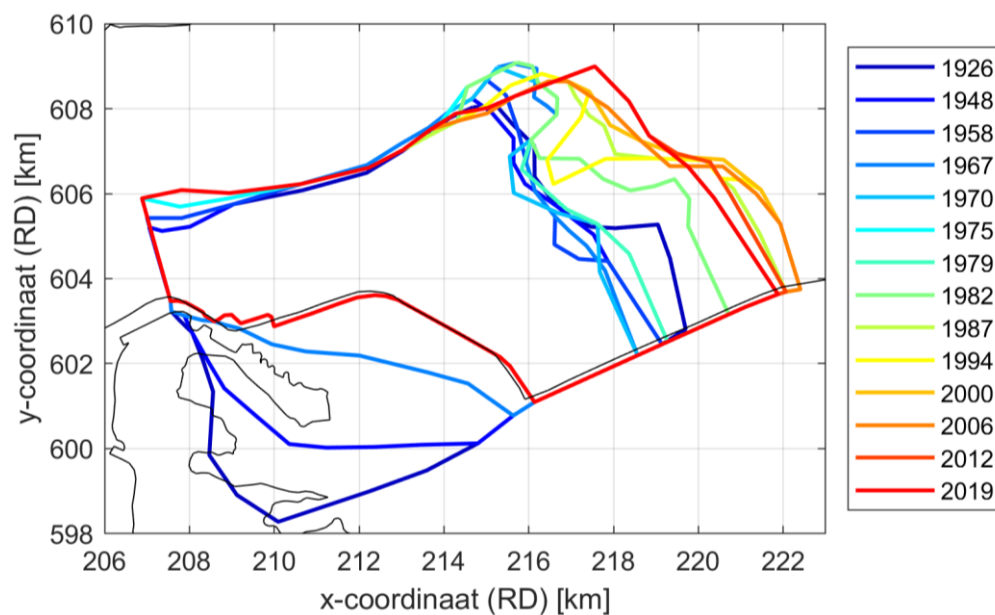


C Kombergingsvolume

C.1 Groote Siege en Brakzandstergat



C.2 Zoutkamperlaag



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