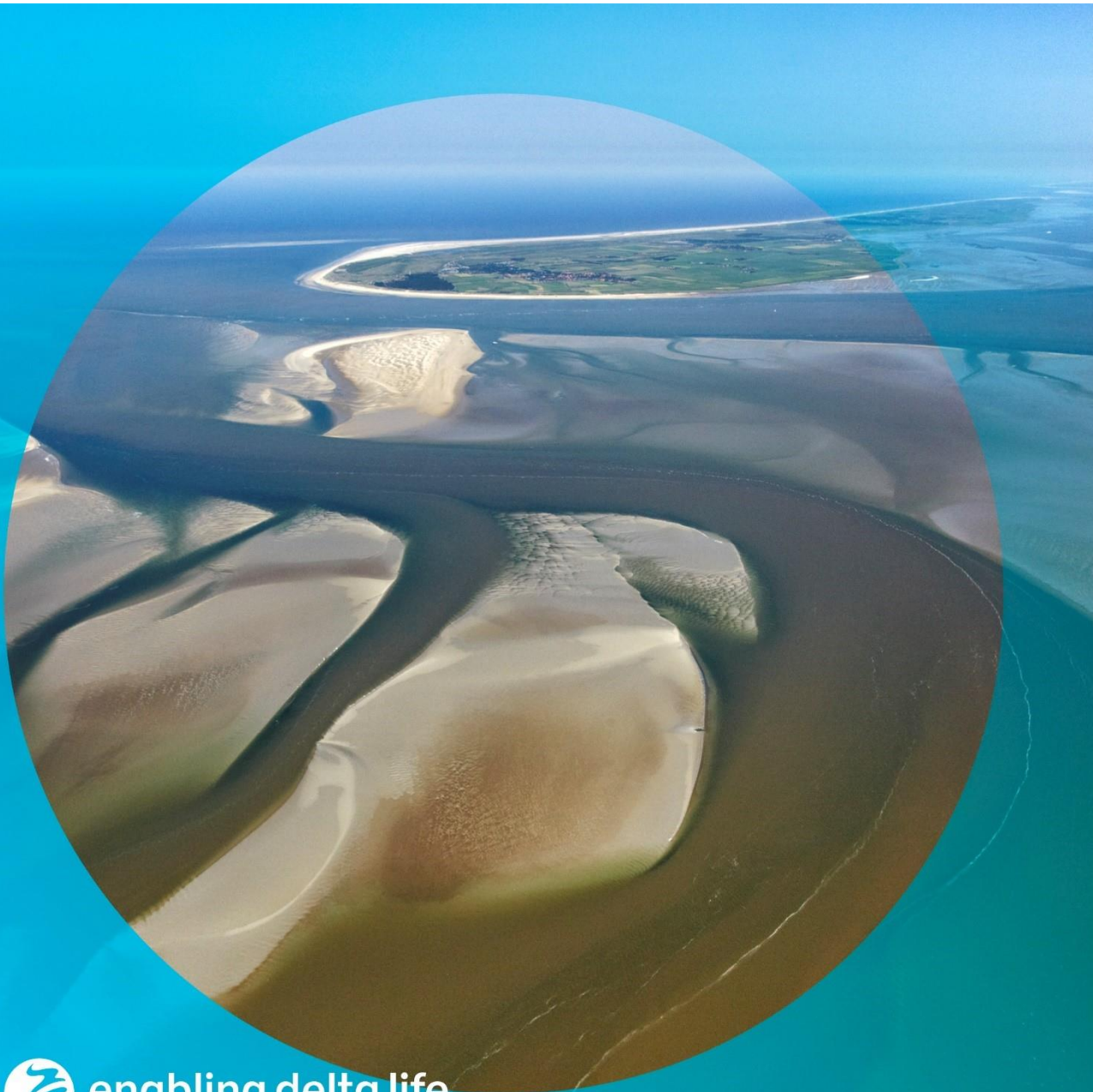


## Kombergingsrapport Friesche Zeegat

Pinkegat en Zoutkamperlaag



**Kombergingsrapport Friesche Zeegat**  
Pinkegat en Zoutkamperlaag

**Auteur(s)**

Albert Oost

J. Cleveringa

Marcel Taal

## Kombergingsrapport Friesche Zeegat

Pinkegat en Zoutkamperlaag

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	
<b>Referenties</b>	KPP 2020 BO02 Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden
<b>Trefwoorden</b>	Waddenzee, morfologie, Friesche Zeegat, Pinkegat, Zoutkamperlaag, kombergingsgebied, beheerbibliotheek

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	16-10-2020
<b>Projectnummer</b>	11205229-001
<b>Document ID</b>	11205229-001-ZKS-0002
<b>Pagina's</b>	131
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)


Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Albert Oost J. Cleveringa	Marcel Taal	Toon Segeren	
0.2	Albert Oost J. Cleveringa Marcel Taal	Edwin Elias	Toon Segeren	
1.0	Albert Oost J. Cleveringa Marcel Taal 	Edwin Elias 	Toon Segeren 	

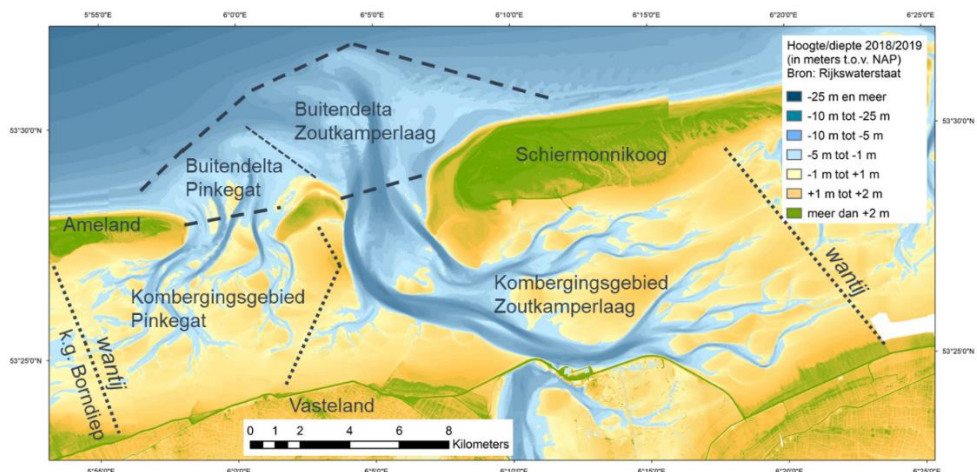
# Samenvattende beschouwing

Dit rapport geeft een overzicht van de actuele kennis van de morfologie van de 2 kombergingsgebieden van het Friesche Zeegat, te weten Pinkegat en Zoutkamperlaag, en een overzicht van de beheer- en beleidsvraagstukken, en is onderdeel van de 'beheerbibliotheek' van de kombergingsgebieden van de Waddenzee

## Inleiding

Dit rapport is het derde 'kombergingsrapport' van de Nederlandse Waddenzee, in navolging van de rapporten over de kombergingsgebieden Borddiep (2017) en Marsdiep & Vlie (2018), te vinden op: <https://publicwiki.deltares.nl/display/MORFWAD/Producten>. Een kombergingsrapport heeft twee functies. Het bevat de actuele kennis van de morfologie op de middelgrote ruimteschaal (de mesoschaal) en is een naslagwerk voor de beheerders van de Waddenzee (beheerbibliotheek). Deze samenvattende beschouwing is niet gericht op het volwaardig samenvatten van de inhoudelijke hoofdstukken. Dat past niet bij een naslagwerk. In hoofdstuk 7 wordt wel per gebruiksfunctie besproken wat de beschreven ontwikkelingen op de mesoschaal betekenen.

Onderwerp van dit rapport zijn de kombergingsgebieden Pinkegat en Zuidkamperlaag, liggend tussen Ameland en Schiermonnikoog. Samen vormen ze het Friesche Zeegat. Het Pinkegat ligt westelijke en vooral bij Ameland. De grotere Zoutkamperlaag ligt ten westen en zuiden van Schiermonnikoog. Het Pinkegat en de Zoutkamperlaag worden gescheiden door de zandplaten van Engelsmanplaat-Rif.



## Grootschalige evolutie en de verschillen tussen Pinkegat en Zoutkamperlaag

De beide zeegaten zijn sterk met elkaar verweven. Zeker op de buitendelta's is er veel uitwisseling van zand, voornamelijk netto in oostwaartse richting. Anderzijds lijken de twee kombergingsgebieden zich morfologisch betrekkelijk onafhankelijk te ontwikkelen.

Het kombergingsgebied van het Pinkegat is kleiner met daardoor kleinere geulen en laat een grotere morfologische dynamiek zien. Het zeegat bestaat afwisselend uit één of meerdere (tot vier) geulen. Dit heeft invloed op de ontwikkeling van de oostpunt van Ameland. De meest recente inzichten zijn dat hier geen duidelijke cyclische voorspelbaarheid in aanwezig is. De belangrijkste en vrijwel enige 'gebruiksfunctie' van het gebied is 'natuur'.

Het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag is groter en vertoont minder morfologische dynamiek. De hoofdgeul heeft een vrij stabiele configuratie. De waterbeweging (in het bijzonder de relatieve rol van de golfwerking) verklaart deels het verschil in geuldynamiek tussen het westelijke (Pinkegat) en oostelijke (Zoutkamperlaag) deel van het Friesche Zeegat. Dit verschil tussen west en oost is bij meer kombergingsgebieden te zien. De aanwezigheid van harde, erosiebestendige lagen speelt bij de stabiele ligging van de Zoutkamperlaag echter ook een rol.

Naast het verschil in omvang en dynamiek verschillen de kombergingsgebieden in hun gebruiksfunctie en eventuele ingrepen daarvoor. De geulen van de Zoutkamperlaag zorgen voor de toegankelijkheid van Lauwersoog vanaf de Noordzee en Schiermonnikoog. En in dit kombergingsgebied is een majeure ingreep geweest door de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Dit deltawerk voor de bescherming tegen overstromingen en verbetering van de waterhuishouding van Noord-Nederland, heeft grote veranderingen in waterbeweging en sedimentbudgetten veroorzaakt. Het uiteindelijke effect was een 35% kleiner getijprisma, alhoewel het kombergingsgebied langzaam in omvang toenam omdat het wantij op sommige plekken kilometers naar het oosten verschoof. In de eeuwen voor de afsluiting was de Lauwerszee al geleidelijk opgeslibd, gevolgd door vele inpolderingen.

De verkleining van het kombergingsgebied door de afsluiting deed veel sediment vrijkomen uit de buitendelta van de Zoutkamperlaag. Dit heeft zowel Schiermonnikoog gevoed met zand als sediment in het kombergingsgebied gebracht, voornamelijk in de geulen ten zuiden van het eiland.

Een derde verschil dat expliciet genoemd wordt is de zoetwateraanvoer. In het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag is er een relatief grote aanvoer. Via de sluisen in de Lauwersmeerdijk wordt per tij gemiddeld 4 miljoen m<sup>3</sup> geloosd. Over de effecten op stroming en ecologie hiervan zijn geen studies bekend.

### **Morfologische eenheden op mesoschaal**

Dit rapport bespreekt in de hoofdstukken 4 tot en met 6 achtereenvolgens de getijdegeulen, de wadplaten en de kwelders. Hoofdstuk 4 behandelt eerst de omvang en de dynamiek van geulen en geeft daarna extra aandacht aan de geulen die speciale aandacht van de beheerder krijgen. Dit is omdat ze voor de toegankelijkheid van Schiermonnikoog van belang zijn of omdat ze in de nabijheid van een dijk liggen (Vierhuizergat en Oort bij de Lauwersmeerdijk).

Beide kombergingsgebieden hebben een hoog percentage wadplaten. Het verschil ertussen is dat, door de intensievere verplaatsing van de geulen van het Pinkegat, de platen daar vaak vrij jong zijn, met veel variatie in ligging en hoogte. Hierdoor fluctueert ook het totale areaal plaatgebied in het Pinkegat sterker. Dichter bij de vastelandskust spelen restanten van kwelderwerken ook een rol in de ontwikkeling. Op de grote schaal valt de oostelijke verplaatsing van het wantij ten zuiden van Schiermonnikoog het meest op. Hierdoor nam niet alleen het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag toe, maar ook het daarbij behorende plaatareaal. Apart genoemd worden Rif en Engelsmanplaat die tussen de eilanden liggen en deel uitmaken van de grens tussen de twee kombergingsgebieden.

Bij de beschrijving van de kwelders worden de kwelders op de eilanden en langs de vastelandskust apart behandeld. Op Ameland heeft de aanleg van stuifdijken mede richting gegeven aan de kweldervorming. Uitzondering is de zuidoostpunt (de Hon), die volledig natuurlijk is ontstaan. De aanwezigheid van groene stranden bij Schiermonnikoog valt ook onder kwelders. Ook bij dit eiland heeft de aanleg van stuifdijken belangrijke invloed gehad op de kwelderontwikkeling. Langs de vastelandskust waren de kwelderwerken sturend, maar in het gebied van het Pinkegat is deze weinig succesvol geweest.

# Inhoud

	<b>Samenvattende beschouwing</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Kennisbasis morfologie Waddenzee	8
1.2	Doelen kombergingsrapport / beheerbibliotheek	8
1.3	Benamingen kombergingsgebieden Friesche Zeegat	9
1.4	Leeswijzer	10
<b>2</b>	<b>Grootschalige kenmerken en ontwikkelingen</b>	<b>11</b>
2.1	Het Friesche Zeegat is een samengesteld zeegat	11
2.2	Grootschalige fysische kenmerken van het kombergingsgebied Pinkegat	12
2.2.1	Ontwikkelingsgeschiedenis	12
2.2.2	Herhalend gedrag	13
2.3	Grootschalige kenmerken van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag	19
2.3.1	Ontwikkelingsgeschiedenis	20
2.3.2	Herhalend gedrag tot 1969	21
2.3.3	Evolutie na 1969	24
2.4	Ontwikkelingen in de sedimentbalans	26
<b>3</b>	<b>Hydrodynamica</b>	<b>30</b>
3.1	Inleiding	30
3.2	Zeespiegelstijging	30
3.3	Getij	31
3.4	Wind, golven en stormvloedstanden	32
3.5	Aanvoer van zoetwater	35
<b>4</b>	<b>Getijdegeulen</b>	<b>37</b>
4.1	Geulomvang	38
4.2	Grote en diepe geulen in de zeegaten	40
4.3	Geulbochten	42
4.4	Eb- en vloedscharen	44
4.5	Overname geulen	46
4.6	Geulontwikkeling en dijkstabiliteit: Vierhuizergat en Oort	47
<b>5</b>	<b>Inter- en supragetijde wadplaten</b>	<b>50</b>
5.1	Kenmerken en deelgebieden	50
5.2	Het Pinkewad	51
5.3	Het Friesche Wad en het Wierumerwad	52

5.4	Het Rif en Engelsmanplaat	55
5.5	Oude Wal-Rif-Reede	57
5.6	Roode Hoofd-Brakzand	58
5.7	Lutjewad en wantij Zoutkamperlaag-Lauwers	60
<b>6</b>	<b>Kwelders</b>	<b>62</b>
6.1	Inleiding	62
6.2	Kwelders van het Pinkegat	64
6.2.1	Eilandkwelders Ameland – De Hon en Neerlands Reid	64
6.2.2	Kwelders vasteland	67
6.3	Kwelders van Zoutkamperlaag	69
6.3.1	Kwelders en groene stranden Schiermonnikoog	69
6.3.2	Kwelders Zoutkamperlaag, vasteland	73
<b>7</b>	<b>Relatie morfologie en gebruiksfuncties</b>	<b>76</b>
7.1	Inleiding	76
7.2	Veiligheid tegen overstromingen	76
7.2.1	Beleid en beheer	76
7.2.2	De rol van morfologische veranderingen in de waterveiligheid	77
7.3	Bereikbaarheid: vaarwegen en havens	78
7.3.1	Beleid en beheer	78
7.3.2	De rol van morfologische veranderingen in de bereikbaarheid	78
7.4	Natuur	81
7.4.1	Beleid en beheer	81
7.4.2	Morfologische veranderingen sturen natuurwaarden	81
7.5	Gaswinning	81
7.5.1	Beleid en beheer	81
7.5.2	Relatie met morfologische ontwikkelingen	82
7.6	Overige gebruiksfuncties	82
<b>8</b>	<b>Referenties</b>	<b>84</b>
<b>A</b>	<b>Historische reconstructies</b>	<b>88</b>
<b>B</b>	<b>Kaarten</b>	<b>92</b>
<b>C</b>	<b>Dwarsdoorsnedes</b>	<b>102</b>

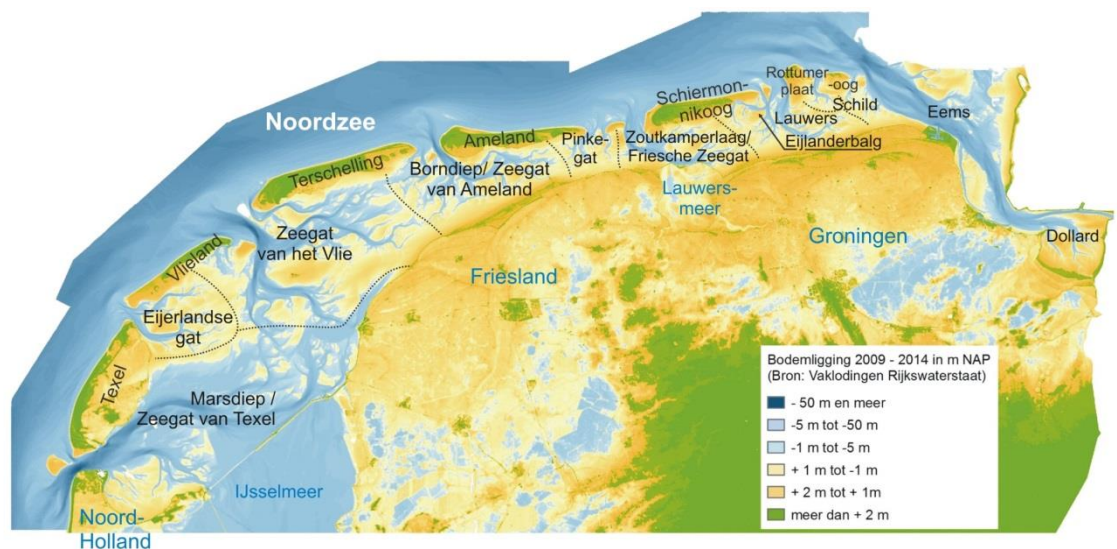
# 1 Inleiding

## 1.1 Kennisbasis morfologie Waddenzee

Rijkswaterstaat wil de morfologische kennisbasis voor het beleid en beheer op orde brengen en onderhouden. Hiervoor is een onderzoekssamenwerking met Deltares ontwikkeld via het zogenaamde Kennisprogramma voor Primaire Processen. In het onderzoeksprogramma wordt morfologische kennis op een structurele manier verzameld, geanalyseerd, geordend en geborgd. Daarnaast wordt de kennis toegankelijk gemaakt voor beleids- en beheervraagstukken op het gebied van veiligheid, bereikbaarheid, natuur en overige gebruiksfuncties. Hiertoe wordt afstemming gezocht met beleidsmakers, beheerders, adviseurs, wetenschappers en gebruikers van het wad. Het voorliggende rapport wordt uitgebracht als onderdeel van dit kennisprogramma.

## 1.2 Doelen kombergingsrapport / beheerbibliotheek

Voorliggend rapport is het derde 'kombergingsrapport' van de Nederlandse Waddenzee. Het behandelt de twee kombergingsgebieden van het Friesche Zeegat: Pinkegat en Zoutkamperlaag. Deze worden in dit rapport samen beschreven omdat de morfologische ontwikkelingen ervan zeer met elkaar zijn verweven en beiden liggen tussen Ameland en Schiermonnikoog.



Figuur 1-1 De Waddenzee en haar kombergingsgebieden.

Een kombergingsrapport heeft twee doelen:

1. Het verzamelt de kennis van de morfologie op de middelgrote ruimteschaal (de mesoschaal) op basis van de verschillende typen morfologische elementen. Hiermee wordt een methodiek gevolgd van mesoschaalrapportages die ook succesvol voor de Westerschelde is toegepast.



2. Het is een inleiding en naslagwerk voor de beheerders van de Waddenzee. Het kombergingsgebied is opgedeeld in ruimtelijk samenhangende eenheden die aansluiten bij de schaal waarop gebruik en beheer plaatsvindt. Het sluit daarin aan bij het maken en onderhouden van beheerbibliotheken<sup>1</sup>.

Het streven is om voor alle kombergingsgebieden van de Waddenzee (Figuur 1-1 laat ze allemaal zien) dergelijke rapporten te maken en deze periodiek bij te werken om voldoende up-to-date kennis en informatie te leveren. Een mogelijke frequentie is zes jaar, gelijk aan het tempo van beschikbaar komen van de gebiedsdekkende vaklodingen. Bij het beschikbaar komen van doorslaggevend nieuwe inzichten kan van deze frequentie worden afgeweken.

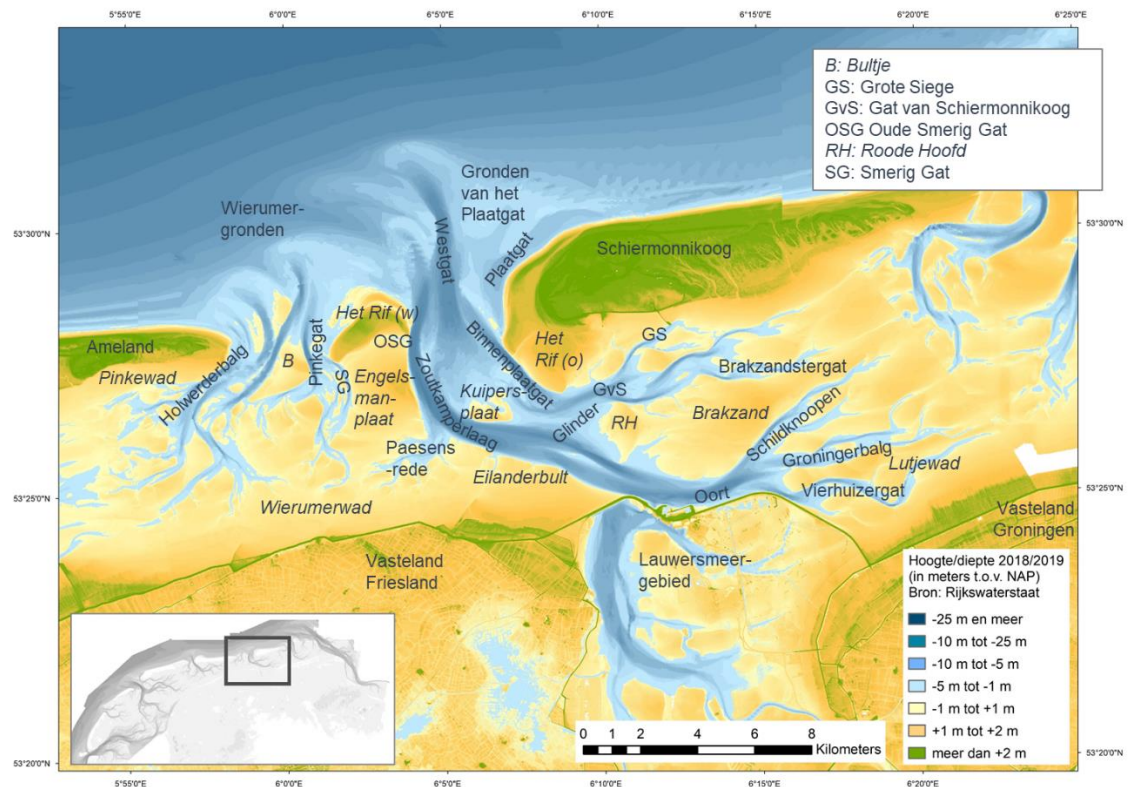
### 1.3 Benamingen kombergingsgebieden Friesche Zeegat

Er zijn voor zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag verschillende benamingen in omloop. Het Pinkegat wordt ook wel aangegeven met de naam Holwerderbalg, maar dit wordt meer en meer gebruikt voor de geulen binnengaats (Figuur 1-2). De Zoutkamperlaag wordt soms ook Friesche Zeegat genoemd. Uit de beschikbare hydrografische kaarten van de Marine uit de 19<sup>e</sup> eeuw blijkt dat dit de overkoepelende naam was voor Pinkegat en Zoutkamperlaag samen. Het Friesche Zeegat ligt tussen de eilanden Ameland en Schiermonnikoog en was de ingang naar de havens in Dokkum en Groningen. Een enkele keer wordt de naam Scholbalg nog wel eens gebruikt voor de Zoutkamperlaag. Deze naam gaat terug op de middeleeuwse situatie waarin de Zoutkamperlaag hoogstwaarschijnlijk nog geen connectie had met de Lauwerszee en doodliep in het Waddengebied.

Om verwarring te voorkomen spreekt dit rapport steeds over 'kombergingsgebied Pinkegat' en 'kombergingsgebied Zoutkamperlaag'. Voor de hoofdgeulen zal kortweg Pinkegat en Zoutkamperlaag worden gebruikt. Wanneer specifiek de opening/ geul tussen twee eilandkoppen wordt bedoeld spreekt dit rapport van het 'zeegat' (van het Pinkegat of de Zoutkamperlaag) en het totale gebied wordt aangeduid als Friesche Zeegat.

---

<sup>1</sup> Het concept beheerbibliotheek is ontwikkeld bij Rijkswaterstaat-kustlijn­zorg. Het geeft per kustvak of morfologische eenheid een overzicht van het morfologische systeembegrip in samenhang met de spelende beheer- en beleids­vraagstukken. Het biedt qua morfologische kennis een gezamenlijk vertrekpunt voor de verschillende



Figuur 1-2 Kaart van het Friesche Zeegat met de gebruikte toponymen van de geulen en platen (namen van platen zijn cursief weergegeven).

## 1.4 Leeswijzer

De volgende twee hoofdstukken omvatten het gehele Friesche zeegat, waarbij eerst de grootschalige ontwikkelingen worden beschouwd in hoofdstuk 2 en de hydrodynamica in hoofdstuk 3. Daarna volgen drie hoofdstukken die elk zijn gewijd aan een van de morfologische eenheden op mesoschaal:

- Getijdegeulen, vertakkend van groot (bij het zeegat) naar klein (hoofdstuk 4);
- Intergetijdeplaten, ook wel wadplaten (hoofdstuk 5);
- Kwelders, bij het vasteland en onder de eilanden (hoofdstuk 6);

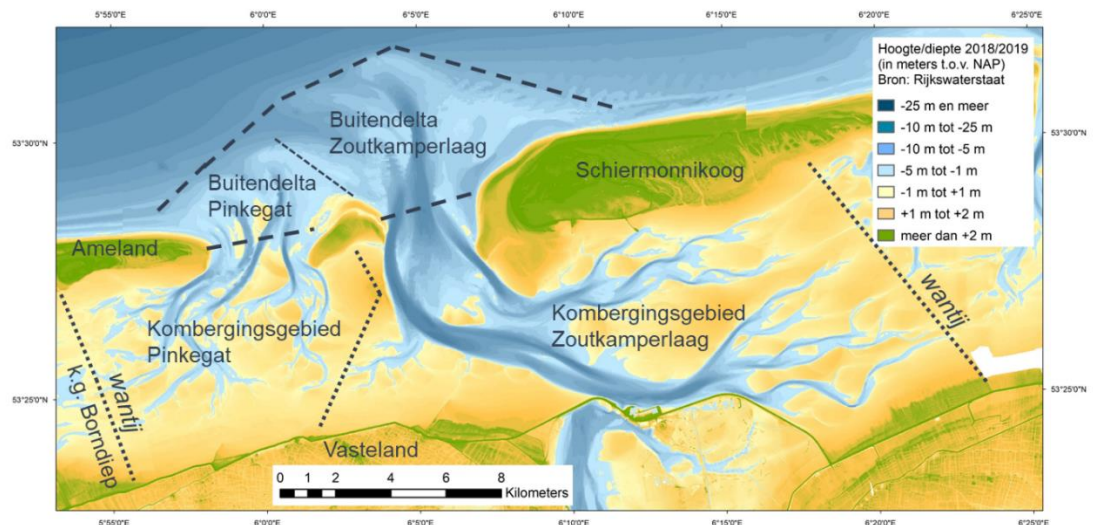
Hoofdstuk 7 geeft de belangrijkste verbanden tussen de morfologie van het kombergingsgebied en de gebruiksfuncties. Dit helpt bij het prioriteren van kennisontwikkeling. De prioriteit in het hebben en verspreiden van kennis van de morfologie op de mesoschaal ligt bij die morfologische eenheden die belangrijk zijn voor gebruiksfuncties, in het bijzonder als er belangrijke beheervragen zijn hierover. Nadere interpretatie van de kennis of advisering over beheervragen gebeurt niet in dit rapport. Hiervoor zijn andere trajecten.

De bijlagen omvatten een serie historische reconstructies (bijlage A), bodemkaarten van de vaklodgingen vanaf 1987 tot 2018 en enkele verschilkaarten (bijlage B) en een serie dwarsdoorsnedes uit het kombergingsgebied (bijlage C).

## 2 Grootschalige kenmerken en ontwikkelingen

### 2.1 Het Friesche Zeegat is een samengesteld zeegat

Tussen Ameland en Schiermonnikoog ligt niet één, maar liggen twee zeegaten (Figuur 2-1): het Pinkegat Zeegat aan de westzijde en de grotere Zoutkamperlaag Zeegat aan de oostzijde. Deze twee zeegaten worden gescheiden door de zandplaten van Engelsmanplaat-Rif. Een dergelijke configuratie treedt in de trilaterale Waddenzee vaker op (Oost et al., 2017). Het samengestelde karakter met twee zeegaten is in het Friesche Zeegat erg expliciet en bestaat al zeker sinds de 16<sup>e</sup> eeuw (Oost, 1995a)<sup>2</sup>. Het is waarschijnlijk deels geholpen door de aanwezigheid van een vroeg-holocene kleikern onder het inter- tot supragetijdegebied Engelsmansplaat (Sha, 1990).



Figuur 2-1 Het samengestelde Friesche Zeegat (bodem 2018/19).

Het kombergingsgebied aan de oostzijde van een Waddeneiland, dus de meest westelijke van een dubbel zeegat, is het kleinst van de twee. Dat komt doordat het getij zich van west naar oost verplaatst langs de kust van de Waddeneilanden en het kan, vanuit een eiland bekeken, aan de westzijde verder het wad op kunnen doordringen dan langs de oostzijde. Dit geldt ook voor het Pinkegat met een oppervlakte aan wadplaten en geulen van ongeveer 51 km<sup>2</sup> en een getijprisma (bepaald op basis van de bathymetrie) van circa  $100 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> en de Zoutkamperlaag met een oppervlakte van ongeveer 138 km<sup>2</sup> en een getijprisma van circa  $193 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>.

Omdat golf- en getijgedreven stroming beiden naar het oosten zijn gericht, wordt veel sediment van de Amelandse kust aangevoerd en ondervindt het Pinkegat daarvan relatief veel invloed. Hierdoor verplaatsen de geulen van de buitendelta van het Pinkegat zich relatief snel naar het oosten. De westzijde van de Engelsmansplaat heeft zich in de afgelopen 180 jaar ca. 5 kilometer oostwaarts verlegd ten gevolge van erosie door geulen van het Pinkegat (Oost, 1995a). De omvang van de Engelsmanplaat is hierdoor afgenomen.

<sup>2</sup> Eerder (vermoedelijk 15e eeuw) was mogelijk nog sprake van een enkel zeegat, Scholbalg geheten (Oost, 1995a).

Morfologisch lijken de twee, door de relatief hoge Engelsmanplaat en Rif gescheiden, zeegatsystemen Pinkegat en Zoutkamperlaag zich betrekkelijk onafhankelijk van elkaar te ontwikkelen. Er is wel sprake van netto stromingen tussen beide systemen over het wantij dat ten zuiden van het Rif over de Engelsmanplaat naar de Friese kust loopt. Tijdens stormen uit het noordwesten tot westen beweegt het water vooral oostwaarts van Pinkegat naar Zoutkamperlaag (Duran-Matute & Gerkema, 2015; Duran-Matute et al., 2016); Vermaas & Elias, 2019) (hoofdstuk 4). Zie voor meer informatie paragraaf 3.3.

De dimensies en de oriëntatie van de beide kombergingsgebieden verschillen. Het Pinkegat is beduidend kleiner en heeft geulen die naar het westen, zuidwesten en zuiden zijn georiënteerd. Bij de Zoutkamperlaag zijn de geulen naar het zuidoosten en oosten georiënteerd. Omdat het Pinkegat een kleiner kombergingsgebied heeft zijn de geulen ook kleiner. Dit leidt weer tot een ander verschil: de migratie van de (kleinere) geulen in de buitendelta van het Pinkegat ondervinden relatief meer invloed door golfwerking. Dit leidt vervolgens tot een veel sterkere geuldynamiek in het kombergingsgebied. In de Zoutkamperlaag zijn de posities van de geulen vrij stabiel. Onder het Brakzand (voor ligging, zie Figuur 1-2) is op ca. NAP -5 m nog veen aanwezig, wat impliceert dat dit gebied nog nooit door geulen is omgewerkt sinds het ontstaan van de Zoutkamperlaag.

Beide kombergingsgebieden hebben een hoog percentage platen, zie Tabel 2-1. Verschil is wel dat, door de intensievere verplaatsing van de geulen van het Pinkegat, de platen daar vaak vrij jong zijn. Ook is de fluctuatie in het areaal plaatgebied in het Pinkegat veel groter. Dit is mede gestuurd door de sterkere afwisseling in geulconfiguratie in de buitendelta. In de jaren 1971 en 1987, wanneer een (nabije) enkele inlaat fase bestaat, is het areaal ongeveer 5 km<sup>2</sup> groter dan in de jaren 1978 en 1981 toen meerdere zeegaten aanwezig waren.

Tabel 2-1 Arealen wadplaten en geulen in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag, (situatie 2019; slotgemiddelden 2011, Schiermonnikoog).

	Pinkegat		Zoutkamperlaag	
Wadplaten	39,1 km <sup>2</sup>	77%	94,5 km <sup>2</sup>	68%
Geulen (= oppervlak bij GLW)	11,9 km <sup>2</sup>	23%	48,8 km <sup>2</sup>	32%
Totaal (= oppervlak bij GHW)	51 km <sup>2</sup>		138,3 km <sup>2</sup>	

## 2.2 Grootschalige fysische kenmerken van het kombergingsgebied Pinkegat

Het kombergingsgebied van het Pinkegat is een relatief klein getijdebekken. In het zeegat liggen afwisselend één hoofdgeul of meerdere (2 tot 4) hoofdgeulen. Figuur 2-2 laat voorbeelden zien van de twee configuraties, met aan de linkerkzijde de één-geulconfiguratie in 1987 en aan de rechterzijde de meergeulenconfiguratie in 2012. Het kombergingsgebied wordt begrensd door Ameland, het wantij met het Zeegat van Ameland aan de westzijde, het vasteland van Friesland en de Engelsmanplaat en het wantij met de Zoutkamperlaag.

### 2.2.1 Ontwikkelingsgeschiedenis

Het Pinkegat is waarschijnlijk ontstaan tussen 1480 en 1550, hoewel een vroegere datum niet kan worden uitgesloten (Appendix A; Oost, 1995a). Na 1800 vond een verschuiving naar het oosten van het wantij van Ameland plaats over ongeveer 2,8 km<sup>3</sup>. Als gevolg hiervan verschoof ook het Pinkegat systeem naar het oosten. In de periode 1923-1950 verschoof het wantij onder Ameland nog 1,6 km oostwaarts.

<sup>3</sup> Hoofdzakelijk toe te schrijven aan de sterke oostwaartse verschuiving van de hals van het Zeegat van Ameland.

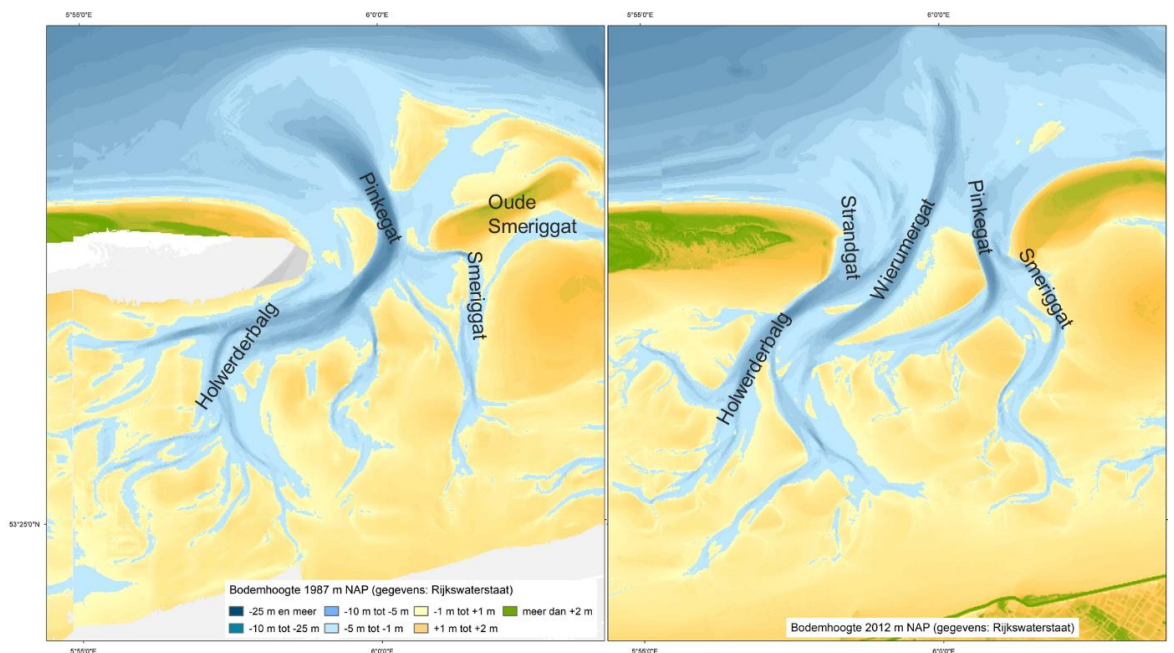
Dit is waarschijnlijk de belangrijkste reden voor de erosie van  $22 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  in het Zeegat van Ameland en de sedimentatie van  $24,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  in de periode 1927-1949 in het Pinkegat (Oost, 1995a).

## 2.2.2 Herhalend gedrag

Zowel vóór als ná afsluiting van de Lauwerszee worden de veranderingen van het Pinkegat gekenmerkt door twee ontwikkelingen. Ten eerste varieert het Pinkegat zeegat tussen een één- en meergeulensysteem. Deze variatie is met A aangeduid in Figuur 2-3 en Figuur 2-4 geeft een indruk van de bijbehorende ruimtelijke schaal. Door deze variatie verschuiven de belangrijkste geulen binnen het kombergingsgebied ook voortdurend van positie. Hierdoor wordt een groot deel van het kombergingsgebied "omgeploegd". In Figuur 2-5 is deze ontwikkeling te volgen via visualisatie van beschikbare bodemopnames.

In de één-geul configuratie is de hoofdgeul Pinkegat groot en diep en verzorgt de gehele drainage van het achterliggende kombergingsgebied. De herhalingsstijd van deze configuratie is ordegrrootte 50 jaar (zie Figuur 2-3). Alleen in de periode na afsluiting van de Lauwerszee vindt een veel snellere herhaling (20 jaar) plaats. Het is echter niet duidelijk of er een oorzakelijk verband is met die afsluiting. Er is geen eenduidig mechanisme dat zorgt voor de overgangen tussen een configuratie met één of meerdere geulen. De overgang in 1927 is veroorzaakt door verlanding van de Sykkeplaat. Na deze verlanding blijft de één-geul configuratie dan lang behouden. In 1967 en 1987 ontstaat de enkele geul juist door het samengaan van de hoofd- en nevengeulen. Dit is beschreven in het conceptueel model van Oost (1995a).

De groei en terugtrekking van De Hon lijkt samen te vallen met de afwisseling tussen de één- en meergeulenconfiguratie. In de één-geulconfiguratie is De Hon sterk uitgebouwd. De grootste uitbouw vindt plaats als het één-geulsysteem is gevormd door bankaanlanding.



Figuur 2-2 Het één-geulsysteem in het Pinkegat in 1987 (links) en het meergeulensysteem in 1987 (rechts).

Naast het grootschalige afwisselen tussen één- en meergeulensysteem vertonen ook de kleinere geulen (Strandgat en Wierumergat, zie voor ligging rechterzijde Figuur 2-2) een zich herhalende ontwikkeling. Sinds 1997 waren er vier van zulke herhalingen, waarbij Strandgat en Wierumergat ontstaan en met elkaar versmelten. De rechterzijde van Figuur 2-4 geeft een indruk van de bijbehorende ruimtelijke schaal (aanduiding B).

### **Mechanisme achter de periodiciteit van Strandgat en Wierumergat**

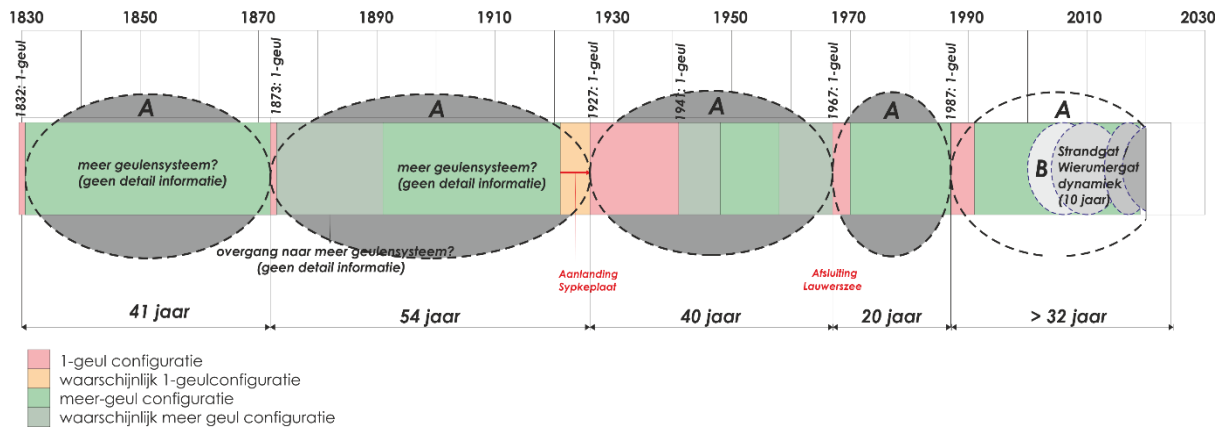
Langs de Hon ontstaan kortsluitgeulen die verbinding maken met het achterliggende geulensysteem (Holwerderbalg) Deze geulen migreren oostwaarts onder invloed van de zanddruk (golfgedreven) vanaf Ameland. Daarbij gaan de westelijke geulen sneller dan de meer oostelijke geulen, waardoor ze versmelten en er zich één enkele hoofdgeul kan vormen. Als deze geul te ver oostwaarts migreert wordt deze minder efficiënt en een nieuwe kortsluitgeul ontstaat langs de Hon. Het migreren van de geulen is een balans tussen de zandtoevoer langs de kust van Ameland en de getijkrachten door het zeegat.

Op grond van voorafgaande is te verwachten dat de duur van de migratie van geulen (en elkaar inhalen, met de snelste aan westzijde, en met elkaar versmelten) en het aangroeien van Ameland min of meer gelijk op gaat. Dit is ook de basis van de conceptuele beschrijving van Oost (1995). Naast deze deterministische ontwikkeling laat de meetdata ook zien dat er een stochastische component in de geulontwikkeling zit. Nieuwe kortsluitgeulen langs de kust van Ameland kunnen ontstaan door stormen en stormvloed en waarbij vrijwel instantaan grote hoeveelheden sediment worden verplaatst.

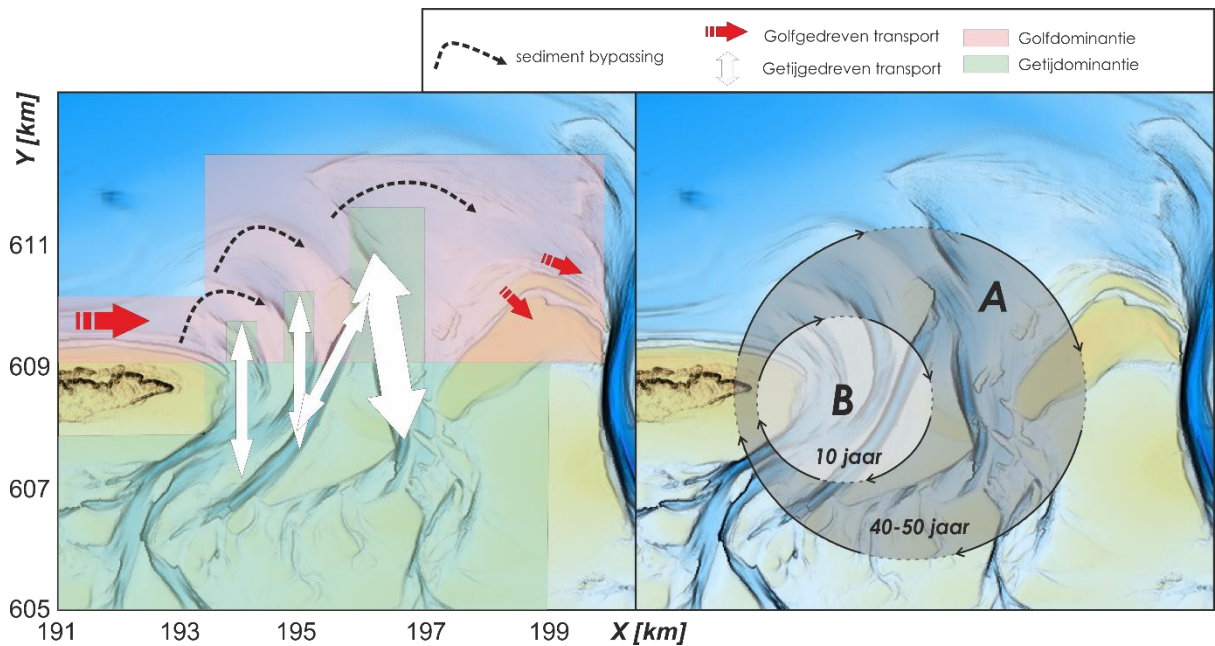
De geulontwikkeling laat dus een patroon zien dat primair deterministisch is, maar door de stochastische processen onregelmatigheden bevat. Dit is vergelijkbaar met de ontwikkelingen rond het Zeegat van Ameland (Elias et al., 2019). Zodra een proces in gang gezet is overheerst het deterministische proces, maar het ontstaan van de instabiliteit is niet voorspelbaar. Het is daarom beter het gedrag te beschrijven als periodiek of herhalend gedrag in plaats van cyclisch gedrag.

### **Relatie tussen geulconfiguratie en sediment transport over buitendelta**

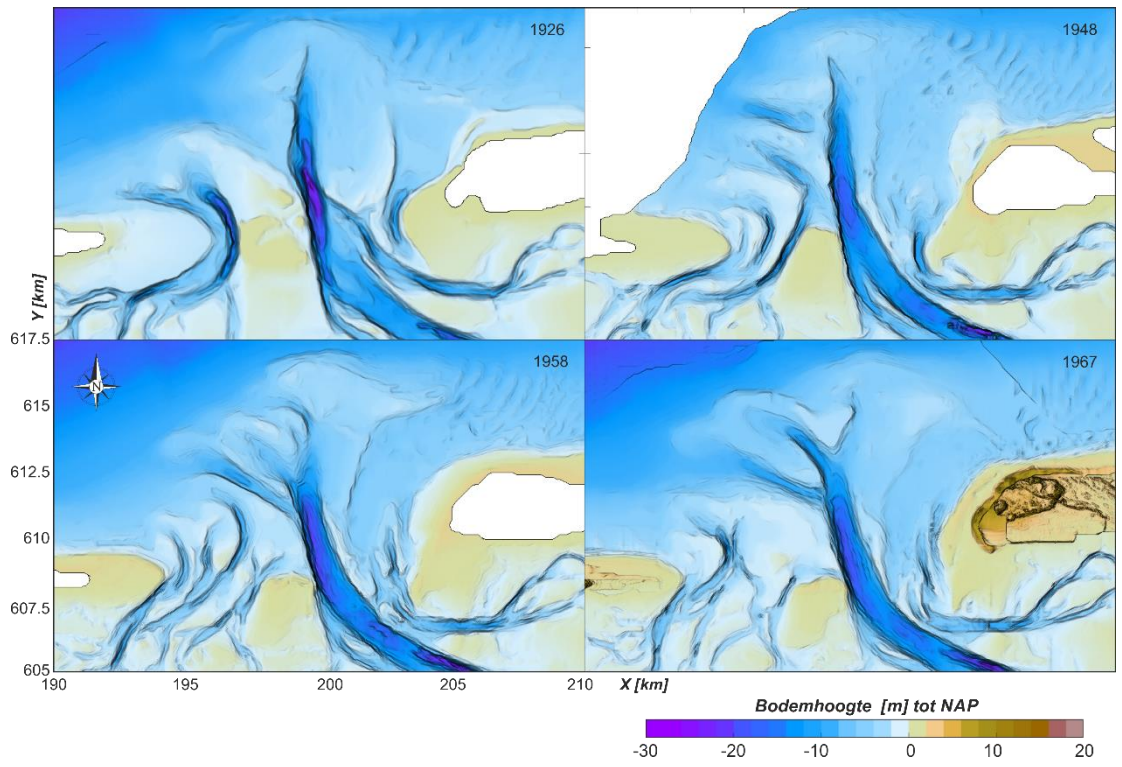
Afhankelijk van het stadium in de één- of meergeulenconfiguratie zal sediment bypassing (het transport van zand via ondieptes en aanlandende platen) op de buitendelta anders verlopen. In het stadium met meerdere geulen (zie ook Figuur 2-2) zullen er voor iedere geul (kleine) buitendeltaschilden aanwezig zijn. Deze buitendeltaschilden vormen zich door een balans tussen de zeewaartse toevoer door het getij en de oostwaartse afvoer en verplaatsing door golven. De grootte van het ebschild hangt samen met de grootte van de bijbehorende geul: een grotere geul heeft een groter ebschild. Vanaf de buitendelta van het Pinkegat vindt aanlanding van zandplaten plaats op Het Rif. De grootte en vorm van de banken die zeewaarts van Het Rif liggen en het wel of niet aanwezig zijn van een vloedgeul naar de Zoutkamperlaag bepaalt de uitwisseling van zand met het zeegat van de Zoutkamperlaag.



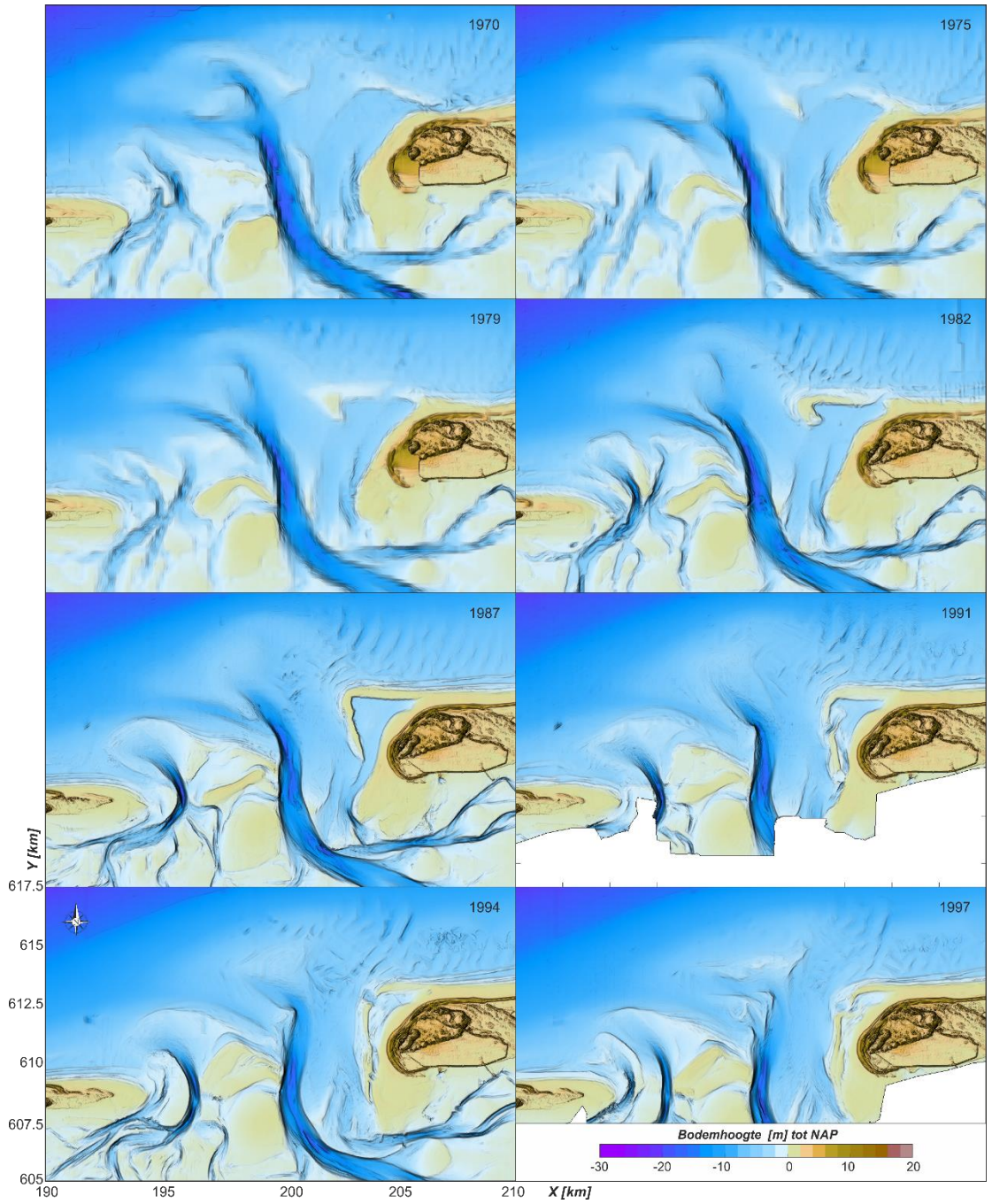
Figuur 2-3 Een conceptuele weergave van het morfologische gedrag van het Pinkegat. Een schematische tijdlijn van (A) een periode van herhaling (de gestreepte, grijze, cirkels) en (B) de kleinschaligere (nevengeul) dynamiek van Strandgat en Wierumergat. Alleen over de periode 1997-2019 is de meetdata beschikbaar om die kleinschalige dynamiek duidelijk te onderscheiden. Het lijkt waarschijnlijk dat ook voor 1997 deze dynamiek plaatsvond. Uit Elias en Oost (2020).

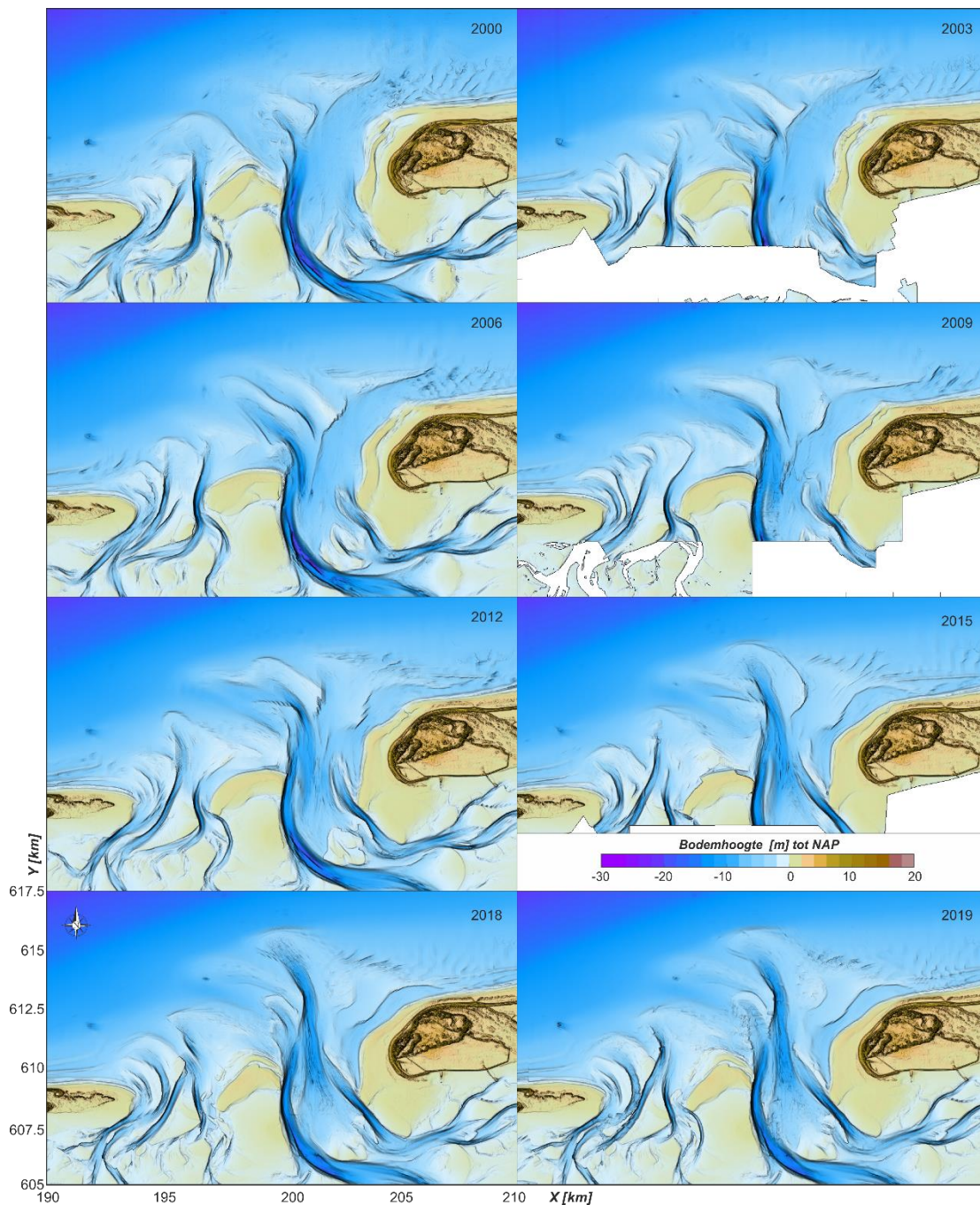


Figuur 2-4 Conceptuele weergave van de processen (links) en dynamiek (rechts) geprojecteerd op de 2018 bodem van het Pinkegat. Uit Elias en Oost (2020).







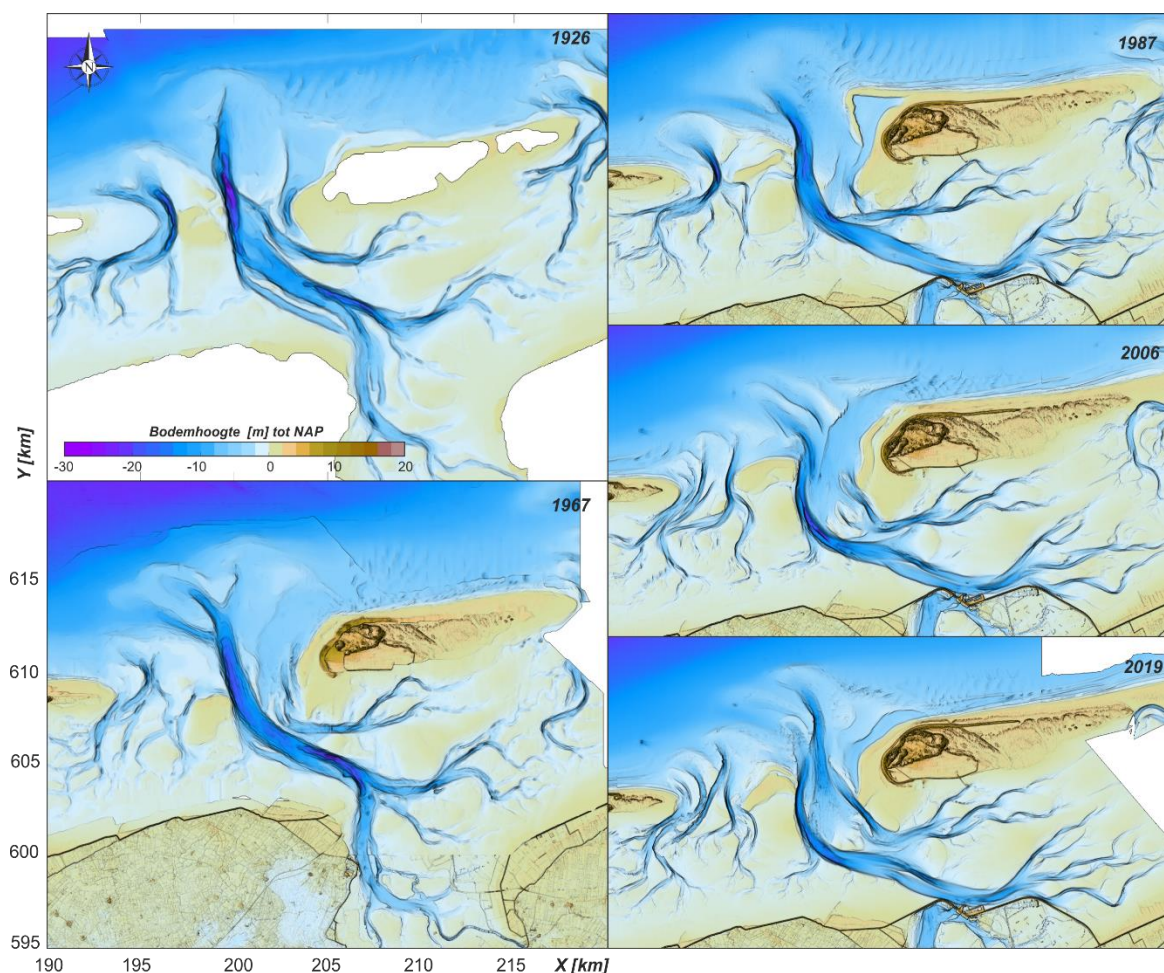


Figuur 2-5 Ontwikkeling van de buitendelta's van het Friesche Zeegat met links de hoofdgeulen van het Pinkegat en rechts de Zoutkamperlaag, op basis van lodingen (Elias & Oost, 2020).

## 2.3 Grootschalige kenmerken van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag

Het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag is een middelgroot getijdebekken. De hoofdgeul van dit kombergingsgebied heeft op hoofdlijnen een vrij stabiele configuratie sinds de middeleeuwen (Appendix A). Ze loopt gedurende de gehele periode 1576 tot 1969 in een vrij rechte lijn langs de Engelsmanplaat. Daarna kromt ze zich sterk naar het oosten, terwijl één tak doorging (tot de afsluiting in 1969) naar het Lauwerszeegebied (Figuur 2-6). De krommingen van de hoofdgeul wordt veroorzaakt door het momentum van het water gaande en komende van het oosten. Verder wordt de laterale beweging van de hoofdgeul beperkt door de geologie: aan de westkant liggen vroeg mariene Holocene kleirijke afzettingen onder de Engelsmanplaat en aan de oostkant een Pleistoceen hoog met kleirijke afzettingen en veen. In de periode na de afsluiting van de Lauwerszee is er een gestage erosie waar te nemen van de Engelsmanplaat aan de oostzijde waarbij de hoofdgeul Zoutkamperlaag zich langzaam kromt. Het kombergingsgebied wordt begrensd door Schiermonnikoog, het wantij zuidelijk van dit eiland, het vasteland van Groningen, de Engelsmanplaat en het wantij zuidelijk ervan.

De hoofdgeul (Zoutkamperlaag) buigt bij Lauwersoog af naar het oosten en heet daar Oort. Langs Schiermonnikoog bevindt zich de relatief grote geul Gat van Schiermonnikoog-Groote Siege. De belangrijkste wadplaatgebieden zijn de Brakzand, Oude Wal en het gebied westelijk van de lijn oostelijk deel Engelsmanplaat naar Lauwersoog.



Figuur 2-6 De grootschalige ontwikkeling van de Zoutkamperlaag gebaseerd op lodingen en voor vasteland en eilanden aangevuld met AHN-1 (1996-2003). In Figuur 2-5 is de ontwikkeling van het zeegat (niet van het kombergingsgebied) ook te volgen, via visualisatie van nog meer beschikbare bodemopnames.

### 2.3.1 Ontwikkelingsgeschiedenis

Oost (1995a) heeft afgeleid dat rond 1300 het zeegat nog vrij klein was en geen of alleen een beperkte connectie had met de Lauwerszee. Het zeegat had toen waarschijnlijk een getijprisma vergelijkbaar met het huidige Pinkegat (ca  $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ). Na 1300 begon de Zoutkamperlaag de drainage van de Lauwerszee over te nemen van het Zeegat van de Lauwers, wat oostelijk van Schiermonnikoog lag. Rond 1500 verzorgden beide zeegaten de drainage. Rond 1570 werd de Lauwerszee vooral nog gedraineerd via het Zoutkamperlaag Zeegat<sup>4</sup>. De overname van de drainage van de Lauwerszee door de Zoutkamperlaag betekende (Appendix A; Oost, 1995a) dat de dimensies van het systeem toenamen, vooral de geulen en de buitendelta. Het geërodeerde sediment zal in die periode vermoedelijk afgezet zijn op de buitendelta. Uit beschrijvingen en gedetailleerde kaarten blijkt duidelijk dat tot en met de 18e eeuw grote en ver zeewaarts uitgebouwde sub- tot supragetijdse platen aanwezig waren op de buitendelta. Rond 1570 zal het zeegat ook op haar grootst zijn geweest met een geschat getijdeprisma van zo'n  $400 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (Figuur 2-7; Oost, 1995a; Biegel & Hoekstra, 1995).

De Lauwerszee slibde daarna geleidelijk op waarbij van tijd tot tijd inpoldering volgde en het getijprisma afnam. In de periode 1927-1966/67 werd in de Lauwerszee  $15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  afgezet. Die verminderde invloed van het getij leidde weer tot een relatieve dominantie van de golfwerking op de buitendelta. Hierbij past een afname van het sedimentvolume van de buitendelta. In de periode 1927-1965 was de erosie circa  $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Na de afsluiting in 1969 nam het tempo daarvan toe: 50 miljoen  $\text{m}^3$  tussen 1967 en 2015 volgens (Elias & Oost, 2020).



Figuur 2-7 Overzicht van het opslibben en indijking van de Lauwerszee. De lijnen geven de polders weer met hun jaar van indijking in blauw. <http://landschapsgeschiedenis.nl/deelgebieden/6-Lauwersland.html>

<sup>4</sup> Vergelijkbaar met die in de Oetzumer Balje (Duitsland) nadat deze de Harle Inham overnam van het Harle Seegat.

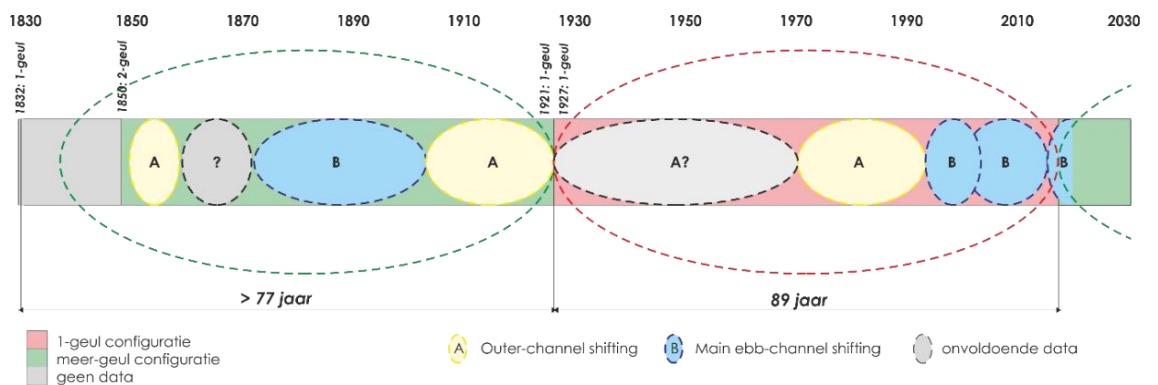
Een deel van het zand dat vanuit de buitendelta beschikbaar kwam is terecht gekomen in de geulen. De afname van het getijdevolume zorgt immers voor een verkleining van de hoofdgeulen van de Zoutkamperlaag. Een ander deel is naar Schiermonnikoog verplaatst, dat na de afsluiting sterk groeide aan de kop, het Noordzeestrand en na verloop van tijd ook aan de oostpunt. In een periode van ruwweg 25 jaar (1967-1991) vormde zich een grote strandhaak, die zich landwaarts verplaatste en verheelde met de kust (1994-2000; Elias en Oost, 2020). De morfologische veranderingen aan de kust van Schiermonnikoog worden gedomineerd door het afvoeren van deze grote hoeveelheid zand. Voor die periode kende de westkant van Schiermonnikoog een lange geschiedenis van erosie, minimaal vanaf 1550, door migrerende geulen, zowel in de buitendelta als in het kombergingsgebied.

Aangedreven door de eeuwenlange, gestage afname van de grootte van de Lauwerszee vond ook een geleidelijke verschuiving van de configuratie van het kombergingsgebied plaats. Het gebied kwam in toenemende mate zuidelijk van Schiermonnikoog te liggen.

### 2.3.2 Herhalend gedrag tot 1969

Op de buitendelta van de Zoutkamperlaag wisselen configuraties met één enkele, dominante uitstroombank en met twee geulen elkaar af in de afgelopen twee eeuwen (zie conceptuele weergave in Figuur 2-8; Elias & Oost, 2020). In de situatie met een dubbele hoofdgeul is de meest westelijke een diepe ebgeul en ligt oostelijker een (vaak ondiepere) vloedgeul. Dit komt voor in de periode 1850 – 1921. Een periode met één geul is aanwezig tussen 1927 en 2018. Sinds 2018 is er weer een configuratie met twee geulen aanwezig.

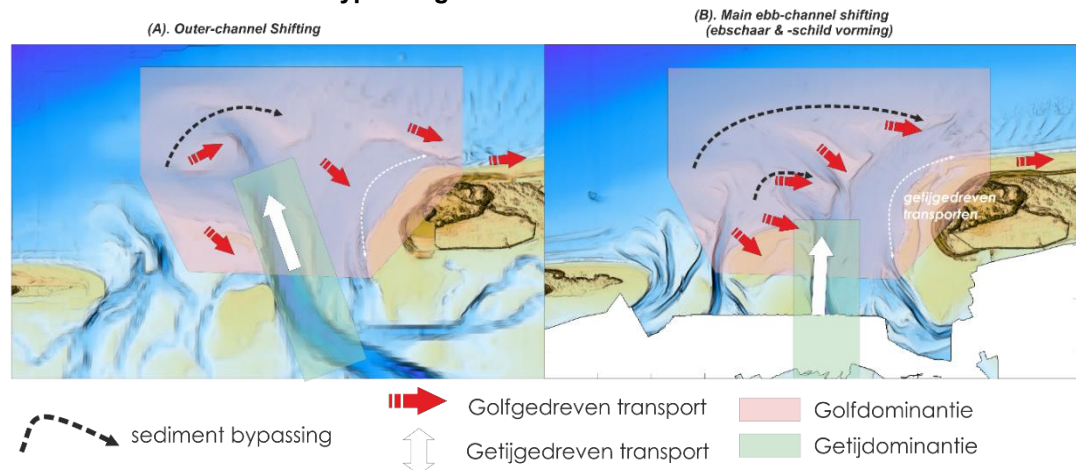
Naast deze langzame variatie in de hoofdgeul zijn ook variaties in de (kleinschaligere) geulbankverplaatsingen te zien. Deze variaties kunnen beschreven worden door de conceptuele modellen van outer channel shifting en main ebb channel shifting (zie het kader met daarin Figuur 2-9, ontleend aan Elias en Oost, 2020, zie ook Figuur 2-11 in paragraaf 2.3.3).



Figuur 2-8 Conceptuele weergave van het morfologische gedrag van de Zoutkamperlaag. Een schematische tijdslijn van de geulconfiguraties (groen: één-geulconfiguratie; rood: meergeulenconfiguratie) en de duur en het belangrijkste mechanisme voor de geuldynamiek en de vorming en verplaatsing van ondieptes naar de kust van Schiermonnikoog (Outer channel shifting = A en Main ebb channel shifting = B). Uit Elias en Oost (2020).

Door het optreden van verschillende mechanismen varieert de omvang van de aangelande zandplaten op de kust van Schiermonnikoog. Net als beschreven voor de dynamiek van het Pinkegat vertoont de geulontwikkeling in het zeegat en op de buitendelta een patroon dat primair deterministisch is, maar door de stochastische processen onregelmatigheden bevat.

## Twee mechanismen voor 'bypassing' van zand over de buitendelta:

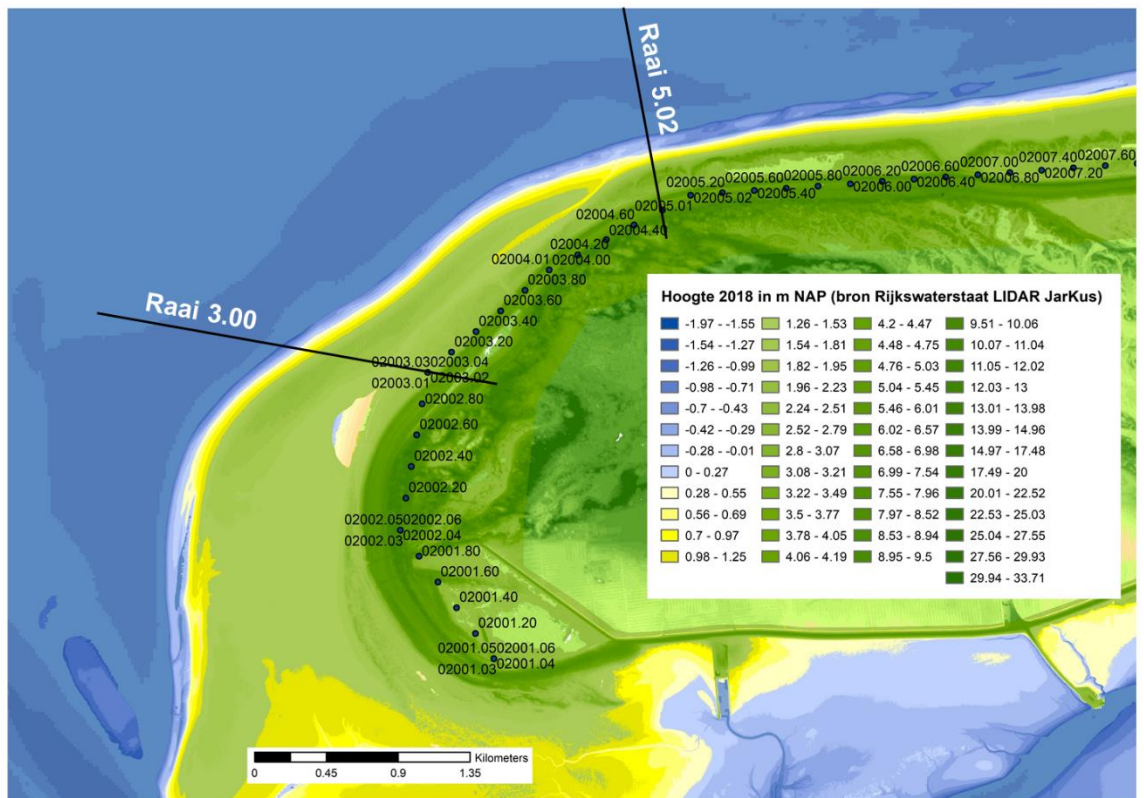
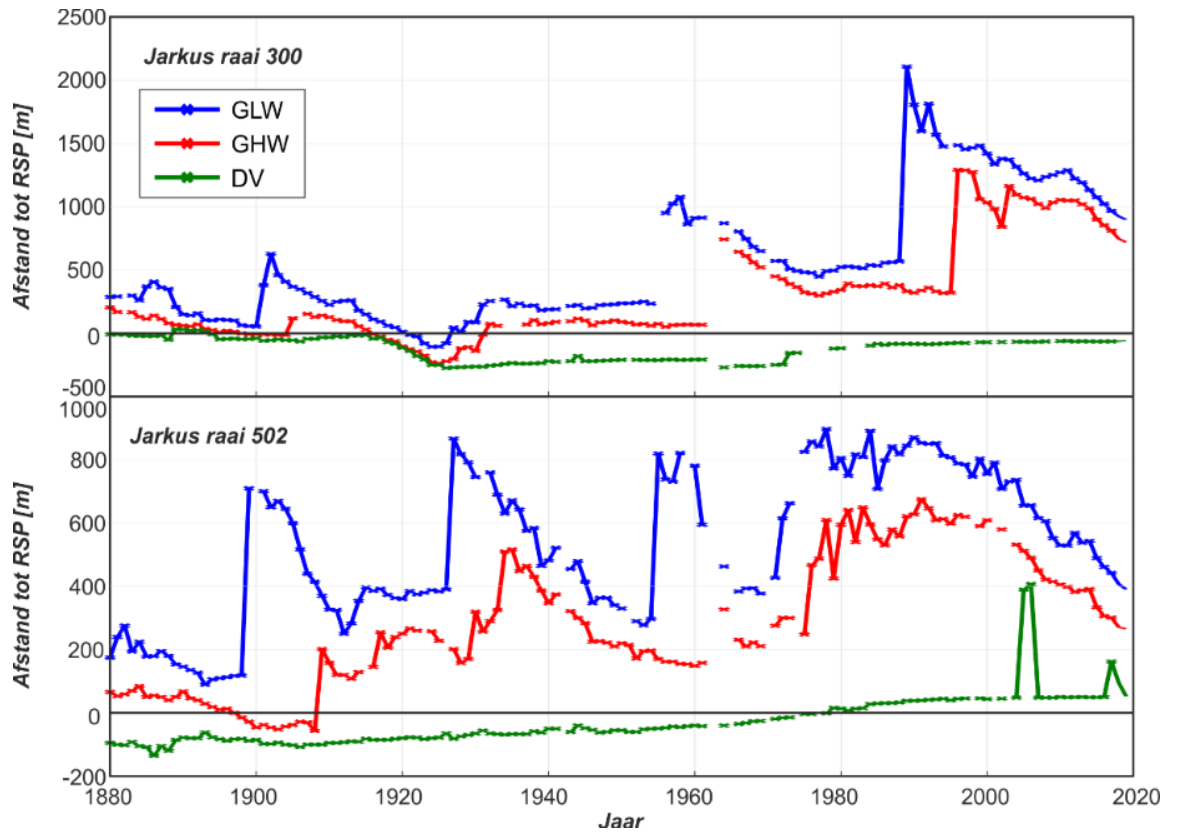


Figuur 2-9 Schematische weergaven van de processen van Outer-channel shifting (links) en Main-ebb channel shifting (rechts), beide in een één-geulsituatie (uit Elias en Oost, 2020).

1. Outer-channel shifting (geuluitstroom verplaatsing): Het landwaartse en centrale deel van de hoofdgeul (Zoutkamperlaag geul) blijft stabiel. De uitstroom van de hoofdgeul roteert kloksgewijs. Deze rotatie wordt geïnitieerd door de vorming van banken aan de benedenstroomse (west)zijde. Onder invloed van golven migreren de banken oostwaarts en drukken daarbij het zeewaartse deel van de ebgeul oostwaarts. Met oostwaartse verplaatsing wordt deze geul minder efficiënt en op een gegeven moment vormt er een nieuwe uitstroming (ebschaar) aan de westelijke (bovenstroomse) zijde van de bank, waarna het proces opnieuw start.
2. Main ebb-channel shifting (hoofdgeul verplaatsing): de vorming, groei en verplaatsing van een ebschild aan de zeewaartse zijde van de hoofdgeul en de verplaatsing van hoofdgeul met het ebschild van west naar oost.

Het belangrijke verschil tussen de twee mechanismen is de zeewaartse extensie van de hoofdgeul. Bij outer-channel shifting strekt de geul zich ver uit. De dominante morfologische veranderingen treden dan op het zeewaartse deel van de buitendelta op en het centrale deel van de buitendelta is relatief stabiel. Bij main ebb-channel shifting blijft eigenlijk alleen de keel stabiel en vrijwel de gehele buitendelta is dan aan verandering onderhevig.

De uitwisseling van zand tussen buitendelta en kust is in een plot van de kustlijnligging duidelijk terug te zien (Figuur 2-10). Deze figuur geeft de ligging van de kustlijnen voor raaien 300 en 502 weer. Tot 1967 vindt een zekere herhaling in de plaataanlandingen plaats met een aanlanding om de 25 tot 35 jaar. De plaataanlandingen vinden dus plaats op een ongeveer gelijke tijdschaal als de verplaatsingen van de geuluitstroming. De aanlanding rond 1980 wijkt hier van af. Deze zeer grote aanlanding wordt veroorzaakt door de aanlanding van de Strandhaak die is ontstaan na de afsluiting van de Lauwerszee. Deze strandhaak heeft de periodiciteit van de plaataanlandingen verstoort.



Figuur 2-10 Ontwikkeling van strandlijnen van raai 300 en raai 502 op Schiermonnikoog voor Gemiddeld Laag Water (GLW), Gemiddeld Hoog Water (GHW) en de DuinVoet (DV) over de periode 1880-2019. Kaart met de ligging van de raaien. (Elias en Oost, 2020).

Niet alleen op de buitendelta, maar ook in het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag laat de hoofdgeul voor de afsluiting van de Lauwerszee een herhalend patroon zien. Gedurende korte perioden is er sprake van een enkele hoofdgeul die de drainage verzorgd (1832, 1949). Buiten die perioden ligt er een vloedschaar aan de westzijde van de geul die zowel door de eb- als de vloedstroom wordt gebruikt (Postema, 1956; bijv. 1832-1859, 1927-1934). De vloedschaar dient vooral voor de aanvoer richting Lauwerszee. De meer oostelijke geul draineert zowel het gebied boven Groningen als de Lauwerszee. Tussen deze geulen wordt een (intergetijde)plaat gevormd die in toenemende mate langgerekt wordt (1806, 1859-1927). Uiteindelijk raakt de westelijke geul verlaten en wordt opgevuld (1806-1832, 1927-1949). Dit leidt opnieuw tot een situatie met een enkele geul. Deze ontwikkelingen in het kombergingsgebied zijn nauw gerelateerd zijn aan de ontwikkelingen op de buitendelta.

### 2.3.3 Evolutie na 1969

De ontwikkelingen sinds 1969 in het gehele kombergingsgebied van het Friesche zeegat zijn in belangrijke mate bepaald door de afsluiting van de Lauwerszee in dat jaar (Oost, 1995a; Biegel en Hoekstra, 1995). De afsluiting verkleinde het bekkenoppervlakte met ongeveer 30%, waardoor het getijprisma afnam met 35%, van 306 naar 200 miljoen m<sup>3</sup> (Oost 1995). De grote afname van getijprisma was een belangrijke oorzaak van de sterke morfologische veranderingen. Er hoort immers een ander morfologisch evenwicht bij het verkleinde prisma. De geulen in het kombergingsgebied waren te ruim voor de kleinere getijdebieten waardoor de stroomsnelheden afnamen. In reactie op de lagere stroomsnelheden begon de hoofdgeul op te vullen. In de buurt van de Lauwerszeedam gebeurde dat met slib. Halverwege de geul gebeurde dat met een mengsel van slib (zomer half jaar) en zand (winter half jaar). In de buurt van het zeegat kwam er zand (Oost, 1995a). De buitendelta, die eveneens te groot was voor het nieuwe getijdeprisma vormde een de belangrijkste bron van zand hiervoor.

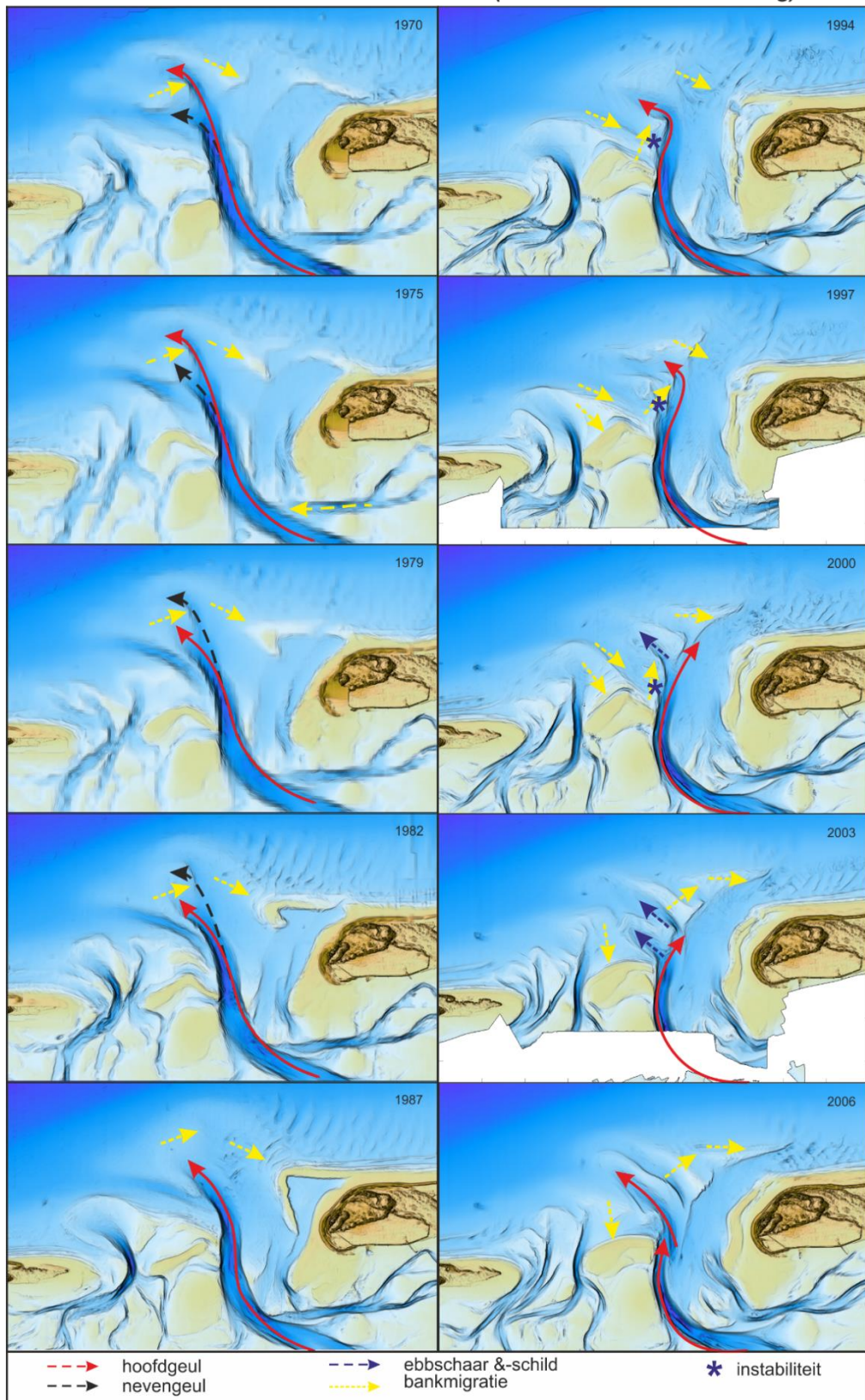
De afsluiting van de Lauwerszee had ook tot gevolg dat de getijstrooming in andere delen sterker kon binnendringen, want de hoofdgeul had nog de ruime dimensies van voor de afsluiting. De vloed kon vanwege de te ruime geulen vrij snel doorstromen naar het wantij zuidelijk van Schiermonnikoog, in het bijzonder bij het vasteland. Het wantij verschoof zo over meerdere kilometers naar het oosten. Tegelijk met deze instantane verandering van de waterbeweging begon de hiervoor beschreven, veel tragere, opvulling van de geulen. Gestaag nam hierdoor de weerstand voor de getijstrooming weer toe. Dit is allemaal onderdeel van de evolutie van de geul naar een nieuw evenwicht tussen erosie/sedimentatie en stroomsnelheden. De toegenomen wrijving zorgde er ook voor dat de vloed minder 'snel kon lopen' naar het wantij, wat vervolgens deels weer terugschoof in westelijke richting.

Op de buitendelta vindt na afsluiting van de Lauwerszee tussen 1970 en 1987 eerst een sediment bypassing proces plaats dat conceptueel beschreven kan worden als outer-channel shifting (zie kader in 2.3.2 en de linker serie kaarten in Figuur 2-11). Bij outer-channel shifting roteert de uitstroom van de hoofdgeul kloksgewijs, geïnitieerd door de vorming van banken aan de westzijde. Onder invloed van golven migreren de banken oostwaarts en deze drukken daarbij het zeewaartse deel van de ebgeul naar het oosten. Met oostwaartse verplaatsing wordt deze geul minder efficiënt en op een gegeven moment vormt aan de westzijde een nieuwe ebschaar. In 1970 is zo'n ebschaar al gevormd en tussen 1970-1987 groeit deze dan uit tot de nieuwe hoofdgeul.



(A). Outer-channel shifting

(B). Main ebb-channel shifting  
(ebschaar & -schild vorming)



Figuur 2-11 Het optreden van Outer channel shifting (links) en main ebb-channel shifting (rechts) op de buitendelta van het Zoutkammerlaag zeegat.

Na 1987 verandert het mechanisme en tussen 1987 en 2006 vindt sediment bypassing plaats via main ebb-channel shifting (kader in 2.3.2 en de rechter serie kaarten in Figuur 2-11). In deze periode is één grote hoofgeul aanwezig en ontstaan er kleine ebschaar en -schild systemen aan de bovenstroomse zijde. Deze ontwikkeling is vrijwel identiek aan de recente ontwikkeling van het Zeegat van Ameland (Elias et al. 2019).

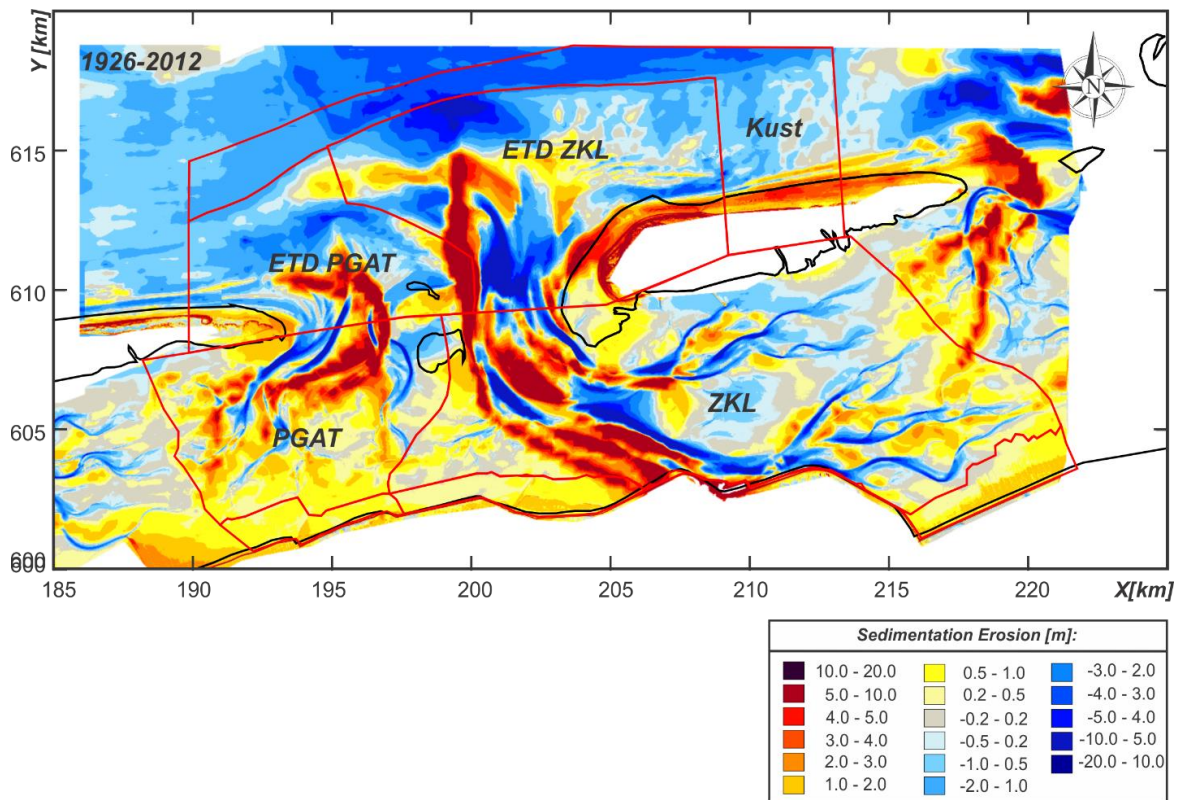
Waarschijnlijk speelt de vorm van Het Rif en de zandaanvoer van de buitendelta van het Pinkegat een belangrijke rol in de overgang van outer-channel shifting naar main ebb-channel shifting en omgekeerd. De ontwikkeling van de secundaire banken hangt samen met de zandtoevoer vanaf het zeegat van het Pinkegat. Langs de zeewaartse zijde van Het Rif kan een grote zandtoevoer richting de Zoutkamperlaag geul plaatsvinden, waardoor een ondiepe, langgerekte bank langs de bovenstroomse zijde van de geul wordt gevormd. Op deze bank ontwikkelen zich instabiliteiten, die kunnen uitgroeien tot een kleine geul (ebschaar) en bijbehorende bank (ebschild). Deze ebschaar neemt een gedeelte van het debiet van de hoofgeul over. De oude uitstroom van de hoofdgeul neemt dan in belang af en het buitendelta front trekt zich landwaarts terug. Het ebschild van de nieuwe uitstroom verplaatst zich verder zeewaarts en groeit. Door golven wordt dit ebschild dan oostwaarts gedrukt waardoor het de oude hoofdgeul dicht begint te drukken. Dit versterkt de groei van de nieuwe eidgeul. Met een zeewaartse migratie van de nieuwe eidgeul ontstaat opnieuw ruimte voor de vorming van een nieuwe instabiliteit, die dan weer kan uitgroeien tot een nieuw systeem van ebschaar en -schild.

Tussen 1994 en 2006 zien we de vorming van drie van deze cycli. Na iedere cyclus blijft het ebschild achter op de benedenstroomse zijde van het buitendeltaplatform. Deze banken worden door golven landwaarts verplaatst. Een deel van het sediment migreert langs het buitendelta front landwaarts en verheelt aan de noordzijde van eilandkop met de kust van Schiermonnikoog. Een deel verplaatst over het platform zuidoostwaarts richting het centrale deel van de eilandkop. Door geulvorming wordt dit sediment in langsrichting afgevoerd. De exacte mechanismen waarom de instabiliteiten zich vormen en waarom ze soms wel of niet uitgroeien als ebschild en -schaar systeem zijn nog niet geheel bekend (Elias en Oost, 2020).

De meest recente ontwikkelingen (2009 - 2019) op de buitendelta verlopen weer iets anders. Net als in de voorgaande periode ontwikkelen kleine ebschaar en -schild systemen, maar in deze periode blijft de hoofdgeul juist behouden. De hoofdgeul ontwikkelt zich nu als dominante geul op de buitendelta (2009-2015), die na 2015 splitst in een ebdominant en een vloeddominant deel gescheiden door een ondiepe rug. De Zoutkamperlaag heeft dan een uitstroom net ten noorden van Het Rif. Oostelijk hiervan ligt dan een diepe geul met een vrijwel noord-zuid oriëntatie, zodat nu weer sprake lijkt te zijn van een 2-geulensysteem.

## 2.4 Ontwikkelingen in de sedimentbalans

De basis voor deze sectie is de recente uitgebreide analyse van , die de sedimentbalans van de hele Waddenzee voor de periode 1927-2019 geeft. Na een uitgebreide analyse van de methoden om tot de trendlijn voor volumeontwikkeling te komen valt de keuze op een methode en periode op het niveau van een deelgebied. De deelgebieden zijn op basis van expert-judgement gekozen. De gegevens die voor die studie zijn gebruikt voor de kombergingsgebieden van het Friesche Zeegat lopen tot en met de vaklodingen van 2012. Om de ontwikkelingen na 2012 ook in beeld te krijgen is door ) de Vaklodingen-dataset van 1989 tot en met 2019 gebruikt om de volumes in beeld te brengen. De ontwikkelingen worden hier in beeld gebracht in Figuur 2-13 (uit Elias, 2019) en Figuur 2-14 (uit Van der Lugt et al., 2020). Voor meer details wordt verwezen naar bijlage B van Elias (2019), waarin de trends per deelgebied zijn opgenomen. Hieronder volgt het algemene beeld per kombergingsgebied.



Figuur 2-12 Overzicht van de sedimentatie en erosie in het Friesche Zeegat voor de periode 1926-2012 (Elias, 2019).

Voor het **Pinkegat** laten de figuren zien dat er overheersend sedimentatie moet zijn geweest. Oost (1995a) bepaalde die op circa  $38 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  in de periode 1927-1967, en ca.  $11 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  in de periode 1967-1987. Figuur 2-13 uit Elias (2019) geeft een trend over de hele periode 1926-2015 van gemiddeld  $0,46 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ . Figuur 2-13 suggereert dat de toename van de sedimentvolumes doorging tot ca. 1975. De reeks van 1989 tot en met 2019 Figuur 2-14, laat zien dat in de laatste twee opnames sprake is van een beperkte toename van de sedimentvolumes. Zonder die opnames zou de suggestie kunnen worden gedaan dat er sinds 1989 een licht erosieve trend was in de vloedkom van het Pinkegat, maar dat is hiermee in perspectief geplaatst. De volumeontwikkeling voor het Pinkegat wordt best beschreven als een relatief grote toename in de periode 1926-1975, gevolgd door een periode van stabiliteit.

De sedimentatie in 1926-2015 was met ca. 6,8 mm/jaar veel meer is dan de gemiddelde zeespiegelstijging (1,9 mm/jaar). Die grotere sedimentatie is waarschijnlijk het gevolg van een afname van het getijprisma waardoor de getijdegeulen van het Pinkegat afnamen in dimensies. Die afname van het getijprisma had de oorzaak in de oostwaartse verschuiving van het wantij onder Ameland in de periode 1927-1949. Die verschuiving wordt weer verklaard door de afsluiting van de Zuiderzee (Oost, 1995a).

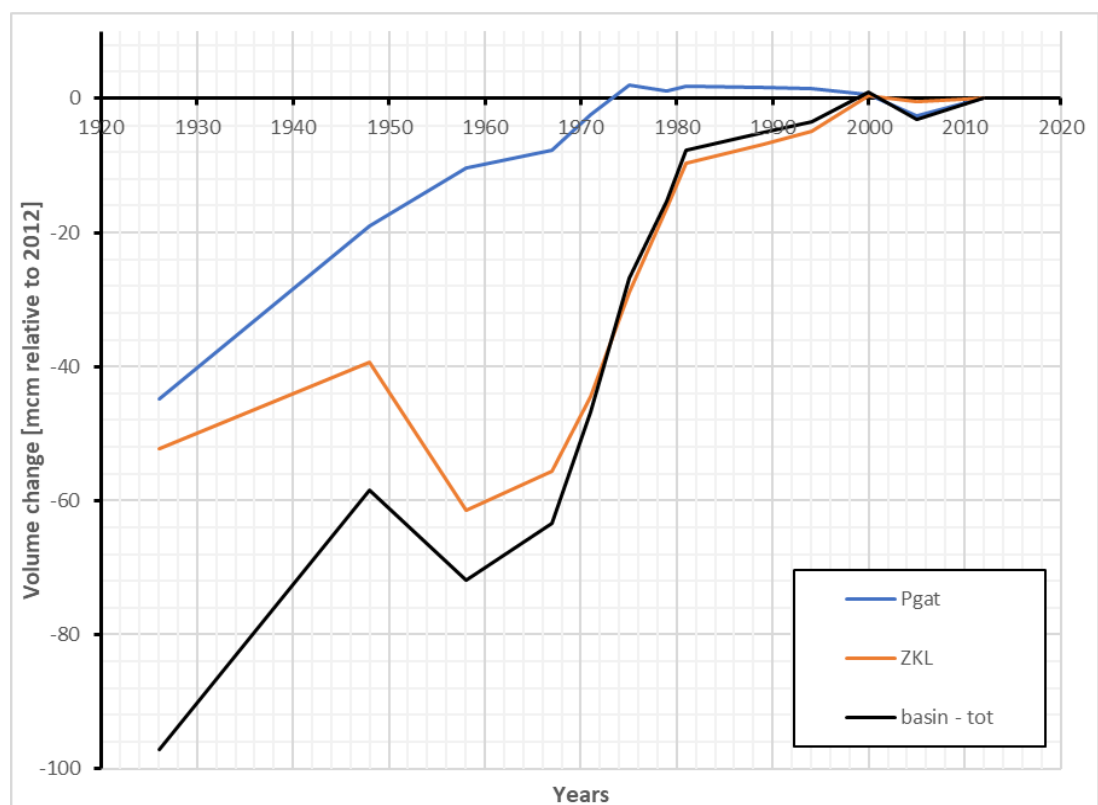
Het sedimentvolume van het kombergingsgebied van de **Zoutkamperlaag** heeft trends van  $1,37 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$  over de periode 1926-2015 en  $0,21 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$  over periode 1989-2015. Dit past bij Figuur 2-12, waarin sedimentatie lijkt te overheersen. In 2.3 wordt de grote en snelle sedimentatie na de afsluiting van de Lauwerszee beschreven. Voor de forse fluctuaties in het sedimentvolume voor 1969 die Figuur 2-13 laat zien is er geen sluitende verklaring. Veranderingen voorafgaand aan de daadwerkelijke afsluiting kunnen een rol spelen, maar het is ook mogelijk dat geulen en wadplaten in- en uit het kuberingsgebied zijn geschoven.

Figuur 2-13 suggereert ook dat de periode met grote sedimentatie na de afsluiting van de Lauwerszee tot begin jaren '80 heeft geduurd. Daarna is er nog steeds sprake van sedimentatie, maar veel minder omvangrijk. Figuur 2-14 laat zien dat ook tegenwoordig nog sprake is van netto sedimentatie in de Zoutkamperlaag.

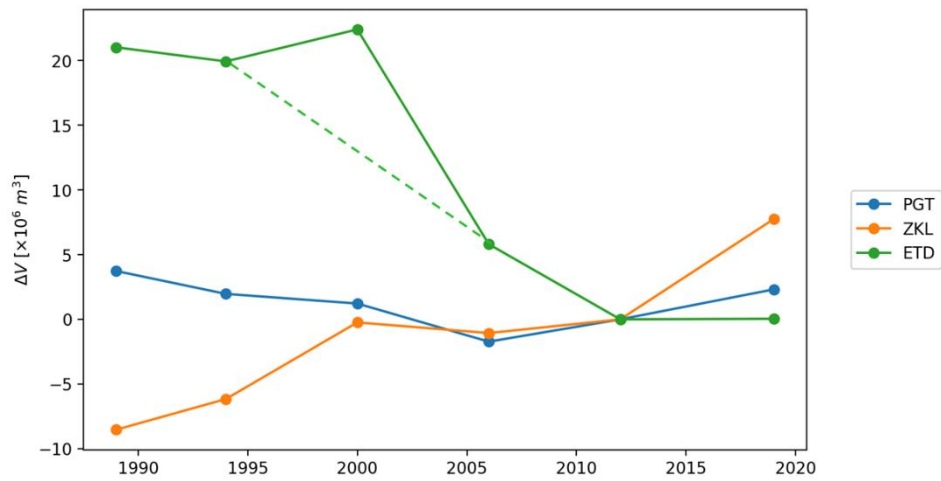
Tabel 2-2 Trends in sedimentatie in de kombergingsgebieden voor twee perioden (Elias, 2019)

	Trends (Mm <sup>3</sup> /jaar)	
	1926/2015	1989/2015
Pinkegat	0,46	-0,28
Zoutkamperlaag	1,37	0,21

Tegenover de sedimentatie in het kombergingsgebied staat een ongeveer vergelijkbaar sedimentverlies in de buitendelta van de Zoutkamperlaag tussen 1967 en 2012 van 55 miljoen m<sup>3</sup> (Elias & Oost, 2020). Dit is een veel sterkere trend dan in de periode ervoor. Het achterliggende mechanisme is de afname van de ebstream door de afsluiting. Hierdoor werden golven relatief dominant en werd zand geleidelijk landwaarts verplaatst. Het zandverlies van de buitendelta vond vooral plaats in delen die NAP-10 m lagen. Mogelijk worden veranderingen op dieper water nog steeds voortgezet als reactie op de sluiting van de Lauwerszee, want de processen verlopen op die diepte langzamer door de zwakkere invloed van golven (Oost et al., 2015). Het is zeer aannemelijk dat een belangrijk deel van het zand in het kombergingsgebied tot afzetting is gekomen, hoewel een deel van de sedimenttoename in het kombergingsgebied door slib is gebeurd. Het andere deel van het zand is vanuit de buitendelta getransporteerd naar Schiermonnikoog (zie 2.3.1)



Figuur 2-13 Lange termijn ontwikkeling sedimentvolume Pinkegat, Zoutkamperlaag en Friesche Zeegat (Elias, 2018).



Figuur 2-14 Recente ontwikkeling volume in miljoenen kubieke meters. PGT=vloedkom Pinkegat; ZKL=vloedkom Zoutkamperlaag; ETD- Buitendelta Friesche zeegat. De groene stippellijn corrigeert voor de uitschieter in 2000, waarschijnlijk veroorzaakt door een probleem met de gegevens (uit van der Lugt et al., 2020).

## 3 Hydrodynamica

### 3.1 Inleiding

De waterbeweging van de twee kombergingsgebieden wordt gedomineerd door het getij, dat twee keer per dag de 'vloedkommen' vult en ledigt. Op de lange termijn veranderen de waterstanden als gevolg van de relatieve zeespiegelstijging, zie hiervoor paragraaf 3.2. De doortij-springtijcyclus en de invloed op de hoog- en laagwaterstanden staan in paragraaf 3.3. De rol van de meteorologische condities, onder andere via de golven en windgedreven stroming, bij de morfodynamiek staat in paragraaf 3.4. De spuisluizen tussen het Lauwersmeer en de Zoutkamperlaag zijn een belangrijke aanvoerbron voor zoetwater in de Waddenzee, wat wordt toegelicht in paragraaf 3.5.

### 3.2 Zeespiegelstijging

De waterstanden zijn niet in het gehele gebied hetzelfde door stuwning van het water, getij karakteristieken en morfologische effecten. Als de waarden van de kenmerkende waterstanden gemiddelde zeeniveau, hoogwater en laagwater van de verschillende meetstation in een kaart worden geplott, dan vormen deze hellende vlakken<sup>5</sup>. In Tabel 3-1 wordt een overzicht gegeven van de 2011 slotgemiddelden voor gemiddelde zeeniveau, en het gemiddelde hoogwater en laagwater. Op een langere tijdschaal van tientallen jaren (in ieder geval langer dan de periode van langjarige fluctuaties in het getij, zoals de 18,6 jarige cyclus) is uit de metingen van de waterstanden vast te stellen dat sprake is van zeespiegelstijging. In Figuur 3-1 zijn de jaargemiddelde laag- en hoogwaterstanden zoals die zijn gemeten in Schiermonnikoog weergegeven en hierin is een kleine stijging van beide waarneembaar. In de grafiek is geen sprong zichtbaar in de periode na de afsluiting van de Lauwerszee, omdat deze afsluiting niet heeft geleid tot een verandering van de voortplanting van get getij in bekken (dit in tegenstelling tot de situatie bij de afsluiting van de Zuiderzee). In de Zeespiegelmonitor 2018 (Baart et al., 2019) is een overzicht gegeven van de methoden om te komen tot betrouwbare bepaling van de stijgingssnelheden. Baart et al. (2019) geven de zeespiegeltrends voor de hoofdstations langs de Nederlandse kust, waarvan Harlingen en Delfzijl de dichtstbijzijnde zijn. Voor de waterstandsstations in en rond het Friesche Zeegat zijn de stijgingssnelheden ontleend aan een eerdere analyse van Dillingh (2013a en b) en opgenomen in Tabel 3-1.

Tabel 3-1 Overzicht van de slotgemiddelde waterstanden 2011 (Dillingh, 2013a) en de gemiddelde stijgingen (Dillingh, 2013b).

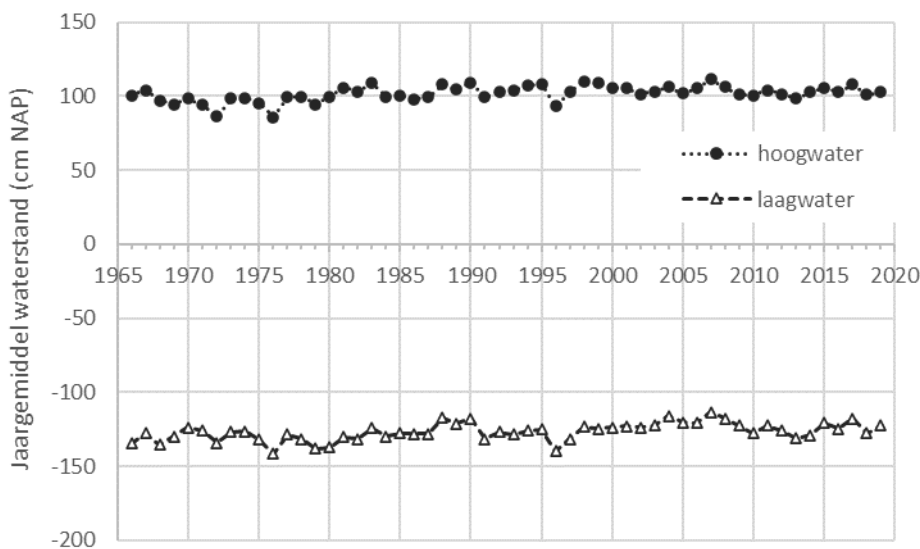
Station	Periode	Gemiddeld Zeeniveau		Gemiddeld Hoogwater		Gemiddeld Laagwater	
		Niveau (cm NAP)	Stijgsnelheid (cm/eeuw)	Niveau (cm NAP)	Stijgsnelheid (cm/eeuw)	Niveau (cm NAP)	Stijgsnelheid (cm/eeuw)
Wierumergronden		+1		+93		-108	
Schiermonnikoog	1971-2010	+5	30	+105	24	-123	28
Nes, Ameland	1971-2010	+8	25	+106	23	-116	27
Lauwersoog	1971-2010	+4	27	+106	27	-126	14

<sup>5</sup> Dit is een denkbeeldige situatie, omdat de momenten van hoog- en laagwater niet op dezelfde moment optreden.

### 3.3 Getij

Het getij weergegeven met het gemiddelde hoogwater en laagwater doet weinig recht aan de variaties die optreden met spring- en doortij en de bijbehorende getijverschillen en daarom zijn deze opgenomen in Tabel 3-2. Voor de ecologie en morfologie zijn ook de duur van de rijzing en daling van belang om dat deze de getijasymmetrie bepalen en daarmee van invloed zijn op de snelheid van droogvallen en onderstromen en voor het transport van het sediment.

Daarnaast zijn van belang het tijdsverschil tussen HW en LW in de keel van het zeegat en op de wantijen (Tabel 3-3). De waarden die hier zijn getoond hebben steeds betrekking op het astronomische getij: Dit is het getij zoals dat wordt veroorzaakt door de forcering door de maan en de zon, maar zonder invloed van wind, golven en de aanvoer van zoetwater.



Figuur 3-1 Jaargemiddelde waterstanden bij station Schiermonnikoog (gegevens Rijkswaterstaat CIV).

Voor de morfologie zijn de gecombineerde grootheden van het getij en de morfologie van belang, te weten het getijprisma en natte oppervlak (Tabel 3-4). Het getijprisma is berekend uit de bathymetrie van het kombergingsgebied in combinatie met de getijdeslag. Dit leidt tot een overschatting van ca. 10% t.o.v. getijprisma-metingen ten gevolge van traagheid van het getijwater.

Tabel 3-2 Karakteristieken van het getij: duur daling en stijging in uren en minuten; gegevens slotgemiddelde 2011 in cm (t.o.v. NAP) (Rijkswaterstaat, 2013).

	Wierumergronden	Schiermonnikoog	Nes, Ameland	Lauwersoog
Duur daling	05:26	05:26	06:10	06:10
Duur stijging	05:59	05:59	06:15	06:15
Gemiddeld Zeeniveau	1	5	8	4
Gemiddeld Laagwater	-108	-123	-116	-126
Gemiddeld Hoogwater	93	105	106	106
Gemiddeld Tijverschil	201	227	222	232
Gemiddeld Springtij Laagwater	-123	-138	-133	-142
Gemiddeld Springtij Hoogwater	105	118	119	119
Gemiddeld Springtij Tijverschil	228	256	252	261
Gemiddeld Doodtij Laagwater	-88	-100	-94	-102
Gemiddeld Doodtij Hoogwater	73	86	88	87
Gemiddeld Doodtij Tijverschil	161	186	182	189

Tabel 3-3 Tijdverschil in minuten voor hoogwater en laagwater t.o.v. keel Pinkegat voor 2015 (gebaseerd op *getij.rws.nl*)

	Hoogwater				Laagwater			
	Keel	Wantij Ameland	Wantij Engelsmanplaat	Wantij Schiermonnikoog	Keel	Wantij Ameland	Wantij Engelsmanplaat	Wantij Schiermonnikoog
Pinkegat	0	40	40		0	30	40	
Zoutkamperlaag	20		40	100	10		40	60

Tabel 3-4 Getijdegrootheden natte oppervlakte en getijprisma<sup>6</sup>

Gebied	Dimensies	Jaar	Bron bijzonderheden
“Natte” oppervlakte (AGHW), Pinkegat	65*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	Ca. 1982	Louters & Gerritsen, 1994
Getijprisma, Pinkegat	100*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Ca. 1982	Louters & Gerritsen, 1994
Vloedvolume Pinkegat voor maart zonder wind	93*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Situatie 2017 (modelberekening)	Vermaas & Elias, 2019
Ebvolume Pinkegat voor maart zonder wind	98*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Idem	Vermaas & Elias, 2019
“Natte” oppervlakte (AGHW), Zoutkamperlaag	130*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	1982	Biegel, 1992 Louters & Gerritsen, 1994
Getijprisma (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ), Zoutkamperlaag	193*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	1981	Louters & Gerritsen, 1994
Vloedvolume ZKL voor maart zonder wind	205*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Situatie 2017 (modelberekening)	Vermaas & Elias, 2019
Ebvolume ZKL voor maart zonder wind	200*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Idem	Vermaas & Elias, 2019

### 3.4 Wind, golven en stormvloedstanden

Naast het astronomische getij heeft de wind en golven invloed op de stroming in, naar en uit de Waddenzee. Dit betekent dat de in werkelijkheid gemeten waterstanden altijd afwijken van de astronomische waterstanden. Duran-Matute et al. (2014) laten voor de hele Waddenzee zien hoe de stroming en daarmee de uitwisseling van water door de zeegaten en over de wantijen afhankelijk zijn van wind en van de aanvoer van zoetwater door spuien. Specifiek voor de omgeving van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag is door Vermaas en Elias (2019) een overzicht gegeven van de stroming over het wantij onder verschillende meteorologische omstandigheden.

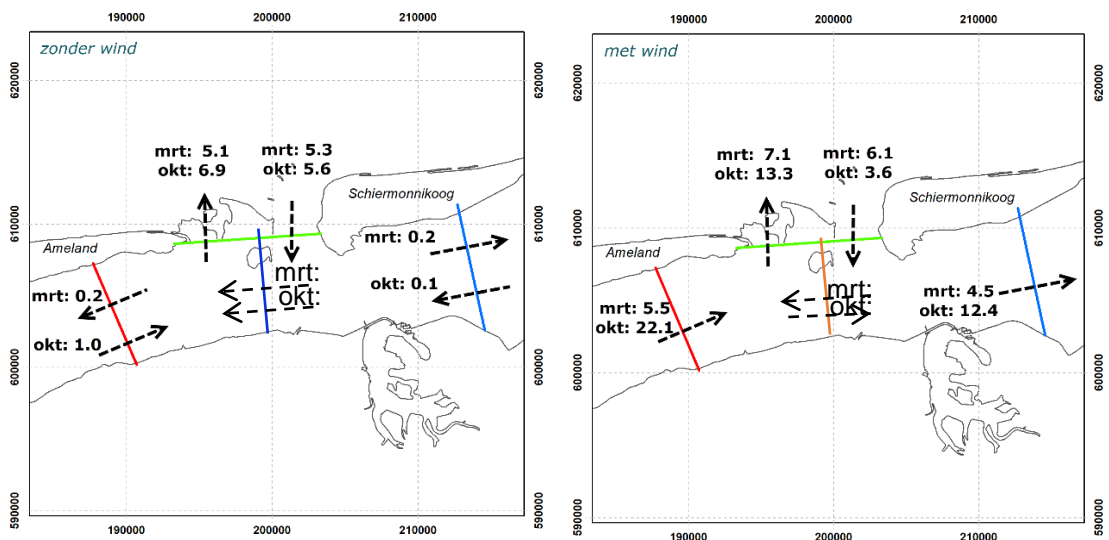
Weliswaar is het model dat Vermaas & Elias (2019) hebben gebruikt niet afgeregeld op de waterbeweging in de Waddenzee, maar het model geeft een eerste inzicht in de gevoeligheid van de watertransporten door de wind.

<sup>6</sup> Het getijprisma is berekend uit de bathymetrie van het kombergingsgebied in combinatie met de getijdeslag. Dit leidt tot een overschatting van ca. 10% t.o.v. getijprisma-metingen ten gevolge van traagheid van het getijwater.



De stroming in het gebied is sterk afhankelijk van de wind. Gemiddeld over heel 2017 genomen is de wind uit het westen dominant, wat een netto debiet naar het oosten veroorzaakt. (Vermaas & Elias, 2019; Zie ook Duran-Matute et al., 2016). Er zijn over het jaar periodes, zoals in maart, mei en juli, met een bovengemiddeld sterke wind uit het oosten waarin er weinig stroming is over de wantijen. In de 4 maanden na september treedt 2/3<sup>e</sup> van het netto oostwaartse debiet over het Amelander wantij op. Deze sterke stroming wordt veroorzaakt door de grotere windsnelheden in herfst en winter die een veel sterkere westelijke component hebben.

Om de invloed van wind over de seizoenen nog wat duidelijker te maken is op grond van een model berekend wat de netto debieten zijn tijdens één getij met en zonder wind (Figuur 3-2; Vermaas & Elias, 2019). In de berekening *met wind* is er een groot verschil te zien tussen de debieten in maart en oktober, vermoedelijk vooral door de verschillen in windsnelheden tussen beide maanden, maar mogelijk spelen verschillen in getij (doodtij/springtij) en setup ook een rol, dit is niet onderzocht. In maart is het netto debiet door de Zoutkamperlaag naar het kombergingsgebied. Dit is groter dan de uitstroom in oostelijke richting over het wantij onder Schiermonnikoog. Het overschot stroomt over het wantij van Engelsmanplaat/Rif in westelijke richting. Daar draagt het bij aan de netto uitstroom door het Pinkegat. In oktober is de westelijke stroming over de wantijen veel groter en stroomt het ook over het wantij van Engelsmanplaat/Rif in oostelijke richting. Een belangrijk deel van al dit water stroomt uit via het Pinkegat en de netto aanstroom door de Zoutkamperlaag is kleiner dan in maart (Vermaas & Elias, 2019).



Figuur 3-2 Getijgemiddelde netto debiet (in miljoen m<sup>3</sup> per getij) over het wantij bij Ameland, het Pinkegat, de Zoutkamperlaag en het wantij bij Schiermonnikoog, gebaseerd op het gedetailleerde model zonder en met wind (naar Vermaas & Elias, 2019). Op grond van deze debieten zijn ook debieten berekend over het wantij van Engelsmanplaat (oranje lijn). De balans is niet geheel sluitend als gevolg van afrondingen.

Voor de berekening met alleen getij en *zonder wind* zijn nog steeds relatief kleine verschillen te zien tussen de maanden maart en oktober. De verschillen zijn te klein om te weten of deze veroorzaakt worden door de afregeling van het model of dat dit werkelijke verschillen zijn. Het transport over de wantijen is veel kleiner voor de situatie zonder wind. De netto import door de Zoutkamperlaag en de export door het Pinkegat zijn vergelijkbaar. Bij situaties zonder wind is er een kleine netto stroming over het wantij van de Engelmanplaat/Rif in westelijke richting.

Dit verschil wordt veroorzaakt door de snellere propagatie van het getij door de Zoutkamperlaag. Weliswaar is het hoogwater iets eerder bij het Pinkegat aanwezig, maar het dringt daarna via de Zoutkamperlaag veel sneller naar binnen.

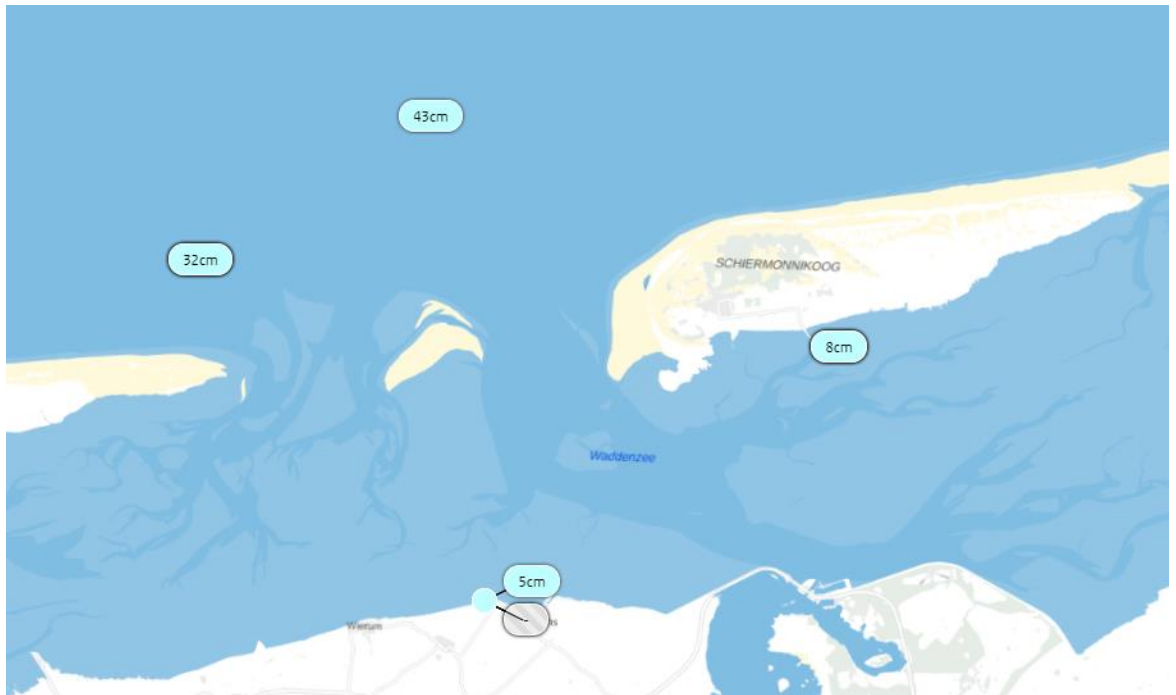
De berekende netto debieten zijn slechts een paar procent van de bruto in- en uitstroom. In maart is door het Pinkegat de instroom ca. 93 miljoen m<sup>3</sup> per getij en de uitstroom ca. 98 miljoen m<sup>3</sup> per getij, door de Zoutkamperlaag is de instroom ca. 205 miljoen m<sup>3</sup> per getij en de uitstroom ca. 200 miljoen m<sup>3</sup> per getij (Tabel 3-4; Vermaas & Elias, 2019). De reststromen maken duidelijk dat er een tendens is om de wantijen verder naar het oosten te verplaatsen, met name bij sterke westenwinden. Daarnaast is duidelijk dat onder vrijwel alle omstandigheden het Pinkegat een netto aanvoer van water kent over één of meerdere wantijen.

De karakteristieken van de golven in de Waddenzee worden enerzijds bepaald door de hoogte van de golven op de Noordzee en anderzijds door de reductie van de golfhoogte door de ondiepe bodem op de buitendelta en in de Waddenzee. De golfhoogte in de Waddenzee is daarom altijd laag ten opzichte van de golfhoogte op de Noordzee. De golfhoogte wordt op verschillende plekken gemeten in en rond het Friesche Zeegat, zoals aangegeven in Figuur 3-3. Langjarige meetreeksen van de golven op de Noordzee zijn beschikbaar en de golfkarakteristieken worden gegeven voor station Wierumergronden in Tabel 3-5. Tegenwoordig worden ook golfmetingen uitgevoerd op het Wierumerwad, maar hiervoor zijn nog geen langjarige statistieke beschikbaar. Een voorbeeld van de toename van de golfhoogte op het wad tijdens een storm is opgenomen in Figuur 3-4. In deze grafiek is zichtbaar dat de golfhoogte kan oplopen tot waarden tegen de 90 cm tijdens een storm, waar deze onder rustige omstandigheden tot de 10 cm oplopen. In de grafiek is ook zichtbaar dat er gedurende langere periodes geen golven aanwezig zijn en dat komt omdat onder rustige omstandigheden deze meetlocatie tijdens laagwater droogvalt.

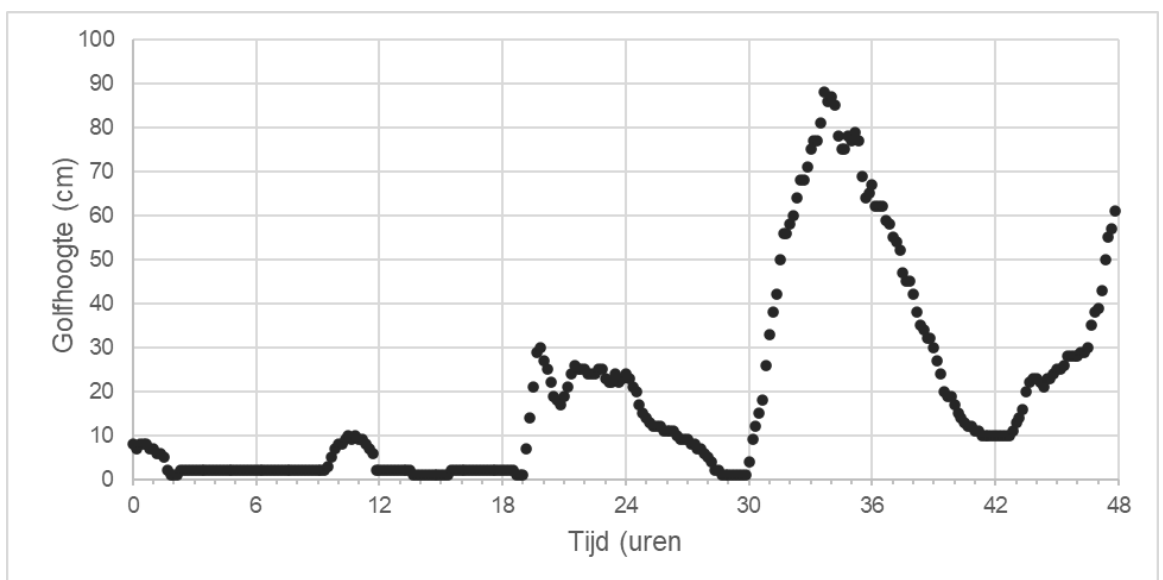
Bij stormen wordt het water in de Waddenzee tot grotere hoogten opgestuwd, waarbij de mate van opstuwing is gerelateerd aan de windsterkte, de windrichting, de duur van de storm en het pad dat de storm aflegt. Uit de statistiek van de opgetreden stormvloed wordt voor verschillende waterstanden de kans van optreden afgeleid, die wordt uitgedrukt als de herhaaltijd. De afgeleide waarden van de stormvloedhoogten voor diverse herhalings tijden staan ook in Tabel 3-5.

Tabel 3-5 Golf- en stormvloedkarakteristieken (hoogte t.o.v. NAP?).

Parameter	Observatie	Jaar	Bron
Significante golfhoogte Hs buitengaats	118 cm	1990 – 2012	Wierumergronden, Ridderinkhof, 2016
Gemiddelde piekperiode Tp (s) buitengaats	5,77 sec	1990 – 2012	Wierumergronden, Ridderinkhof, 2016
Stormvloedhoogte			Wierumergronden,
1:100 jaar	350 cm MAP	2011	Dillingh, 2013a
1:200 jaar	370 cm NAP	2011	idem
1:500 jaar	390 cm NAP	2011	idem



Figuur 3-3 Golfmeetlocaties in en rond het Friesche Zeegat, met daarbij weergegeven de gemeten de golfhoogte op de rustige zomerdag 20 augustus 2020, om 16.40 uur.



Figuur 3-4 Grafiek met de gemeten golfhoogte (gemiddelde per 10 minuten) op de locatie Wierumerwad tijdens de storm "Clara" op 9 en 10 februari 2020 (de locatie dicht bij de Friese vastlandskust in Figuur 3-3).

### 3.5 Aanvoer van zoetwater

Er zijn slechts op twee plekken bij het Friesche zeegat lozingspunten van zoetwater. Het betreft het (relatief kleine) lozingspunt van de polder op Schiermonnikoog iets oostelijk van de veerdam en de R.J. Cleveringsluizen in de Lauwersmeerdijk (een harde zoet-zoutgrens). Het hier gespuide water stroomt vooral af via de Zoutkamperlaag. De spuicapaciteit van de sluisen is circa 1900 m<sup>3</sup>/s (Termes & Eysink, 2005; Landstra & Venema, 2015). Per tijd wordt er gemiddeld 4 miljoen m<sup>3</sup> water geloosd, maar onder uitzonderlijke omstandigheden kan dit oplopen tot meer dan 10 miljoen m<sup>3</sup> (5% van het getijprisma in volume; van Hoorn et al., 2014). Bij hoge spuidebieten treden korte scherpe stoten van zoetwater op in de Waddenzee.

De uitstroom van zoetwater brengt stromingen op gang, in het bijzonder de estuariene circulatie. Het zoete water is lichter en stroomt over het zoute water van de Waddenzee heen. Dit is zichtbaar in Figuur 3-5. Tijdens het spuien breidt de spuistroom zich geleidelijk over een steeds groter oppervlak uit, waarbij de grootste concentratie van het zoete water eerst in noordelijke en daarna in noordwestelijke richting optreedt. Iets voor de laagwaterkentering bereikt de spuistroom de dijk westelijk van de uitwateringssluizen (Reenders, 1983). De satellietopname toont alleen de uitstroming aan het oppervlak. Aan de bodem wordt deze uitstroming gecompenseerd door een stroming de andere kant op. Estuariene circulatie treedt daardoor regelmatig op tijdens het spuien via de spuisluizen in de Lauwersmeerdijk.

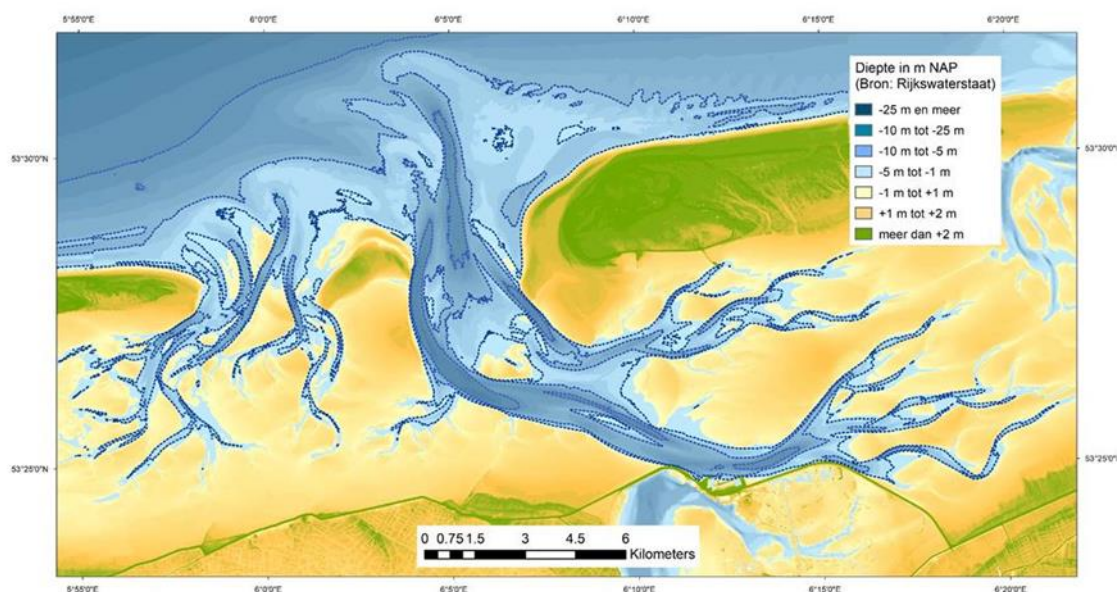
Over het belang van de estuariene circulatie voor de waterbeweging en het sedimenttransport in de Zoutkamperlaag zijn geen studies bekend, in tegenstelling tot het spuien vanuit het IJsselmeer. Vanwege de relatief grote omvang van het spuidebiet in verhouding tot het kombergingsgebied lijkt die invloed niet verwaarloosbaar. Hetzelfde geldt voor de eventuele invloed van het zoete water op de saliniteit in het kombergingsgebied en eventuele de gevolgen voor de ecologie.



*Figuur 3-5 Satellietopname van de uitstroom van zoetwater via de Clevering(a)-sluizen vanuit het Lauwersmeer naar het de Zoutkamperlaag (opname 15 februari 2019).*

## 4 Getijdegeulen

Waar zeer veel getijdewater heen en weer stroomt en de stroming hoge snelheden bereikt schuurt de bodem uit en vormen zich geulen. Deze getijdegeulen voeren niet alleen water aan, maar ook sediment en nutriënten. De geulen vertakken zich op vrij regelmatige wijze. Elke zijtak en 'zij-zijtak' voorziet een steeds kleiner deel van het gebied van water en draineert een bepaald gebied. Samen vormen de takken en de hoofdgeul een netwerk dat in de Waddenzee wel iets lijkt op een appelboom (Van Veen, 1950) als ervan bovenaf op wordt gekeken: het geulensysteem. Dit geldt voor het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag veel duidelijker dan voor het kombergingsgebied van het Pinkegat. Het Pinkegat heeft de vorm van een vertakkend 'struikje', met meerdere geulen in het zeegat (Figuur 4-1).



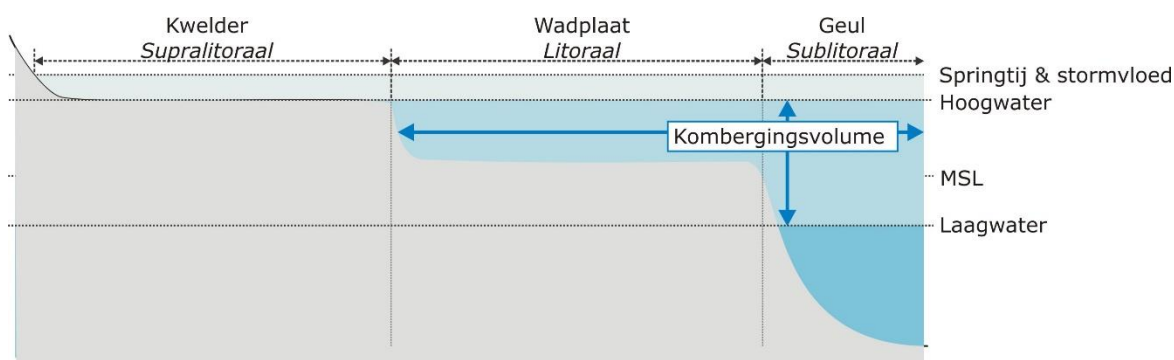
Figuur 4-1 Contouren van de geulen in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag in 2018 (contouren in cm NAP).

Dit hoofdstuk bespreekt een aantal kenmerkende veranderingen van de geulen. De omvang wordt gestuurd door de hoeveelheid water die er doorheen stroomt (paragraaf 4.1). Hier zit een belangrijke relatie met de langjarige ontwikkelingen op de grote ruimteschaal. De afsluiting van de Lauwerszee zorgde voor een grote reductie van het getijprisma (dus de hoeveelheid water die door de geul stroomt) en zo voor afname van de omvang van de hoofdgeul. De verplaatsing van het wantij onder Schiermonnikoog naar het oosten heeft geleid tot een uitbreiding van de kleinere geulen in de richting van het wantij. Paragraaf 4.2 bespreekt de geulen in het zeegat, met dynamiek die in belangrijke mate plaatsvindt op de buitendelta's. Het verschil in omvang van de systemen Pinkegat en de Zoutkamperlaag leidt tot verschil in de snelheid van de veranderingen. De kenmerkende ontwikkelingen van geulbochten en eb- en vloedcharen doen zich voor in alle geulen, van groot tot klein en deze zijn beschreven aan de hand van enkele voorbeelden in paragraaf 4.3 en 4.4. In de Zoutkamperlaag liggen twee geulen in het kombergingsgebied in de nabijheid van de dijk en de interactie tussen de geulontwikkelingen en ingrepen vanwege de waterkering leveren hier specifieke morfologische ontwikkelingen op die apart worden beschreven (paragraaf 4.6). Paragraaf 4.5 kijkt naar de overname van het stroomgebied van de ene geul door een andere geul. Ook dit is een mechanisme dat bij de grootste tot de kleinste geulen optreedt.

## 4.1 Geulomvang

De hoeveelheid getijdewater die door een geul stroomt wordt ruwweg bepaald door het kombergingsvolume (Figuur 4-2). Dit wordt berekend uit de oppervlakte van het kombergingsgebied, vermenigvuldigd met het getijverschil, minus de oppervlakte van de droogvallende platen, vermenigvuldigd met de gemiddelde hoogteligging van de platen<sup>7</sup>. Minder getijdewater betekent dat de natte doorsnede van de geul ook minder groot hoeft te zijn (voorbeeld in Figuur 4-3 en 4-4). Dat betekent dat veranderingen in het lokale getijprisma (bijvoorbeeld door verplaatsing van het wantij, concurrentie met andere geulen, sedimentatie en erosie op platen, veranderingen in areaal kwelders) morfologische veranderingen in de geulen tot gevolg hebben. Afhankelijk van de lokale condities kan sedimentatie in de geul plaatsvinden met zand, slib of een mengsel van de twee.

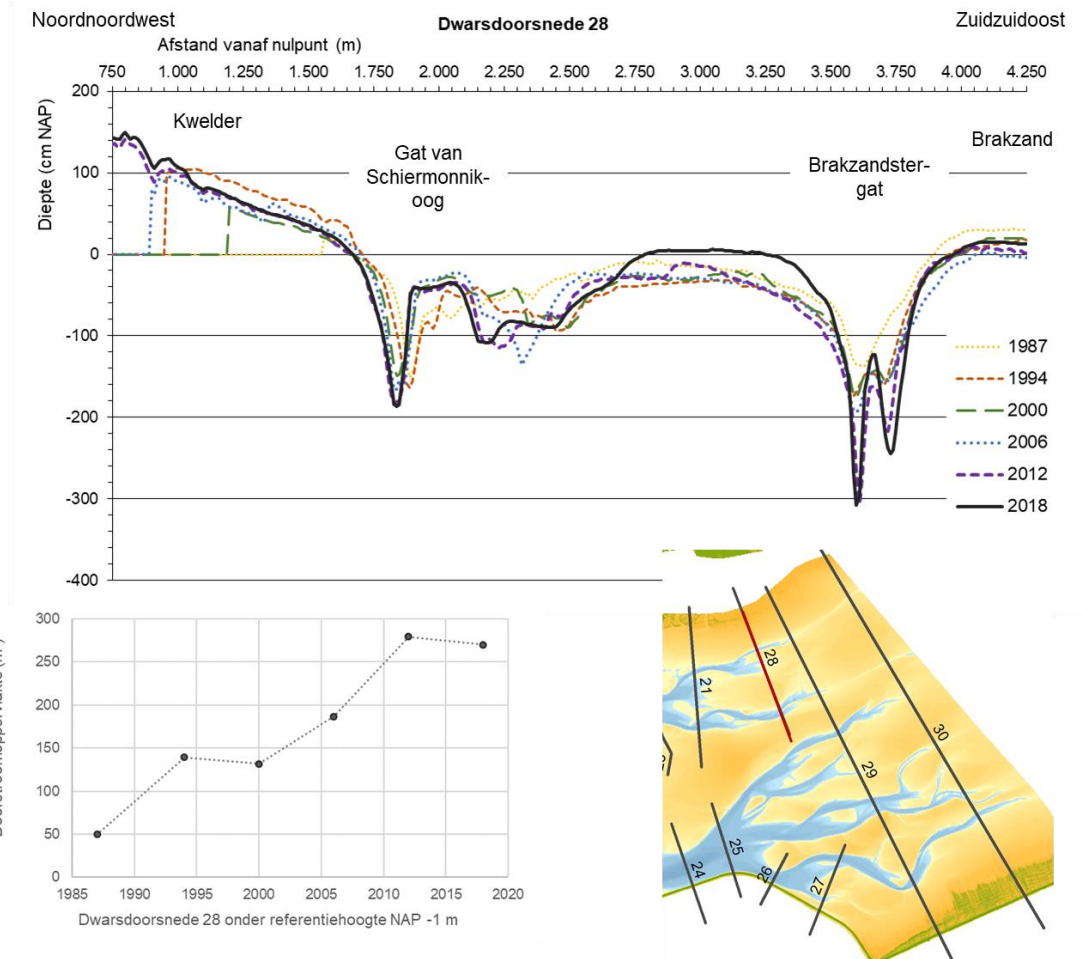
De afsluiting van de Lauwerszee in 1969 betekende een sterke afname van het getijprisma van de hoofdgeul. De afname tot 2/3 van het oorspronkelijke getijprisma leidde in de jaren daarna in netto sedimentatie en sterke afname van de omvang van de geul. Deze ontwikkeling van de Zoutkamperlaag is o.m. gedocumenteerd in Oost (1995b) en Biegel en Hoekstra (1995).



Figuur 4-2 Hoogte van geul, wadplaat en kwelder ten opzichte van het niveau van laag- en hoogwater en het kombergingsvolume (uit LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svašek-Arcadis, 2013).

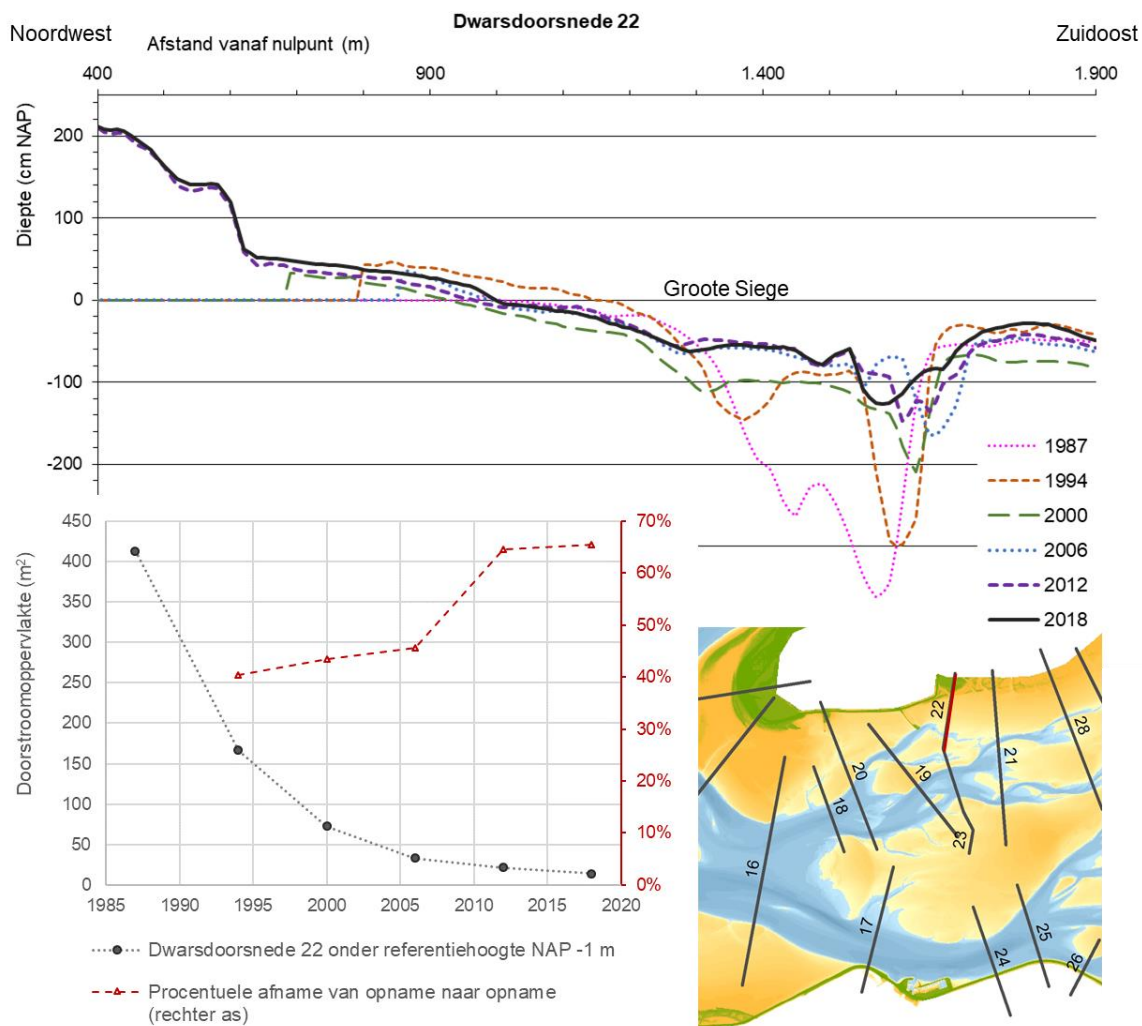
In de Waddenzee kan ook een toename van een kombergingsgebied en toename van de omvang van geulen optreden. In Figuur 4-3 is de ontwikkeling in dwarsdoorsnede en doorstroomoppervlakte te zien van twee geulen ten zuiden van Schiermonnikoog, van 1987 tot 2018. De toename is niet gelijkmatig en er zijn ook twee perioden, van 1994 tot 2000 en van 2013 tot 2019, met een kleine afname. De ontwikkeling wordt waarschijnlijk gestuurd door veranderingen in de ligging van het wantij ten zuiden van Schiermonnikoog. De verschuiving van dat wantij is te relateren aan de grootschalige veranderingen die zijn opgetreden na de afsluiting van de Lauwerszee. Met een oostelijker wantij is het kombergingsgebied (en daarmee het kombergingsvolume van de geulen) groter geworden.

<sup>7</sup> Helemaal correct is dat niet omdat nu eenmaal het water nog afstroomt tijdens eb terwijl de vloed alweer naar binnen komt: daardoor is het werkelijke volume dat heen en weer stroomt door een zeegat ongeveer 0,9\* het hierboven gegeven volume op basis van morfologie (Van Veen, 1950).



Figuur 4-3 Toename van de geulomvang van de geultjes Gat van Schiermonnikoog en Brakzandstergat ten zuiden van Schiermonnikoog.

In de nabijheid van de beide geultjes ligt de geul Groote Siege, waarvan de omvang juist is afgenomen. Omdat deze langs de veerdam bij Schiermonnikoog loopt en wordt gebruikt voor de veerverbinding is deze ontwikkeling van belang voor de bereikbaarheid. Figuur 4-4 toont de afname van de geul Groote Siege. Er is gekozen voor een dwarsdoorsnede ten oosten van de veerdam, die dus niet wordt gebruikt door de veerboot en daarom ook niet onderhouden wordt door baggeren. De ontwikkeling in Figuur 4-4 kan daarom worden beschouwd als de autonome ontwikkeling. Zichtbaar is dat de geul sinds de eerste opname in 1987 veel minder diep en breed is geworden. De doorstroomoppervlakte is afgenomen van meer dan 400 m<sup>2</sup> tot minder dan 50 m<sup>2</sup>. Het lijkt te gaan om een afname die in eerste instantie groot was en daarna steeds kleiner wordt. Echter, als naar de procentuele afname van vakloding naar vakloding wordt gekeken, blijkt dat naar verhouding de afname alleen maar groter is geworden van 40% naar meer dan 60%. Dit wijst op een afnemend getijdenbet dat niet in staat is de geul open te houden. Het is aannemelijk dat dit invloed heeft op het deel van de Groote Siege dat onderhouden moet worden voor de veerboot.



Figuur 4-4 Afname van de geulomvang van de geul Grootte Siege ten zuiden van Schiermonnikoog, iets ten oosten van de veerdam.

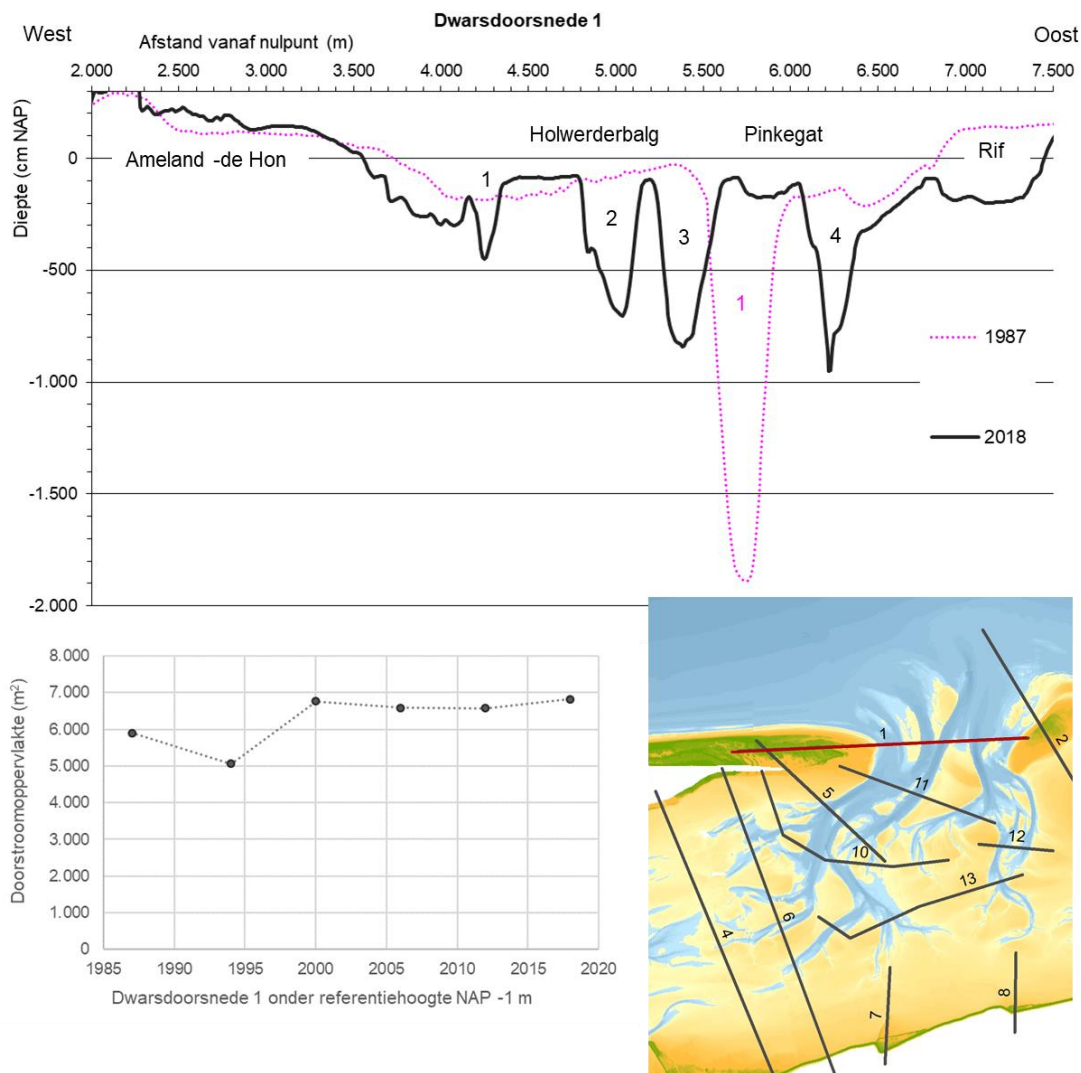
## 4.2 Grote en diepe geulen in de zeegeaten

Dwarsdoorsneden door de zeegeaten van het Pinkegat en van de Zoutkamperlaag staan in Figuur 4-5 en Figuur 4-6. Beide dwarsdoorsneden lopen door het diepste deel van het zeegeat. De dynamiek van de geulen op de buitendelta's is beschreven in paragraaf 2.2. Hier worden de verschillen in de omvang van de geulen en dynamiek getoond.

### *Pinkegat*

De configuratie van het Pinkegat is zeer dynamisch. In sommige jaren is sprake van één geul, in andere jaren van meerdere geulen. In Figuur 4-5 is de dwarsdoorsnede van 1987 met één relatief diepe geul te zien naast de situatie tijdens de meest recente bodemopname, met vier veel ondiepere geulen. Figuur 4-5 laat zien dat de omvang van de doorstroomoppervlakte van het zeegeat met één geul in 1989 iets kleiner is dan in 2018, met vier geulen. Van grote veranderingen in het totale doorstroomoppervlak van het zeegeat is echter geen sprake. De breedte van de geulen bij GLW is in 2018 groter dan in 1989.

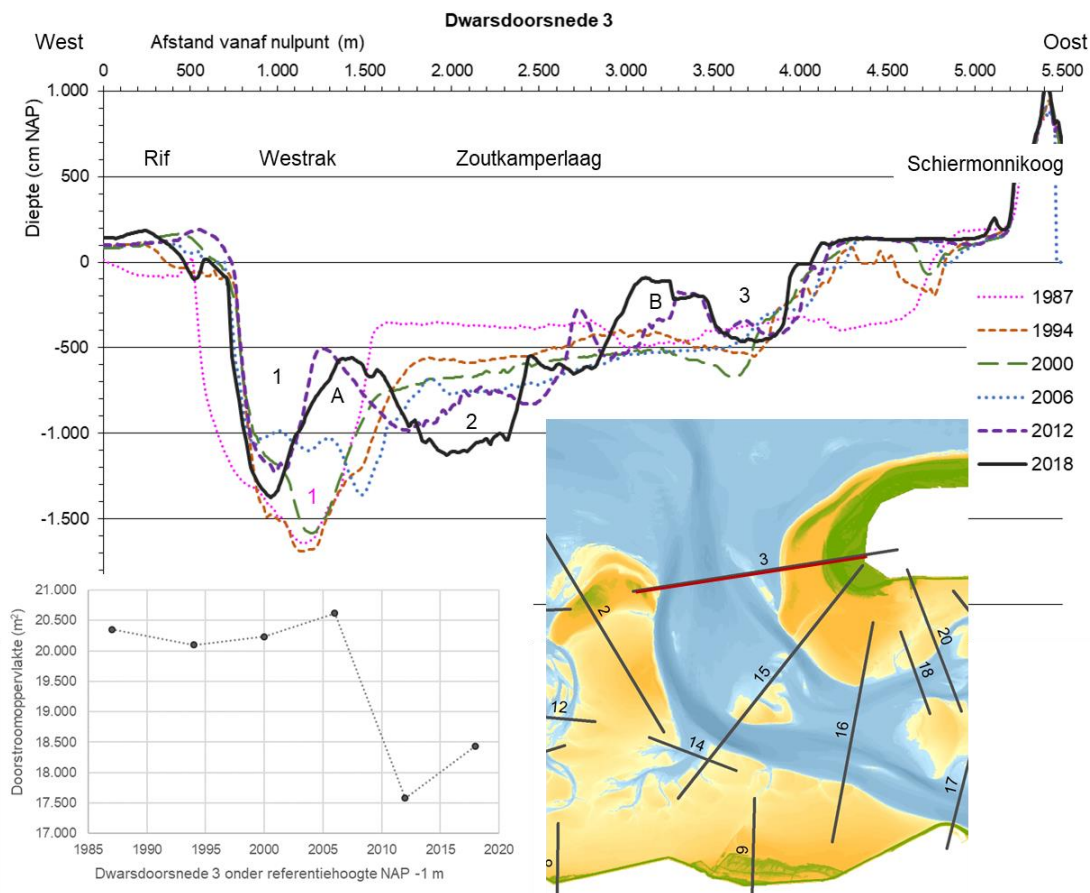




Figuur 4-5 Dwarsdoorsnede van het Zeegat Pinkegat (boven), met een grafiek van de doorstroomoppervlakte (linksonder) en de locatie van de dwarsdoorsnede (rechtsonder).

#### Zeegat Zoutkamperlaag

De dwarsdoorsnede door het zeegat Zoutkamperlaag (Figuur 4-6) toont dat in 1987 sprake is van één geul tot NAP -16m (gemarkeerd met de roze nummer 1). In de periode na 1987 wordt het gebied ten oosten van deze geul steeds dieper. Uiteindelijk ontstaat een tweede geul (gemarkeerd met de zwarte 2) in het zeegat ten oosten van de oorspronkelijke geul (nummer 1, nu zwart). Tijdens het ontstaan van de tweede geul wordt ook een ondiepte gevormd tussen geulen 1 en 2 (gemarkeerd met de zwarte A). Ook dichterbij Schiermonnikoog is een geul ontstaan (gemarkeerd met de zwarte 3), ook met het ontstaan van een ondiepte (gemarkeerd met de zwarte B). De maximale diepte van de geul is ondertussen afgenomen tot ca NAP -14m. De grafiek met doorstroomoppervlakte toont dat aanvankelijk weinig is veranderd, maar dat na 2006 een afname van 10% plaatsvond. De oorzaak van deze afname is niet bekend, mogelijk is het gekoppeld aan omvang, aantal en oriëntatie van de geulen op de buitendelta. Aan de Waddenzeezijde van het zeegat is (zie dwarsdoorsnede 15 in Figuur 4-6) geen sprake van een afname van de dwarsdoorsnede tussen 1987 en 2018.

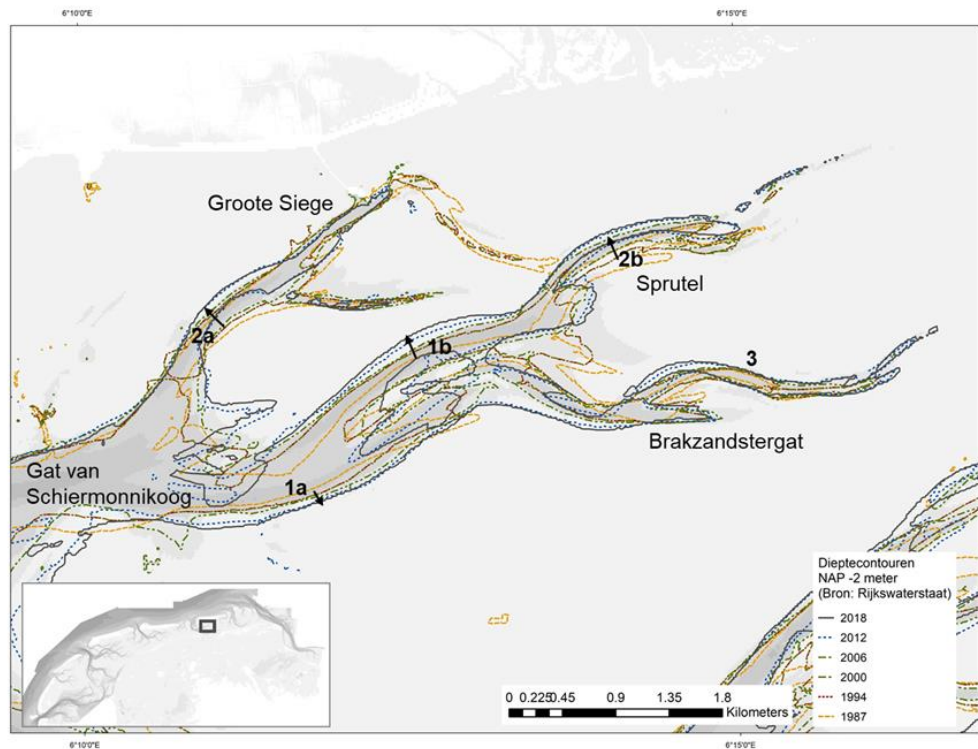


Figuur 4-6 Dwarsdoorsnede van het Zeegat van de Zoutkamperlaag (boven), met een grafiek van de doorstromoppervlakte (linksonder) en de locatie van de dwarsdoorsnede (rechtsonder).

### 4.3 Geulbochten

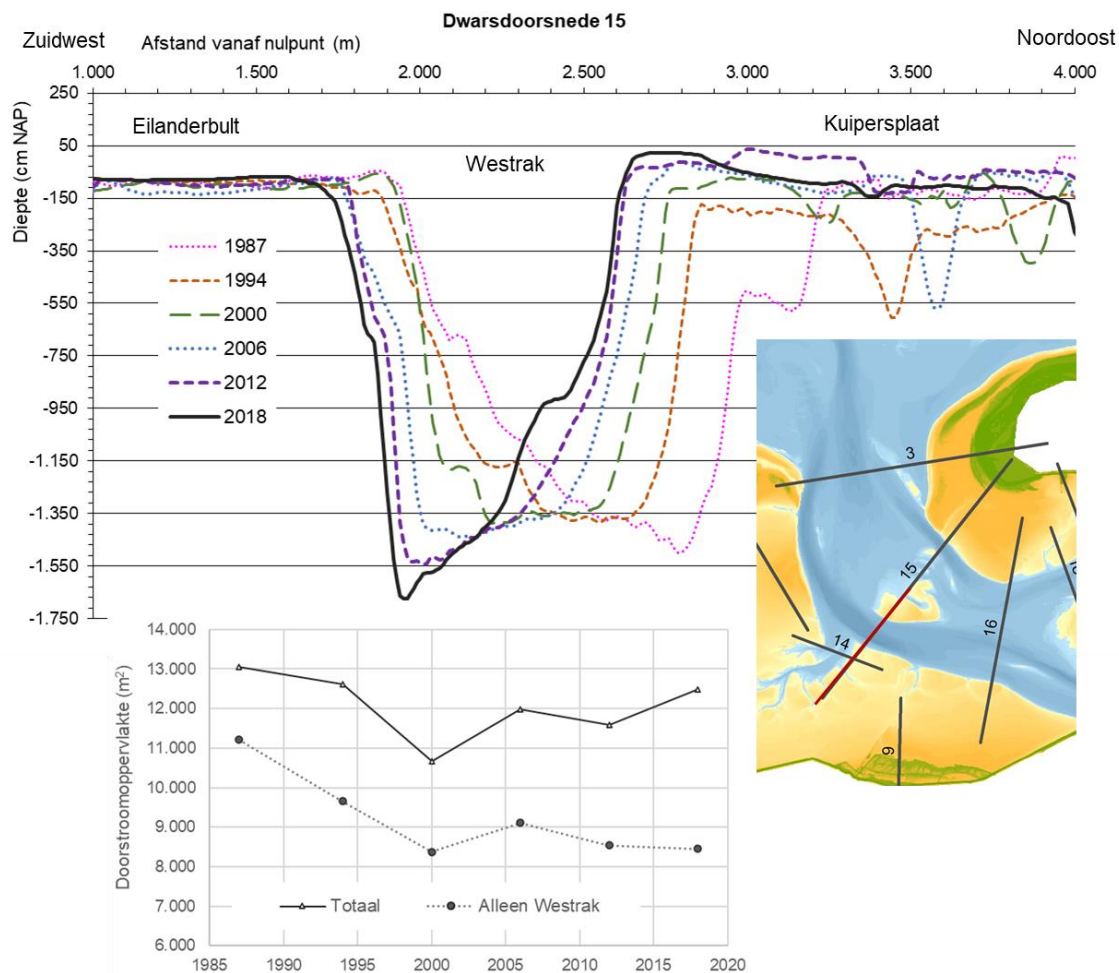
De geulen in zowel Pinkegat als Zoutkamperlaag hebben vrijwel allemaal en altijd bochten, die we in analogie met de bochten in rivieren ook wel meanders noemen. Een deel van deze geulbochten verplaatst naar buiten, op een vergelijkbare wijze als bochten in rivieren dat doen. Helemaal vanzelfsprekend is dat niet, omdat in tegenstelling tot in een rivier sprake is van twee dominante stroomrichtingen (vloed en eb), waardoor het zandtransport in een getijdegeul anders plaatsvindt dan in een rivier. Dit is ook de reden voor het optreden van de typische eb- en vloedscharen in de getijdegeulen, waarover meer in de volgende paragraaf.

In Figuur 4-7 zijn drie geulen weergegeven ten zuiden van Schiermonnikoog, met de NAP -2 m dieptelijn van de opeenvolgende vaklodingen. Bij 1a en 1b is te zien hoe de beide buitenbochten van het Gat van Schiermonnikoog naar buiten bewegen. Omdat deze buitenbochten deels naast elkaar liggen (en niet in elkaars verlengde) is het gevolg van deze verandering dat deze geul hier breder is geworden. Bij 2a en 2b is sprake van geulbochten waarbij de buitenbocht en de binnenbocht van de geul met ongeveer dezelfde snelheid verplaatsen, zodat de gehele geul verplaatst. Ten slotte is bij 3 nog een geul gemarkeerd die, ondanks de aanwezige bocht in de geul, vrijwel niet verplaatst.



*Figuur 4-7 Hoogtekaart van de situatie 2012: het meanderende patroon van alle geulen en hun vertakkingen komt duidelijk tot uitdrukking.*

Figuur 4-8 laat zien hoe de verplaatsing van een geulbocht zich in een dwarsdoorsnede manifesteert. Deze dwarsdoorsnede ligt in de buitenbocht van het Westrak (de westelijk geul van de hoofdgeul van de Zoutkamperlaag). Zichtbaar is dat de beide geulwanden verplaatsen naar het zuidwesten. Omdat de verplaatsing van de binnenbocht groter was dan die van de buitenbocht, is de geul niet alleen verplaatst, maar is deze ook smaller geworden. Daarbij is de geul aan de noordoostzijde verondiept, terwijl deze aan de zuidwestzijde is verdiept. De omvang van de doorstroomoppervlakte van het Westrak is afgenomen tot 2000 en daarna is deze stabiel gebleven. De totale doorstroomoppervlakte door de Zoutkamperlaag is slechts beperkt afgenomen, omdat de omvang van het gat van Schiermonnikoog-Plaatgat is toegenomen.



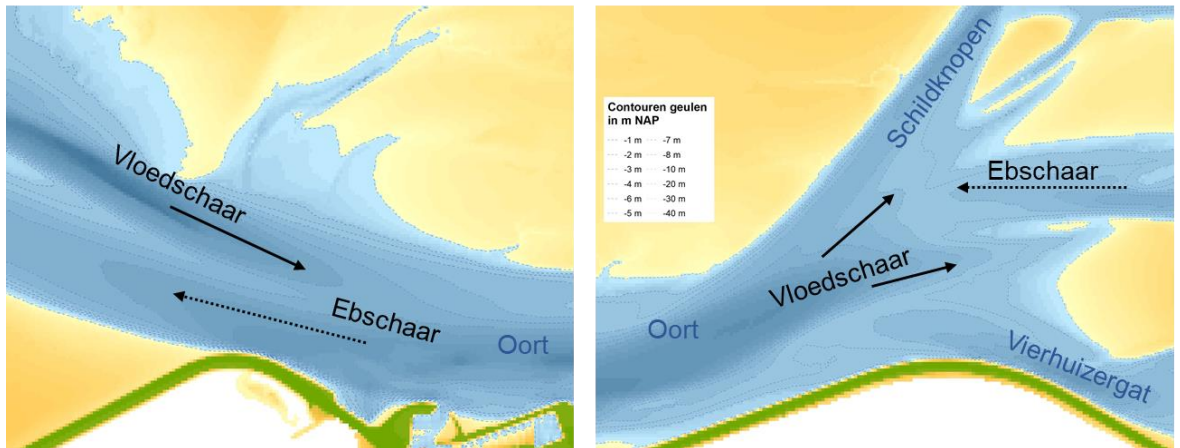
Figuur 4-8 Dwarsdoorsnedes door de geul Westrak in de Zoutkamperlaag (locatie in inzet).

#### 4.4 Eb- en vloedscharen

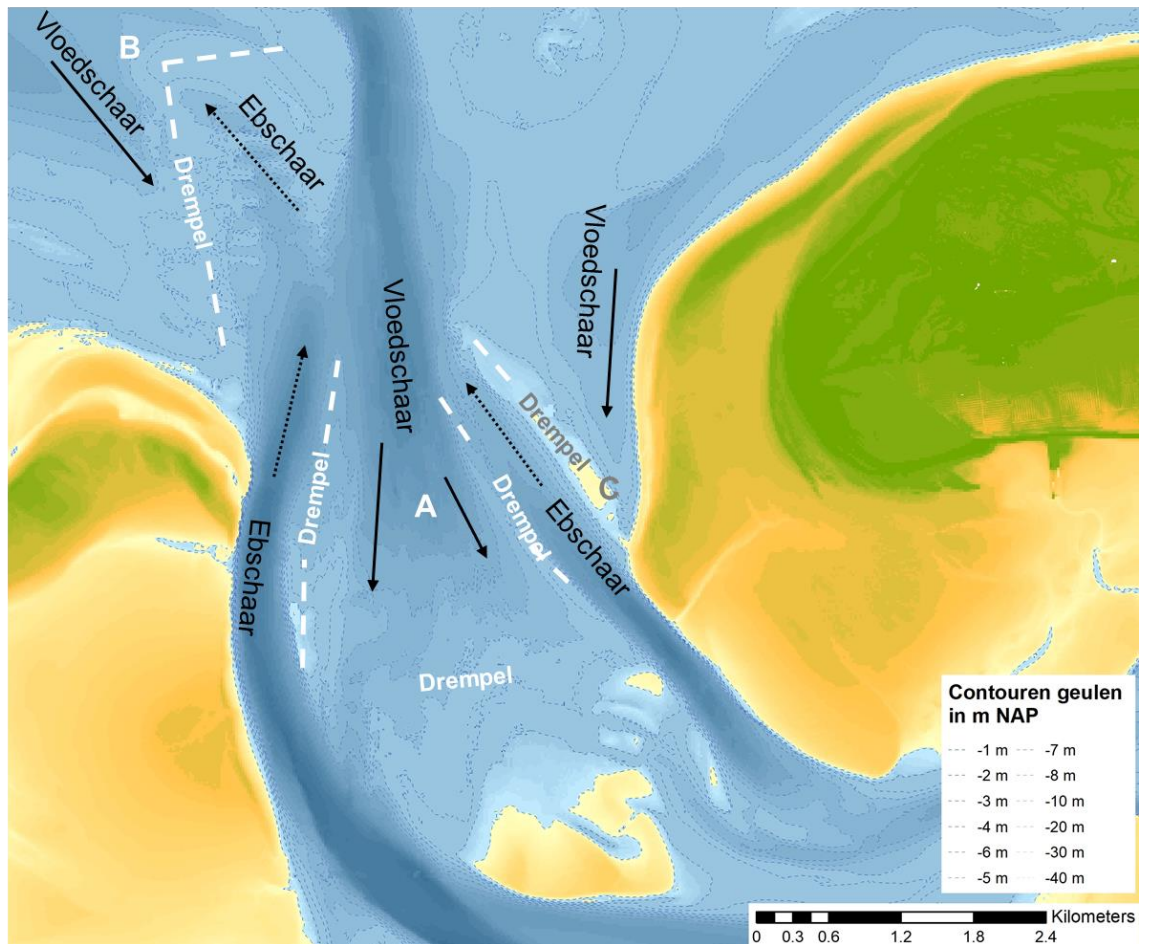
Van Veen (1950) beschreef deze kenmerkende geulpatronen in getijdgebieden. Eb- en vloedscharen zijn geulen die eruitzien alsof ze ‘uit de bocht’ geschoten zijn en die eindigen in een ondiepte of drempel (Figuur 4-9). Een vloedschaar is georiënteerd in de richting van de vloedstroom, van het zeegat naar het kombergingsgebied. Een ebschaar heeft de omgekeerde oriëntatie. De aanwezigheid van de drempel aan het einde van de schaar betekent dat er geen directe aansluiting op de rest van de geul mogelijk is. Het resultaat daarvan is dat geulen opsplitsen. Dit resulteert in het door Van Veen beschreven systeem van elkaar vermijdende eb- en vloedscharen. Eb- en vloedscharen komen voor in verschillende karakteristieke vormen, die zijn getoond in Figuur 4-9.

Eb- en vloedscharen komen in alle getijdegeulen voor, ongeacht de omvang ervan. Ze kunnen daarbij geheel onder water liggen, maar dat hoeft niet. Grote eb- en vloedscharen zijn onder meer zichtbaar in de hoofdgeul van de Zoutkamperlaag. Aan de noordzijde “schieten” de geulen van de buitendelta uit de bocht wat leidt tot eb- en vloedschaaarvorming. In het gedeelte tussen Engelsmanplaat en de Lauwersmeerdijk leidt het uitbochten van de geulen naar het oosten tot ontwikkeling van scharen (Figuur 4-10).

Ook de intergetijdgebieden kunnen worden beïnvloed door eb- en vloed-schaarvorming. Zo ontwikkelt het Gat van Schiermonnikoog-Brakzandstergat, zie Figuur 4-7, van een één-geulstelsel naar twee aparte geulstelsels door vloed-schaarontwikkeling, wat ten koste gaat van het plaatareaal.



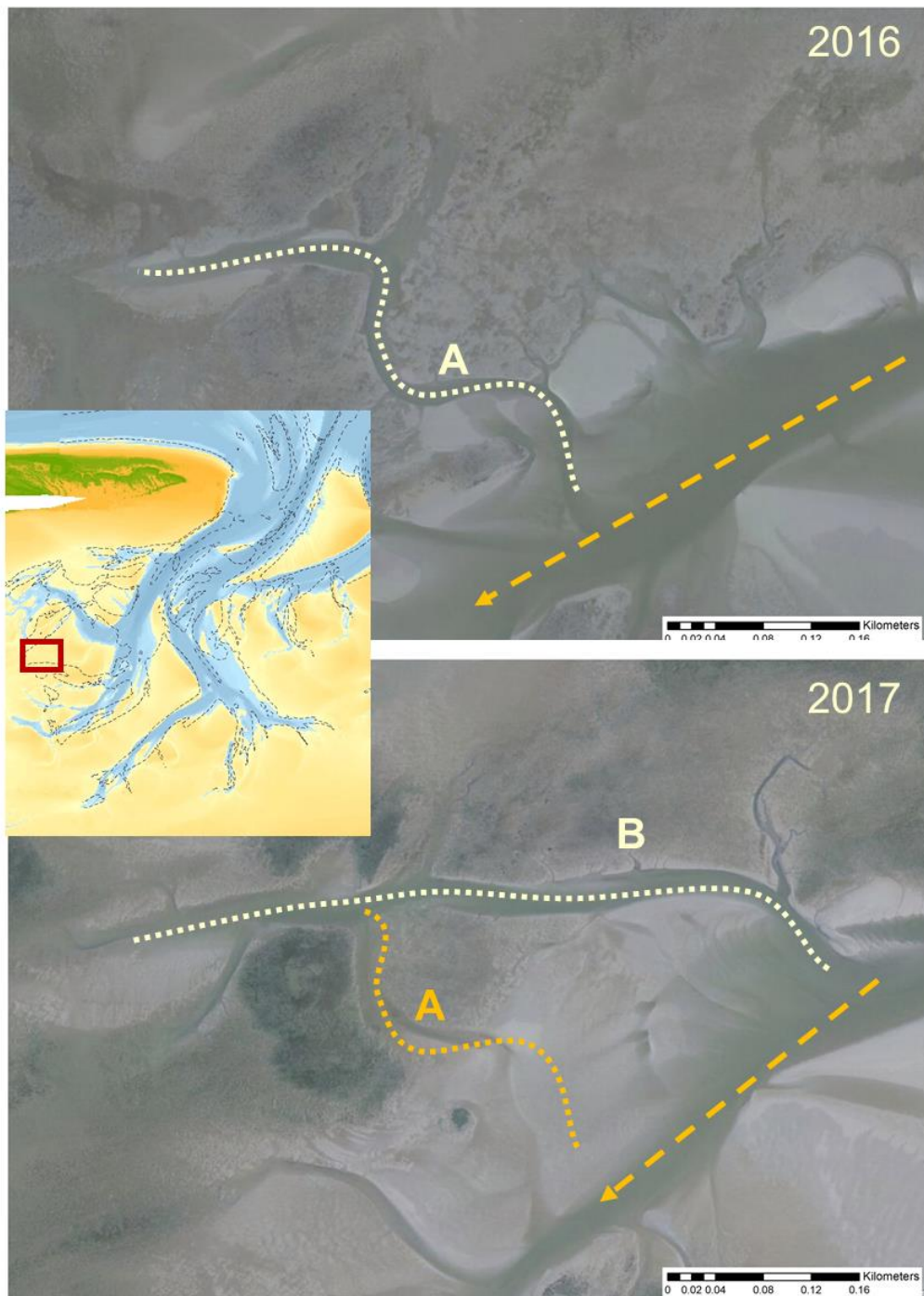
Figuur 4-9 Eb- en vloed-schaar configuraties volgens de classificatie van (Van Veen, 1950). Links: 'flankaanval'; rechts: 'vorkvorming'.



Figuur 4-10 Diepteligging van de situatie 2018/19 rond het Zeegat van de Zoutkamperlaag met de diverse vloed- en ebscharen en de drempelgebieden in de hoofdgeulen (A) en de nevengeulen (B en C).

## 4.5 Overname geulen

Het laatste morfodynamische proces van geulen dat in dit hoofdstuk wordt beschreven is de overname van de ene geul door de andere geul. Bij sommige geulen wordt de rol van de ene geul overgenomen door een andere geul die tot ontwikkeling is gekomen. Als voorbeeld hiervan beschrijven we zeer kleine geultjes, waarvan de ontwikkeling niet gevolgd kan worden in de vaklodingen, maar wel in de luchtfoto's die ieder jaar worden gemaakt, zie Figuur 4-11.



*Figuur 4-11 Voorbeeld van de overname van de functie van een geultje (A) door een ander geultje (B), waardoor de functie van A vervalt. De gestreepte pijl markeert de iets grotere geul waar de geultjes A en B van aftakken.*

Op het wad ten zuiden van Ameland is in 2016 het geultje A de actieve geul. In 2017 is geultje B tot ontwikkeling gekomen en heeft de functie van geultje A geheel overgenomen. Geultje A is grotendeel verdwenen en er is alleen nog een restant van zichtbaar.

Dit soort ontwikkelingen doet zich ook op grotere ruimteschalen voor, zoals bij het zeer dynamische Pinkegat zeegeul. Maar omdat op die schaal ook allerlei andere ontwikkelingen plaatsvinden, is het veel minder duidelijk weer te geven dan op deze kleine schaal. De snelheid waarmee de morfologische veranderingen optreden voorafgaand aan de overname en in reactie op de overname is bij grotere geulen lager dan bij kleinere geulen. Wel is zowel bij kleine als bij grote geulen sprake van één moment waarop de daadwerkelijke overname plaatsvindt.

#### 4.6 Geulontwikkeling en dijkstabiliteit: Vierhuizergat en Oort

Bij de Lauwersmeerdijk grenzen (tegenwoordig) twee geulen direct aan de teen van de dijk, namelijk Zoutkamperlaag-Oort en het Vierhuizergat. Deze kunnen de stabiliteit van de dijk beïnvloeden. De Zoutkamperlaag ligt sinds de aanleg van de Lauwersmeerdijk al min of meer op dezelfde locatie, feitelijk omdat de oorspronkelijke Zoutkamperlaag is afgedamd. Figuur 4-12 geeft een luchtfoto van de situatie kort na de afsluiting. In deze luchtfoto zijn de patronen van de geulen herkenbaar aan beide zijden van de Lauwersmeerdijk. De Lauwersmeerdijk is ten oosten van Lauwersoog voornamelijk op wadplaten aangelegd. Bij 1 is met een pijl aangegeven waar een zijtak van het Vierhuizergat lag die naar het zuiden gericht was. Hier is de Lauwersmeerdijk over de voormalige geul heen aangelegd. Voor de aanleg van de dam is zand gewonnen, zowel aan de zuidzijde van wat tegenwoordig de geul Oort is, als in de omgeving van het huidige Vierhuizergat (Postma & Reenders, 1986).

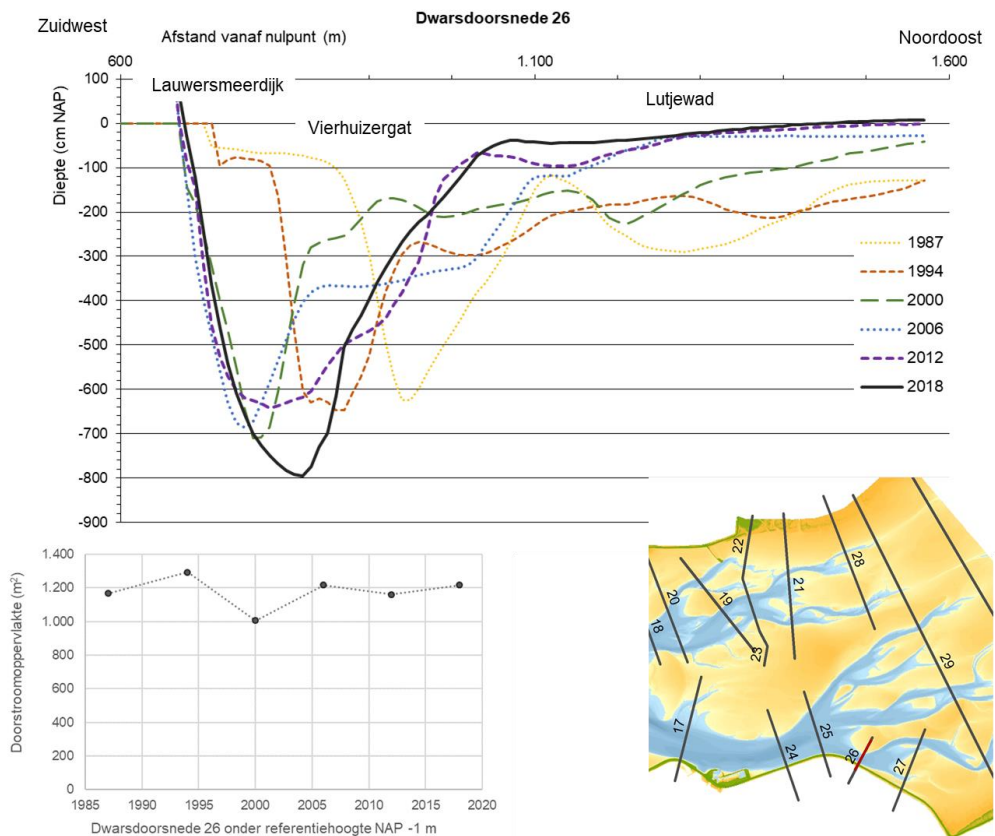


Figuur 4-12 Luchtfoto opname 8 juni 1969 (detail van luchtfoto mozaïek in de hal van de Zonneveld-vleugel van de Universiteit Utrecht).

Na de aanleg van de Lauwersmeerdam erodeerde de zandplaat die tussen de dijk en de geul lag bij Oort en het Vierhuizergat geleidelijk. Het gevolg van de erosie is dat de geulen geleidelijk tegen de dijk aan zijn 'gekropen'. In de dwarsdoorsnede in Figuur 4-13 is deze ontwikkeling duidelijk zichtbaar. De geulwanden aan beide zijden zijn van 1987 tot 2000

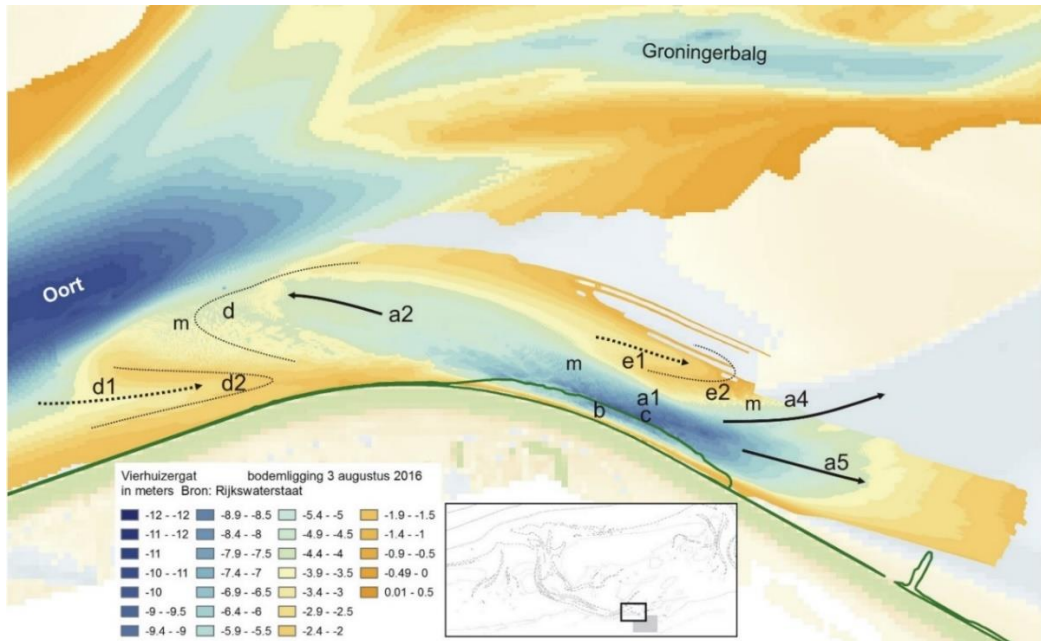
opgeschoven naar het zuidwesten. Na 2000 is de geulwand aan de zuidwestzijde niet verder opgeschoven. Deze geulwand is later gestabiliseerd met stortsteen. Deze stabilisatie is uitgevoerd om de sterkte van de dijk te garanderen. Na de stabilisatie van de zuidwestelijke zijde is de andere zijde verder naar het zuidwesten verplaatst, zodat de geul smaller werd. Daarbij is de geul dieper geworden. De doorstroomoppervlakte is steeds ongeveer hetzelfde gebleven.

De ontwikkelingen van het Vierhuizergat zijn in veel detail geanalyseerd, vanwege de stabiliteit van de dijk. Hierbij zijn verschillende oplossingsrichtingen onderzocht om de destabiliserende ontwikkelingen van het Vierhuizergat tegen te gaan (Arcadis, 2017 en Ouwerkerk, 2019). Uit de analyses van de ligging en ontwikkelingen van het Vierhuizergat is ook gebleken dat de aanwezigheid van het Vierhuizergat ook de ligging van de geul bij de dijk beïnvloedt. De aanwezigheid van het ebschild van het Vierhuizergat 'duwt' Oort als het ware een beetje uit de dijk. Figuur 4-14 toont een gedetailleerde opname van de bodemligging van het Vierhuizergat en van Oort. Het Vierhuizergat bestaat bij de bestorting uit een diep centraal deel (a1), met aan beide zijde verondiepingen. Het sinds 2012 bestorte gedeelte van geul ligt binnen de groene contour bij b. Bij de teen van de bestorting wordt het diepste gedeelte van de geul gevonden (c). Aan de noordwestzijde ligt een ebschild (a2). Het ebschild (d) aan de westzijde van de geul vormt de overgang naar de getijdegeul Oort. Ten zuidwesten van deze drempel ligt bij d1 een kleine aftakking van Oort die snel verondiept en een vloedschil (d2) heeft. Dit is een vloedschaar.



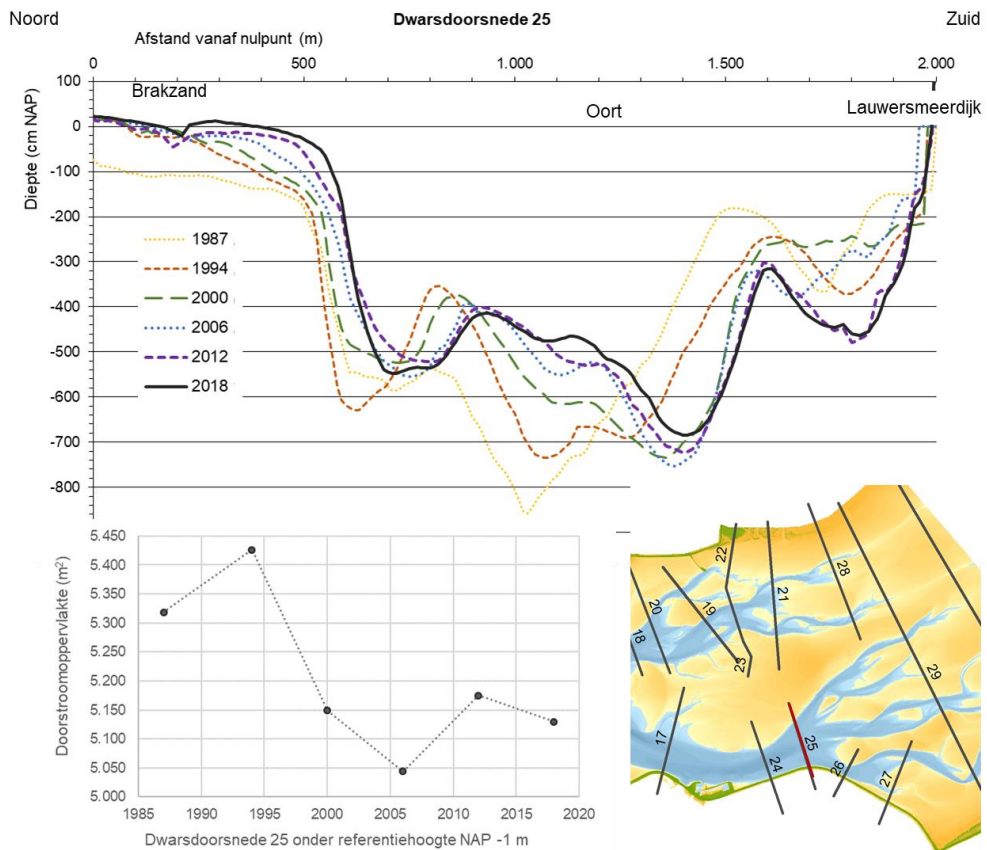
Figuur 4-13 Dwarsdoorsnede van het Vierhuizergat (boven), met een grafiek van de doorstroomoppervlakte (linksonder) en de locatie van de dwarsdoorsnede (rechtsonder).





Figuur 4-14 Detailkaart Vierhuizergat (op basis multibeam-opnamen van Rijkswaterstaat (uit Arcadis, 2017)).

Ondanks de aanwezigheid van het ebschild van het Vierhuizergat, is Oort direct bij de Lauwersmeerdijk sinds de jaren '80 wel dieper geworden, zoals zichtbaar is in Figuur 4-15.



Figuur 4-15 Dwarsdoorsnede van Oort (boven), met een grafiek van de doorstroomoppervlakte (linksonder) en de locatie van de dwarsdoorsnede (rechtsonder).

## 5 Inter- en supragetijde wadplaten

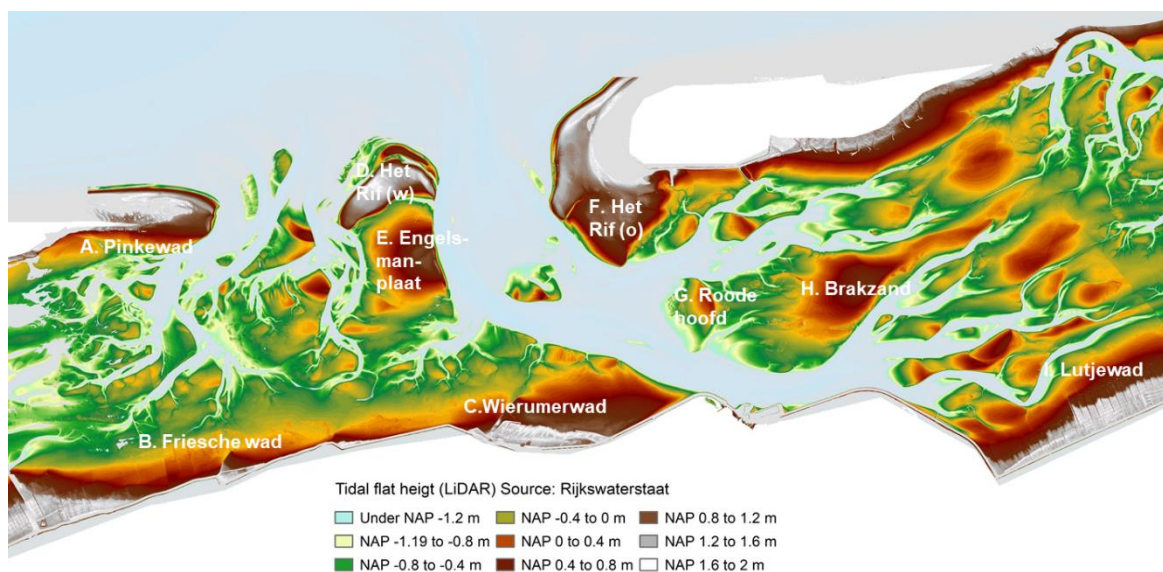
### 5.1 Kenmerken en deelgebieden

Intergetijde wadplaten zijn gebieden met een hoogte tussen laag- en hoogwater. Ze vallen tijdens laagwater vrijwel geheel droog. Alleen op de diepere delen, die niet direct afwateren op de geulen, kan dan een laagje water blijven staan. De supragetijde wadplaten hebben een grotere hoogte en lopen alleen onder als het waterniveau hoger wordt dan normaal hoogwater.

Voor de beschrijving maken we onderscheid in negen gebieden (Figuur 5-1):

- A. Het Pinkewad (paragraaf 5.2);
- B. Het Friesche Wad (paragraaf 5.3);
- C. Het Wierumerwad (paragraaf 5.3);
- D. Supragetijde Rif (paragraaf 5.4);
- E. Inter- tot supragetijde Engelsmanplaat (paragraaf 5.4);
- F. Inter- tot supragetijde Oude Wal-Rif-Reede (paragraaf 5.5);
- G. Roode Hoofd (paragraaf 5.6);
- H. Brakzand (paragraaf 5.6);
- I. Lutjewad (paragraaf 5.7).

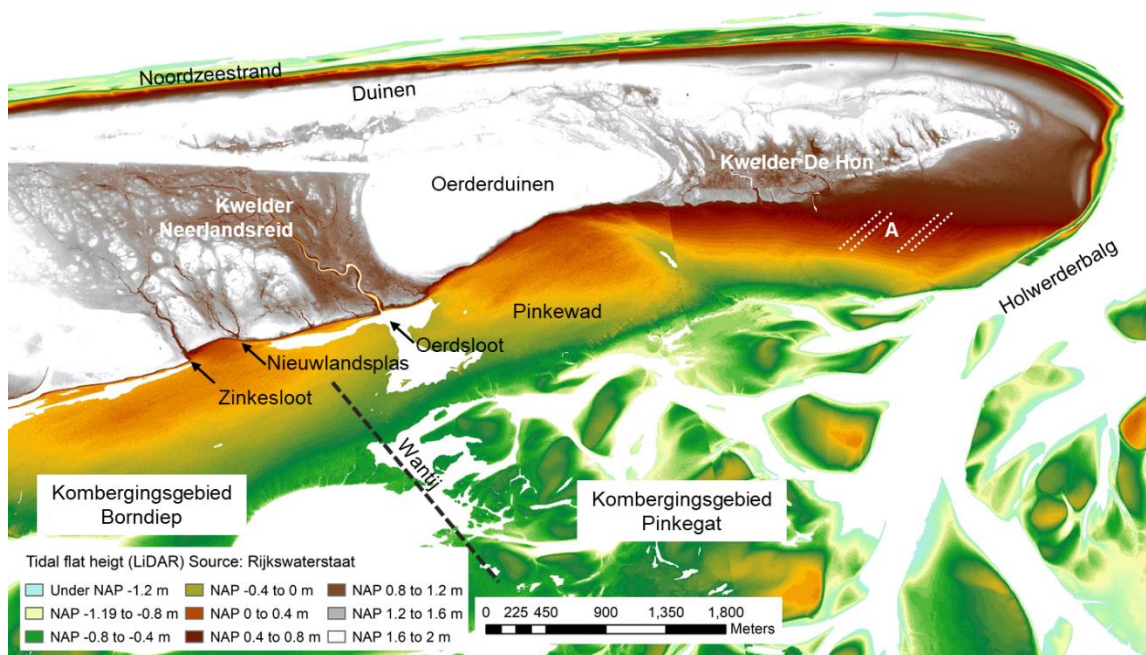
Als geheel, kijkend naar de grootschalige ontwikkelingen van de platen, vertonen Pinkegat en Zoutkamperlaag geen uitgesproken ontwikkelingen. Het meest in het oog springend op de grote schaal is de verplaatsing van het wantij ten zuiden van Schiermonnikoog naar het oosten, waardoor het kombergingsgebied met het daarbij behorende plaatareaal van de Zoutkamperlaag is toegenomen.



Figuur 5-1 Kaart met de hoogte van de droogvallende wadplaten en de hogere delen van het Friesche zeegat (LiDAR hoogtemeting 2017, Rijkswaterstaat).

## 5.2 Het Pinkewad

Het Pinkewad ligt ten zuiden van de oostpunt van Ameland, zie Figuur 5-2. Het ligt voor de eilandkwelders Neerlandsreid en Hon en voor de Oerderduinen. De overgang van deze kwelders naar het Pinkewad is bij het Neerlandsreid vastgelegd met stortsteen. Bij de Hon is sprake van een natuurlijk kwelderklif, dat over een belangrijk deel geleidelijk landwaarts verplaatst. In hoofdstuk 6 staat meer informatie over deze kwelders.



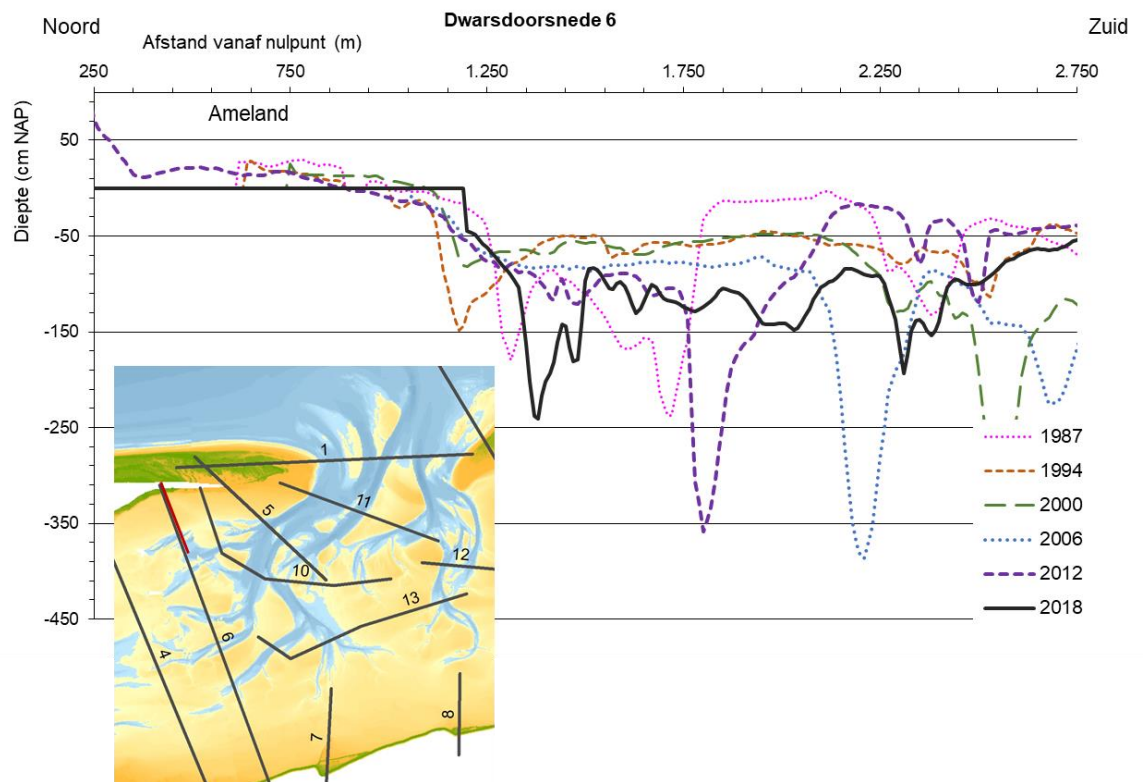
Figuur 5-2 Detailkaart van het Pinkewad (LiDAR hoogtemetingen vakkleding Pinkegat 2018; vakkleding Borndiep 2017; Ameland AHN3: 2014).

Het Pinkewad is het hoogst in de zone direct ten zuiden van de kwelders en loopt dan geleidelijk af naar de geulen in de Waddenzee. In deze zone zijn geen geulen. In Figuur 5-2 is wel een iets dieper deel zichtbaar dat een verbinding vanaf het Oerderduin met een geul vormt. Het witte gebied in op het Pinkewad in Figuur 5-2 geeft aan dat daar geen hoogtegegevens zijn ingewonnen, waarschijnlijk vanwege water op de wadplaat. Dit 'witte' gebied vormt verbindingen tussen de grote kwelderkreek Oerdsloot en de geulen in de Waddenzee. Aan de oostzijde zijn langgerekte bodemvormen in Figuur 5-2 gemarkeerd met A, waarbij de oriëntatie van deze bodemvormen is aangegeven met de witte stippellijnen. Deze langgerekte bodemvormen hebben een golflengte van 30 tot 50 m en een hoogte van een decimeter. Dit type bodemvormen is door Van Straaten beschreven (1950).

Zuidelijker op het Pinkewad is sprake van veel variatie in de hoogte van het wad. Het wad wordt er doorsneden door veel geulen. De ligging van de geulen (vertakkingen van de Holwerderbalg) is zeer variabel, zie de dwarsdoorsneden in Figuur 5-3. De afstand van de kwelderrand tot de dichtstbijzijnde geul varieert sterk van opname tot opname en ook de omvang van de dichtstbijzijnde geul varieert sterk. Een dergelijke variatie in de ligging van de geulen ten zuidwesten van het zeegat is ook geobserveerd in de andere kombergingsgebieden in de Waddenzee.

De monitoring van de hoogte van de wadbodem (met LiDAR, zie Van der Lugt et al., 2019) en van de erosie en sedimentatie (met spijkermetingen, zie Krol et al., 2019) van het Pinkewad heeft laten zien dat er een zone (of band) voor de kwelders ligt die structurele verlaging heeft ondergaan.

Daar is minder sedimentatie opgetreden dan nodig is voor het bijhouden van de bodemdaling die door gaswinning sinds 1987 is opgetreden. Iets verder zuidelijker is de hoogte van de wadbodem heel variabel, voornamelijk vanwege de grote dynamiek van de geulen.

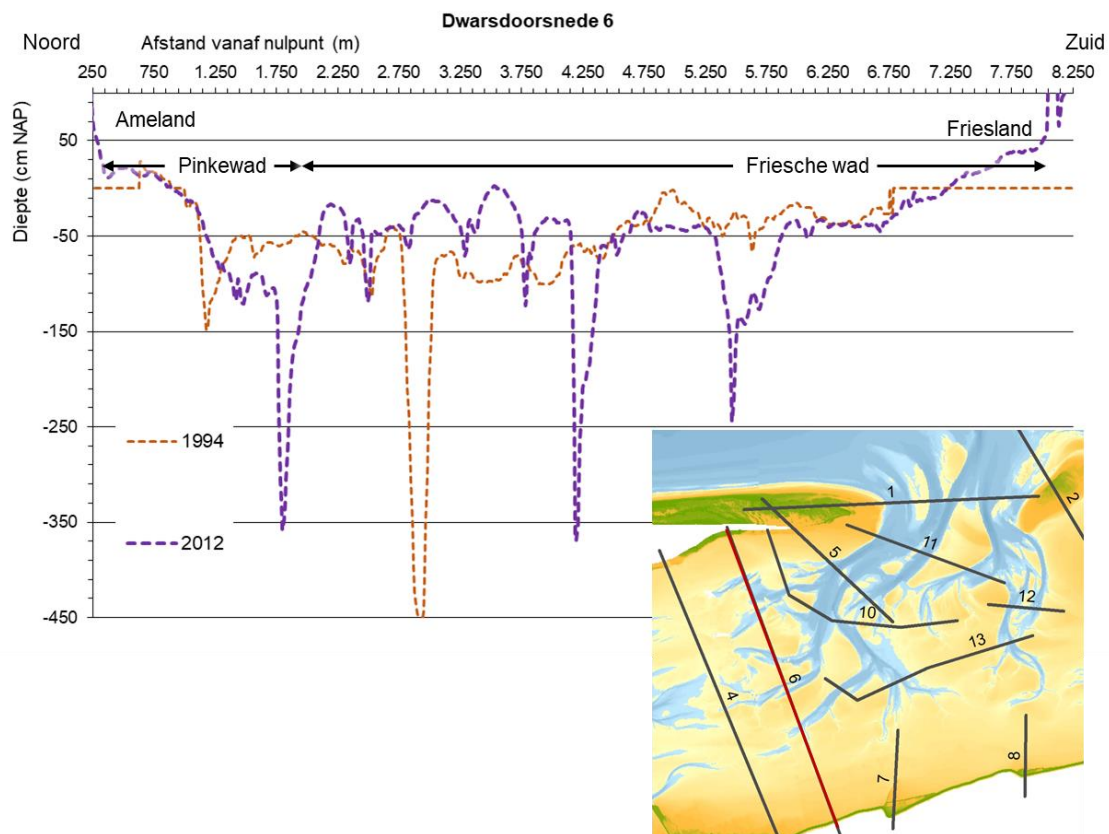


Figuur 5-3 Dwarsdoorsnede van het Pinkewad ten zuiden van de oostpunt van Ameland (locatie in inzet).

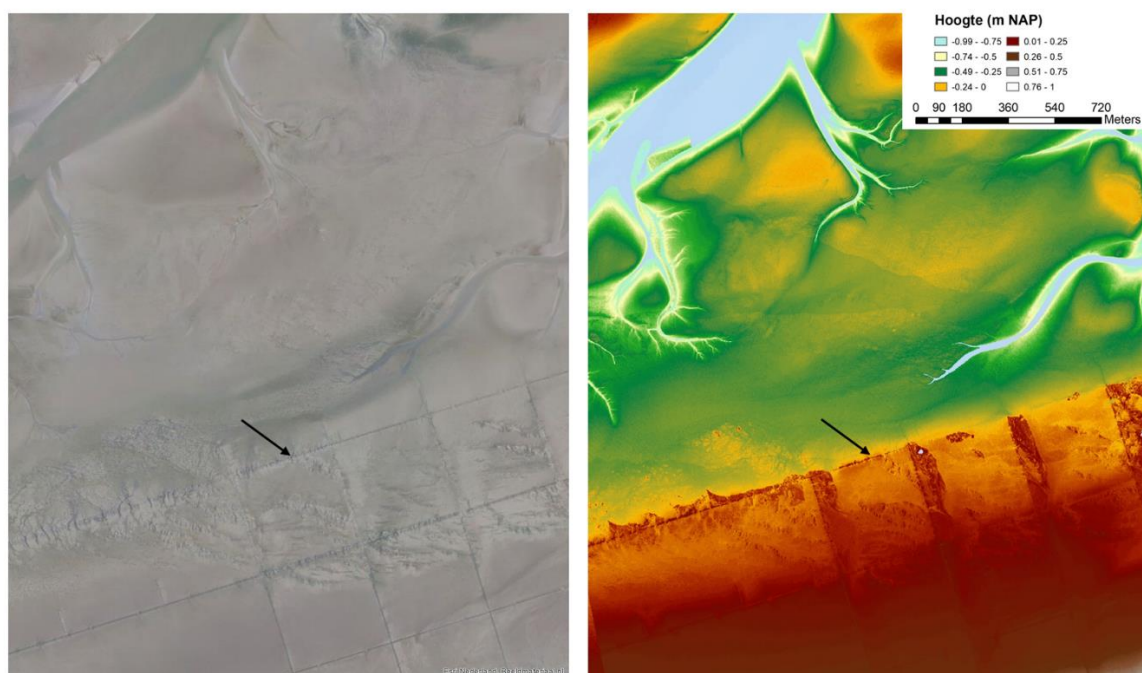
### 5.3 Het Friesche Wad en het Wierumerwad

Het Friesche wad is het gebied ten noorden van de Waddenzeedijk. Het begint bij het wantij en loopt tot het kwelderfragment bij Wierum, waar het overgaat in het Wierumerwad. Het hele gebied vanaf de Waddenzeedijk tot het Pinkewad wordt beschouwd als het Friesche Wad. In de dwarsdoorsnedes in Figuur 5-4 is duidelijk gemaakt hoe deze onderverdeling er uit ziet. De dwarsdoorsnedes (vooral die van de vaklodingen 2012) laten zien dat vanaf de Friese vastelandskust de wadbodem geleidelijk dieper wordt. Dit is vergelijkbaar met het hoogteprofiel bij het Pinkewad, vanaf de kust van Ameland. Het is ook zichtbaar in de wadbodem bij andere kombergingsgebieden. Tussen de dieper wordende noord- en zuidoever liggen verschillende wadplaten, die worden begrensd door geulen. Zowel positie als hoogte van de geulen verschillen in de getoonde vaklodingen van 1994 en 2012. De grote variatie in de ligging van de geulen in het Pinkegat betekent ook dat de ligging en de hoogte van de wadplaten in de loop van de tijd sterk verschilt.

Een ander kenmerkend onderdeel van het Friesche wad, naast de sterke fragmentatie van de droogvallende wadplaten en de grote dynamiek van de geulen en platen, is de aanwezigheid van restanten van kwelderwerken. In Figuur 5-5 is zichtbaar dat niet alleen restanten van de rijshouten dammen aanwezig zijn, maar dat ook het hoogtepatroon de rechthoekige vorm van de kwelderwerken vertoont.



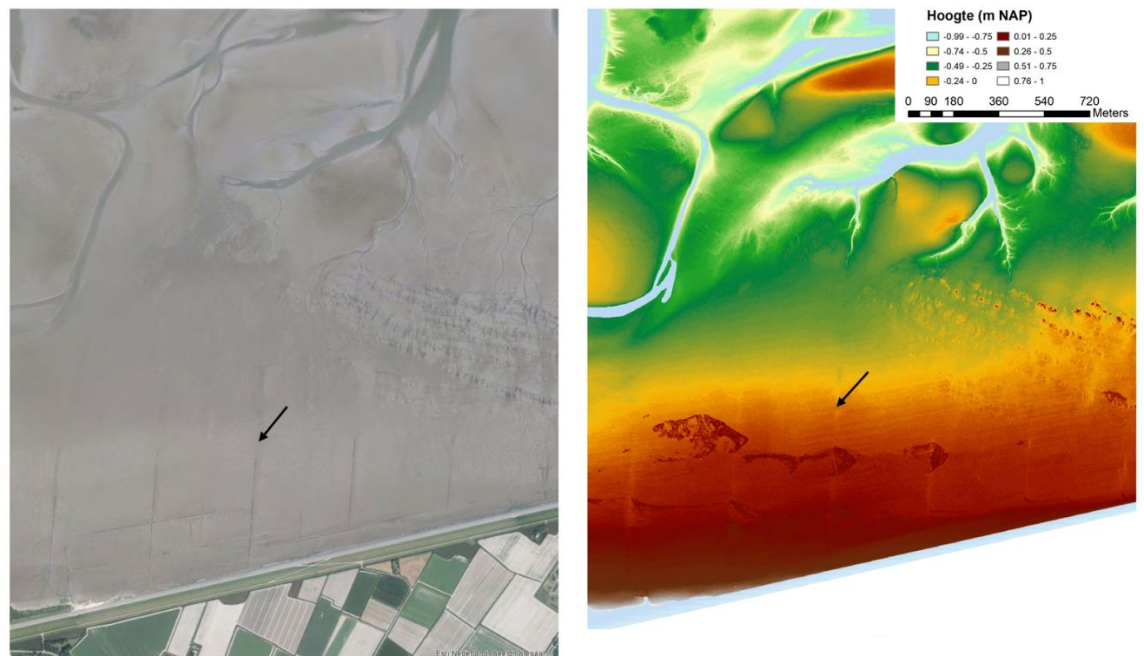
Figuur 5-4 Dwarsdoorsnedes van het gehele wad tussen Ameland en de Friese vastelandskust, met het Pinkewad en het Friesche wad (locatie in inzet).



Figuur 5-5 Luchtfoto (2017, bron PDOK - Beeldmateriaal) en LiDAR-Hoogtemeting (2018, bron Rijkswaterstaat) van het Friesche wad. De pijl markeert een van de restanten van de kwelderwerken, die het rechthoekige patroon onderin de foto vormen.

Het Wierumerwad ligt ten oosten van het Friesche wad ten noorden van de Friese vastelandskust. Het Wierumerwad is in veel opzichten de voorzetting van het Friesche wad. De hoogte loopt geleidelijk af vanaf de zeedijk naar de geulen in de Waddenzee. Bij het Wierumerwad zijn ook landaanwinningswerken uitgevoerd. De restanten zijn in luchtfoto's zichtbaar (Figuur 5-6). In de gedetailleerde hoogtekaart is het patroon van de landaanwinningswerken minder duidelijk dan bij het Friesche wad. Bij de restanten van de rijshoutendammen zijn de wadplaten lager dan bij het Friesche wad (Figuur 5-5).

De landaanwinningswerken liepen van de veerdam bij Holwerd tot aan de huidige Lauwersmeerdijk. Afgezien van de Peazemerlannen, waar een kwelder en zomerpolder zijn gevormd door de opslibbing, zijn deze landaanwinningswerken geen succes geweest. Al aan het begin van de jaren '60 zijn de werken verlaten en is het onderhoud aan de rijshoutendammen en de greppels gestaakt (Hoekstra et al., 1998). Het zeer beperkte succes van deze kwelderwerken en ook het ontbreken van een zone van doorgaande sedimentatie langs de vastelandskust staat in contrast met de ontwikkelingen ten westen van de veerdam in het Borndiep. Bij het Borndiep heeft veel aanslibbing plaatsgevonden in de kwelderwerken en is er een zone van sedimentatie. De oorzaak voor dit grote verschil in ontwikkeling langs de vastelandskust tussen deze naast elkaar gelegen kombergingsgebieden is niet bekend.



Figuur 5-6: Luchtfoto (2017, bron PDOK - Beeldmateriaal) en LiDAR-Hoogtemeting (2018, bron Rijkswaterstaat) van het Wierumerwad. De pijl markeert een van de restanten van de kwelderwerken, die de rechte lijnen onderin de foto vormen.

## 5.4 Het Rif en Engelsmanplaat

Het Rif en Engelsmanplaat zijn bijzondere platen, omdat ze onderdeel zijn van het wantij tussen het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. Onderling verschillen deze platen sterk in eigenschappen en ook in dynamiek.

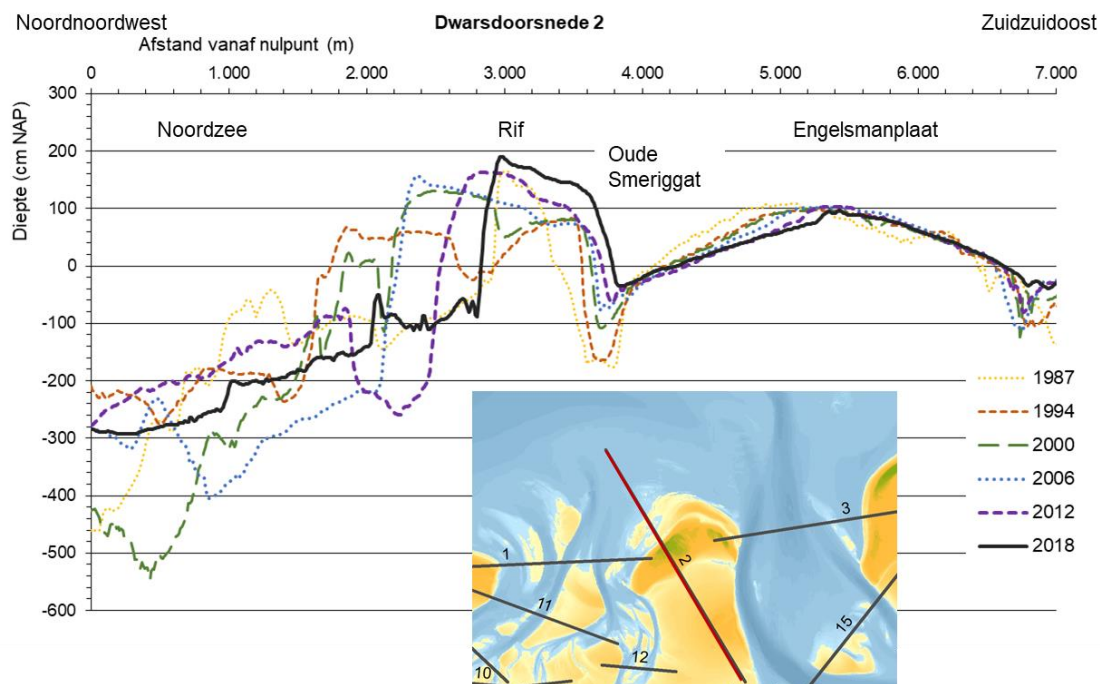
Het Rif ligt van de twee platen aan de Noordzeezijde en is relatief hoog. De positie aan de rand van de buitendelta betekent dat Het Rif een grotere golfaanval kent dan wadplaten in het kombergingsgebied (meer beschut). De relatief zware golfaanval is waarschijnlijk ook de reden dat deze plaat zo hoog is: de golven werpen een zandbank op aan de Noordzeezijde. In Figuur 5-7 is deze zandbank zichtbaar als de hoge rug aan de noordwestzijde.

Het Rif<sup>8</sup> is dermate hoog dat delen ervan niet ieder getij worden overspoeld door water, waardoor naast de golven en de stroming ook de wind een rol speelt bij morfodynamische veranderingen. Figuur 5-7 laat zien dat het hoge deel ervan geleidelijk naar het zuidoosten opschuift, waarschijnlijk als gevolg van golven vanaf de Noordzee. De kaarten van de bodemligging en opeenvolgende satellietbeelden en luchtfoto's laten zien dat frequent kleine zandbanken vanaf de buitendelta van het Pinkegat naar Het Rif verplaatsen en uiteindelijk met Het Rif verhelen. Elias & Oost (2020) laten de opeenvolgende contouren van NAP 0 m zien. Hier is gekozen voor een illustratie met twee satellietopnames uit 2018 en 2019 (Figuur 5-8) met daarin een relatief hoge zandbank aan de noordoostzijde (1), het restant van het diepere water tussen Het Rif en die zandbank (2) en de dieper liggende zandbanken aan de noordwestzijde (3). De zandbank schuift geleidelijk naar Het Rif, waardoor het restant van het diepere water steeds kleiner wordt. De dieper liggende zandbanken aan de noordwestzijde lijken ook naar Het Rif te schuiven. Door het opschuiven en verhelen van deze zandbanken met Het Rif groeit deze aan de Noordzeezijde aan. Onder invloed van de golven is de hoogte van Het Rif in de loop van de tijd ook steeds toegenomen, zie de in de tijd opeenvolgende dwarsdoorsnedes in Figuur 5-7.

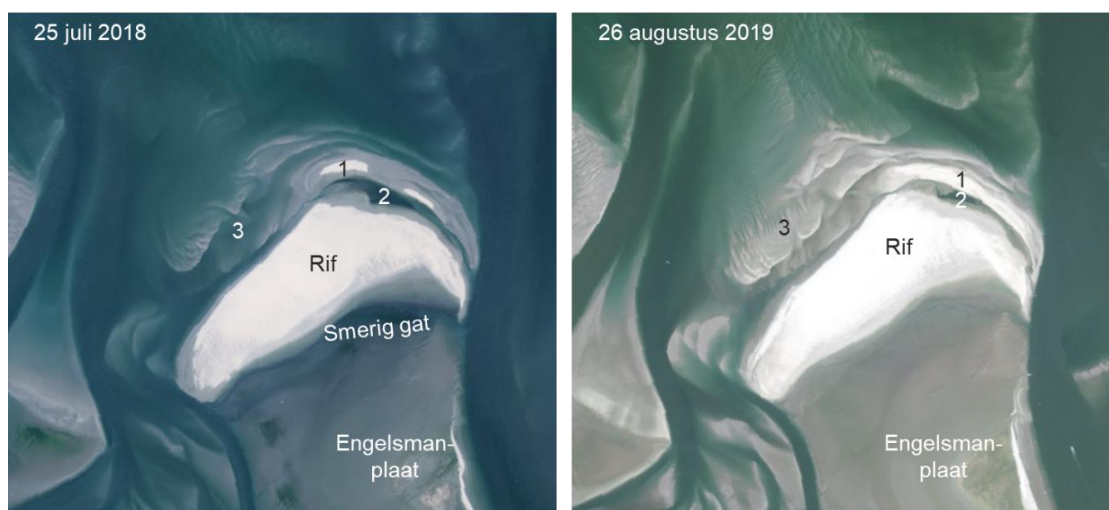
Het Rif lijkt, wat betreft vorm hoogte en dynamiek op andere hoge zandplaten nabij een zeegat, zoals Richel in het Vlie en de Zeehondenplaat bij het Borndiep.

---

<sup>8</sup> In het Friesche Zeegat zijn twee gebieden die Rif worden genoemd. De zandplaat tussen de zeegaten Pinkegat en Zoutkamperlaag is in Figuur 5-1 aangeduid met Het Rif (w), waarbij de w voor west staat. De zandvlakte ten zuiden van Schiermonnikoog is in Figuur 5-1 aangeduid met Het Rif (o), waarbij de o voor oost staat. Deze paragraaf heeft betrekking op Het Rif (w).



Figuur 5-7 Dwarsdoorsnedes door het Rif en de Engelsmanplaat (locatie in inzet).



Figuur 5-8 Satellietbeelden (tijverschillen mogelijk) van het Rif uit 2018 (links) en 2019 (rechts)..

De Engelsmanplaat is een grote aaneengesloten wadplaat, die een bol hoogteprofiel heeft (zie Figuur 5-7). De Engelsmanplaat is in de loop van de jaren kleiner en lager geworden, mede door de erosie aan de oostzijde, waar de geul Zoutkamperlaag naar het westen is verschoven.

Tussen het Rif en de Engelsmanplaat ligt het restant van de geul Oude Smeriggat<sup>9</sup>. Deze geul is een verlaten geul (abandoned channel) die voor een belangrijk deel is opgevuld met slib. In de meest recente dwarsdoorsnede van 2018 in Figuur 5-7 is alleen een verdieping van de droogvallende plaat tussen het Rif en de Engelsmanplaat getuige van de oorspronkelijke aanwezigheid van het Oude Smeriggat.

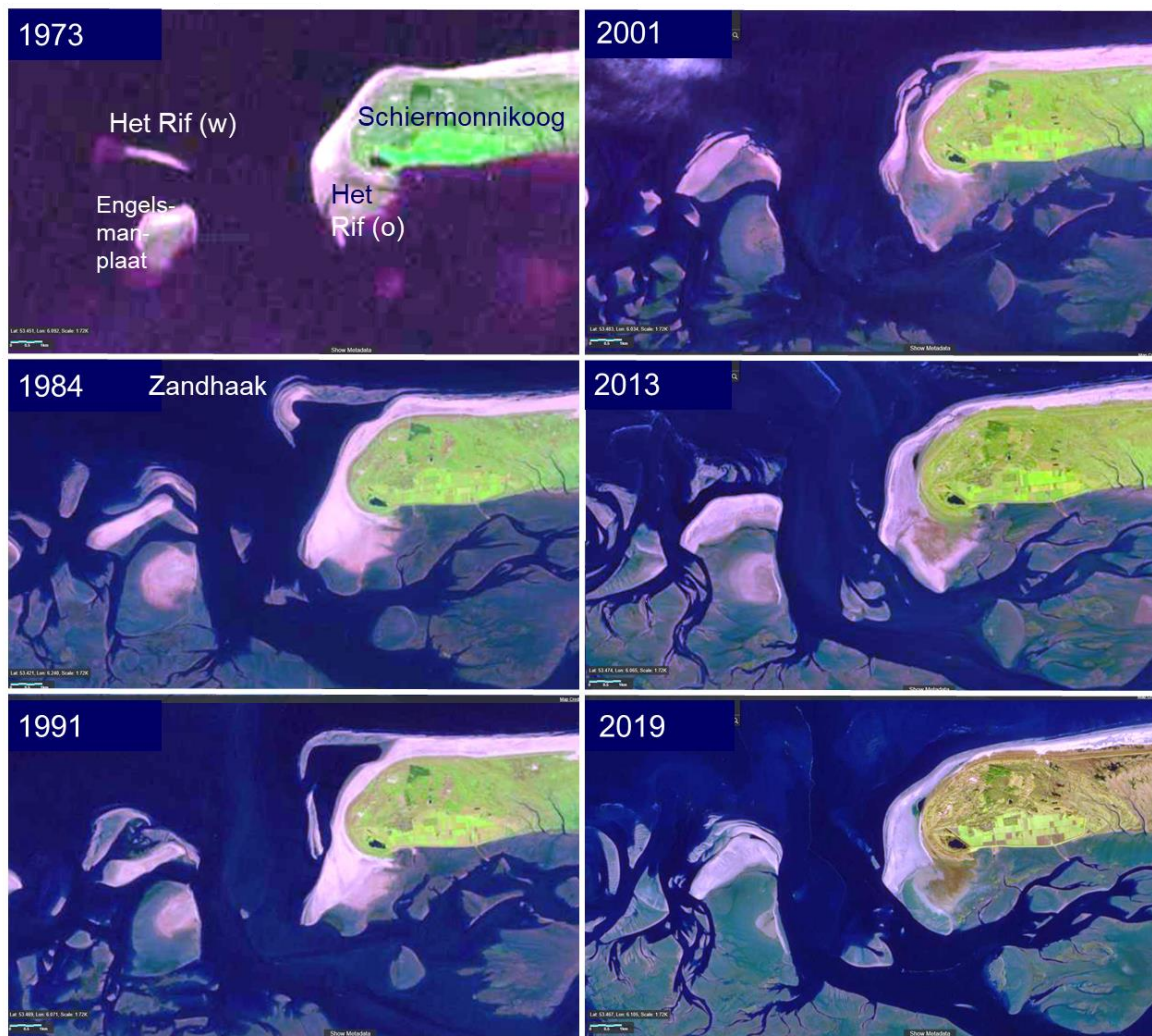
<sup>9</sup> De naam Smeriggat wordt tegenwoordig gebruikt voor een kleine geul ten westen van de Engelsmanplaat. Daarom wordt voor het oorspronkelijke Smeriggat nu Oude Smeriggat gebruikt.



## 5.5 Oude Wal-Rif-Reede

Ten zuiden van de westkop van Schiermonnikoog ligt een uitgestrekte en relatief hoge zandige plaat, die, net als de zandplaat tussen Pinkegat en Zoutkamperlaag, wordt aangeduid met 'Het Rif'. Voor het onderscheid gebruiken we daarom in dit stuk de toevoegingen (w) en (o). De zuidelijke punt van Het Rif (o) wordt aangeduid met 'Oude wal'. Aan de oostzijde gaat deze over in de wadplaten ten zuiden van Schiermonnikoog, aangeduid als Siegewal, en vervolgens in 'Laagte' of 'Reede'. Van oudsher is 'Reede' de naam voor een plek waar schepen kunnen liggen en deze naam wijst daarmee op een oorsprong als sublitoraal of geul, zoals zichtbaar is in de eerste topografische kaart van het eiland (1822: [www.topotijdreis.nl](http://www.topotijdreis.nl)). In deze wadplaat ligt nu de jachthaven.

De serie opeenvolgende satellietbeelden in Figuur 5-9 tonen de ontwikkeling van Het Rif (o). De opname van 1973 toont dat het Rif al vóór de afsluiting van het Lauwersmeer aanwezig was. De daarna volgende beelden illustreren dat De Oude wal en Het Rif (o) hun huidige vorm hebben gekregen na de afsluiting van de Lauwerszee. Die afsluiting deed een groot volume aan zand vrijkomen op de buitendelta. De strandhaak die zich daarbij vormde is aangeduid bij de opname uit 1984 in Figuur 5-9. Een deel van die strandhaak kwam vervolgens op de noordwestkust van Schiermonnikoog terecht (te zien in de opname van 2001) en een ander deel transporteerde naar het zuiden en breidde daar de grote en hoge zandplaat verder uit (zie de opname uit 1991). In de opname van 2001 is deze uitbreiding naar het zuidwesten verdwenen. Het wad ten zuiden van Schiermonnikoog is een meer 'normale' wadplaat, die daar al langer aanwezig is.

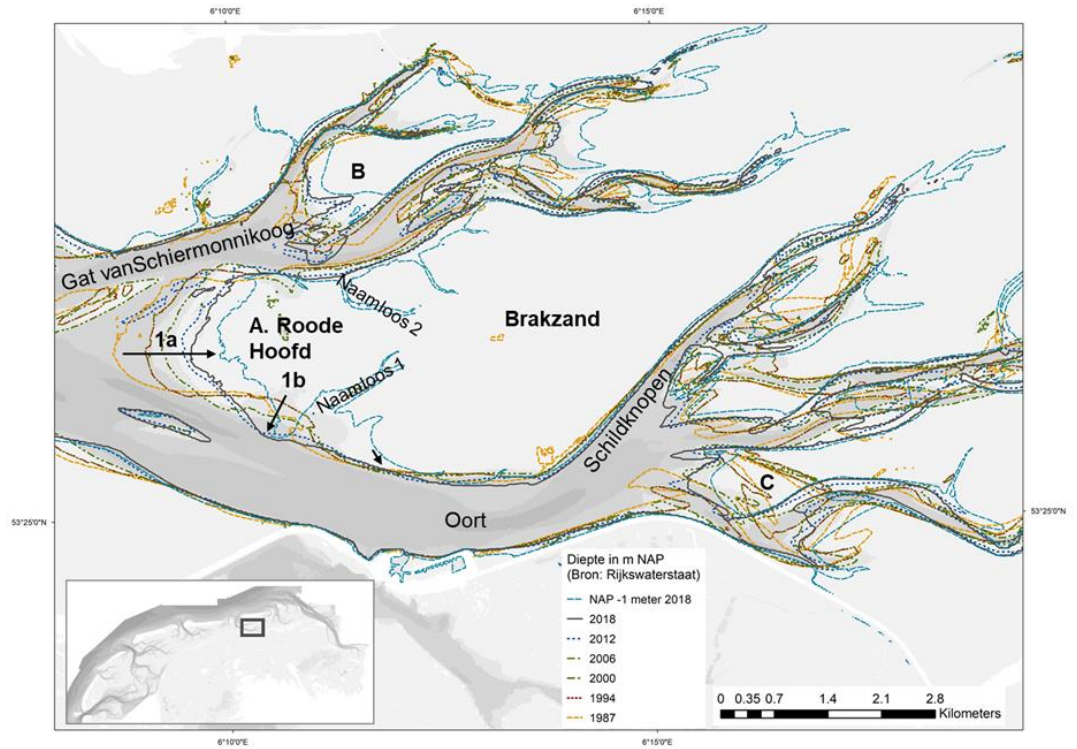


Figuur 5-9 Satellietbeelden van het zeegat Zoutkamperlaag, met de verschillende zandplaten in de periode 1973-2019 (bron <https://landlook.usgs.gov/viewer.html>). Omdat satellietbeelden worden ingewonnen ongeacht de waterstand ten tijde van de opname, verschilt de waterstand per opname, zodat de omvang van de natte (donderblauwe) delen verschilt.

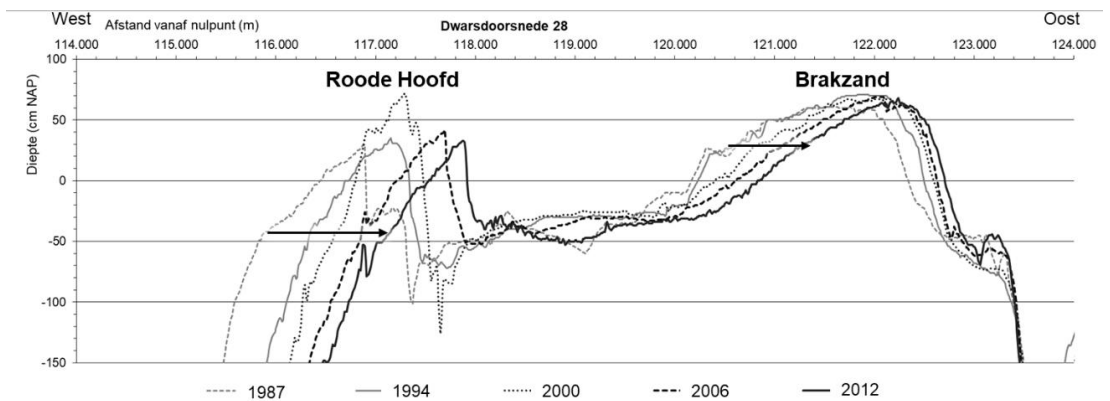
## 5.6 Roode Hoofd-Brakzand

Het Roode Hoofd is de diamant of ruitvormige zandplaat die wordt begrensd door de geulen Gat van Schiermonnikoog aan de noordwestzijde en de geul Zoutkamperlaag-Oort aan de zuidwestzijde (Figuur 5-10). Vanuit beide geulen steken twee naamloze geultjes naar het zuidoosten en noordoosten, die het Roode Hoofd aan de achterzijde begrenzen. De hoogte van het Roode Hoofd neemt geleidelijk toe van het westen naar het oosten. Het hoogste deel van de plaat heeft de vorm van een halve maan. In de nabijheid zijn er nog twee platen met een vergelijkbare ligging en vorm, die zijn gemarkeerd met B en C in Figuur 5-10.

Het Roode Hoofd wordt niet volledig omringd door geulen. Aan de oostzijde gaat deze wadplaat over in het Brakzand. Dat is een grote wadplaat, die aan de noordzijde wordt begrensd door het Brakzandstergat en aan de zuidzijde door de Schildknopen. Het Brakzand is samen met de Engelsmanplaat een van grootste aaneengesloten wadplaten in het Friesche zeegat en heeft een bol reliëf.



Figuur 5-10 Kaart van de wadplaten Roode Hoofd en Brakzand, met e NAP -2 waterlijn van de opeenvolgende vaklodingen.



Figuur 5-11 Dwarsdoorsneden door de platen Roode Hoofd en Brakzand.

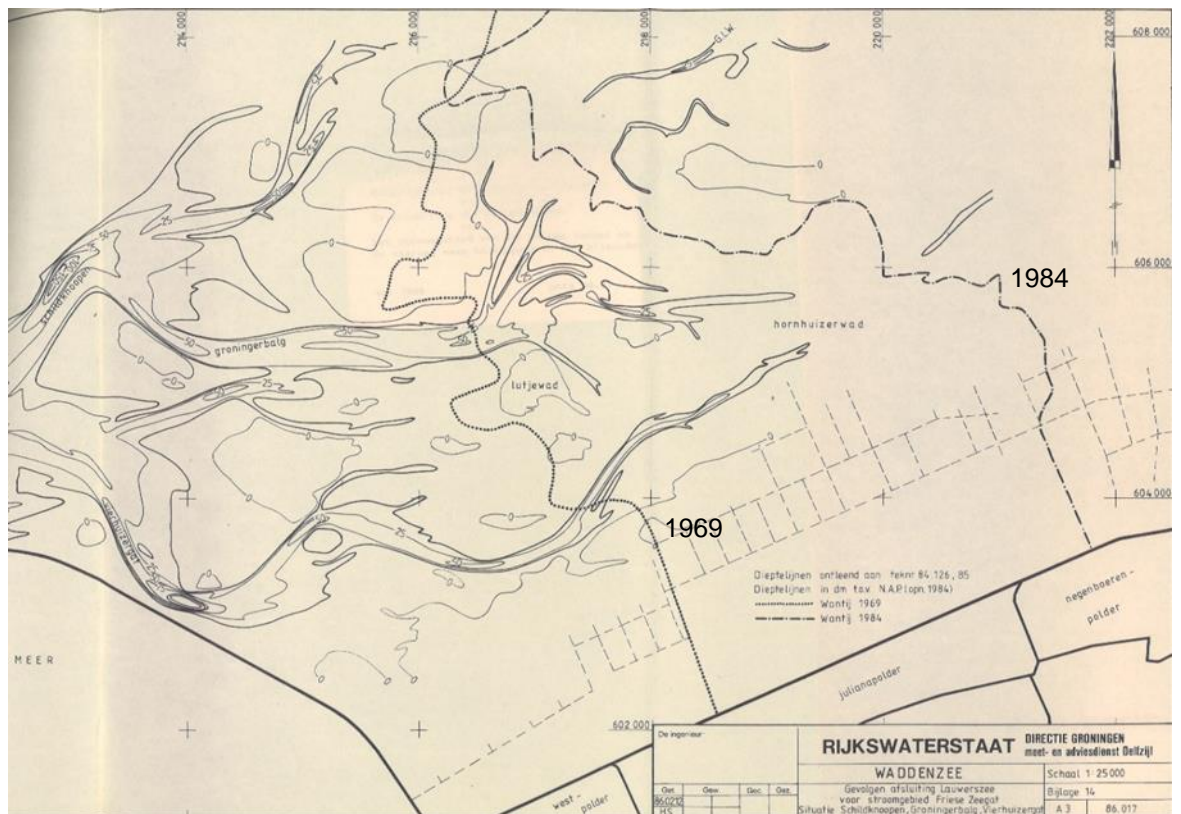
De westelijke begrenzing van het Roode Hoofd is de afgelopen jaren naar het oosten geschoven, zichtbaar bij pijl 1a in Figuur 5-10. De kenmerkende vorm van deze plaat is daarbij geleidelijk ontstaan, mede doordat aan de zuidwestzijde uitbouw van de plaat heeft plaatsgevonden (pijl 1b). Deze veranderingen lijken niet het gevolg van het verplaatsen van de grote geulen die deze plaat begrenzen. Mogelijk speelt de blootstelling aan golven een rol, want die kan in vergelijking met andere wadplaten in de Zoutkamperlaag groot zijn, door de relatief grote strijklengte van de wind over het water ten westen van deze plaat. De begrenzing van het Brakzand is in de periode 1987-2019 zeer stabiel geweest.

Naast de veranderingen in de vorm van het Roode Hoofd zijn er ook nog veranderingen in de hoogte van de plaat. In Figuur 5-11 is zichtbaar dat de hoge delen van het Roode Hoofd naar het oosten zijn geschoven. Het hoogste deel van het Roode Hoofd ligt tegenwoordig een kilometer oostelijker dan in 1987. Ook het Brakzand is naar het oosten geschoven, met enkele honderden meters.

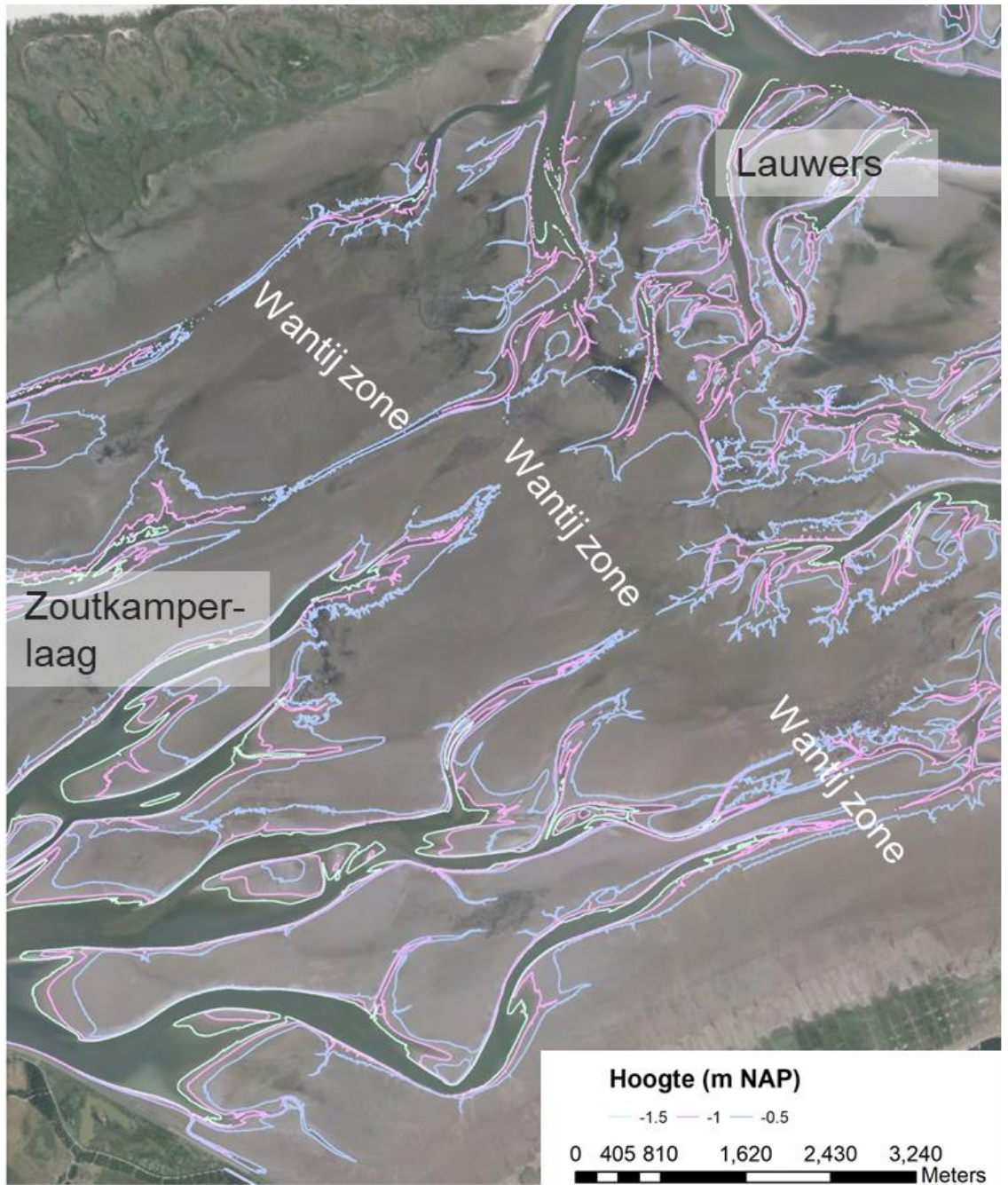
## 5.7 Lutjewad en wantij Zoutkamperlaag-Lauwers

Het Lutjewad is het wad bij de Groningse vastelandskust, voor de vastelandskwelders. Het is het hoogst direct voor de kwelders en loopt geleidelijk af naar het Vierhuizergat. Ten noorden van het Vierhuizergat liggen wadplaten, die doorsneden worden door de uitlopers van de geulen van de Zoutkamperlaag. Opvallend is dat deze geulen vrijwel recht naar het oost-noordoosten lopen en tot het wantij te volgen zijn als verdiepingen in het wad (Figuur 5-13).

De positie van de zuidelijke helft van het wantij is in de periode na de aanleg van de Lauwersmeerdijk sterk veranderd en ligt nu enkele kilometers oostelijker (Figuur 5-12).



Figuur 5-12 Ligging van het wantij na (1984) en voor (1969) de afsluiting van de Lauwerszee (uit Postma & Reenders, 1986).



*Figuur 5-13 De Oostnoordoost lopende geulen op het wantij onder Schiermonnikoog, contouren op basis van de LiDAR hoogteopnames van de vaklodgingen 2019, met op de achtergrond de luchtfoto van 2018 .*

## 6 Kwelders

### 6.1 Inleiding

Kwelders zijn slibrijke gebieden die begroeid zijn met kruiden, grassen of lage struiken en die regelmatig (minimaal 5 overspoelingen per jaar) worden overstroomd door zout of brak water (Adam, 1990). Ze strekken zich uit tot waar stormvloed en reiken. In het Waddengebied zijn drie soorten kwelders aanwezig:

- A. Vastelandskwelders, voornamelijk kwelders die ontstaan zijn door de kwelderwerken.
- B. Eilandkwelders aan de Waddenzeezijde, vrij natuurlijke kwelders die zich vormen in de luwte van de duinen. De meeste ervan zijn ingedijkt en omgezet in polders.
- C. Eilandkwelders aan de Noordzeezijde. Deze vallen buiten het bestek van dit rapport.

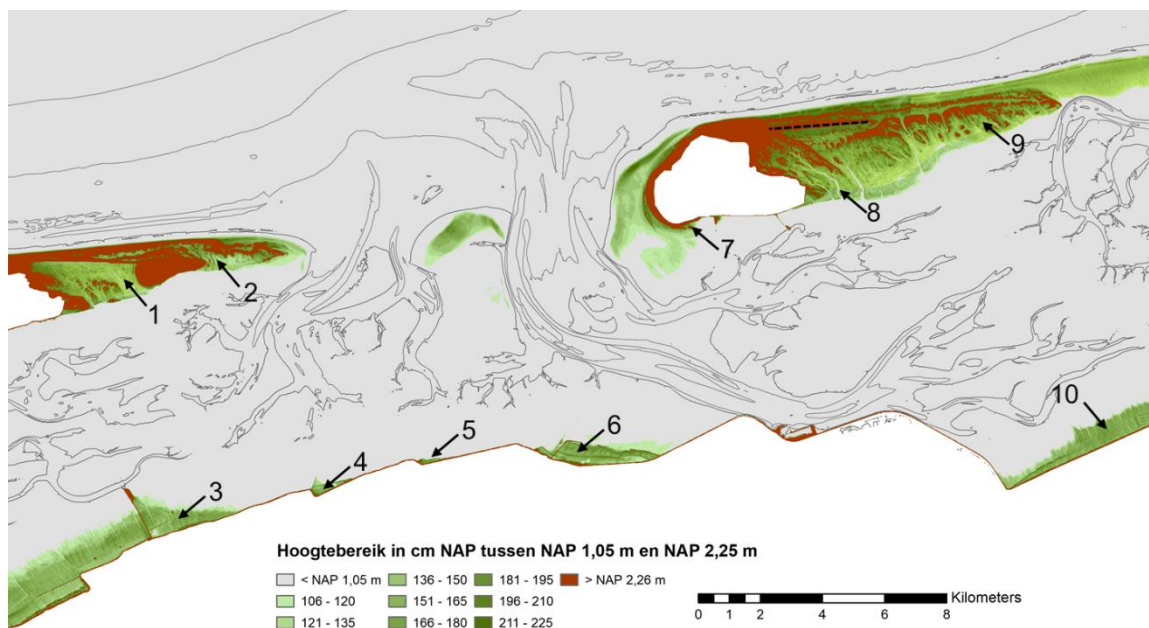
De locaties van de kwelders in de kombergingsgebieden van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag zijn aangeduid in Figuur 6-1. De namen die corresponderen met de nummers in de figuur en de paragrafen waarin de beschrijving van deze kwelders is opgenomen zijn:

Pinkegat (paragraaf 6.2):

1. Neerlands Reid (paragraaf 6.2.1);
2. De Hon (paragraaf 6.2.1);
3. Kwelders oostelijk van de veerdam Holwerd (paragraaf 6.2.2);
4. It Skoar (paragraaf 6.2.2);
5. De Kromme Horne (paragraaf 6.2.2);
6. De Peazemerlannen (paragraaf 6.2.2);

Zoutkamperlaag (paragraaf 6.3):

7. Rif (paragraaf 6.3.1);
8. Binnenkwelder-Oosterkwelder (paragraaf 6.3.1);
9. Kwelder Oostpunt (paragraaf 6.3.26.3.1);
10. Groningerkwelders (paragraaf 6.3.2);



Figuur 6-1 Kwelders rond de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag.

Figuur 6-2 geeft een schematische dwarsdoorsnede de verschillende onderdelen van de kwelder, inclusief de relatie met de waterstanden.

*Pionierzone:*

De pionierzone, of pionierkwelder wordt gevormd door de hoogste delen van het wad, die vrijwel ieder hoogwater onder water staan. Hier vestigen zich typische soorten zoals zeekraal (*Salicornia*) en slijkgras (*Spartina*).

*Lage kwelder:*

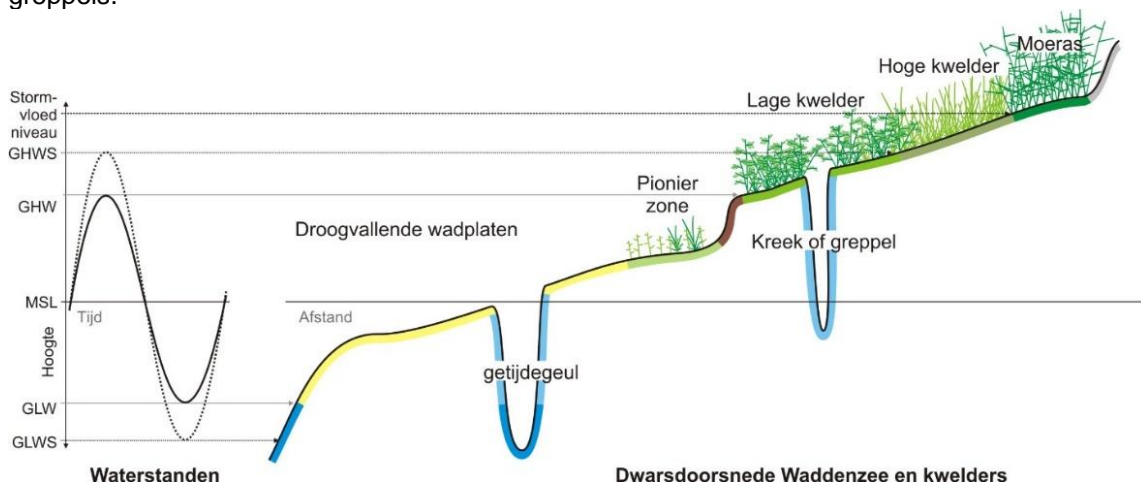
De lage kwelder ligt boven gemiddeld laagwater en onder het niveau van het gemiddeld hoogwater bij springtij. Hier groeien plantensoorten zoals kweldergras (*Puccinellia*) en Zoutmelde (*Halimione*). Meestal is tussen de pionierzone en de lage kwelder sprake van snelle oevergang in hoogte: de kwelderrand. Die is in sommige gevallen erosief en vormt dan een kwelderklif.

*Hoge kwelder:*

De hoge kwelder overstroomt enkele malen per jaar. Hier groeien planten zoals russen (*Juncus*).

*Kreken of greppels:*

Dit zijn de geultjes die water aan- en afvoeren. Als ze een natuurlijke hebben zijn het kreken, maar in kwelders die zijn ontstaan onder invloed van menselijke ingrepen zijn dit vaak gegraven greppels.



Figuur 6-2 Schematische dwarsdoorsnede van een kwelder met voorliggende wadplaat en de verschillende morfologische eenheden.

Deze indeling is gebaseerd op de hoogteligging. Vanwege de ecologische waarden van de kwelders bestaan er ook indelingen die zijn gebaseerd op de kenmerkende vegetatie. Rijkswaterstaat gebruikt voor de kartering van de kwelders de indelingen Salt97 (1989 t/m 2007, de Jong et al., 1998) en Salt08 (vanaf 2008, Kers, 2012). Voor de ecotopenkaart wordt de classificatie uit het ZES (Zoute Ecotopen Stelsel) gehanteerd (Bouma et al, 2005). De indeling van de habitatkaarten, die gebruikt worden in de Natura 2000 systematiek volgt de profielbeschrijvingen van habitattypen (Ministerie van EZ, 2012). Voor het omzetten van de ene naar de andere classificatie zijn vertaaltabellen beschikbaar. De kweldervegetatiekaart kan met een vertaaltabel worden omgezet naar een vegetatiezoneringskaart, een vegetatiestructuurkaart, een Habitattypenkaart en een KRW-zoneringskaart.

De ontwikkeling van de kwelders heeft plaatsgevonden in die gebieden in het Friesche zeegat waar de hoogte dermate was toegenomen dat de vestiging van pioniervegetatie mogelijk werd. Er is daarmee sprake van een duidelijke koppeling met de morfologische ontwikkeling, zowel op de schaal van het gehele kombergingsgebied als op de mesoschaal.

Er is ook een koppeling met menselijke ingrepen, want langs de vastelandskust is de ontwikkeling van kwelders gestimuleerd met landaanwinningswerken. Dat was succesvol bij de vastelandskust van Groningen, maar weinig succesvol bij het Friesche wad en het Wierumer wad (paragraaf 5.3).

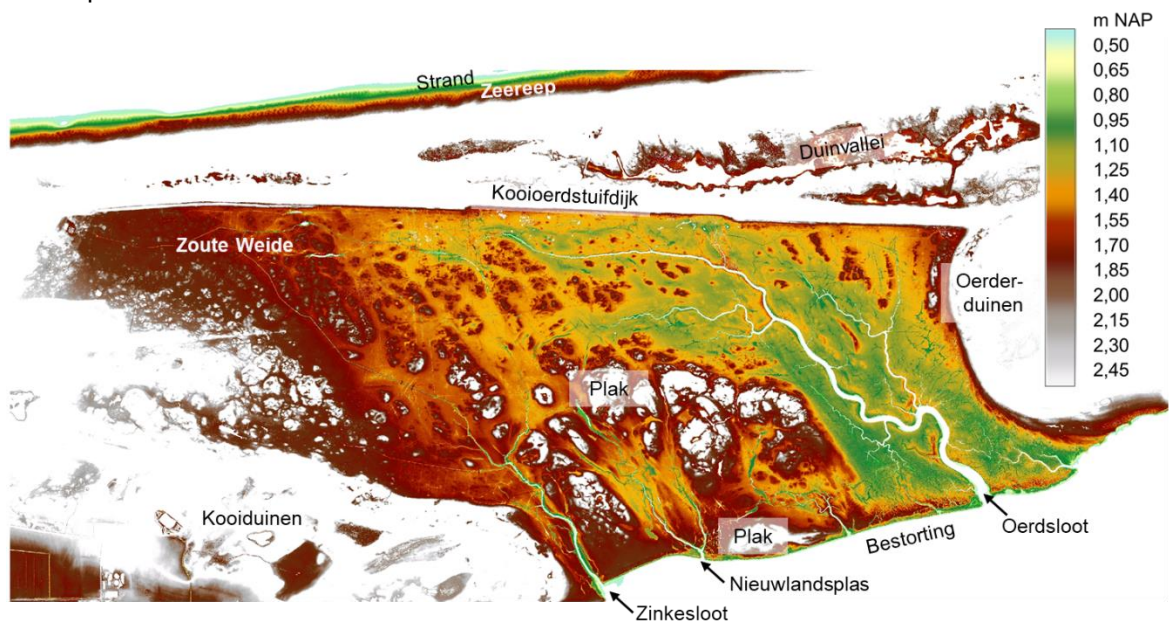
## 6.2 Kwelders van het Pinkegat

### 6.2.1 Eilandkwelders Ameland – De Hon en Neerlands Reid

#### Neerlands Reid

De kwelders op het Neerlands Reid (ook wel: Nieuwlands Reid) zijn voor een belangrijk deel ontstaan na de stuifdijkaanleg op Ameland (Figuur 6-3). Ze worden begrensd door de Kooiduinen aan de westzijde, de Oerderduinen aan de oostzijde en de Kooi-Oerdstuifdijk aan de Noordzijde.

Tussen Buren en Oerderduinen zijn meerdere stuifdijken aangelegd in de periode 1839-1880, die veelal mislukten. Pas in de periode 1882-1888 slaagde men erin een West-Oost lopende stuifdijk aan te leggen (Kooi-Oerdstuifdijk) die de Kooiduinen met het Oerd verbond. In de periode 1960-1970 werd oostwaarts van de bestaande stuifdijk een nieuwe aangelegd van paal 20,6 naar paal 23. Tussen paal 18-21 werden in 2011 kerven aangelegd in de zeereep.



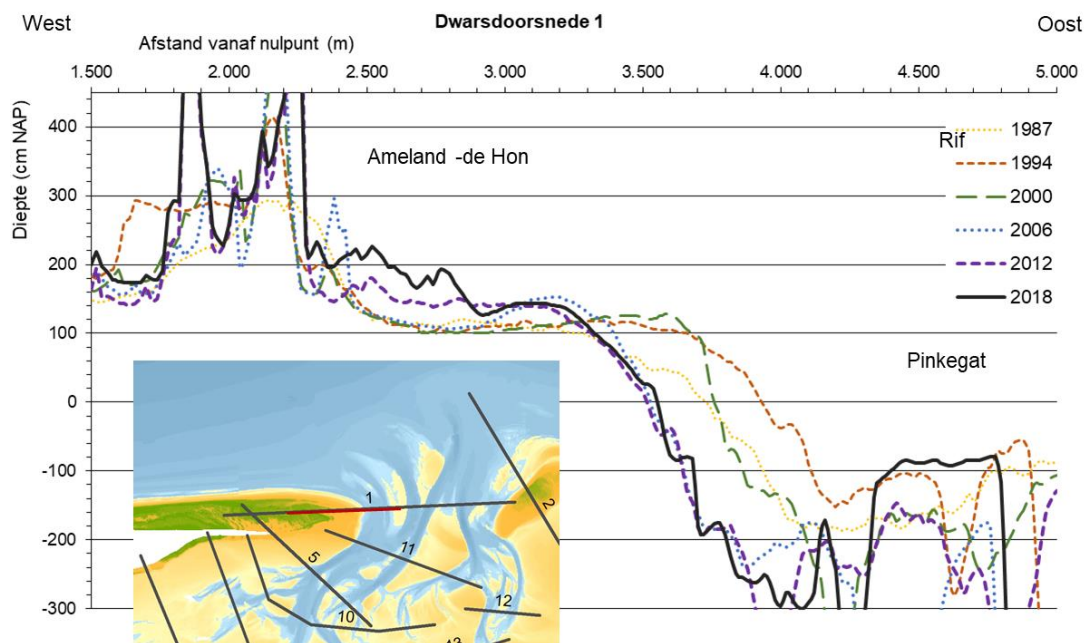
Figuur 6-3 Hoogtekaart van het Neerlands Reid, de hoogtecontouren op basis van de AHN3-LiDAR hoogtemetingen (2014).

Op de zo afgesloten strandvlakte lagen toen al duintjes uit de periode 1800-1880 (Bakker et al., 1979). Deze duintjes vormen hoogtes in de tegenwoordige kwelder, die worden aangeduid met 'plak'. In de luwte van de stuifdijk kon de kwelder zich ontwikkelen (Ehlers, 1988). In een periode van ongeveer 125 jaar na de aanleg van de stuifdijk werd een sedimentlaag van circa 50 cm dikte afgezet, op die plaatsen waar zand werd afgezet. Waar minder zand werd afgezet is de dikte van de afzettingslaag tot de helft kleiner (Mantel et al., 2016). De kwelders worden begraasd. De kwelder en een deel van de aangrenzende duinen is eigendom van de 'Maatschappij tot Exploitatie van Onroerende Goederen op het Oosteinde, Oerd en Neerlands Reid B.V.', kortweg de 'Vennoot' genoemd. Kliferosie wordt vanaf het westen tot iets voorbij de Oerdsloot tegengegaan door een steenglooiing (NAM, 2017).



## De Hon

Ten oosten van de Oerderduinen ligt de Hon, ontstaan zonder menselijke ingrepen en het vormt de zuidoostpunt van Ameland. In het bijzonder na de 19<sup>e</sup> eeuw groeide die punt opnieuw aan: tussen 1927 en 1998 schoof de gemiddeld hoogwaterlijn netto 2,3 km oostwaarts. De gaten in de spontane duinaangroei noordelijk ervan werden in de 20<sup>e</sup> eeuw gedicht.

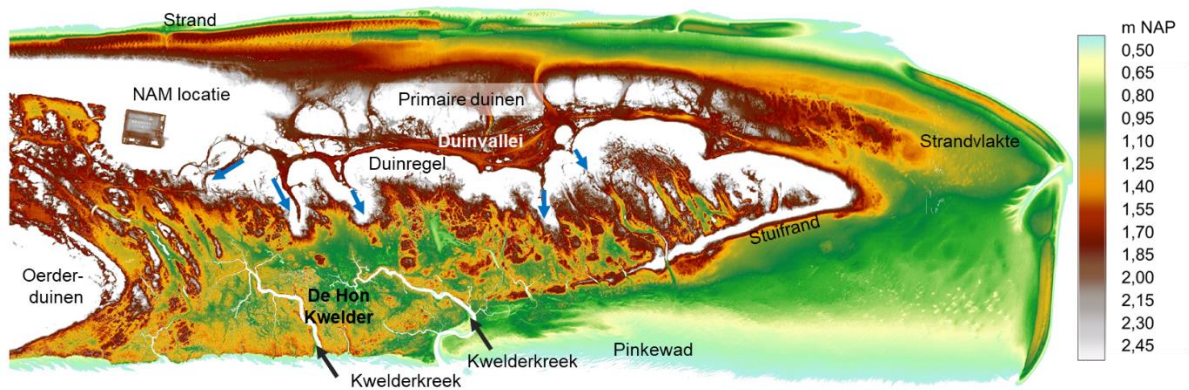


Figuur 6-4 Dwarsdoorsnedes van de oostpunt van de Ameland, op basis van de vaklodingen (locatie in inzet).

Aanvankelijk was de Hon een kale zandplaat, maar langs de noordzijde vormden zich jonge duintjes (Schroevers & Van Leeuwen, 1962). Daarachter ontwikkelde zich de kwelder. Voor De Hon zal de stuifdijk een heel beperkte invloed hebben gehad op de vorming (De Groot et al., 2015). Het was voornamelijk de aangroei, ophoging en natuurlijke duinvorming die de kwelderontwikkeling bepaalde.

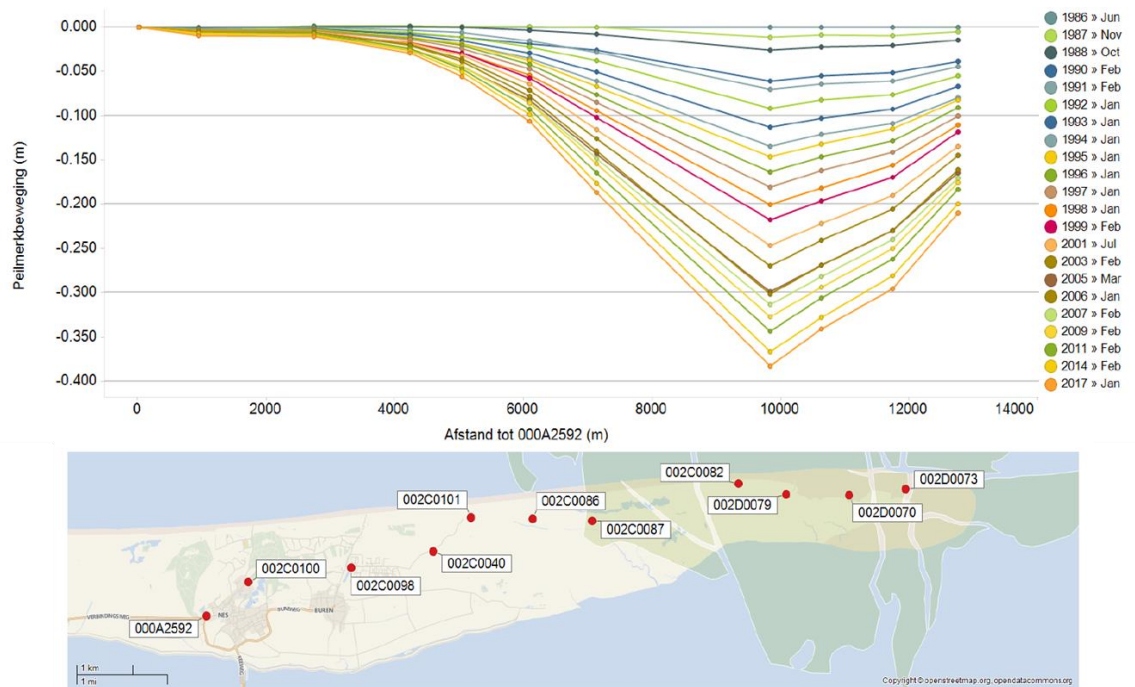
Aan de zuidwestzijde van De Hon vindt kliferosie plaats; aan de zuidoostzijde aangroei. Er zijn delen die vanaf 1986 in 25 jaar tijd de successie van pionierzone, via Gewoon kweldergras en Gewone zoutmelde naar Zeekweek hebben doorgemaakt. De hoogteontwikkeling van de Hon is zichtbaar in de dwarsdoorsnedes in Figuur 6-4. Het gebied direct ten oosten van de hogere duinen laat, ondanks de bodemdaling door de gaswinning van enkele decimeters, een toename van de hoogte zien van rond + 1,0 meter boven NAP in 2006 tot rond +2,0 m boven NAP in 2018. De ruimtelijke variatie in de hoogtetoe name is groot, omdat niet alleen sprake is van een kwelder, maar ook van washovers, pionierduinen en een strandvlakte (Figuur 6-5), waarbij door de verschillende sedimentatie- en erosieprocessen sprake is van verschillende sedimentatiesnelheden. De kleilaag die is gevormd door de sedimentatie op de kwelder van De Hon is aanzienlijk dunner dan op het Neerlands Reid (NAM, 2017). De Hon en een deel van het Oerd wordt sinds 1938 door It Fryske Gea beheerd.

Figuur 6-4 toont ook dat de groei van het eiland is gestopt. Beschouwd op een hoogte van NAP -100 cm is het in de opname van 1994 meer dan 500 meter langer dan in de opname van 2006.



Figuur 6-5 Hoogtekaart van de Hon, de hoogtecontouren op basis van de AHN3-LiDAR hoogtemetingen (2014). De blauwe pijlen markeren de washovergeulen.

De kwelders van zowel het Neerlands Reid als de Hon zijn sinds 1986 onder invloed gekomen van de bodemdaling door de gaswinning op Oost-Ameland. De omvang van de bodemdaling op basis van metingen aan peilmerken in de ondergrond is weergegeven in Figuur 6-6. De bodemdaling als gevolg van gaswinning duurt voort tot op heden. Vanwege de bodemdaling vindt een intensieve en uitgebreide monitoring plaats van de kwelders. Iedere zes jaar wordt hierover uitgebreid gerapporteerd (de rapportages zijn te vinden via de website <https://www.waddenzee.nl/themas/bodemdaling-ameland/>)



Figuur 6-6 Dwarsdoorsnede door de ondergrondse peilmerken aan de oostzijde van Ameland, die de mate van bodemdaling weergegeven in de periode 1986-2017 (NAM, 2017).

## 6.2.2 Kwelders vasteland

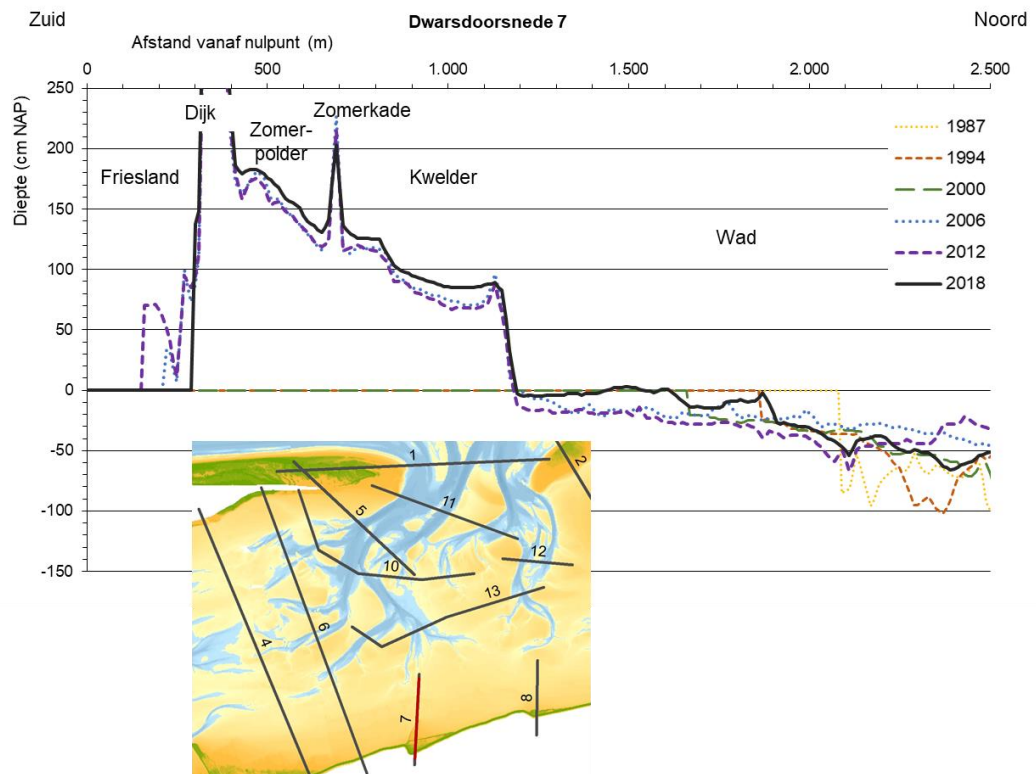
In het voorgaande hoofdstuk is de aanwezigheid van de restanten van de kwelderwerken bij de vastelandskust beschreven (zie ook Figuur 5-5 en Figuur 5-6). Landaanwinning was hier eigenlijk nooit succesvol en pogingen ertoe zijn gestaakt in de jaren '60 (voordat landaanwinning werd veranderd in kwelderwerken). Zeewaarts van de Waddenzeedijk bij de Friese vastelandskust zijn van west naar oost aanwezig:

### De kwelderuitlopers oostelijk van de veerdam Holwerd.

Deze kwelder is, mede door de kwelderwerken, in de luwte ten oosten van de veerdam ontstaan. De zeewaartse begrenzing van deze kwelder ligt bij de dam vrijwel tot aan het zeewaartse einde van de dam. De kwelder wordt verder naar het oosten steeds smaller. Deze vorm wijst op het belang van de dam voor de vorming en stabiliteit van deze kwelder. Het is niet duidelijk welke fysische processen precies verantwoordelijk zijn voor deze vorm en het ontbreken van brede vastelandskwelders verder oostelijk. Naast de invloed van de veerdam kan ook de nabijheid van het zeegat Pinkegat een rol spelen in de afwezigheid van oostelijkere kwelders. Op de kwelders is recent door de beheerder (Staatsbosbeheer) een vogelkijkscherm en een broedeiland aangelegd.

### It Skoar

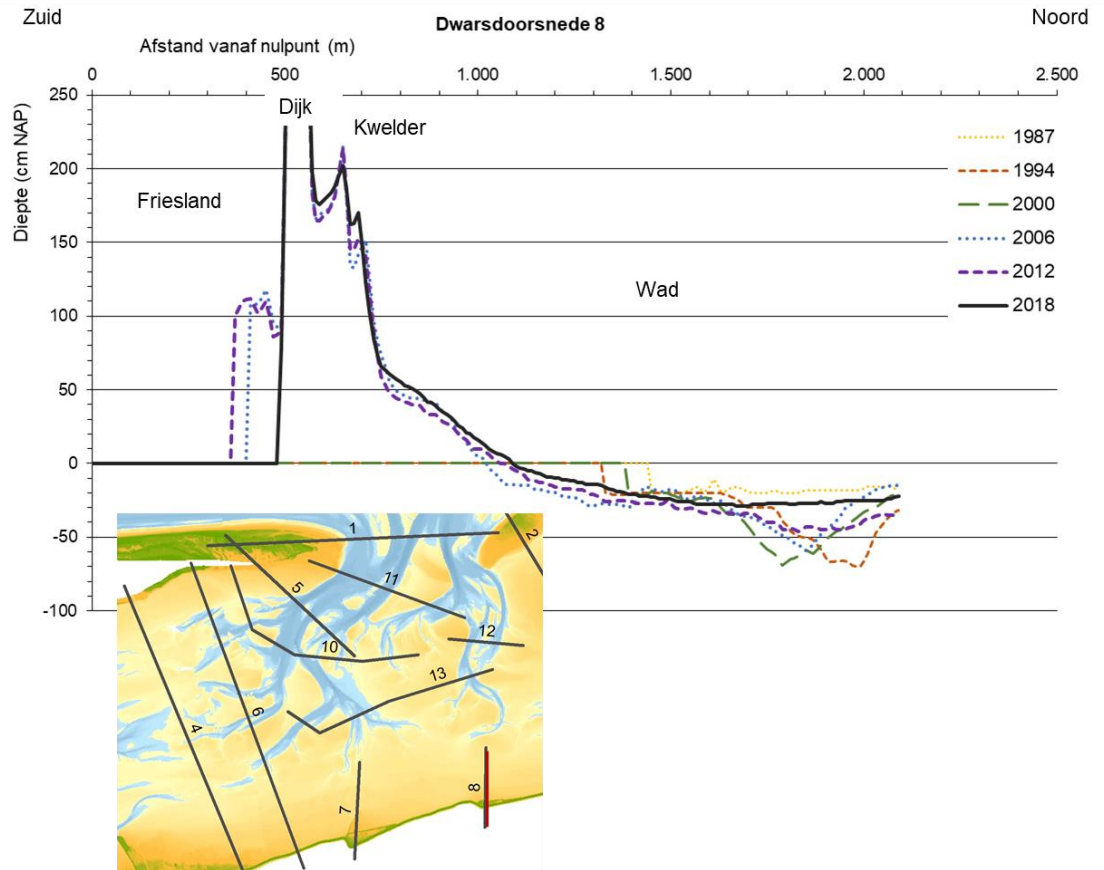
Dit is een kweldertje noordoostelijk van Ternaard, liggend in de luwte van de hoek in de zeedijk en een zomerdijk (Figuur 6-7). Op de kwelder graast jongvee in de zomer.



Figuur 6-7 Schematische dwarsdoorsnede van It Skoar met voorliggende wadplaat.

## De Kromme Horne

Dit kwelderfragment ten oosten van Wierum ligt in de luwte van de hoek in de zeedijk en was in ieder geval in 1830 al aanwezig (Figuur 6-8). Daarmee is het een vrij oude kwelder. Het wordt gekenmerkt door een onregelmatig oppervlakte van hoge kwelder met daartussen erosiegaten waarin schelpen en zand overheersen. De kwelder wordt begraasd door schapen. Voor dit kwelderfragment is een plan bedacht om een houten pier “Kromme Horne” van 330 meter lengte aan te leggen naast de bestaande dam die daarmee beschermd zal worden. Het idee is om later deze dam tot 550 meter te verlengen.



Figuur 6-8 Schematische dwarsdoorsnede van de Kromme Horne met voorliggende wadplaat.

## De Peazemerlannen

De Peazemerlannen is een 100 ha groot kweldergebied, in beheer bij het Fryske Gea. De kwelder is ontstaan uit een polder van 40 jaar oud, na een dijkbreuk in 1973. Binnen de Peazemerlannen zijn nog verschillende zomerkades en greppels met de restanten van klepduikers aanwezig. Een groot deel van Peazemerlannen wordt begraasd. Maatregelen om de natuurwaarde van de Peazemerlannen te vergroten, onder andere door het aanleggen van een broedeilandje, zijn in voorbereiding.

## 6.3 Kwelders van Zoutkamperlaag

### 6.3.1 Kwelders en groene stranden Schiermonnikoog

#### Groene stranden

Een groen strand is een overgangshabitat waar zich soorten van zoute tot brakke/zoete kwelder- en duin vegetaties vestigen. Vaak zijn er ook microbiële matten aanwezig (Stal et al., 1985). Zuidelijk van de Westerplas ligt op het Rif een groen strand van iets meer dan een vierkante kilometer groot (aangeduid met Groen strand zuid in Figuur 6-9). Het groene strand ontstond toen na de afsluiting van de Lauwersmeer in 1969 de zandplaat hoger werd (zie 5.5 en Figuur 5-9). Dit groene strand kenmerkt zich ook door veel microbiële matten en het gebrek aan embryoduinen (Severin & Stal, 2008). In een volgende fase kan zich geleidelijk een mozaïek van kweldermilieus, al of niet afgesnoerde primaire duinvalleien, sluffers, washover-systemen, embryoduintjes en/of witte duinen ontwikkelen (Bakker et al., 2005; Kers & Koppejan, 2005; Petersen et al., 2013). Anderzijds kan het groene strand ook vrij snel weer verdwijnen en terugkeren in de staat van een onbegroeide strandvlakte of strand. Ook ten zuidwesten van de Westerplas, aan de noordwestzijde van eilandkop van Schiermonnikoog en aan de noordzijde van het eiland zijn Groene stranden aanwezig.



Figuur 6-9 Overzichtsluchtfoto (2018) van de westzijde van Schiermonnikoog

#### Binnenkwelder en Oosterkwelder

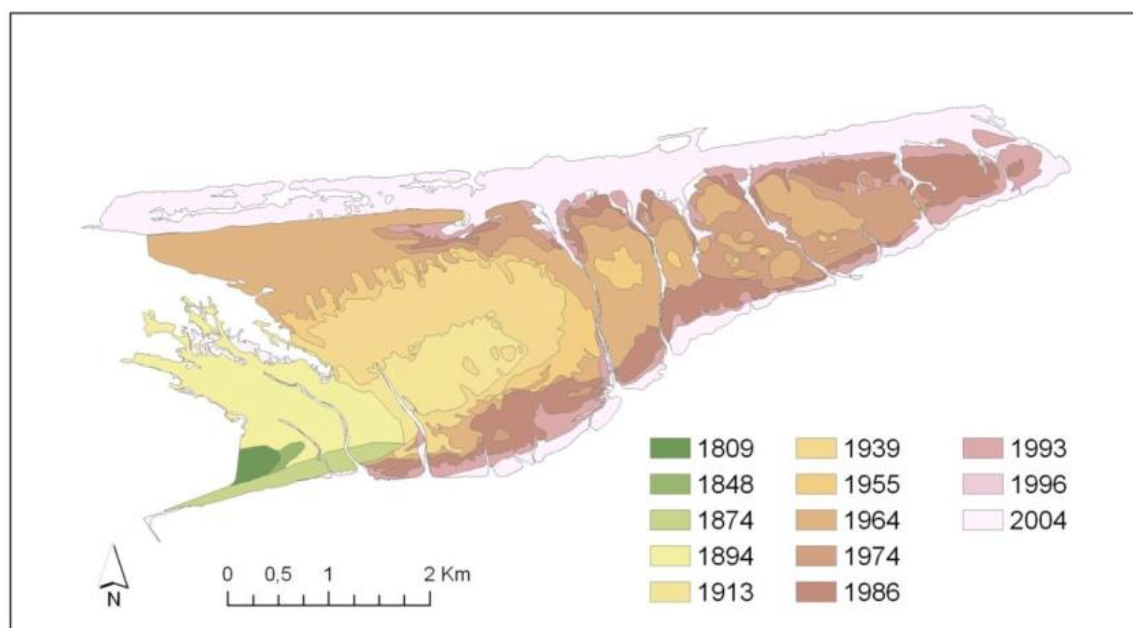
De Binnenkwelder en de Oosterkwelder liggen ingeklemd tussen de Kooiduinen aan de zuidwestzijde en de Kobbeduinen aan de noordoostzijde. De kwelder gaat naar het noordwesten geleidelijk over in het duingebied (Figuur 6-10).



Figuur 6-10 Overzichtsluchtfoto (2018) van de oostzijde van Schiermonnikoog

Beide kwelders zijn grotendeels na 1945 ontstaan. In 1945 werden bij het verbreden van de zeereep de inbochtigen en doorbraakgaten rechtgetrokken respectievelijk afgesloten vanuit het westen tot en met de Kobbbeduinen<sup>10</sup>.

Westelijk van de Kobbbeduinen vormden zich in de luwte ervan de zogeheten Binnenkwelder en Oosterkwelder. Een deel is zelfs nog ouder en is op kaarten van 1809 en 1848 al te zien (Figuur 6-11). De naam Oosterkwelder is afgeleid van de tijd dat dit nog het oosteinde van het eiland was; later is deze naam abusievelijk ook wel gebruikt voor het gebied oostelijk van de Kobbbeduinen. De kwelders werden tot 1959 begraasd door runderen. Daarna werd alleen in de zomer vlak bij de dijk nog beweid. Vervolgens is dit weer oostwaarts uitgebreid (zie Kwelder Oostpunt).

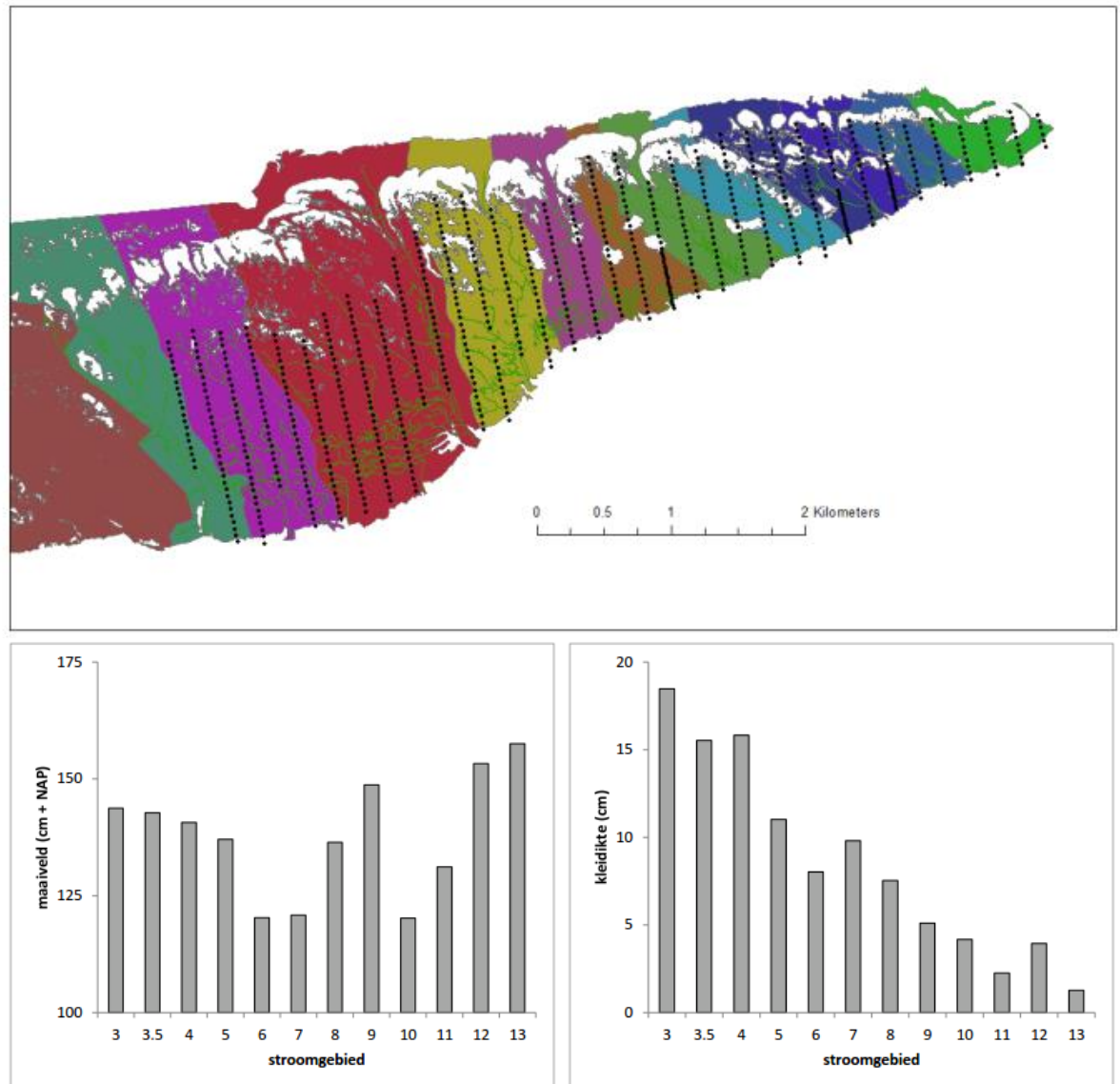


Figuur 6-11 Leeftijden van de kwelders en duinen van de eilandstaart van Schiermonnikoog (Kers et al., 1998; Jager, 2006).

<sup>10</sup> De Kobbbeduinen zijn in hun huidige vorm ontstaan tussen 1858 en 1891.

### Kwelder Oostpunt

Vanaf 1950 zijn, met beperkt succes, stuifdijken aangelegd ten oosten van de Kobbeduinen. In 1959 werd tussen paal 7 en 13 een stuifdijk aangelegd met een oost-west oriëntatie over het strand. Die boog af ter hoogte van paal 14 en werd later doorgetrokken, naar net voorbij het Willemsduin. Deze stuifdijk werd herhaaldelijk aangetast en met wisselend succes weer gerepareerd. Uiteindelijk werd in de jaren '80 het onderhoud van de stuifdijk voorbij paal 10,4 gestaakt. Toen waren oostelijk ervan grote openingen aanwezig. In 1989 werd nog een drempel in stand gehouden, ter hoogte van Paal 11, tussen de resten van de aanwezige duinen. Vanaf 1990 geldt het beleid van dynamisch kustbeheer en is onderhoud aan de zeereep tussen paal 7 en 10,4 ook stopgezet (De Groot et al, 2015).

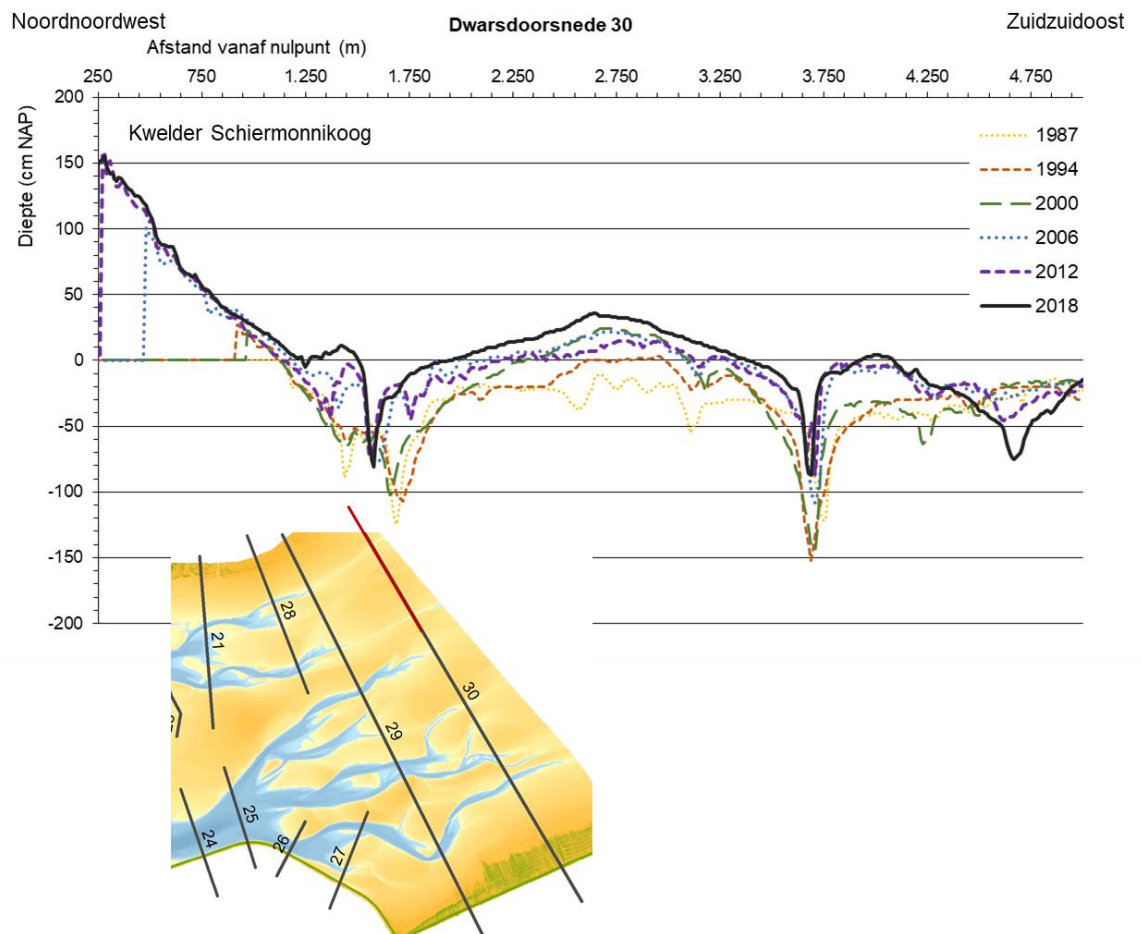


Figuur 6-12 Meetraaien in de verschillende stroomgebieden van de kwelderkreken (aangegeven met verschillende kleuren) op Schiermonnikoog en metingen van gemiddelde maaiveldhoogte (linksonder) en kleidikte (rechtsonder) uit De Groot et al. (2015).

In de luwte van de duinenrijen ontwikkelde zich een kwelder die met de ophoging en aangroei van het eiland zich geleidelijk naar het oosten en zuiden wist uit te bouwen (Figuur 6-11). De kleidikte neemt daardoor geleidelijk af in oostwaartse richting van 18 cm naar 1-2 cm. De gemiddelde oorspronkelijke hoogteligging lijkt minder belangrijk. (Figuur 6-12). De hoofdkreken zijn noord-zuid georiënteerd. Omdat er stukken van de kwelder gerelateerd zijn aan een specifieke kreek zijn er gerichte sedimentatiemetingen mogelijk (Figuur 6-12). Het grootste deel van de hoofdkreken is via washovers, die alleen tijdens stormvloed actief worden, ook verbonden met de Noordzezijde. De afstand tussen kreekmondingen aan de Waddenzeezijde is gemiddeld iets meer dan een kilometer (De Groot et al, 2015).

Op oudere kwelders, die zeewaarts zijn gegroeid, is het mogelijk dat het sediment niet de delen kan bereiken die het verst van de kwelderrand en kreken liggen. Deze blijven achter qua ophoging. Dit wordt wel het 'badkuipeffect' genoemd, omdat deze delen daardoor kunnen vernatten (zie ook Van Wesenbeeck et al., 2014). Op Schiermonnikoog liggen juist deze delen vrij hoog ten opzichte van het getij. De drainage is dan bepalend of het badkuipeffect zich voordoet.

Dicht bij de oostkant van de Kobbeduinen is wel sprake van vrij natte condities, omdat een deel van het gebied is ingesloten tussen oudere lage duintjes in het zuiden en de stuifdijk in het noorden. Rietgroei is daar een belangrijk deel van de vegetatie.



Figuur 6-13 Dwarsdoorsnede van de Oosterkwelder met voorliggende wadplaat, nabij de wantij-zone tussen Zoutkamperlaag en het oostelijk gelegen kombergingingsgebied van de Lauwers.



Het aandeel van het areaal pionierzone op Schiermonnikoog is min of meer constant in de tijd, door aangroei in oostelijke en zuidelijke richting, waarbij steeds nieuwe laaggelegen bodem gekoloniseerd wordt. Deze aangroei met nieuwe pioniervegetatie heeft tot nu toe de arealen die verdergaan in successie meer dan kunnen compenseren, zodat het nastreven van een brede range aan kweldervegetatie verzekerd blijft (De Groot, 2009; De Groot et al., 2015). Mogelijk heeft de relatief uitgebreide ontwikkeling van pioniervegetatie bij deze eilandkwelder, in vergelijking met de beperkte hoeveelheid bij Terschelling en Ameland, te maken met de ontwikkeling van de wadplaten voor deze kwelders. Als ze eenmaal voldoende hoog zijn kan de pioniersvegetatie zich erop vestigen. Zeewaarts van de Oosterkwelder is de hoogte van de wadplaten in de periode van 1987 tot 2018 toegenomen, zoals zichtbaar is in de dwarsdoorsnedes in Figuur 6-13. Bij de twee andere genoemde Waddeneilanden is geen sprake van toename van de wadplathoogte voor de kwelders van de eilandstaarten.

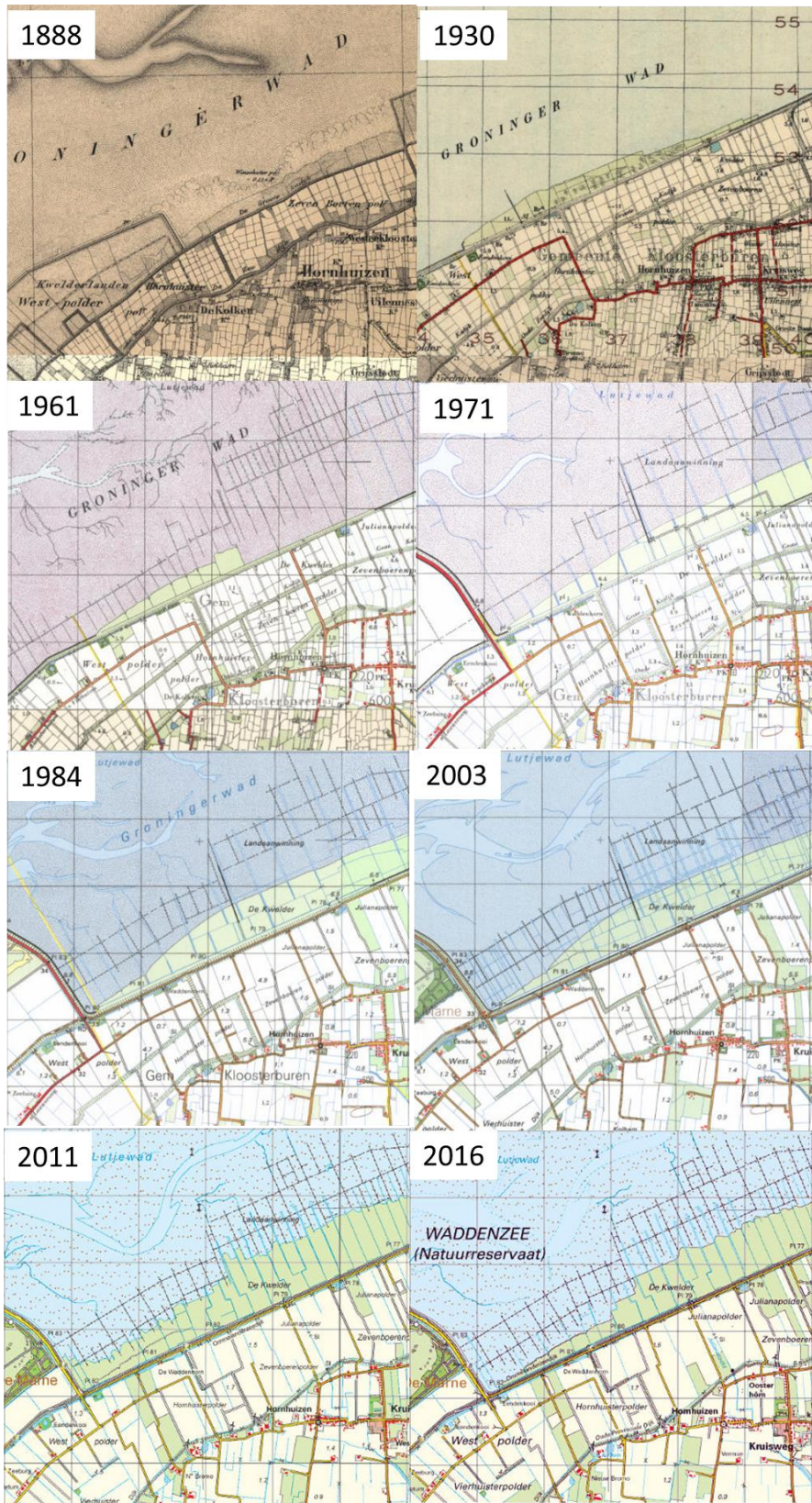
Er vindt kwelderbeweiding plaats. Na 1972 werd deze uitgebreid tot de 2<sup>e</sup> Slenk en noordelijk van het fietspad van de Oosterkwelder, om na 1987 zelfs uitgebreid te worden tot de 3<sup>e</sup> Slenk.

### 6.3.2 Kwelders Zoutkamperlaag, vasteland

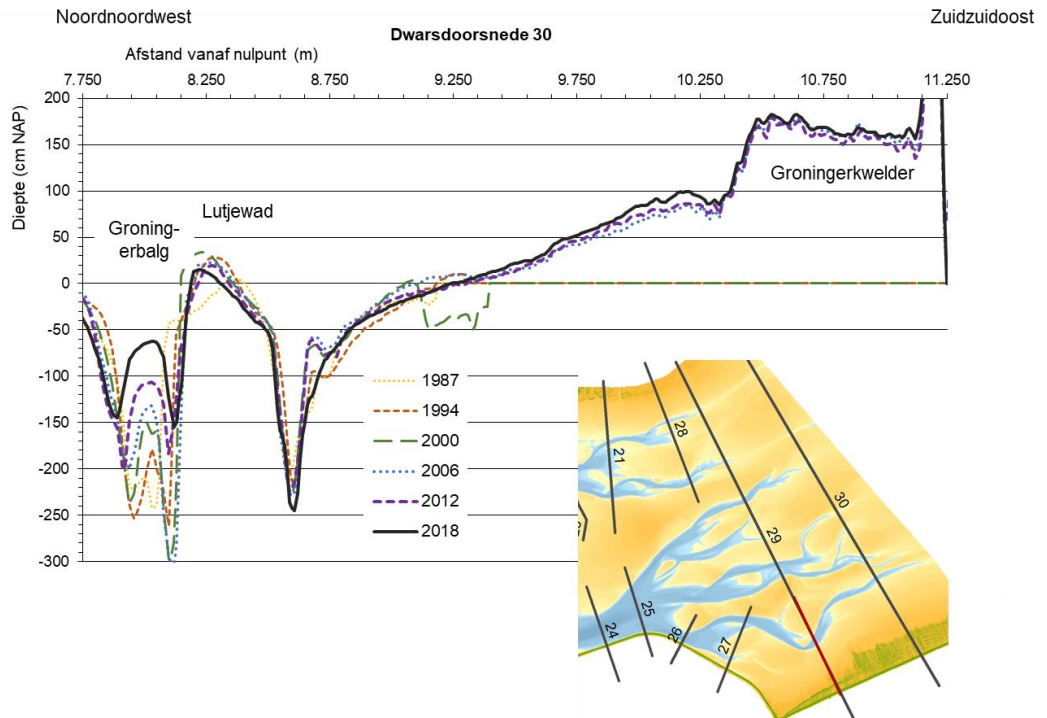
Aan het vasteland van Groningen zijn al lang kwelders aanwezig. Bij het uitruimen van de Lauwerszee zal vermoedelijk ook aan de noordoostzijde landverlies zijn opgetreden (Oost, 1995a), met langzame aanwas en inpolderingen, met name vanaf de vroege 19<sup>e</sup> eeuw. In Figuur 6-14 is te zien hoe tot 1930 nieuwe polders tot stand kwamen op de hoge kwelders. Daarna was er sprake van uitbreiding van de kwelders, bevorderd door uitgebreide kwelderwerken, voornamelijk na de 2<sup>e</sup> Wereldoorlog. De ophoging van de kwelders gaat nog door, zij het relatief langzaam (Figuur 6-15). De gemiddelde sedimentatiesnelheden van de westelijke Groninger kwelders ligt momenteel onder 1 cm per jaar (Figuur 6-16).

Figuur 6-16 geeft een overzicht van de bruto opslibbing in de kwelderwerken. Naarmate de kwelders hoger worden treden overstromingen minder vaak op en verloopt de opslibbing langzamer. De pionierzone is door kwelderwerken kunstmatig beschermd tegen golven en stroming.

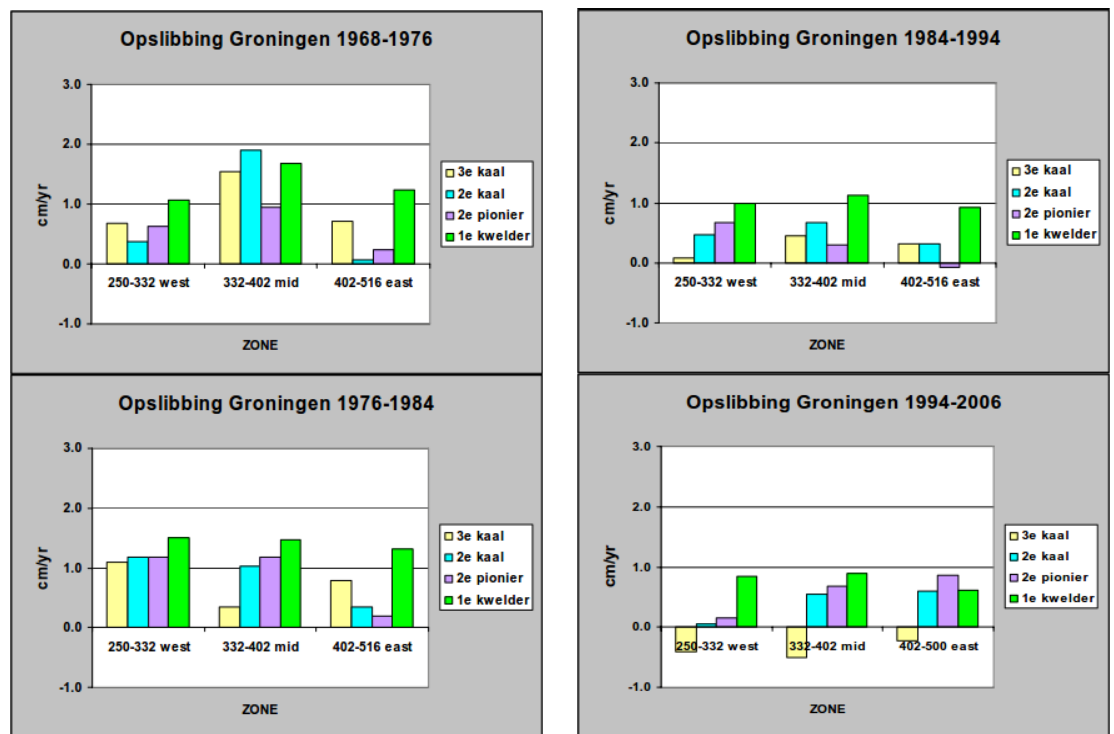
De opslibbing in de pionierzone van Groningen-west liep terug na 1984. In de verlaten buitenste bezinkvelden is de opslibbing afgenomen. Het maaiveld verlaagt netto over de periode 1994-2006 en volgt de hoogteligging van de aangrenzende wadplaten (Dijkema et al. 2001; Hoeksema et al. 2004). De uiteindelijke hoogteontwikkeling zal in evenwicht zijn met de aangrenzende wadplaten (Dijkema et al, 2007). Rijkswaterstaat ging de teruglopende opslibbing tegen door vakverkleining en herstel van de aansluiting van dammen aan de kwelder.



Figur 6-14 Topografische kaarten 1888-2016 met grootschalige kwelderwerken buitendijks.



Figuur 6-15 Dwarsdoorsnede van de Groninger kwelder met voorliggende wadplaat.

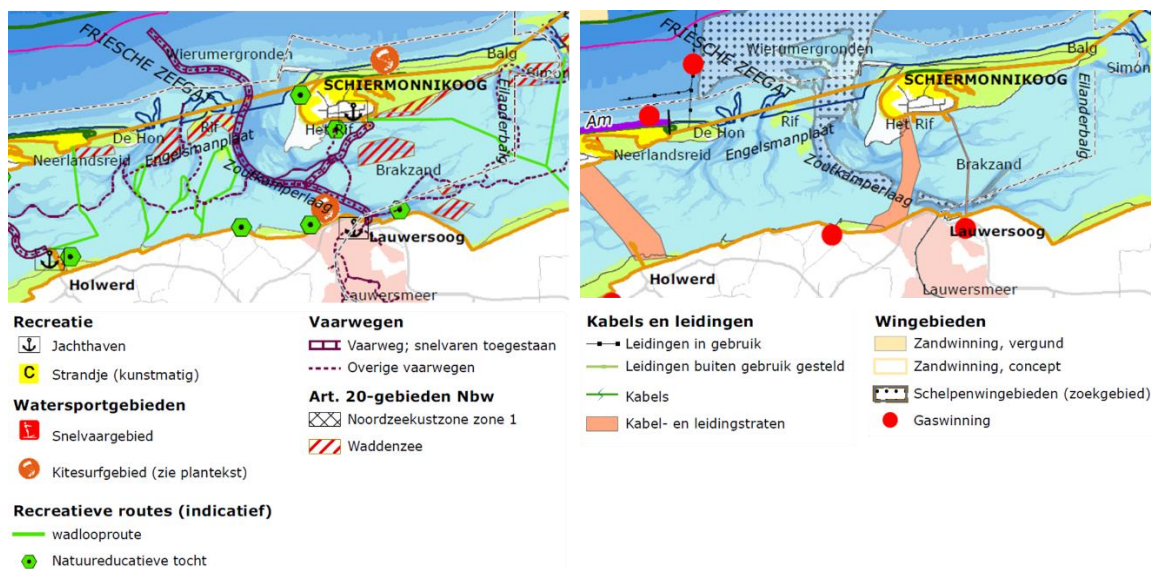


Figuur 6-16 Gemiddelde opslibbing over 4 perioden voor kale bezinkvelden, de pionierszone en de 1<sup>e</sup> kwelder. West zijn de Groninger kwelders van de Zoutkamperlaag (Dijkema et al, 2007).

# 7 Relatie morfologie en gebruiksfuncties

## 7.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft de belangrijkste verbanden tussen de morfologie van het kombergingsgebied en de gebruiksfuncties, getoond in Figuur 7-1. De prioriteit in het hebben en verspreiden van kennis van de morfologie op de mesoschaal ligt immers bij die morfologische eenheden die belangrijk zijn voor gebruiksfuncties, in het bijzonder als hierover belangrijke beheervragen zijn. Net zoals de rest van rapport beperkt dit hoofdstuk zich tot beschrijving. Voor nadere interpretatie of advisering aan beleid en beheer bestaan andere trajecten.



Figuur 7-1 Twee overzichtskarten met gebruiksfuncties, links recreatie en rechts civiele werken en economisch gebruik (bron: Natura 2000-beheerplan Waddenzee; Periode 2016-2022).

Het kombergingsgebied kent meerdere beheerders: Rijkswaterstaat, het Ministerie van LNV, waterschappen (Wetterskip Fryslân en Noordpolderzijlvest), Staatsbosbeheer, Natuurmonumenten, Fryske Gea, de gemeentes en de haven van Lauwersoog.

## 7.2 Veiligheid tegen overstromingen

### 7.2.1 Beleid en beheer

Langs de Waddenzee liggen primaire waterkeringen die de bewoonde Waddeneilanden, het vasteland en het Lauwersmeer beschermen tegen overstromingen.

Het Nederlandse beleid voor veiligheid tegen overstromingen is vastgelegd in de Waterwet en het Nationale waterplan 2016-2021 (Ministeries van I&M & EZ, 2015). Bij de toetsing van de keringen aan de normen worden karakteristieke maatgevende condities gehanteerd die ze moeten kunnen weerstaan. In de maatgevende condities verschillen Waddenzee en Noordzee sterk. De Waddenzee is veel ondieper en de daarin optredende golven zijn kleiner. Ook de aanwezigheid van voorlanden (het gebied voor de dijk, dat bestaat uit kwelder, wadplaat of geul) bepaalt de golfopzet en/of maatgevende waterstanden.

De maatgevende golven die bepalend zijn voor de dimensies van de waterkeringen, zijn voor de waterkeringen rond de Waddenzee lager dan voor de waterkeringen bij de Noordzee. De wettelijk vastgelegde cyclus van het toetsen van de waterkeringen vindt iedere twaalf jaar plaats. Tekortkomingen bij de toetsing kunnen leiden tot het versterken van (onderdelen) van de waterkering. Nieuwe inzichten en (morfologische) ontwikkelingen worden meegenomen bij zowel de toetsing, het wettelijk instrumentarium ervoor en de metingen die bij de toetsing horen. De dijkversterkingen Koehoal-Lauwersmeer en Lauwersmeerdijk volgden op het afkeuren van de waterkering tijdens de voorgaande toetsronde. Daarnaast heeft Wetterskip Fryslân in de periode 2015-2018 de bekleding van de Waddenzeedijk op Ameland over een lengte van 16,5 kilometer versterkt en de dijk met gemiddeld 35 centimeter verhoogd. De dijk voldoet nu aan de wettelijke veiligheidseisen voor de komende 50 jaar.

### 7.2.2 De rol van morfologische veranderingen in de waterveiligheid

Morfologische veranderingen zijn van invloed op de waterveiligheid als hierdoor de belastingen op de waterkeringen veranderen. Het kan gaan om veranderingen in de maatgevende waterstanden en/of de golven (zwaardere golven vereisen een steviger bekleding). Bij de dijken rondom de Waddenzee wordt de golfaanval vooral bepaald door de waterdiepte in het gebied vóór de dijk: het voorland (bestaand uit kwelder, wadplaat of geul). Hoe hoger en uitgestrekter het is, des te lager de golven.

De aandacht voor de rol van het voorland voor de waterkering is de afgelopen jaren toegenomen. Tegenwoordig wordt bij dijkversterkingsprojecten nadrukkelijk gekeken naar de mogelijkheden om door beheer van en ingrepen in het voorland de versterking van de dijk te beperken. Dit speelt onder andere bij de nu lopende dijkversterking van Koehoal tot de Lauwersmeer (kombergingsgebied Pinkegat) en bij de lopende dijkversterking Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat (kombergingsgebied Zoutkamperlaag). Kweldererosie is ook een issue. Dit treedt in het Friesche Zeegat vooral op sinds het niet langer onderhouden van de buitenste kwelderwerken.

Morfologische veranderingen in het kombergingsgebied kunnen niet alleen invloed hebben op de belasting op een kering, maar ook op de sterkte ervan. Dit speelt in het bijzonder wanneer er veranderingen zijn in de ligging en de diepte van geulen en de steilheid van de geulwand. Een geul vlak bij een waterkering kan deze instabiel maken. Er zijn regels over de maximale helling die de onderwateroever mag bereiken. Om te voorkomen dat dit criterium wordt bereikt, wordt de geulwand bestort (met stortsteen of staalslakken). Waar een bestorting ligt wordt door de beheerder steeds gecontroleerd of deze nog voldoet, of dat onderhoud (aanvullingen) nodig is. Dit is onder meer gebeurd bij de westelijke Lauwersmeerdijk in de 90er jaren en in de periode 2010-2015 voor de oostelijke Lauwersmeerdijk bij het Vierhuizergat. De ontwikkelingen bij het Vierhuizergat, iets oostelijk van de Lauwersmeerdijk, zijn beschreven in paragraaf 4.5. Bij onderzoek binnen POV<sup>11</sup> Waddenzeedijken voor het Vierhuizergat, is bekeken of een geulwandsuppletie, met zand dat is gewonnen in de geul, dan wel het geheel verleggen van de geul alternatieven waren voor een vervolgbestorting. Het onderzoek wees voor het Vierhuizergat uit dat bestortingen de aangewezen maatregel waren, zie Ouwerkerk et al. (2019) voor de samenvatting van de resultaten. Het meenemen van zandige alternatieven bij het aanpakken van geulinstabiliteit bij geulen blijft voor andere locaties een te bekijken optie. Hiervoor is in het kader van de POV Waddenzeedijken een handreiking opgesteld: "Handreiking Geulmanagement; Wat te doen als een geul naar de dijk kruipt..." (Sas, 2019).

---

<sup>11</sup> Binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) zijn er verkenningen die individuele versterkingsprojecten overstijgen (POV's). Er is er ook een voor de Waddenzeedijken, zie <https://pov-waddenzeedijken.nl/>.

Bij (grotere) spuisluisen, zoals de Cleveringsluizen in de Lauwersmeerdijk, is een onderzeese bestorting aanwezig om erosie ten gevolge van het uitstromende water te voorkomen. Dit soort erosie in de vorm van ontgrondingskuilen is een lokaal fenomeen dat direct samenhangt met de aanwezigheid van de spuisluisen.

## 7.3 Bereikbaarheid: vaarwegen en havens

### 7.3.1 **Beleid en beheer**

In het kombergingsgebied Pinkegat liggen geen havens. Het wordt vrijwel uitsluitend gebruikt door recreatievaart.

In het kombergingsgebied Zoutkamperlaag liggen de haven van Lauwersoog en de veerhaven en de jachthaven van Schiermonnikoog. De haven van Lauwersoog is het grootst en vooral van belang voor visserij. Het heeft een stelsel van dammen om luwte verschaffen en is via de Zoutkamperlaag verbonden met de Noordzee. De veerverbinding vanaf Lauwersoog (Wagenborgen Passagiersdiensten) is uiteraard zeer belangrijk voor Schiermonnikoog.

Het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag wordt gebruikt door zowel beroepsvaart (veerboot, visserij, vrachtvaart, waaronder zand- en schelpenwinners) als recreatievaart. Een deel is vanwege diepgang gebonden aan betonde vaargeulen die havens en de zeegaten verbinden. Alle havens en een aantal van de vaargeulen worden onderhouden (baggeren en verspreiden). Het beheer voor toegankelijkheid omvat verder toezicht, monitoring, het aanbrengen, verleggen en onderhouden van betonning, inrichting en onderhoud van veerhavens, scheepvaartbegeleiding en ook het onderhoud van havendammen. Het beheer van de havens ligt bij de gemeente (recreatiehaven Schiermonnikoog), het havenbedrijf (industriehaven Lauwersoog) en Rijkswaterstaat (veerhavens Lauwersoog en Schiermonnikoog). De recreatiehaven Lauwersoog ligt binnendijks.

De Scheepvaartverkeerswet specificereert dieptes van vaarwegen, de situatie van 2006 is maatgevend, met specifieke aanwijzingen voor baggerwerken in de Waddenzee:

- Ze zijn beperkt in omvang,
- Volgen de natuurlijke morfologische ontwikkelingen en
- Vinden uitsluitend plaats indien de bereikbaarheid van de havens, de Waddeneilanden of de verkeersveiligheid in het geding zijn.

### 7.3.2 **De rol van morfologische veranderingen in de bereikbaarheid**

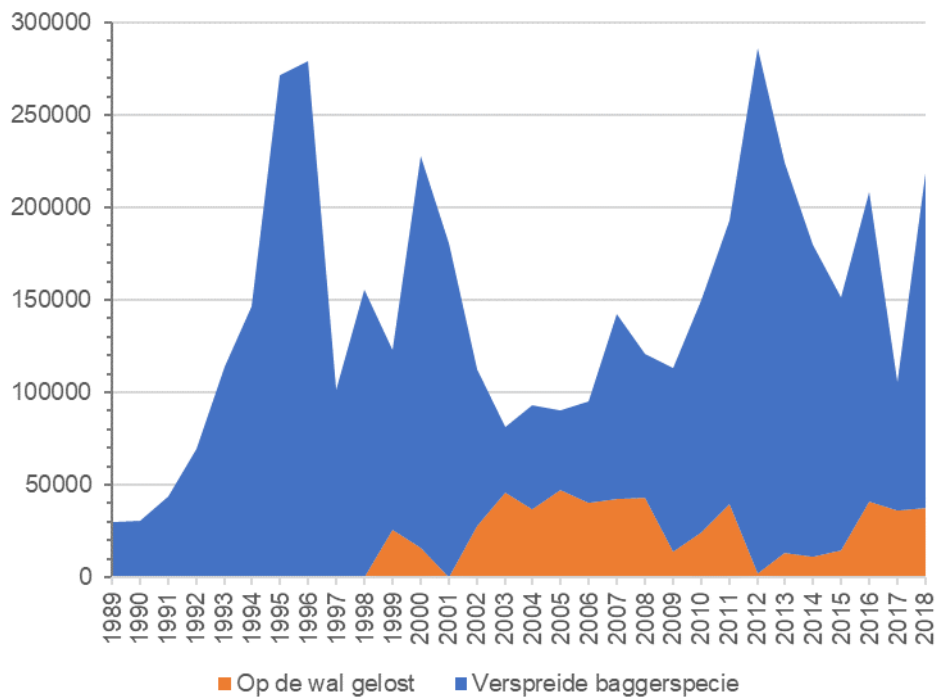
Veranderingen in geulen die worden onderhouden voor de bereikbaarheid hebben uiteraard direct invloed op de benodigde baggerinspanning. Gebaggerd materiaal moet ook weer verspreid worden in de Waddenzee. De verspreidingslocatiekeuze daarvoor is mede gebaseerd op morfologische ontwikkelingen.

Tabel 7-1 geeft een overzicht van het gemiddeld jaarlijks onderhoud van havens en vaarwegen, over de perioden 2013-2017 of 2013-2015. Figuur 7-2 geeft in een grafiek de gebaggerde volumes (in beun) in opdracht van Rijkswaterstaat. Een klein deel van de gebaggerde specie, dat vrijkomt bij het onderhoudsbaggerwerk van de geulen wordt sinds 1998 aan de wal gelost. Het baggerwerk dat wordt uitgevoerd in de recreatiehaven van Schiermonnikoog en de geul naar deze haven en het baggerwerk in de industriehaven van Lauwersoog is niet in de grafiek opgenomen.

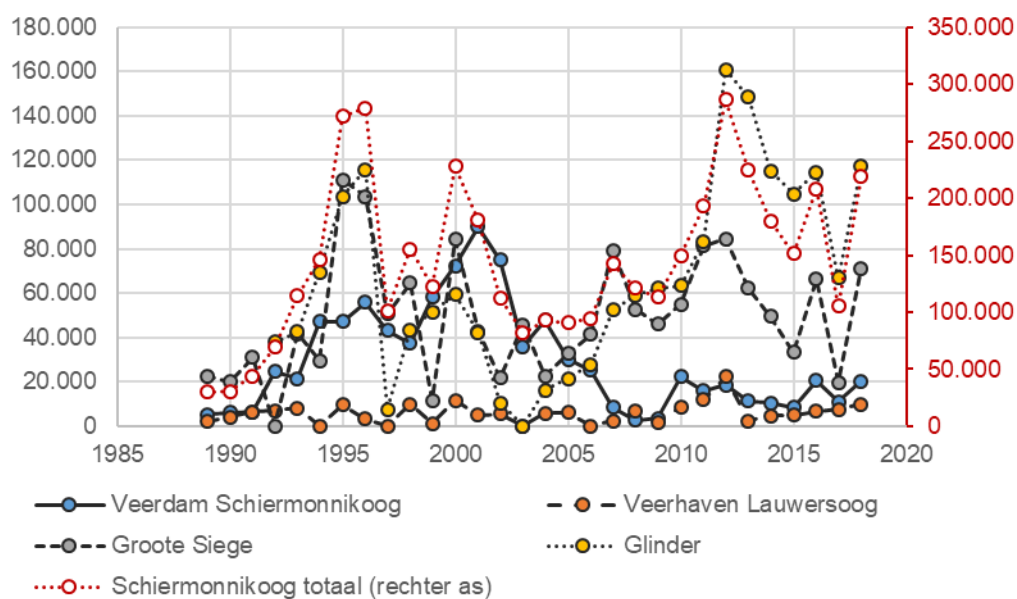
Er zijn grote fluctuaties te zien in de gebaggerde volumes. Figuur 7-3 laat per baggergebied zien hoeveel baggerspecie is gebaggerd. Uit deze grafiek is af te leiden dat de grote variaties in de baggervolumes met name optreden in de baggergebieden Glinder en Grootte Siege. In geen van de gebaggerde gebieden vindt een trendmatige toe- of afname van de baggervolumes plaats. Ook in de Grootte Siege, waarvan de natuurlijke geul sterk in omvang is afgenomen (Figuur 4-4), is geen sprake van een trendmatige toename van het baggervolume. Mocht de afname in omvang doorgaan, dan kan het baggervolume sterk toenemen zodra de diepte van de natuurlijke geul kleiner wordt dan de gewenste baggerdiepte. Een dergelijke sterke toename is bijvoorbeeld opgetreden in de vaarweg bij Holwerd.

Tabel 7-1 Overzicht baggervolumes in en nabij de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Bronnen: Wadden in beeld, 2016 en Natura 2000 beheerplan Waddenzee.

Kombergingsgebied	Hoeveelheid (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ) gemiddeld per jaar	Periode & Bron
Zoutkamperlaag		
Havens		
Lauwersoog	190	WiB2016
Veerhaven Lauwersoog	Gemiddeld: 9 Maximaal: 23  Periode 2011-2015	Bijlage A van PB baggeren en verspreiden Waddenzee (zie Natura 2000 beheerplan Waddenzee)
Veerdam/veerhaven Schiermonnikoog	10	WiB2016
Recreatiehaven Schiermonnikoog	10	Bijlage B van PB baggeren en verspreiden Waddenzee (zie Natura 2000 beheerplan Waddenzee)
Subtotaal	229	
Vaargeulen		
Vaargeul naar Schier	170	2011-2015 WiB2016
Totaal	399	



Figuur 7-2 Grafiek met de totale gebaggerde volumes per jaar in opdracht van Rijkswaterstaat in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag, waarbij is aangegeven welk deel van de gebaggerde is verspreid in het kombergingsgebied (blauw) en welke deel aan land is gebracht (oranje) (gegevens Rijkswaterstaat).



Figuur 7-3 Grafiek met de gebaggerde volumes per jaar in opdracht van Rijkswaterstaat voor de verschillende deelgebieden in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag (gegevens Rijkswaterstaat).

De morfologie van de buitendelta van de Zoutkamperlaag, hoewel strikt genomen buiten de scope van het kombergingsgebied, is van belang voor de benutting van de haven en havenfaciliteiten van Lauwersoog door vissers. Op de buitendelta was gedurende enige jaren een drempel in de belangrijkste toegangseuwl aanwezig, waardoor veel vissersschepen uitweken naar de havens van Harlingen en Urk en de Eemshaven. De drempel is in 2018 gebaggerd (pilot project). De ontwikkeling van de drempel wordt intensief gemonitord.



## 7.4 Natuur

### 7.4.1 **Beleid en beheer**

De Europese richtlijnen zijn de belangrijkste kaders, in Nederland geïmplementeerd via de Wet Natuurbescherming. De (instandhoudings)doelstellingen voor het Natura 2000-gebied zijn geformuleerd op de schaal van het gehele Natura 2000-gebied (Ministerie van LNV, 2008/2010). De morfodynamiek van de Waddenzee is daarin een zogenaamd 'kwaliteitselement'. Veel morfologische ontwikkelingen hebben effect op de arealen van de verschillende beschermde habitattypen, bijvoorbeeld doordat permanent onderstaande zandplaten (Habitattype H1110) veranderen in wadplaten (Habitattype H1140). Er zijn geen specifieke doelstellingen voor een enkel kombergingsgebied. Bij het opstellen van de Natuurdoelstellingen is onderkend dat autonome veranderingen plaatsvinden in de arealen van de verschillende habitattypen. De Kaderrichtlijn Water (KRW) heeft ook relatie met de morfologie. Ze kent ook doelstellingen voor abiotische aspecten, in het bijzonder eilandkwelders en de aanwezigheid van zeegras.

Voor Natura 2000-gebieden zijn er beheerplannen. Deze beschrijven ook de relaties tussen andere activiteiten en de natuur. Ook vanuit het kader van de Waterwet zijn er beheerplannen. Het Beheerplan Rijks Wateren (BPRW, Rijkswaterstaat, 2015) omvat maatregelen met betrekking tot de waterkwaliteit (slib) en de kwelders, om aan doelstellingen in de KRW te voldoen. Ook voor de Waddeneilanden en de vastelandskwelders bestaan beheerplannen.

### 7.4.2 **Morfologische veranderingen sturen natuurwaarden**

De Waddenzee is één Natura 2000-gebied, dat ook de vastelandskwelders omvat. Ook maakt het deel uit van het trilaterale Werelderfgoedgebied Waddenzee, zowel erkend op basis van de waarden van de bijzondere geomorfologie als van de levende natuur. Belangrijke ecologische functies zijn 'rust en foerageergebied voor zeehonden', 'foerageer- en rustgebied voor vogels', 'paaigebied voor vissen', 'ontwikkelingsgebied voor kwelders' en 'groeigebied voor ongewervelde dieren'. Al deze functies zijn afhankelijk van de hydromorfodynamische ontwikkelingen, want die hebben effect op de arealen en hun kwaliteit. De droogvallende platen en de geulen zijn qua omvang het grootst. Kwelders omvatten slechts een beperkt areaal.

## 7.5 Gaswinning

### 7.5.1 **Beleid en beheer**

Er is gaswinning in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag, vanuit velden rondom Ameland (gaswinning Ameland) en velden nabij de vastelandskust (gaswinning Moddergat, Lauwers, Vierhuizen oftewel MLV, ook wel bekend als gaswinning Waddenzee).

Beleid rond de diepe delfstoffenwinning is vastgelegd in de Structuurvisie derde nota Waddenzee (SVW, Ministerie van VROM, 2007a en b). Het huidige beleid staat het plaatsen van boor- en productieplatformen in de Waddenzee niet meer toe. Schuin vanaf het vasteland of vanaf de eilanden boren naar gas en zout onder de Waddenzee is nog wel toegestaan, maar het te winnen volume gas is begrensd, doordat de cumulatieve bodemdaling per kombergingsgebied niet groter mag worden dan de beschikbare 'gebruiksruimte'.

### 7.5.2 Relatie met morfologische ontwikkelingen

Bodemdaling door gaswinning wordt vooral veroorzaakt door het Ameland veld. De bodemdaling op Ameland bedraagt 2,3 Mm<sup>3</sup> en in het kombergingsgebied 8,6 Mm<sup>3</sup> waarvan 2,1 Mm<sup>3</sup> in de Zoutkamperlaag. De bodemdaling door gaswinning onder de Waddenzee wordt door sedimentatie aangevuld, door herverdeling van zand en slib in de Waddenzee (Van der Lugt et al., 2019). Hierdoor zijn geen gevolgen aan het wadoppervlak in de morfologie zichtbaar zijn, maar wel in de metingen van de sedimentatie (Krol et al., 2019). De vereffening vindt plaats door herverdeling van zand en slib in de Waddenzee en door de aanvoer van zand uit de kustzone. In sedimentbalansen van de aangrenzende buitendelta's en kust vormt de bodemdaling door de gaswinning dientengevolge een 'verliespost' voor sediment.

Delen van de eilandkwelders van Ameland zijn door de gaswinning Ameland verlaagd omdat opslibbing minder groot was dan de opgetreden bodemdaling (NAM, 2017). In delen van de kwelder heeft regressie (een verjonging) van de vegetatie plaatsgevonden (NAM, 2017).

### 7.6 Overige gebruiksfuncties

Dit wordt beperkt tot functies die een duidelijke relatie hebben met de morfologie.

**Recreatie:** De routes van de vastelandskust naar Ameland, de Engelsmanplaat en Schiermonnikoog zijn routes voor het wadlopen (zie ook Figuur 7-1). Deze routes liggen over de wantijzones en worden regelmatig aangepast vanwege veranderingen in de ligging van de geulen en veranderingen in de dikte van sliblagen nabij de kust.

**Visserij:** De visserij heeft geen directe relatie met de morfologie, anders dan de bereikbaarheid (zie hiervoor). Binnen het kombergingsgebied leveren de morfologische veranderingen, voor zover bekend, geen beperkingen op voor de visserij.

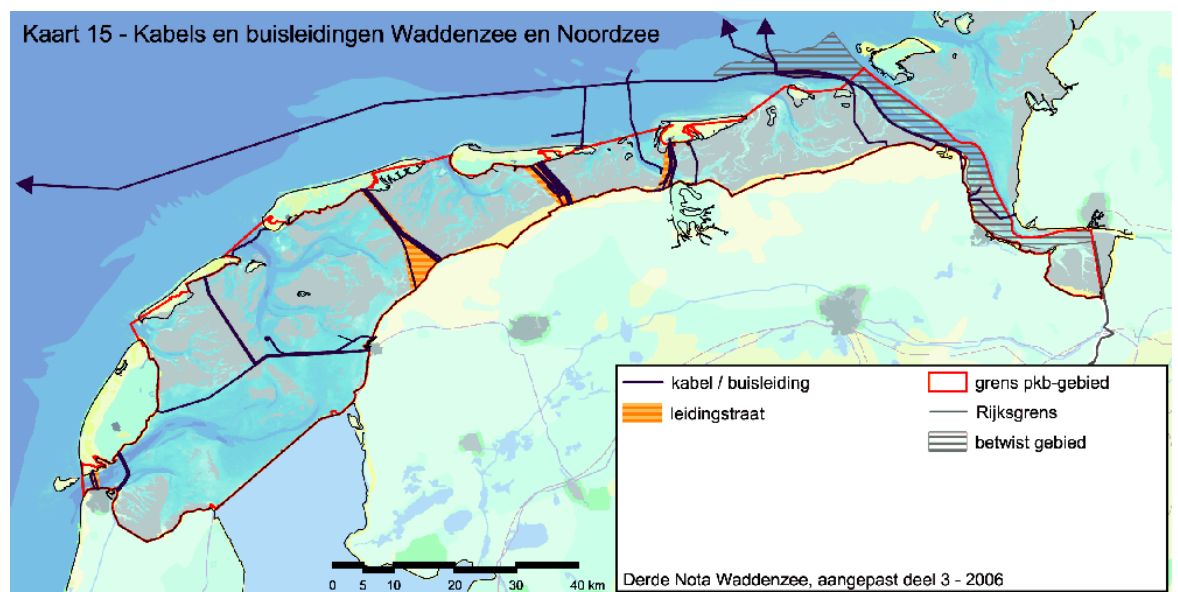
**Zand- en schelpenwinning:** In de Waddenzee is de zandwinning gekoppeld aan het onderhoud van de vaargeulen, zoals is vastgelegd in de Beleidsregels ontgrondingen in Rijkswateren: "landwaarts van de doorgaande NAP -20 meter dieptelijn in de Noordzee kan alleen vergunning worden verleend voor: a. de zandwinning uit de vaargeulen....". Zandwinning uit putten, buiten en binnen de vaargeulen, zonder onderhoudsdoelstelling, is sinds 1998 niet meer toegestaan. Het volume zand dat mag worden gewonnen was maximaal 500.000 m<sup>3</sup> per jaar, maar wordt afgebouwd, volgens het schema in Tabel 7-2. De reden voor de afbouw ligt in de gevolgen ervan voor de sedimentbalans van de Waddenzee en de kustzone. Figuur 7-2 toont de volumes aan zand die sinds 1998 worden gewonnen als onderdeel van het baggerbeheer van de vaargeulen.

Tabel 7-2 Beschikbare volume voor zandwinning in de Waddenzee in de periode 2012-2022 (Rijkswaterstaat).

Jaar	Zandwinkwotum (m <sup>3</sup> )
2012	500.000
2013	500.000
2014	500.000
2015	500.000
2016	500.000
2017	500.000
2018	400.000
2019	300.000
2020	200.000
2021	100.000
2022	0

Er worden schelpen gewonnen in de diepere geulen van de kombergingsgebieden, beneden de NAP -5 m diepte (zie Figuur 7-1). Op basis van de jaarlijkse schelpenproductie is het totale jaarlijkse quotum is de vigerende vergunning (Ministerie van I&M, 2016) bepaald op 80.000 m<sup>3</sup> per jaar in de Waddenzee. In totaal mag in de kombergingsgebieden, de buitendelta's en de Noordzeekust 160.000 m<sup>3</sup> aan schelpen per jaar worden gewonnen. De winning mag alleen plaatsvinden in de geulen dieper dan NAP -5 m.

**Kabels en leidingen:** Onder de wadbodem lopen verschillende kabels en leidingen die de Waddeneilanden met het vasteland verbinden (zie Figuur 7-1). Daarnaast zijn er leidingen en buizen die het vasteland verbinden met gebieden buitengaats. Dit betreft voor het Friesche Zeegat buizen voor gastransport (Figuur 7-4). In tegenstelling tot bij de meeste Waddeneilanden lopen de kabels en leidingen naar Schiermonnikoog niet over of nabij wantij gebieden, maar lopen deze onder diepe geulen.



Figuur 7-4 Leidingstraten en kabels en buisleidingen in de Waddenzee (Derde Nota Waddenzee, 2006).

In de Verkenning “aanlanding netten op zee 2030” zijn de routes verkend van de windkavels (<https://www.rvo.nl/onderwerpen/bureau-energieprojecten/lopende-projecten/hoogspanning/verkenning-aanlanding-netten-op-zee-2030>). (Arcadis & Pondera, 2018). Een van de verkende routes loopt over de wantijzone tussen het Pinkegat en de Zoutkamperlaag, via Rif en Engelsmanplaat. De reden voor het opnemen van deze route is de mogelijkheid om aan te sluiten op het elektriciteitsnetwerk bij Bergum. In het m.e.r.-traject dat is opgestart om de milieueffecten van de verschillende alternatieven en varianten te onderzoeken voor de verbinding van het gebied ten noorden van de Waddeneilanden zijn nog twee alternatieven toegevoegd (Witteveen en Bos, 2019), waarvan er een dwars door het Pinkegat loopt.

## 8 Referenties

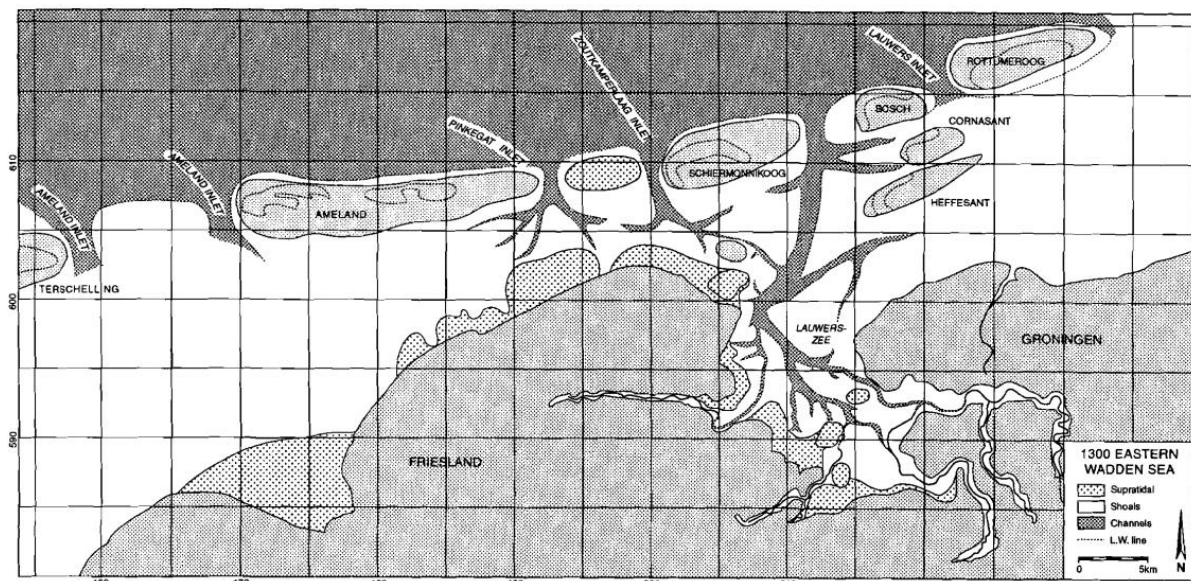
- Adam, P., 1990. Saltmarsh ecology. Cambridge University Press, Cambridge, 461 pp.
- Arcadis & Pondera, 2018a. Samenvatting Afwegingsnotitie; Verkenning aanlanding netten op zee 2030.
- Arcadis & Pondera, 2018b. Afwegingsnotitie; Verkenning aanlanding netten op zee 2030.
- Arcadis, 2017. Verkenning geulmanagement Varianten Vierhuizergat; POV Waddenzeedijken m.m.v. Rijkswaterstaat en Programma naar een Rijke Waddenzee. Arcadis rapport referentie 079148812 0.5Ra
- Baart, F., G. Rongen, M. Hijma, H. Kooi, R.de Winter & R. Nicolai, 2019. Zeespiegelmonitor 2018. De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Rapport Deltares met kenmerk 11202193-00: 0-ZKS-0004.
- Bakker, J.P., R.M. Veeneklaas, A. Jansen & A. Samwel, 2005. Een nieuw Groen Strand op Schiermonnikoog. De Levende Natuur, 106 (4): 151-155.
- Bakker, T.W.M., J. Kleijn & E. van Zadelhoff, 1979. Duinen en Duinvalleien. Delft, TNO.
- Biegel, E.J., 1992. Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function (phase 2): Investigation on empirical morphological relations - annex: data report RWS Report Coastal Genesis.
- Biegel, E. & P. Hoekstra, 1995: Morphological response characteristics of the Zoutkamperlaag Inlet, Friesian Inlet, The Netherlands to a sudden basin area reduction. International Association of Sedimentologists. Special Publication 24: 85-99.
- Bouma, H., D.J. de Jong, F. Twisk & K. Wolfstein, 2005. Zoute wateren EcotopenStelsel (ZES.1) Voor het in kaart brengen van het potentiële voorkomen van levensgemeenschappen in zoute en brakke rijkswateren Rapport RIKZ/2005.024/
- Consortium Deltares-IMDC-Svašek-Arcadis, 2013. Samenhang ontwikkelingen tijd- en ruimteschalen. LTV V&T-rapport K-17.
- De Groot, A.V., 2009. Salt-marsh sediment. Natural  $\gamma$ -radioactivity and spatial patterns. PhD Thesis
- De Groot, A.V., A.P. Oost, R.M. Veeneklaas, E.J. Lammerts, W.E. van Duin, B.K. van Wesenbeeck, E.M. Dijkman & E. C. Koppenaar. 2015. Ontwikkeling van eilandstaarten. Geomorfologie, waterhuishouding en vegetatie. Rapport nr. 2015/OBN198-DK.
- De Jong, D.J., K.S. Dijkema, J.H. Bossinade & J.A.M. Janssen 1998. SALT97. Classificatieprogramma voor kweldervegetaties. Rijkswaterstaat RIKZ, Dir. Noord-Nederland, Meetkundige Dienst; IBN-DLO. Diskette met programma en handleiding.
- Dijkema, K.S., A. Nicolai, J. de Vlas, C.J. Smit, H. Jongerius & H. Nauta 2001. Van landaanwinning naar kwelderwerken. Leeuwarden, Rijkswaterstaat dir Noord-Nederland en Texel, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, 68 p.
- Dijkema, K.S., W.E. van Duin, E.M. Dijkman & P.W. van Leeuwen, 2007. Monitoring van kwelders in de Waddenzee. Alterra-rapport 1574 / IMARES-rapport C104/07, WOT IN serie nr. 5. 63 pp.
- Dillingh, D., 2013a. Voor de waterstandsstations in en rond het Friesche Zeegat zijn de stijgingsnelheden ontleend aan een eerdere analyse van Dillingh (2013a en b) en deze zijn opgenomen in Tabel 3-1.
- Dillingh, D., 2013b. Kenmerkende waarden kustwateren en grote rivieren. Deltares, Rapport 1207509-000-ZKS-0010, 79 pp.
- Duran-Matute M., T. Gerkema, G.J. de Boer, J.J. Nauw & U. Gräwe, 2014. Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. Ocean Sciences 10 (4), 611–632.

- Duran-Matute, M. & T. Gerkema, 2015. Calculating residual flows through a multiple-inlet system: The conundrum of the tidal period. *Ocean Dynamics* 65: 1461–1475.
- Duran-Matute M., T. Gerkema & M.G. Sassi, 2016. Quantifying the residual volume transport through a multiple-inlet system in response to wind forcing: the case of the western Dutch Wadden Sea. *Journ. Of Geoph. Research: Oceans*.
- Ehlers, J. 1988. *The Morphodynamics of the Wadden Sea*. - A. A. Balkema, Rotterdam.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment-bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology* 415. Elias, E.P.L., 2018. Een actuele zandbalans van de Friesche Zeegat. Report 11202190-000 (in Dutch). Deltares, Delft: 27 pp.
- Elias E. & A. Oost 2020. Morfologische processen van het Friesche Zeegat: Een conceptueel model. Deltares-rapport 205236-003, 97 pp.
- Hoeksema, H.J., H.P.J. Mulder, M.C. Rommel, J.G. de Ronde & J. de Vlas 2004. Bodemdalingstudie Waddenzee 2004, Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd, Rapport RIKZ 2004-025.
- Hoekstra, H., Winkels, H., & Gerritsen, J., 1998. De bodemopbouw van de buitendijkse gronden langs de noordkust van Friesland en Groningen. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directie IJsselmeergebied.
- Jager, T.D., 2006. Vegetatiekartering 2004 op basis van false colour-luchtfoto's 1:10.000. Rapportnummer AGI-2006-GSMH-015, Rijkswaterstaat, AGI, Delft.
- Kater, B.J., J. Cleveringa L. Perk & M. Poortinga, 2008. Haalbaarheidsstudie vaarweg Ameland; Fase 1: selectie van kansrijke alternatieven. Alkyon-rapport A2066R1r3.
- Keizer, A., A. Rispen, J. Rispen, J. Bos, & H. Postma. 2019 Referentie Manifest Lauwerskust; Een toekomstvisie op Lauwerskust voor 2050 en verder.
- Kers, A.S., 2012. Salt-typologie sleutel: versie 2.27, en de Soortengroepen: versie 2.11, beiden van 5 juli 2012. In Excel bestand: SALT sleutel en soorten v2.27 printversie.xls. RWS-DID, Delft.
- Kers, A.S., Koppejan, H., 2005. De Groene Stranden van Rottumerplaat. *De Levende Natuur*, 106(4): 159-161.
- Kers, A.S., S.R. Van der Brug, L. Schoen, D. Bos, & J.P. Bakker, 1998. Vegetatiekartering Oost-Schiermonnikoog, 1993 - 1996, Laboratorium voor Plantenoecologie, Rijksuniversiteit Groningen. Krol, J., 2019. Sedimentatie metingen op het wad van Ameland, Paesens, Piet Scheve plaat, Engelsmanplaat en Schiermonnikoog; Rapport 2018. Rapport NatuurCentrum Ameland.
- Krol, J., 2019. Wadsedimentatiemetingen Ameland, Engelsmanplaat, Paesens en Schiermonnikoog 2007-2016
- Landstra, F. & P-W. Venema, 2015. Vismigratie van en naar het Lauwersmeer Effectiviteit van het visvriendelijk beheer van de R.J. Cleveringsluizen voor de migratie van vislarven & Migratie mogelijkheid van Driedoornige stekelbaars bij vispassage te Esumakeech. Hogeschool van Hall Larenstein, Waterschap Noorderzijlvest, Staatsbosbeheer, 72 pp.
- Louters, T. & F. Gerritsen, 1994. Het mysterie van de Wadden; Hoe een getijdesysteem inspeelt op zeespiegelstijging. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) Rapport RIKZ-94.040.
- Mantel S., P. Slim & J. Krol, 2016. Vlakvaaggrond. Ameland, Neerlands Reid in wording, 'Kwelder als buffer bij zeespiegelstijging' Brochure
- Meijer, K.H.R., 2013. Evaluatie dijkversterking Vierhuizergat. Nota Waterschap Noorderzijlvest.
- Ministerie van EZ (voorheen LNV), 2012. Profielen habitattypen en soorten, Internethonk synbiosys Natura 2000, 2012

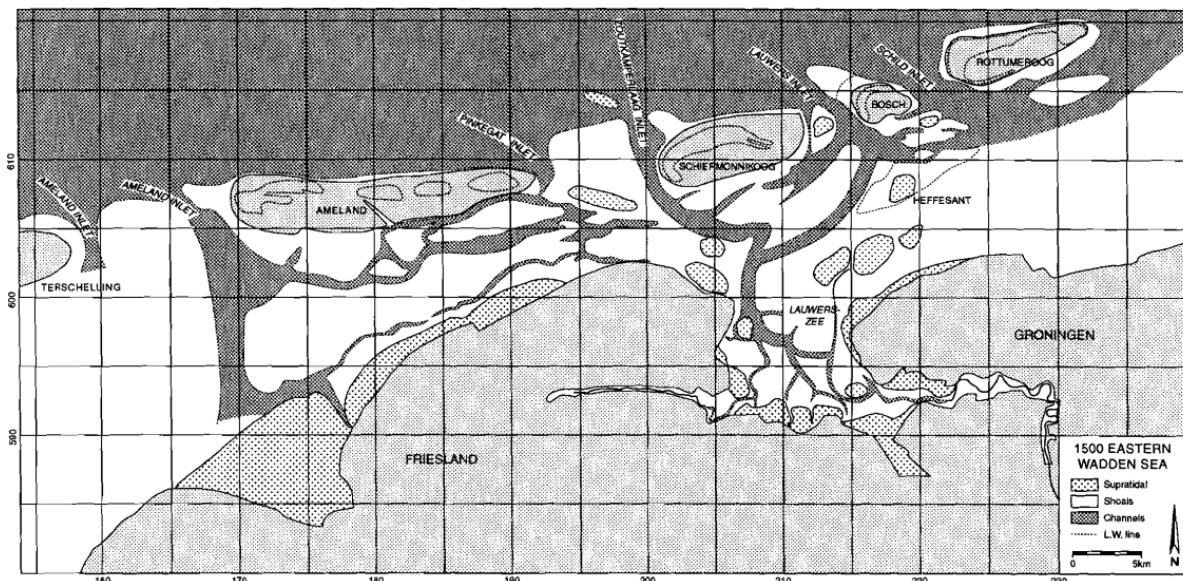
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016. Natura 2000-beheerplan Waddenzee Periode 2016-2022, 331 pp.
- Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (2008/2010) Natura 2000 profieldocumenten: Vogels, Habitattypen, Habitatsoorten.
- Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (2007a). Strategische milieubeoordeling Derde Nota Waddenzee Eindrapport strategische milieubeoordeling van het concept aangepast deel 3 van de planologische kernbeslissing Derde Nota Waddenzee
- Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (2007b). Deel 4 van de Planologische kernbeslissing Derde Nota Waddenzee, tekst na parlementaire instemming. Ontwikkeling van de wadden voor natuur en mens. Januari 2007.
- NAM, 2017. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost: evaluatie na 30 jaar gaswinning. Rapport.
- Oost, A.P. & de Haas, H., 1992, Het Friesche Zeegat, Morfologisch-Sedimentologische veranderingen in de periode 1970-1987, een getijde inlet systeem uit evenwicht, deel 1, rapport in het kader van Kustgenese Werkgroep 1. & deel 2 Figuren.
- Oost, A.P. & de Haas, H., 1993, Het Friesche Zeegat, Morfologisch-Sedimentologische veranderingen in de periode 1927-1970, cyclische veranderingen in een tidal-inlet systeem, deel 1, rapport in het kader van Kustgenese Werkgroep 1 & deel 2, figuren. Oost en de Haas (1992 & 1993)
- Oost, A.P. 1995a. Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea the emphasis on the Frisian Inlet; a study of the barrier islands, ebb-tidal deltas and drainage basins. PhD-Thesis, Utrecht, Geologica Ultraiectina, 126, 518 pp.
- Oost, A.P., 1995b. Sedimentological implications of morphodynamic changes in the ebb-tidal delta, the inlet and the drainage basin of the Zoutkamperlaag tidal inlet (Dutch Wadden Sea), induced by a sudden decrease in the tidal prism, in: Flemming, B.W. et al. (Ed.) Tidal Signatures in Modern and Ancient Sediments. Special Publication of the International Association of Sedimentologists, 24: pp. 101-119.
- Oost, A.P. 2014. Quick scan Vierhuizergat; Morfodynamiek van een geul onder de dijk. Deltares rapport 08935-000-ZKS-0003.
- Oost, A.P., R. van Buren & A. Kieftenburg, 2017: Overview of the hydromorphology of ebb-tidal deltas of the trilateral Wadden Sea, Deltares report 11200926-000, 334 pp.
- Ouwerkerk, S., 2019. POV Waddenzeedijken; Onderzoek geulmanagement, fase B2. Rapport HKV Lijn in Water referentie PR3744.10.
- Ouwerkerk, S., V. Vuik, R. Zijlstra & K. de Jong, 2019. Geulenbeheer in de Waddenzee. Land+Water, 11 november.
- Petersen, J., Kers, A.S., Stock, M., 2013. TMAP-typology of coastal vegetation in the Wadden Sea area; version: 1.0, Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven.
- Poortman, S. 2010. Morfologische ontwikkelingen vooroever Lauwerszeedijk; Geuldynamiek Vierhuizergat en de effecten van de afsluiting van de Lauwerszee. Stageverslag Waterschap Noorderzijlvest en Alkyon.
- Postema, P.W., 1956. Wijzigingen in geulenstelsel Waddenzee, omgeving Lauwerszee. Int. Rep. RWS Friesland, 10 pp.
- Postma, J.T. & R. Reenders, 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. Rijkswaterstaat Meet- en Adviesdienst Delfzijl Nota 84.21.
- Reenders R., 1983 Ontwikkeling diepteligging voorland Lauwersmeerdijk tussen de uitwateringssluizen en het voormalig sluitgat. R.W.S. meet- en adviesdienst Delfzijl. Nota 83-29.
- Ridderinkhof, W., 2016. Morphodynamics of ebb-tidal deltas. PhD Thesis Utrecht University.

- Rijkswaterstaat, 2013. Kenmerkende waarden Getijgebied 2011.0. Rapport Rijkswaterstaat CIV. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, 2015. Beheer- en ontwikkelplan voor de Rijkswateren 2016-2021, 313 pp
- Sas, H. 2019. Handreiking Geulmanagement; Wat te doen als een geul naar de dijk kruipt...; Projectnummer OW.11503/1H.
- Sha, L.P., 1990. Geological Research in the Ebb-tidal Delta of „Het Friesche Zeegat“, Wadden Sea, The Netherlands, Report R.G.D. Project 40010, 20 pp.
- Termes, A.P.P. & W.D. Eysink, 2005 Watervisie Lauwersmeer: quick scan gedempt getij. HKV, PR958, 42 pp.
- Schrijvershof, R.A. & J. Vroom, 2016. Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2015); Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Deltares rapport, 1221249-000-ZKS-0004.
- Schroevers, P. & C.G. van Leeuwen 1962. Excursierapport Ameland. Intern rapport. RIVON, Zeist.
- Severin, I., Stal, L.J., 2008. Light dependency of nitrogen fixation in a coastal cyanobacterial mat. The ISME Journal, 2(10): 1077-1088.
- Stal, L.J., Van Gemerden, H., Krumbein, W.E., 1985. Structure and development of a benthic marine microbial mat. FEMS Microbiology Letters, 31(2): 111-125.
- Van Duin, W. E., H. Jongerius, A. Nicolai, J.J. Jongsma, A. Hendriks & C. Sonneveld, 2016. Friese en Groninger kwelderwerken: monitoring en beheer 1960-2014. WOt/Imares-rapport C042/16.
- Van der Lugt, M., M. Visser & H. van den Boogaard, 2019. Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2018); Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Deltares rapport kenmerk 11203620-002-ZKS-0003.
- Van der Lugt, M., J. Cleveringa, & Z.B. Wang, 2020. Integrale analyse morfologie Ameland-Oost. Rapport 11203910-002-ZKS-0003, Deltares, Delft, 73 p.
- Van Hoorn, M., K. van de Ven, S. Dijk, G. Zantingh, J. Schut, & B. Reeze, 2014. De Kaderrichtlijn Water bij Waterschap Noorderzijlvest.
- Van Straaten, L.M.J.U. 1950. Giant ripples in tidal channels, Waddensymposium, Tijdschrift Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, pg 76-81.
- Van Veen, J. 1950. Eb- en Vloedschaar systemen in de Nederlandse Getijwateren. – Tijdschrift van het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, Tweede Reeks LXVII.
- Van Wesenbeeck, B.K., P. Esselink, A.P. Oost, W.E. van Duin, A.V. de Groot, R.M. Veeneklaas, T. Balke, P. van Geer, A.C. Calderon & A. Smale, 2014: Verjonging van half-natuurlijke kwelders en schorren. Rapport, OBN 2014/191-DZ, 72 pp.
- Vermaas T. & E. Elias, 2019. Werking van het Friesche Zeegat; Morfologie en hydrodynamica. Deltares rapport 11203669-000-ZKS-0005, 50 pp.
- Wiertz, J., 2990. Ontstaan, grondwater en bijzondere soorten van enkele duinvalleien op Oost-Ameland; Duin-pq's bodemdaling Ameland 1986 - 1989, Rijksinstituut voor Natuurbeheer, Leersum.
- Witteveen en Bos, 2019, Net op zee Ten noorden van de Waddeneilanden; Concept Notitie Reikwijdte en Detailniveau.

# A Historische reconstructies

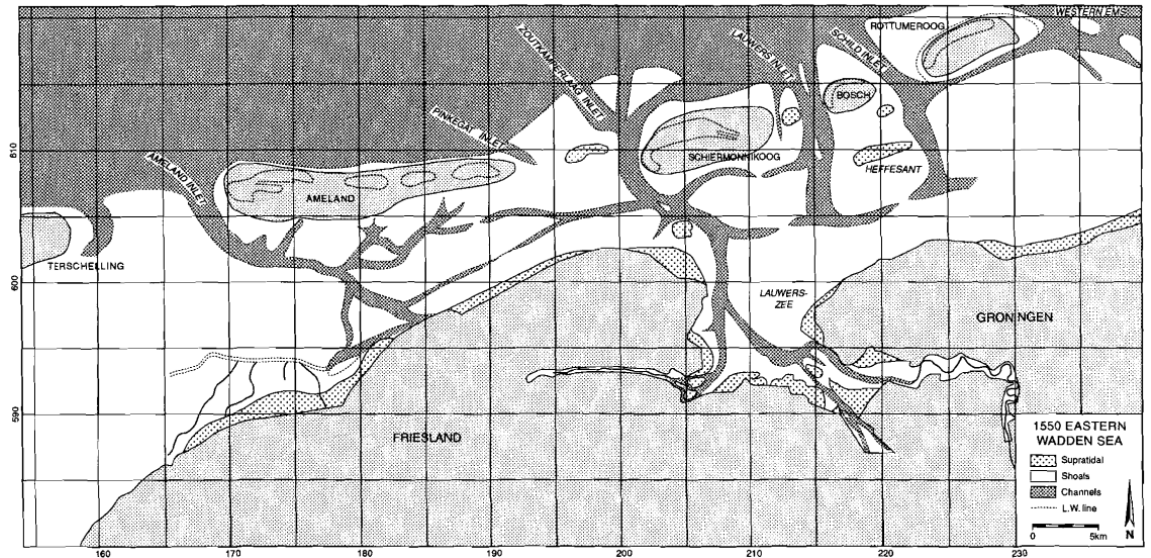


Figuur A1: Reconstructie oostelijk deel van de Nederlandse Waddenzee in 1300; bestaan Pinkegat onzeker (Oost, 1995a).

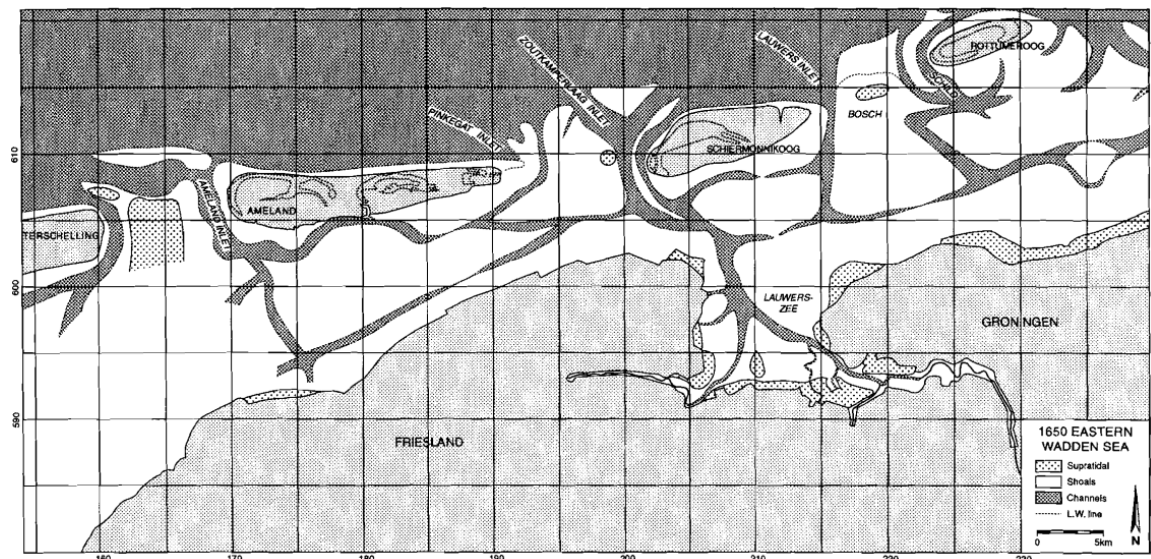


Figuur A2: Reconstructie oostelijk deel van de Nederlandse Waddenzee in 1500; bestaan Pinkegat onzeker (Oost, 1995a).

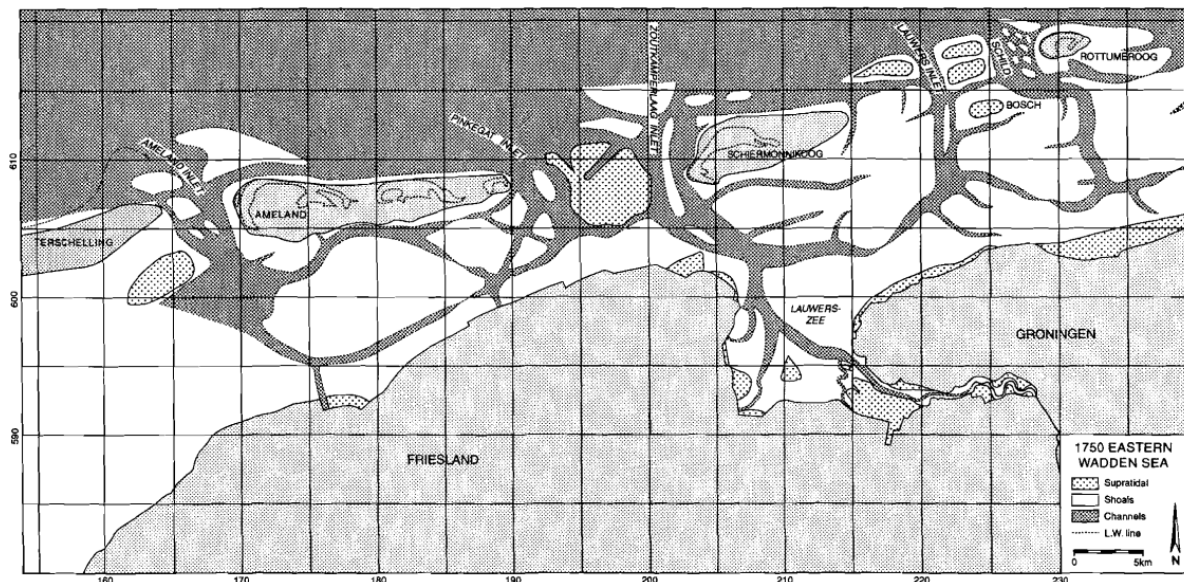




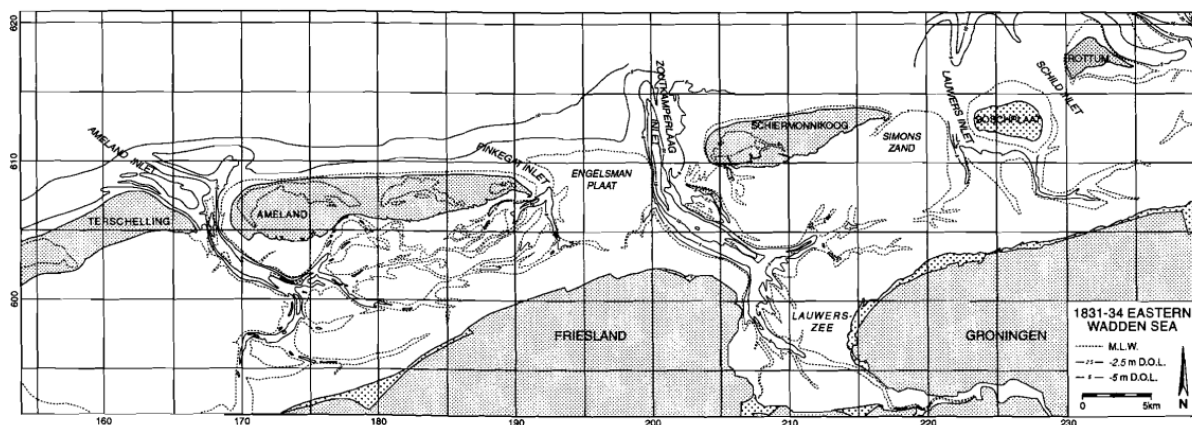
Figuur A3: Reconstructie oostelijk deel van de Nederlandse Waddenzee in 1550 (Oost, 1995a).



Figuur A4: Reconstructie oostelijk deel van de Nederlandse Waddenzee in 1650 (Oost, 1995a).



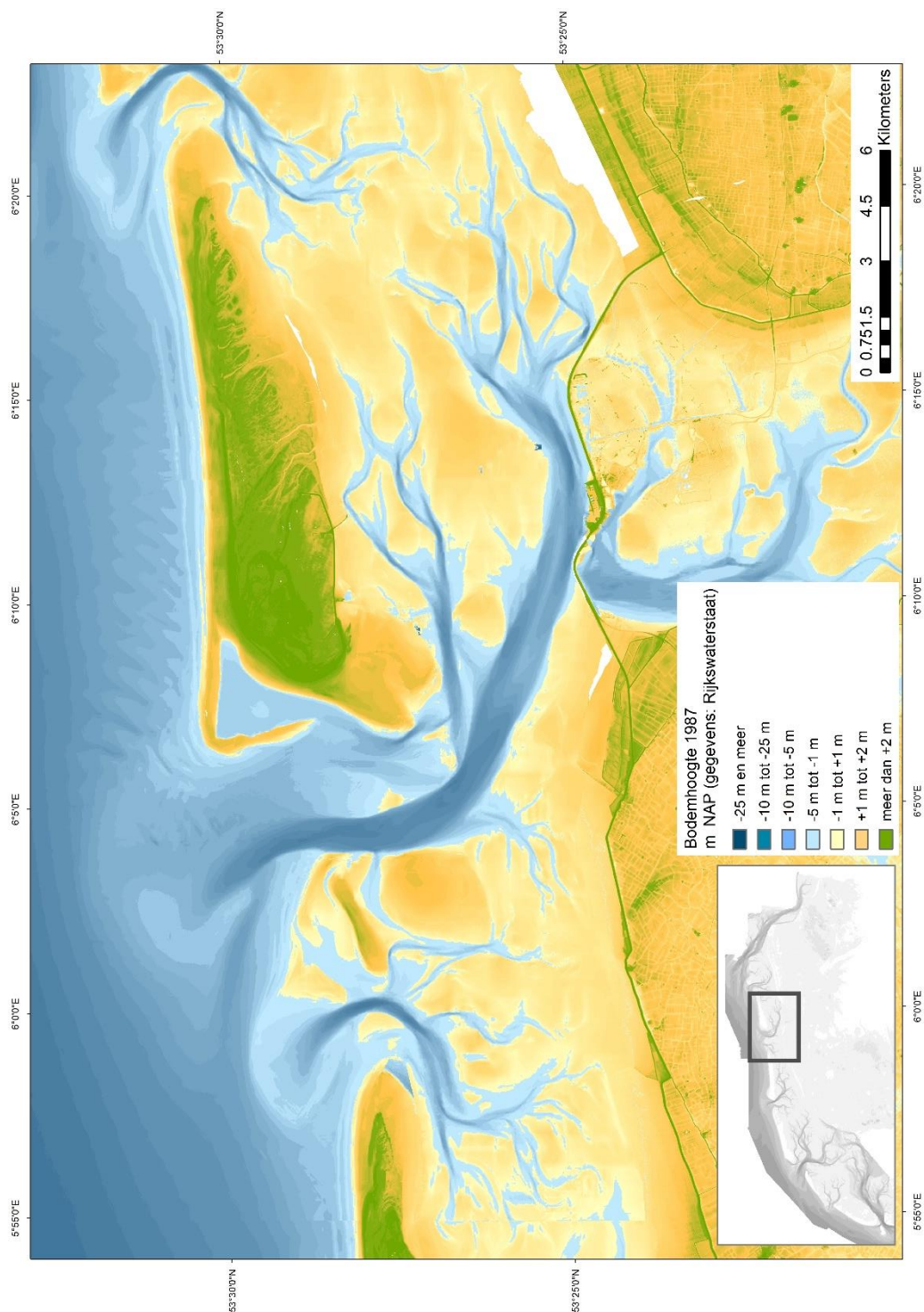
Figuur A5: Reconstructie oostelijk deel van de Nederlandse Waddenzee in 1750 (Oost, 1995a).



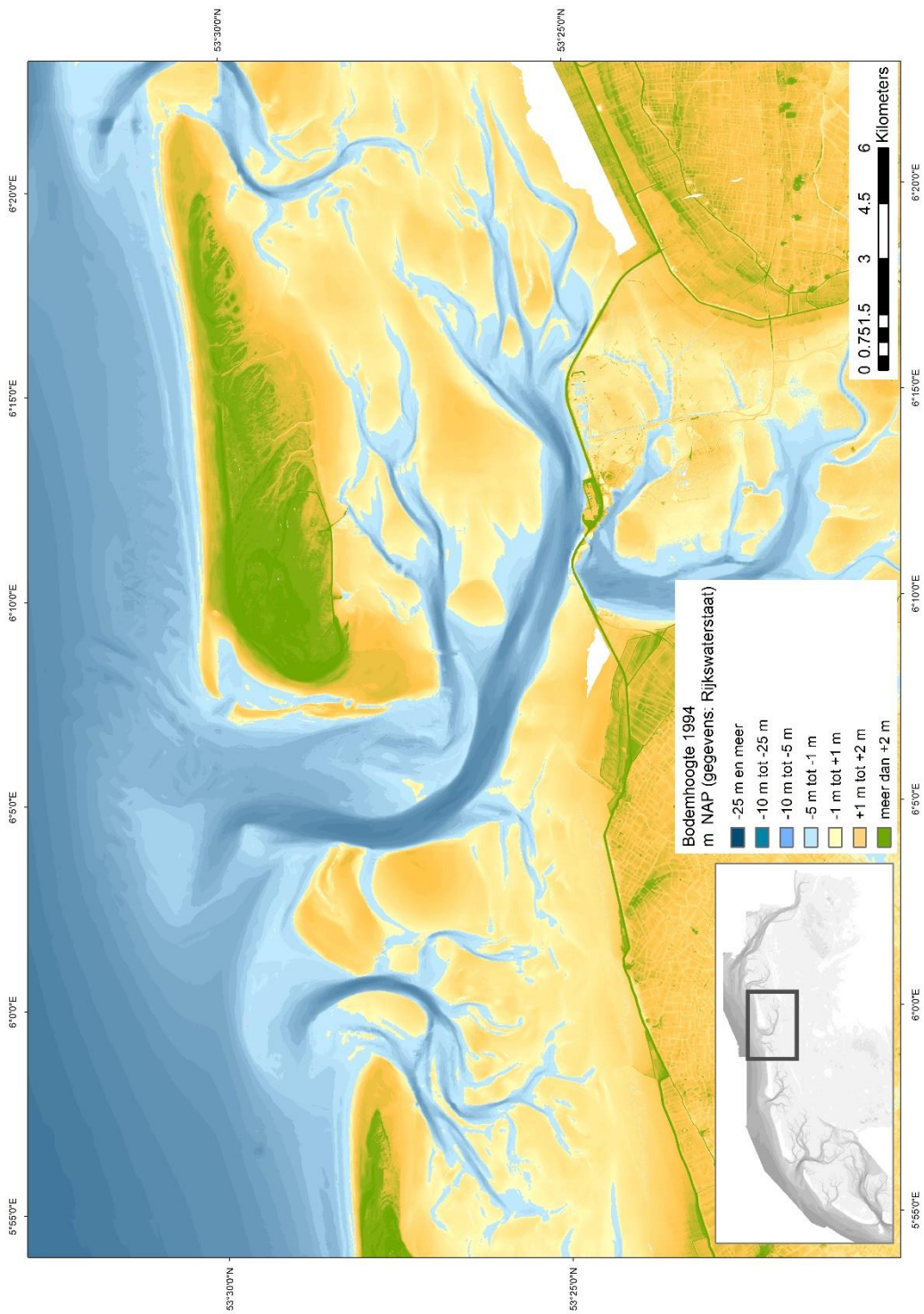
Figuur A6: Reconstructie oostelijk deel van de Nederlandse Waddenzee in 1831-34 (Oost, 1995a).



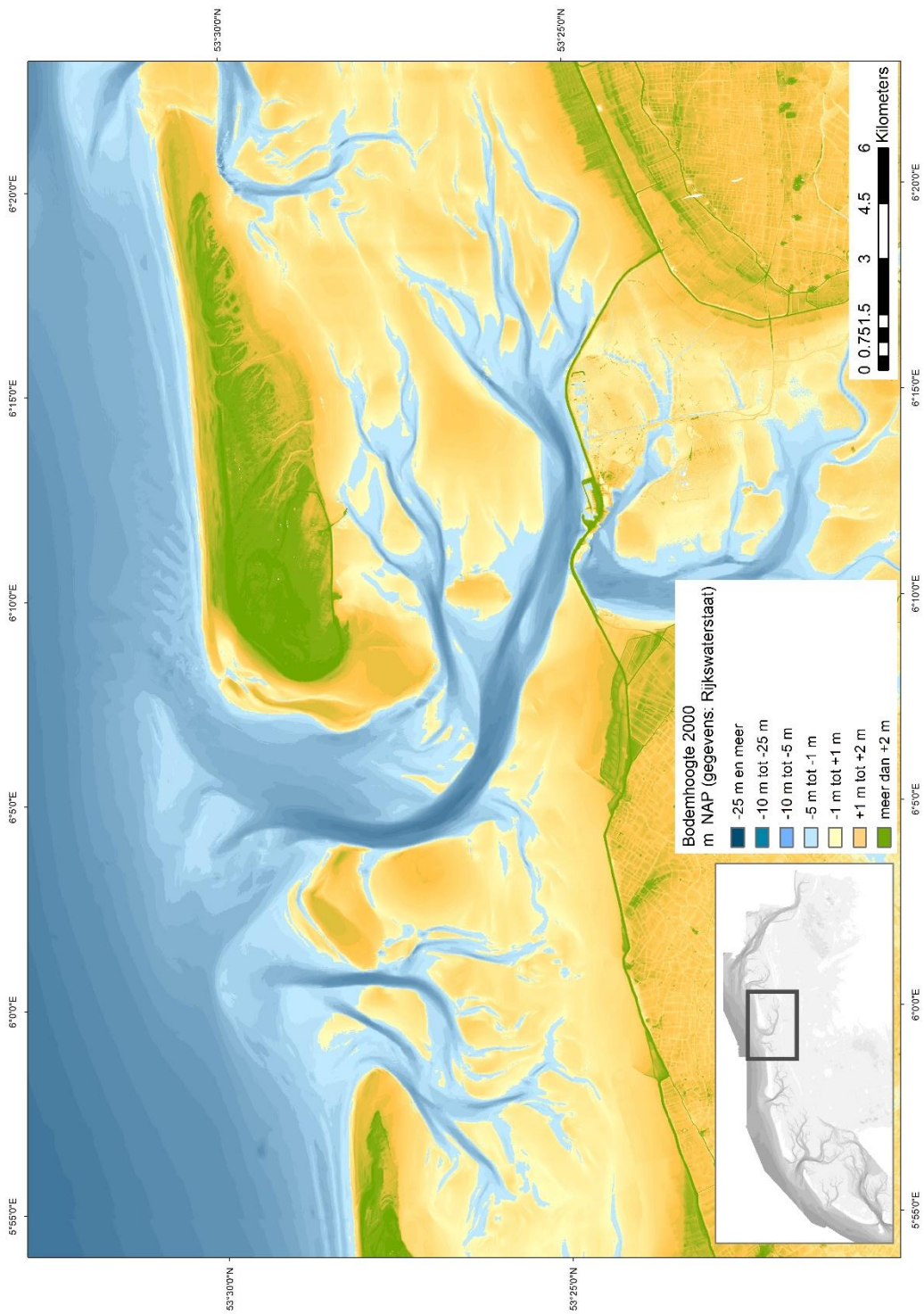
## B Kaarten



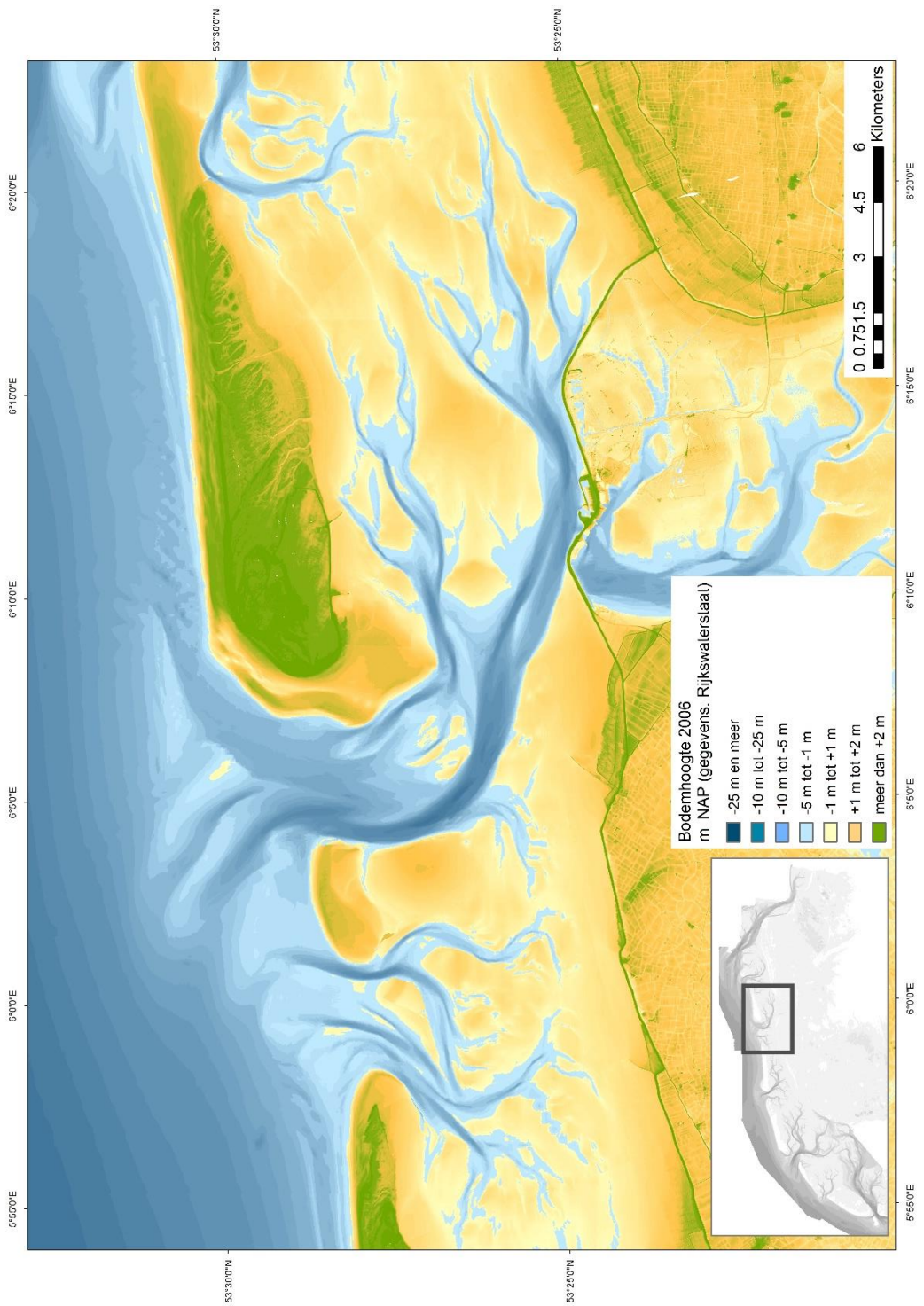
Figuur B-1 Kaart vaklodingsopname 1987 (eerste vaklodingencyclus).



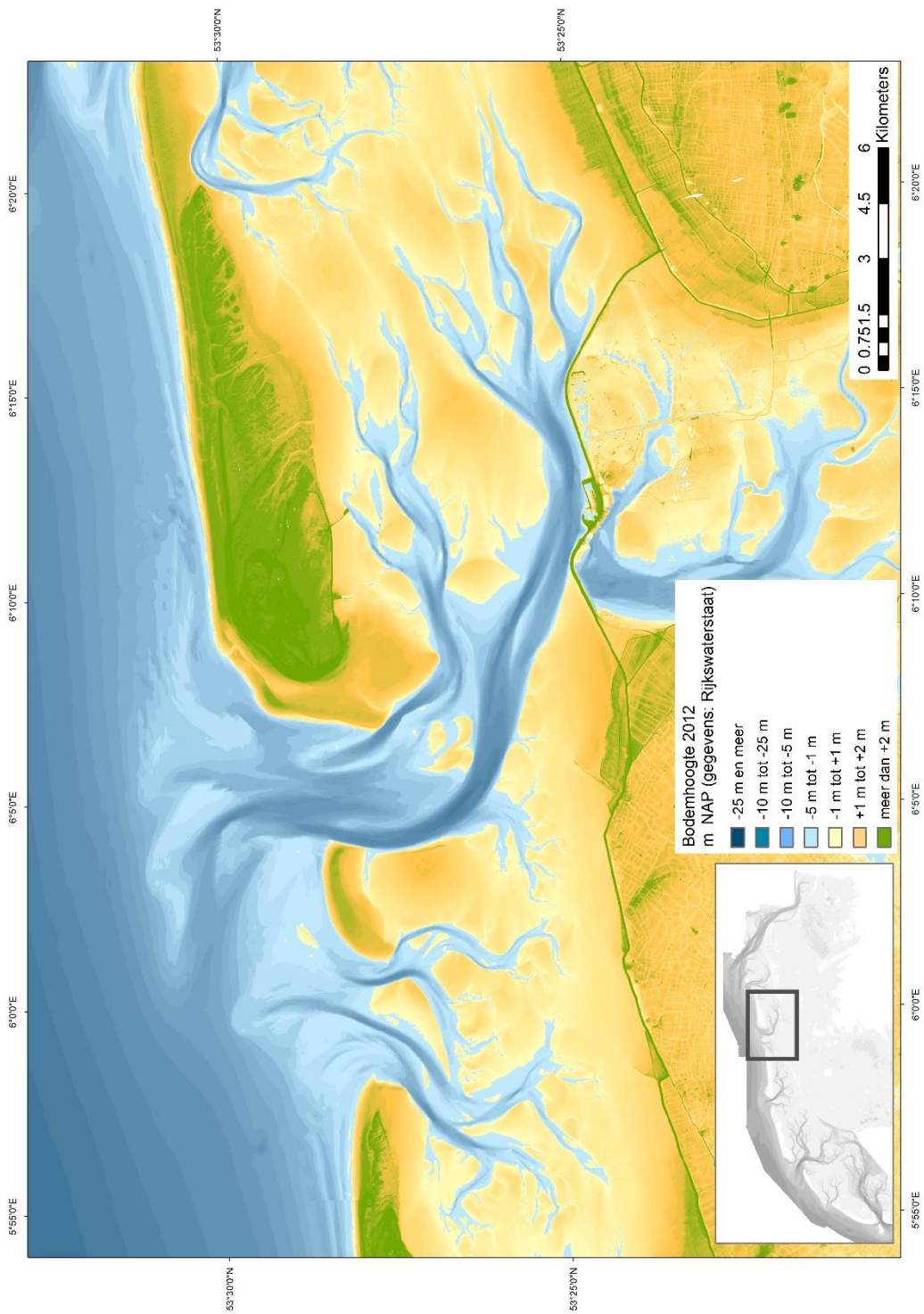
Figuur B-2 Kaart vaklodingsopname 1994 (tweede vaklodingencyclus).



Figuur B-3 Kaart vaklodingsopname 2000 (derde vaklodingencyclus).

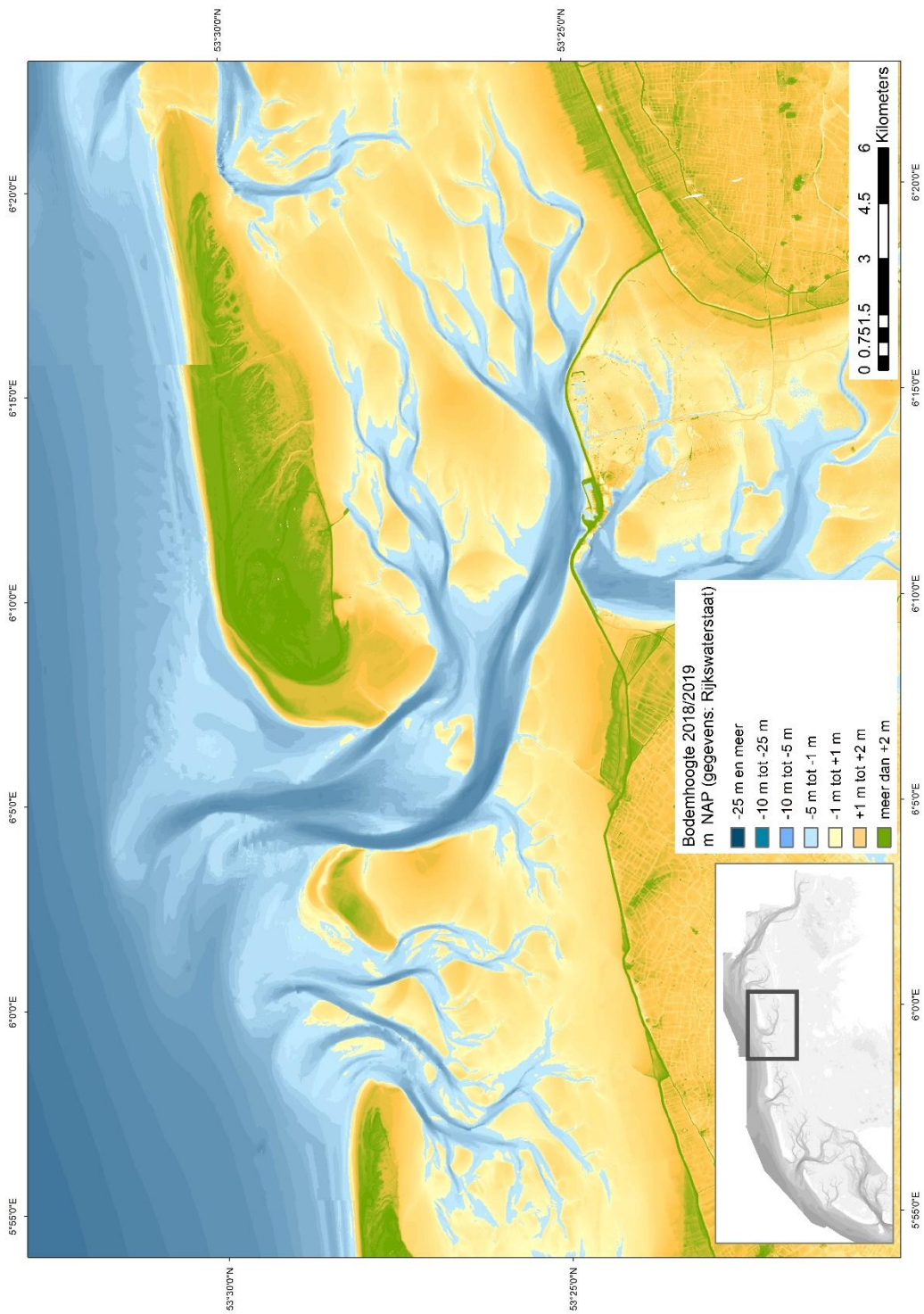


Figuur B-4 Kaart vaklodingsopname 2006 (vierde vaklodingencyclus).

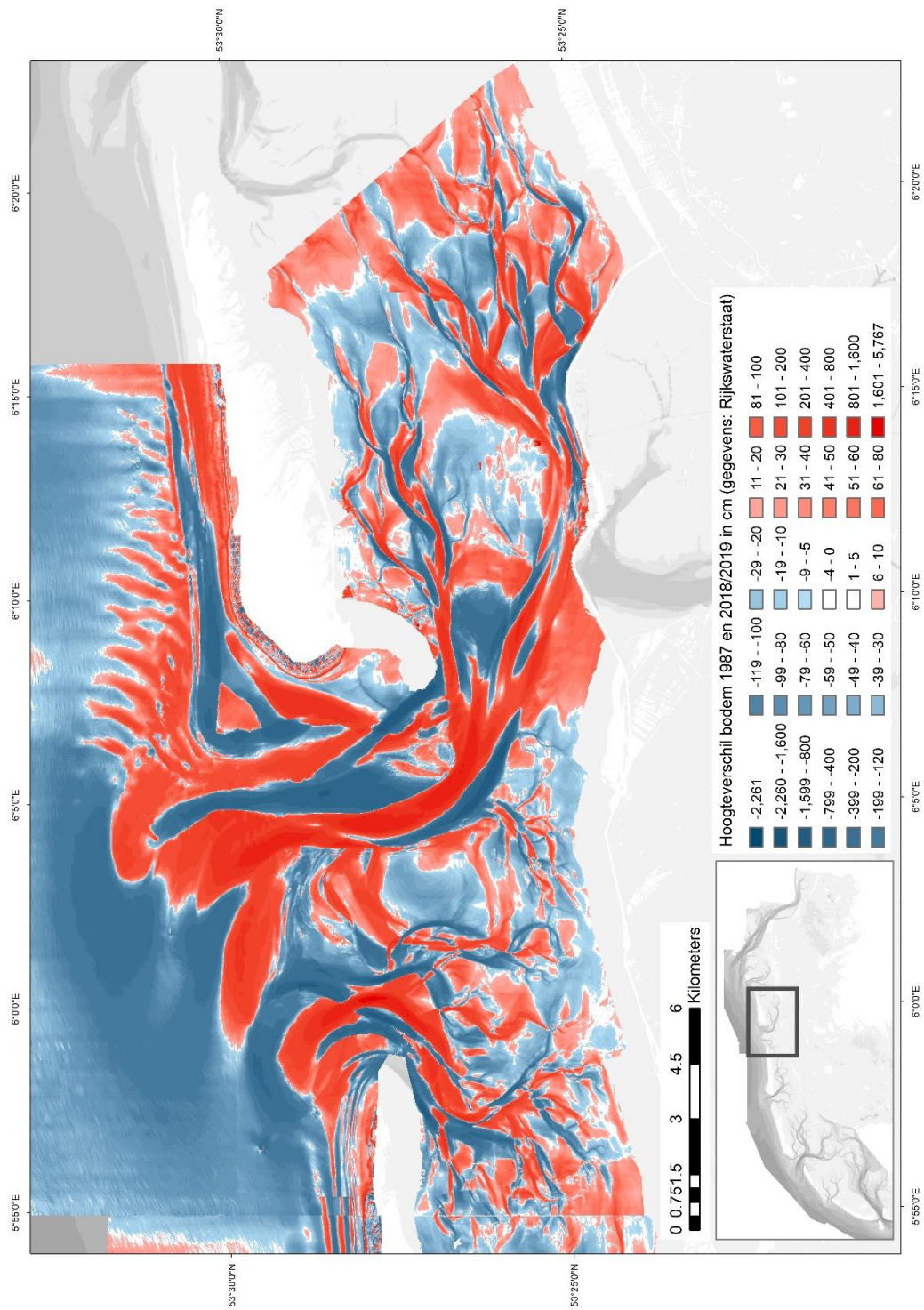


Figuur B-5 Kaart vaklodingsopname 2012 (vijfde vaklodingencyclus).

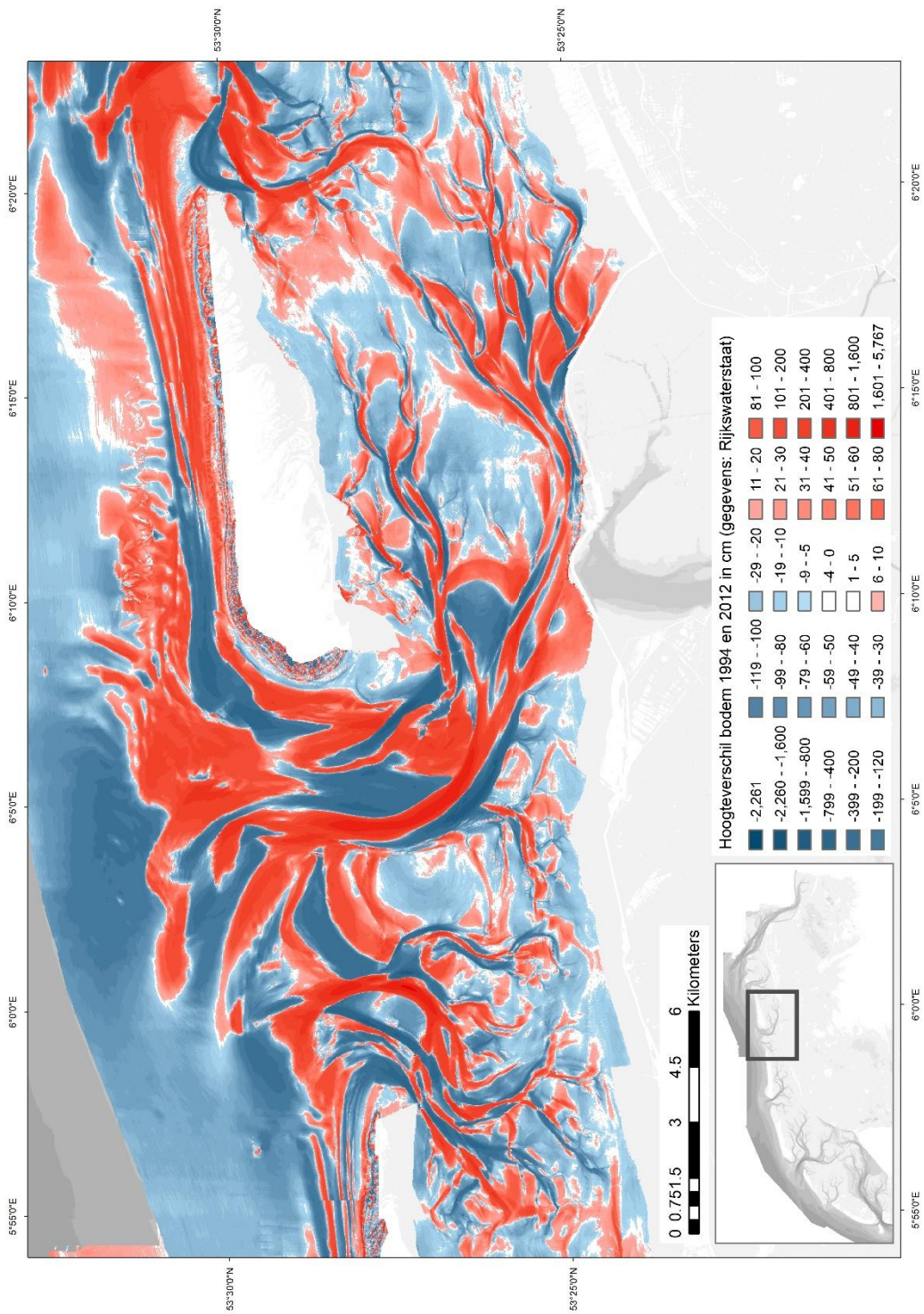




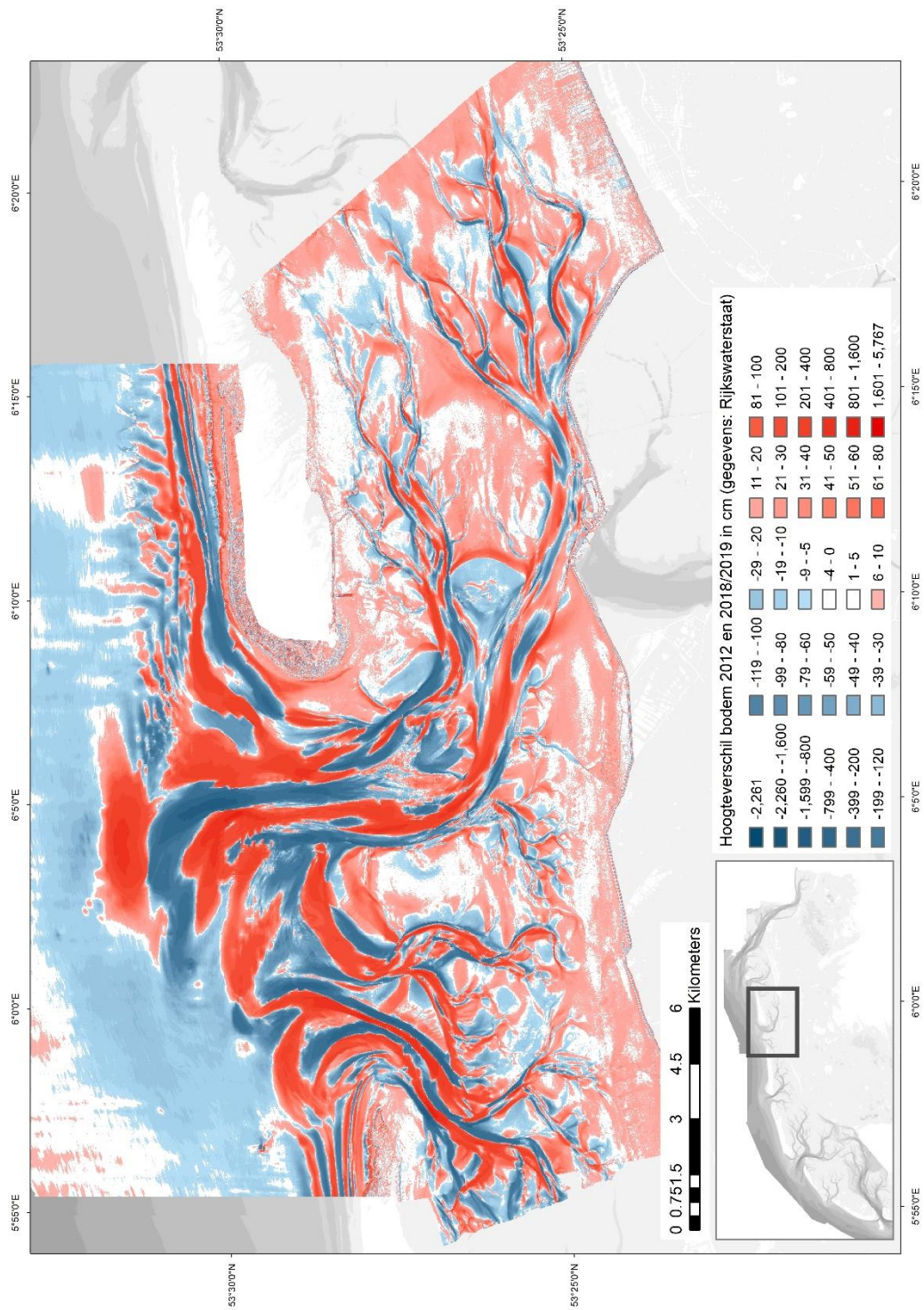
Figuur B-6 Kaart vaklodingsopname 2018/2019.



Figuur B-7 Verschilkaart 1987-2018/2019. Sedimentatie is aangegeven in rood en erosie in blauw.



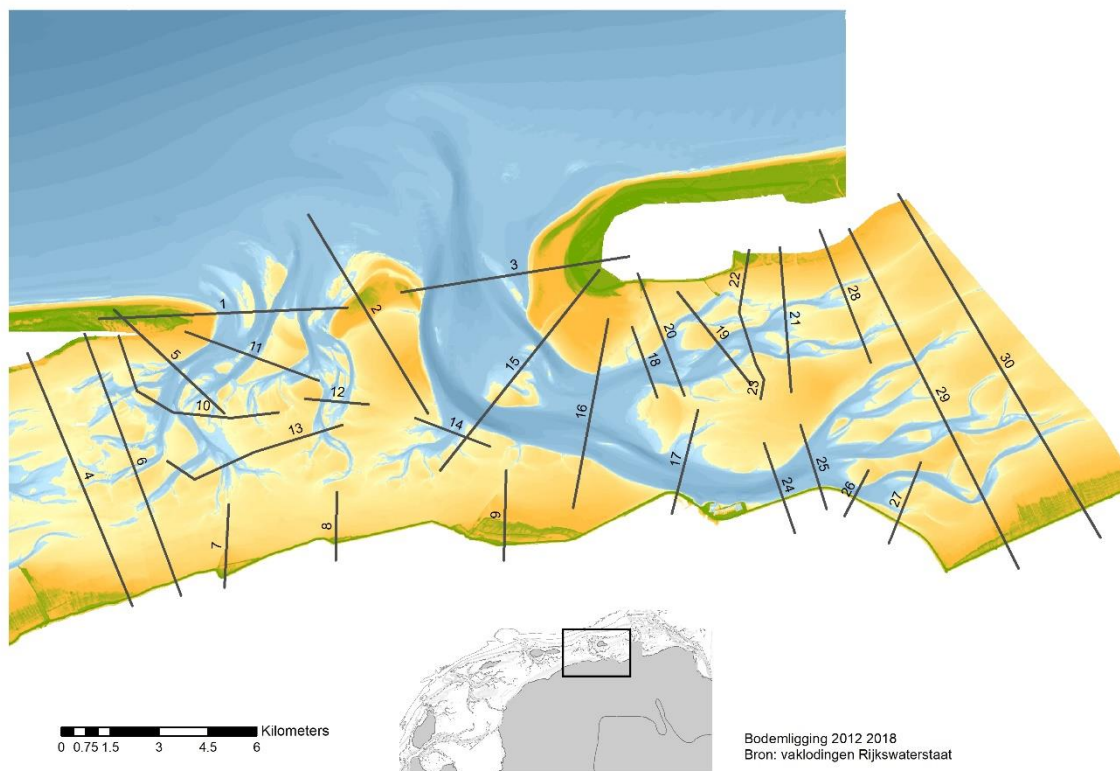
Figuur B-8 Verschilkaart 1994-2012. Sedimentatie is aangegeven in rood en erosie in blauw.



Figuur B-9 Verschilkaart 2012-2018/19. Sedimentatie is aangegeven in rood en erosie in blauw.

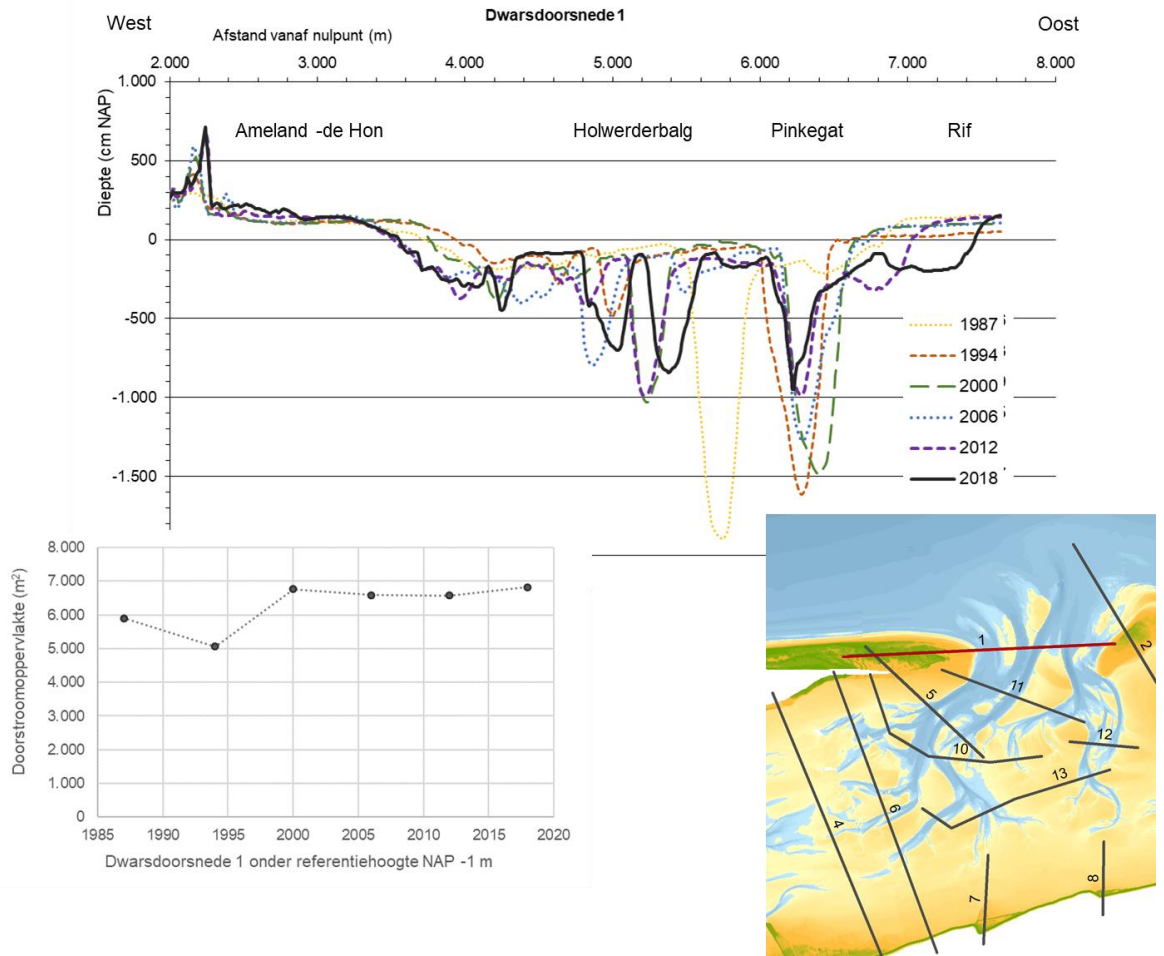


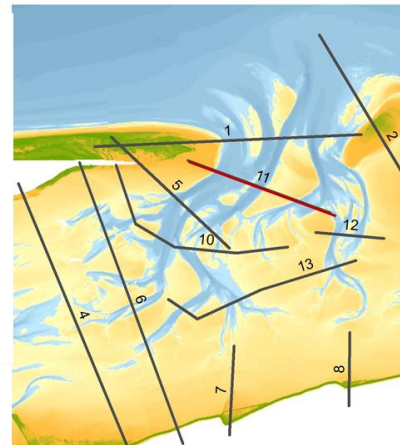
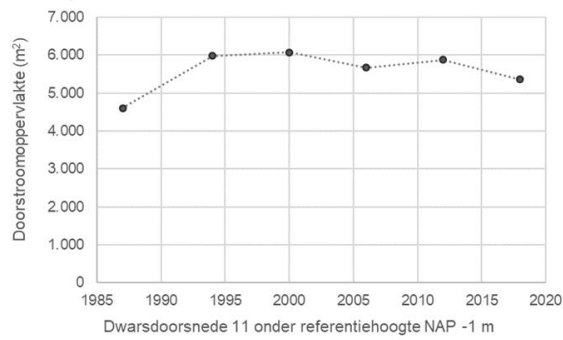
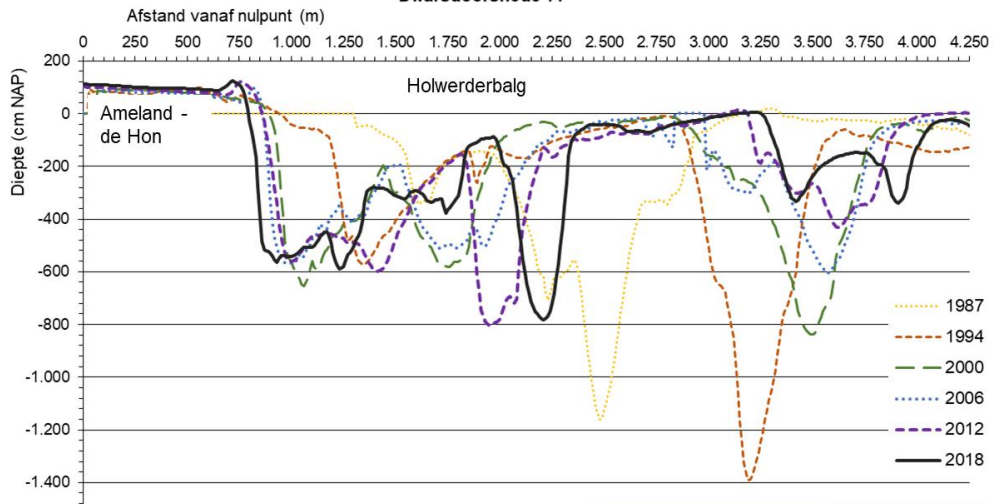
## C Dwarsdoorsnedes



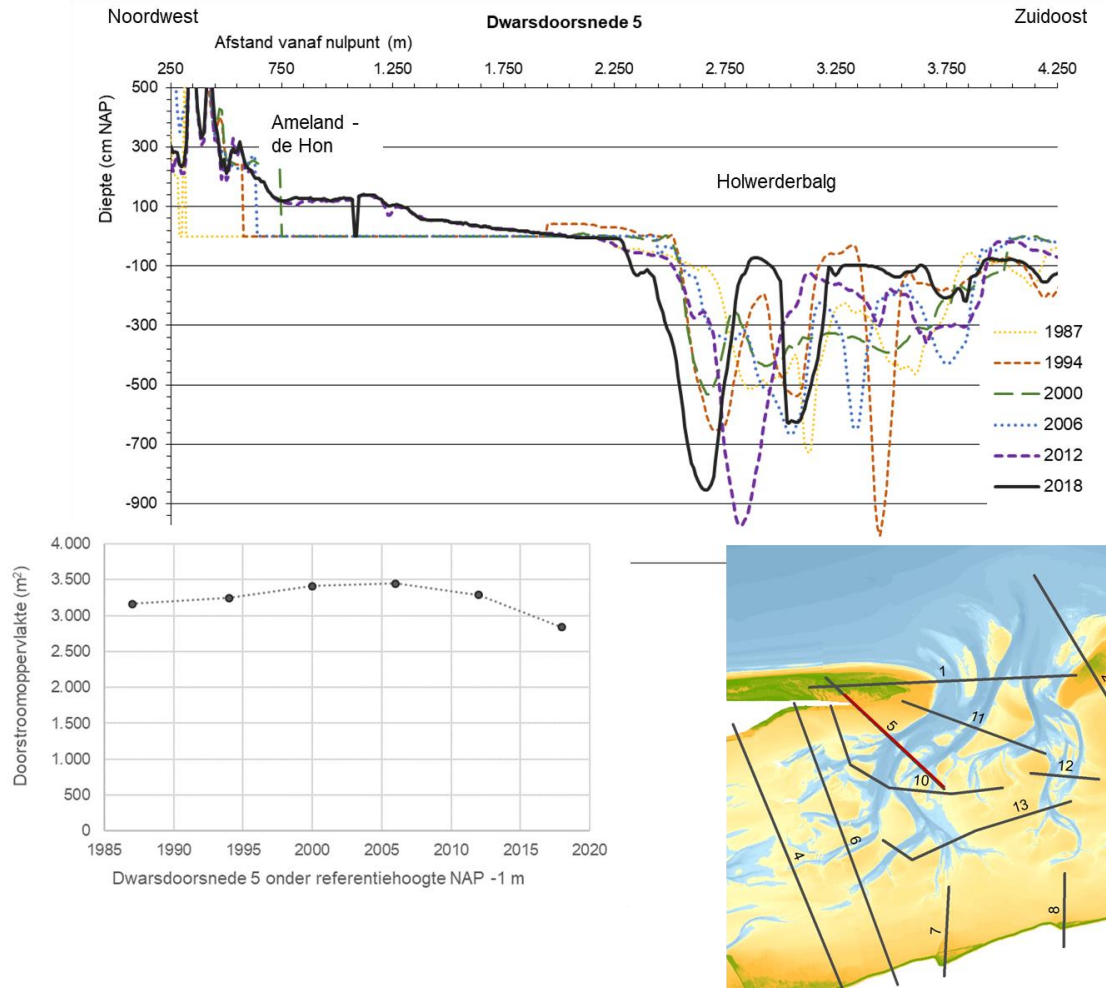
Figuur C-1 Kaart met de ligging van de dwarsdoorsnedes. Let op: dwarsdoorsnede 4 is wel aangegeven, maar deze ligt in het kombergingsgebied Borndiep en is niet opgenomen. Dwarsdoorsnede 23 bestaat niet.

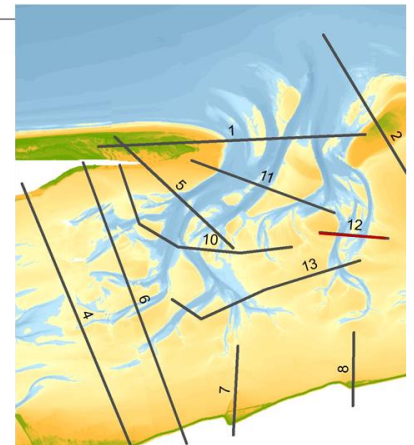
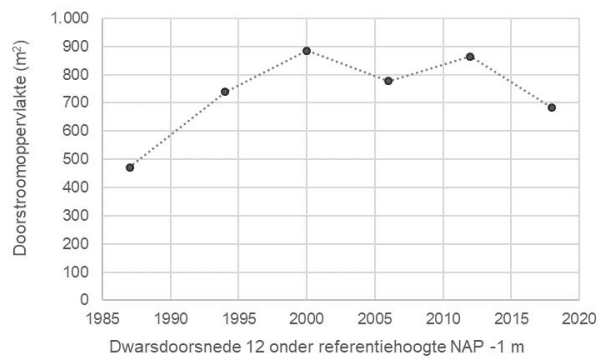
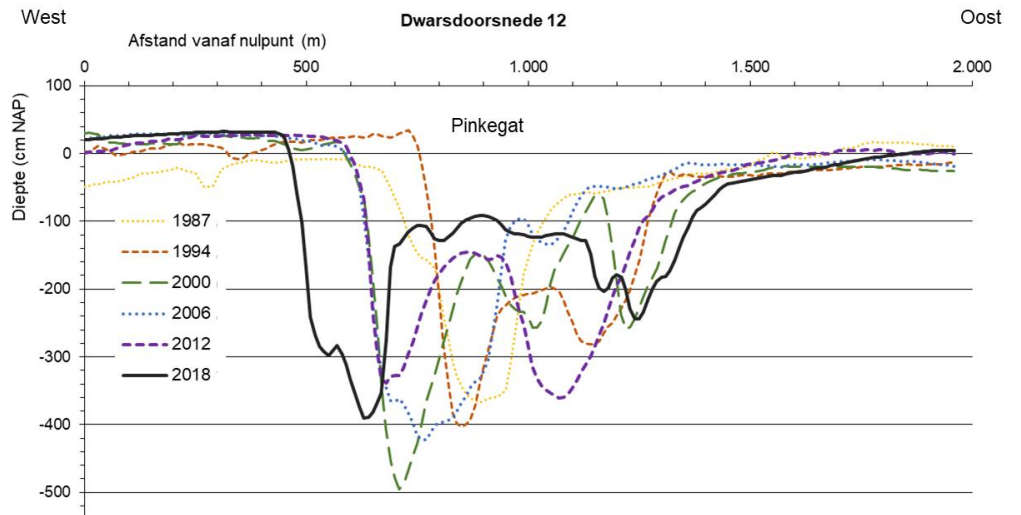
# Pinkegat

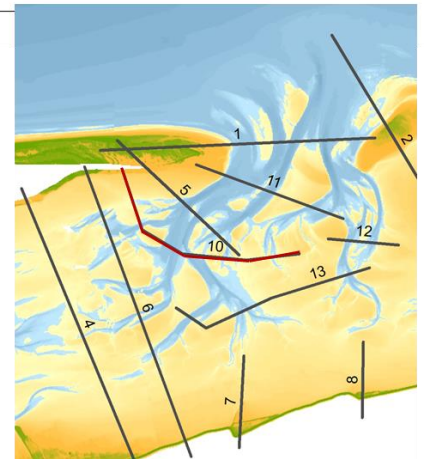
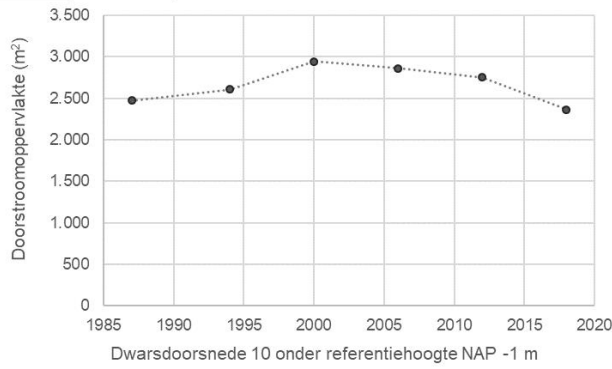
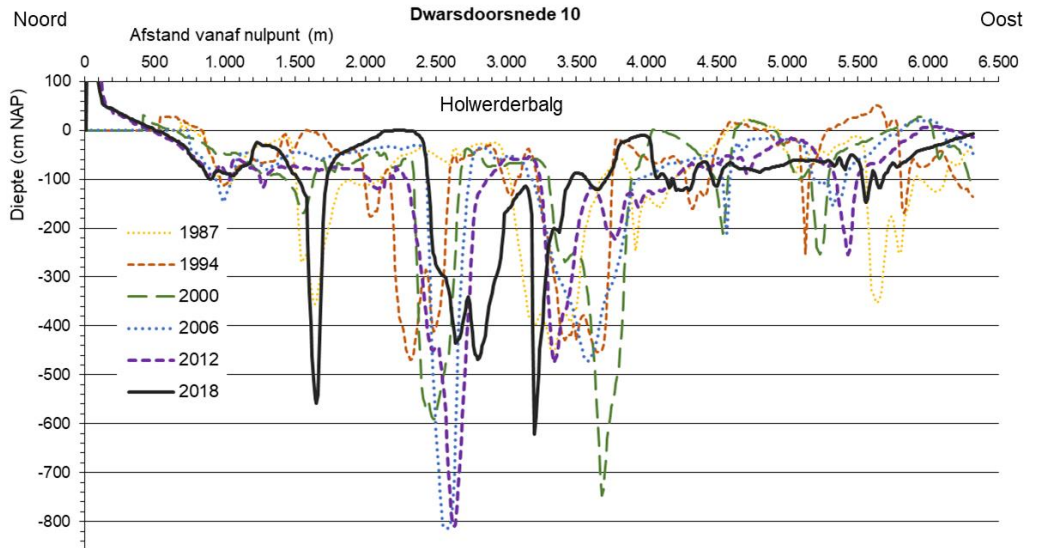


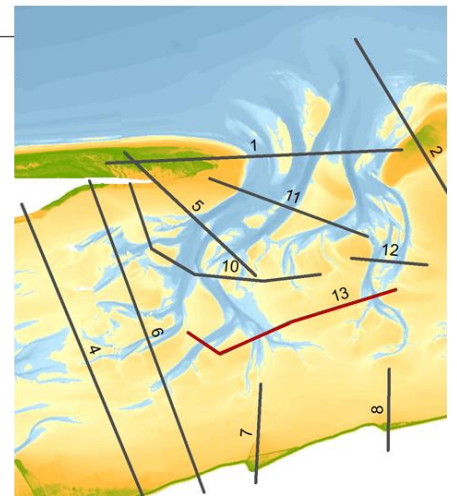
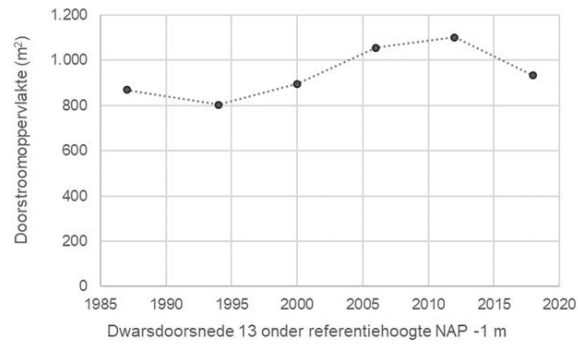
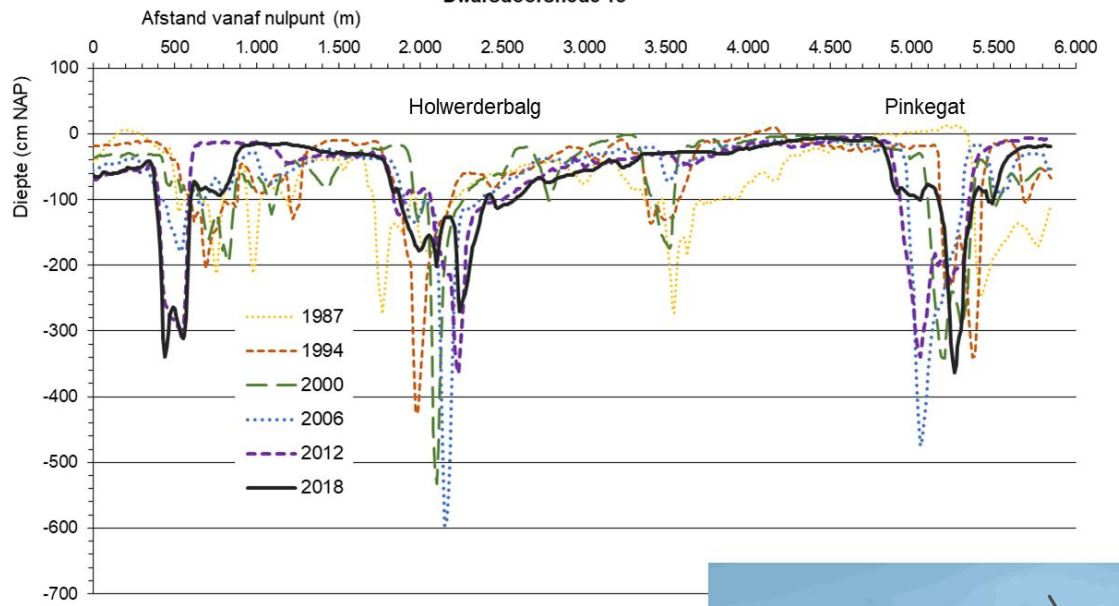


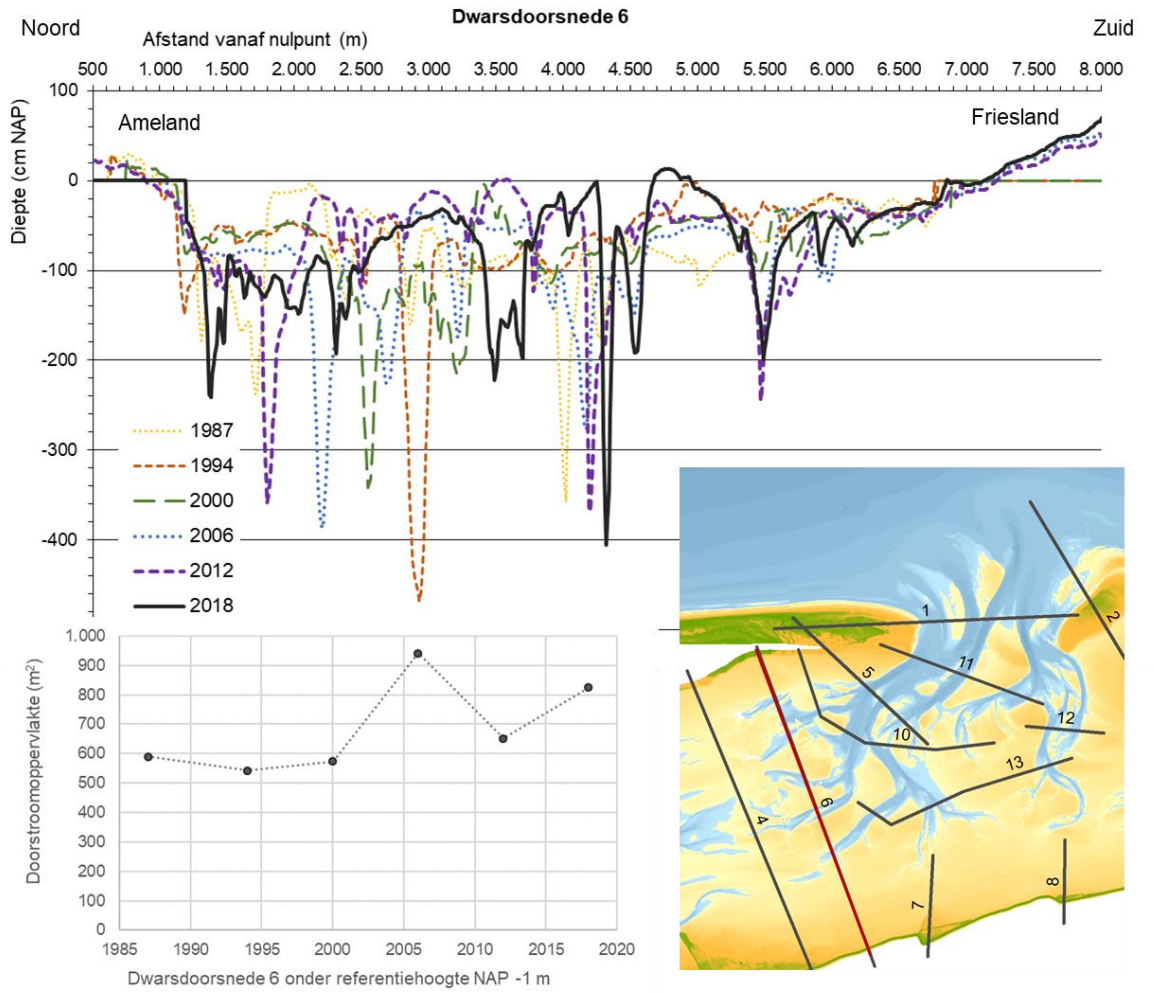


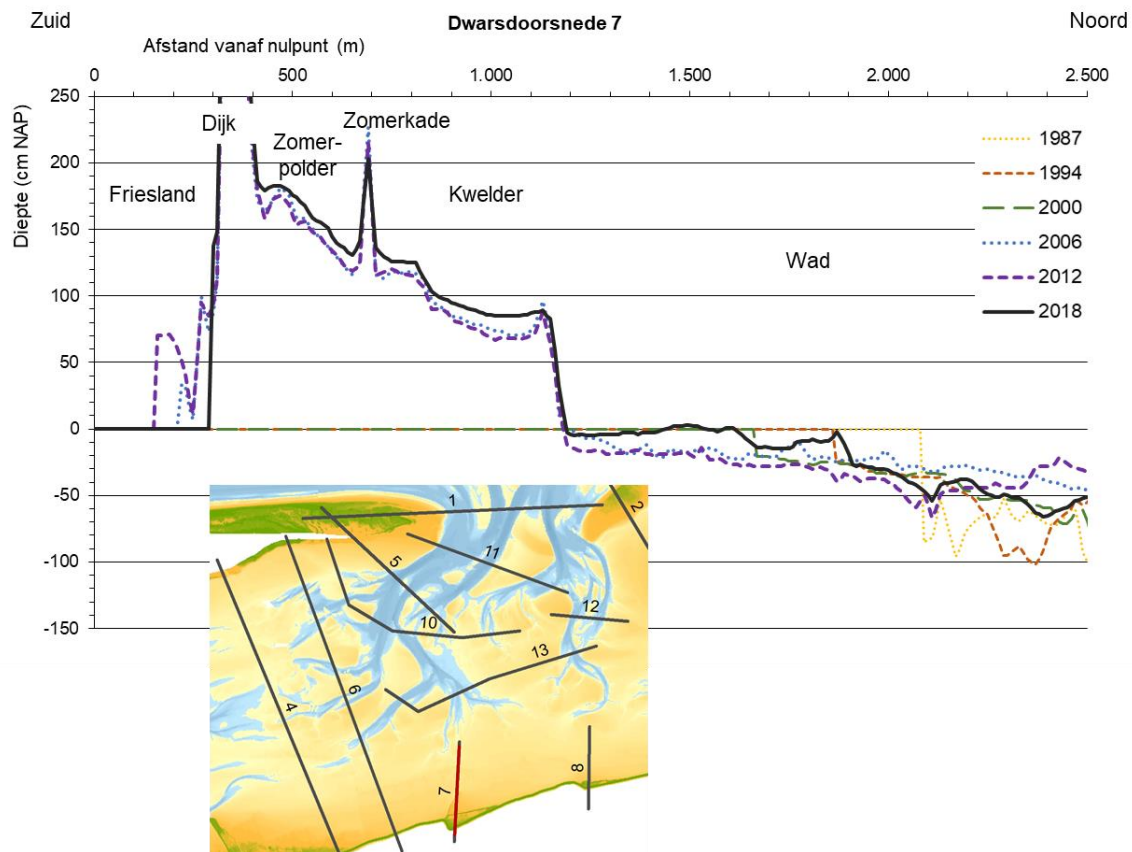


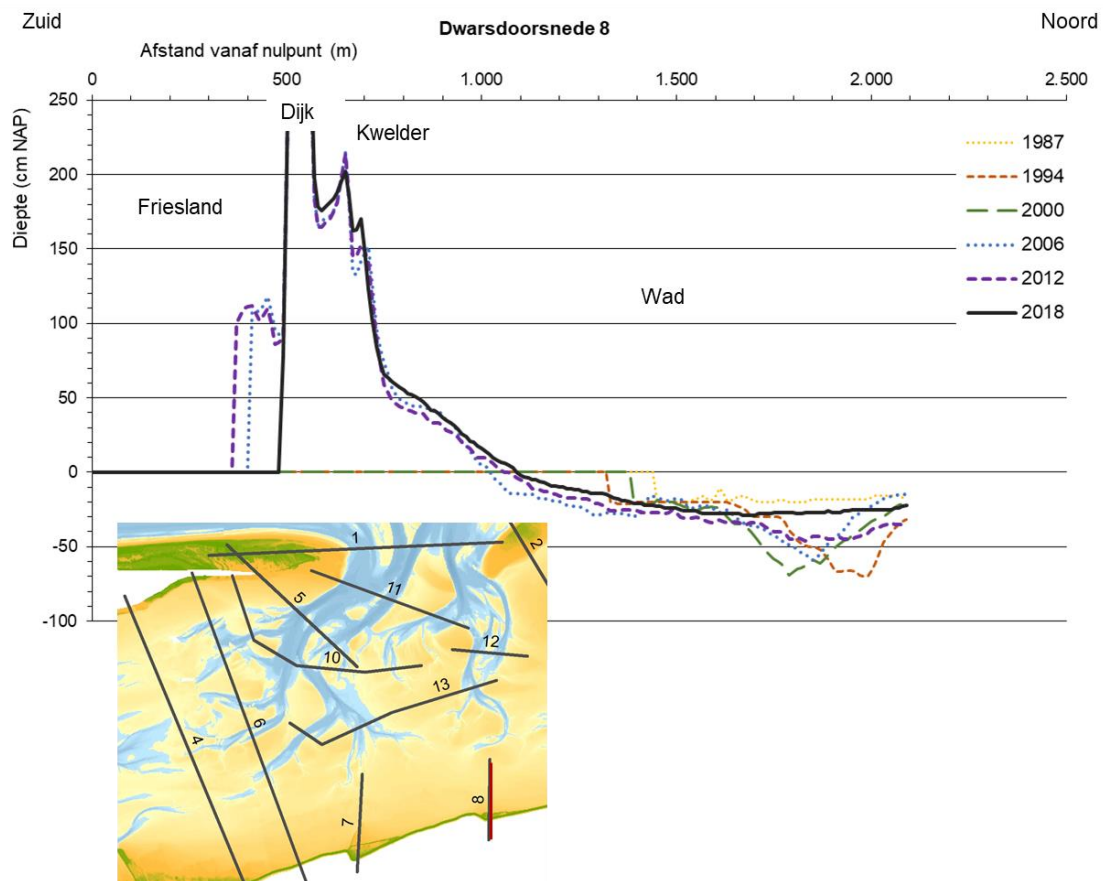


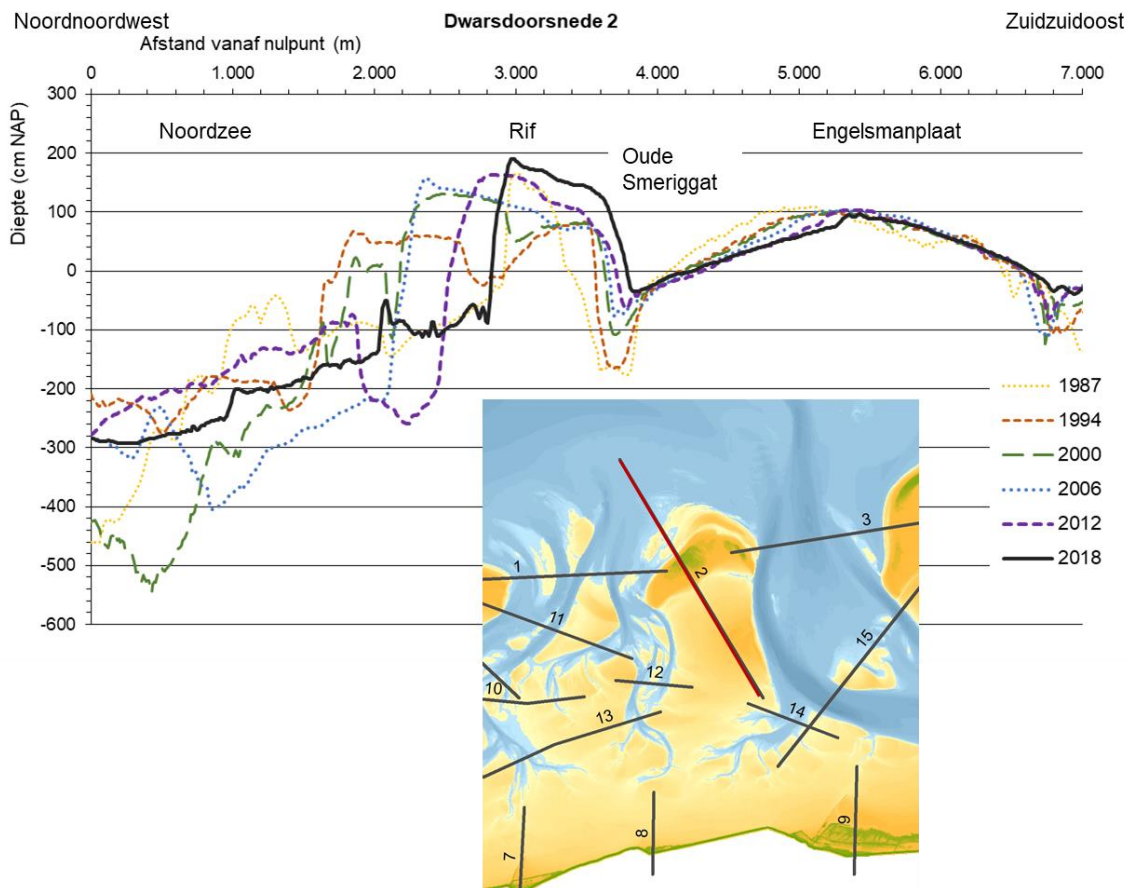






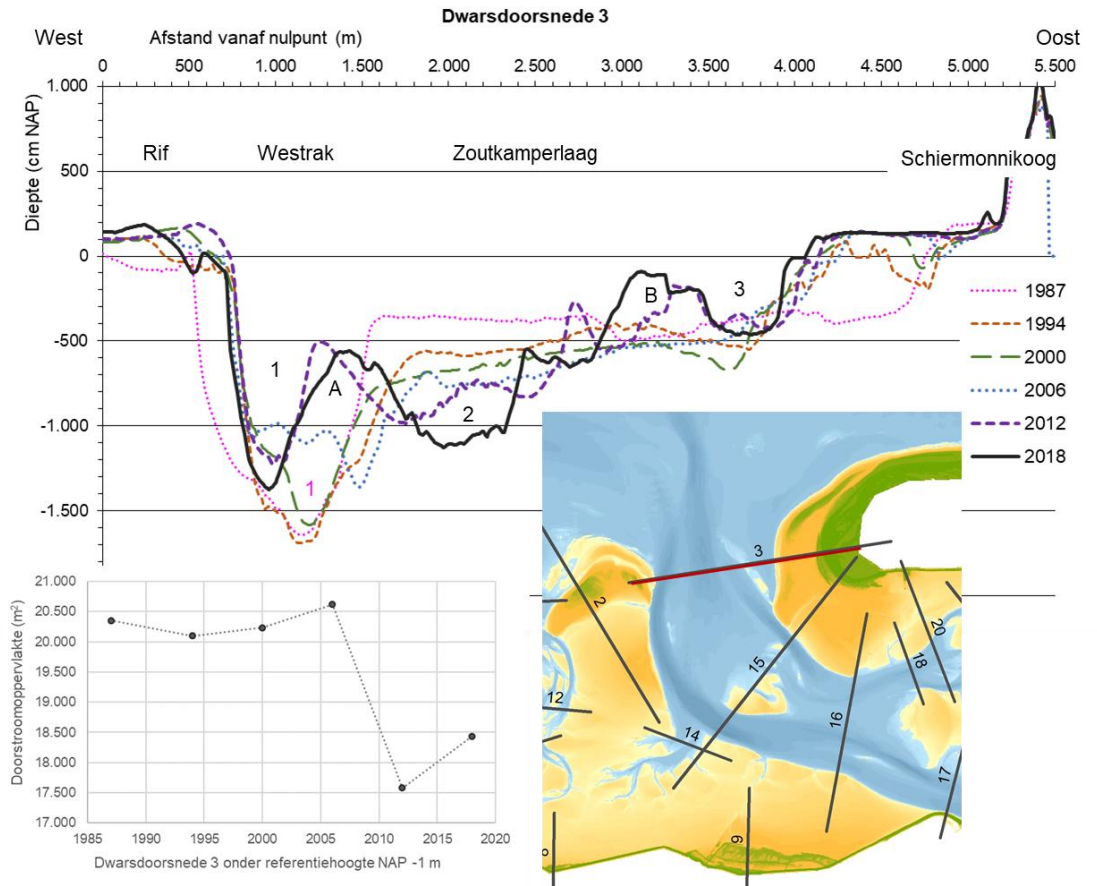


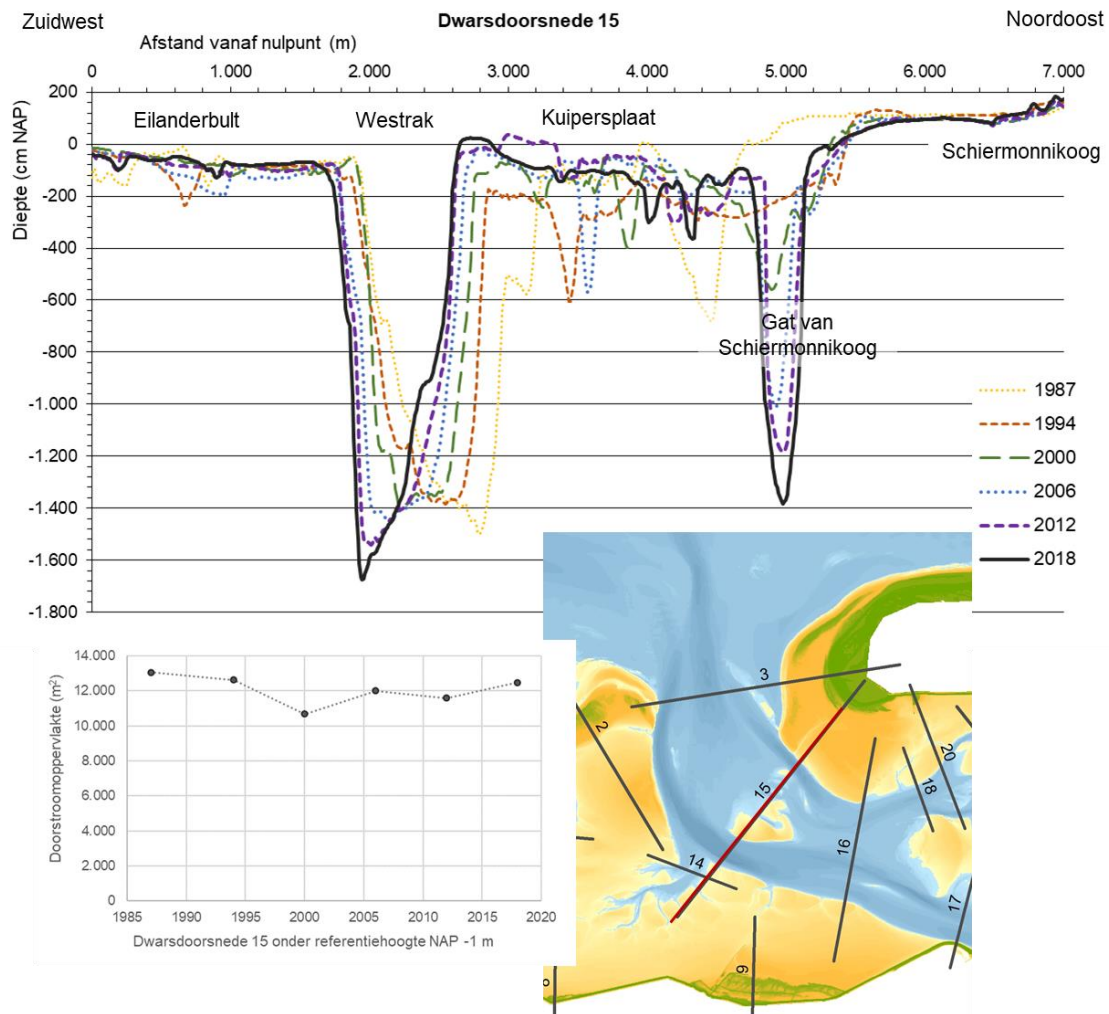


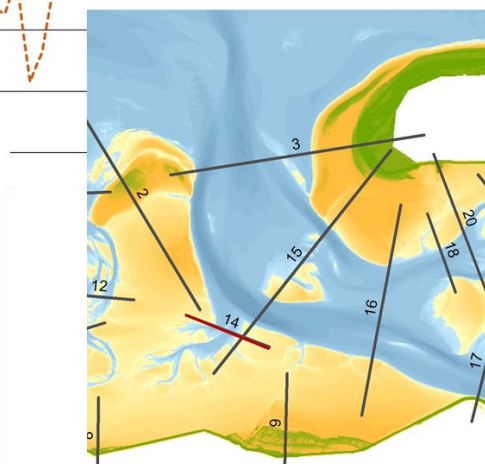
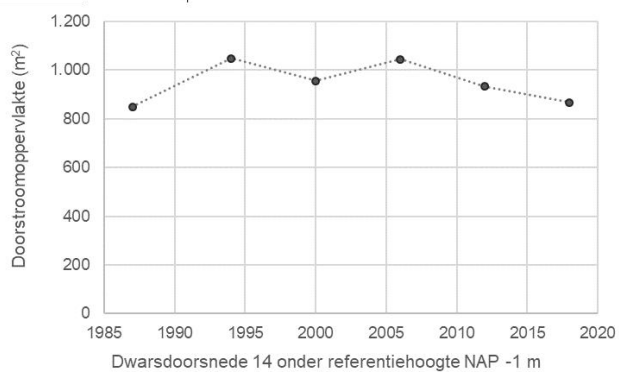
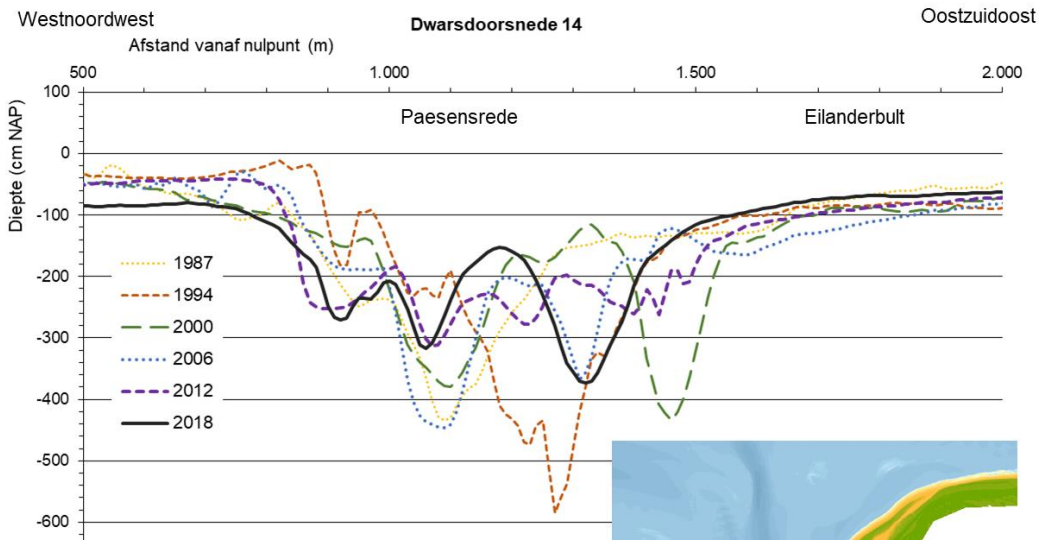


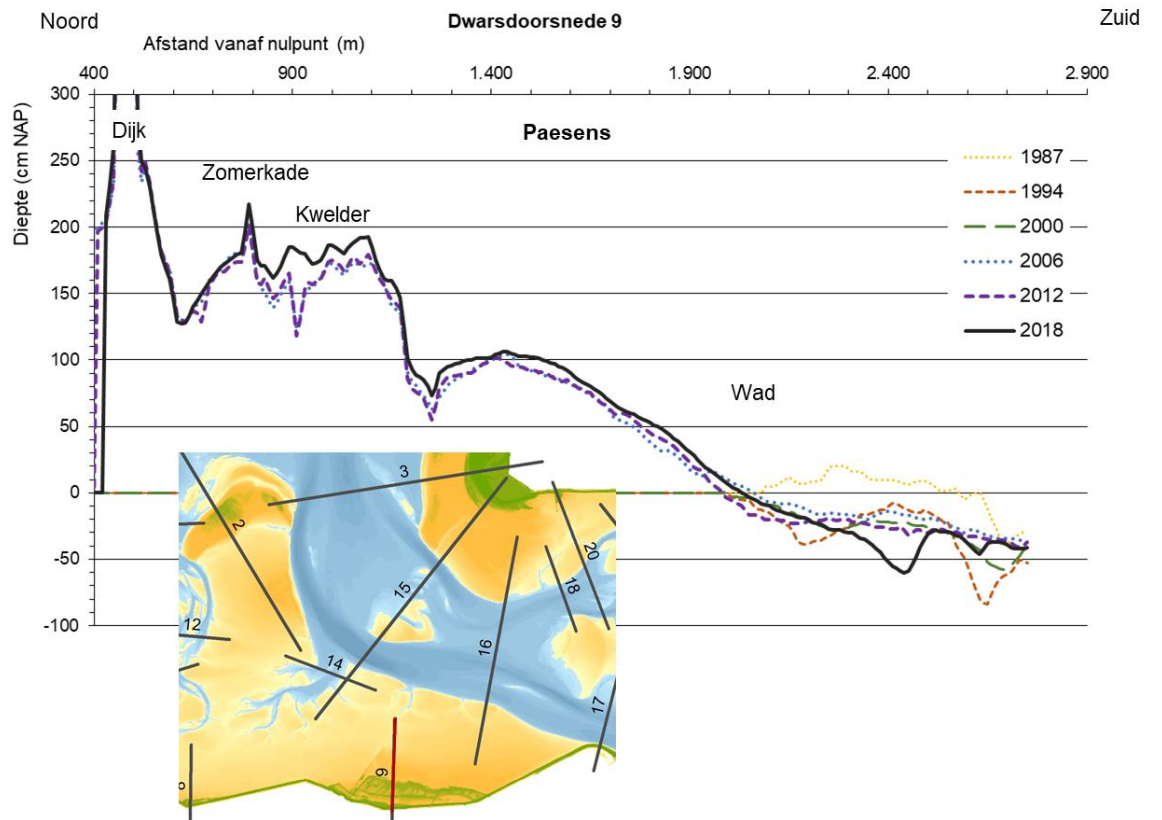


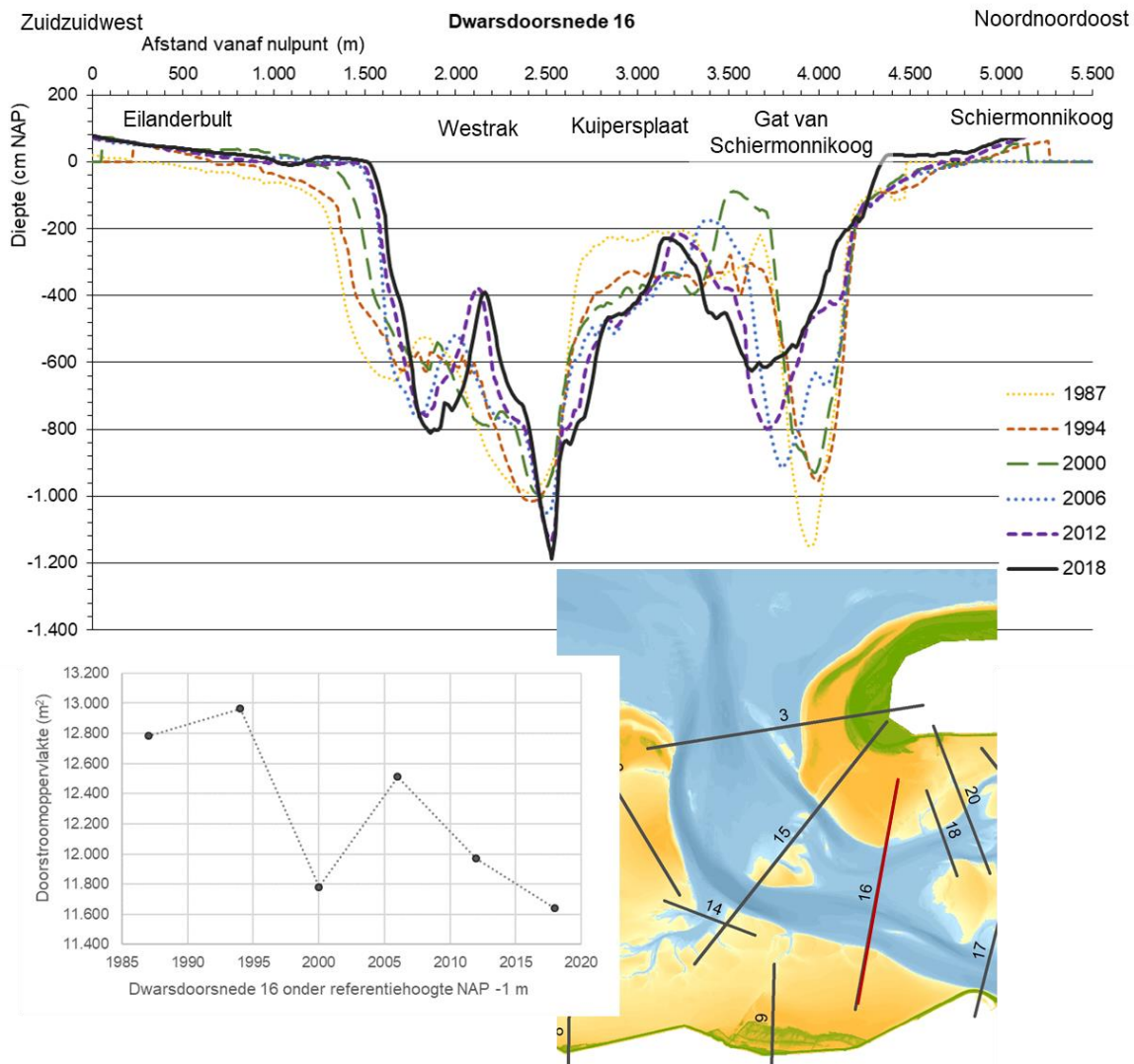
# Zoutkamperlaag

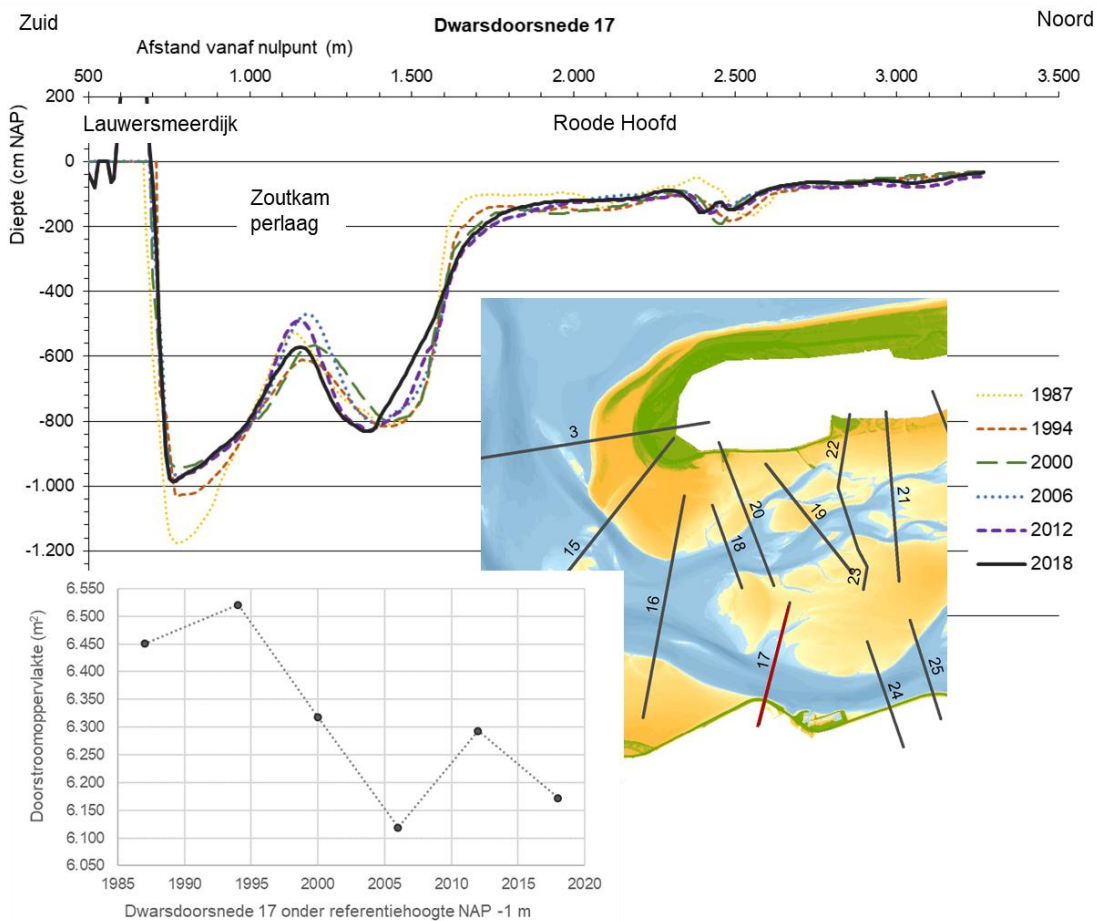


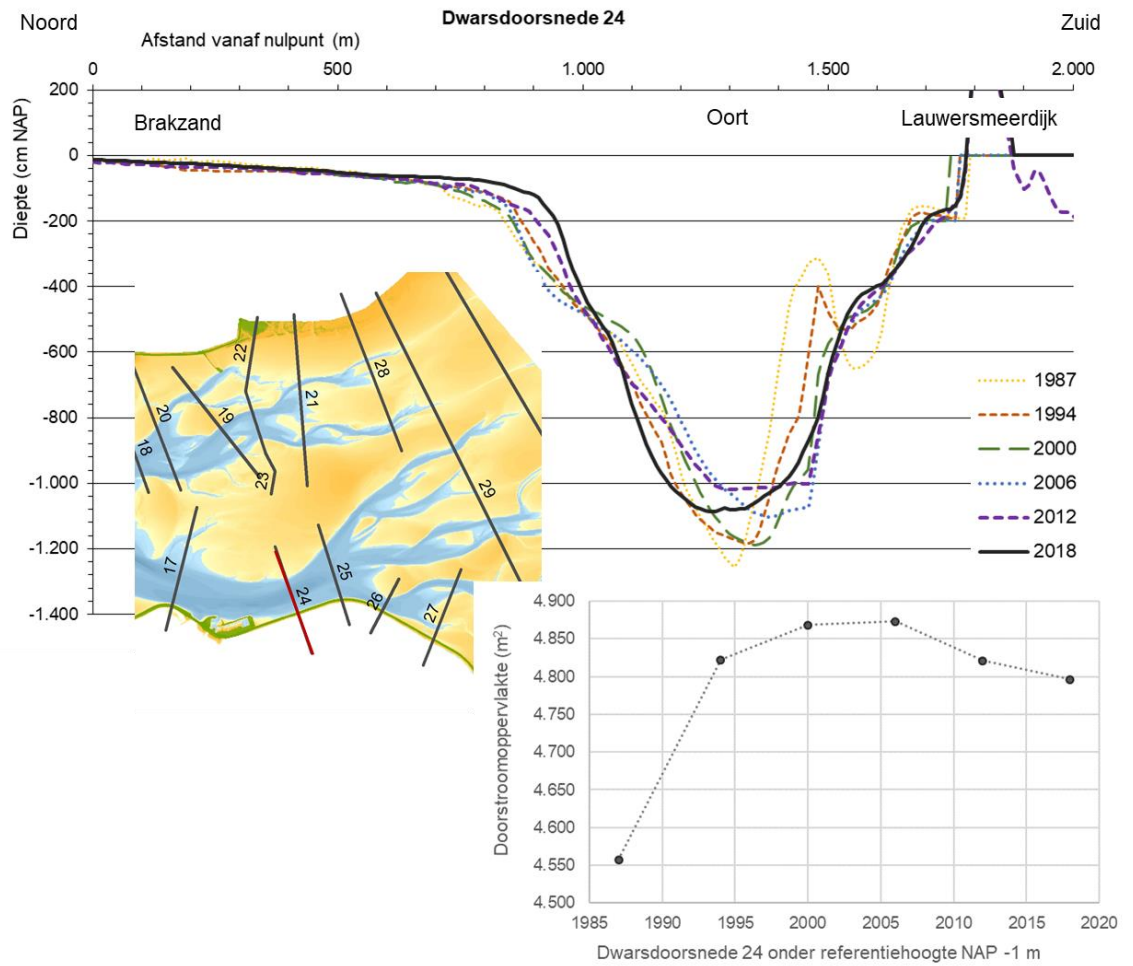


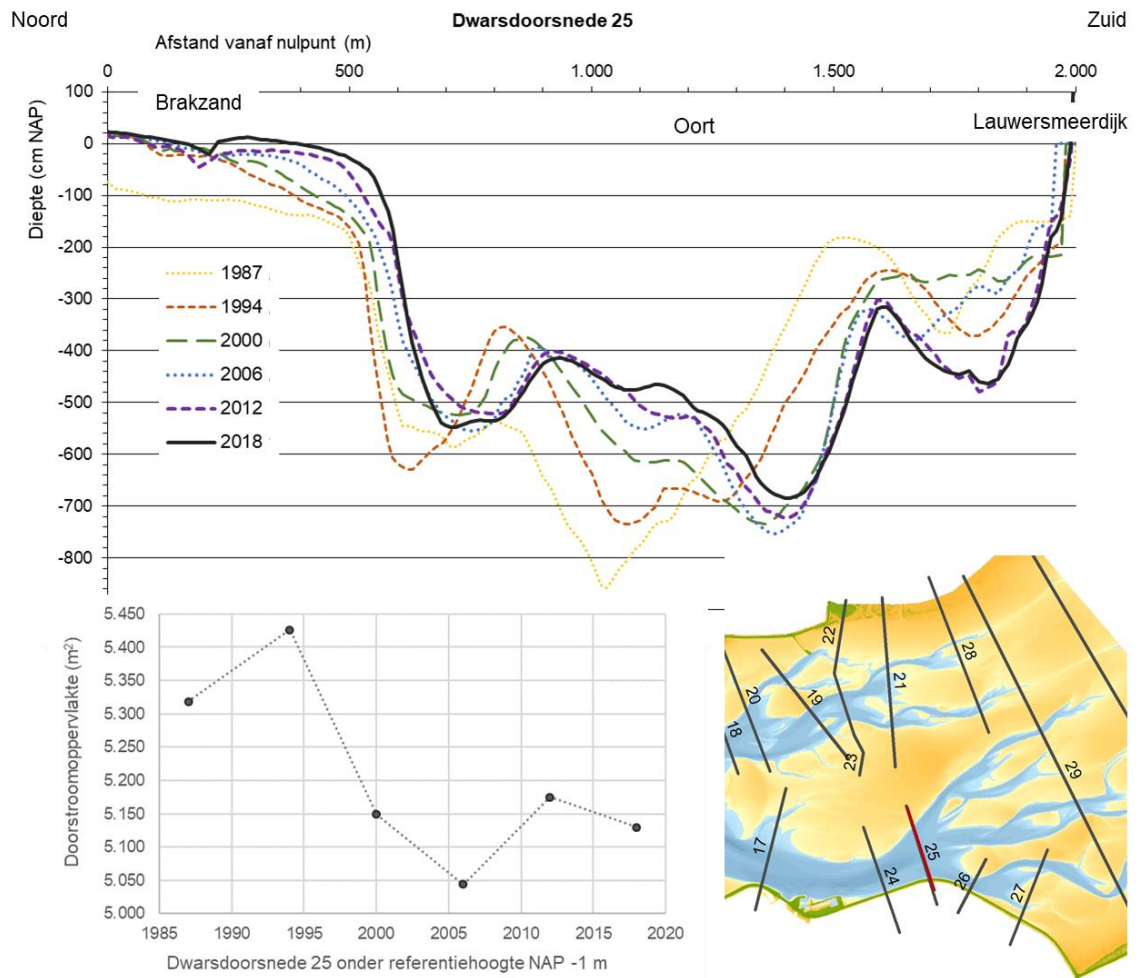




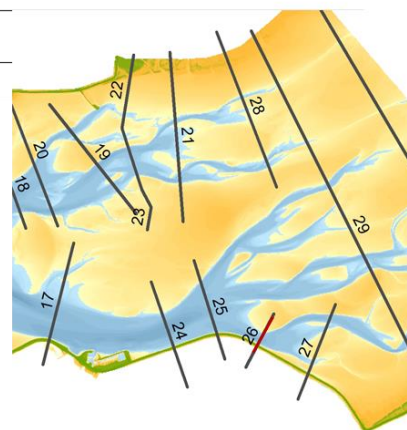
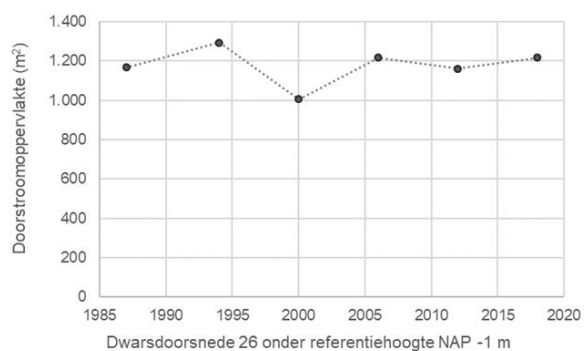
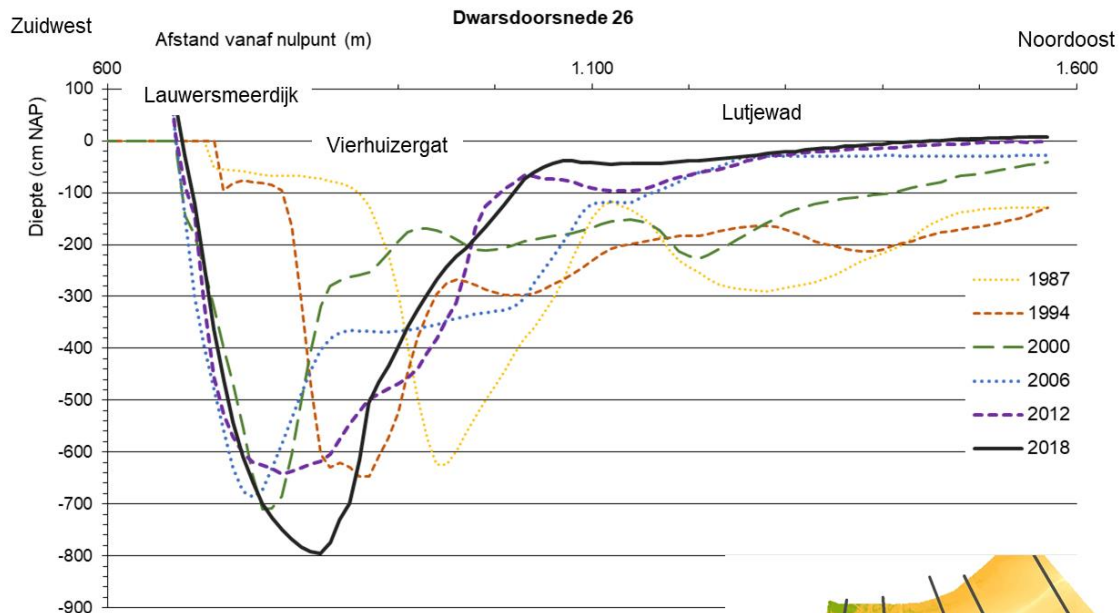


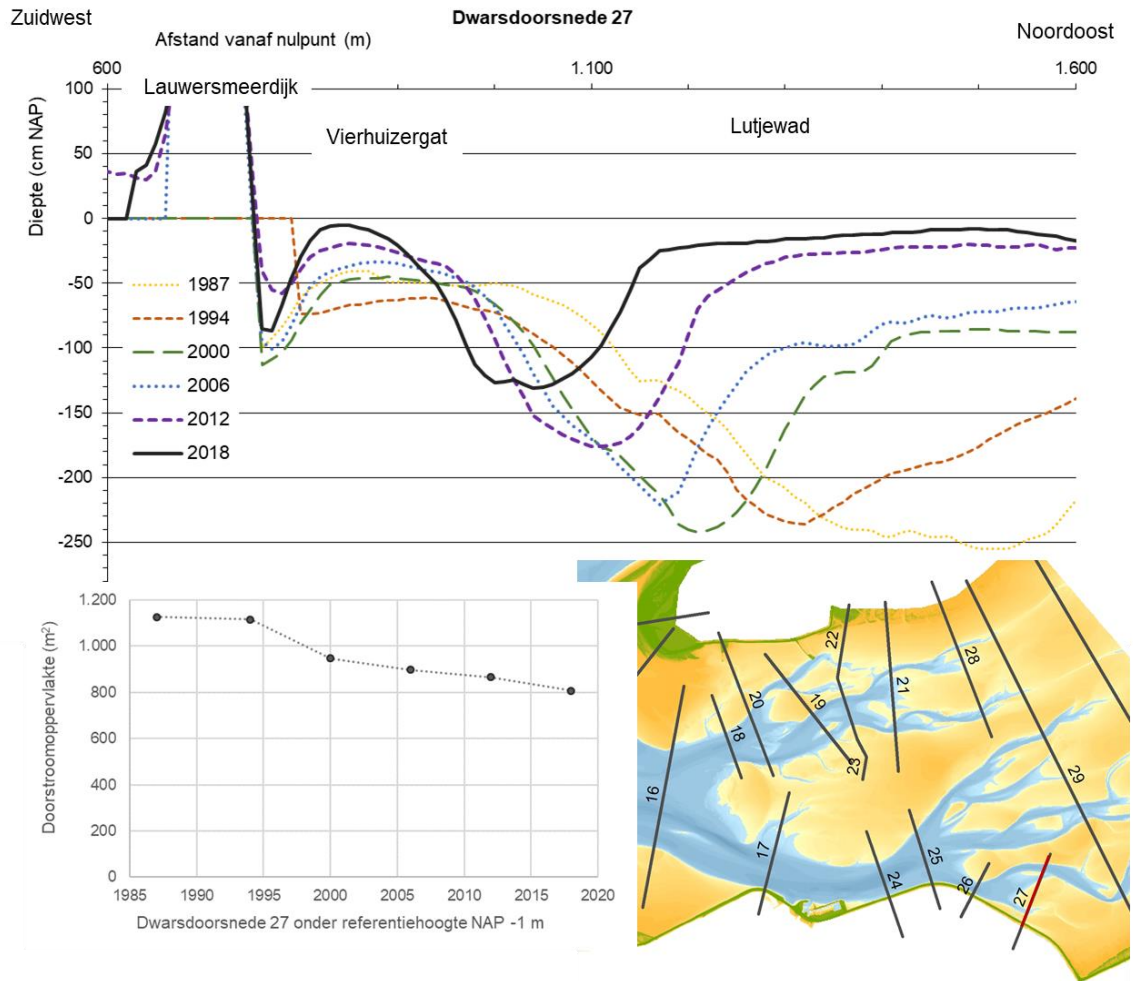


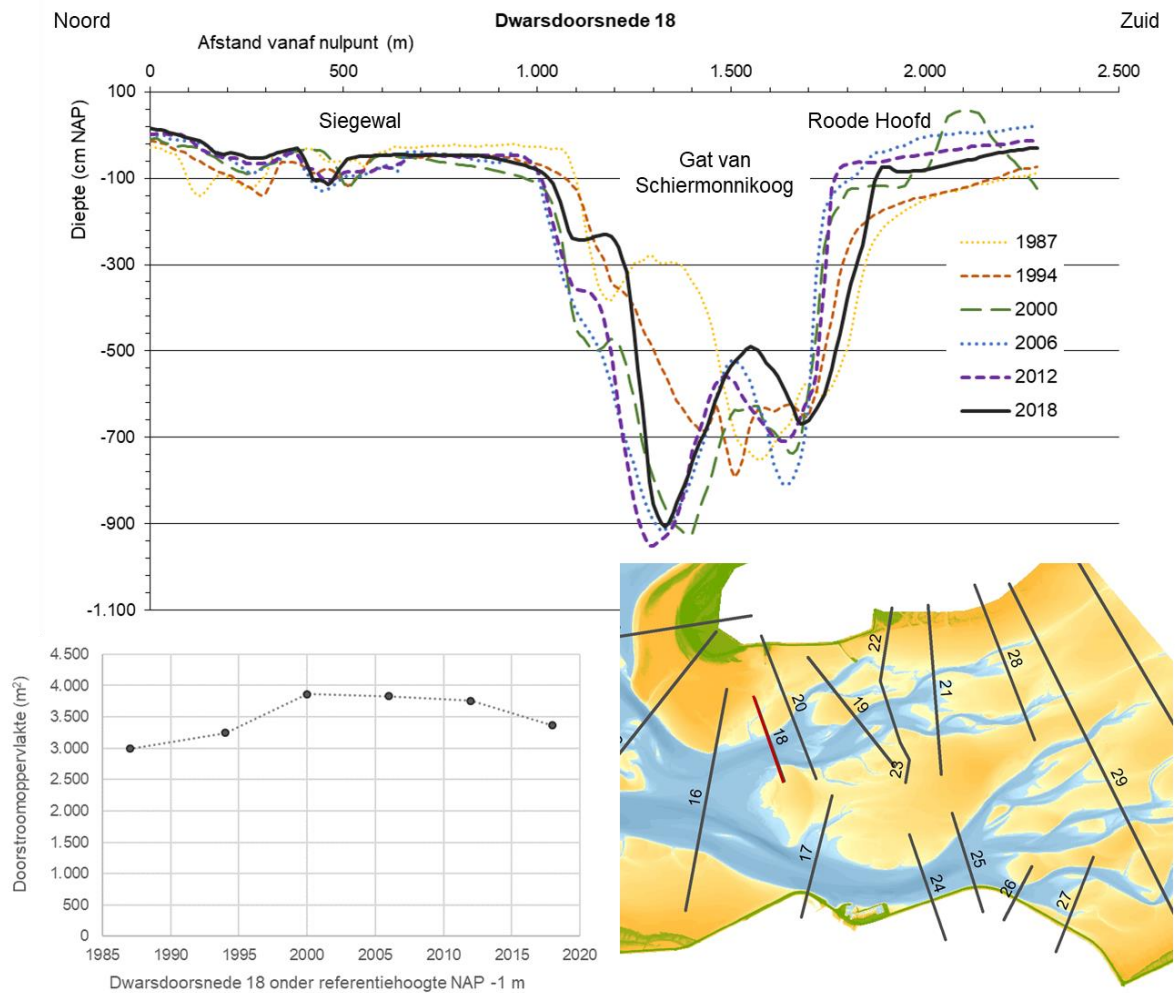


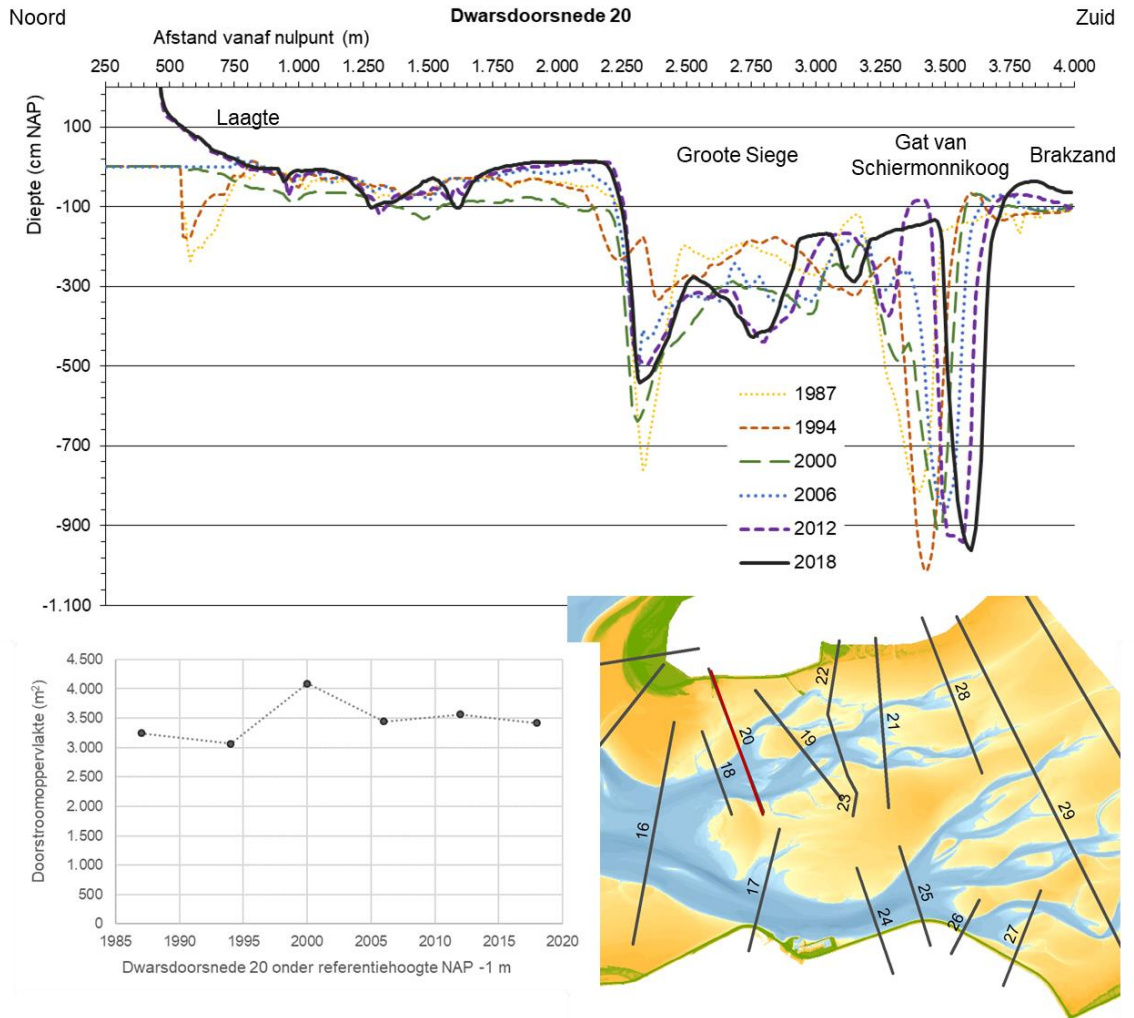


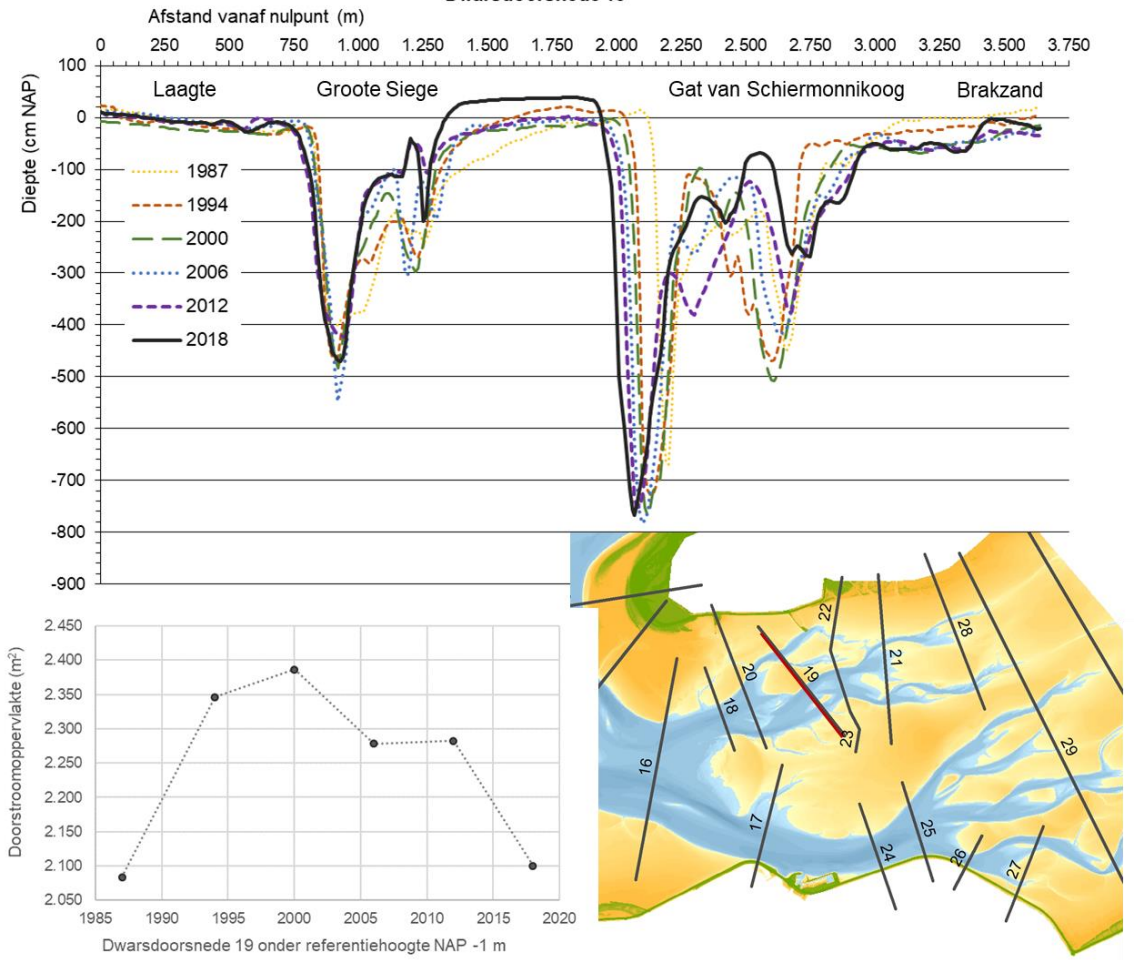


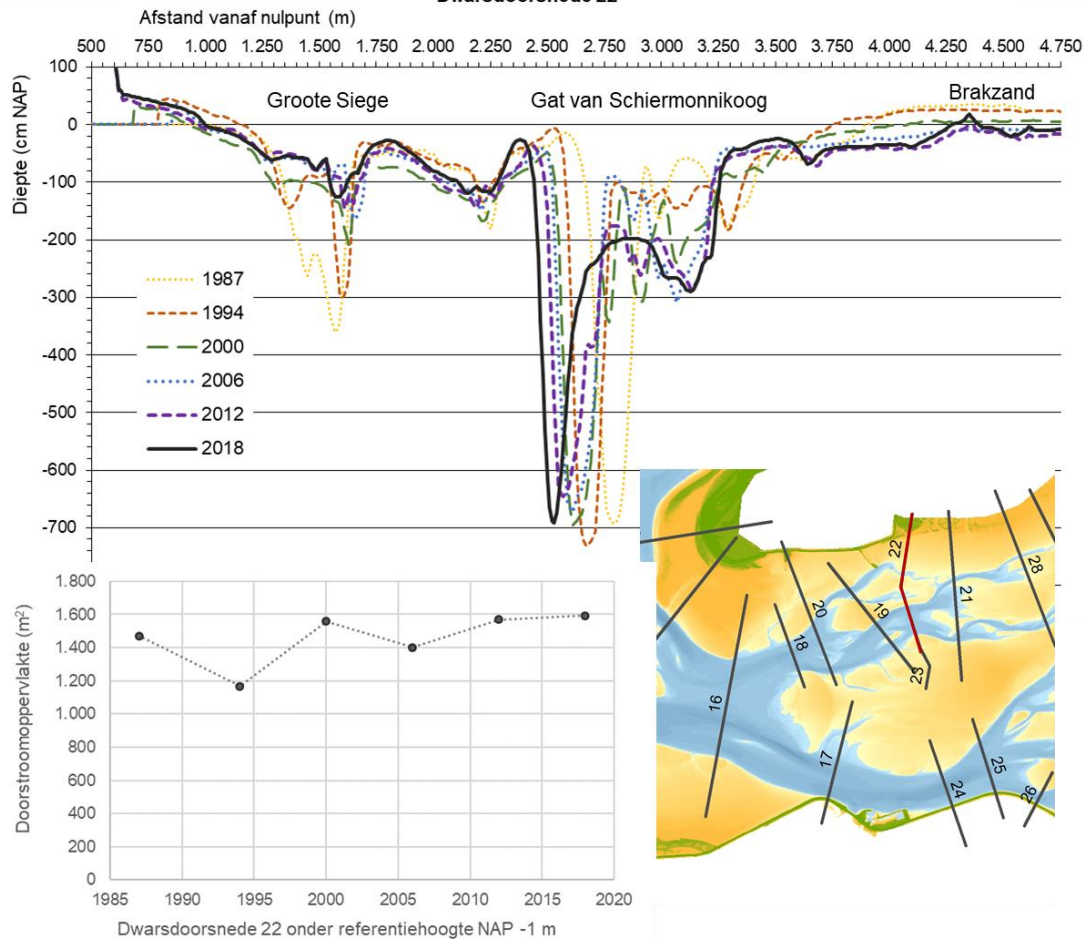


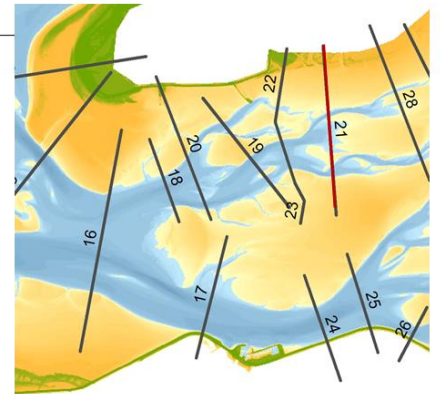
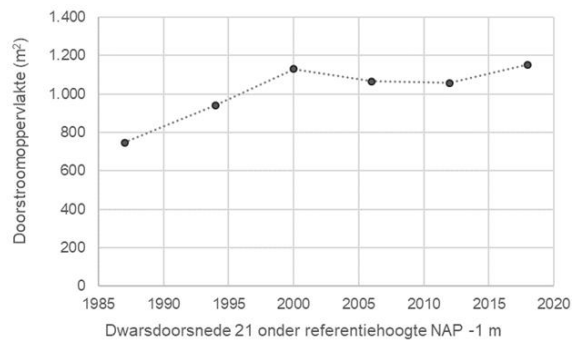
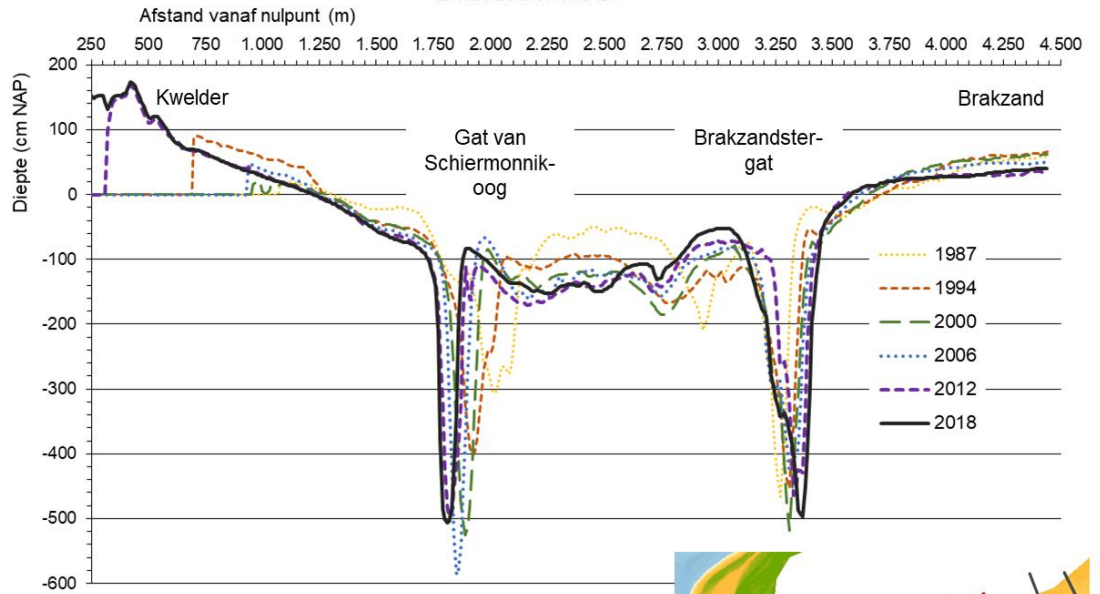


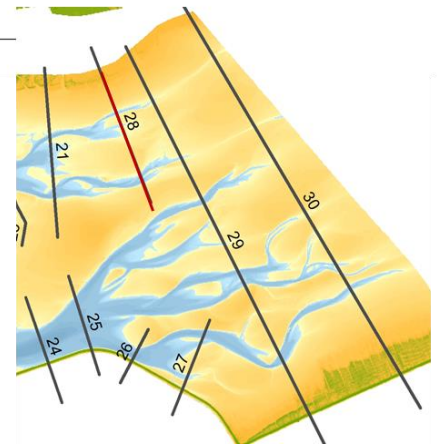
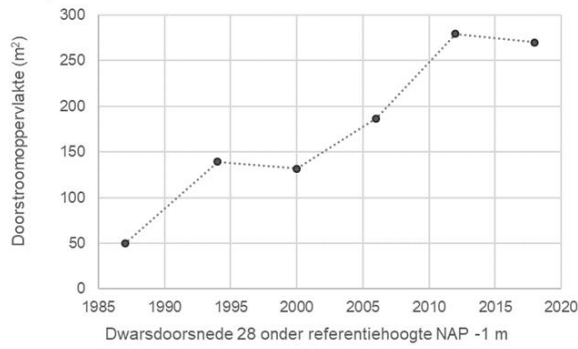
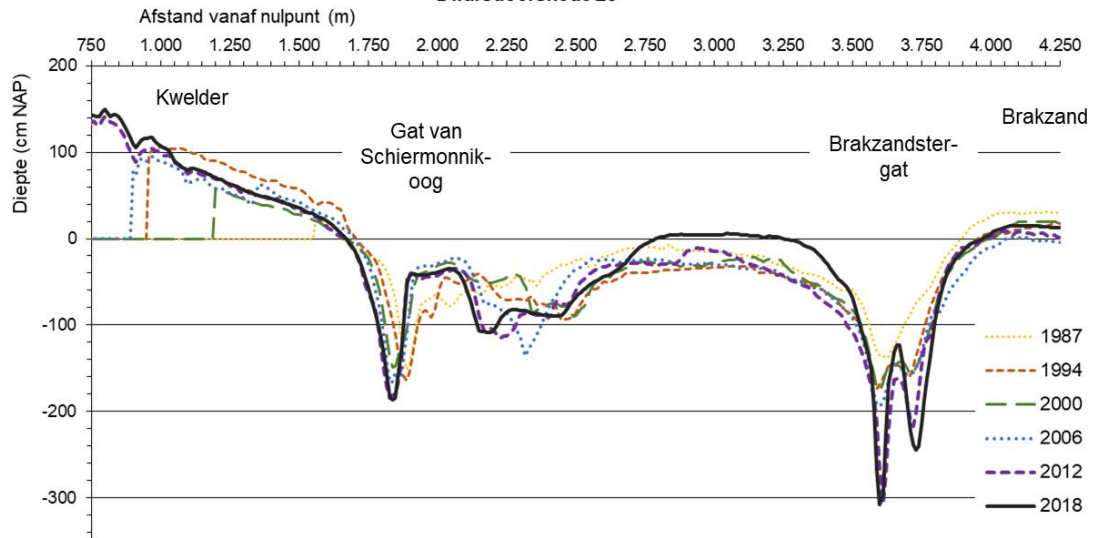






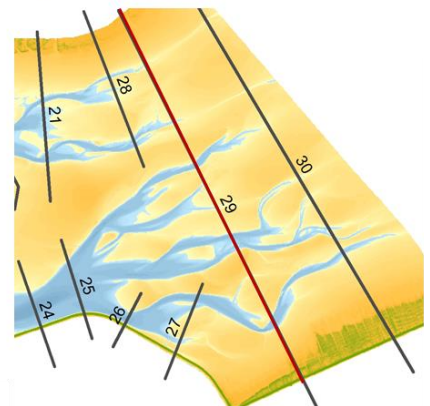
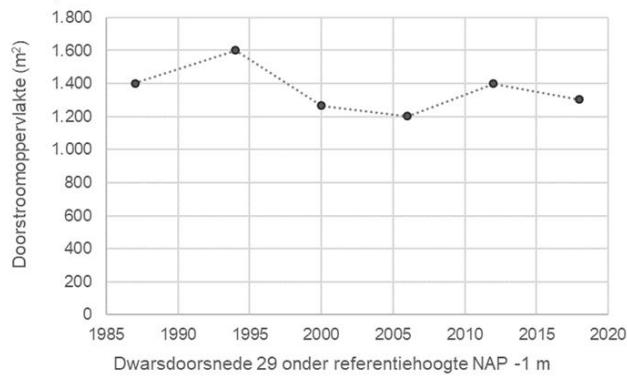
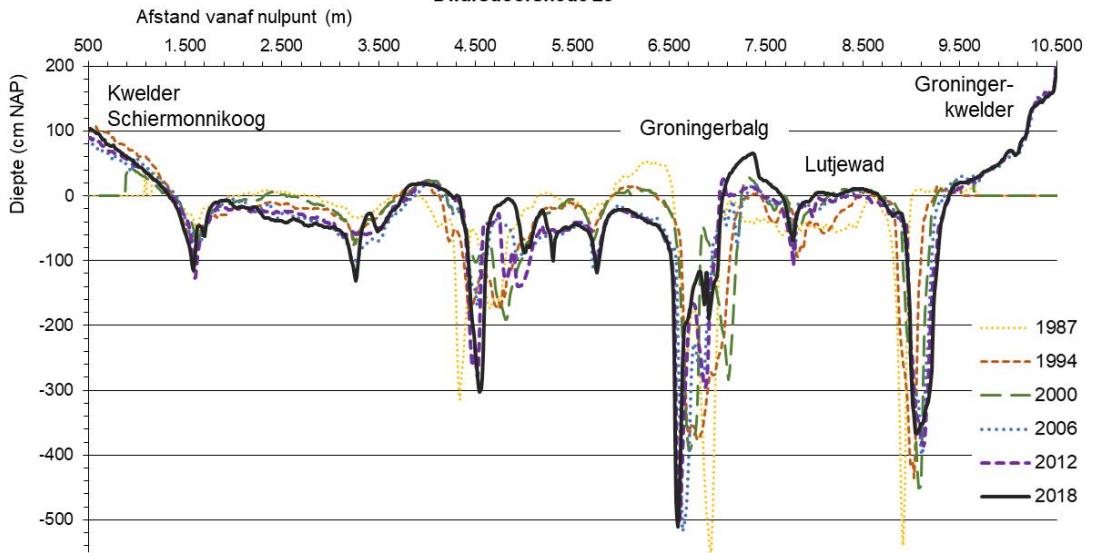


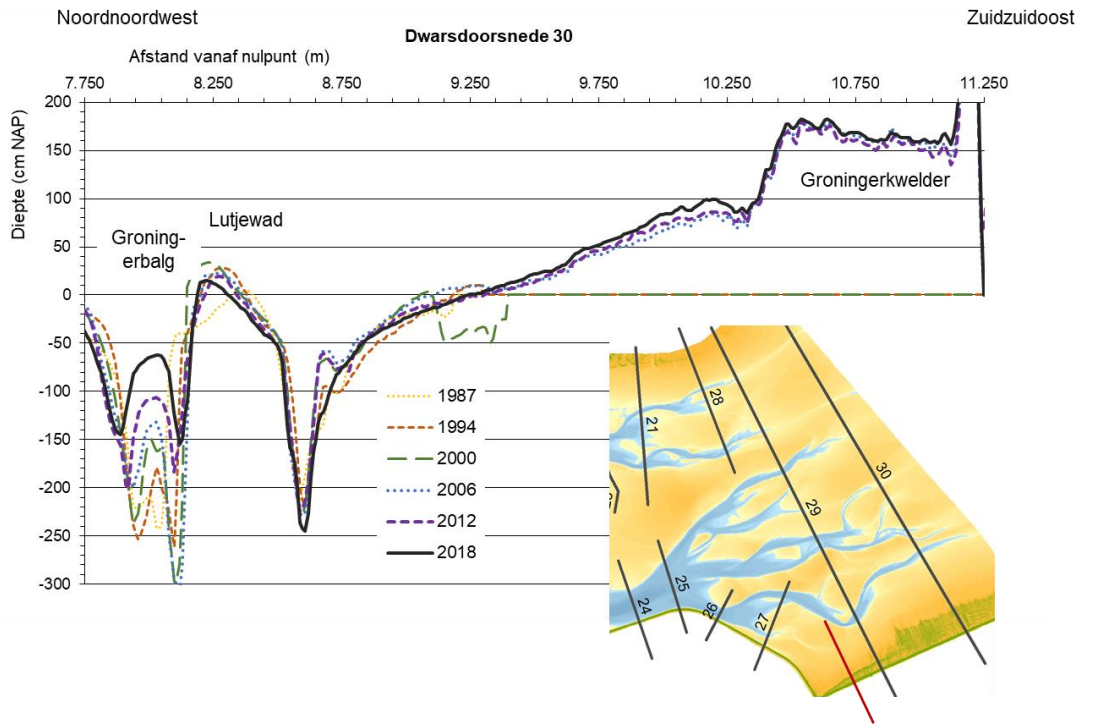






Dwarsdoorsnede 29





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](http://www.deltares.nl)