

## Kombergingsrapportage Marsdiep

Overzicht van informatie en kennis van het fysisch systeem. Versie 2023



## **Kombergingsrapportage Marsdiep**

Overzicht van informatie en kennis van het fysisch systeem. Versie 2023

### **Auteur(s)**

Julia Vroom

Jelmer Cleveringa

Albert Oost

Marcel Taal

### **Partners**

ARCADIS Nederland BV, AMSTERDAM

## Kombergingsrapportage Marsdiep

Overzicht van informatie en kennis van het fysisch systeem. Versie 2023

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Jurre de Vries
<b>Referenties</b>	WVH07 2023 Kennis voor Beheer en Onderhoud Waddenzee
<b>Trefwoorden</b>	Kombergingsrapport, morfologie, Waddenzee, geulen, platen, beheerbibliotheek

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.1
<b>Datum</b>	31-12-2023
<b>Projectnummer</b>	11209267-001
<b>Document ID</b>	11209267-001-ZKS-0005
<b>Pagina's</b>	128
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Julia Vroom	
	Jelmer Cleveringa	
	Albert Oost	
	Marcel Taal	

***Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.***

<b>Doc. Versie</b>	<b>Auteur</b>	<b>Controle</b>	<b>Akkoord</b>
<b>1.0</b>	Julia Vroom	Edwin Elias	Toon Segeren
	Jelmer Cleveringa		
	Albert Oost		
	Marcel Taal		

# Samenvatting

Dit rapport is de kombergingsrapportage van het bekken van het Marsdiep. 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). In 2022 is het laatste kombergingsrapport afgerond, waardoor de beheerbibliotheek van de Waddenzee compleet is, alleen de Eems-Dollard ontbreekt nog. Het voorliggende rapport is een update van de versie uit 2019, die de bekken van het Marsdiep en het Vlie in één rapport beschreef. Vanwege de behapbaarheid is besloten deze bekken te beschrijven in twee separate rapporten.

Deze update heeft zich gericht op het uniformeren van het Marsdiep kombergingsrapport met de andere kombergingsrapportages, zodat informatie sneller kan worden teruggevonden en er 1 standaard ontstaat voor alle rapportages. Daarnaast is er een analyse van veranderingen van watervolumes en een conceptueel denkmodel aan de rapportage toegevoegd om het systeembegrip verder te vergroten. Waar de vorige rapportage van het Marsdiep-Vlie in bijna elk hoofdstuk een koppeling maakte met de gebruiksfuncties, is dit in deze update samengebracht in het laatste hoofdstuk.

De ontwikkeling van de Westelijke Waddenzee begon met het ontstaan van een verbinding tussen Vlie en het Almere voor het begin van de jaartelling. Deze binnenzee groeide uit tot de Zuiderzee. Vanaf de middeleeuwen werd de ontwikkeling gedomineerd door het ontstaan van het Marsdiepsysteem als gevolg van erosie van veengebied. Dat leidde tot een veel dieper systeem dan de oostelijke Waddenzee. Vanaf het jaar 1000 had het bekken haar grootste omvang bereikt, waarna steeds grotere delen werden bedijkt. Er was op dat moment sprake van een 'gedeeld bekken': zowel het Marsdiep als het Vlie waren onderdeel van de Zuiderzee. In dit diepere bekken werd in 1932 de Afsluitdijk voltooid. Op dat moment verandert de getijkarakteristiek in het overgebleven (gedeelde) bekken direct, de laagwaters daalden en de hoogwaters stegen en over de Boontjes, Zuidoost Rak en Scheurrak vormt zich een wantij. Door de gedaalde laagwaters valt initieel een groter areaal intergetijdengebied droog. De vergroting van de getijslag leidt tot een groter getijprisma, ondanks de sterke verkleining van het bekken. Het grotere getijprisma leidt nabij de zeegaten en in het centrale deel van het bekken tot erosie, terwijl de geulen die vroeger de Zuiderzee voedden sterk sedimenteren. De morfologische respons op de afsluiting duurt tot op de dag van vandaag voort, maar is tegenwoordig in termen van het sedimenttransport naar het kombergingsgebied wel een stuk kleiner dan direct na de afsluiting. Er is nog steeds uitwisseling van water tussen Vlie en Marsdiep, maar wordt wel steeds kleiner dan in het verleden door de groei van wadplaten tot steeds meer een droogvallend wantij-gebied.

De waterstanden zijn nog steeds aan verandering onderhevig. Na de afsluiting steeg het niveau van hoogwater sterker dan dat van laagwater, waardoor de getijslag verder toenam. Sinds de jaren '80 neemt het hoogwater minder snel toe, terwijl juist bij de zeegaten het laagwater wat sneller toeneemt, met als gevolg dat de getijslag nabij de zeegaten afneemt. Ook bij Harlingen neemt de getijslag sinds de jaren '80 nog toe. De veranderingen van de waterstanden leidde in de meeste gebieden tot een toename van het kombergingsvolume in ieder geval tot aan de jaren '80. Veranderingen in de getijslag hebben in het Marsdiep in vergelijking met andere bekken veel gevolgen voor het kombergingsvolume, vanwege het grote areaal aan sublitorale gebieden. Sedimentatie op en areaal uitbreiding van intergetijdegebieden treedt alleen op op het Balgzand en recentelijk rondom de Boontjes, waardoor in deze gebieden het kombergingsvolume afneemt. Rondom de Boontjes leidt dat voorsnog niet tot een afname van het geulvolume, maar op termijn naar verwachting wel.



# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Achtergrond en doelstelling	8
1.2	Update van 2023	8
1.3	Leeswijzer	9
<b>2</b>	<b>Grootschalige kenmerken</b>	<b>10</b>
2.1	Namen van platen en geulen	10
2.2	Gebiedsbeschrijving	10
2.3	Hypsometrie en arealen	11
<b>3</b>	<b>Hydrodynamica</b>	<b>14</b>
3.1	Waterstanden	14
3.2	Relatieve zeespiegelstijging	15
3.3	Zoetwaterafvoeren en saliniteitsverdeling	16
3.4	Stroomsnelheden en debieten	18
<b>4</b>	<b>Langjarige morfologische ontwikkelingen</b>	<b>20</b>
4.1	Ontstaan westelijke Waddenzee door openbreken Marsdiep en Zuiderzee	20
4.1.1	Voor en tijdens de Middeleeuwen	20
4.1.2	Vanaf 1100 tot de 20 <sup>e</sup> eeuw	20
4.2	De afsluiting van de Zuiderzee	21
4.2.1	De afsluiting en het effect op het getij	21
4.2.2	De ontwikkeling van het wantij	23
4.2.3	Morfologische veranderingen na afsluiting	26
<b>5</b>	<b>Sediment- en watervolumes en arealen</b>	<b>29</b>
5.1	Sedimentvolume	29
5.2	Watervolume en oppervlakte	32
<b>6</b>	<b>Getijgeulen</b>	<b>39</b>
6.1	Inleiding: getij stuurt geulvolume	39
6.2	Helsdeur, Marsdiep en Texelstroom	41
6.3	Doove Balg	44
6.4	Omdraai en Scheurrak	47
6.5	De Boontjes	48
6.6	Visjagersgaatje	52

<b>7</b>	<b>Sublitorale platen</b>	<b>55</b>
7.1	Inleiding	55
7.2	Vlieter en Javaruggen	56
7.3	'Hankenhammen'	58
<b>8</b>	<b>Droogvallende wadplaten</b>	<b>61</b>
8.1	Inleiding	61
8.2	Het stabiele Balgzand	62
8.3	De dynamische Lutjeswaard	63
8.4	Dynamische platen ten westen en zuidwesten van Harlingen	65
8.5	Morfodynamiek van de wadplaten	66
<b>9</b>	<b>Kwelders</b>	<b>70</b>
9.1	Inleiding	70
9.2	De Schorren	73
9.3	Mokbaai: kwelders van het Puntje en Karhoek	74
9.4	Balgzand tot en met Den Oever	74
<b>10</b>	<b>Conceptueel denkmodel systeemgedrag</b>	<b>76</b>
10.1	Inleiding	76
10.2	Ontwikkelingen Marsdiep	76
10.2.1	Ruimteschaal van het hele kombergingsgebied op een tijdschaal van tientallen tot honderden jaren	76
10.2.2	Ruimteschaal van deelgebieden in het kombergingsgebied op een tijdschaal van tientallen jaren	77
10.2.3	Ruimteschaal van morfologische eenheden op een tijdschaal van jaren	79
10.3	Basisdenkmodel voor grootschalige ontwikkelingen en aanpassingen aan het denkmodel voor het Marsdiep	79
10.3.1	Denkend aan de toekomst	83
<b>11</b>	<b>Relatie morfologie en gebruiksfuncties</b>	<b>85</b>
11.1	Inleiding	85
11.2	Veiligheid tegen overstromingen	85
11.2.1	Dijkstabiliteit in relatie tot geulmigratie en ontgroning	85
11.2.2	Sedimentatie van het voorland en belasting van de waterkering	87
11.2.3	Kustbeheer	87
11.3	Bereikbaarheid: vaarwegen en havens	88
11.4	Natuur	89
11.5	Overige gebruiksfuncties	89
11.5.1	Mosselpercelen en -cultuur en mosselzaadinvanginstallaties (MZI's)	89
11.5.2	Schelpenwinning	91
11.5.3	Kabels en leidingen	91
<b>12</b>	<b>Referenties</b>	<b>92</b>

<b>A</b>	<b>Morfologische schaalniveaus en eenheden</b>	<b>99</b>
A.1	Morfologische schaalniveaus	99
A.2	Morfologische elementen op de mesoschaal	100
<b>B</b>	<b>Historische ontwikkelingen westelijke Waddenzee</b>	<b>101</b>
B.1	De Romeinse periode: het Flevomeer (400BC – 100AD)	101
B.2	Vroege tot Hoge Middeleeuwen: Aelmere en Vlie-estuarium (450 -1000 AD)	102
B.2.1	Algemeen	102
B.2.2	Marsdiep als veenstroom, zeegat of beiden?	102
B.2.3	Vlie: een estuarium?	104
B.2.4	Aelmere	104
B.3	Hoge tot Late Middeleeuwen: Het doordringen van de zee (1000-1500 AD)	105
B.3.1	Algemeen	105
B.3.2	Marsdiep: ontwikkeling van het ‘zeegatsysteem’	105
B.3.3	Vlie: van estuarium naar kombergingsgebied	107
B.3.4	Van Aelmere naar Zuiderzee	108
B.4	De moderne tijd: 1500-1900	111
B.4.1	Algemeen	111
B.4.2	Marsdiep: toename getijdeprisma	112
B.4.3	Het geulenpatroon	113
B.4.4	Het Zeegat van het Vlie	115
B.4.5	Zuiderzee	116
B.5	Referenties	116
<b>C</b>	<b>Watervolumes</b>	<b>120</b>

# 1 Inleiding

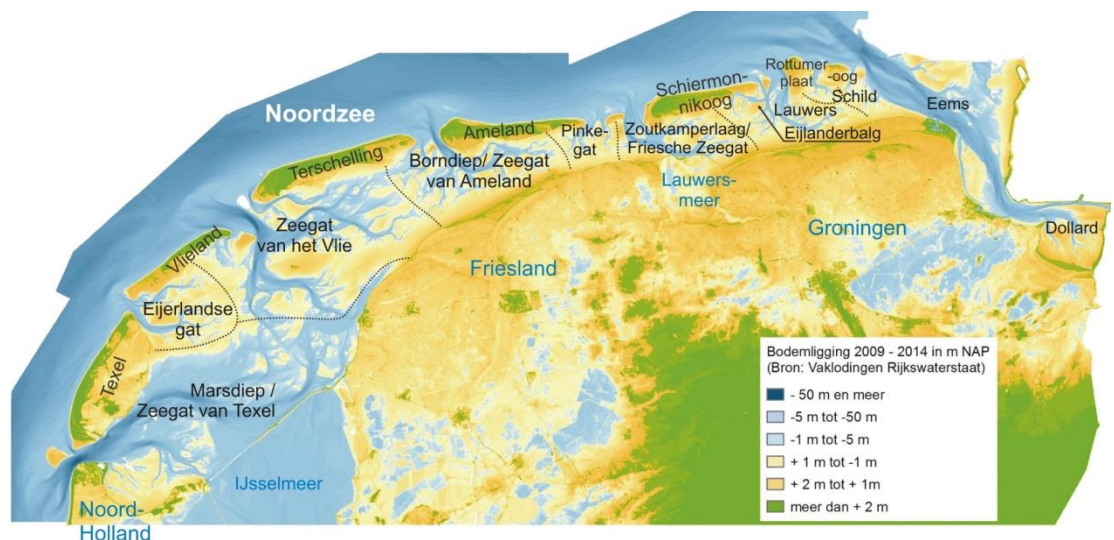
## 1.1 Achtergrond en doelstelling

Met het uitbrengen van de kombergingsrapportage voor het Eierlandse Gat in 2022 is er voor elk kombergingsgebied in de Waddenzee (Figuur 1-1; uitgezonderd het Eems-estuarium) een kombergingsrapportage beschikbaar. Voorliggend rapport is een update van de in 2019 uitgebracht Kombergingsrapportage Marsdiep en Vlie. Bij deze update is besloten de rapportage voor het Marsdiep en het Vlie te scheiden. De gebieden zijn nauw met elkaar verweven en ondervonden beiden een grote impact van het afsluiten van de Zuiderzee, maar ontwikkelen zich ook meer en meer tot 2 'zelfstandige' bekkens. Voor de behapbaarheid van de rapportage is echter besloten twee losse documenten te maken.

De kombergingsrapportages zijn vergelijkbaar met de [beheerbibliotheken](#) die voor de Nederlandse kust zijn gemaakt<sup>1</sup>. In bijlage A staat een omschrijving van de verschillende schaalniveaus en morfologische elementen in de Waddenzee. Deze indeling vormt de kapstok voor de kombergingsrapportages.

Een kombergingsrapportage heeft twee functies:

1. Het verzamelt en structureert de bestaande kennis van de morfologie op de middelgrote ruimteschaal (de mesoschaal) op basis van de verschillende typen morfologische elementen.
2. Het is een inleiding en naslagwerk voor de beheerders om bekend te raken met de morfologische werking van het betreffende bekken.



Figuur 1-1 De Waddenzee, de zeegaten en haar kombergingsgebieden.

## 1.2 Update van 2023

In 2023 heeft een update van de kombergingsrapportage plaatsgevonden, zoals beschreven in dit rapport. Hierbij is de voorgaande uitgave, die het Marsdiep én het Vlie beschreef, ten

<sup>1</sup> Het concept beheerbibliotheek is ontwikkeld bij Rijkswaterstaat-kustlijninzorg. 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 beheerders. Het rapport is ook bruikbaar voor beleidsmakers, wetenschappers, gebruikers en andere geïnteresseerden.



behoefte van de leesbaarheid en behapbaarheid gesplitst. Daarnaast zijn veel kaarten en grafieken geactualiseerd met de nieuwe bodemopname uit 2021. Ook is zoveel mogelijk aansluiting gezocht bij de indicatoren uit de in 2022 gelanceerde Digitale Systeemrapportage Waddenzee ([www.systeemrapportage.nl/wadden](http://www.systeemrapportage.nl/wadden)). Daarnaast zijn relevante resultaten van een aantal recente projecten toegevoegd aan het rapport. Beschrijvingen over beleid en beheer waren in de vorige versie verdeeld over het gehele rapport, en zijn nu samengenomen in het laatste hoofdstuk. Tot slot is er een conceptueel denkmodel van de systeemwerking aan het kombergingsrapport toegevoegd..

### 1.3 Leeswijzer

In dit rapport worden eerst de grootschalige kenmerken besproken (hoofdstuk 2), gevolgd door de hydrodynamica (hoofdstuk 3) en de langjarige morfologische ontwikkelingen vanaf het ontstaan van de westelijke Waddenzee tot de afsluiting van de Zuiderzee (hoofdstuk 4, paragraaf 4.1 met een meer gedetailleerde beschrijving in bijlage B) en daarna, tot op heden (hoofdstuk 4, paragraaf 4.2). Hoofdstuk 5 bespreekt de sedimentbalans. Daarna volgen vier hoofdstukken, elk gewijd aan één van de vier morfologische eenheden op mesoschaal op termijn van decennia tot maximaal een eeuw:

- Getijgeulen, vertakkend van groot (bij het zeegat) naar klein (hoofdstuk 6);
- Permanent onder water liggende platen (hoofdstuk 7);
- Intergetijdenplaten, ook wel wadplaten (hoofdstuk 8);
- Kwelders, bij het vasteland en onder de eilanden (hoofdstuk 9);

Hoofdstuk 10 bevat het conceptueel denkmodel van het systeemgedrag, wat de belangrijkste aandrijvende processen voor de morfologie in kaart brengt. Hierbij is ook een korte doorkijk naar de toekomstige ontwikkelingen opgenomen.

Hoofdstuk 11 bevat de synthese naar gebruiksfuncties en zoomt in op locaties waar de mesoschaal morfologie het gebruik beïnvloedt en er belangrijke beheervragen zijn. Lezers die vooral geïnteresseerd zijn in de relatie met de beheervragen wordt aangeraden (naast de samenvatting) zich te richten op dit hoofdstuk.

Ook wordt bijlage A onder de aandacht gebracht, die een inleiding in morfologische schaalniveaus en elementen op de mesoschaal bevat. Deze wordt aanbevolen aan lezers die minder bekend met morfologische terminologie zijn.



intergetijdengebieden. Deze grens is door de afsluiting van de Zuiderzee veranderd (zie verder §4.2.2). Aan de zuidzijde wordt het bekken begrensd door de Afsluitdijk.

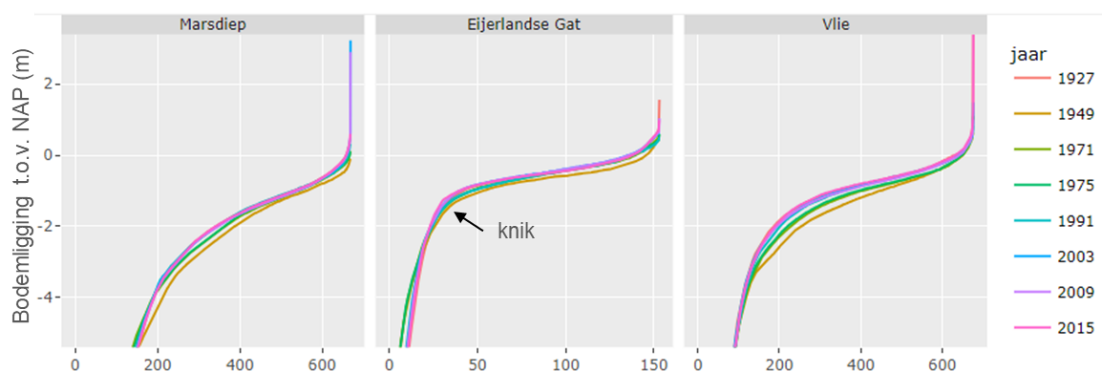
Een belangrijk kenmerk van het kombergingsgebied is haar vorm, die ten opzichte van de andere bekkens meer langgerekt is. Ook is de oriëntatie van de geulen, vanaf het zeegat naar binnen en de oriëntatie van de kustlijn is anders dan die van de andere Waddenbekkens.

Een ander kenmerk van het kombergingsgebied Marsdiep is de aanwezigheid van veel dieper gelegen subgetijde plaatgebieden. Zowel in absolute als in relatieve zin veel meer areaal aanwezig in het Marsdiep dan in de andere kombergingsgebieden in de Waddenzee. Een belangrijk deel van deze sublitorale gebieden missen duidelijke geulstructuren, de waterlijnen onder NAP -1 lopen daar niet parallel tot een diepte die varieert tussen NAP -3 en 5 m. De omvang en kenmerken van het sublitoraal zijn zo bijzonder voor het Waddengebied dat voor deze sublitorale gebieden een apart hoofdstuk is opgenomen in dit kombergingsrapport, namelijk hoofdstuk 7.

## 2.3 Hypsometrie en arealen

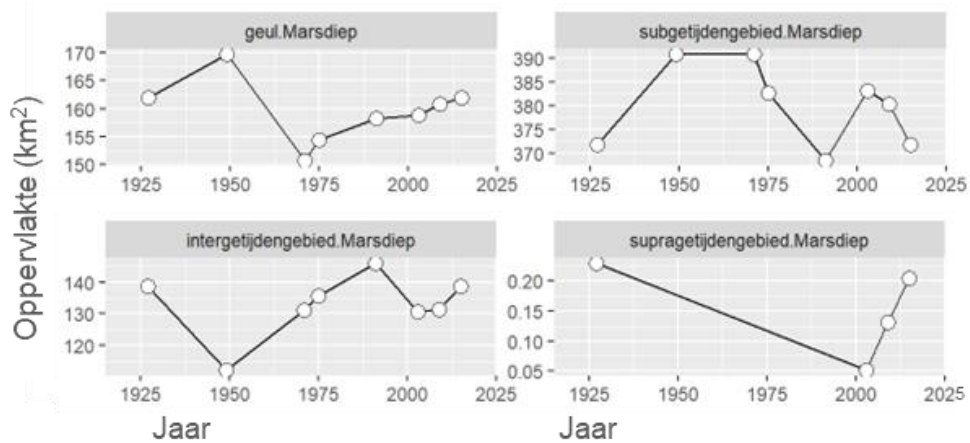
Een van de manieren om snel inzicht te krijgen in de kenmerken van kombergingsgebieden is om te kijken naar de hypsometrische curves. In deze curves wordt de cumulatieve oppervlakte per diepte klasse geplot, van diep naar ondiep. Figuur 2-2 toont de hypsometrische curves voor vaklodingen van verschillende jaren, van 1927 tot 2015 voor de kombergingsgebieden van de Westelijke Waddenzee.

De kenmerkende vorm van de hypsometrische curves in het Eierlandse gat bestaat uit een steil oplopend deel aan de diepe zijde, gevolgd door een knik, waarna de een flauw oplopend deel volgt. Deze kenmerkende curve is ook zichtbaar in de andere kombergingsgebieden (zie hiervoor de DSR). De knik van diep naar ondiep ligt bij het Eierlandse gat rond gemiddeld laag water (NAP -1m). Deze knik in de hypsometrische curves markeert de overgang van getijdegeulen en het sublitoraal naar de droogvallende wadplaten (litoraal). In het Vlie verloopt de overgang veel vloeiender en is zeker in de oudere curves geen sprake van een knik. In het Marsdiep is in het geheel geen sprake van een knik, hier gaat het diepere water in de hypsometrische curve geleidelijk over naar het ondiepe deel.



Figuur 2-2 Hypsometrische curves van de kombergingsgebieden in de Westelijke Waddenzee (uit de Digitale Systeem Rapportage, DSR).

Het is mogelijk om de arealen van de getijdegeulen, sublitorale platen, intergetijdengebied en kwelders (supragetijdengebieden) af te lezen uit de hypsometrische curves in Figuur 2-2, maar deze zijn ook opgenomen in de DSR (Figuur 2-3).



Figuur 2-3 Tijdsreeks met gemeten areaal in km<sup>2</sup> getijdgeulen, sublitorale platen, intergetijdengebied en supragetijdengebied (kwelders) voor het kombergingsgebied Marsdiep (uit de DSR).

In de DSR is een vaste hoogte-indeling gehanteerd:

- Geul: dieper dan NAP -5 m;
- Subgetijdengebied (sublitoraal): NAP -5 m tot NAP -1 m;
- Intergetijdengebied (wadplaat): NAP -1 tot NAP +1 m;
- Supragetijdengebied (kwelder): hoger dan NAP +1 m.

De indeling in de DSR gaat uit van vaste hoogtegrenzen in de tijd en voor de hele Waddenzee. De hoogte van NAP -1 komt daarbij bij benadering overeen met het niveau van laagwater en de hoogte van NAP +1 m komt bij benadering overeen met het niveau van hoogwater. Door het hanteren van vaste hoogtegrenzen in de DSR zijn de veranderingen in de arealen direct te relateren aan veranderingen in de bodemligging.

In werkelijkheid variëren de niveaus van hoog- en laagwater in de Waddenzee, waarbij de laagwaterstanden afnemen van west naar oost en de hoogwaterstanden toenemen. Voor het bepalen van arealen kan het zinvol zijn om andere hoogtegrenzen te hanteren, afhankelijk van het doel van de betreffende studie. Zo is het bijvoorbeeld voor ecologische studies belangrijk om het daadwerkelijk bereikbare areaal van droogvallende platen te kennen, waarbij rekening wordt gehouden met de lokale waterstanden zoals die gedurende een jaar (of een andere periode) optreden. Dat geeft inzicht in de tijd die wadvogels hebben voor het foerageren op die wadplaten.

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de arealen, die volgen uit het hanteren van verschillende definities. De eerste twee kolommen (gemarkeerd met 1.) geven de waarden op basis van de DSR.

Voor het Kombergingsgebied Marsdiep is in aanvulling op de hoogtegrenzen van de DSR, een aangepaste hoogtegrens gehanteerd voor het sublitoraal. Met de ondergrens van het sublitoraal op NAP -3 m diepe, worden gebieden die niet de kenmerken van getijdegeulen hebben, maar wel dieper zijn dan laagwater, zo goed als mogelijk worden gedekt. De arealen op basis van deze aangepaste dieptegrens staan in Tabel 2.1 in de kolommen die zijn gemarkeerd met 2.

In Tabel 2.1 zijn in de kolommen die zijn gemarkeerd met 3. de arealen opgenomen die zijn berekend door rekening te houden met de waterstanden ten tijde van de vakloding. Bij deze berekening is rekening gehouden met de ruimtelijke variatie (zie voor de methode en de toelichting op de resultaten paragraaf 32).



Tabel 2.1 Oppervlaktes van het totale areaal aan getijgeulen, sublitorale platen, intergetijdengebied en kwelders volgens verschillende bronnen.

1. Deelgebieden volgens DSR (2021)	1. Areaal [km <sup>2</sup> ]	2. Deelgebieden aangepast hoogte deze studie	2. Areaal [km <sup>2</sup> ]	3. Deze studie, gebaseerd op waterstanden 2021:	2. Areaal [km <sup>2</sup> ]
<b>Geul dieper dan -5 m NAP)</b>	162 km <sup>2</sup>	Geul dieper dan <- 3 m NAP)	235 km <sup>2</sup>	Geul dieper dan GLW -2 m:	251 km <sup>2</sup>
<b>Subgetijdengebied tussen NAP -5 en -1 m)</b>	372 km <sup>2</sup>	Sublitorale platen tussen NAP -3 en -1 m	352 km <sup>2</sup>	Sublitorale platen tussen GLW-2m en GLW:	311 km <sup>2</sup>
<b>Intergetijdengebied tussen -1 m en 1 m NAP )</b>	140 km <sup>2</sup>	Intergetijdengebied tussen -1 m en 1 m NAP	104 km <sup>2</sup>	Intergetijdengebied tussen GLW en GHW:	113 km <sup>2</sup>
<b>Supragetijdengebied hoger dan NAP + 1 m</b>	Minder dan 1 km <sup>2</sup>	Kwelders	12 km <sup>2</sup> (Cleveringa, 2018)	Niet beschouwd	-
<b>Totaal<sup>1</sup></b>	674 km <sup>2</sup>	Totaal	703 km <sup>2</sup>	Missende data: 32 km <sup>2</sup> Totaal	707 km <sup>2</sup>

Een verandering van de gehanteerde hoogtegrenzen heeft ook invloed op de veranderingen die optreden in de tijd, zoals weergegeven in Figuur 2-3. In Grasmeijer et al. (2022) is de areaalverandering van het Marsdiep op basis van historische kaarten sinds de jaren '70 vastgesteld t.o.v. een vast referentieniveau. Het gebied met een ligging onder de -5 m NAP neemt 0,23 km<sup>2</sup>/j toe in oppervlakte en het intergetijdengebied (met een ligging boven de -1 m NAP) neemt met 0,19 km<sup>2</sup>/j toe. Het subtidaal (tussen -5 en -1 m NAP) neemt dan dus met 0,42 km<sup>2</sup>/j af.

## 3 Hydrodynamica

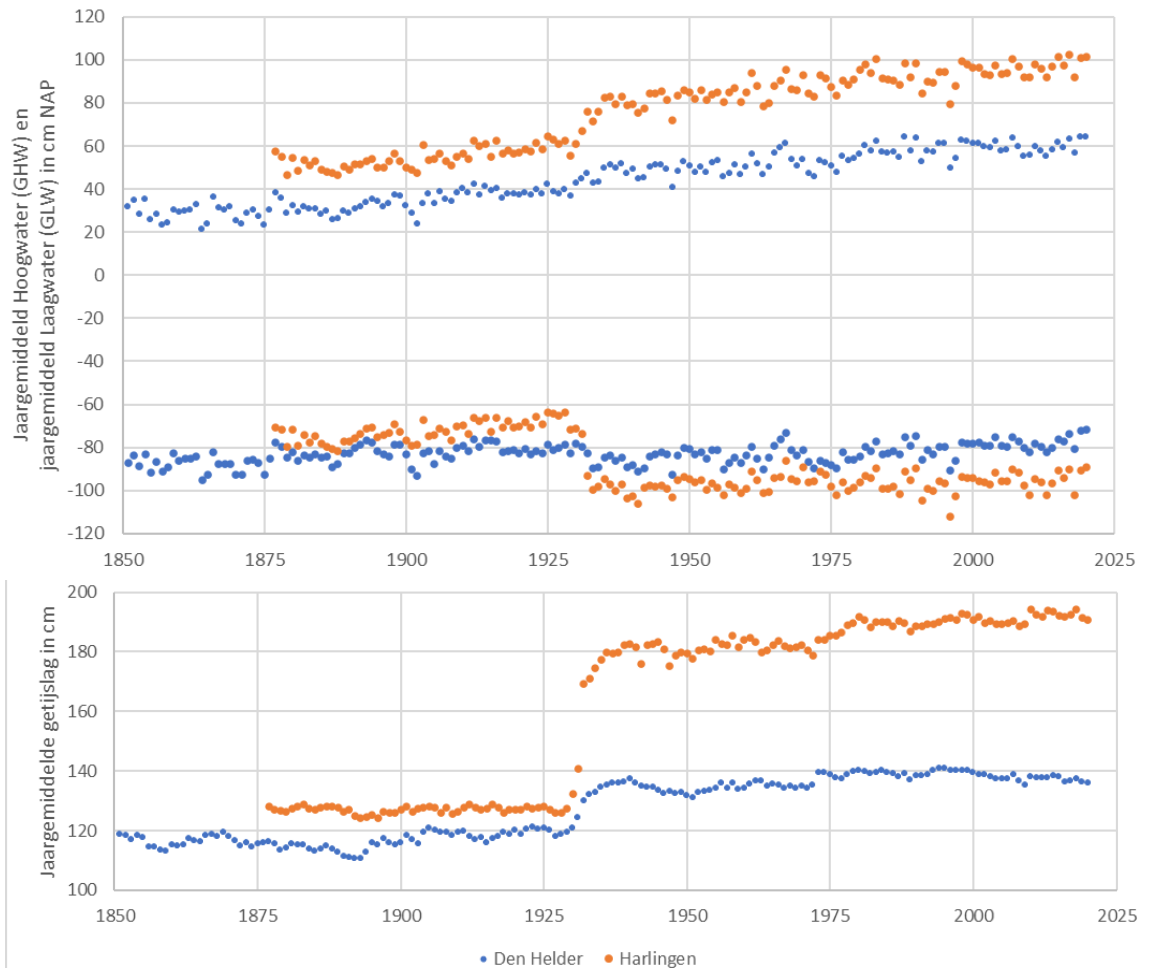
### 3.1 Waterstanden

Op verschillende plaatsen in het kombergingsgebied Marsdiep wordt de waterstand gemeten: bij Den Helder, Den Oever, Kornwerderzand, Oude Schild en Harlingen (Figuur 3-1). Het getij vervormt in het bekken door de lengte en vorm van het bekken en onder invloed van bodemwrijving, waarbij de getijslag vanaf het zeegat in landwaartse richting toeneemt.



Figuur 3-1 Kaart met de locaties van de waterstandstations in en nabij het kombergingsgebied Marsdiep.

Figuur 3-2 toont de beschikbare tijdseries van de jaargemiddelde hoog- en laagwaterstanden en getijslag voor de stations Den Helder en Harlingen. Het effect van de afsluiting van de Zuiderzee (zie ook §4.2) op de waterstanden is duidelijk zichtbaar, vooral bij Harlingen en in mindere mate bij Den Helder. De verandering na de afsluiting is het duidelijkst zichtbaar in de getijslag, die met name bij Harlingen sterk is toegenomen door de afsluiting. Daarnaast zien we een toename in de jaargemiddelde hoogwaters bij zowel Den Helder als Harlingen. De laagwaters zijn meer stabiel door de tijd. De getijslag neemt bij Harlingen sterker toe dan bij Den Helder, waar de getijslag sinds de jaren '80 zelfs een afname vertoond (zie ook bijlage C).



Figuur 3-2 Jaargemiddeld hoogwater en laagwater en getijslag voor Den Helder en Harlingen in cm t.o.v. NAP. Bron: Digitale Systeemrapportage Wadden.

### 3.2 Relatieve zeespiegelstijging

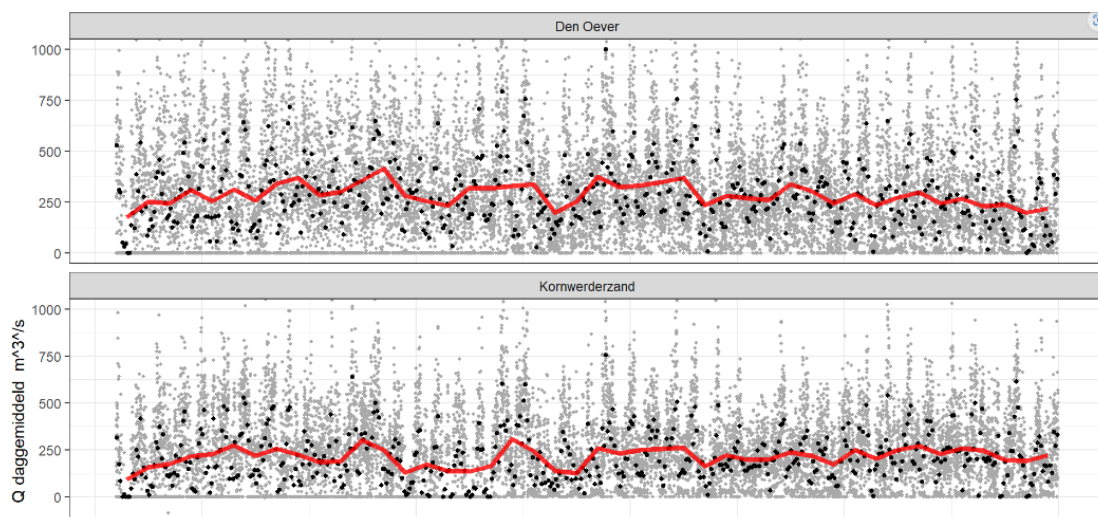
De toename van de zeespiegel ten opzichte van NAP bestaat uit een stijging van de langjarige gemiddelde waterstanden en daling van de ondergrond. Een actueel overzicht van de snelheid van zeespiegelstijging wordt gegeven door Stolte et al. (2023) en is samengevat in Tabel 3.1. De bijdrage van bodemdaling van de diepe ondergrond aan de relatieve zeespiegelstijging in de Waddenzee bestaat uit geologische bodemdaling en bodemdaling door delfstofwinning (van gas of zout). Bij Den Helder bedraagt de geologische bodemdaling 0,5 mm/j met een onzekerheidsmarge van 0,3 mm/j (Hijma, 2021).

Tabel 3.1: GHW, GLW en getijslag bij Den Helder en Harlingen, gemiddelde over de periode 2011-2020. Bron: Digitale Systeemrapportage Wadden. Zeespiegelstijging uit Stolte et al. (2023).

Station	GHW	GLW	Getijslag	Zeespiegelstijging voor 1993	Zeespiegelstijging na 1993
Den Helder	0,60 m NAP	-0,77 m NAP	1,37 m	1,4 mm/j	2,7 mm/j
Harlingen	0,98 m NAP	-0,95 m NAP	1,93 m	1,1 mm/j	3,3 mm/j

### 3.3 Zoetwaterafvoeren en saliniteitsverdeling

Langs de randen van het kombergingsgebied liggen op verschillende plekken spuisluizen en gemalen waar zoetwater op de Waddenzee wordt geloosd. Duran-Matute et al. (2014) geeft een overzicht van de grote en kleine zoetwaterafvoeren langs de westelijke Waddenzee. Van deze spuilocaties zijn de debieten vanuit de Afsluitdijk het grootst. Bij Kornwerderzand en Den Oever liggen de spuisluizen waardoor het zoete water vanuit het IJsselmeer bij laagwater op de Waddenzee wordt gespuid. Beide sluizen zijn spuisluizen en geen gemalen en dat betekent dat alleen gespuid kan worden als de waterstand in de Waddenzee ter plaatse van de spuisluizen lager is dan de waterstand in het IJsselmeer.

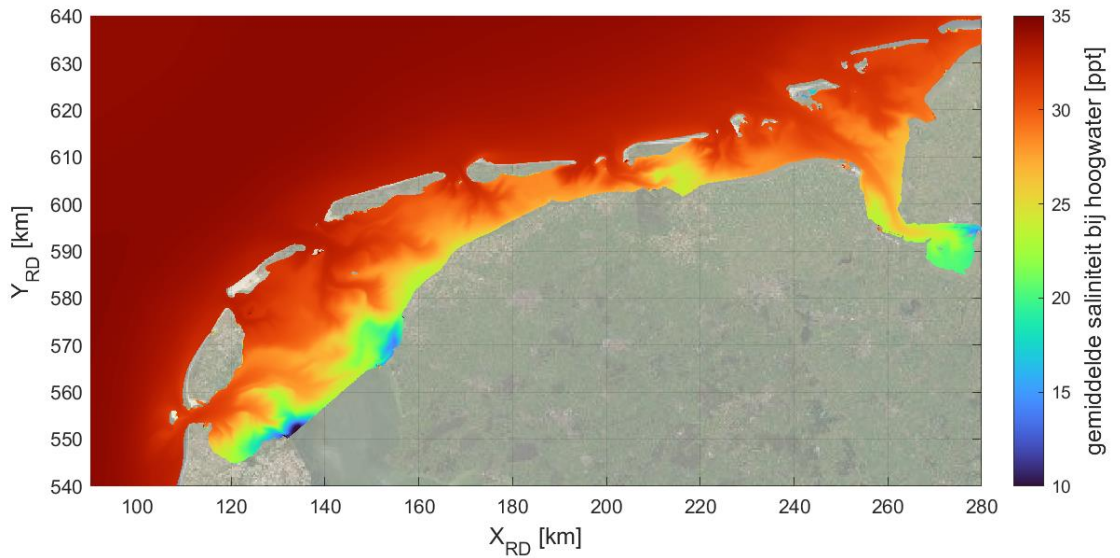


Figuur 3-3 Zoetwaterafvoer bij Den Oever (boven) en Kornwerderzand (onder). Grize puntjes geven de daggemiddelden, zwarte punten de maandgemiddelden en de rode lijn de jaargemiddelden. Bron: Digitale Systeemrapportage Waddenzee.

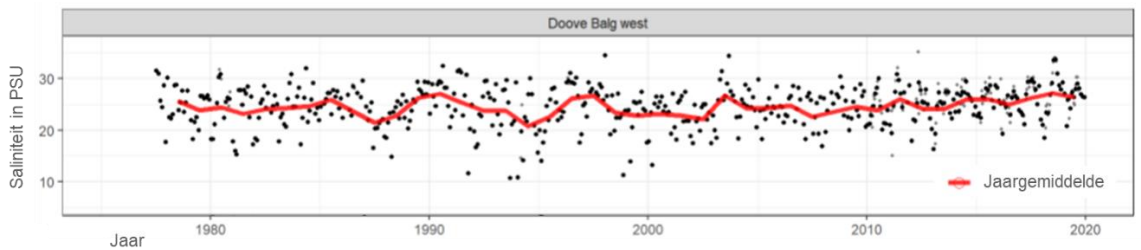
Bij hoge spuidebieten treden korte pulsen van zoetwater uit in de vrij zoute westelijke Waddenzee (Figuur 3-3). Deze kunnen als zoetwaterbellen aan het oppervlak blijven drijven en zich met het getij verplaatsen langs de kust. Over het algemeen, is bij lagere spuidebieten het mixen voldoende om een situatie te verkrijgen met isohalienen (waarden van gelijk zoutgehalte) evenwijdig aan de Afsluitdijk, met uitstulpingen bij de spuisluizen in de Afsluitdijk (Figuur 3-4).

In het kader van de Monitoring Waterstaatskundige Toestand Des Lands (MWTL) wordt tweewekelijks tot maandelijks de saliniteit gemeten op verschillende punten in het kombergingsgebied van het Marsdiep. Op de NIOZ steiger, nabij het zeegat, is een continu meetpunt. Op het MWTL-punt Marsdiep Noord bedraagt de saliniteit gemiddeld zo'n 27 ppt en bij Doove Balg West zo'n 25 ppt. De meetreeks, met de maandgemiddelde en jaargemiddelde waarden zijn weergegeven in Figuur 3-5. Voor de andere tijdseries en de exacte locatie van de MWTL-meetpunten wordt verwezen naar de Digitale Systeemrapportage. Bij de NIOZ steiger varieert de saliniteit grofweg tussen de 22 en 32 ppt. Met het dagelijks getij kan de saliniteit met zeker 5 ppt variëren, afhankelijk van het seizoen en de getijcyclus is dit iets meer of minder (Zijl et al. 2023). De kaart van de berekende variatie in de saliniteit in Figuur 3-6 geeft inzicht in de ruimtelijk variatie, die het grootst is rond de spuilocaties Den Oever en Kornwerderzand. Op enkele kleine gebieden na blijven de zoutgehalten boven 20 promille, een belangrijke ecologische grenswaarde voor veel Waddenzeeorganismen (Oost et al. 2002, 2003). Een deel van het zoete water wordt afgevoerd via het kombergingsgebied Vlie, nadat het over het wantijgebied is getransporteerd.

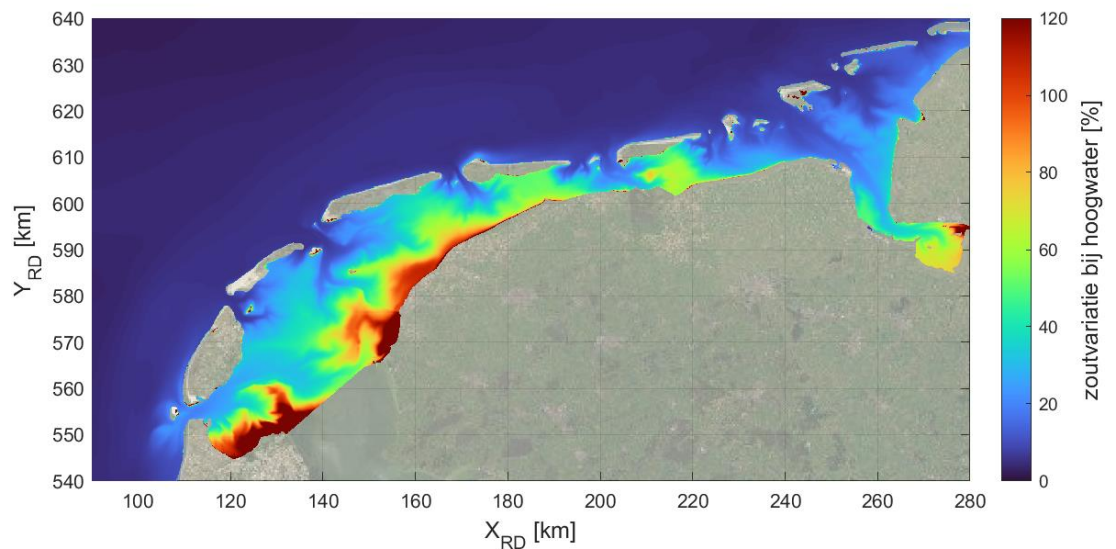




Figuur 3-4 Kaart van de berekende gemiddelde saliniteit bij hoogwater in 2019. Basislaag voor de ecotopenkaart. Bron: Digitale Systeemrapportage Wadden.



Figuur 3-5 Jaargemiddelde saliniteit in het Marsdiep (rode lijn) op meetlocatie Doove Balg west. Ook de maandgemiddelden (zwarte punten) en individuele metingen (kleinste grijze punten) zijn weergegeven. De jaargemiddelde waarde is alleen berekend bij meer dan 10 metingen per jaar. Bron: Digitale Systeemrapportage Wadden.



Figuur 3-6 Kaart van de variatie in gemiddelde saliniteit bij hoogwater (2019) afkomstig uit modelberekeningen gebruikt voor de Ecotopenkaart, bepaald als  $[(4 \times \text{standaarddeviatie}) / \text{gemiddelde zoutgehalte}] \times 100\%$ . Bron: Digitale Systeemrapportage Wadden.

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 wordt aan de bodem gecompenseerd door een stroming de andere kant op. Dit is een fenomeen dat bij de spuisluizen in de Afsluitdijk regelmatig kan ontstaan en invloed heeft op de stroming tot in het Zeegat van het Marsdiep (Elias 2006; Buijsman & Ridderinkhof, 2007) en bij Harlingen (Schulz & Gerkema, 2018).

### 3.4 Stroomsnelheden en debieten

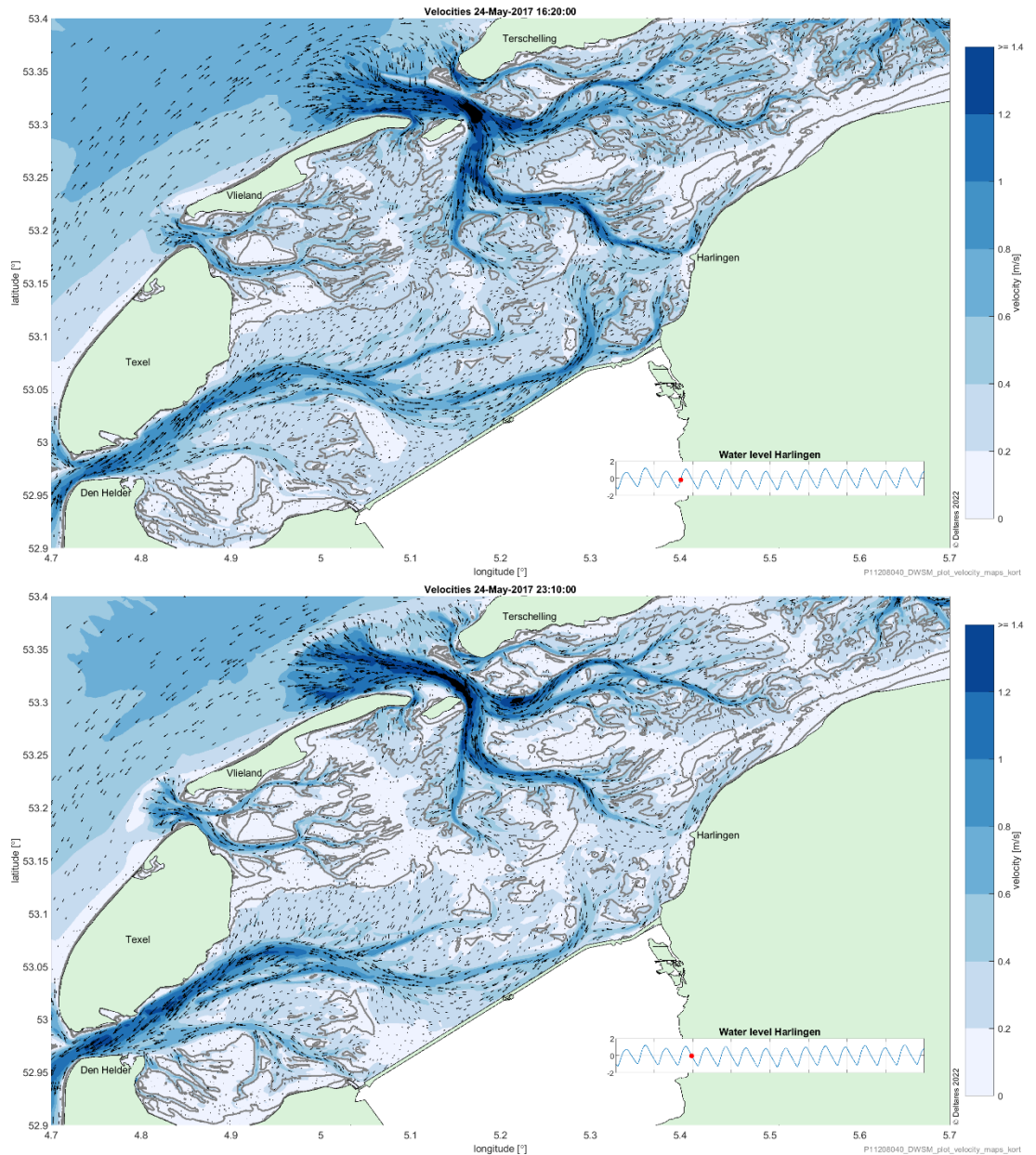
In het verleden zijn verschillende debietmetingen uitgevoerd in het zeegat (De Reus en Lieshout, 1982; Blok en Mol, 2001). Deze metingen zijn gebaseerd op 13-uurs metingen, waarbij de meting dan omgerekend is naar een gemiddeld debiet. Op basis van de metingen kan geconcludeerd worden dat het gemiddelde debiet varieert tussen de 0 en -200 miljoen m<sup>3</sup>/getij (export). Op basis van de NIOZ Ferry metingen, Ridderinkhof et al (2002) geven als schatting een residueel vloed-dominant debiet van 115 miljoen m<sup>3</sup>/getij.

Jaren	Debiet (miljoen m <sup>3</sup> )	
	Ebb	Vloed
1938	944	1081
1966	1052	1101
1974	896	1092
1975	953	1045
1981	910	1049
1997	904	948
2001	1010	1115

Figuur 3-7 geeft een overzicht van de stroming bij vloed en eb in de westelijke Waddenzee. Het getijvolume kan worden berekend door de oppervlakte van ~700 km<sup>2</sup> (Tabel 2.1) van het kombergingsgebied te vermenigvuldigen met een gemiddelde getijslag van 1,65 m en van dat watervolume het sedimentvolume af te trekken van het intergetijdengebied van 60 miljoen m<sup>3</sup> (bron: Digitale Systeemrapportage Wadden). Op basis van deze berekening bedraagt het getijvolume ongeveer 1.095 miljoen m<sup>3</sup>. Met de correctie van Van Veen (1950) voor de getijvoortplanting, bedraagt het getijprisma ~990 miljoen m<sup>3</sup>. Dit komt overeen met de waarde uit Duran-Matute et al. (2014). In Grasmeijer et al. (2022) is het getijvolume van het Marsdiep met modelberekeningen bepaald voor 2015 op 1.070 miljoen m<sup>3</sup>/getij voor vloed en 1.010 miljoen m<sup>3</sup>/getij voor eb. Dezelfde modelberekeningen (Grasmeijer et al. 2022) geven een piekvloeddebiet door het Zeegat van het Marsdiep van 75.000 m<sup>3</sup>/s en een piekebbebiet van 66.000 m<sup>3</sup>/s.

De reststroming is sterk afhankelijk van de windcondities (Duran-Matute, 2014), en bedraagt in Grasmeijer et al. (2022) ca. 40 miljard m<sup>3</sup>/j naar buiten via het Zeegat van het Marsdiep en evenveel netto instroom via het Vlie. Dit grootschalige reststromingspatroon wordt aangedreven door het verschil in getijslag tussen de zeegaten van het Marsdiep en het Vlie en door de vorm en diepte van de bekkens. Dit effect is belangrijker dan het faseverschil tussen de stroming door de zeegaten (Ridderinkhof, 1990). Indien alleen de getijstroming wordt beschouwd, is er sprake van een transport van water van het kombergingsgebied Vlie naar het kombergingsgebied Marsdiep. Tijdens stormen vanuit het westen en zuidwesten draait het stromingspatroon om en komt een stroming van het kombergingsgebied Marsdiep naar het kombergingsgebied Vlie op gang. Van der Molen et al. (2022) vonden een afname van de

residuele uitstroming door het zeegat van Texel over tijd (sinds 1998), die mogelijk gekoppeld is aan de toename van de stratificatie op de Noordzee als gevolg van de opwarming van de aarde. Als deze trend doorzet, zou een netto instroom via het zeegat van Texel kunnen ontstaan, met nog onbekende effecten op de zoutverdeling en de ecologie.



Figuur 3-7 Voorbeeld van berekende dieptegemiddelde stroomsnelheden tijdens vloed (boven) en tijdens eb (onder). Het model bevat de bodemhoogte van 2015. Zie de volgende YouTube link voor de bijbehorende animatie: <https://youtu.be/onE3vZ8eUlc>. Overgenomen uit Grasmeyer et al. (2022).).

## 4 Langjarige morfologische ontwikkelingen

In dit hoofdstuk wordt een beknopt overzicht gegeven van de langjarige morfologische ontwikkelingen van de westelijke Waddenzee. In bijlage B is een uitgebreidere beschrijving beschikbaar.

### 4.1 Ontstaan westelijke Waddenzee door openbreken Marsdiep en Zuiderzee

Het Marsdiep (zeegat, buitendelta en kombergingsgebied) is een relatief jong systeem in vergelijking met het Vlie en de zeearmen en bekkens van de oostelijke Waddenzee. Voor aanleg van de Afsluitdijk strekte het kombergingsgebied zich ver oostelijk uit (de voormalige Zuiderzee). Door aanleg van de afsluitdijk (1925-1932) ontstaat dan een relatief diep gelegen Marsdiep kombergingsgebied. Deze 'overdiepte' is nog steeds duidelijk zichtbaar en bepalend voor de morfologie. Dit verklaart ook het relatief beperkte areaal intergeijde wadplaten (Tabel 2.1) en de aanwezigheid van grote gebieden met permanent onder water liggende platen (Hoofdstuk 7).

De belangrijkste gebeurtenissen die de geometrie, de morfologie en het functioneren van de westelijke Waddenzee tot op de dag van vandaag bepalen zijn:

1. Het snel uitbreiden van Marsdiep en Zuiderzeegebied door het verdwijnen van de veengebieden tussen circa 1100 en 1500.
2. De bedijkingsgeschiedenis van het gebied.
3. De aanleg van de Afsluitdijk.

In alle gevallen speelde de mens een doorslaggevende rol.

#### 4.1.1 Voor en tijdens de Middeleeuwen

De configuratie van het westelijke deel van de Waddenzee is vrij recent ontstaan, waarschijnlijk tijdens de Middeleeuwen. Het westelijke Waddenzeegebied en een groot deel van het huidige IJsselmeergebied waren tot die tijd deels veengebieden, die tijdens het openbreken zijn geërodeerd. Dit maakt het moeilijk te reconstrueren hoe het gebied er oorspronkelijk uitzag en hoe en wanneer de veranderingen zich voltrokken hebben. De laatste jaren is meer informatie aan het licht gekomen over de waarschijnlijke configuratie. In Bijlage B wordt hierop in meer detail ingegaan.

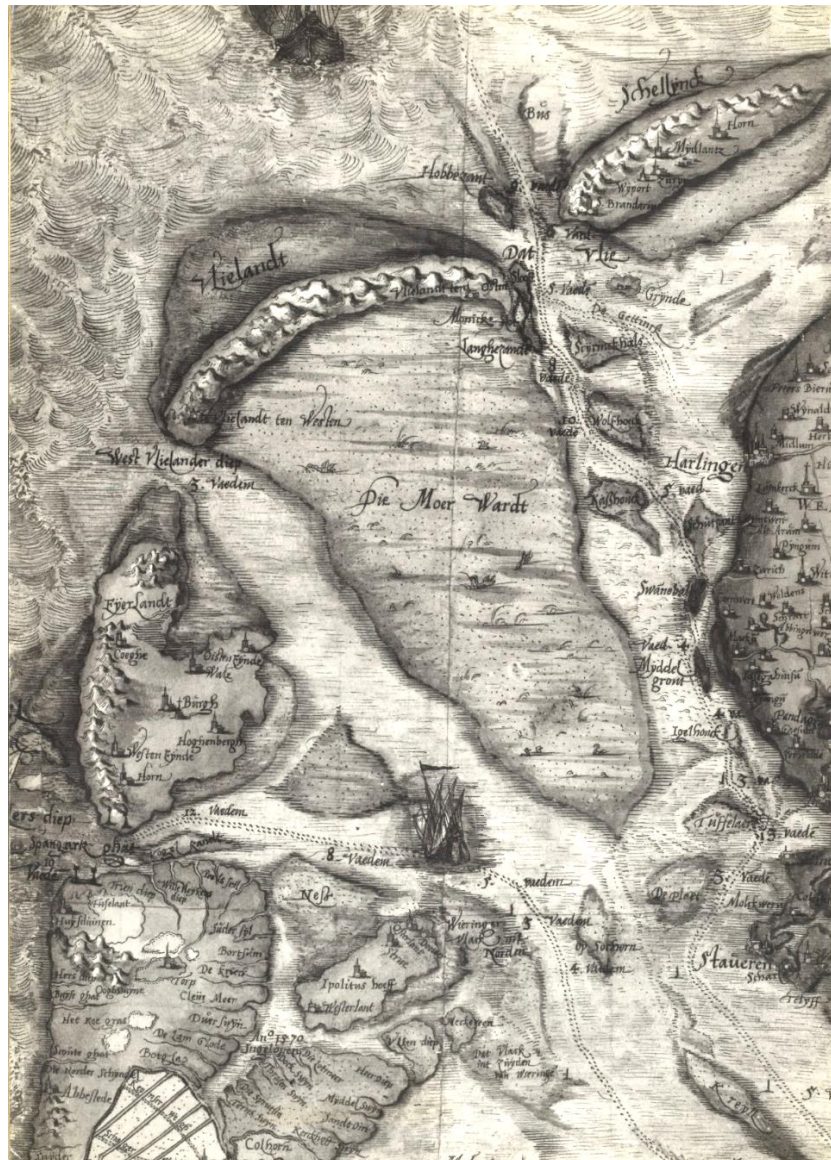
Tot ca. 1100 verzorgde het Vlie hoogstwaarschijnlijk de drainage van het Aelmeer, een zoetwatermeer gelegen op de plek van de latere Zuiderzee. Toen stak de kust van Noord-Holland ver zeewaarts uit (tot max. 10 km verder dan tegenwoordig). Het Marsdiep was toen slechts een veenstroompje richting kust (en werd toen waarschijnlijk Moerasdiep genoemd). De uitgebreide veengebieden achter de kust waren deels bewoond. Om die bewoning en akkerbouw mogelijk te maken werd gedraineerd, wat leidde tot het klinken van het veen. Er werd ook veen gewonnen. Dit maakte het gebied kwetsbaar voor overstromingen en erosie.

#### 4.1.2 Vanaf 1100 tot de 20<sup>e</sup> eeuw

Toen er erosie van de kust optrad, waarbij de invloed van de zee op het Marsdiep geleidelijk groter werd en oostwaarts uitbreidde (periode 1100-1300), bleek die kwetsbaarheid. Het drainagegebied van het Vlie werd deels overgenomen door het Marsdiep-systeem (Figuur 4-1). De omvang van het Marsdiep nam verder toe als gevolg van afbraak van veengebieden. Het Marsdiep-Vlie-Zuiderzee-systeem ontstond, dat een heel groot areaal sublitoraal had. Dat



betekent dat al voordat de Afsluitdijk werd afgesloten het aantal en areaal van droogvallende wadplaten klein was in vergelijking met andere kombergingsgebieden. Bodemonsters maken duidelijk dat voor de afsluiting van de Zuiderzee weinig sediment tot afzetting kwam in het gebied (Ente, 1987). Ridderinkhof (2016) suggereert dat het Marsdiep voor de afsluiting sediment exporterend kan zijn geweest.



Figuur 4-1 Gedeelte van de kaart *Phrisia occidentalis et Waterlandia* uit de handgetekende atlas van Christianus Sgrooten, ca. 1573. Kopie uit Rijkswaterstaat, 1935.

## 4.2 De afsluiting van de Zuiderzee

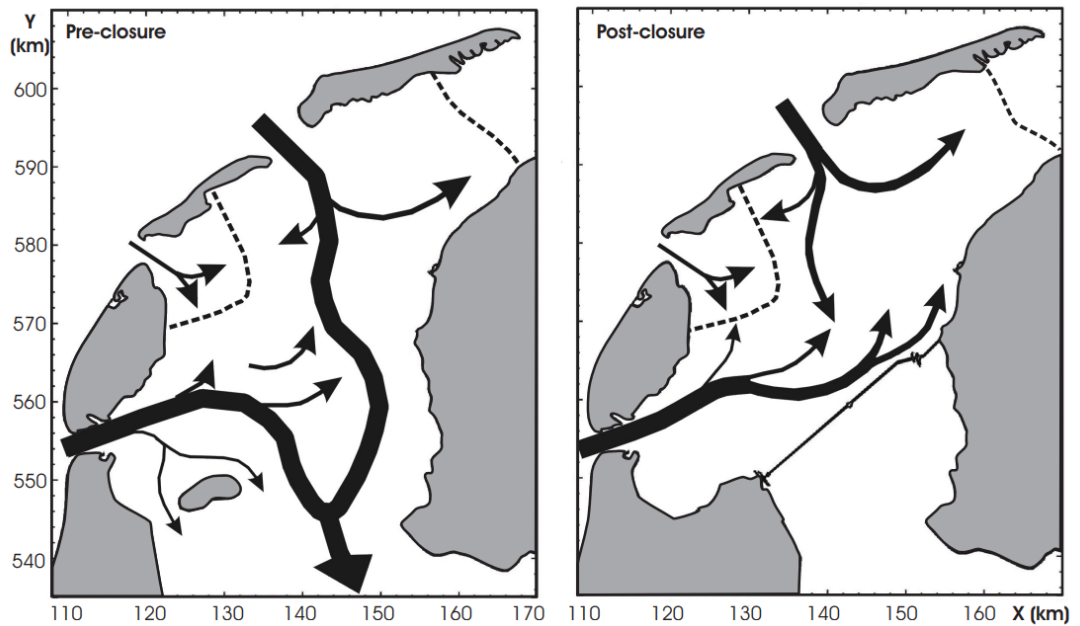
### 4.2.1 De afsluiting en het effect op het getij

In 1932 was de afsluiting van de Zuiderzee voltooid. Hiervoor waren twee dijken aangelegd:

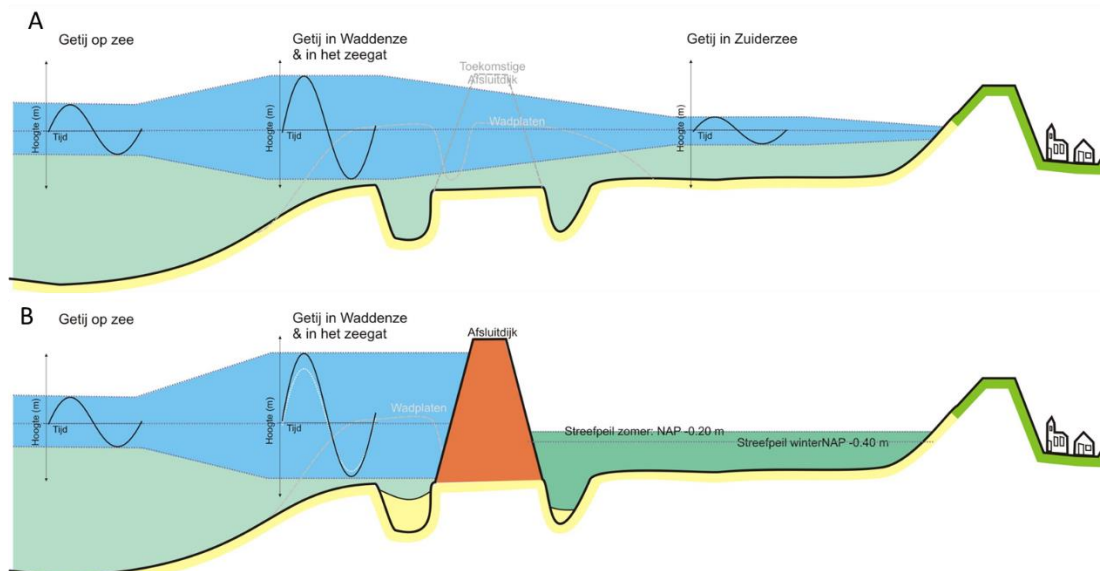
- De Amsteldiepdijk van Noord-Holland naar Wieringen (2,5 km), aangelegd tussen 1920 en 1925. Deze dijk scheidde het Amsteldiep van de Zuiderzee. Het achterliggende land werd deels ingepolderd.
- De Afsluitdijk van Wieringen naar Friesland (32 km), aangelegd tussen 1927 en 1932. Deze dijk sloot meerdere geulen af, van west naar oost het Gaatje, het Naauw, de Vlieter (een hoofdgeul), de Javaruggen en de Middelgronden (een hoofdgeul).



Voor de afsluiting was de oppervlakte van het kombergingsgebied Marsdiep ~4000 km<sup>2</sup>, en de lengte ~130 km. Na afsluiting was het oppervlak gereduceerd tot ongeveer 712 km<sup>2</sup> en de lengte ca. 30 km. Dit leidde tot een sterke verandering van de getijkarakteristieken. De getijgolf veranderde van een lopende getijgolf naar een golf met een meer stand karakter. Ook de getijstrooming naar en uit de zeegaten Marsdiep en Vlie veranderde, zoals schematisch is weergegeven in Figuur 4-2. Door de resonantie, reflectie en de verminderde wrijving (grotere diepte overgebleven deel) nam de getijslag toe (Figuur 3-1, Figuur 3-2; Tabel 4.1; Rietveld, 1962; Thijsse, 1972; ) en dat is schematisch weergegeven in Figuur 4-3. Door de combinatie van veranderingen nam het getijprisma van het Marsdiep met ca. een kwart toe Ook trad er een faseverschuiving op tussen de getijden in de Noordzee en die in het zeegat (Vroom et al. 2012).



Figuur 4-2 Schematische weergave van de getijndringing in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee vóór (links) en na (rechts) de afsluiting van de Zuiderzee (Elias et al., 2003; naar Thijsse, 1972).



Figuur 4-3 Schematische dwarsdoorsnede door de Zuiderzee (A) en de huidige Waddenzee en het IJsselmeer (B).

Tabel 4.1 Getijdekaracteristieken voor en na de afsluiting volgens "SLOTG2" (voor uitleg zie Van Malde 1984). Getallen gebaseerd op Doekes (1985).

	Hoogwater in cm NAP		Laagwater in cm NAP		Getijslag in cm		Verandering getijslag in %
	voor	na	voor	na	voor	na	
<b>Den Helder</b>	39	47	-78	-87	118	133	13%
<b>Harlingen</b>	62	78	-66	-100	128	178	39%
<b>West-Terschelling</b>	67	71	-97	-97	164	168	2%

#### 4.2.2 De ontwikkeling van het wantij

Het wantij is de zone waar de watermassa's die door de zeegaten naar binnen stromen elkaar ontmoeten (van Straaten, 1964). Dit is het hydrodynamische wantij. Omdat de ligging van de plek waar de stromingen uit de twee zeegaten elkaar ontmoeten per getij varieert en mede afhankelijk is van de optredende getij-, wind- en golfcondities is het hydrodynamische wantij een zone of gebied en geen scherpe grens. De stroomsnelheden zijn doorgaans laag, waardoor zich een uitgestrekt plaatgebied kan ontwikkelen, waar ook relatief veel fijn sediment wordt afgezet. Het morfologische wantij wordt gevormd door de ondiepste gebieden tussen de kombergingsgebieden, die meestal niet doorsneden worden door geulen. Het morfologische wantij in de situatie van 2021 is aangegeven in Figuur 2-1. Bij de overgang van het Eierlandse gat naar het Marsdiep komt het hydrodynamische wantij vrijwel overeen met het morfologische wantij.

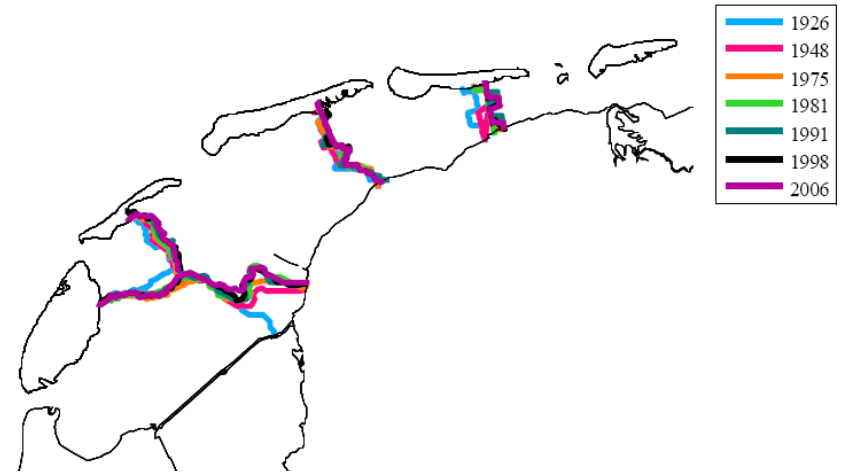
Het wantij tussen het Marsdiep en het Vlie heeft een ander karakter, omdat beide kombergingsgebieden worden verbonden door geulen en het sublitoraal. Daardoor is er een relatief grote uitwisseling van water en sediment tussen de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie, in vergelijking met uitwisseling tussen andere kombergingsgebieden (zie o.m. Elias et al., 2012; Elias & Vermaas, 2018; Elias, 2019). Studies naar de waterbeweging laten een grote uitwisseling van water zien tussen de beide kombergingsgebieden (Ridderinkhof, 1990; Vroom, 2011; Wang et al., 2013; Duran-Matute et al., 2014; Grasmeijer et al., 2022). Op de grens van beide kombergingsgebieden liggen sublitorale gebieden, en er lopen geulen over het wantij (o.a. Boontjes, Molenrak, Zuidoostrak, Scheurrak). Deze elementen stammen nog van de situatie van vóór de afsluiting en zorgen nog voor extra uitwisseling van water 'achterlangs'. Dit wantij heeft vanwege de historie een wezenlijk ander karakter dan dat van de andere kombergingsgebieden, waar zulke geulen ontbreken.

De ligging van het wantij is bepalend voor de oppervlakte van kombergingsgebieden. Verschuivingen erin hebben niet alleen invloed op de oppervlakte van de kombergingsgebieden, maar ook op het getijprisma en de evenwichtsdoorsnedes van geulen in het bekken. Omdat de waarnemingen en modelberekeningen over de ontwikkelingen van de wantijen verschillen is het trekken van een eensluidende conclusie over de ligging en het functioneren van het wantij lastig. Dit betekent dat bij analyses waarbij de ligging van de kombergingsgrenzen een rol speelt, zoals het bepalen van volume- en areaalveranderingen een (arbitraire) keuze voor de positie van het wantij gemaakt dient te worden.

Eind 19<sup>e</sup> eeuw liepen de geulen vanaf het Marsdiep en het Vlie de Zuiderzee in (Figuur 4-4). De ligging van de (hydrodynamische of morfologische) wantijen in de afgelopen eeuw is in verschillende studies steeds anders getrokken (Eysink 1979; Werkgroep I, 1981; Eysink & Biegel, 1992; Kragtwijk 2004; Hoeksema et al. 2004; Van Geer 2007; Vroom 2011; Wang et al. 2013). Echter uit de meeste studies volgt een verschuiving van het wantij tussen Marsdiep en Vlie naar het noordoosten na aanleg van de Afsluitdijk, vooral in de periode direct aansluitend op de aanleg (Figuur 4-5). Het kombergingsgebied Marsdiep nam daardoor in oppervlakte toe ten koste van het kombergingsgebied Vlie.



Figuur 4-4 Historische topografische kaart uit de periode 1883 (J. Swart, 1883) van de kombergingengebieden Marsdiep, Eierlandse Gat en Vlie. De rode lijn geeft het morfologische wantij aan tussen Marsdiep en Vlie gebaseerd op geulpatronen en het ondiepste punt.



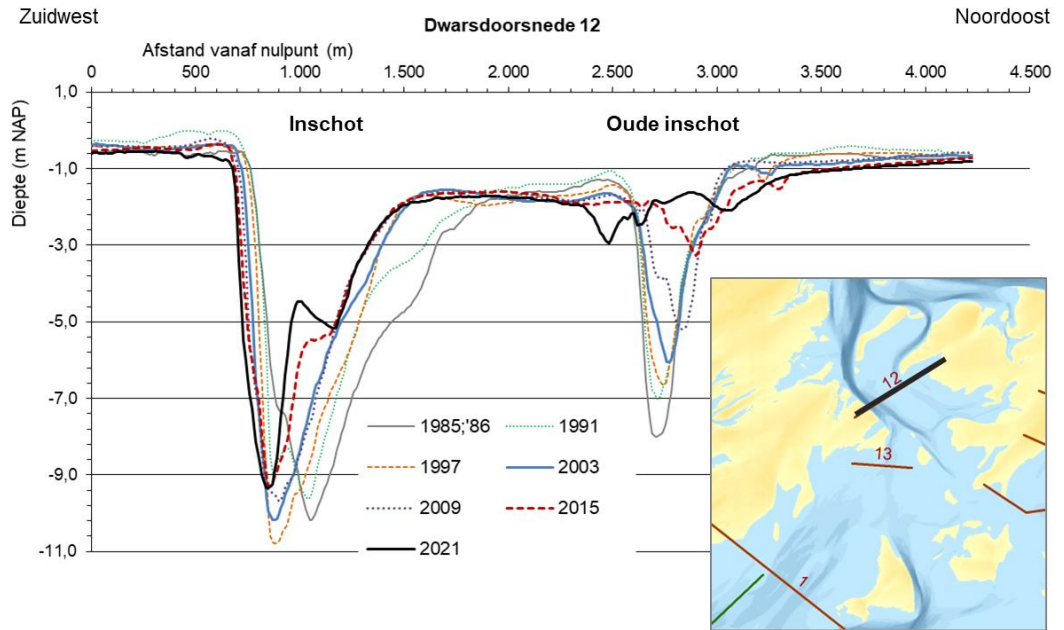
Figuur 4-5 Berekende hydrodynamische wantijen op basis van bodemliggingen uit verschillende jaren (Van Geer 2007).

Door te kijken naar de omvang (de oppervlaktes van dwarsdoorsnedes) van de getijgeulen die gebieden verbinden (Cleveringa & Grasmeyer, 2010) kan het verschuiven van het wantij ook bestudeerd worden. Zij laten zien dat de verhouding tussen de Doove Balg en de Blauwe Slenk een duidelijke verschuiving laat zien. In 1933 had de Doove Balg, de hoofdgeul in het Marsdiep een omvang van 70% ten opzichte van de Blauwe Slenk, de hoofdgeul in het Vlie. In 1950 waren de geuldoorsnedes aangepast, waarbij beide geulen even groot waren geworden. Een

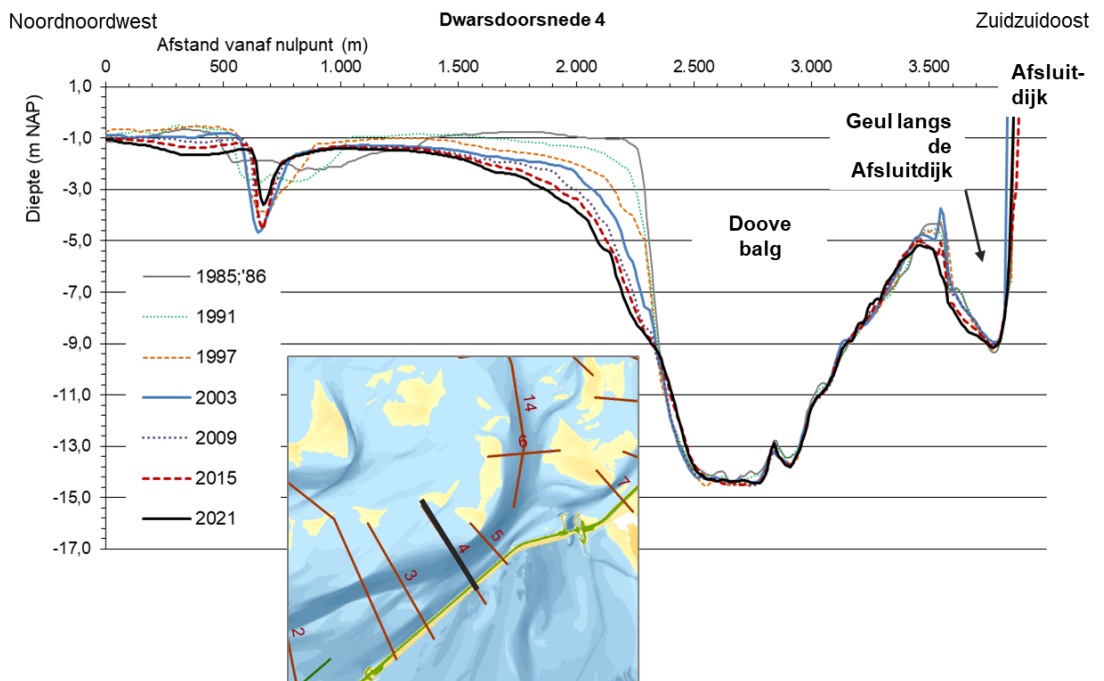


verandering wijst erop dat de invloed vanuit het Marsdiep is toegenomen ten opzichte van het Vlie. Deze toename stopt na 1950 en dat wekt de suggestie dat daarna de ligging van het wantij relatief stabiel is geweest.

Het belang van de verschillende geulen in de nabijheid van het wantij verandert wel nog na 1950, tot op de dag van vandaag. De omvang van de verbinding van het Vlie met het Marsdiep via het Inschot en de parallel daaraan lopende oude Inschot is afgenomen. Dit is zichtbaar in de dwarsdoorsnede van de geulen in Figuur 4-6. De omvang van de Doove Balg neemt juist toe, zoals zichtbaar is in de dwarsdoorsnede in Figuur 4-7. De trendmatige afname van Inschot en Oude Inschot lijkt te worden opgevangen door de toename van de Doove Balg.



Figuur 4-6 Dwarsdoorsnede 12 van de geulen Inschot en Oude Inschot (zie inzet voor locatie).



Figuur 4-7 Dwarsdoorsnede 4 van de geul Doove balg (zie inzet voor locatie).

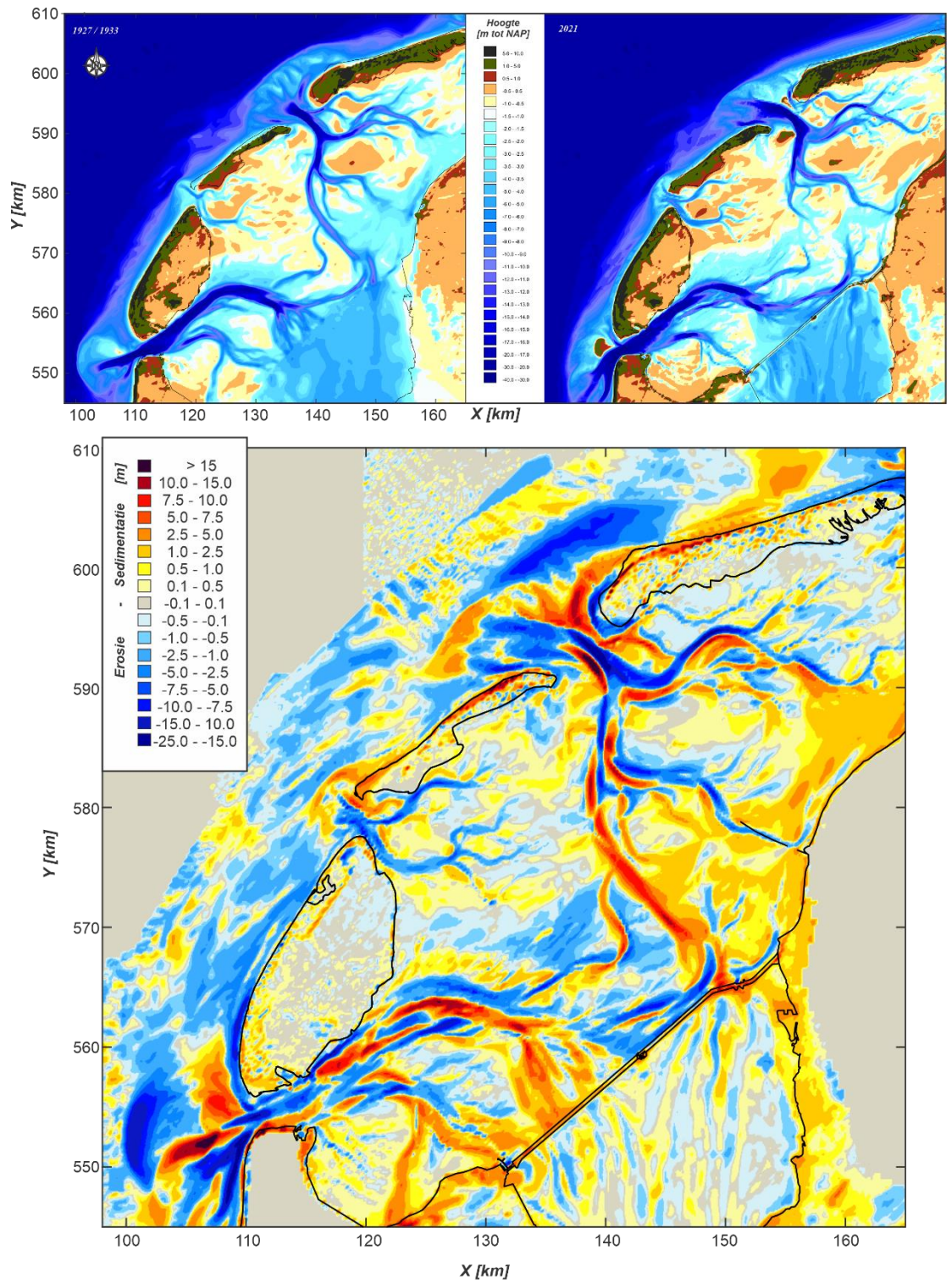
### 4.2.3 Morfologische veranderingen na afsluiting

De veranderde getijkarakteristieken en getijvoortplanting, de aangepaste bekkengeometrie en het afsluiten van de hoofdgeulen hadden grootte aanzanding in het bekken tot het gevolg (zie Figuur 4-8). De grootste veranderingen vonden plaats langs de afsluitdijk, waar de afgesloten geulen (zoals Vlieter, Vliestroom en Texelstroom) sterk aanzanden doordat hier de stromingen tot bijna nul reduceerden. Langs het oostelijke gedeelte van de afsluitdijk vond voornamelijk erosie plaats doordat de geul Doove Balg zich in oostelijke richting heroriënteerde en uitbreide. Het in oostelijke richting vergroten van het kombergingsgebied van het Marsdiep lijkt ook nu nog plaats te vinden (Oost and Kleine Punte, 2003).

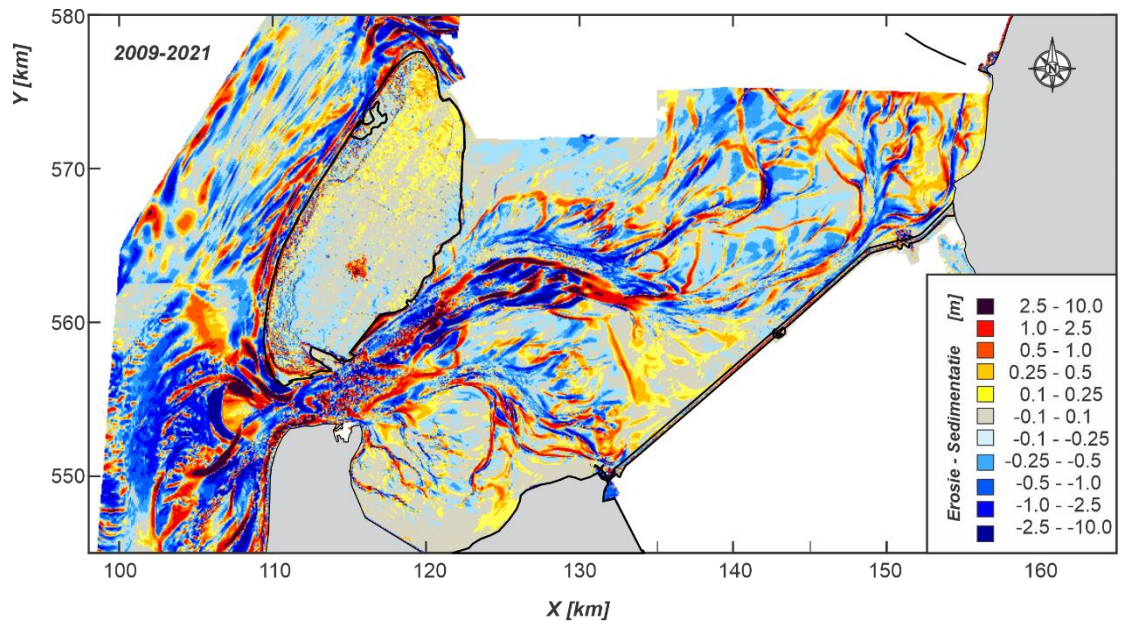
Wat opvalt, is de relatief stabiele positie van Texelstroom. Zelfs na afsluiting van de Zuiderzee bleef de noordoost-zuidwest oriëntatie behouden. Waarschijnlijk komt dit door de aanwezigheid van erosie-resistente lagen en de kustverdediging aan de zuid-oostzijde van Texel. Analyse van literatuur en boorkernen (TNO-NITG, ongepubliceerde data) geeft aan wat de zeewaartse zijde van Texelstroom geflankeerd wordt door een 'glacial till' wat de stabiliteit en positie bepaald. Daarnaast hebben ook de vele oeverbeschermingsconstructies langs de zuidoost kust van Texel aan de stabiliteit bijgedragen (Schoorl, 1973).

Recentelijk zijn de bodemveranderingen kleiner (Figuur 4-9). De grootste bodemhoogte veranderingen treden op rondt de geulen. Deze zijn vaak gerelateerd aan verplaatsing van de geul. Sedimentatie domineert nog steeds op de Op de Lutjeswaard en Javaruggen en ook op het Kornwerderzand zijn grote sedimentatiegebieden aanwezig. Erosie domineert in het gebied tussen de Doove Balg en het bekken van het Vlie. Tussen de





Figuur 4-8 Bodemkaarten voor 1933 en 2021 (boven) en verschil in bodemligging tussen 1933 en 2021 (onder).



Figuur 4-9 Erosie (blauw) en sedimentatie (rood) tussen 2009 en 2021.

## 5 Sediment- en watervolumes en arealen

Voor het beheer van de Waddenzee is het belangrijk hoe de morfologie ontwikkelt en een van de indicatoren daarvoor is de verandering van de sedimentvoorraad in relatie tot het watervolume (kombergingsvolume). Ook voor het beheer van de Noordzeekust is de het sedimentvolume van de Waddenzee van wezenlijk belang, omdat het zand dat in de Waddenzee wordt afgezet afkomstig is van de kust. De hoeveelheid zand naar de Waddenzee wordt getransporteerd is een belangrijke factor bij het vaststellen van zandtekorten in het kustfundament. Een sedimentbalans geeft de geaggregeerde erosie- en sedimentatievolumes voor de gehele Waddenzee, per bekken of per kleiner deelgebied. De trends geven inzicht in hoeverre een gebied op de langere termijn netto sedimenteert of erodeert. Het sedimentvolume van het kombergingsgebied Marsdiep wordt besproken in §5.1. Voor de toegankelijkheid van de havens zijn de ontwikkelingen van de geulen van belang. De ontwikkeling van het watervolume van de geulen hangt samen met de ontwikkeling van de arealen en het sedimentvolume van het intergetijdengebied, omdat dat de ontwikkeling van het kombergingsvolume bepaalt. Hiertoe wordt gekeken naar de deze ontwikkelingen in relatie tot het watervolume van de geulen voor een aantal deelgebieden. Hierbij wordt gekeken naar de veranderingen in de waterstanden, omdat deze veranderingen ook gevolgen hebben voor het kombergingsvolume. De resultaten van deze analyses worden gepresenteerd in §5.2.

### 5.1 Sedimentvolume

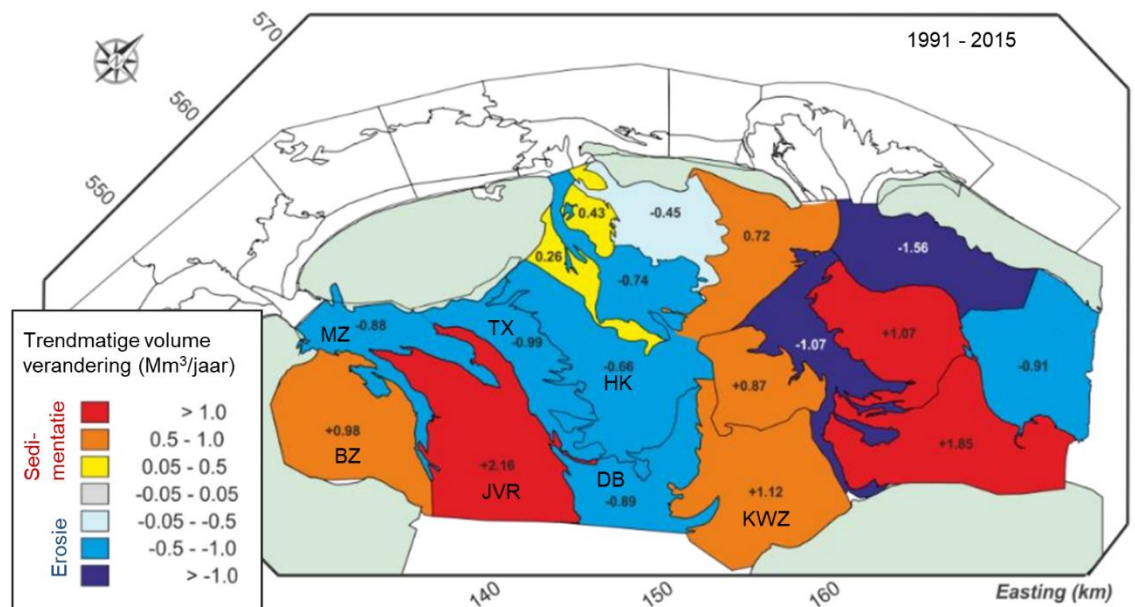
Over de ontwikkeling van het sedimentvolume van de Waddenzee is in het verleden al veel gerapporteerd (Werkgroep 1, 1981; Glim et al. 1987; Hoeksema et al. 2004; Elias et al. 2012; Nederhoff et al. 2017; Smits & Nederhoff 2018; Elias 2019; Colina Alonso 2020). Deze analyses laten zien dat zeer veel sedimentatie heeft plaatsgevonden in de kombergingsgebieden. Ze geven ook aan dat door de afsluiting van de Zuiderzee de westelijke Waddenzee sterk van karakter is veranderd. Recente studies maken onderscheid tussen zand en slib. Zand wordt vanaf de kustzone geïmporteerd in de Waddenzee, en dit verlies wordt veelal met zandsuppleties aangevuld. Slib wordt niet vanaf de Hollandse kust, maar van verder aangevoerd. De hoeveelheid slib die in de trilaterale Waddenzee wordt afgezet, lijkt ongeveer even groot te zijn als de hoeveelheid die naar Den Helder wordt aangevoerd (Oost et al. 2020). Veranderingen in slibsedimentatie in een kombergingsgebied kunnen effect hebben op andere kombergingsgebieden.

Smits & Nederhoff (2018) maakten een volumebalans op mesoschaal van de westelijke Waddenzee om de ontwikkeling van volume en hoogte per deelgebied in kaart te brengen. Hierbij schatten ze het slibpercentage in de bodem van de westelijke Waddenzee op basis van de Sedimentatlas tussen de 13% en 29%. Zij constateren dat het merendeel van de geulen in de westelijke Waddenzee sedimenteert, met uitzondering van het Malzwin. In de geulen komen zij tot een slibpercentage in de bodem tussen de 7 en 22%. Zij observeren dat bij platen die sedimenteren het sediment bestaat uit grote hoeveelheden slib, terwijl bij platen die eroderen het sediment in mindere mate slibrijk materiaal bevat.

Elias (2019) maakt een schatting van de volumeveranderingen over de lange termijn en voor een kortere termijn en gaat daarbij uit van een nieuwe indeling in deelgebieden die overwegende sedimentatie en erosie vertonen, die daardoor meer consistente trends opleveren. De volumeverandering wordt vervolgens op basis van een lineaire trendlijn (over de een representatieve periode) bepaald. Deze methode geeft een aanzienlijk verschil met de 'klassieke' volumeberekeningen (bijv. Elias et al. 2012). De reden hiervoor is vooral dat

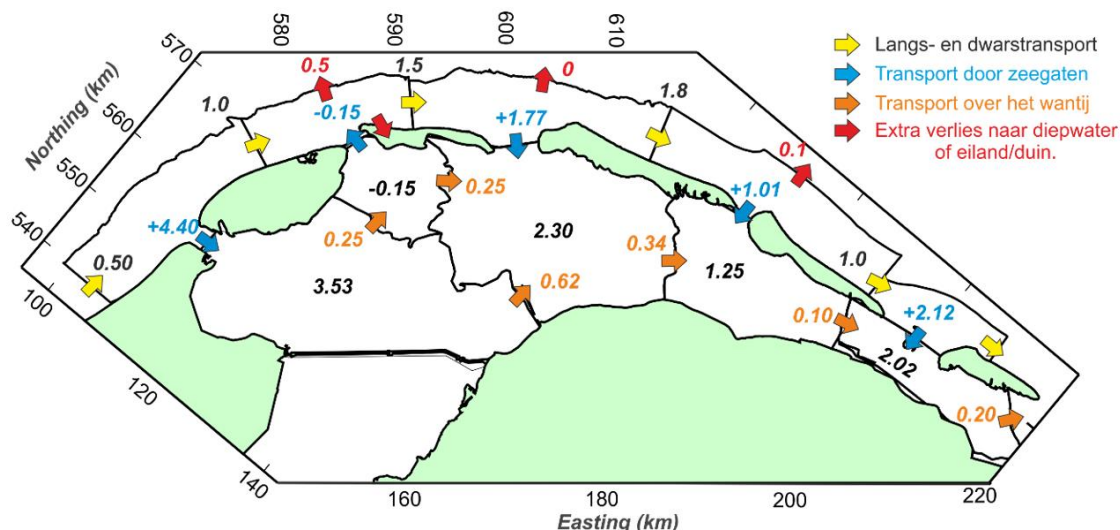


meetfouten, uitschieters in de volumes, minder doorwegen in de resultaten. De ontwikkelingen in de gebruikte deelgebieden over de meest recente periode die is beschouwd door Elias (2019) zijn weergegeven in Figuur 5-1. Door het kleurgebruik is direct zichtbaar dat in één aantal deelgebieden in het kombergingsgebied Marsdiep sprake is van relatief veel sedimentatie, namelijk in het gebied dat de Javaruggen en de Lutjeswaard (JVR in Figuur 5-1) omvat. Andere sedimentatiegebieden zijn het Balgzand (BZ) en het gebied dat onder andere de omgeving van de Boontjes, Pollen en het Kornwerderzand omvat (KWZ in Figuur 5-1). Gebieden met erosie omvatten de grote geulen Marsdiep (MZ), Texelstroom (TX) Doove Balg (DB) en het sublitoraal en litoraal van de Vlake van de Kerken (HK in Figuur 5-1).

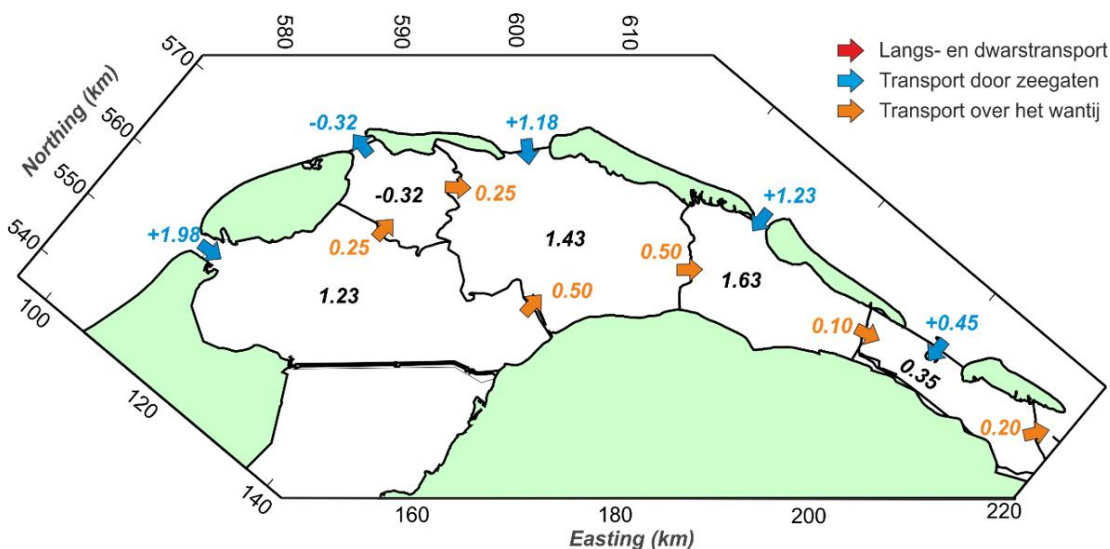


Figuur 5-1 Trends in de sedimentvolumes van de deelgebieden in de westelijke Waddenzee voor de meest recente beschouwde periode (1991-2015). Getallen geven volumeveranderingen in miljoen m<sup>3</sup>/j op basis van een lineaire trendanalyse (Figuur 4.8c uit Elias, 2019)

Via aannamen van de uitwisseling over de wantijen kon door Elias (2019) een schatting gemaakt worden van de import per zeegat. Uit dit zandbalansmodel volgt een import naar het Marsdiep over de lange termijn van 4,4 miljoen m<sup>3</sup>/j (Figuur 5-2) en de periode vanaf 1991 van 2,0 miljoen m<sup>3</sup>/j (Figuur 5-3). De sedimentatie in het bekken van het Marsdiep bedraagt over de lange termijn ruim 3,5 miljoen m<sup>3</sup>/j. Dit is minder dan de import omdat een deel van het sediment verder de Waddenzee in getransporteerd wordt over het wantij. De recente trend laat een veel lagere sedimentatie in het bekken zien, van ruim 1,2 miljoen m<sup>3</sup>/j. De meest plausibele verklaring voor de afname is dat de lange termijn trend (1933-2015) gedomineerd wordt door de eerste decennia na de aanleg van de Afsluitdijk. In deze periode werd veel sediment werd afgezet in oude getijgeulen die doorsneden waren door de Afsluitdijk (Figuur 4-8). De trends passen goed in een denkmodel dat is gestoeld op de aanname dat na een grote verandering (i.c. de afsluiting van de Zuiderzee) de snelheid van de respons direct erna het grootste is en daarna afneemt. Er ontstonden na de afsluiting immers veel gebieden (zoals de geulen die hun functie verloren) waar sedimentatie mogelijk was. In een deel van die gebieden waren de omstandigheden dusdanig rustig dat slibrijk materiaal kon worden afgezet.



Figuur 5-2 Overzicht van het grootschalige zandbalansmodel representatief voor de langetermijn trends (1933-2015), uitwerking op schaal van de zeegaten, gecorrigeerd voor baggeren, verspreiden, bodemdaling en overige winst- en verliesposten. Getallen geven volumeveranderingen in miljoen  $m^3/j$ . (Figuur 7.2d uit Elias, 2019)



Figuur 5-3 Overzicht van het zandbalansmodel representatief voor de huidige trends (1991-2015), uitwerking op schaal van de zeegaten, gecorrigeerd voor baggeren, verspreiden, bodemdaling en overige winst- en verliesposten. Getallen geven volumeveranderingen in miljoen  $m^3/j$ . (Figuur 7.3d uit Elias, 2019)

Colina Alonso (2020) heeft een zand- en slibbalans opgesteld voor de Waddenzee. Ook Colina Alonso (2020) ziet een sterke afname van de sedimentatie over tijd, als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee. Ze beschrijft dat de import van zand sterk is afgenomen sinds de jaren '90, maar dat de slibsedimentatie gestaag doorzet. Voor de westelijke Waddenzee (bekkens van het Marsdiep, Vlie en Eierlandse Gat) is een totale volumeverandering tussen 1933 en 2018 van 350 miljoen  $m^3$  gevonden (4,1 miljoen  $m^3/j$ ). Dit getal is kleiner dan de volumeverandering in de westelijke Waddenzee in Figuur 5-2 (in totaal 5,68 miljoen  $m^3/j$ ), omdat deze getallen gecorrigeerd zijn voor baggeren en verspreiden en bodemdaling én een lineaire trend op deelgebieden is gefit. Van de 4,1 miljoen  $m^3/j$  is ongeveer 1,2 miljoen  $m^3/j$  slib. Bij een uitsplitsing naar deelgebieden werd voor het Balgzand een netto sedimentatie sinds 1933 van 1 m gevonden (waarvan 20 cm slib), voor de Vlieter bijna 2 m (waarvan 70 cm slib) en voor



Kornwerderzand (rondom de Boontjes) bijna 1,5 m (waarvan 20 cm slib). De sedimentatie van slib levert dus een belangrijke bijdrage aan de totale sedimentatie in dit kombergingsgebied.

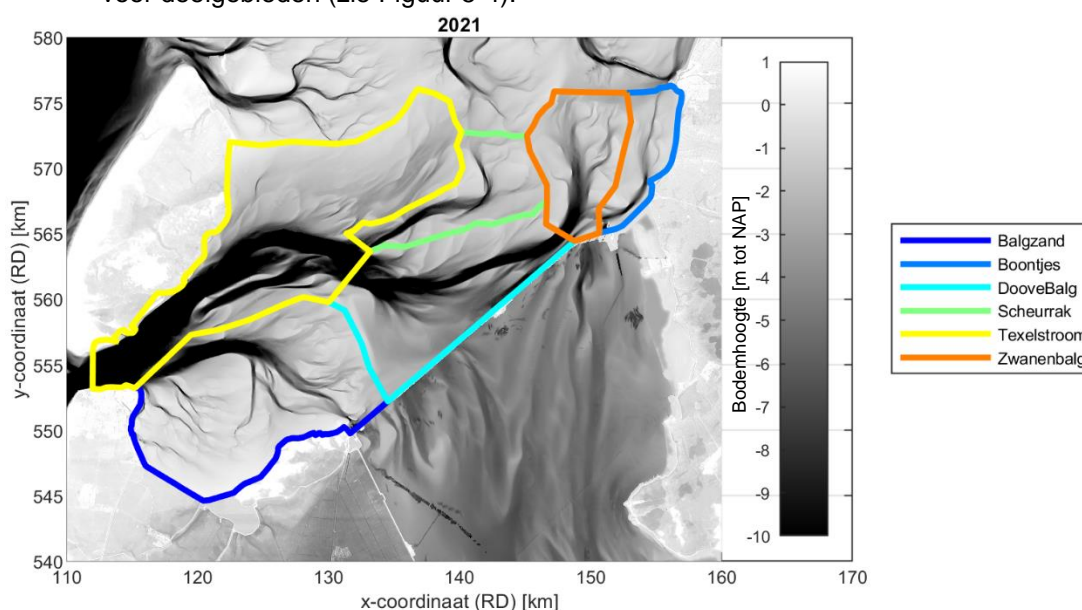
## 5.2 Watervolume en oppervlakte

In de voorgaande paragraaf is alleen gekeken naar de sedimentvolumes, zonder een relatie te leggen met de watervolumes in het bekken. Voor de bevaarbaarheid is de ontwikkeling van het kombergingsvolume boven de platen en het watervolume (onder laagwater) van de geulen van belang. Daarom is aan deze kombergingsrapportage ook een analyse van de watervolumes toegevoegd. Omdat in de Waddenzee zowel de bodemligging als de waterstanden veranderen, is bij deze analyse gekeken naar beide. Dit is de eerste keer dat deze methode wordt toegepast in een kombergingsrapport. Daarom wordt ook gekeken in hoeverre de toegepaste methode gevoelig is voor de gemaakte keuzes.

### Methode

De watervolumes zijn op de volgende manier bepaald:

- Vaststellen grenzen van het kombergingsgebied (over het wantij) en de lokale wantijen voor deelgebieden (zie Figuur 5-4).



Figuur 5-4 Kaart met de gehanteerde begrenzingen van de deelgebieden.

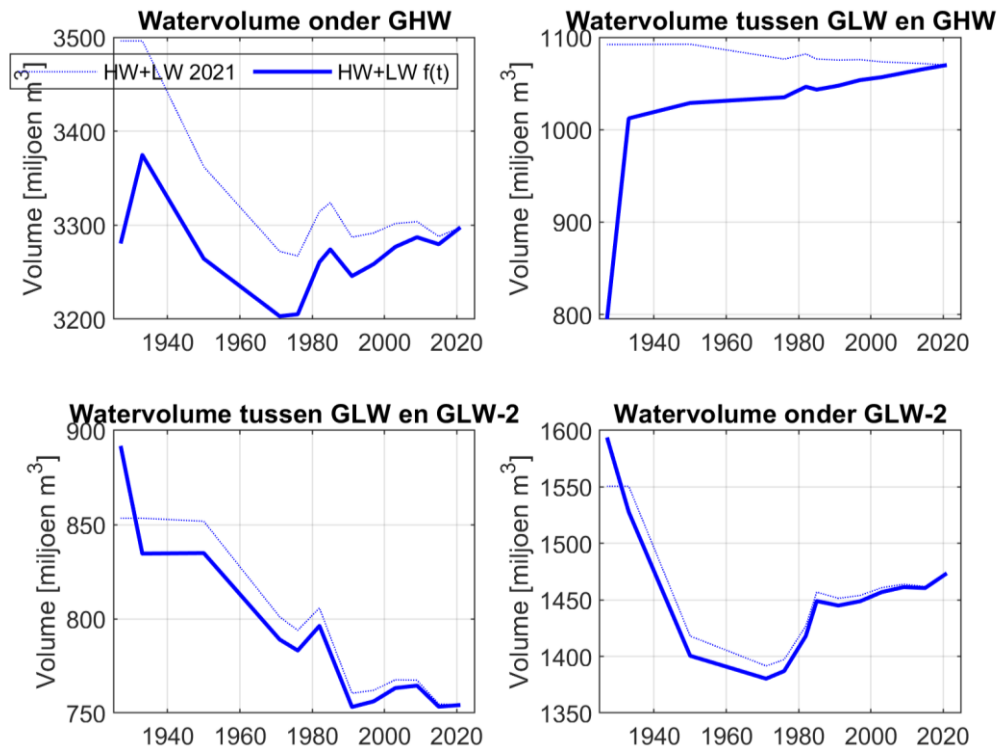
- Vaststellen van de lineaire trends in GHW en GLW voor de stations van Den Helder, Harlingen en West-Terschelling (zie bijlage C). Er is gekozen om voor verschillende periodes een trend te bepalen:
  1. Voor afsluiting (t/m 1925)
  - 2a. Na afsluiting (vanaf 1933 t/m 2021).
  - 2b. Met trendbreuk in 1980 (vanaf 1933 t/m 1979 en vanaf 1980 t/m 2020).
- Er wordt gerekend met een lineaire inter- en extrapolatie over de ruimte van de GHW en GLW niveaus bij Harlingen, West-Terschelling en Den Helder. We realiseren ons dat een driehoeksinterpolatie een vrij grove methode is om de waterstand in het bekken te benaderen, en dat dit met voldoende verfijnde numerieke modellen of interpolatiemethoden beter kan worden benaderd (de Groot & West, 2007; Rappoldt et al., 2020). Echter is dat een te forse inspanning voor de huidige studie.
- Naast de berekeningen met variabele GHW en GLW in de tijd, is er gerekend met de waterniveaus voor het jaar 2021 in combinaties met de bodems uit de verschillende

jaren. Door de ontwikkelingen van de watervolumes met de waterstand uit 2021 te vergelijken met de ontwikkelingen met variabele waterstanden kan het effect van morfologische veranderingen worden geïsoleerd van de veranderingen in waterstanden. De verschillen in beide methodes zijn vooral van belang voor de ontwikkeling van het watervolume tussen GLW en GHW.

- Sommatie van de cellen met een bodemligging in verschillende jaren boven het tijdsvariërende GLW-niveau en onder het GHW niveau vermenigvuldigd met de oppervlakte van de cellen geeft het 'kombergingsvolume'. Hierbij zijn cellen, waar in een van de jaren geen data beschikbaar is, voor alle jaren buiten beschouwing gelaten, zodat verschillen in databeschikbaarheid niet doorwerken in het kombergingsvolume.
- Bodemligging onder het tijdsvariërende GLW niveau geeft het subgetijdenvolume. Voor het Marsdiep is voor het subgetijdenvolume een onderscheid gemaakt in subtidaal plaatgebied en watervoerende geulen op basis van het niveau GLW - 2 m. Op deze manier schuift ook dit niveau door de tijd mee., in plaats van dat bijvoorbeeld een vaste grens van -3 m NAP wordt gehanteerd.

### **Resultaten gevoeligheidsanalyse**

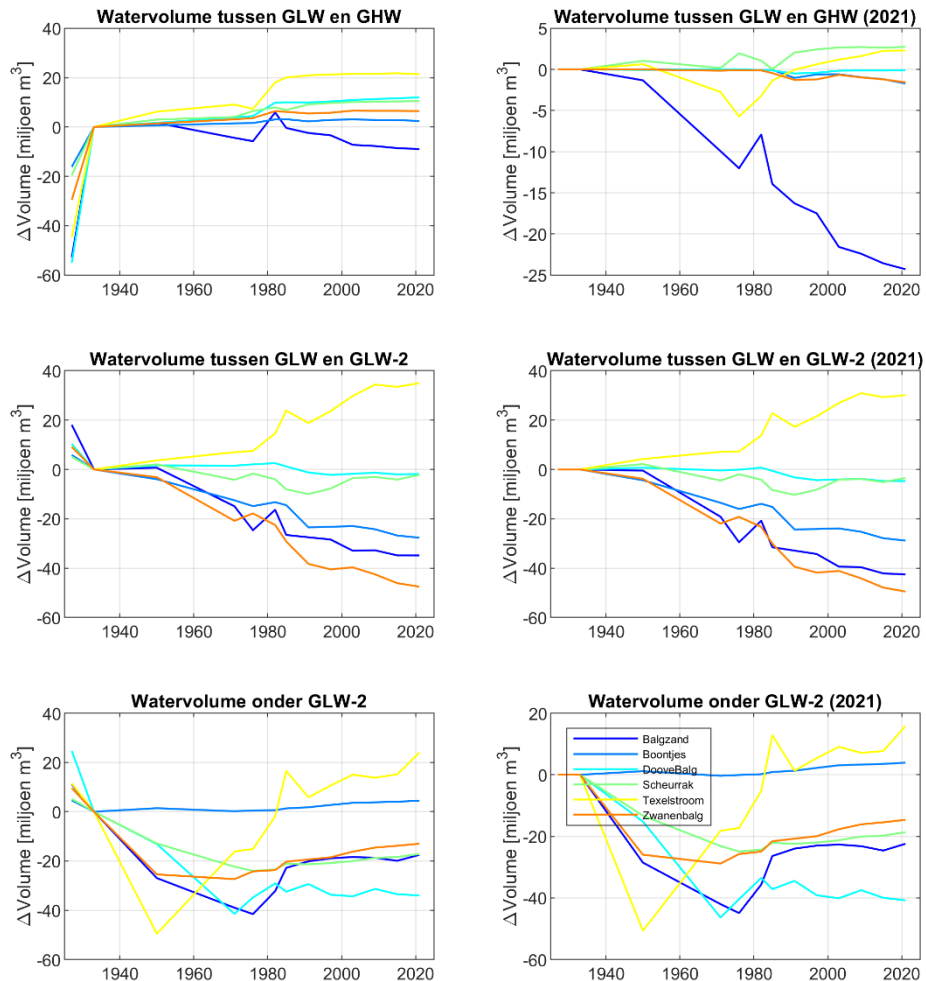
Berekening van het watervolume volgens bovenstaande methode, met trends volgens 1 en 2a, geeft eerst een afname en vervolgens een toename van het geulvolume (volume onder GLW -2 m), zowel met vaste als met variërende waterniveaus (Figuur 5-5). Het watervolume op de subtidaal platen, gelegen tussen GLW en GLW -2 m, neemt af over tijd. Voor het kombergingsvolume (volume tussen GLW en GHW) zien we een afname van het kombergingsvolume indien we met vaste GHW en GLW niveaus rekenen over tijd (dus de GHW en GLW van 2021, zie Figuur 5-5). Indien we rekenen met een lineaire toename in GHW en GLW (1 en 2a), zien we een toename van het kombergingsvolume (die in 1932 groot is als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee). Dit wijst erop dat het van belang is de verandering in GHW en GLW over tijd mee te nemen. Daarom is besloten om de analyse ook nog uit te voeren met een trendbreuk in de waterstanden in 1980 (2b). Na 1980 zien we bij stations Den Helder en West-Terschelling een afname van de getijslag (bijlage C). Als gevolg hiervan zien we sinds de jaren '80 een stabiel watervolume tussen GLW en GHW (bijlage C). De trend in de watervolumes van het subtidaal en geulgebied wijzigen niet door een tweede trendbreuk rond 1980 toe te voegen. In het vervolg van de analyse, waarbij we de trends per deelgebied beschouwen, is gerekend met de tweede trendbreuk in 1980 erbij.



Figuur 5-5 Watervolumes onder GHW (bovenste paneel), tussen GLW en GHW (middelste paneel) en onder GLW (onderste paneel), voor de constante waterstandniveaus (van 2021) in tijd (stippellijn) en variërende waterstandsniveaus door de tijd (doorgetrokken lijn) voor het gehele Marsdiep bekken. In beide gevallen varieert het waterstandsniveau wel over de ruimte.

### Resultaten deelgebieden

De verschillende deelgebieden die zijn getoond in Figuur 5-4, vertonen onderling verschillende trends, die hier per deelgebied worden besproken. De resultaten staan in Figuur 5-6, waarbij de grafieken aan de linkerzijde de ontwikkelingen laten zien met in de tijd variërende waterstanden en de grafieken rechts de situatie met vaste waterstanden (2021) in de tijd. Indien de ontwikkeling links en rechts duidelijk verschilt, zoals bijvoorbeeld voor het Balgzand tussen GLW en GHW, dan is sprake van relatief grote invloed van de veranderingen in de waterstanden. Indien de ontwikkelingen vergelijkbaar zijn, dan is de morfologische ontwikkeling dominant.



Figuur 5-6 Watervolumes tussen GLW en GHW (kombergingsvolume intergetijdengebied, bovenste panelen), tussen GLW en GLW -2 m (sublitoraal, middelste panelen) en onder GLW -2 m (geulen, onderste panelen), voor variërende waterstandsniveaus door de tijd (links) en constante waterstandsniveaus (2021) in tijd (rechts). In beide gevallen varieert het waterstandsniveau wel over de ruimte. Voor de waterstandsniveaus is gerekend met 2 trendbreuken (~1930 en 1980). Veranderingen zijn absoluut ten opzichte van 1933.

Het Balgzand, dat een aanzienlijk aandeel intergetijdengebied heeft, vertoont een afname van het kombergingsvolume over tijd. Deze trend is zowel op de lange als de korte termijn hetzelfde. Veranderingen in het kombergingsvolume van het Balgzand zijn een combinatie van afname van het kombergingsvolume door sedimentatie op het intergetijdengebied en toename van het kombergingsvolume door een toename van de getijslag (GHW stijgt iets sneller dan GLW; zie bijlage C). Het netto effect is dus een afname van het kombergingsvolume. Ook het subtidaal areaal vult op; het watervolume ervan wordt kleiner, en deze trend is voor de lange en korte termijn vergelijkbaar. Het geulvolume is op de lange termijn eerst afgenomen en in de jaren '70 toegenomen, maar is sinds de jaren '80 redelijk stabiel.

De Boontjes en de Zwanenbalg laten sinds de afsluiting sedimentatie in het subtidaal zien. Sinds de jaren '80 is het gebied dermate hoog komen te liggen, dat de sedimentatie ook het intertidaal gebied bereikt en de oppervlakte hiervan toeneemt (Figuur 5-7) en het watervolume ervan afneemt. Voor de jaren '80 nam het watervolume tussen GLW en GHW juist toe. De stijging in de waterstanden kon niet gecompenseerd worden met sedimentatie, omdat er nog geen intergetijdengebied aanwezig was. Het is opvallend dat de Boontjes als enige geul na afsluiting direct een toename van het geulvolume laat zien, terwijl alle andere deelgebieden een afname van het geulvolume vertonen. Recentelijk nemen de geulvolumes

in de deelgebieden Boontjes en Zwanenbalg echter toe. Dit hangt mogelijk samen met het opvullen van het subtidaal gebied.

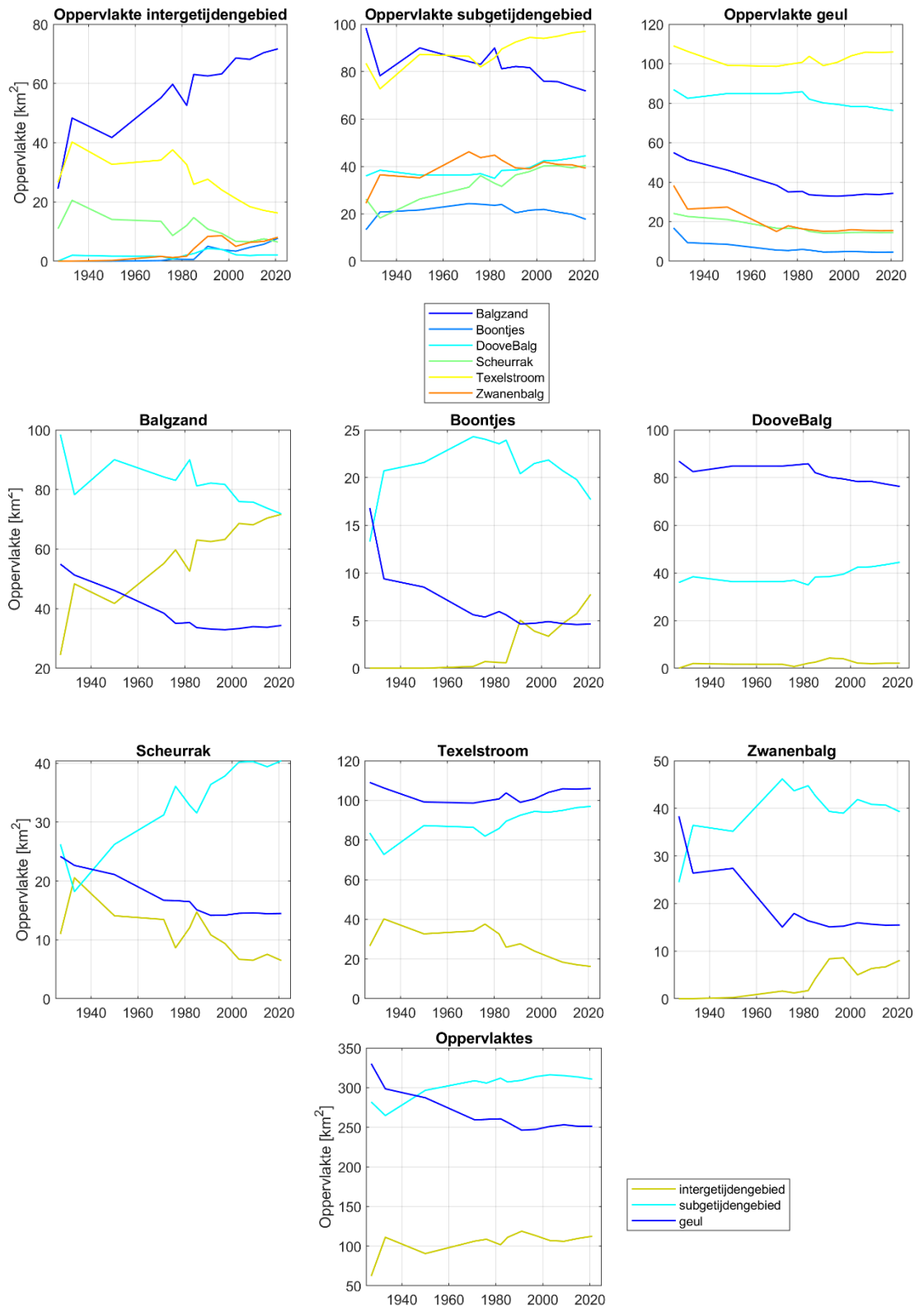
De Texelstroom vertoont een sterk uitruimende trend over alle hoogteliggingen. De geul onderging even sedimentatie als gevolg van de afsluiting, om vervolgens een eroderende trend in te zetten. Er is relatief weinig intergetijdengebied, dat afneemt over tijd. Door het uitruimen van de Texelstroom lijkt ook het Scheurrak zich tegenwoordig vergelijkbaar te gaan gedragen. Waar het geulvolume en subtidaal volume eerst afnam, zien we sinds de jaren '80 juist een toename van deze volumes. Ook het watervolume boven het intergetijdengebied neemt toe, met afname van dit areaal tot gevolg.

De Doove Balg tot slot, is een vrij stabiel gebied. Na afsluiting nam het geulvolume af en het intergetijdenvolume toe, als gevolg van de toename in waterstanden die niet gecompenseerd kon worden door sedimentatie op het intergetijdengebied, omdat dit deelgebied bijna geen intergetijdengebied heeft. De recente trend toont een stabiel geul- en subgetijdenvolume, en een toename van het intergetijdenvolume.

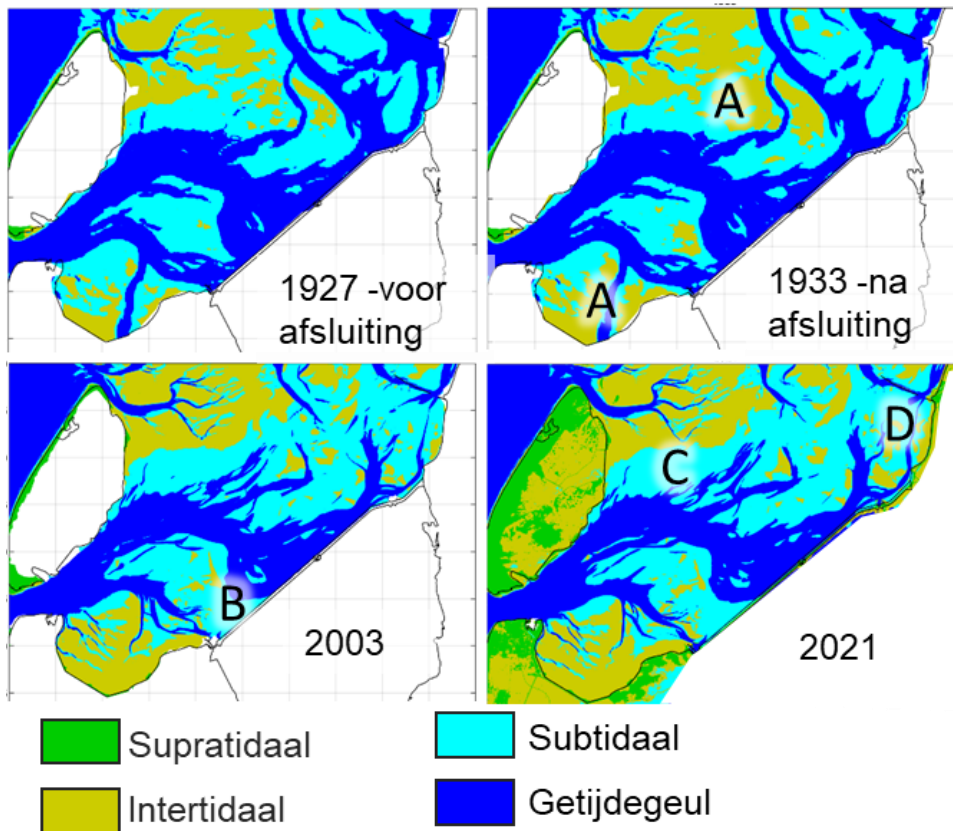
De ontwikkelingen van de arealen getijdegeul, intergetijdegebied (=wadplaat; intertidaal) en subgetijdengebied (= sublitorale platen) uitgaande van in tijd variërende waterstanden is weergegeven in Figuur 5-7. In deze grafieken is zowel de optelsom voor het hele kombergingsgebied opgenomen, als de ontwikkelingen voor de deelgebieden. Voor drie momenten in de tijd na de afsluiting van de Zuiderzee, zijn hiervan de kaarten opgenomen in Figuur 5-8. Daarbij is ook een kaart opgenomen van de situatie voor de afsluiting, op basis van dezelfde bodemhoogte als direct na de afsluiting, maar de waterstanden van 1927. In de grafieken zijn duidelijk de hierboven beschreven verschillen in ontwikkelingen tussen de deelgebieden zichtbaar. In de kaarten is zichtbaar dat:

- Initieel, na afsluiting een toename van het intergetijdengebied optreedt, als gevolg van de toename van de getijslag (A in Figuur 5-8). Gebieden die daarvoor nog in het ondiepe deel van het sublitoraal lagen, zijn daardoor tijdelijk litoraal geworden.
- Sedimentatie optreedt doordat de oude geulen naar de Zuiderzee opgevuld worden met sediment (B in Figuur 5-8);
- Erosie in middengebied (C in Figuur 5-8);
- Sedimentatie langs de randen (D in Figuur 5-8).





Figuur 5-7 Oppervlakte van het intergetijdengebied, subgetijdengebied, geul over tijd voor de verschillende deelpolygoenen (bovenste rij), per deelpolygoon (middelste twee rijen) en voor het gehele Marsdiep bekken (onderste rij), uitgaande van variërende waterstandsniveaus in de tijd en over de ruimte.

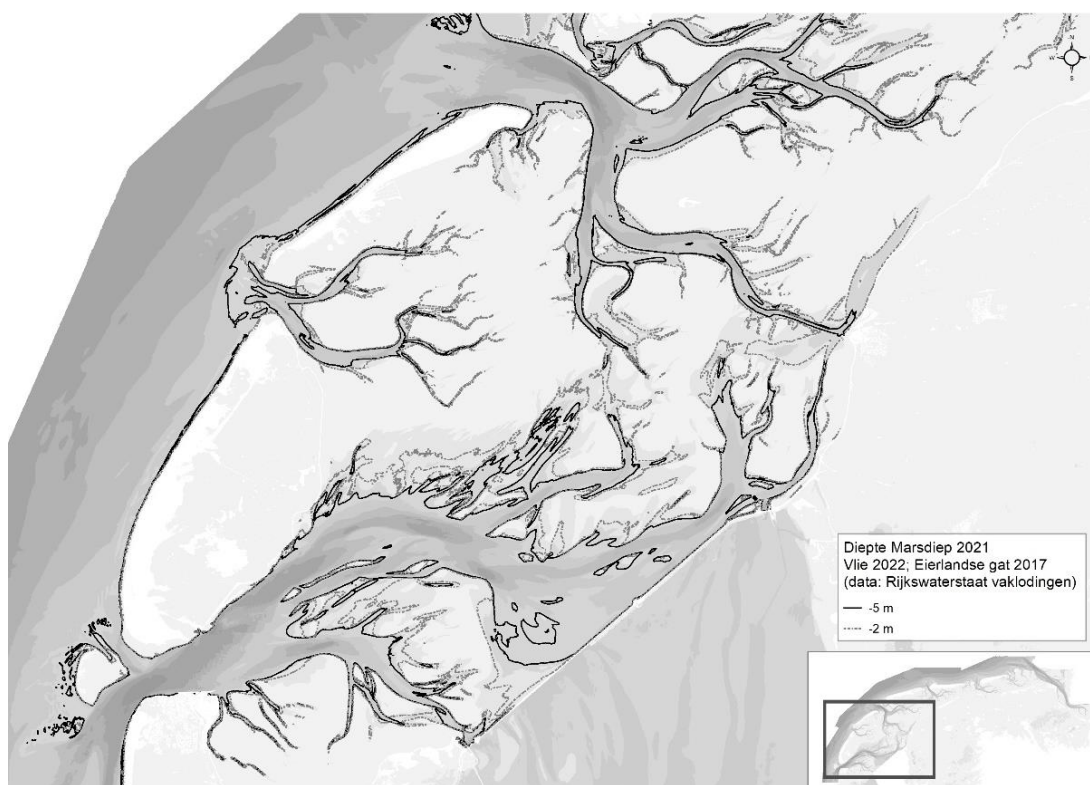


Figuur 5-8 Arealen in de verschillende diepteklassen, waarbij rekening is gehouden met de veranderingen in de bodemligging en gemiddeld hoogwater (GHW) en laagwater (GLW). Supratidaal hoogte  $> GHW$  in het betreffende jaar; intertidaal  $GLW < h < GHW$  in het betreffende jaar; subtidaal  $h < GLW - 2$  in het betreffende jaar en geul  $h < GLW - 2$  in het betreffende jaar. Waterniveaus zijn een driehoeksinterpolatie tussen Den Helder, Harlingen en West-Terschelling. 1927 en 1933 gaan uit van dezelfde bodemligging, maar andere niveaus voor GHW en GLW. Gebruik makend van lineaire trendlijnen door GLW en GHW, met twee trendbreuken (~1930 en 1980).

## 6 Getijgeulen

### 6.1 Inleiding: getij stuurt geulvolume

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, zoals zichtbaar is voor drie kombergingsgebieden in Figuur 6-1. In dit hoofdstuk wordt in paragraaf 6.2 gestart met een beschrijving van de grootste en diepste geul, de Helsdeur, die in het kombergingsgebied Marsdiep en verderop Texelstroom wordt genoemd. In de daaropvolgende paragraaf 6.3 wordt de Doove Balg beschouwd, dit is het vervolg van de Texelstroom verder in het bekken. Daarna wordt in paragraaf 6.4 een aftakking van de Texelstroom beschouwd die Scheurrak en verderop Omdraai wordt genoemd. Vervolgens wordt in paragraaf 6.5 gekeken naar de Boontjes, die aan het landwaartse einde van het kombergingsgebied ligt, in de omgeving die als wantij wordt beschouwd. Ten slotte wordt in paragraaf 6.6 het Visjagersgaatje beschouwd, dit is de geul die tot aan de haven en sluizen bij Den Oever reikt.



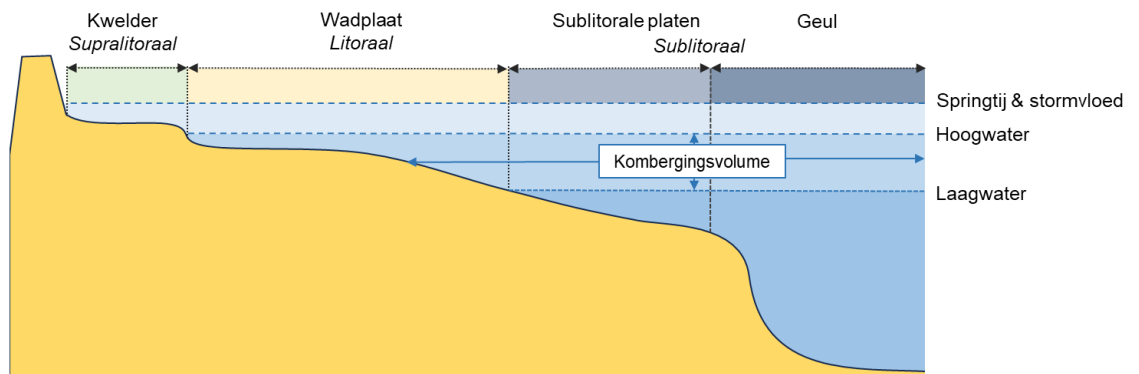
*Figuur 6-1 Dieptecontouren van de NAP -5 en -2 m diepte in de Westelijke Waddenzee (kombergingsgebieden Marsdiep, Eierlandse gat en een groot deel van het Vlie).*

Voorafgaand aan de beschrijving van de individuele geulen volgt hier een algemene inleiding in de kenmerken van het geulenpatroon in het kombergingsgebied van het Marsdiep, zoals zichtbaar is in Figuur 6-1. In vergelijking met het Marsdiep is het vertakkingspatroon veel duidelijker zichtbaar bij het Eierlandse gat en het Vlie, waar elke zijtak en 'zij-zijtak' een steeds kleiner deel van het gebied van water voorziet. Samen vormen de takken en de hoofdgeul een netwerk dat wel iets lijkt op een boom als ervan bovenaf op wordt gekeken (Van Veen, 1950). Voor de geulen in het kombergingsgebied van het Marsdiep verhullen de grote arealen sublitoraal het vertakkende geulenpatroon deels, zoals zichtbaar is in Figuur 6-1. In het

kombergingsgebied van het Marsdiep liggen de -2 m NAP dieptelijnen ook niet overal parallel aan of in het verlengde van de -5 m NAP dieptelijnen, zoals dat bij de kombergingsgebieden Vlie en Eierlandse gat het geval is. Ook dat is het gevolg van de aanwezigheid van het grote areaal aan sublitoraal plaat.

De hoeveelheid water die per getij door een geul stroomt wordt ruwweg<sup>2</sup> bepaald door de oppervlakte van het kombergingsgebied vermenigvuldigd met het getijverschil, minus de oppervlakte van de droogvallende platen, vermenigvuldigd met de hoogteligging van de platen (Figuur 6-2). Minder getijvolume betekent dat de natte doorsnede van de geul ook minder groot hoeft te zijn. Het voorbeeld in Figuur 6-3 van een aantal dwarsdoorsnedes door geulen in het Marsdiep, vanaf de keel van het zeegat tot achterin het kombergingsgebied laat de steeds kleinere geulomvang zien. Door het zeegat gaat het volledige kombergingsvolume van het bekken, terwijl de kleine geul achterin het bekken alleen het lokale kombergingsgebied bedient, waar het watervolume dat wordt geborgen veel kleiner is.

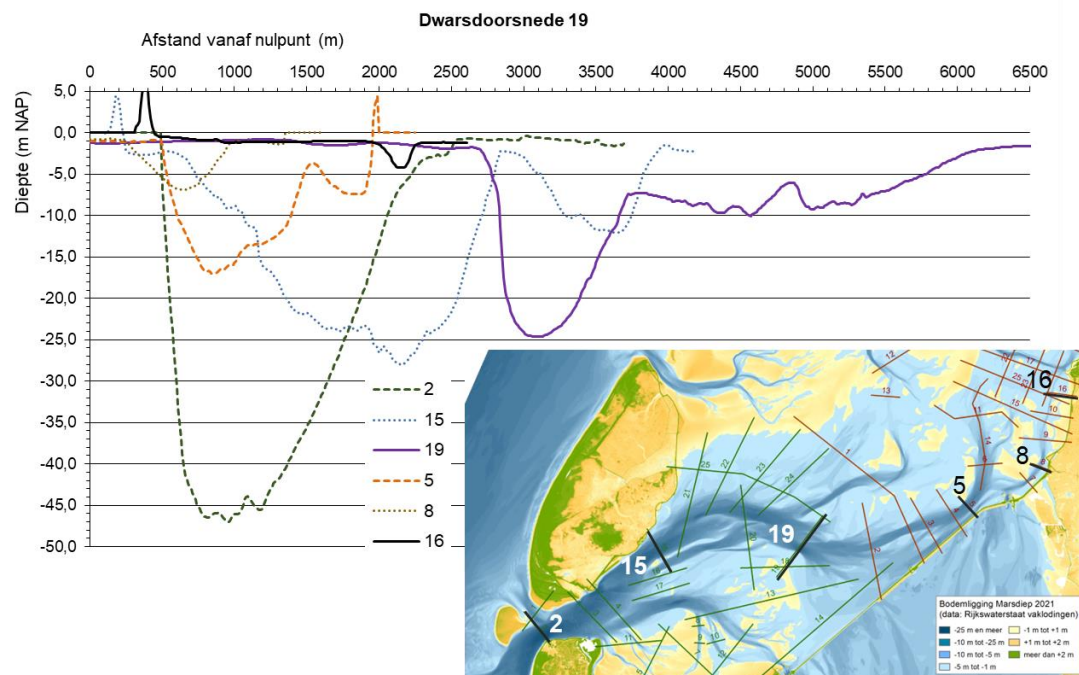
De sublitorale platen in het Marsdiep leveren een relatief grote bijdrage aan het kombergingsvolume in vergelijking met de droogvallende wadplaten, omdat bij de sublitorale wadplaten het volledige waterstandsverschil tussen laag- en hoogwater bijdraagt aan het kombergingsvolume. Bij een droogvallende plaat draagt alleen het hoogteverschil tussen de gemiddelde plaathoogte en het niveau van hoogwater bij aan het kombergingsvolume.



Figuur 6-2 Hoogte van geul, wadplaat en kwelder ten opzichte van het niveau van laag- en hoogwater en het kombergingsvolume (naar LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svašek-Arcadis, 2013a; met toevoeging van de sublitorale platen).

<sup>2</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).

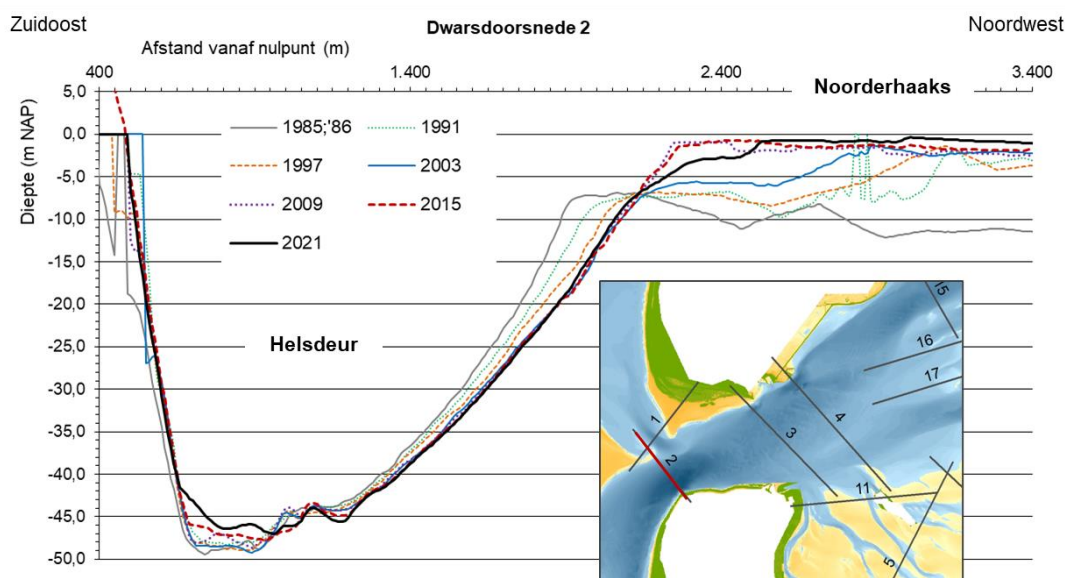




Figuur 6-3 Voorbeeld van de afname van de geulomvang van het zeegat tot verder in het kombergingsgebied.

## 6.2 Helsdeur, Marsdiep en Texelstroom

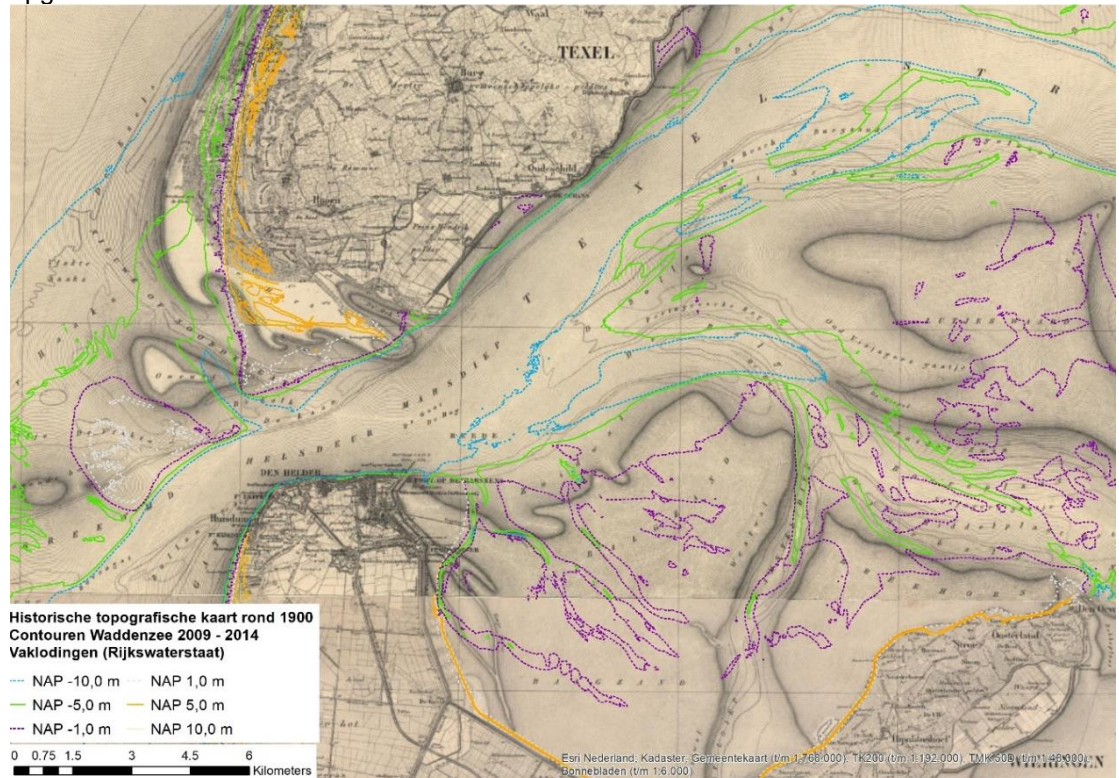
In het smalste deel van het zeegat (de keel) tussen de Kop van Noord-Holland en Texel is sprake van één diep ingesneden geul. In Figuur 6-4 staat een dwarsdoorsnede die door het diepste deel van het zeegat loopt.



Figuur 6-4 Dwarsdoorsnede 2 door het Zeegat van Texel (zie inzet voor locatie).

Op de grote ruimtelijke schaal en de lange tijdschaal van ruim honderd jaar is de ligging van de grote geulen grotendeels gelijk gebleven, zoals zichtbaar is in Figuur 6-5. De grote en snelle verplaatsing van geulen in de Waddenzee vinden niet plaats in dit deel van de Waddenzee.

Op de buitendelta's en bij kleinere geulen in de oostelijke Waddenzee is de dynamiek veel groter. De geulen die vroeger doorliepen tot in de Zuiderzee, zoals de Vlieter, hebben hun functie verloren na de voltooiing van de Afsluitdijk en zijn opgevuld met sediment. Ook een deel van de geulen nabij de waterscheiding tussen kombergingsgebied Marsdiep en Vlie is opgevuld met sediment.



Figuur 6-5 Kaart van de situatie in het kombergingsgebied Marsdiep rond 1900, met de contouren van de geulen en platen in het kombergingsgebied in 2009.

Rond het Marsdiep is op drie plekken sprake van (zeer) diepe delen van de geul met zeer steile oevers. Op deze plekken zijn de oevers bestort en ligt de oever vast. De diepe plekken zijn ontgrondingskuilen en liggen op de volgende locaties:

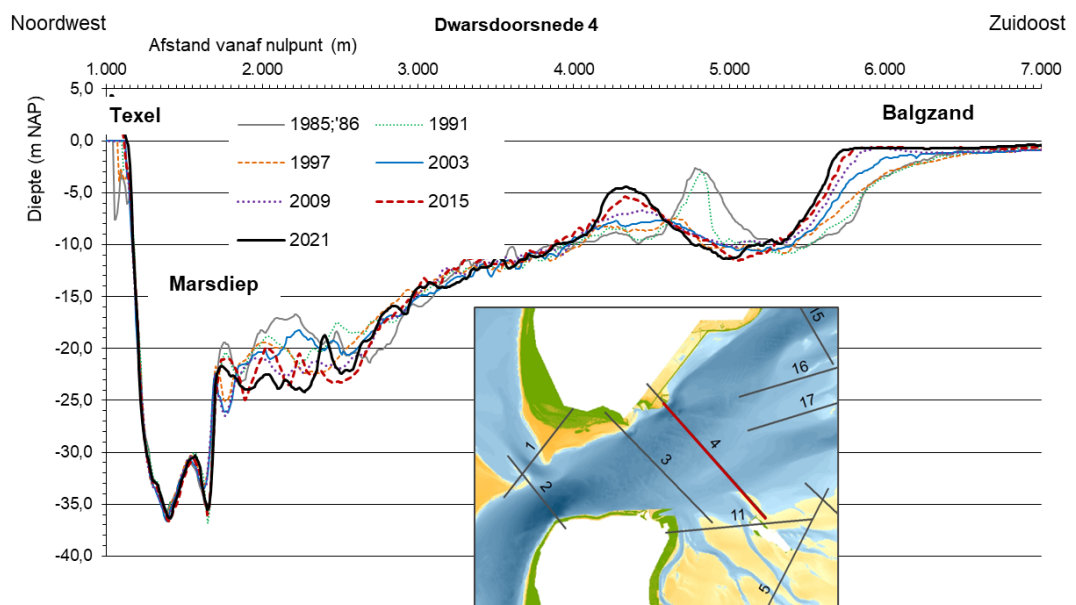
1. Bij Huisduinen, ten westen van Den Helder loopt de Helsdeur, die insnijdt tot bijna 50 m diepte (Figuur 6-4);
2. Bij het 't Horntje en het terrein van het NIOZ loopt de geul tot een diepte van bijna 37,5 m (Figuur 6-6);
3. Aan de oostzijde van de Hors bereikt de bodem een diepte van ruim 37,5 m.

De oorsprong van deze diepe putten is gekoppeld aan de aanwezigheid van de bestortingen. De bestortingen bij Huisduinen zijn al lang geleden gestart (~1700), om Huisduinen en Den Helder te beschermen tegen de naar het zuiden verplaatsende Helsdeur en Marsdiep. De oever is beschermd met de aanleg van stroomhoofden en door het bestorten van de geulwand. Bij het bestorten van de geulwand ontstaat aan de teen en bij de beide uiteinden in langsrichting erosie. Dit noopt tot uitbreiding van de bestortingen. Gaandeweg ontstaat daardoor bij een aangevallen en met stortsteen verdedigde kust een ontgrondingskuil. De Helsdeur is in de laatste eeuwen in toenemende mate geërodeerd, door de zeer hoge maximale stroomsnelheden (tot 2,3 m/s; V&W, 1989).

De twee ontgrondingskuilen aan de Texelse zijde zijn beduidend jonger dan de bestortingen aan de zijde van Noord-Holland. Ter hoogte van 't Horntje zijn in de periode van 1902 tot en met 1970 onderzeese bestortingen aangebracht. De noodzaak tot het uitvoeren van de

bestortingen is waarschijnlijk toegenomen na de afsluiting van de Zuiderzee, omdat in de periode daarna de waterbeweging in het bekken is gewijzigd en de vorm van het zeegat is veranderd. Daarbij heeft een rotatie plaatsgevonden van zowel de Texelstroom, die ten koste is gegaan van de oever van Texel, als van de geulen op de buitendelta, die extra druk op de kust bij Huisduinen heeft opgeleverd (Battjes 1961; Joustra 1971; Sha 1990; Elias & Van der Spek, 2006; 2017).

De ontwikkeling van deze ontgrondingen is nauwlettend gevolgd en gedocumenteerd (Beckerling Vinkers 1951; Rijkswaterstaat 1957) en wordt ook tegenwoordig nog goed in de gaten gehouden door het Waterschap Hollands Noorderkwartier, dat verantwoordelijk is voor de instandhouding van de waterkering. Beckerling Vinkers (1951) toont via kaarten uit 1911 en 1942 aan dat de verdieping in de tussenliggende periode heeft plaatsgevonden. Na 1942 is de betonnen dam aan de zuidzijde van de stuifdijk langs de Mokbaai door een oeverval verdwenen (Van Bendegom, 1949). Na 1970 zijn deze veranderingen veel minder groot geworden.

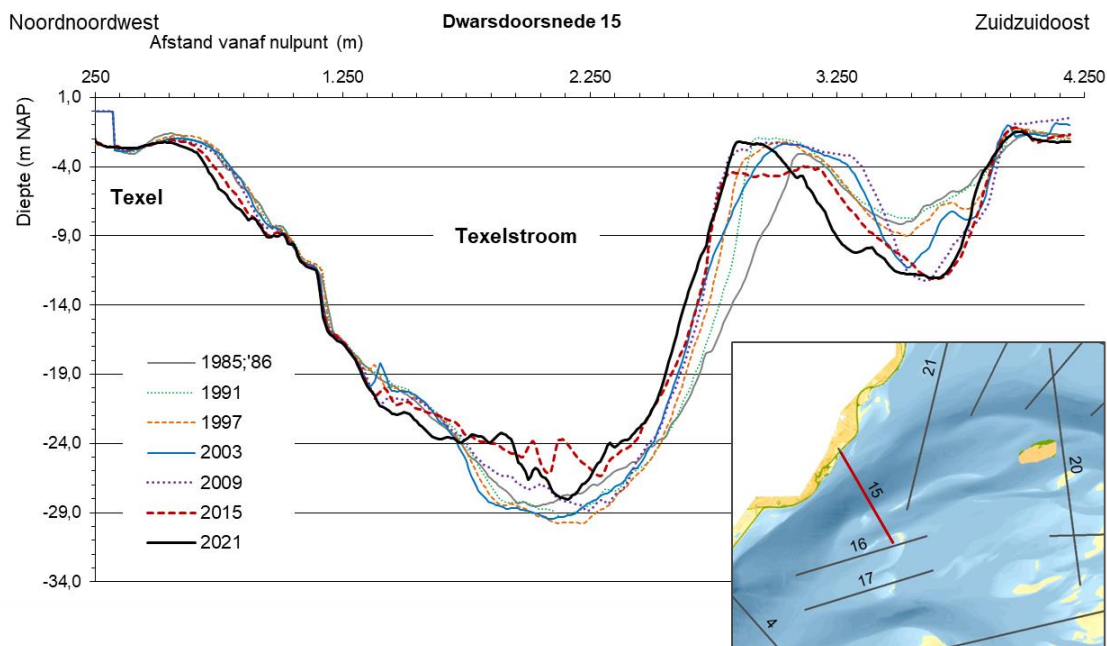


Figuur 6-6 Dwarsdoorsnede door het Marsdiep, ten oosten van Den Helder (locatie in inzet).

De bestortingen hebben ongetwijfeld bijgedragen aan de stabiliteit van de Helsdeur en het Marsdiep. In tegenstelling tot bij bijvoorbeeld het Vlie zijn in deze omgeving in de ondergrond waarschijnlijk geen belangrijke harde lagen aanwezig, die van nature zorgen voor stabiliteit van de geul (Hijma, 2017).

Het Marsdiep loopt verder door naar het noordoosten, waarbij de naam verandert in Texelstroom. De Texelstroom loopt parallel aan de zuidoostkust van Texel, om daarna af te buigen naar het zuidoosten. De Texelstroom bij de kust van Texel is een relatief stabiele geul, zoals zichtbaar is in de dwarsdoorsnede in Figuur 6-7. Aan de zijde noordwestzijde in deze dwarsdoorsnede is weinig variatie zichtbaar in de bodemligging. Aan de overzijde van de geul schuift de geulwand geleidelijk in de richting van Texel. Ten zuidoosten van de Texelstroom loopt parallel daaraan een naamloze geul, waarvan de omvang is toegenomen in de loop van de tijd.





Figuur 6-7 Dwarsdoorsnede door de Texelstroom , ten noordoosten van de haven van Oudeschild op Texel (locatie in inzet).

### 6.3 Doove Balg

De Doove Balg is het verlengde van de geul Texelstroom, die ten zuiden van Texel naar het noordoosten loopt en dan met een bocht naar zuidoosten draait, in de richting van de Afsluitdijk. Hier verandert de naam van de geul van Texelstroom in Doove Balg. Bij de Afsluitdijk maakt de geul Doove Balg opnieuw een bocht, zodat de geul een stukje parallel aan de Afsluitdijk loopt. Daarna volgt opnieuw een bocht, waarbij de Doove Balg naar het noorden gericht is. De Doove Balg is de belangrijkste geul voor het vullen en ledigen van het oostelijke deel van het kombergingsgebied van het Marsdiep. Vanaf de ligging bij de Afsluitdijk takken verschillende geulen van de Doove Balg af, om te beginnen met de Boontjes (zie §6.5). Figuur 6-8 laat de situatie aan de oostzijde van de Doove Balg zien in de jaren tachtig van de vorige eeuw en in 2021. Hierin is met 2 de aftakkende geul aangegeven die naar het noordwesten steekt. De aftakkende geul naar het noordoosten, het Verversgat, is aangegeven met 3. De Doove balg zelf loopt bij 1 in Figuur 6-8 uit in het Molenrak, dat een groot en voornamelijk sublitoraal gebied is, zonder duidelijke geulinsnijdingen. In dezelfde Figuur 6-8 zijn ook de geulen Omdraai, Inschot en Oude Vlie (5) aangegeven.

Tussen de twee kaarten in Figuur 6-8 zijn bij de Doove balg een aantal verschillen zichtbaar.

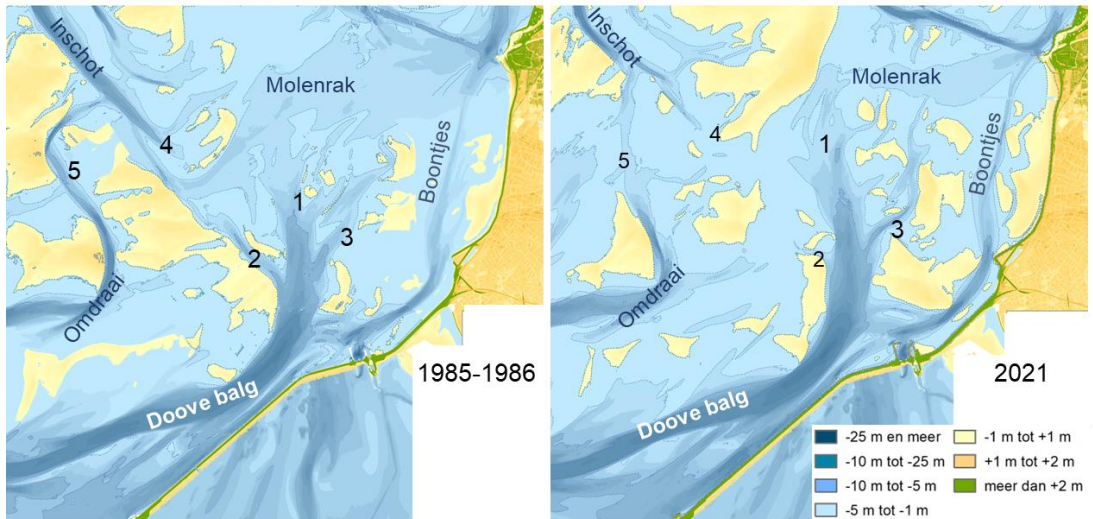
- De Doove Balg verlengt naar het noorden (1);
- Afname van de westelijke tak (2);
  - Toename van de omvang van het Verversgat (3).

Ondertussen is ook de omgeving van het Inschot veranderd:

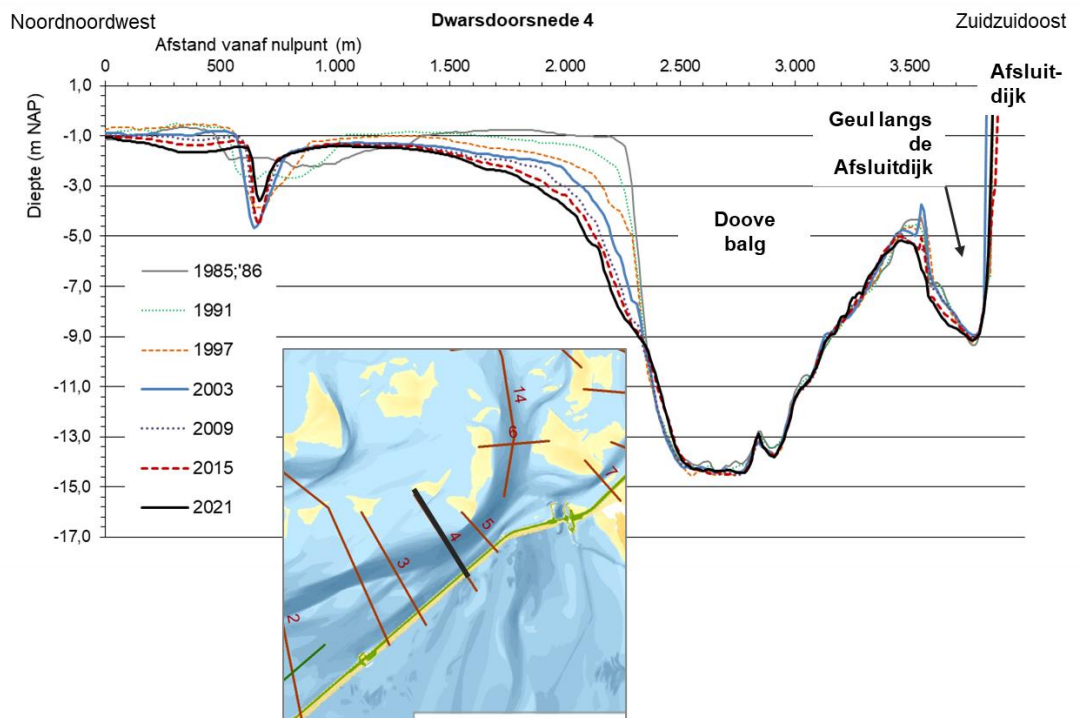
- Van het Inschot zelf neemt de diepte en de breedte af en de geul wordt korter (4);
- De Oude Vlie is vrijwel helemaal verdwenen in de recente kaart.

In het gebied is ook de verdeling van de droogvallende platen veranderd. Rondom Omdraai is het areaal droogvallende platen afgenomen en ten noordwesten van het Molenrak en rond de Boontjes is het areaal droogvallende platen toegenomen.

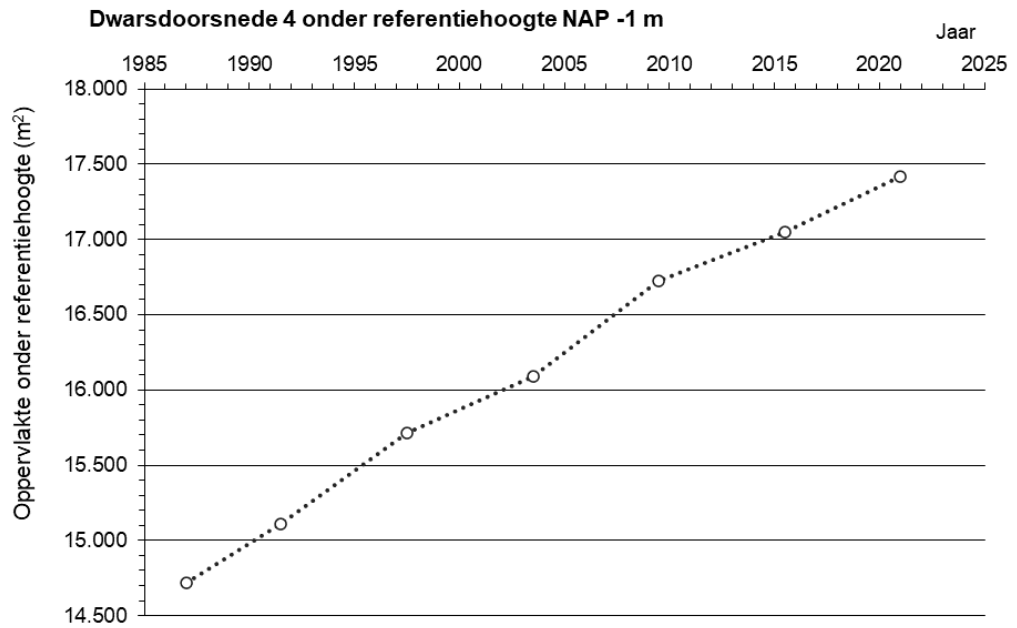




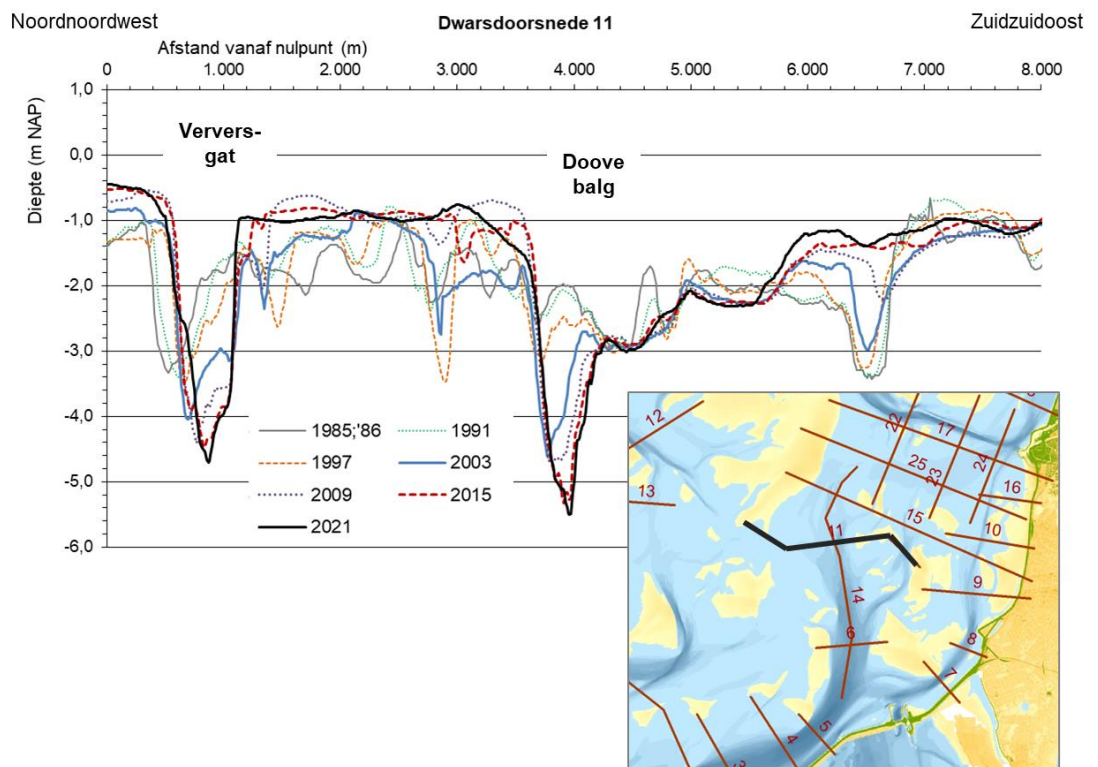
Figuur 6-8 Bodemligging bij de Doove balg in 1985-'86 (links) en in 2021 (rechts) (data: Vaklodingen Rijkswaterstaat). 1. Doove Balg; 2. Aftakkende naamloze geul naar het noordwesten; 3. Verversgat; Inschot; 5. Oude Vlie.



Figuur 6-9 Dwarsdoorsnede 4 van de Doove Balg ter hoogte van de Afsluitdijk met de opeenvolgende vaklodingen (locatie in inzet).



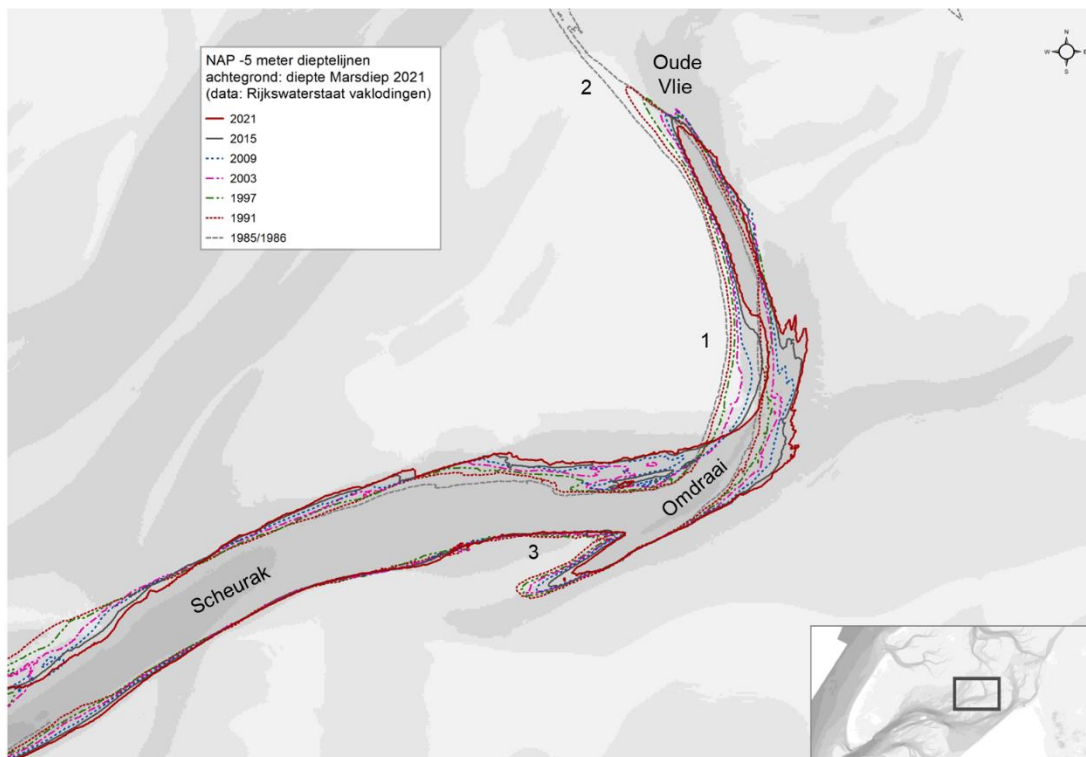
Figuur 6-10 Doorstroomoppervlakte onder NAP -1m bij dwarsdoorsnede 4 (Figuur 6-9).



Figuur 6-11 Dwarsdoorsnede 11 van de Doove Balg ter hoogte van de uitloop richting Molenrak en door het Verversgat, met de opeenvolgende vaklodingen (locatie in inzet).

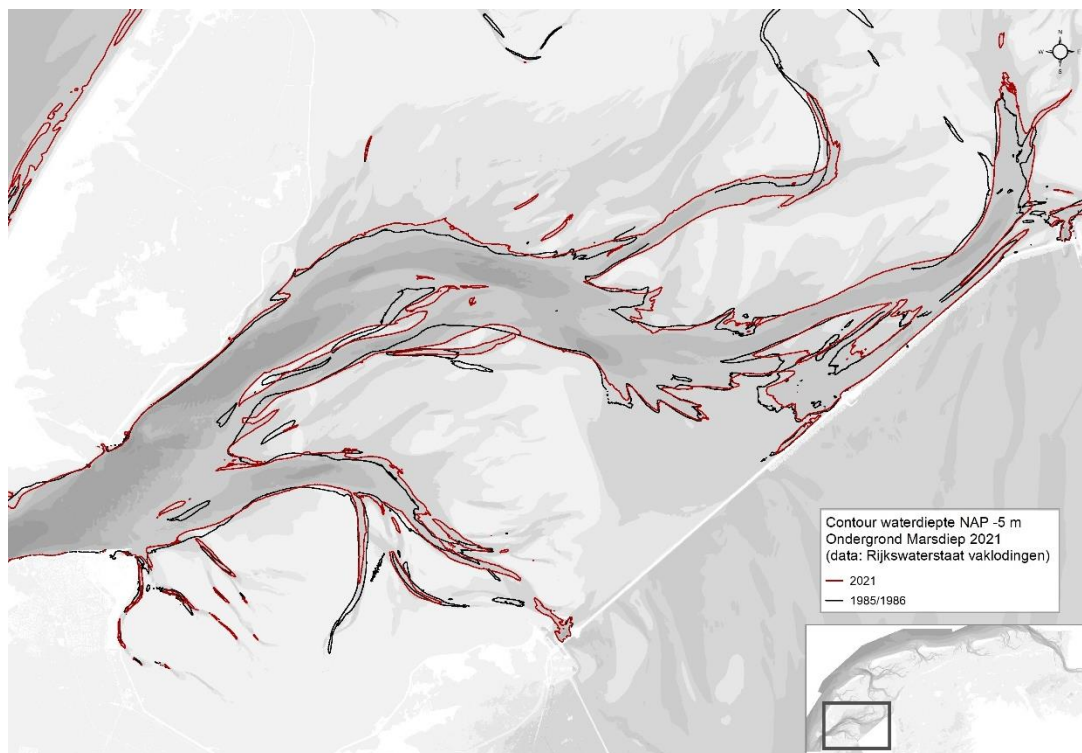
## 6.4 Omdraai en Scheurrak

Vrijwel alle geulen in de Waddenzee vertonen bochten, zoals goed zichtbaar is in de vertakkende geulnetwerken in Figuur 6-1. De geulbochten hebben in sommige gevallen de neiging om te verplaatsen. Dit is te zien bij 1 in Figuur 6-12, waarbij de buitenbocht van Omdraai - Oude Vlie geleidelijk naar het oosten verplaatst. De verplaatsing van de binnenbocht is duidelijk zichtbaar. De vorm van de geul is iets complexer dan alleen een bocht, er is ook een vloodschaar aanwezig, die aftakt van Omdraai naar het noordoosten. Deze vloodschaar verplaatst met de bocht mee naar het oosten en schuift op naar het noorden. Andere veranderingen in deze geul zijn de afname van de omvang aan de noordzijde (bij 2 in Figuur 6-12) en de afname van de omvang van de ebschaar (3 in Figuur 6-12).



Figuur 6-12 Kaart van de -5 m NAP dieptecontour van de geul Scheurrak-Omdraai-Oude Vlie in de opeenvolgende vaklodingen.

De geul Scheurrak, die een heel lichte bochtvorm heeft, verplaatst daarentegen vrijwel niet, de contouren van de -5 m NAP dieptelijnen van de opeenvolgende vaklodingen liggen vrijwel over elkaar heen. Een blik op de kaart van het hele kombergingsgebied van het Marsdiep laat zien dat de locatie van de grote geulen, zoals weergegeven door de -5 m NAP dieptelijn in Figuur 6-13 over het algemeen weinig is veranderd. De oorzaak voor deze stabiliteit is niet bekend, de aanwezigheid van harde -slecht- erodeerbare lagen in de ondergrond speelt hierbij mogelijk een rol, omdat hierdoor de geulen als het ware vastliggen in de ondergrond (Hijma, 2017; van Onselen, 2020). De aanwezigheid van dergelijke lagen in deze omgeving is niet uitgesloten.

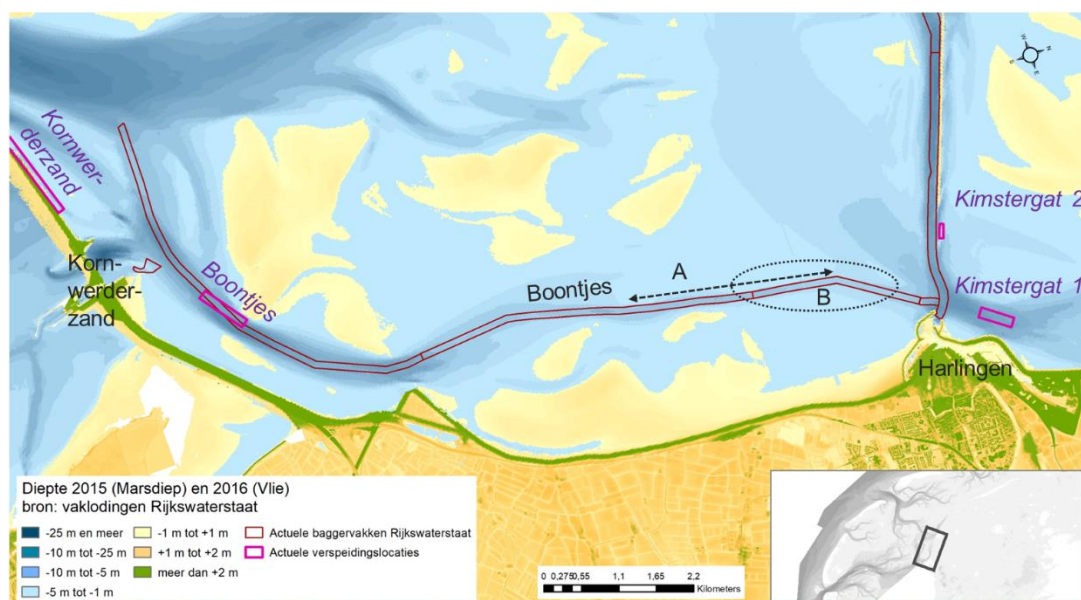


Figuur 6-13 Kaart van de NAP -5 m dieptecontour in het kombergingsgebied van het Marsdiep in twee van vaklodingen.

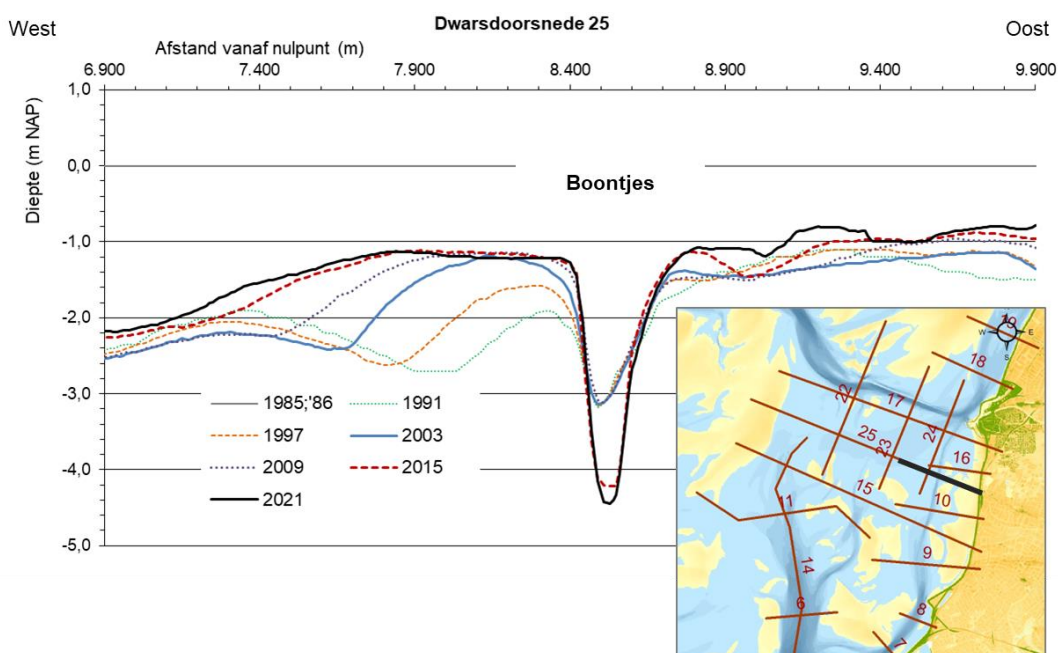
## 6.5 De Boontjes

De Boontjes is de betonde vaarweg die Kornwerderzand verbindt met Harlingen (Figuur 6-14). Het scheepvaartverkeer vanaf het IJsselmeer kan via de Boontjes een rechtstreekse route naar Harlingen nemen, als alternatief voor de veel omslachtiger route via de binnenwateren. In 2012 en 2013 is de vaarweg verdiept, zodat deze over de volle lengte voldoet aan een streefdiepte van -3,8 m NAP (de maximale baggerdiepte is -4,3 m NAP), met een breedte van minimaal 100 m. Sindsdien wordt de vaarweg onderhouden door het uitvoeren van baggerwerkzaamheden. Het gebied waar baggeren nodig was om aan de streefdiepte te voldoen is de ongeveer 5 kilometer lange drempel, met een zwaartepunt over twee kilometer.





Figuur 6-14 Vaargeul Boontjes met daarin aangegeven bij A het drempelgebied dat in 2012 is verdiept en met B het gebied waar de baggerwerkzaamheden hoofdzakelijk plaatsvinden (uit Arcadis, 2022).



Figuur 6-15 Dwarsdoorsnede 25 door de vaargeul Boontjes en de aangrenzende ondieptes (zie inzet voor locatie).

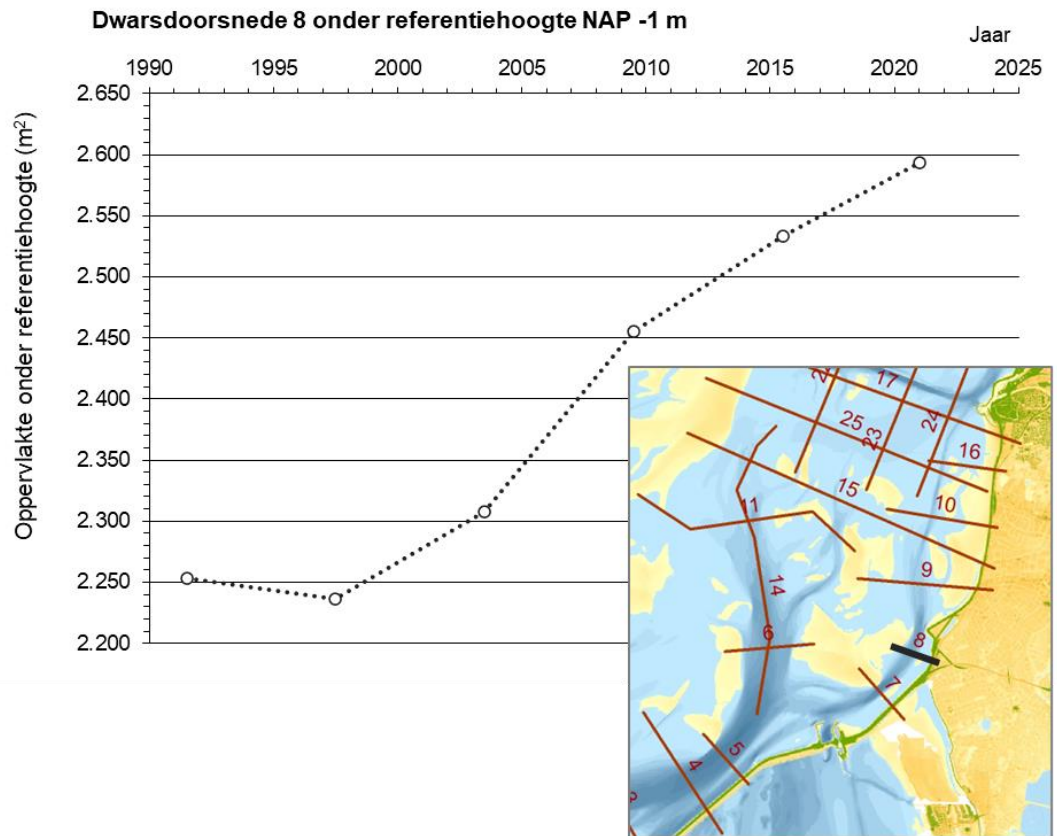
Figuur 6-15 toont dwarsdoorsnede 25, die dwars door het drempelgebied loopt waar het meeste aanlegbaggerwerk heeft plaatsgevonden. In deze dwarsdoorsnede is ook zichtbaar dat ten westen van de vaargeul het ondiepe gebied van jaar op jaar aan het uitbreiden is. Ten oosten van de vaargeul neemt de ondiepte ook toe. Dit is niet alleen in deze dwarsdoorsnede het geval. In het hele noordelijk deel van de Boontjes is sprake van sedimentatie. In dit gebied was, voordat de baggerwerkzaamheden plaatsvonden, sprake van een afname van de doorstroomoppervlakte van de geul.

Het zuidelijke deel van de Boontjes laat een tegenovergestelde trend zien: hier neemt de omvang van de geul toe. Figuur 6-16 laat in een grafiek de toename van de doorstroomoppervlakte zien na 1997/1998. Deze ontwikkeling gaat gelijk op met een toename van de omvang van de meer westelijk gelegen Doove Balg. Het knikpunt in de ontwikkeling van de Boontjes, met in het noorden een afname van de geul en in het zuiden een toename lijkt geleidelijk naar het zuiden op te schuiven. Dit is zichtbaar in de grafiek met de doorstroomoppervlakte van dwarsdoorsnede 10, die in eerste instantie een toename laat zien van de doorstroomoppervlakte, gevolgd door een afname.

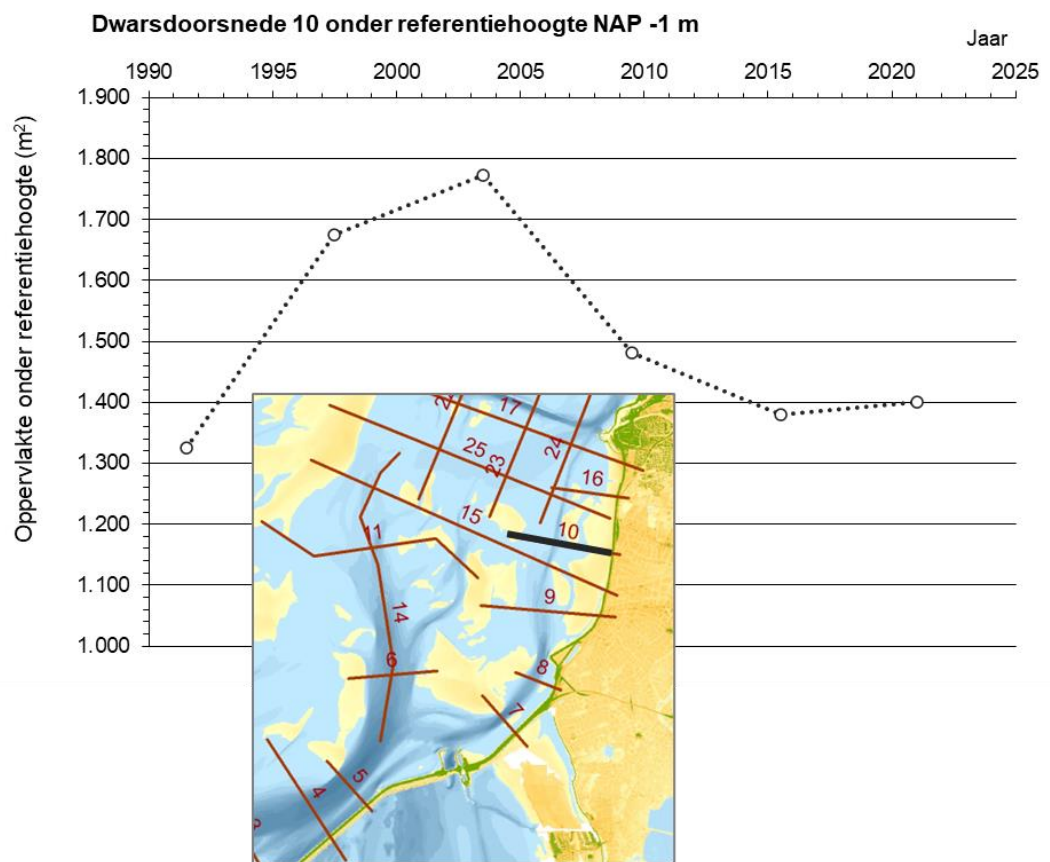
De Boontjes wordt via onderhoudsbaggerwerk op diepte gehouden. De jaarlijkse omvang is varieert en piekt in sommige jaren tot ruim 350.000 m<sup>3</sup>. Dit is veel groter dan de 20.000 m<sup>3</sup> die was voorspeld (Ouwkerk & Vuik, 2012). In 2021 en 2022 is het baggerbezwaar en de morfologische ontwikkeling nader geanalyseerd (Colina Alonso et al. 2021; Smits et al. 2022). Uit deze studies blijkt dat het baggerbezwaar een andere samenstelling heeft van eerder aangenomen, met een groter aandeel slib. Omdat slib veel water bevat, nemen de baggervolumes sterker toe dan de baggermassa (van sediment). De baggeraar geeft aan dat het sediment slibrijker is geworden. Dit kon op basis van de beperkte veldmetingen niet worden bevestigd, hoewel het plaatgebied ten westen van de Boontjes iets slibrijker lijkt geworden. In het noordelijk deel van de Boontjes, ter plaatse van de vroegere drempel wordt veel slib gebaggerd en vormt in de zomer fluid mud. In de zuidelijke Boontjes is het sediment zandiger en ontstaan bodemvormen, waarvan de toppen af en toe worden weggebaggerd.

De Boontjes zal in toenemende mate hinder ondervinden van de grootschalige sedimentatietrend die langs de gehele Waddenzee bij de vastelandskust optreedt. Daarnaast ligt het wantij tussen Marsdiep en Vlie over de Boontjes. Dit wantij zal, door de lage stroomsnelheden, ook bijdragen aan verdere sedimentatie in het gebied rondom de Boontjes. Indien het (nu nog veelal sublitorale) plaatgebied rondom de Boontjes verder ophoogt, zal deze het kombergingsvolume van de geul gaan verkleinen.

Op basis van modelberekeningen (Ouwkerk & Vuik, 2012; Smits et al. 2022) is vastgesteld dat een verdiepte Boontjes meer getijdebiet trekt. Echter vanuit een diepere geul beroeren de golven de bodem minder, waardoor het baggerbezwaar toeneemt. Daarnaast zal het sedimenteren van het plaatgebied rondom de Boontjes (autonome trend) leiden tot meer beroering door golven en daarmee meer aanvoer van sediment naar de Boontjes. Ook is er door de zoetwaterspui bij Kornwerderzand sprake van een netto sedimenttransport nabij de bodem van het slibrijke gebied in het noorden (waar ook de verspreidingslocaties liggen) naar het zuiden.



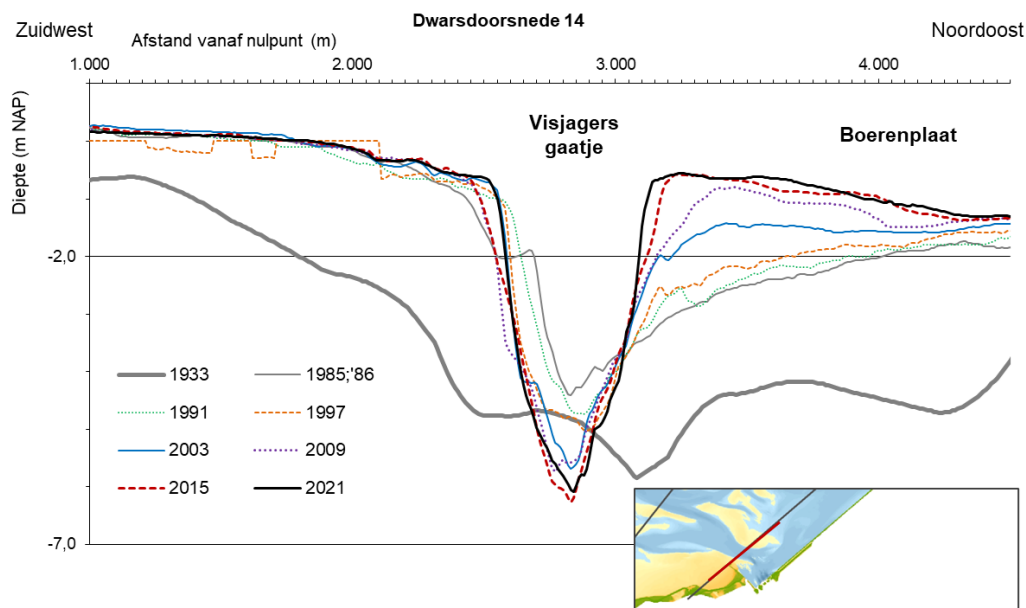
Figuur 6-16 Doorstroomoppervlakte van de Boontjes in dwarsdoorsnede 8.



Figuur 6-17 Doorstroomoppervlakte van de Boontjes in dwarsdoorsnede 10.

## 6.6 Visjagersgaatje

Het Visjagersgaatje is tegenwoordig de belangrijkste getijgeul die het spuicomples bij Den Oever met de rest van de Waddenzee verbindt. Dat is een situatie die gaandeweg is ontstaan na de afsluiting van de Zuiderzee. Ten tijde van de afsluiting was het Visjagersgaatje een relatief kleine getijgeul ten opzichte van de Wierbalg en het Zuiderzwin. De omvang van al deze geulen in deze omgeving is afgenomen, omdat er geen stroming meer naar en van de Zuiderzee plaatsvond. Deze afname was het minst groot voor het Visjagersgaatje. Figuur 6-18 laat de dwarsdoorsnede zien door het Visjagersgaatje voor de vaklodingen vanaf 1985 tot en met 2015 en toont ook de situatie na de afsluiting in 1933. Zichtbaar is dat ten opzichte van 1933 in 1985 sprake is van een duidelijke geul die wordt begrensd door een wadplaat aan de zuidwestzijde en een ondiepte aan de noordoostzijde. Na 1985/86 is de hoogte van de ondiepte toegenomen, en hier tegenwoordig de Boerenplaat ligt. Het Visjagersgaatje zelf is smaller en dieper geworden.

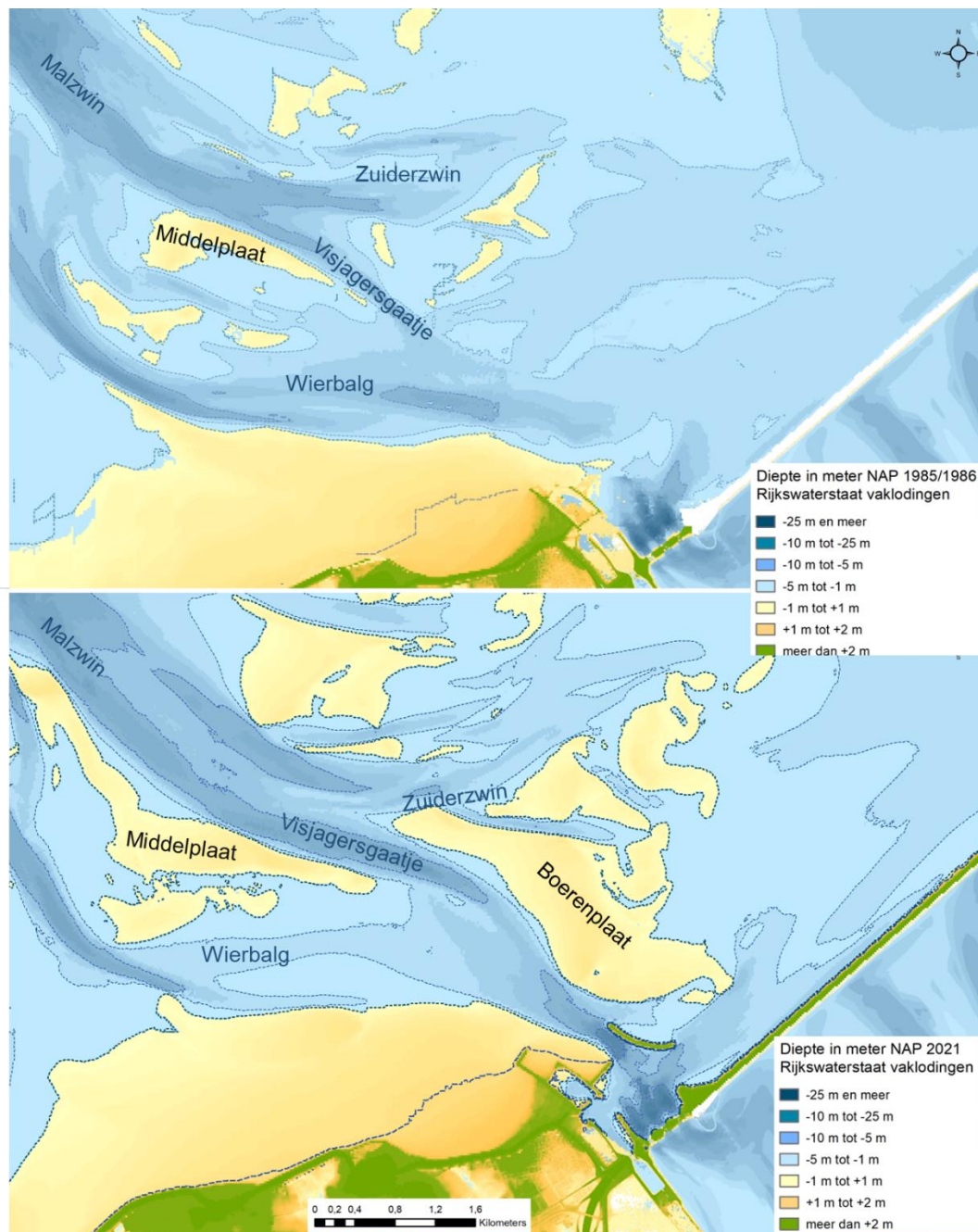


Figuur 6-18 Dwarsdoorsnede door het Visjagersgaatje nabij Den Oever (locatie in inzet, figuur gemaakt voor het Rijkswaterstaat KPP Morfologie Waddenzee programma).

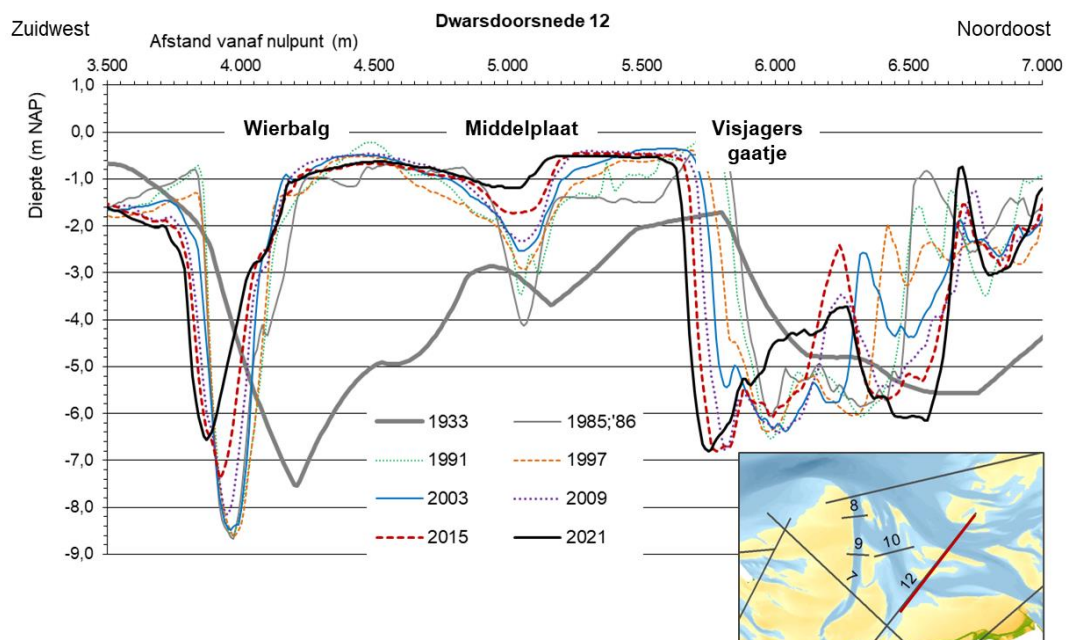
De aanwezigheid van de Boerenplaat ten noorden van het spuicomples bij Den Oever, zoals zichtbaar in Figuur 6-19 is een relatief recente ontwikkeling. In Figuur 6-19 is een bodemkaart van 1985 opgenomen waarin geen sprake is van een wadplaat op die locatie, zoals die tegenwoordig aanwezig is. Ook in de dwarsdoorsnede in Figuur 6-18 is het omhoogkomen van de Boerenplaat zichtbaar. Naast de Boerenplaat zijn ook de andere wadplaten in de omgeving in omvang toegenomen.

In de kaarten in Figuur 6-19 is ook zichtbaar dat in 1985 de Wierbalg een grotere omvang had dan het Visjagersgaatje. In 2021 was de situatie omgekeerd, toen vormde het Visjagersgaatje de belangrijkste verbinding tussen het Malzwin en Den Oever. De afname van de omvang van de Wierbalg is ook zichtbaar in de dwarsdoorsnede in Figuur 6-20. De diepte van de Wierbalg is met meer dan één meter afgenomen. In deze dwarsdoorsnede is ook zichtbaar dat het geultje dat tussen de twee delen van de Middelploot ligt sterk in omvang is afgenomen.





Figuur 6-19 Kaarten met de bodemligging rondom Den Oever in 1985 (boven) en 2021 (onder) (op basis van de vaklodingsgegevens van Rijkswaterstaat).

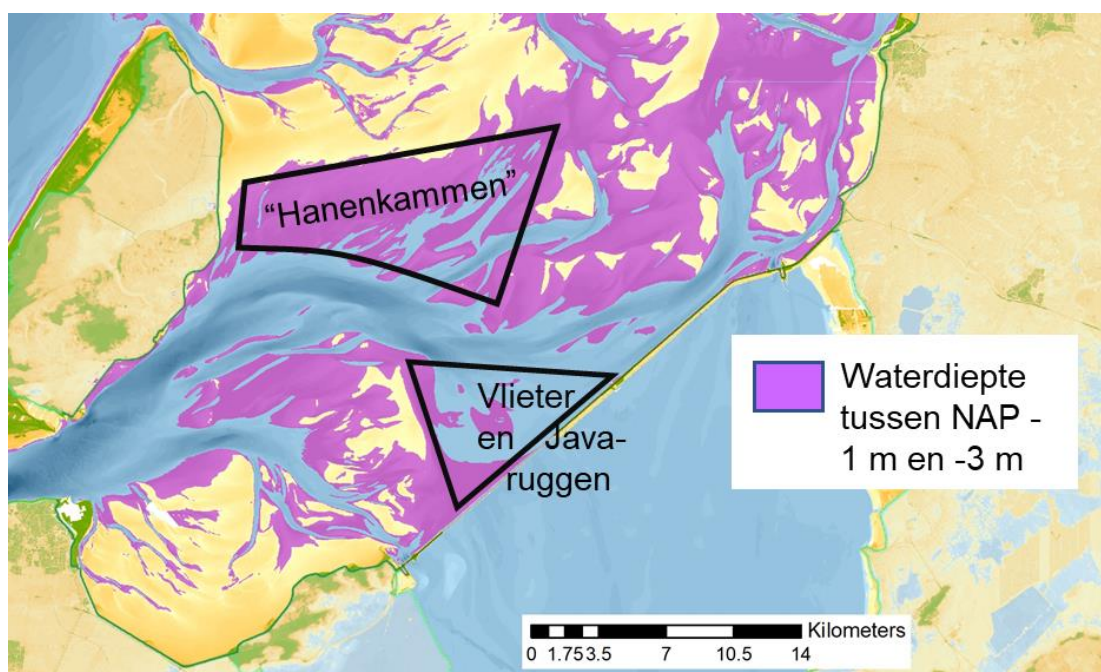


Figuur 6-20 Dwarsdoorsnede door de geulen Wierbalg en Visjagersgaatje, met daartussen de Middelplaat (locatie in inzet, figuur gemaakt voor het Rijkswaterstaat KPP Morfologie Waddenzee programma).

## 7 Sublitorale platen

### 7.1 Inleiding

Een relatief groot deel van het kombergingsgebied van het Marsdiep bestaat uit delen die nooit droogvallen. In de andere kombergingsgebieden zijn de delen die niet droogvallen onderdeel van het patroon van vertakkende getijdegeulen. In het Marsdiep is dat niet zo, de niet droogvallende delen vormen hier grote oppervlaktes, die geen geulpatroon vormen. Deze gebieden noemen we sublitorale wadplaten (Figuur 7-1). In deze paragraaf worden twee grote sublitorale plaatgebieden in meer detail beschouwd, waarbij in paragraaf 7.2 de Vlieter en Javaruggen worden beschouwd en in paragraaf 7.3 het gebied “Hankenammen” ten zuiden van Vlakte van de Kerken. Voorafgaand aan de beschouwing van deze deelgebieden is hieronder een algemene inleiding opgenomen van het sublitoraal.



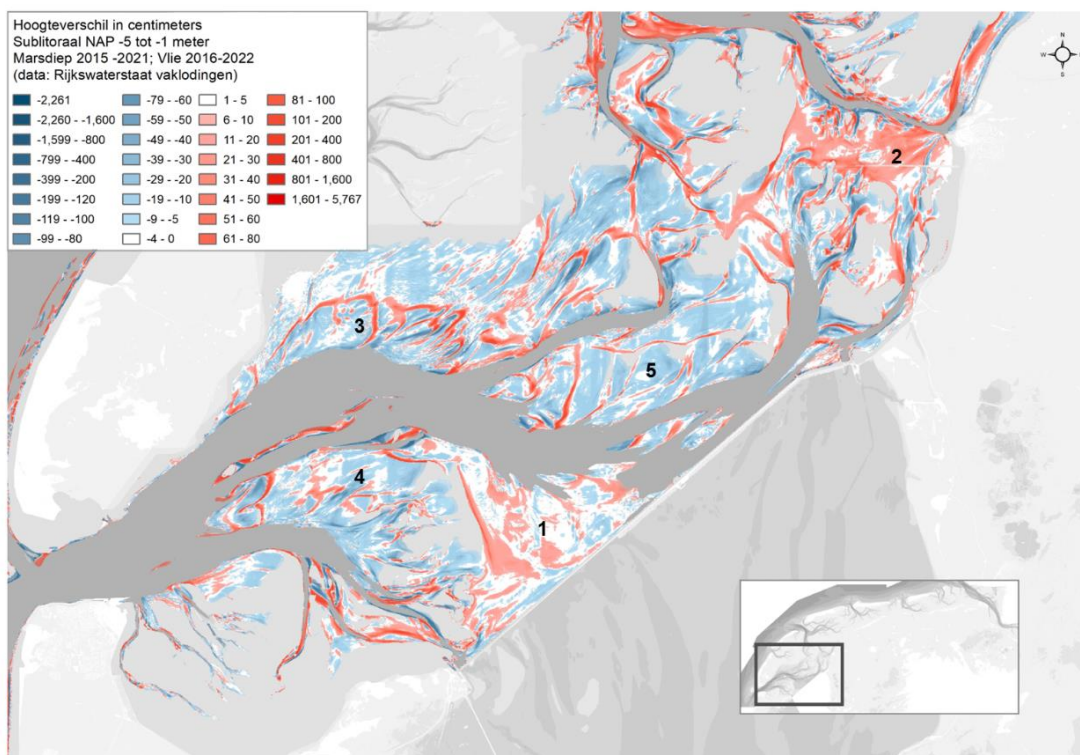
Figuur 7-1 Het areaal tussen NAP -1 en -3 m en de twee sublitorale gebieden waarop in de tekst nader op in wordt gegaan (bodemplugging 2015, Rijkswaterstaat vaklodingen).

De permanent onder water liggende platen of sublitorale platen zijn in het Marsdiep veel aanwezig, in vergelijking met de rest van de Waddenzee. In het Marsdiep is 51% van het bekkenoppervlak sublitorale wadplaat (Tabel 2.1). De getallen in Tabel 2.1 zijn bepaald door het gebied onder de laagwaterlijn onder te verdelen in een dieper geuldeel (dieper dan NAP - m) en een ondieper sublitoraal deel (dieper dan NAP -1 m). In de kaart in Figuur 7-1 zijn deze sublitorale gebieden gemarkeerd in paars. De overgang van geul naar sublitoraal is op basis een overgang op -3 m NAP in de hypsometrische curve van het Marsdiep vastgesteld. Dit is een eerste inschatting. Een morfologische beschrijving of definitie van sublitorale platen, anders dan het dieptebereik dat wordt beschouwd, is niet aangetroffen in de literatuur.

De oorzaak voor het bestaan van het grote areaal sublitoraal ligt in de ontwikkeling van het kombergingsgebied. In hoofdstuk 4 is al toegelicht dat het Marsdiep een relatief grote diepte heeft door de aanleg van de Afsluitdijk.



De sublitorale platen hebben onderling duidelijk verschillende kenmerken, zoals duidelijk wordt uit de beschrijving van de twee deelgebieden Hanenkammen en Vlieter en JaVaruggen (aangegeven in Figuur 7-1). De verschillen betreffen niet allen de vorm van deze gebieden, maar ook de veranderingen die optreden. Dit is zichtbaar in de verschilkaart in Figuur 7-2, waarin de patronen van de erosie (rood) en sedimentatie (blauw) duidelijk verschillen in de sublitorale gebieden (1. Java ruggen; 3 Hannenkammen). In deze verschilkaart is ook zichtbaar dat de overheersende kleur duidelijk verschilt. Bij de Pollen (2 in Figuur 7-2), in het overgangsgebied tussen Marsdiep en Vlie, overheerst sedimentatie (rood). In de gebieden 4 en 5 in Figuur 7-2 overheerst erosie (blauw).



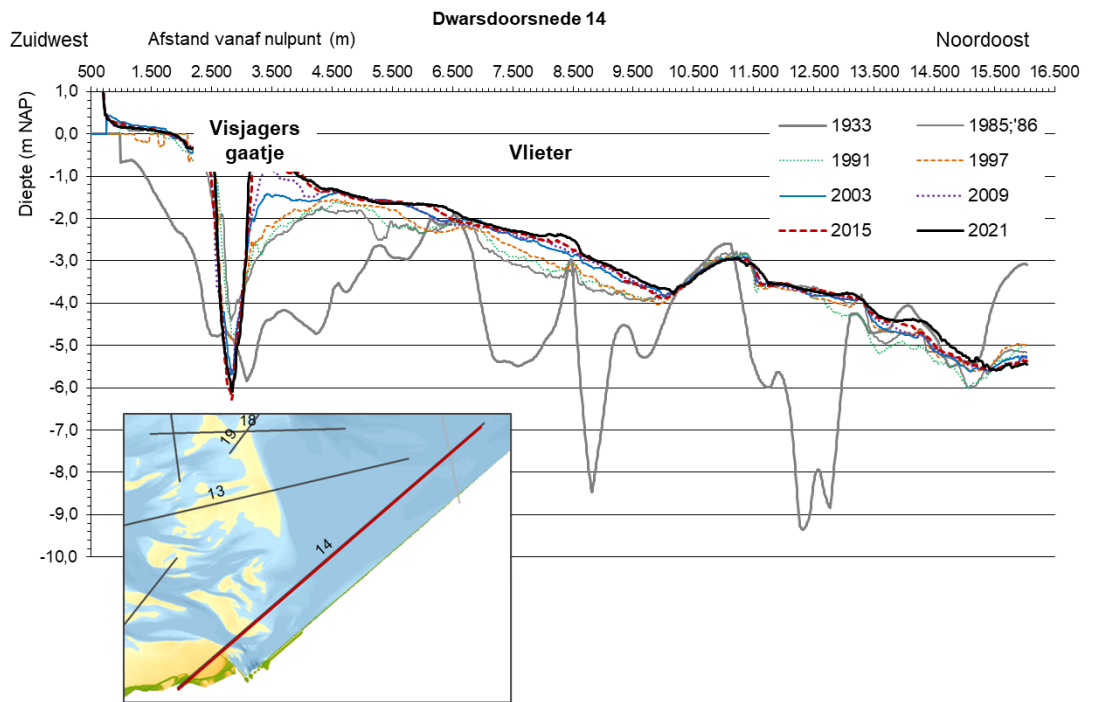
Figuur 7-2 Sedimentatie (rood) en erosie (blauw) 2015-2021 in het gebied dat in 2015 en 2021 een waterdiepte tussen NAP -1 en -5 m had. Het dieptebereik is groter dan dat van het sublitoraal van NAP -1 tot -3 m, zodat de patronen in de erosie en sedimentatie minder worden doorsneden en daarmee duidelijker zichtbaar zijn (op basis van de Rijkswaterstaat vaklodingen).

## 7.2 Vlieter en Javaruggen

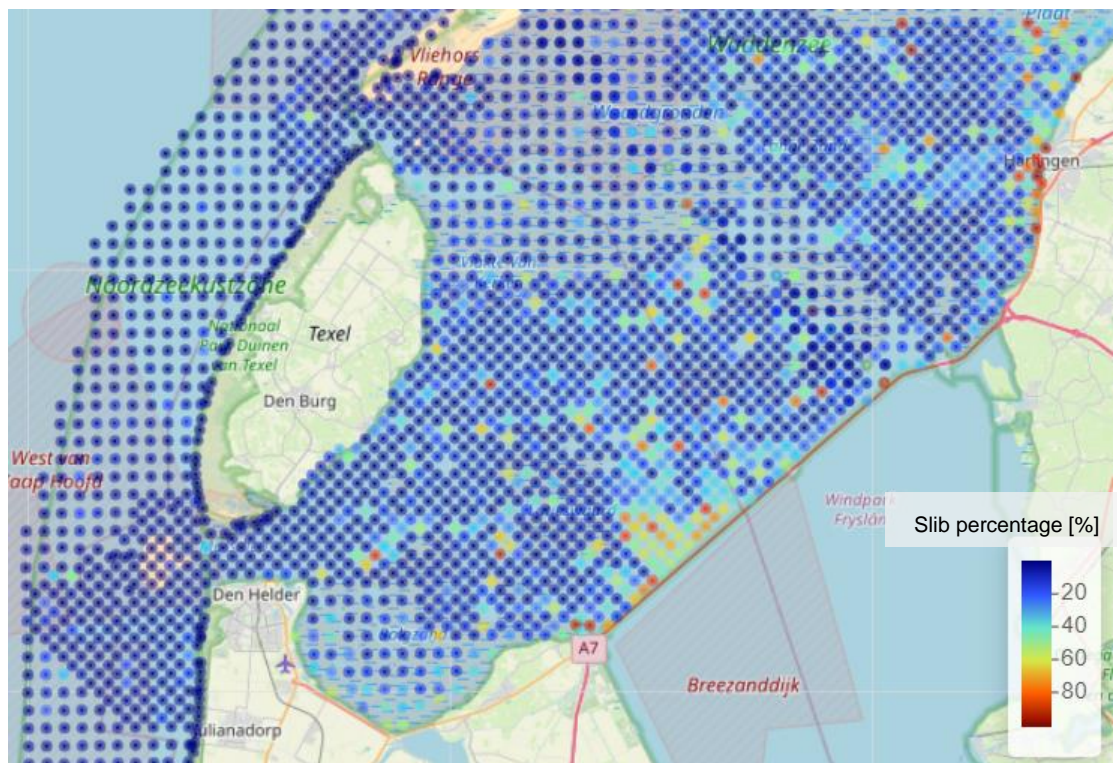
De Vlieter en Jaap Vaars-ruggen (Javaruggen) waren tot voor de aanleg van de Afsluitdijk belangrijke geulsystemen die de drainage verzorgden van de achterliggende Zuiderzee. De geulen zijn door de afsluiting hun watervoerende functie (grotendeels) verloren. Het gevolg was dat ze werden opgevuld met zand en slib. Het zand werd voornamelijk afgezet in het winterhalfjaar en het slib in het zomerhalfjaar, zoals is gereconstrueerd op basis van boringen en dateringen van de geul (Berger et al., 1987). Wat overbleef na de doorgaande sedimentatie was een vrij geleidelijk in noordoostelijke richting licht afhellende vlakke. Deze vlakke is nog steeds geleidelijk aan het verondiepen door doorgaande sedimentatie (Figuur 7-3).

Deze sublitorale platen hebben zeer beperkte bodemvormen, maar wel een duidelijke grootschalig reliëf. De Vlieter en de Javaruggen worden in de Sedimentatlas met metingen uit de jaren '90 gedomineerd door slibrijk sediment (Figuur 7-4). Dit wijst erop dat de stroomsnelheden laag zijn. Dit past bij wat in de literatuur 'abandoned channels' (verlaten geulen) heet.





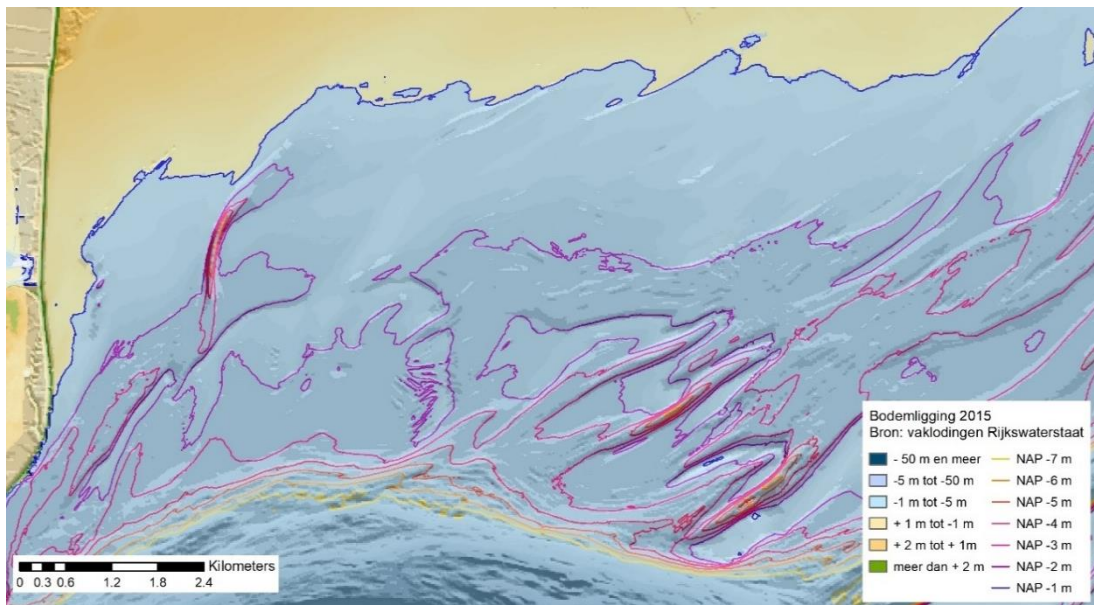
Figuur 7-3 Dwarsdoorsnede 14 door het Visjagersgaatje en de Vlieter (zie inzet voor locatie).



Figuur 7-4 Kaart met de slibpercentages uit de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998). Bron: Digitale Systeemrapportage Waddenzee.

### 7.3 'Hanenkammen'

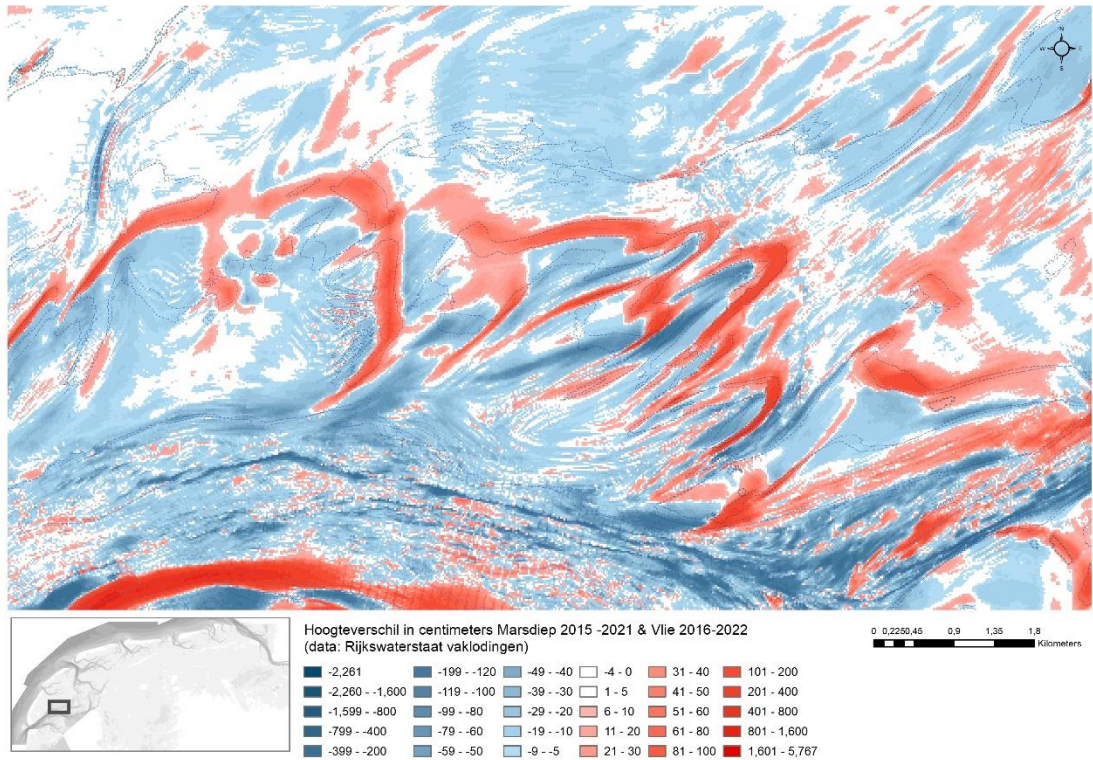
De 'Hanenkammen'<sup>3</sup> liggen ten zuiden van de wadplaat Vlakte van de Kerken en ten noorden van de geul Doove balg (Figuur 7-1). Het loopt geleidelijk op vanaf de knik in de geulwand rond NAP -3 m tot in het litoraal. Kenmerkend zijn de aanwezige paraboolachtige bodemvormen van meerdere kilometers lang die een lichte verhoging van 0,5 m vormen boven het oppervlak. Ze zijn zichtbaar in Figuur 7-5. In de erosie/sedimentatiekaart (verschilkaart tussen 2009 en 1991, zie Figuur 7-6) zijn de paraboolachtige vormen nog duidelijker zichtbaar.



Figuur 7-5 Kaart van sublitoraal in de omgeving van Vlakte van de Kerken.

<sup>3</sup> Dit gebied heeft officieel geen benaming, maar er wordt in deze rapportage naar verwezen als Hanenkammen. 'Hanenkammen' verwijst naar de kenmerkende vorm.



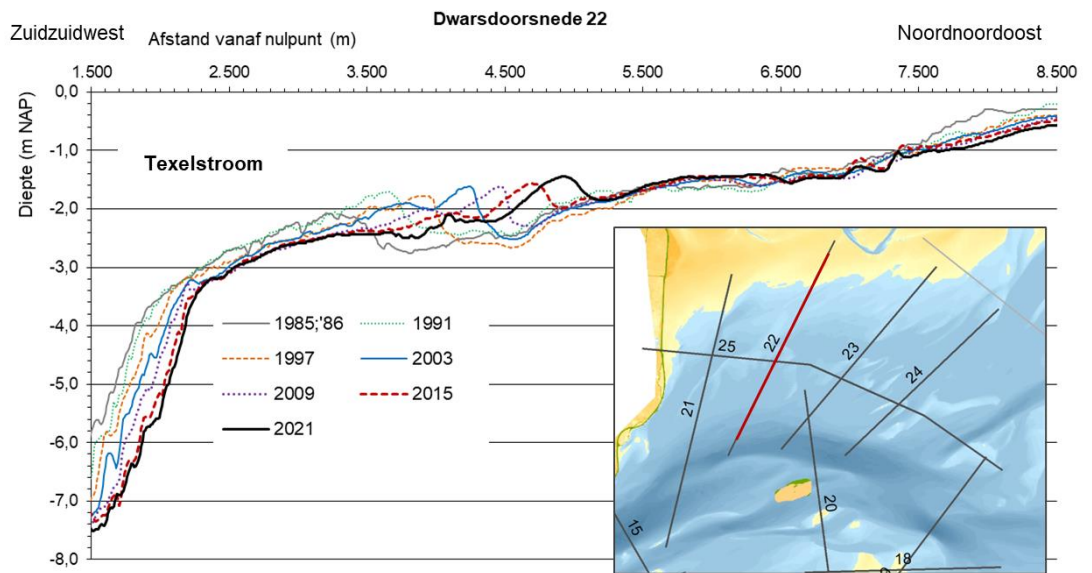


Figuur 7-6 Kaart van het hoogteverschil in het sublitoraal in de omgeving van de Vlakte van de Kerken.

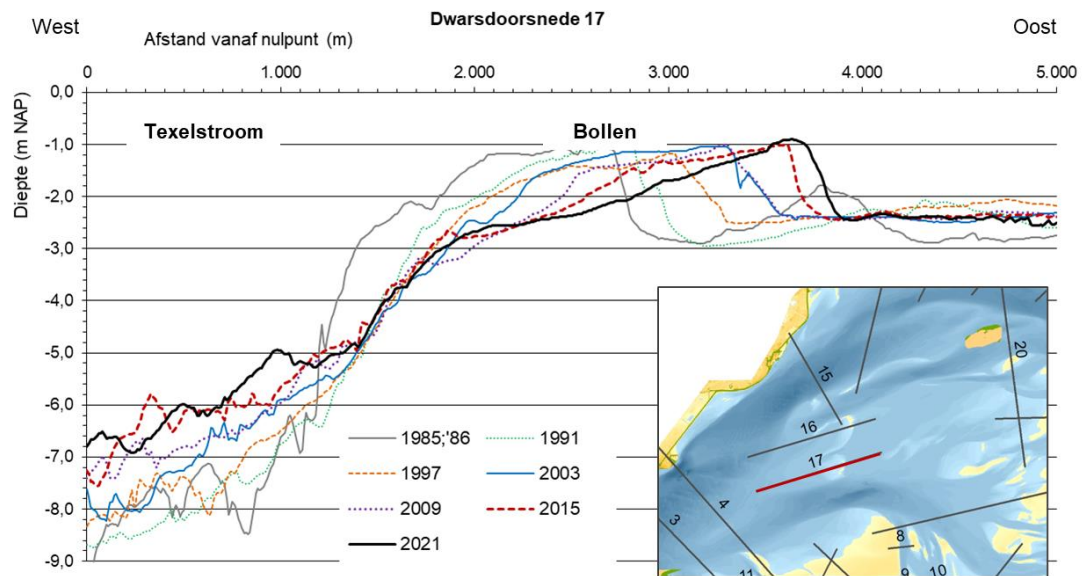
Dat deze vormen in de verschilkaart zichtbaar zijn, komt doordat ze verplaatsen. De verplaatsing is zichtbaar in de dwarsdoorsnede in Figuur 7-7. Uit de dwarsdoorsnede is af te leiden dat de bodemvormen niet alleen uit een bank (verhoging) bestaan, maar dat ten oosten ervan ook een verdieping aanwezig is. Beide verplaatsen naar het oostnoordoosten, waarbij de verdieping in de meeste recente opname vrijwel geheel is verdwenen. Tussen de positie van de top van de bank in de eerste en de laatste opname zit een afstand van ruwweg 1 km, wat wijst op een verplaatsingsnelheid van een tiental meters per jaar. De verplaatsing van de bodemvorm verloopt sneller dan de verplaatsing van de geulwand, die in dezelfde richting migreert. In Figuur 7-7 lijkt het erop dat er nog een regel bodemvormen achter ligt, waarbij het hoogteverschil van degene die het verst van de geulwand liggen kleiner zijn. Mogelijk desintegreren de bodemvormen bij verdere migratie hoger op de plaat geleidelijk.

Het gebied van de Hanenkammen is vrij zandrijk (Figuur 7-4). In combinatie met de aanwezigheid van de bodemvormen wijst dit op relatief grote bodemschuifspanningen. Het is niet duidelijk welk aandeel getijstroming en golven hebben. Ook is onduidelijk in hoeverre deze banken bijdragen aan plaatopbouw en het veranderen van het plaatareaal. De geometrie van de overgang van sublitoraal naar het litoraal is ten zuiden van de Vlakte van de Kerken in ieder geval duidelijk afwijkend van de normale overgang van geul naar plaat, die veel abrupter/steiler is (zie bijvoorbeeld de overgang van de geul Doove balg naar de aanligende plaat in Figuur 6-9 en let daarbij op het verschil in de afstand waarover de verandering van diep naar ondiep water optreedt).

De Hanenkammen zijn dus een nog onverklaarde bodemvorm. Nadere bestudering van bodemkaarten en verschilkaarten leert dat vergelijkbare bodemvormen aanwezig zijn bij de Bollen, tussen Texelstroom en Malzwin. De dwarsdoorsnede in Figuur 7-8 laat zo'n "Hananekam" zien, met vergelijkbare vorm, maar hogere hoogste delen dan bij de Vlakte van de Kerken. De verplaatsing is bij de Bollen juist kleiner. In andere delen van het Waddengebied zijn geen vergelijkbare bodemvormen aangetroffen.



Figuur 7-7 Dwarsdoorsnede 22 in het sublitoraal bij de Vlakte van de Kerken, locatie in inzet.



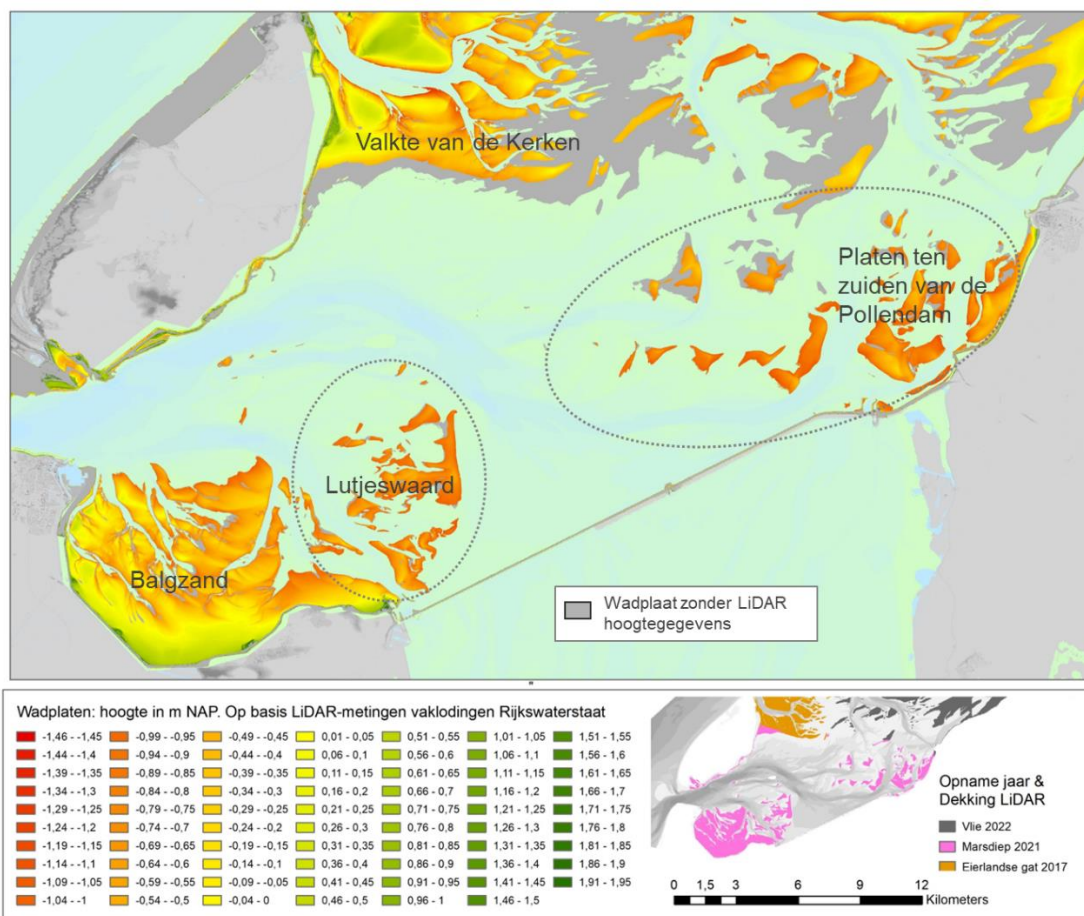
Figuur 7-8 Dwarsdoorsnede 17 in sublitoraal ten oosten van het zeegat van het Marsdiep (zie inzet voor locatie).



# 8 Droogvallende wadplaten

## 8.1 Inleiding

Wadplaten zijn de gebieden met een hoogte tussen laag- en hoogwater (het intertidaal). Door hun hoogteligging vallen de wadplaten tijdens laagwater vrijwel geheel droog. Op de dieper liggende delen van de wadplaten, die niet direct afwateren op de geulen, kan een laagje water blijven staan tijdens laagwater. In het kombergingsgebied Marsdiep zijn relatief weinig intertidale wadplaten. Figuur 8-1 laat de droogvallende wadplaten zien in het Marsdiep, met een gedetailleerde schaalindeling van het intertidaal. In tegenstelling tot de reguliere schaalindeling (die gehele diepte gradiënt van kwelder tot de grote getijdegeulen dekt, zoals onder andere zichtbaar is in Figuur 2-1), zijn duidelijke verschillen zichtbaar in de hoogte van de wadplaten.



Figuur 8-1 Bodemligging (2011), waarbij een sterk kleurverloop is gebruik voor de hoogteschaal van de platen, waardoor hoogtevariaties op de droogvallende platen duidelijk zichtbaar zijn.

Op de verschillende wadplaten is sprake van variatie van de hoogte. En de hoogte van de complexen van wadplaten verschilt ook duidelijk onderling. Figuur 8 1 laat zien dat het Balgzandgebied en de Vlake van de Kerken aaneengesloten gebieden van droogvallende platen vormen in het kombergingsgebied Marsdiep. Bij deze gebieden is sprake van een complete gradiënt in de hoogteligging, met hoge delen die slechts kort overstromen tijdens hoogwater tot de laagste delen die slechts kort droogvallen. Het Balgzand wordt beschreven in paragraaf 8.2. De Vlake van de Kerken wordt beschouwd in het kombergingsrapport over het Eierlandse Gat (Cleveringa & Elias, 2022. Verder zijn twee clusters aanwezig van kleinere

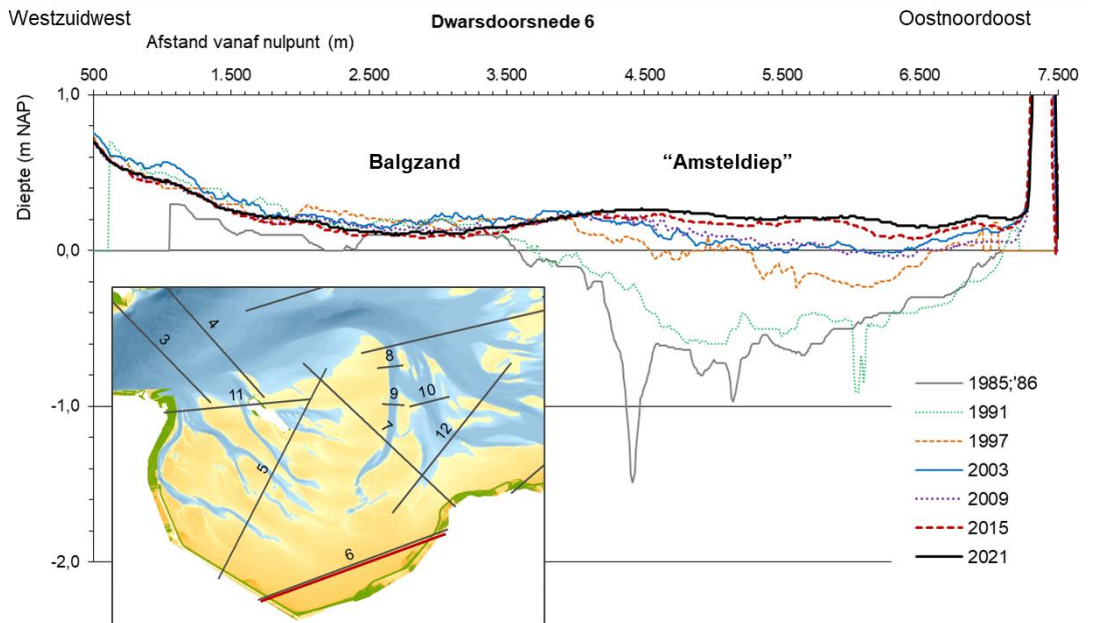
plaatgebieden, waarbij de plaalementen relatief laag liggen. De Lutjeswaard wordt beschreven in paragraaf 8.3 en de platen ten zuiden van de Pollendam worden beschreven in paragraaf 8.4. Ten slotte wordt in paragraaf 8.5 ingegaan op de morfodynamiek van de wadplaten, mede in relatie tot de waarnemingen aan de ontwikkelingen van de arealen en volumes in het hele kombergingsgebied.

## 8.2 Het stabiele Balgzand

Het overgrote deel van de Ballastplaat is een stabiel plaatgebied, met een min of meer vergelijkbare hoogte (Figuur 8-1), dezelfde geulen die slechts beperkt zijn gemigreerd en vrijwel dezelfde buitencontour (Figuur 6-5). Een uitzondering is de hoek aan de noordwestzijde van het voormalige eiland Wieringen (1 in Figuur 8-2), waar tot in de jaren '80 van de vorige eeuw ondiep water aanwezig was, dat was verbonden met de geul Amsteldiep. Deze geul liep voor de afsluiting van het Amstelmeer tussen de Kop van Noord-Holland en het eiland Wieringen, bij de pijl in Figuur 8-2. Figuur 8-3 toont een dwarsdoorsnede, met aan de westzijde het Balgzand en aan de oostzijde het gebied bij het voormalige Amsteldiep dat zich ontwikkelde tot wadplaat. De relatieve stabiliteit van het Balgzand blijkt pas echt als deze wordt vergeleken met de naastgelegen Lutjeswaard.



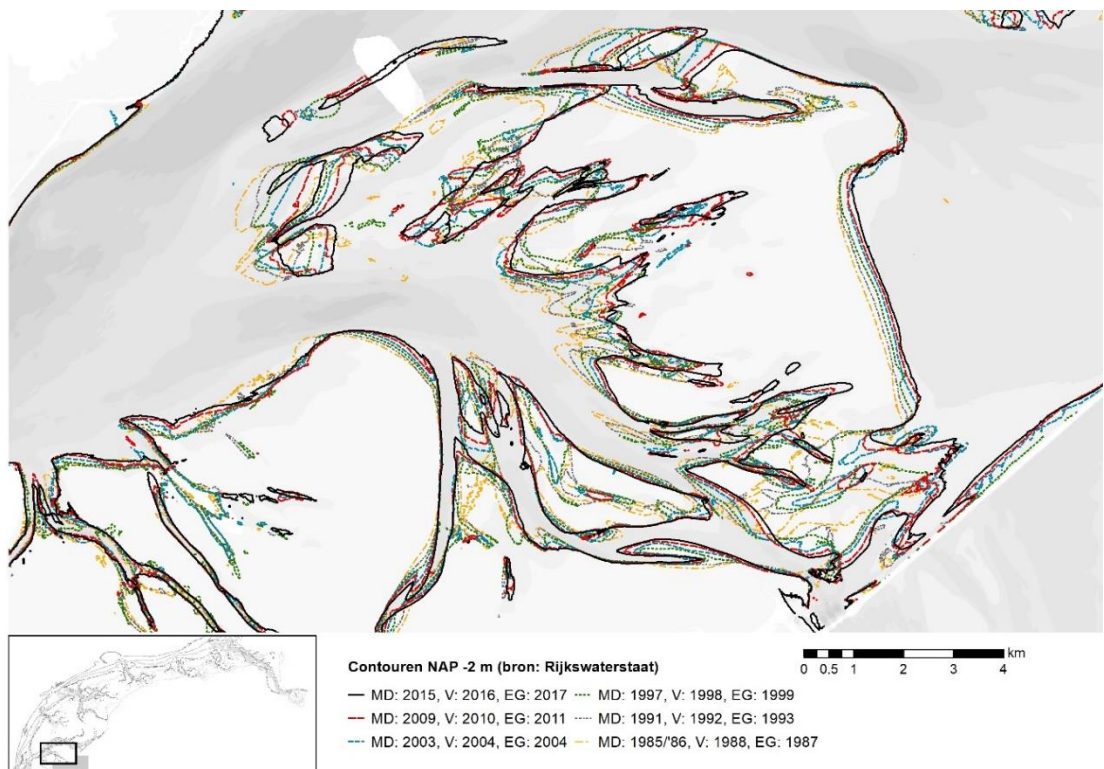
Figuur 8-2 Kaart van het Balgzand en Lutjeswaard met bodemhoogte van 2015.



Figuur 8-3 Dwarsdoorsnede 6 aan de zuidzijde van het Balgzand (locatie in inzet).

### 8.3 De dynamische Lutjeswaard

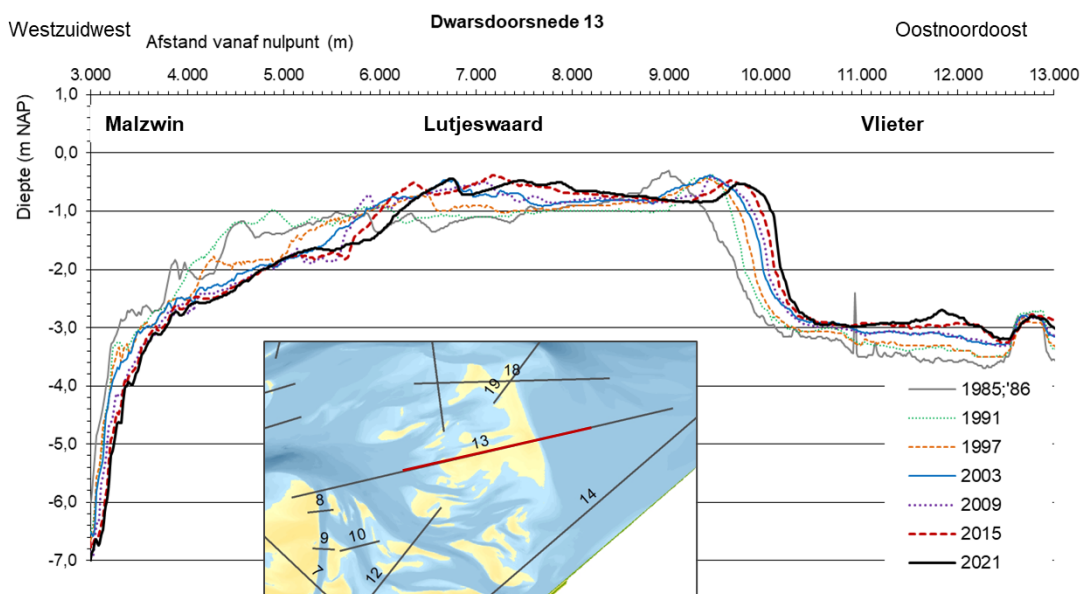
De Lutjeswaard is in vergelijking met het Balgzand veel veranderlijker. Ook dit blijkt uit de vergelijking van de historische kaart in Figuur 6-5 met de recente situatie in Figuur 8-2. De kaart met de contouren van de -2 m NAP dieptelijn in Figuur 8-4 laat ook zeer veel veranderingen zien.



Figuur 8-4 Kaart met de NAP -2 m contour in het Lutjeswaardgebied.



Deze dieptelijn toont niet zozeer de begrenzing van de droogvallende platen, als wel de verplaatsing van de geulen die de platen begrenzen. Veel van deze contouren laten een structurele verplaatsing naar het oosten laten zien. Deze oostwaartse verplaatsing is duidelijk zichtbaar in de dwarsdoorsnede 13 in Figuur 8-5. Deze structurele verplaatsing van de plaalementen van de Lutjeswaard naar het oosten is geen ontwikkeling die zich overal in het Waddengebied voordoet, maar hij wordt wel aangetroffen bij de platen bij de Pollendam. De omvang van de plaat zoals zichtbaar in de dwarsdoorsnede in Figuur 8-5 lijkt niet te veranderen, wat aan de westzijde verdwijnt komt aan de oostzijde erbij. Wel ontstaan in de omgeving van de Lutjeswaard nieuwe droogvallende platen (zie ook de kaarten van omgeving van het Visjagersgatje in Figuur 6-19). Bij de analyse van de watervolumes en arealen in paragraaf 5.2 valt de Lutjeswaard binnen het deelgebied Balgzand. De toename van het areaal droogvallende wadplaten van dat deelgebied bestaat voor een deel uit een toename in de omgeving van de Lutjeswaard, naast de opvulling van het voormalige Amsteldiep (zie de voorgaande paragraaf 8.2).



Figuur 8-5 Dwarsdoorsnede 13 door de Lutjeswaard (locatie in inzet).

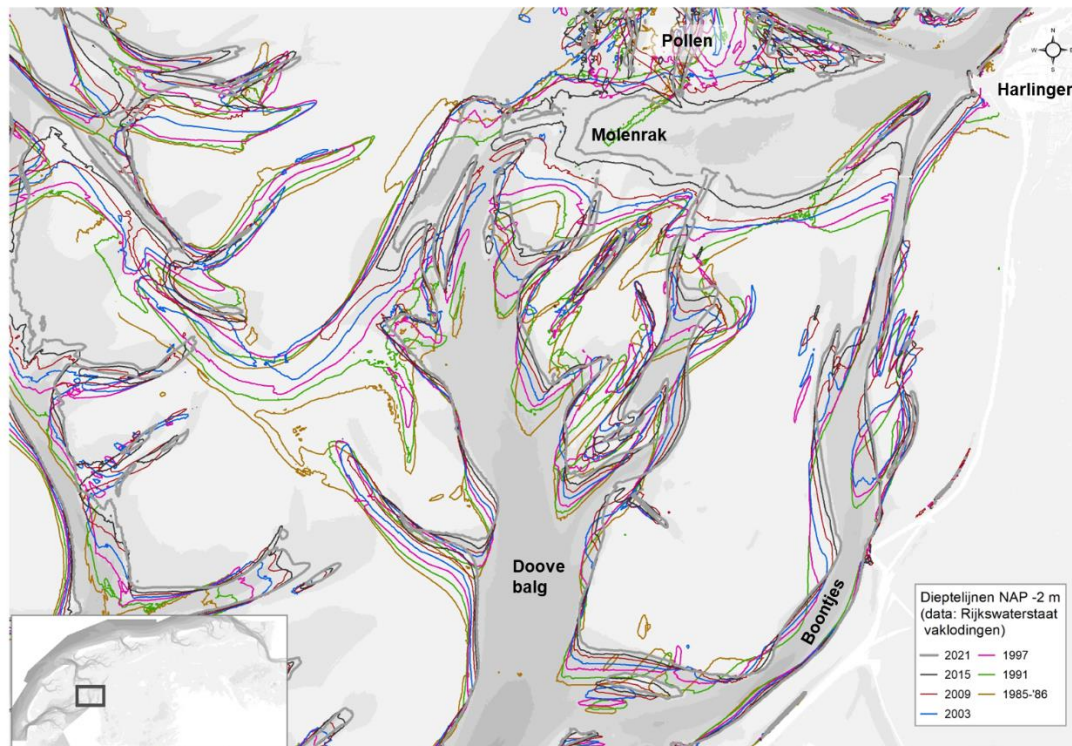
Het Balgzand wordt in vergelijking met de Lutjeswaard meer afgeschermd van de golven vanuit het zeegat. Ook ligt het gebied niet in het verlengde van de getijstrooming door het zeegat. Dit is een mogelijke verklaring voor het verschil in ontwikkeling. De spuisluisen bij Den Oever liggen voor beide gebieden even nabij. Dat maakt het moeilijk voorstelbaar dat (het 5.2 hierbovenverschil in) de dynamiek is gerelateerd aan het spuien van zoetwater.

Figuur 7-4 toont een kaart met de slibpercentages uit de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998). Het is niet mogelijk om objectief vast te stellen of in de omgeving van het Balgzand en de Lutjeswaard meer of minder zand aanwezig is dan vroeger. Onderling vergelijkbare metingen van de korrelgrootteverdelingen uit de Sedimentatlas met recente SIBES-waarnemingen (Folmer et al. 2017) is niet mogelijk, omdat het verzamelen van de monsters en de analyse op verschillende wijze heeft plaatsgevonden. Zeker voor de Lutjeswaard speelt dat er grote veranderingen in bodemligging zijn geweest. Deze veranderingen in de morfologie gaan waarschijnlijk gepaard met veranderingen van de sedimentsamenstelling op de bodem. Morfologische veranderingen bieden een mogelijke verklaring voor anekdotes over veranderingen in de sedimentsamenstelling.



## 8.4 Dynamische platen ten westen en zuidwesten van Harlingen

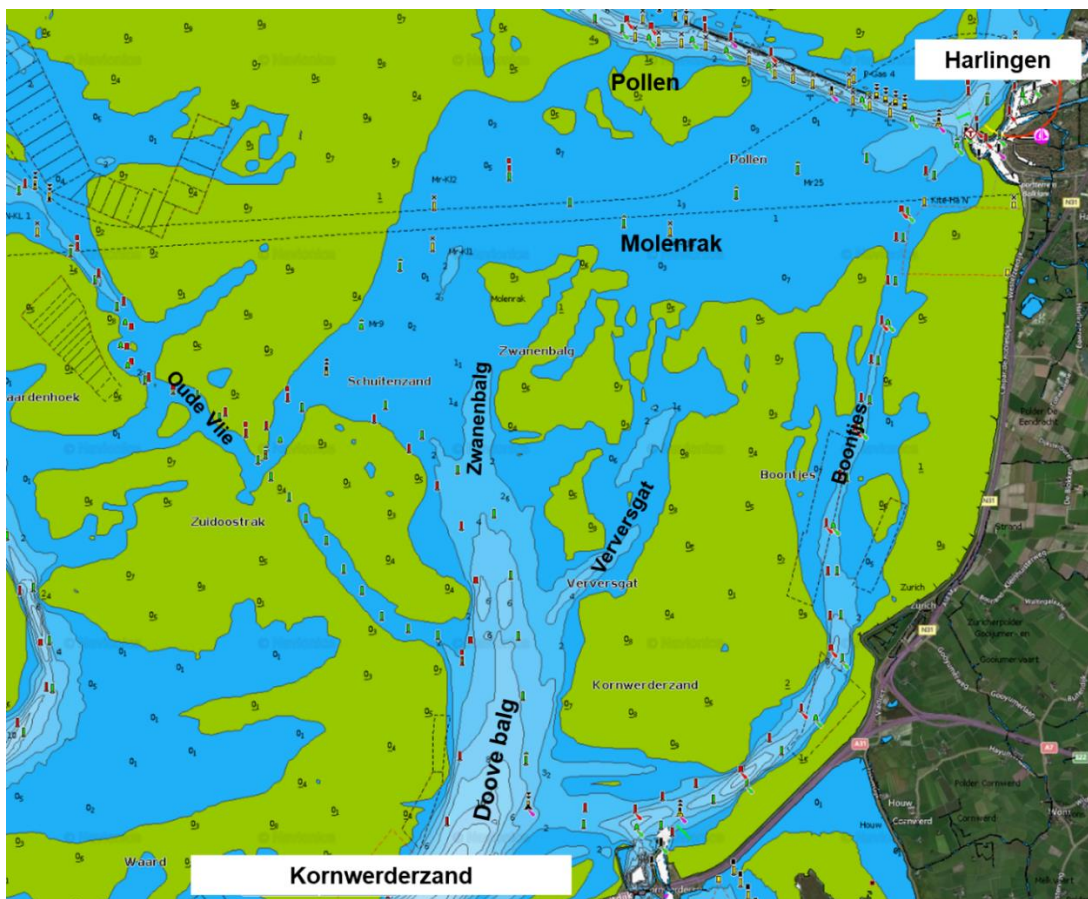
In het gebied ten zuiden en zuidwesten van de Pollendam zijn enkele kleinere droogvallende platen aanwezig en is relatief veel ondiep water. De ligging van de kleine droogvallende platen in het gebied verschilt sterk van vaklodging op vaklodging. In de kaart met de contouren van de NAP -2 m in Figuur 8-6, waarin ook de wadplaten uit een van de vaklodgingen zijn opgenomen, is zichtbaar dat een deel van de NAP -2m contouren over (een deel van) de platen ligt. In de veranderingen van de ligging van de platen is geen duidelijke trend te herkennen. De grootste verschillen treden op bij de Pollen, de platen direct ten zuidwesten van de Pollendam.



Figuur 8-6 Kaart met de NAP -2 m contour in de omgeving ten westen en zuidwesten van Harlingen.

In de geulen ten zuiden van de Pollen (Verversgat en de Zwanenbalg) zijn wel trendmatige veranderingen zichtbaar (zie de contouren in Figuur 8-6). De geulen verplaatsen vrijwel allemaal naar het noordnoordoosten. Ook de rand van het Molenrak verplaatst naar het noordoosten. Dit lijkt sterk op de veranderingen die optreden bij de geulen en platen van de Lutjeswaard. Net als bij de Lutjeswaard is de oorzaak van dit oostwaartse verschuiven onbekend.

Tussen de dynamische wadplaten en via het ondiepe water lopen verschillende betonde vaarroutes, die alternatieven vormen voor de route van Harlingen naar Kornwerderzand via de Boontjes en voor de route via de Blauwe Slenk naar Vlieland en Terschelling (Figuur 8-7). Voor de scheepvaart betekenen de veranderingen dat de betonde routes steeds aangepast worden.



Figuur 8-7 Nautische kaart van de omgeving ten zuiden en zuidwesten van de Pollendam, met de tonnen in rood en groen (bron: Navionics.com).

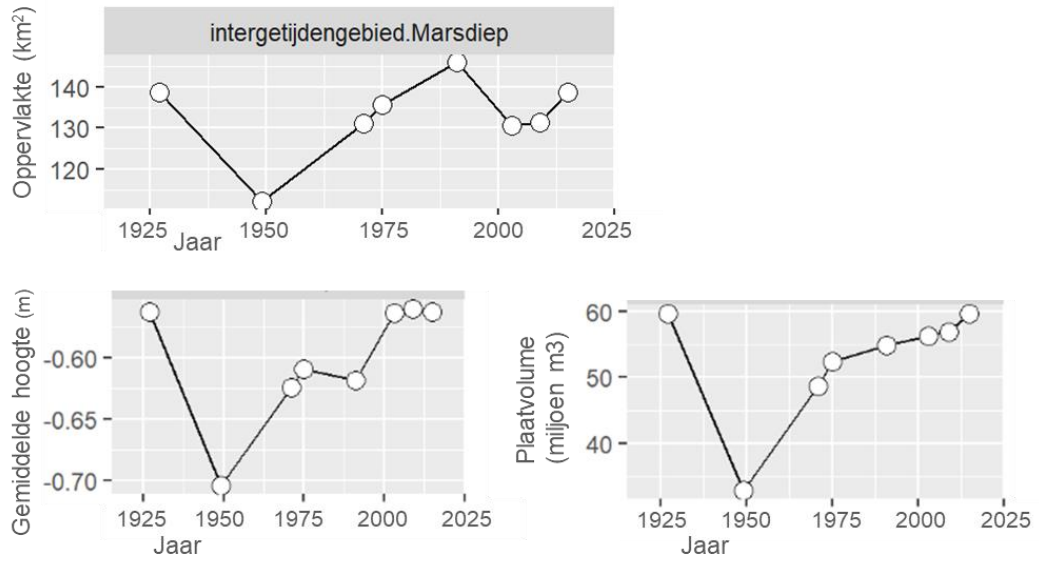
## 8.5 Morfodynamiek van de wadplaten

De ontwikkelingen van wadplaten in het gehele kombergingsgebied, zoals opgenomen in de Digitale Systeem Rapportage staan in Figuur 8-8. In paragraaf 5.2 zijn de ontwikkelingen van het plaatareaal en het watervolume in deelgebieden van het kombergingsgebied beschreven, die per deelgebied blijken te verschillen. Ook uit de beschrijving van de drie plaatcomplexen in de voorgaande paragrafen blijkt dat morfodynamiek verschilt tussen deze complexen. Het is daarom zinvol om niet alleen te kijken naar de ontwikkelingen van de plaatgebieden op de schaal van de kombergingsgebieden, maar ook te kijken naar de deelgebieden.

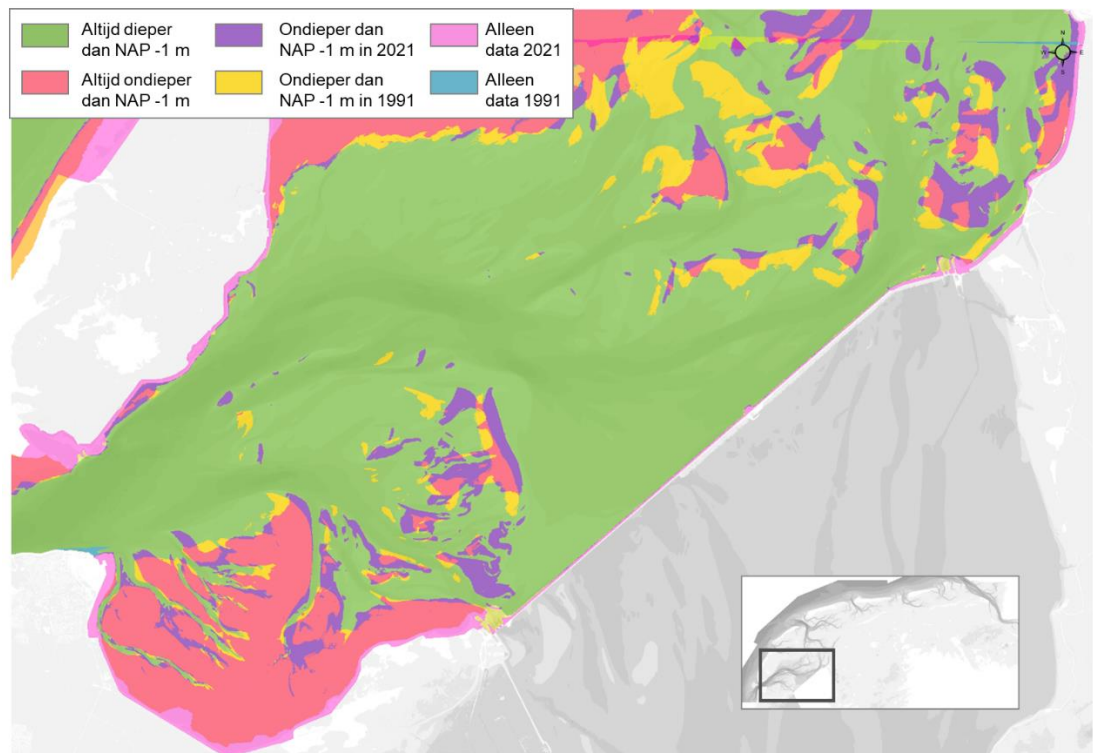
Het verschil in dynamiek is ook weergegeven in Figuur 8-9. In deze kaart is zichtbaar gemaakt welke delen van het kombergingsgebied in de periode 1991 droogvallende plaat waren, maar in de periode 2009 niet, en omgekeerd (dus delen die in 2009 droogvallend waren, maar in de periode 1991 nog niet). De grootste veranderingen vinden plaats in de omgeving van de Pollen, bij de wantijzone tussen de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Ook de platen bij de Lutjeswaard zijn verschoven. In tegenstelling tot het stabiele Balgzand.

Naast het verplaatsen van de wadplaten, dat zichtbaar is gemaakt in Figuur 8-9, vinden er ook veranderingen plaats in de hoogte van de wadplaten. Figuur 8-10 toont de hoogteverschillen op de droogvallende platen in een periode van 6 jaar (tussen 2015 en 2021). Deze kaart laat zien dat op de wadplaten zowel sedimentatie (rood), als erosie (blauw) optreedt. Voor een deel zijn de veranderingen te relateren aan de verplaatsing van de platen, zoals getoond in Figuur 8-9. Dat betreft de wadplaten met aan de ene zijde blauw, waar sprake is van erosie en aan de andere zijde rood, waar sprake is van sedimentatie. Ook het verplaatsen van een

getijdegeul in een wadplaat levert een combinatie van erosie en sedimentatie. Op andere plekken, bijvoorbeeld bij de Boontjes en de Friesche kust, overheerst sedimentatie.



Figuur 8-8 Areaal, gemiddelde hoogte en het plaatvolume voor het kombergingsgebied Marsdiep over de tijd. De getallen zijn bepaald voor de delen van de bodem tussen -1 m NAP en +1 m NAP (overgenomen uit de DSR).

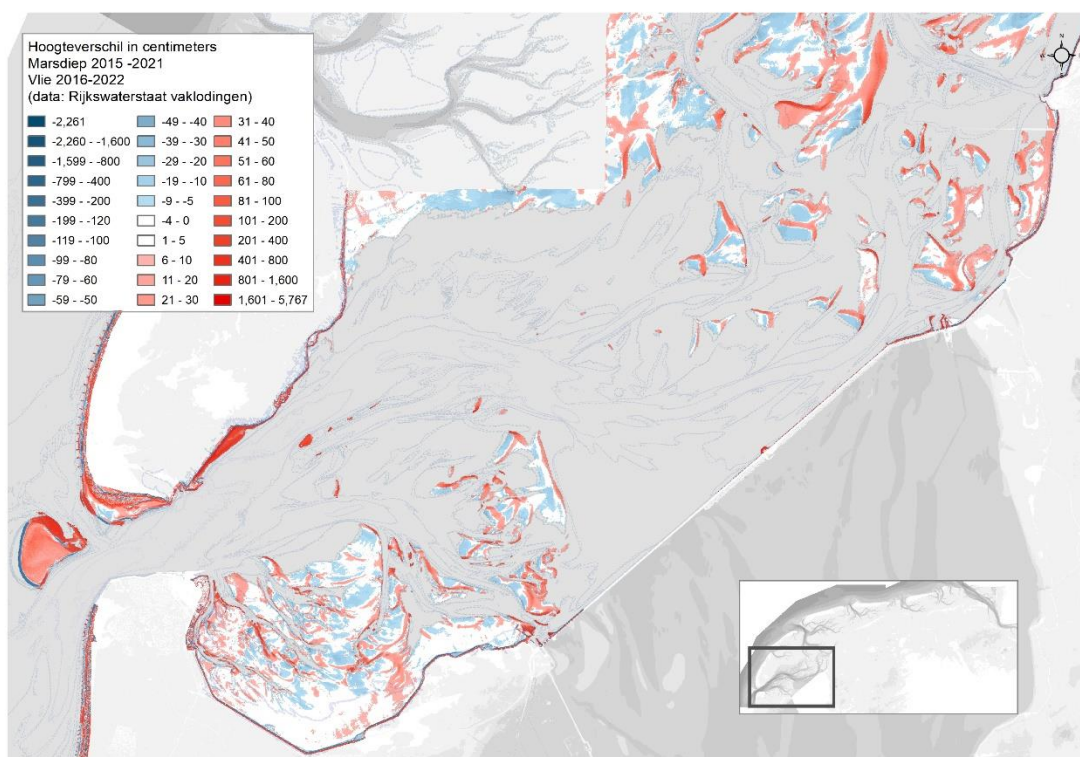


Figuur 8-9 Kaart met in paars delen die in 1991 nog droogvallende plaat waren, maar in 2021 niet meer en in geel delen die in 1991 geen droogvallende plaat waren, maar wel in 2021. Ook de gebieden die altijd droogvallen (rood) en gebieden die nooit droogvallen (groen) zijn aangegeven. Langs de randen van liggen een paar gebieden waar maar voor één opname gegevens beschikbaar waren (roze en blauw).



Bij de analyse van de morfodynamiek hierboven, met daarbij Figuur 8-9 met de verschuivingen van de wadplaten en Figuur 8-10 met de hoogteveranderingen, is steeds uitgegaan van vaste waarden voor de niveaus van hoog- en laagwater voor het hele gebied. In werkelijkheid is sprake van gradiënten in de niveaus van hoog- en laagwater in het kombergingsgebieden en de niveaus van hoog- en laagwater veranderen in de tijd. Gegevens over de ruimtelijke variatie en de variatie in de tijd van de waterstanden zijn in paragraaf 5.2 gebruikt voor de analyse van de watervolumes. Die analyses geven ook de mogelijkheid om de ontwikkelingen van de arealen van de droogvallende wadplaten te beschouwen met inbegrip van de veranderingen in de waterstanden. De gebiedsindeling die hierbij is gehanteerd, staat in Figuur 5-4. De hoog- en laagwaterstanden zijn gebruikt om de relatieve hoogteverdeling te berekenen. De relatieve hoogte loopt van 1, wat betekent dat het gebied altijd droog blijft tot 0, wat betekent dat het gebied nooit droogvalt. Voor de verschillende deelgebieden is vervolgens voor elke vaklodning berekent hoeveel van het areaal aanwezig is bij elke relatieve hoogte. De resultaten van deze analyse staan in Figuur 8-11.

De verschillen in de verdelingen over de relatieve hoogte bij de deelgebieden laten het verschil in de hoogteligging zien. Het Balgzand heeft zowel lage als hoge delen, terwijl de andere deelgebieden alleen lage delen hebben. De verschillen van de verdelingen tussen de verschillende jaren laten zien welke ontwikkelingen plaatsvinden. Daar waar de recente (rode) lijnen rechts van de oudere (blauwe) lijnen liggen heeft een uitbreiding van het areaal plaatsgevonden en dat is meest uitgesproken bij de Boontjes en ook zichtbaar bij de Zwanenbalg. Daar waar de oudere (blauwe) lijnen rechts van de recente (rode) lijnen liggen, heeft erosie plaatsgevonden en dat is bijvoorbeeld het geval bij deelgebied Texelstroom (erosie van de Vlakte van de Kerken). Bij het Balgzand zijn met name de hoger delen in omvang toegenomen. Het Scheurrak laat een afname van het areaal en van de relatieve hoogte zien. Het plaatareaal bij de Doove Balg is laag, maar het areaal is tegenwoordig behoorlijk stabiel.

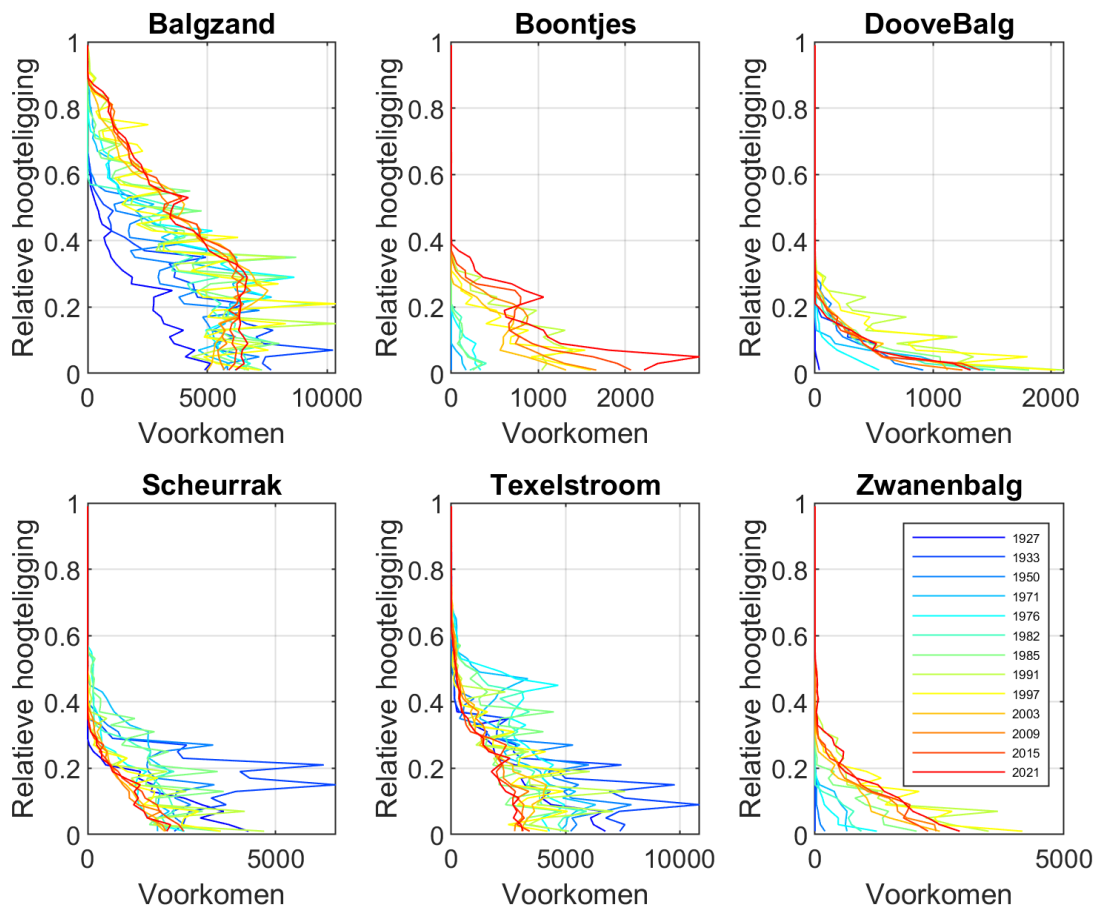


Figuur 8-10 Verschilkaart van de hoogteligging in een periode van 6 jaar (vaklodningen van 2015-2016 vergeleken met 2021-2022). Rood: sedimentatie; Blauw: erosie. Grijs: dieper dan NAP -1m in één of beide vaklodningen.



De oorzaken van de hoogteveranderingen van de droogvallende platen zijn niet altijd duidelijk. Voor sommige locaties hangt de ontwikkeling samen met veranderingen in de aan- en afstroming over de platen, op andere plekken is de sedimentatie mogelijk het gevolg van een ruime aanvoer van sediment, in combinatie met relatief rustige condities. Omdat de ontwikkelingen zo variabel zijn, is geen sprake van één generiek toepasbare verklaring voor de veranderingen in de hoogte van de platen.

De geschetste complexe ontwikkelingen betekenen dat er weliswaar gemiddelde netto sedimentatie op de droogvallende wadplaten plaatsvindt, maar dat dit niet vertaald kan worden in een lokale ontwikkeling. Er vindt lokaal ook erosie en verlaging van de wadplaten plaats. De hoogte- en areaalontwikkeling van wadplaten hebben aandacht in verband met de relatieve stijging van de zeespiegel. De consensus is dat de wadplaten in staat zijn om mee te groeien met de huidige snelheid van zeespiegelstijging (Oost et al., 1999, Van der Spek, 2018). De getoonde veranderingen van de relatieve hoogteligging, waarin de veranderingen in de waterstanden zijn meegenomen, laten zien dat per plaatgebied de ontwikkelingen van de arealen en de hoogtes sterk verschillen.



*Figuur 8-11 Ontwikkeling van de oppervlakte<sup>4</sup> van het intergetijdengebied relatief ten opzichte van het (in de tijd variërende) niveau van GLW (0) en GHW (1), volgens de methode zoals beschreven in paragraaf 5.2. “Voorkomen” op de x-as staat voor het aantal datapunten (rastercellen) binnen het gebied waarvoor de relatieve bodemligging (y-as) is berekend.*

<sup>4</sup> De piekjes die optreden in de oudere vaklodingen zijn een gevolg van de oververtegenwoordiging van de decimeter waarden in de hoogtewaarden van de wadplaten. Die oververtegenwoordiging is waarschijnlijk het gevolg van dataopslag in decimeters van de oorspronkelijke meetwaarden, gevolg door een vergridding naar centimeter waarden. Eenzelfde patroon is aanwezig in de oudere vaklodingsgegevens van de Westerschelde (LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svašek-Arcadis, 2013b).

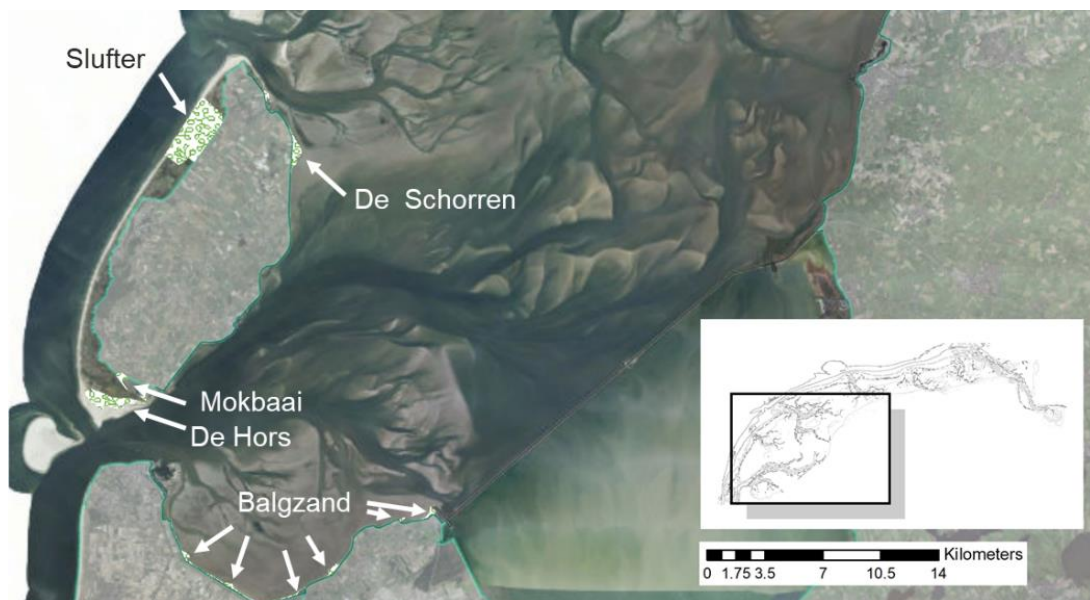
## 9 Kwelders

### 9.1 Inleiding

Kwelders zijn gebieden die begroeid zijn met kruiden, grassen of lage struiken en die regelmatig (gemiddeld 5 keer per jaar of vaker) worden overstroomd door zout of brak water (Adam, 1990). Ze strekken zich uit van het bovenste gedeelte van het intergetijdengebied tot waar stormvloedreiken. In het Waddengebied zijn drie soorten kwelders aanwezig:

1. Vastelandskwelders, voornamelijk kwelders die ontstaan zijn door de kwelderwerken.
2. 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. De enige overgebleven van deze soort in de westelijke Waddenzee is de kwelder in de Mokbaai.
3. Eilandkwelders aan de Noordzeezijde, zoals in de Slufter op Texel. Ze vallen buiten het bestek van dit rapport.

Figuur 9-1 toont de kwelders in de westelijke Waddenzee. Het betreft een zeer beperkt areaal (0,25% van de oppervlakte van het kombergingsgebied Marsdiep) van over het algemeen jonge kwelders (Essink & de Vlas, 2000). De afwezigheid van oude kwelders komt voornamelijk door de sterke landafslag die plaatsvond in de Middeleeuwen. De gebieden waar wel sedimentatie en kweldervorming plaatsvond zijn in de loop van de tijd bedijkt. Dit geldt voor de polders op Texel, waaronder de polder Eierland en de polders ten westen van Wieringen (het Koegras, Anna Paulowna Polder). Kwelderwerken zijn in de westelijke Waddenzee vrijwel afwezig. Tabel 9.1 geeft een overzicht van de kwelders zien, met de beheerders ervan kwelders.



Figuur 9-1 Kaart met de kwelders in en om het kombergingsgebied Marsdiep. De Slufter is het kweldergebied aan de Noordzeezijde van Texel en de Hors is de strandvlakte met duinen aan de zuidwestzijde van Texel. Beide worden niet in het voorliggende rapport beschouwd.

Tabel 9.1 Overzicht van de kwelders van de kombergingsgebieden Marsdiep (o.a. naar Essink & De Vlas, 2000, met bijdragen van L Kelder, Staatsbosbeheer De Kop; D. van Dijk LNH; J. Esselaar, NM; E. van der Spek, Staatsbosbeheer Texel. De grootte van de kwelders is veelal geschat.

Naam	Opper- vlak (ha)	Ontstaan	Beheer	Functie	Beheerder
<b>Texel</b>					
<b>De Schorren</b>	75	Spontane aanslibbing geholpen met rijshoutdammen	Vervangen wiepen van de rijshoutdammen	rust- en broedgebied voor vogels	Natuurmonumenten (beheert ook de 20 ha van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
<b>Karhoek, Mokbaai</b>	25	Spontaan, na aanleg stuifdijk. Waarschijnlijk in de toekomst mede in stand gehouden door op stroom zetten van slib bij opkomend tij	Extensieve beweiding met schapen	Vegetatie en landschap. Hoogwatervluchtplaats en broedgebied voor vogels;	Defensie, voor deze Staatsbosbeheer
<b>het Puntje, Mokbaai</b>	9	Spontaan, na aanleg stuifdijk	Geen	Vegetatie en landschap Deels oefenterrein.	Defensie
<b>Kwelder zuidoostelijk van weg tussen de Horsmeertjes door</b>	Wisselen door duin dynamiek	Kwelder en sluftervorming zuidoostelijk van duingebied	Geen	Vegetatie en landschap Hoogwatervluchtplaats en broedgebied voor vogels	Defensie, voor deze Staatsbosbeheer
<b>NIOZ kwelder</b>	1	Spontaan, verdwijnt deels onder Prins Hendrik-Zanddijk, er wordt een nieuwe grotere kwelder aangelegd	Geen, toekomst nog niet bepaald	Vegetatie en landschap	Nog niet bekend, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
<b>Volharding</b>	11	Spontaan	Geen	Vegetatie en landschap Hoogwatervluchtplaats en broedgebied voor vogels.	Natuurmonumenten
Naam	Opper- vlak (ha)	Ontstaan	Beheer	Functie	Beheerder
<b>Balgzand</b>					
<b>Kooihoeksc hor</b>	14	Restant oude kwelder bij dijkverzwaring aangevuld met grond. Ca. 8 jaar geleden grondlichaam en rijshoutdammen	Klepelen/maaien + nabeweiding na het broedseizoen	Hoogwatervluchtplaats en broedgebied voor vogels	Landschap Noord-Holland

		aangebracht. Aan zuidzijde natuurlijke aanslibbing			
<b>2<sup>e</sup> Schor</b>	2	Door grond van de dijkverhoging	Geen beweiding	gering, Hoogwater-vluchtplaats en broedgebied voor vogels	Landschap Noord-Holland
<b>3<sup>e</sup> Schor Ewijcksluis-schor</b>	14	Ongeveer 8 jaar geleden grondlichaam en rijshoutdammen aan gebracht. Aan zuidzijde natuurlijke aanslibbing dijkverhoging.	Klepelen/maaien + nabeweiding na het broedseizoen	Hoogwatervlucht-plaats en broedgebied voor vogels	Landschap Noord-Holland
<b>Slikhoek + rand langs zuidzijde Balgzand</b>	Ca.26	Slikhoek = spontane aanslibbing; rest door grond van dijkverhoging	Deels niets doen deels klepelen(verrieting/verruiging tegen gaan)	Hoogwatervluchtplaats voor vogels, spontane kweldervorming	Landschap Noord-Holland
<b>Naam</b>	<b>Opper-vlak (ha)</b>	<b>Ontstaan</b>	<b>Beheer</b>	<b>Functie</b>	<b>Beheerder</b>

#### Wieringen

<b>Normerven</b>	20	Zandopspuiting 1986 en daarna gerestaureerd met kaden van steenbestorting	Geen beweiding	Hoogwatervluchtplaats en broedgebied voor vogels	Staatsbosbeheer
<b>Vatrop</b>	5	Voormalige winput keileem; ingericht als vogelgebied	Geen beweiding; uitdiepen slenk i.v.m. voorkomen van verstoring	Landschap	Staatsbosbeheer
<b>Schor Den Oever</b>	8	Spontane aanslibbing	Geen beweiding	Hoogwatervluchtplaats voor vogels, vegetatie	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
<b>TOTAAL MARSDIEP</b>	<b>179</b>				

De kenmerken van kwelders verschillen, omdat de hoogte verschilt en daarmee de frequentie van overstromingen. Door het verschil in overstromingsfrequentie komen op de lagere delen andere kwelderplanten voor dan op de hogere delen. In Figuur 9-2 zijn in een schematische dwarsdoorsnede de verschillende onderdelen van de kwelder benoemd, waarbij ook de relatie met de waterstanden is aangeduid. De volgende zones worden onderscheiden:

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

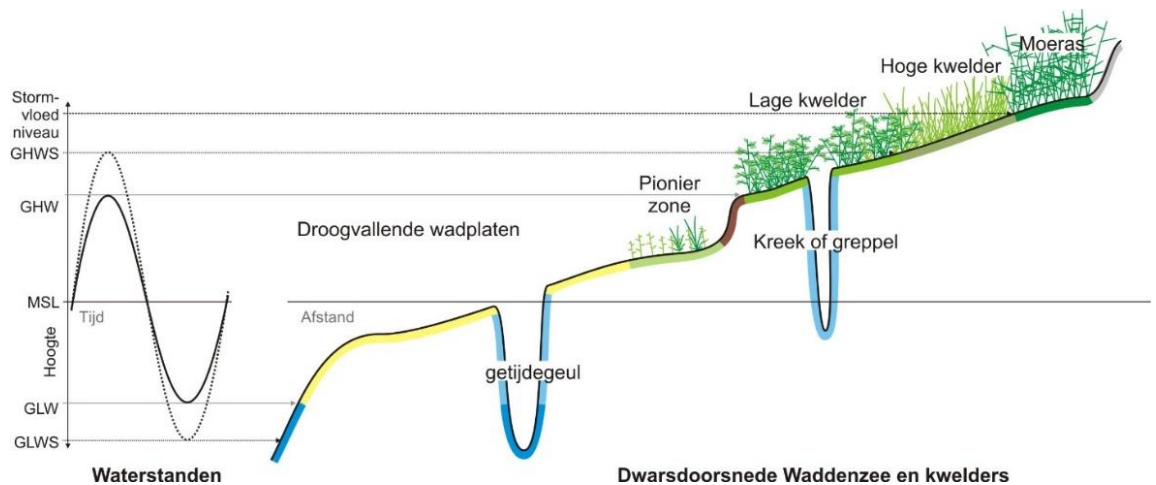
**Lage kwelder:** De lage kwelder ligt boven gemiddeld laagwater en onder het niveau van het gemiddeld hoogwater bij springtij. Hier groeien plantensoorten zoals kweldergras (*Puccinellia*) en Zoutmelde (*Halimione*). Meestal is tussen de



pionierzone en de lage kwelder sprake van snelle overgang in hoogte: de kwelderrand. Die is in sommige gevallen erosief en vormt dan een kwelderklif.

Hoge kwelder: De hoge kwelder overstroomt slechts 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 oorsprong hebben zijn het kreken, maar in kwelderwerken zijn dit vaak gegraven greppels.



Figuur 9-2 Schematische dwarsdoorsnede van een kwelder met voorliggende wadplaat en de verschillende eenheden.

## 9.2 De Schorren

De Schorren, achter de dijk van polder De Eendracht op Texel, is een ongeveer 75 ha groot kweldergebied met veel kreken. Samen met een deel van de Vlakte van Kerken vormen ze een groter reservaat van 6700 ha. Het gebied is van groot belang als rust- en broedgebied voor vogels en –met uitsluiting van excursies– gesloten voor het publiek. Op de Schorren vindt geen beweiding plaats. Op een kaart uit 1852 is een begin van een kwelder aanwezig, maar de echte ontwikkeling van de Schorren voltrok zich in de 50 jaar erna. De Schorren zijn dus ongeveer 120-160 jaar oud.

De schorren zijn niet heel veranderlijk (zie Figuur 9-3), maar zonder beheermaatregelen zouden de Schorren eroderen. Natuurlijke kwelderuitbreiding van de Schorren wordt de komende decennia niet verwacht, omdat de hoogte van aanliggende wadplaten te laag is voor de vestiging van vegetatie (Esselink et al., 2017). In 1978 zijn rijshoutendammen aangelegd ter bescherming van de schorren. Vanwege achterstallig onderhoud van de rijshoutendammen is de effectiviteit van de bescherming afgenomen (Esselink et al., 2017). Eind 2023 vindt groot onderhoud van de rijshoutendammen plaats, zodat de Schorren beter worden beschermd. Ook wordt de uitstroomopeningen van een aantal van de kreken vrijgemaakt, zodat de aan- en afstroming beter kan plaatsvinden<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Bron: <https://www.natuurmonumenten.nl/natuurgebieden/de-schorren/nieuws/duurzaam-herstel-strekdammen-de-schorren-bij-texel> (geraadpleegd op 12 oktober 2023).



Figuur 9-3 De Schorren in 2007 en 2013 (bron: Topotijdreis.nl) en de recente hoogte op basis van de AHN4 opname.

### 9.3 Mokbaai: kwelders van het Puntje en Karhoek

De Mokbaai ligt aan de zuidzijde van Texel tussen de duinen en de waterkering aan de oostzijde ervan. De Mok is het restant van de geul 'het Spanjaardsgat', die oorspronkelijk op de buitendelta lag. In de periode 1736-1749 werd deze geul aan de zeezijde afgesloten door het aanlanden van de grote Horsplaat aan de zuid-zuidwestzijde van Texel.

In de Mokbaai bevinden zich twee kwelders die qua oppervlak vergelijkbaar zijn en samen ca. 34 ha beslaan. De kwelder van het Puntje ligt bij de mond van de Mokbaai, zuidelijk van de Marinebasis.

Kwelder de Karhoek ligt aan de binnenrand tegen de duinen aan in de noordwestelijke punt van de Mokbaai. Hier bevindt zich een complete reeks van zoute pioniervegetatie. Bij de duinvoet is de invloed van toestromend zoet kwelwater relatief groot en er groeit dan ook vrij veel riet. Op deze kwelder vindt lichte beweiding met schapen plaats. De kwelders in de Mokbaai hebben een beperkte functie voor broedende en rustende vogels.

### 9.4 Balgzand tot en met Den Oever

Langs het Balgzand en langs de kust van Wieringen zijn diverse kleine kwelders aanwezig (zie zes kleine pijltjes in Figuur 9-1). De meeste zijn het gevolg van menselijke ingrepen, maar drie zijn ontstaan door natuurlijke aanslibbing.

- Kooihoekschor ligt op het Balgzand en is door spontane aanslibbing gevormd. Het is 12 ha groot en dient als hoogwatervluchtplaats en broedgebied.

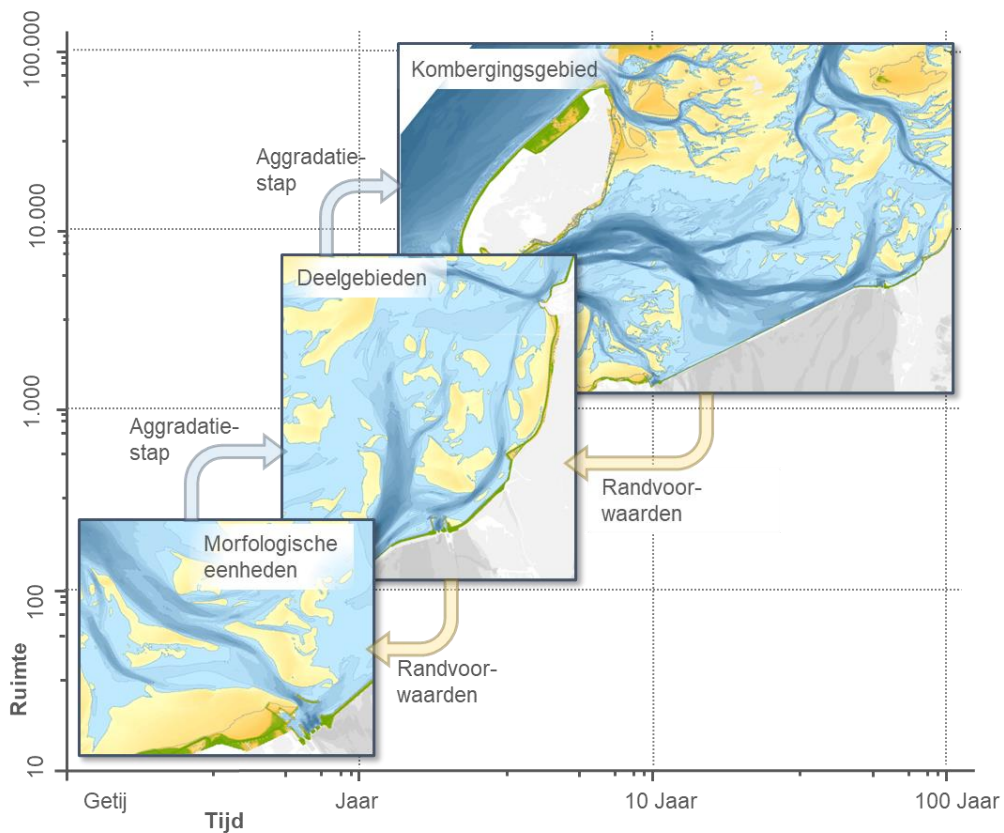
- Langs het Balgzand ontstonden in de vorige eeuw een paar kleine randjes kwelder: het 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> Balgzandschor. Bij de verhoging van de Balgzanddijk (periode 1983-1989) is dit deels weer verloren gegaan. Daarom is het 3<sup>e</sup> schor kunstmatig vergroot (Essink & de Vlas, 2000).
- Slikhoek is door spontane aanslibbing gevormd. De aansluitende kwelders langs de zuidzijde van het Balgzand zijn ontstaan op grond van de dijkverhoging. Het totale gebied is ca. 5 ha groot.
- Aan de noordzijde van Wieringen is het Normerven in 1986 en in 1994/95 heringericht, onder meer door het aanbrengen van een zandplaat van bijna 5 ha, waardoor een nieuwe kwelder kon ontstaan. Deze wordt verdedigd met steenwerk.
- Vatrop is een voormalig keileemwinningsgat nabij het dorpje Oosterland op Wieringen dat is heringericht. Daarbij is een kweldergebied ontstaan van ca. 5 ha.
- Verder is in de afgelopen decennia een kleine kwelder gevormd in de luwte van een havendam bij Den Oever.

Al deze kleine Noord-Hollandse kwelders hebben een 'normale' kwelderflora zoals die ook in grotere kweldergebieden aangetroffen wordt. De kwelders bij het voormalige eiland Wieringen zijn goed toegankelijk vanaf de dijk en hebben daardoor ook een recreatieve functie.

# 10 Conceptueel denkmodel systeemgedrag

## 10.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt geformuleerd welke morfologische ontwikkelingen plaats hebben gevonden in het kombergingsgebied en welke processen daaraan ten grondslag liggen. Dit wordt beschouwd als het conceptuele model voor de morfologische ontwikkelingen. Op basis van de morfologische ontwikkelingen wordt een doorkijk gemaakt naar de verwachte toekomstige ontwikkelingen. De morfologische ontwikkelingen worden beschouwd aan de hand van de schaalcascade (De Vriend, 1991; Cowell et al., 2003a,b). Enerzijds vormen de grootschalige ontwikkelingen van het hele kombergingsgebied de randvoorwaarden voor de ontwikkelingen op kleinere schaal en anderzijds bestaan de ontwikkelingen op de grote schaal uit de optelsom van de ontwikkelingen op de kleinere schalen.



Figuur 10-1 De schaalcascade met de voorbeelden van morfologische onderdelen van het kombergingsgebied Marsdiep, naar De Vriend, 1991 & Cowell et al., 2003a, b.

## 10.2 Ontwikkelingen Marsdiep

### 10.2.1 Ruimteschaal van het hele kombergingsgebied op een tijdsschaal van tientallen tot honderden jaren

Het relatief jonge ontstaan van het Marsdiep door in eerste instantie de vorming van de Zuiderzee, gevolgd door de abrupte aanleg van de Afsluitdijk hebben geresulteerd in een aantal specifieke eigenschappen en ontwikkelingen voor dit kombergingsgebied. De ontwikkelingen worden zeer sterk bepaald door de afsluiting van de Zuiderzee, meer dan 90



jaar geleden. De impact van deze ingreep was zo groot dat die nog steeds zeer sterk doorwerkt in de ontwikkelingen in dit kombergingsgebied.

### **Toename kombergingsvolume na afsluiting Zuiderzee**

Na de aanleg van de Afsluitdijk is sprake van een eigenstandig kombergingsgebied Marsdiep, in plaats van een Marsdiep en Vlie die onlosmakelijk waren verbonden met de Zuiderzee. Door de afsluiting van de Zuiderzee veranderde de waterbeweging in morfologische termen vrijwel instantaan. Door reflectie en resonantie van de getijdeweg door aanleg van de Afsluitdijk ontstond er een opslingering van het getij met enkele decimeters: de laagwaters werden lager en de hoogwaters werden hoger. De corresponderende toename in getijslag leidde tot een toename in het kombergingsvolume, ondanks de gigantische verkleining van het bekken. Vanwege de geschiedenis van het gebied (grootschalige afslag van veengebieden) was het gebied relatief diep en waren weinig wadplaten aanwezig. Hoewel initieel, door de verlaging van het gemiddelde laagwater een toename heeft plaatsgevonden van het plaatareaal, is daarna het areaal wadplaat afgenomen door stijging van de waterstanden (zie paragraaf 4.2.1). In vergelijking met andere kombergingsgebieden was het sublitoraal (areaal en het watervolume onder laagwater) van het kombergingsgebied Marsdiep groot.

### **Sedimentaansvoer van buiten en herverdeling sediment binnen het kombergingsgebied**

Na de afsluiting is er een grootschalige herverdeling van sediment door erosie en sedimentatie op gang gekomen, waarbij ook veel zand en slib van buiten het kombergingsgebied is aangevoerd. Omdat de hoofdgeulen nog niet waren gedimensioneerd op die grotere volumes ontstonden initieel grotere stroomsnelheden in het Zeegat van het Marsdiep en de grote geulen richting het bekken. Dit leidde tot sterke erosie van die hoofdgeulen (Texelstroom, Doove balg), zoals verderop in de paragraaf wordt toegelicht. Andere geulen waren door heroriëntatie van de stroming in het bekken overbodig geworden. Deze geulen, zoals bij de JaVaruggen en de Vlieter sedimenteerden zeer snel, door lokale herverdeling van sediment. En door de aanvoer van sediment van buiten het kombergingsgebied.

De grootschalige aanpassingen in het kombergingsgebied, die zijn ingezet na de afsluiting van de Zuiderzee, gaan nog steeds door. De snelheid waarmee de netto sedimentatie (opvulling) in het bekken plaatsvindt is wel afgenomen (Elias, 2019). Mogelijk is de snelheid van opvulling afgenomen omdat de stroomsnelheden en daarmee het sedimenttransport, zijn afgenomen naarmate de hoofdgeulen Marsdiep en Texelstroom dichterbij hun evenwichtsprofiel kwamen. De debieten door veel geulen zijn nog wel gestaag toegenomen (Grasmeijer et al, 2022). Deze ontwikkeling kan een gevolg zijn van de groei van omringende platen waardoor het getij meer en meer via geulen gaat lopen en minder over de platen.

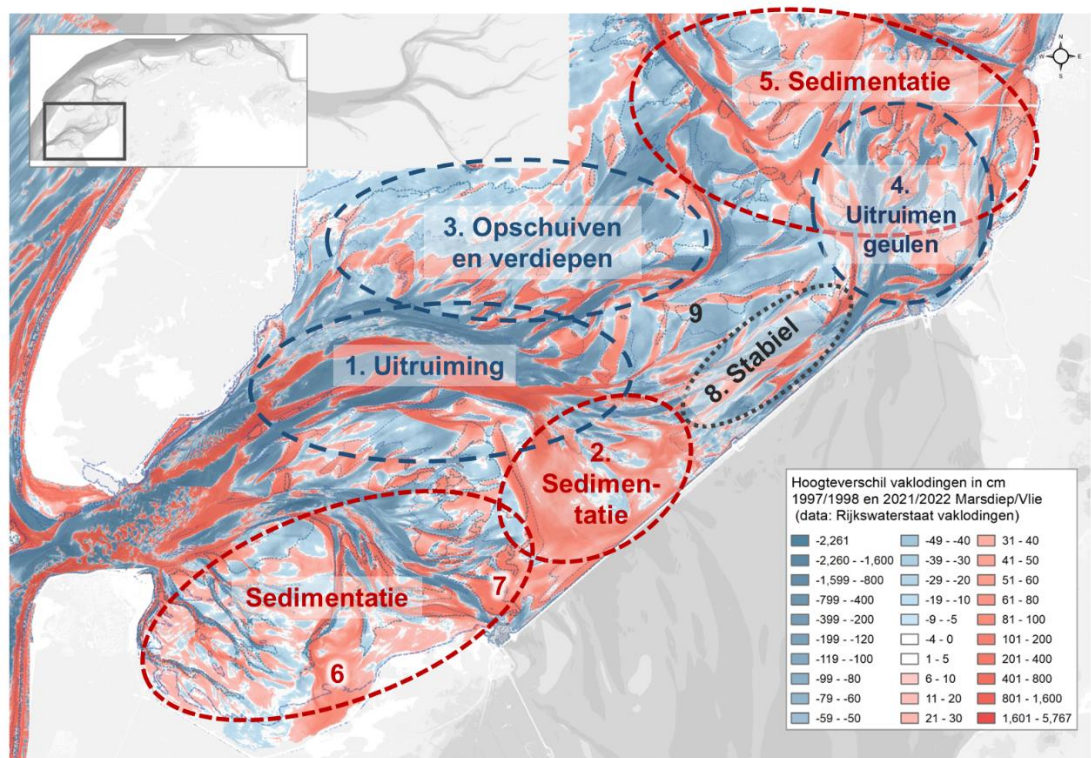
## **10.2.2 Ruimteschaal van deelgebieden in het kombergingsgebied op een tijdschaal van tientallen jaren**

In Figuur 10-2 zijn in een relatief recente verschilkaart (voor het Marsdiep 1997-2021 en voor het Vlie 1998 en 2022) de ontwikkelingen van de deelgebieden aangegeven. In de voorgaande paragraaf zijn al twee van deze veranderingen besproken, die spelen op de schaal van de deelgebieden binnen het kombergingsgebied. Dat zijn de sterke erosie van de hoofdgeul (gemarkeerd met 1 in Figuur 10-2) en de sedimentatie in de afgesneden geulen naar de Zuiderzee (gemarkeerd met 2 in Figuur 10-2). Deze ontwikkelingen vinden plaats op de schaal van de deelgebieden binnen het kombergingsgebieden, zoals aangegeven in de schaalcascade.

### **Veranderde stroomrichtingen in het kombergingsgebied Marsdiep**

De toename van het getijprisma en de heroriëntatie van de stroming in het bekken (de hoofdstroom werd niet meer de Zuiderzee in getrokken, maar werd afgebogen door de Afsluitdijk en oriënteerde zich op het oostelijkere gebied tot aan Harlingen) leidde initieel tot

sterke erosie van Marsdiep, de Texelstroom en de Doovebalg (gemarkeerd met 1 in Figuur 10-2). Het sublitorale gebied ten noorden van de Texelstroom erodeerde door toegenomen debieten en door uitbochting van de geul, waardoor mede golven vermoedelijk meer vat kregen op dat gebied (gemarkeerd met 3 in Figuur 10-2). Hierbij schuift ook de overgang van het sublitoraal naar het litoraal geleidelijk naar het noorden. Door de verruiming en heroriëntatie van de hoofdgeulen is vermoedelijk ook een steeds efficiëntere geulconfiguratie voor de vulling en lediging van het bekken ontstaan. De getijdeweg loopt daardoor met minder weerstand naar binnen, waardoor ook de getijslag is toegenomen. Daardoor is, een deel van de geulen verdiept. Naast het op het zeegat georiënteerde deel is dat ook het landwaartse uiteinde van de Doove balg en het zeewaartse deel van de Boontjes, gemarkeerd met 4 in Figuur 10-2. Door de veranderingen in de omvang en oriëntatie van de geulen en komt het laagwater tegenwoordig eerder in Harlingen aan (Grasmeijer et al. 2022).



Figuur 10-2 Verschilkaart van het Marsdiep (met een stukje Vlie) op basis van de vaklodingen van 1997 & 1998 en 2021 & 2022 (Marsdiep & Vlie, bron: Rijkswaterstaat).

### Veranderende uitwisseling water tussen Marsdiep en Vlie

Tussen de bekkens van het Marsdiep en Vlie ontstond ter hoogte van de Boontjes-Molenrak-Oude Vlie-Inschot een zone met lagere stroomsnelheden, het hydrodynamische wantij (zie Figuur 4-5). In de situatie met de Zuiderzee was geen sprake van een dergelijke zone, omdat sprake was van een heel ander soort waterbeweging (zie ook paragraaf 4.2.2). In dit gebied vond en vindt overwegend sedimentatie plaats, aangegeven met 5 in Figuur 10-2. Gestaat verzanden ook de resterende geulverbindingen tussen de beide kombergingsgebieden. De aanwezigheid van deze geulen is een duidelijk verschil met de andere kombergingsgebieden in de Waddenzee, die geen geulverbindingen over de wantijen kenden. De ontwikkelingen van de afgelopen tientallen jaren in de omgeving Boontjes-Molenrak zijn nog niet goed begrepen. Weliswaar is er goed zicht op de waargenomen veranderingen (Colina Alonso et al; 2021) en de veranderingen in de waterbeweging (Smits et al., 2022; Grasmeijer et al., 2022), maar het 'waarom' van deze ontwikkelingen is nog niet duidelijk.

### **Luwte en sedimentatie langs de vastelandskust**

Aan de randen van het bekken treedt sedimentatie op, een trend die doorloopt in het Vlie en het Borndiep, tot aan de Veerдам bij Holwerd. Het landwaartse deel van de sedimentatie die is gemarkeerd met 5 in Figuur 10-2 vormt het zuidwestelijke verlengde van deze zone van sedimentatie langs de vastelandskust. Het optreden van deze sedimentatie hangt ten minste deels samen met het veranderende stromingspatroon na de afsluiting van de Zuiderzee. Voor de afsluiting van de Zuiderzee was langs de Friese kust van Harlingen tot Workum sprake van een redelijke sterke getijdestroming. Om de aanval van de stroming op de dijk te beperken zijn vanaf Zurich tot Koehoal strekdammen aangelegd, om de invloed van de stroming te beteugelen. Na de aanleg nam de stroming sterk af en kon sedimentatie plaatsvinden. Voor de Friese kust ten zuiden van Harlingen is de bodem inmiddels zover opgehoogd, dat de sedimentatie tegenwoordig steeds meer tot intergetijdengebied gaat leiden, waar er voorheen nog nauwelijks intergetijdengebied was. Dit leidt ook tot een afname van het kombergingsvolume en daarmee het verder verondiepen van het noordelijk deel van de geul Boontjes en van de Zwanenbalg.

Bij de oostzijde van het Balgzand is sterke sedimentatie opgetreden (aangegeven met 6 in Figuur 10-2), waardoor het areaal intergetijdengebied toeneemt en het kombergingsvolume is afgenomen. Sinds de aanleg van de Amstelmeerdijk, voorafgaand aan de aanleg van Afsluitdijk, is geen doorgaande getijdestroming meer in het Balgzand. Dit gebied bevindt zich in de luwte van de Kop van Noord-Holland en lijkt zich vrij onafhankelijk van de andere gebieden in het bekken te ontwikkelen. Ten oosten van het Balgzand verplaatsen de Lutjeswaard en de andere droogvallende platen, waarbij het areaal van de droogvallende platen toeneemt (gemarkeerd met 7 in Figuur 10-2). De getijdegeul Visjagersgaatje, die de Den Oever met het Malzwin verbindt. Ligt tussen de wadplaten die in omvang toenemen. De geul versmalt en verdiept als gevolg van deze ontwikkeling. De ontwikkeling van het Visjagersgaatje is een voorbeeld van de ontwikkeling van een individueel morfologisch element, dat zich op een ruimtelijke kleinere schaal afspeelt (zie Figuur 10-1).

### **Relatief stabiele geulen parallel aan de Afsluitdijk**

Daar waar de Doove balg parallel aan de Afsluitdijk loopt (aangegeven met 8 in Figuur 10-2), verandert de omvang daarvan slechts beperkt. De omvang van de geul die direct parallel aan de Afsluitdijk ligt neemt enigszins in omvang toe. In vergelijking met de andere deelgebieden die hierboven zijn besproken, is sprake van een relatief stabiel gebied. In het sublitorale gebied ten noordwesten van dit stabiele gebied is sprake van enige erosie in het sublitoraal (aangegeven met 9 in Figuur 10-2).

#### **10.2.3 Ruimteschaal van morfologische eenheden op een tijdschaal van jaren**

In de hoofdstukken 6, 7, 8 en 9 is een verscheidenheid aan ontwikkelingen opgenomen van individuele morfologische elementen, die hier niet opnieuw worden opgevoerd.

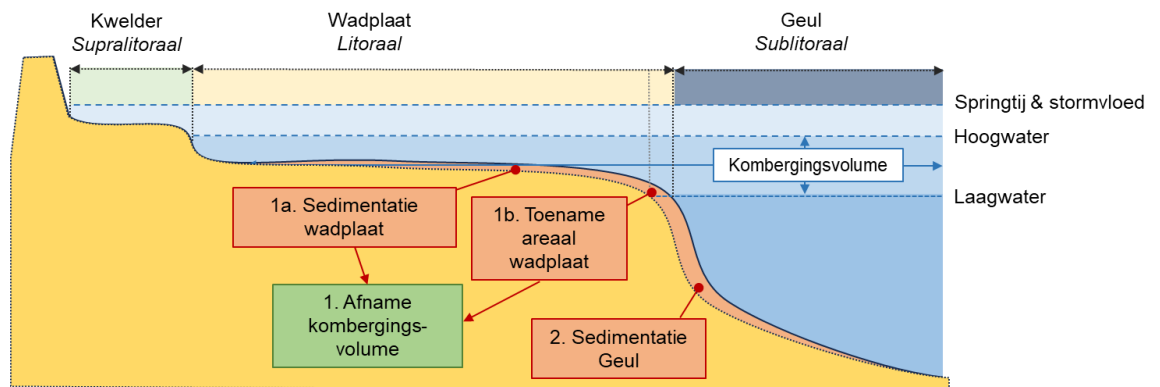
### **10.3 Basisdenkmodel voor grootschalige ontwikkelingen en aanpassingen aan het denkmodel voor het Marsdiep**

#### **Het sedimentdelende systeem**

De basis voor het denkmodel van alle kombergingsgebieden van de Waddenzee is dat van het sedimentdelende systeem, waarin de kombergingsgebieden sediment uitwisselen met de eilanden en de Noordzeekustzone en morfologische elementen (getijdegeulen, wadplaten, buitendelta) onderling sediment uitwisselen. De omvang van de getijdegeulen (uitgedrukt in hun watervolume) staan in verhouding tot de ontwikkelingen van het kombergingsvolume van het bekken (schematisch weergegeven in Figuur 6-2). Het getijdeprisma wordt bepaald door de oppervlakte van het kombergingsgebied vermenigvuldigt met de getijdeslag (het verschil tussen hoog- en laagwater) minus het sedimentvolume van de wadplaten.

Naar vrijwel alle kombergingsgebieden in de Waddenzee wordt netto sediment aangevoerd (uitzondering is het Eierlandse gat, Elias, 2019; Cleveringa & Elias, 2022). Dit komt omdat vrijwel alle bekkens van de Waddenzee door autonome ontwikkelingen, historische ingrepen en relatieve zeespiegelstijging uit evenwicht zijn waardoor per getij meer sediment in het bekken achter blijft dan weer wordt afgevoerd. Het sediment dat naar de Waddenzee wordt aangevoerd is afkomstig van buiten de Waddenzee. Het zand is afkomstig van de aangrenzende Noordzeekusten en de buitendelta en het slib wordt via de waterkolom vanuit de Noordzee aangevoerd.

In het kombergingsgebied werken sedimentatie en erosie op de platen en veranderingen in de waterstanden door in het getijdeprisma. Veranderingen in het getijdeprisma hebben gevolgen voor de omvang van de geulen. Bij een toename van het getijdeprisma, bijvoorbeeld door het stijgen van de waterstanden, zal de omvang van de getijdegeulen toenemen. Bij kleiner kombergingsvolume, bijvoorbeeld door sedimentatie op de wadplaten en een uitbreiding van het areaal daarvan, moet ook de omvang van de geulen afnemen, zoals is weergegeven in Figuur 10-3. De essentie van de evenwichtsrelaties tussen de omvang van het getijdeprisma en de omvang van de droogvallende platen en de getijdegeulen is dat de ontwikkelingen van het element doorwerkt op de andere elementen. Hier wordt niet nader ingegaan op de oorzaken voor de netto sedimentatie die in de kombergingsgebieden plaatsvindt.



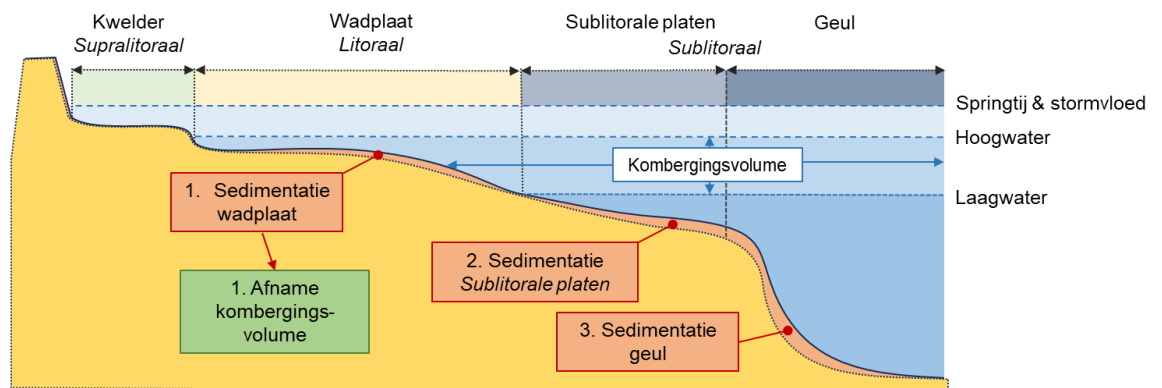
Figuur 10-3 Schematische dwarsdoorsnede “normaal” kombergingsgebied met sedimentatie in de geulen en op de platen en een afname van het komborgingsvolume.

### De rol van het sublitorale areaal in het sedimentdelende systeem

In vergelijking met het “normale” kombergingsgebied dat is weergegeven in Figuur 10-3, is het kombergingsgebied van het Marsdiep relatief diep. Het kombergingsgebied Marsdiep heeft met een groot areaal aan subtidaal plaatgebied, met een hoogteligging van ca -3 m tot -1 m NAP. Dit subtidaal plaatgebied staat permanent onder water. In deze sublitorale platen is geen sprake van duidelijke ingesneden geulvormen, in tegenstelling tot de getijdegeulen zelf. De aanwezigheid van het grote areaal sublitoraal habitat heeft invloed op de terugkoppelingen tussen sedimentatie en erosie. In een ‘normaal’ kombergingsgebied heeft de sedimentatie (of erosie) op de platen direct invloed op het komborgingsvolume, zoals zichtbaar is in Figuur 10-3 en daardoor zijn de ontwikkelingen van getijdegeul en wadplaat gekoppeld. Maar sedimentatie en erosie op sublitorale platen heeft geen invloed op het komborgingsvolume, zoals is aangegeven in Figuur 10-5. Het betekent dat bij sedimentatie of erosie in het sublitoraal geen terugkoppeling met de omvang van de geul plaatsvindt. In een ‘normaal’ kombergingsgebied de sedimentatie of erosie op de plaat, gevoed door erosie of sedimentatie vanuit de geul de doorwerking van veranderingen in de waterstanden op het komborgingsvolume compenseren. Bij de sublitorale platen is deze terugkoppeling niet aanwezig.



Een tweede gevolg van het grote sublitorale areaal is dat de gevolgen van veranderingen in de hoog- en laagwaterstanden anders worden gevoeld dan in een 'normaal' kombergingsgebied met alleen geulen en wadplaten. Zo leidt een gelijke toename van de niveaus van hoog- en laagwater (met een gelijkblijvende getijdeslag) in het sublitoraal niet tot een verandering van het kombergingsvolume, terwijl dat bij een droogvallende wadplaat wel zo is.



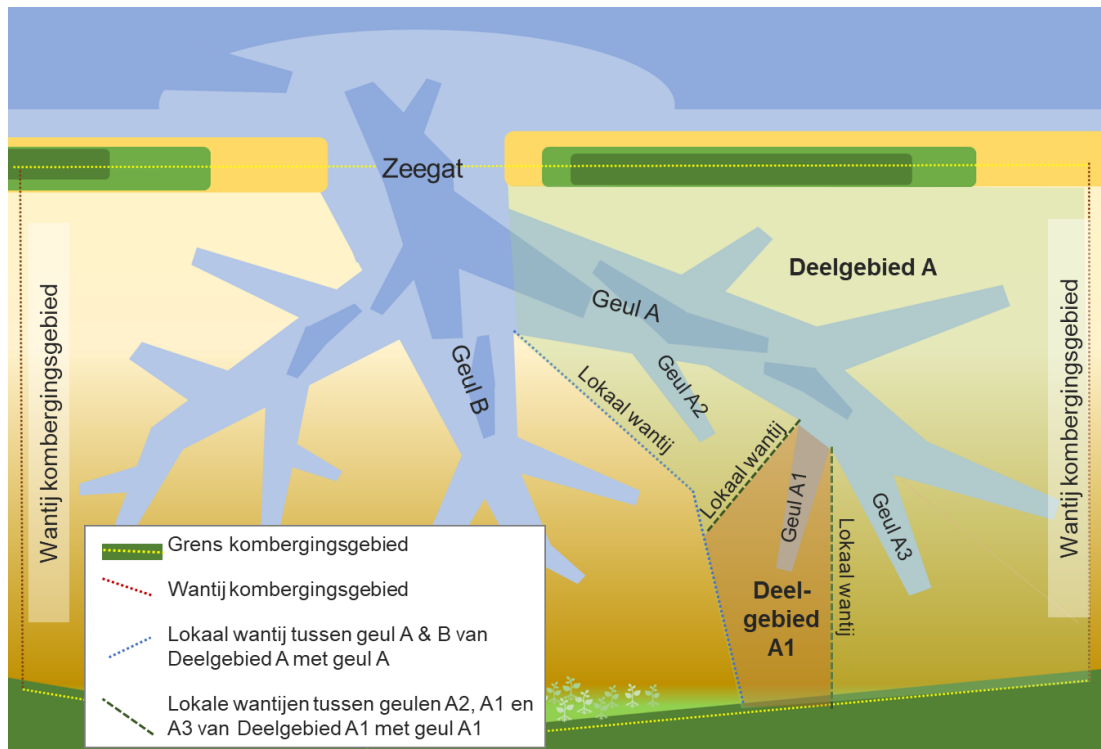
Figuur 10-5 Schematische dwarsdoorsnede kombergingsgebied van het Marsdiep met naast geulen en platen een fors areaal aan sublitorale platen.

De gevolgen van de aanwezigheid van het uitgebreide sublitorale areaal zijn dat de response op veranderingen in de waterstanden, die onder andere optreden door zeespiegelstijging, kleiner is dan in 'normale' kombergingsgebieden, maar ook dat het terugkoppelingsmechanisme dat zorgt voor de respons op veranderingen in het getijdeprisma in 'normale' kombergingsgebieden, beduidend minder sterk is in het Marsdiep.

### Deelgebieden in het kombergingsgebied

Het sedimentdelende systeem is hierboven beschreven voor het hele kombergingsgebied, zonder (Figuur 10-3) en met een uitgebreid areaal sublitorale plaatgebieden (Figuur 10-3). Dit model gaat niet alleen op voor het hele kombergingsgebied, maar ook voor deelgebieden. Ook voor deelgebieden binnen het kombergingsgebied wordt ervan uitgegaan dat de omvang van de getijdegeulen in verhouding staat tot het lokale getijdeprisma. In Figuur 10-6 is een schematische weergave opgenomen van een kombergingsgebied, met daarin deelgebieden A en daarin deelgebied A1. Het totale kombergingsgebied wordt begrensd door de wantijen tussen de kombergingsgebieden en de landwaartse grens (dijk) en aan de zeezijde de eilanden. Het deelgebied A volgt aan de buitenzijde de grenzen van het kombergingsgebied en wordt binnen het kombergingsgebied begrensd door het lokale wantij. Binnen deelgebied A ligt het deelgebied A1, dat door twee lokale wantijen wordt begrensd. De omvang van geul A, die aan- en afvoer naar deelgebied A verzorgt, wordt bepaald door de omvang van het deelgebied A. En de omvang van geul A1 wordt bepaald door de omvang van deelgebied A1. In het kombergingsgebied Marsdiep zijn er deelgebieden die ten opzichte van de andere gebieden een relatief autonome ontwikkeling vertonen. Dat geldt bijvoorbeeld voor het Balgzand. Mogelijk wordt deze relatief autonome ontwikkeling geholpen door de ligging van het Balgzand in de luwte van de Kop van Noord-Holland. In dit deelgebied is het areaal van het sublitoraal beperkt en lijkt er een directe koppeling plaats te vinden tussen toename van het areaal en de hoogte van droogvallende wadplaten en de afname van de omvang van de getijdegeulen. Ook in de omgeving aan de oostzijde van de Boontjes en bij het Molenrak lijkt een eigenstandige ontwikkeling plaats te vinden, maar in deze gebieden is nog wel een behoorlijk sublitoraal areaal aanwezig, zodat de koppeling tussen de sedimentatie en veranderingen in de omvang van de geulen minder direct is.

Binnen het kombergingsgebied vertonen deelgebieden verschillende ontwikkelingen. De onderlinge wisselwerking tussen deze ontwikkelingen via het sedimentdelende systeem hoeft niet groot te zijn, omdat de response in het deelgebied niet noodzakelijkerwijs doorwerkt op het andere gebied



Figuur 10-6 Schematische kaart van een kombergingsgebied met een vertakkend geulenpatroon en de daaraan verbonden deelgebieden

#### Andere verschillen tussen het Marsdiep en de andere kombergingsgebieden.

Naast dit verschil in het sedimentdelende systeem zijn nog andere verschillen tussen het kombergingsgebied van het Marsdiep en de andere Waddenzeebekken, waardoor de ontwikkelingen van het Marsdiep mogelijk anders verlopen dan die van de andere kombergingsgebieden. De vorm van het Marsdiep is meer langgerekt t.o.v. meer vierkant/rechthoekig en de oriëntatie is west-oost t.o.v. meer noord-zuid. De vorm en lengte van het bekken heeft onder andere invloed op de wijze waarop het getij zich voortplant in het bekken. De oriëntatie betekent dat de wind en windgolven anders aangrijpen in het Marsdiep dan in de andere kombergingsgebieden. En vanwege de overheersende rol van wind uit het zuidwesten tot noordwesten, in combinatie met de relatief grote waterdiepte, is het plausibel dat golven een grotere rol spelen in (delen van) het Marsdiep dan in de andere kombergingsgebieden.

De analyse van de ontwikkelingen van de waterbeweging onder invloed van de reeds opgetreden veranderingen in de morfologie (Grasmeijer et al., 2022) en de waarnemingen aan de waterstanden in het bekken (zie paragraaf 3.1) laten zien dat de morfologische veranderingen in het Marsdiep duidelijke gevolgen hebben gehad voor de voortplanting van het getij. De veranderingen in het getij hebben op hun beurt weer gevolgen voor het kombergingsvolume van het Marsdiep en in de verschillende deelgebieden. Dit maakt de relatie tussen waterbeweging en de morfologie nog complexer in het Marsdiep.

Ten opzichte van de andere kombergingsgebieden kent het Marsdiep een grote aanvoer van zoetwater, vanuit de spuisluisen in de Afsluitdijk. De omvang van de zoetwateraanvoer varieert,

zoals is beschreven in paragraaf 0. Bij hogere afvoeren leidt het spuien van het zoete water tot een gravitatiecirculatie (ook wel estuariene circulatie genoemd), die merkbaar is tot in het zeegat (Elias, 2006; Buijsman & Ridderinkhof, 2007). Daarbij stroomt het zoete water aan het oppervlakte naar buiten, terwijl aan de bodem een stroming op gang komt in de richting van het bekken. Deze circulatie draagt bij aan een extra netto import van slib.

Ten slotte wordt herhaald (zie paragraaf 4.2.2) dat de overgang van het Marsdiep naar het Vlie een andere karakter heeft dan de normale wantijen tussen de kombergingsgebieden. Door de aanwezigheid van verschillende getijdegeulen en sublitorale plaat heeft de overgang tussen Vlie en Marsdiep een meer open karakter. Ook bij lagere waterstanden is uitwisseling van water met sediment tussen Marsdiep en Vlie mogelijk, terwijl normale wantijen dan droogvallen. Niet alleen is hierdoor meer uitwisseling van water en sediment tussen Vlie en Marsdiep mogelijk, maar die uitwisseling is ook nog eens complexer. Windgedreven stroming kan de richting van het watertransport omkeren (Ridderinkhof, 1990; Matute, 2014). Bij hoge spuiafvoeren vanuit het IJsselmeer kan de zoetwaterbel richting de bekkens van Vlie en Ameland worden geblazen, waardoor de stroming nog complexer wordt.

### 10.3.1 **Denkend aan de toekomst**

Op basis van de beschrijving van de ontwikkelingen op de verschillende ruimteschalen in paragraaf 10.2 en het aangepaste sedimentdelende systeem met de andere aspecten van het denkmodel wordt in de paragraaf een korte vooruitblik gepresenteerd van de verwachte morfologische ontwikkelingen.

Op de schaal van het hele kombergingsgebied is de komende decennia sprake van een een relatief diep gebied, met een groot areaal aan sublitoraal. De accommodatieruimte waar sediment kan worden afgezet, blijft daardoor beduidend groter dan de aanvoer van sediment. Bij de huidige snelheid van zeespiegelstijging wordt netto meer sediment aangevoerd dan nodig is voor het bijhouden van de zeespiegelstijging. Daardoor verandert geleidelijk het karakter van het gebied, doordat het areaal droogvallende wadplaten toeneemt en het areaal sublitoraal afneemt. Bij hogere snelheden van zeespiegelstijging gaan die veranderingen langzamer, omdat dan steeds meer sediment nodig is voor het bijhouden van de zeespiegelstijging. Het zal nog heel lang (honderden jaren) duren voordat het Marsdiep een vergelijkbare hypsometrie heeft als de andere kombergingsgebieden.

De ontwikkelingen in de deelgebieden van het kombergingsgebied verschillen (zie Figuur 10-2). Het ligt in de lijn der verwachting dat die ontwikkelingen op een vergelijkbare wijze verder gaan, indien de snelheid van zeespiegelstijging niet heel sterk toeneemt. Het deelgebied Balgzand is al ver heen opgevuld met sediment. De omgeving van de Lutjeswaarden, ten oosten van het Balgzand kan nog verder verondiepen en het is plausibel dat deze verondieping zal gaan plaatsvinden. Dat betekent ook dat de omvang van de geulen voor de aan- en afvoer van water naar en uit het gebied, verder zal afnemen. Het andere gebied waar al volop sedimentatie optreedt, die ook in de toekomst zal doorzetten, is de omgeving rond de Boontjes bij Harlingen en bij het Molenrak. Ook hier zal naar verwachting de omvang van de geulen afnemen. Daarbij past de kanttekening dat de voorplanting van het getij wel aan het veranderen is, waarbij aan de zuidzijde van de Boontjes de omvang van de geul nog zal toenemen. De sedimentatie in het sublitorale gebied van de JaVaruggen zal in de toekomst naar verwachting ook doorgaan, maar dit levert geen direct terugkoppeling op met veranderingen in de omvang van de getijdegeulen. Voor het sublitorale gebied van de Hanenkammen, ten zuiden van de Vlake van de Kerken wordt ook een vergelijkbare ontwikkeling verwacht, waarbij enige erosie optreedt. De heroriëntatie van de grootste geul Texelstroom - Doove Balg is een ontwikkeling die samengaat met veranderingen in de voorplanting van het getij. Het lijkt waarschijnlijk dat deze ontwikkeling nog verder kan doorzetten. Dat geldt ook voor de netto sedimentatie bij de geulen over de wantij zone tussen Marsdiep en Vlie. Dit betekent dat de (bruto) uitwisseling van water en sediment tussen de bekkens mogelijk zal afnemen.

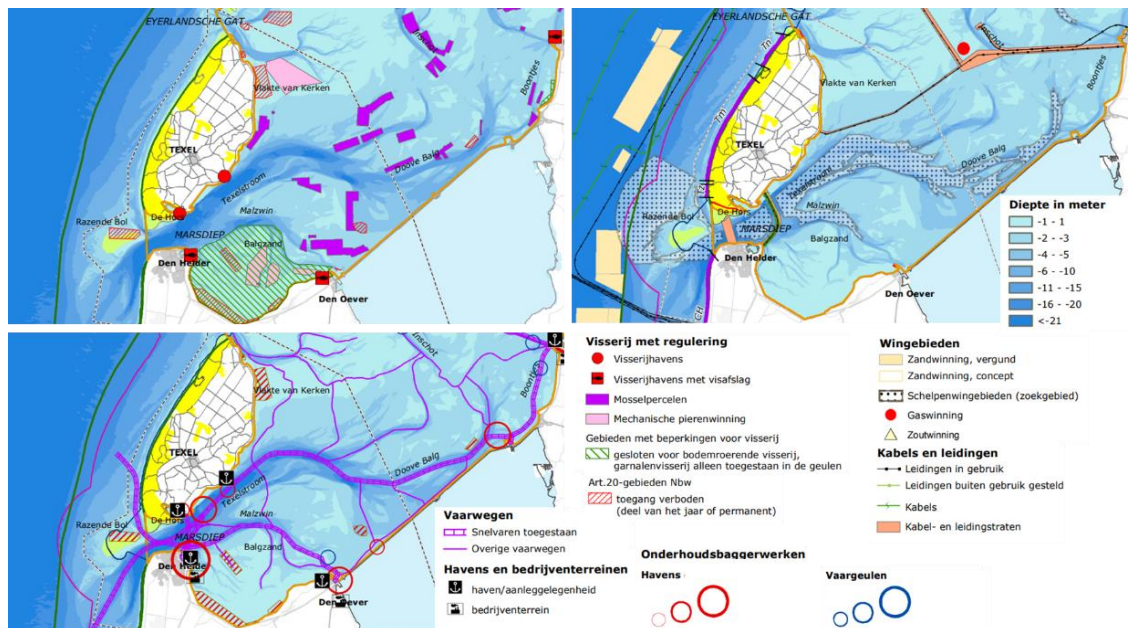
Het gevolg van de optelsom van deze verwachte toekomstige ontwikkelingen is dat in het kombergingsgebied het belang van de grootste geul toeneemt en de bekkenvorm toegroeit naar de trechtervorm van een estuarium. Omdat de voorplanting door het getij ook verandert als gevolg van de morfologische veranderingen en dat weer gevolgen heeft voor de kombergingsvolumes en daarmee voor de omvang van de getijdegeulen, is sprake van verschillende complexe terugkoppelingen. Juist voor het kombergingsgebied Marsdiep is het daarmee lastig om voorspellingen te doen over de toekomstige ontwikkelingen.



# 11 Relatie morfologie en gebruiksfuncties

## 11.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft de belangrijkste verbanden tussen de morfologie van het kombergingsgebied, zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken en de verschillende gebruiksfuncties. Een aantal van de gebruiksfuncties is in getoond in Figuur 11-1. In het voorliggende rapport is in dit hoofdstuk een beknopte beschrijving opgenomen van verschillende gebruiksfuncties. Voor nadere interpretatie of advisering aan beleid en beheer bestaan andere trajecten.



Figuur 11-1 Overzichtskaarten met enkele gebruiksfuncties, linksboven visserij, rechtsboven civiele werken en economisch gebruik en linksonder havens en vaarwegen (bron: Natura 2000-beheerplan Waddenzee; Periode 2016-2022, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

## 11.2 Veiligheid tegen overstromingen

Rond de kombergingsgebieden zorgen dijken en andere waterkeringen voor bescherming. Op moment van schrijven zijn verschillende versterkingsprojecten uitgevoerd (o.a. bij Den Oever, de dijkversterking op Texel, inclusief de Prins Hendrik zanddijk en de Afsluitdijk) of in uitvoering (de sluizencomplexen van de Afsluitdijk). De Prins Hendrik zanddijk is een bijzondere vorm van dijkversterking. Op deze locatie is een drie kilometer lange zanddijk in de Waddenzee voor de dijk aangelegd.

Met betrekking tot dijkveiligheid worden de twee belangrijkste typen mesoschaal-ontwikkelingen besproken, migrerende geulen en aangroeiende voorlanden, inclusief de locaties waarop ze in de nabije toekomst actueel kunnen worden (Figuur 11-2).

### 11.2.1 Dijkstabiliteit in relatie tot geulmigratie en ontgronding

Een geul vlakbij een waterkering kan een waterkering 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

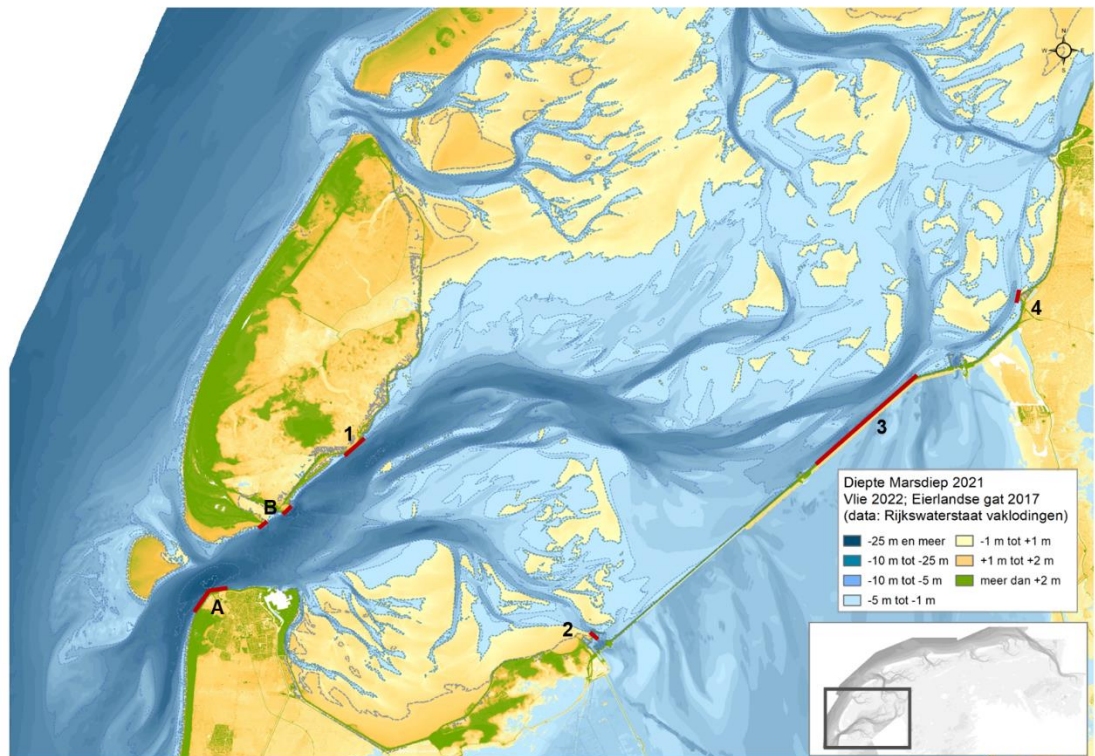
ligt wordt door de beheerder steeds gecontroleerd of deze nog voldoet, of dat onderhoud (aanvullingen) nodig zijn.

Figuur 11-2 toont drie plaatsen waar sprake is van getijdegeulen die dicht tegen de waterkering aanliggen en waar de geulwanden zijn bestort. Dit is het geval bij Huisduinen aan de Kop van Noord-Holland (A) en bij 't Horntje op Zuid Texel (B).

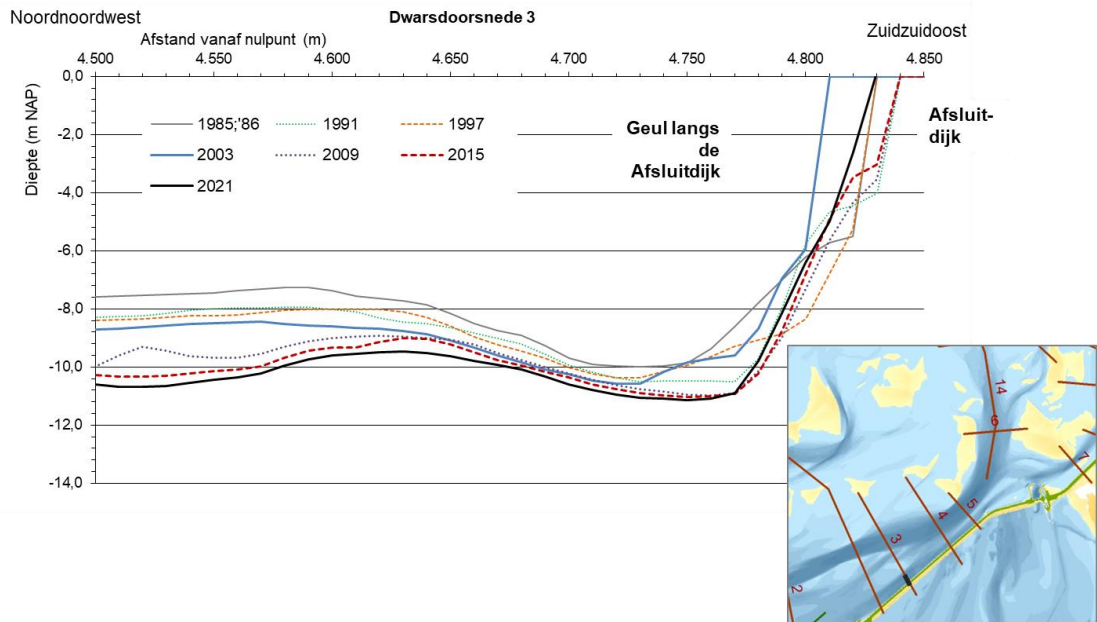
Er zijn nog vier andere locaties waar (nrs. 1 - 4 in Figuur 11-2) een geul nabij een dijk ligt en waar dit in de toekomst een stabiliteitsvraagstuk zou kunnen veroorzaken.

1. De Texelstroom bij de dijk op Texel ten noordoosten van de Prins-Hendrikzanddijk tot de haven van Oudeschild;
2. Het Visjagersgatje, nabij de havendam van Den Oever;
3. De Afsluitdijk, ten noordoosten van de werkhaven bij Breezanddijk;
4. De Waddenzeedijk ten noordoosten van Zurich;

Bij de locaties 2 en 3 (Visjagersgatje nabij Den Oever en Afsluitdijk, ten noordoosten van de werkhaven bij Breezanddijk Figuur 11-3) blijkt dat de diepte van de geul is toegenomen en dat de positie van de geulwand varieert. Hierdoor is niet uitgesloten dat er een toekomstig risico is voor de dijk. Locatie 1, nabij de Texelstroom, lijkt dit risico niet te hebben. De situatie is van oudsher zeer stabiel, mogelijk door de aanwezigheid van erosieresistente lagen in de ondergrond. Bij de locatie 3 neemt de omvang van de getijdegeul af, waardoor de invloed ervan afneemt. Wel is de diepte van de ontgrondingskuil bij Zurich, direct onder de dijk, de afgelopen jaren toegenomen.



Figuur 11-2 Vraagstukken rond de veiligheid.



Figuur 11-3 Dwarsdoorsnede 3, loodrecht op de Afsluitdijk, door de geul parallel aan de Afsluitdijk (locatie in inzet).

### 11.2.2 Sedimentatie van het voorland en belasting van de waterkering

Hoe sterk een dijk moet zijn wordt mede bepaald door de golfaanval. 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. Hoe hoger en uitgestrekter het is, des te lager de golven. In de westelijke Waddenzee liggen, in tegenstelling tot de oostelijke Waddenzee, vrijwel geen kwelders die als voorland fungeren. Uitzonderingen zijn de kwelders bij Westhoek, het kleine kweldertje 't Oeverse Schor (noordelijk van Den Oever), smalle strookjes op het Balgzand en de kwelders van de Mokbaai tegen de Petten aan<sup>6</sup>. Zie ook de omschrijvingen in paragraaf 9.3 en 9.4. De beschreven ontwikkeling is relatief langzaam en geleidelijk geweest. De consequentie was dat de maatgevende golfaanval op sommige waterkeringen afnam. De systematiek van de beoordeling van de waterkering biedt voldoende mogelijkheden om de veranderingen in belasting van de waterkering door morfologisch veranderingen mee te nemen.

### 11.2.3 Kustbeheer

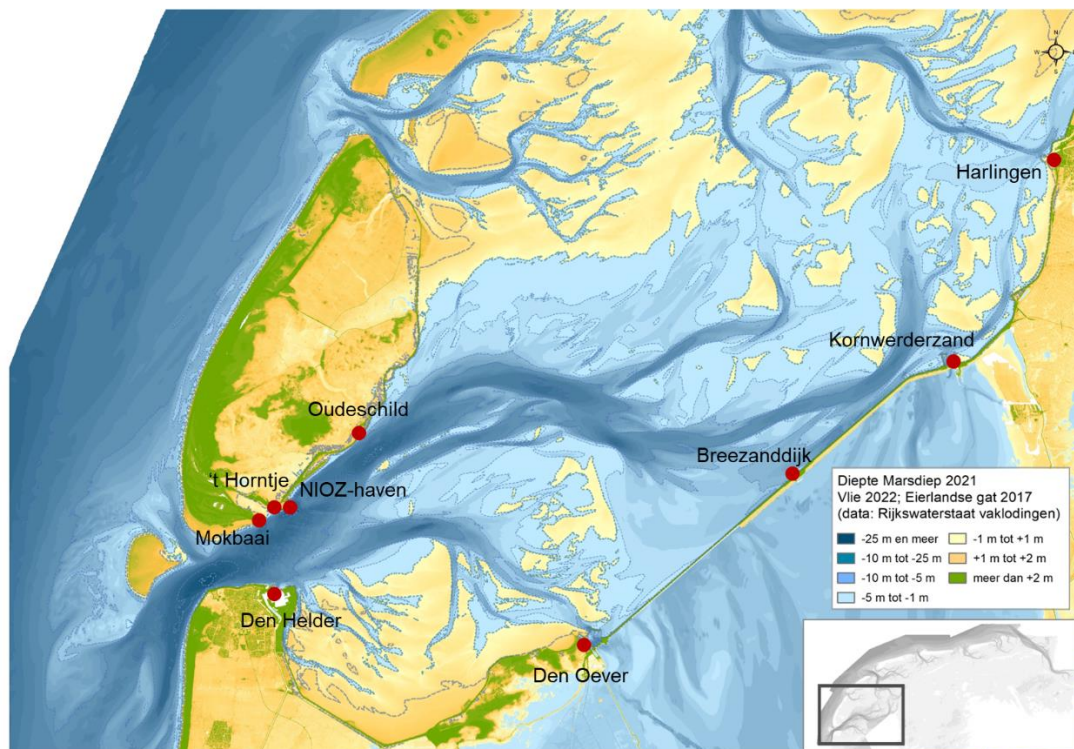
De aanvoer van zand naar het kombergingsgebied vanaf de kust leidt tot een achteruitgang van de kustlijn (zie bijvoorbeeld Taal et al, 2023). Dit is de reden dat omvang van die zandaanvoer veel aandacht krijgt vanuit het kustbeheer- en -beleid. Het Marsdiep is hierbij altijd een belangrijk aandachtsgebied, omdat de grote sedimentvraag na de afsluiting heeft geleid tot duidelijke achteruitgang van de kustlijn, onder andere op Texel. Omdat het Marsdiepbekken door de afsluiting van de Zuiderzee nog lang niet in evenwicht is zal hier nog zeer veel sedimentatie gaan plaatsvinden. De snelheid en hoeveelheid waarmee deze sedimentatie plaatsvindt is belangrijk voor de kustlijn zorg, omdat die sedimentatiebehoefte in de Waddenzee leidt tot kusterosie en daarmee bepalend is voor de zandbehoefte van de kust.

<sup>6</sup> Met als bijzonderheid dat de kleilaag die daar op de moddervlakte en in de kwelder tot afzetting is gekomen mee wordt gewogen bij de beoordeling van de stabiliteit van de aanliggende zanddijk.



### 11.3 Bereikbaarheid: vaarwegen en havens

Rond het kombergingsgebied Marsdiep liggen verschillende havens, waarvan de haven van Den Helder de grootste is. Verschillende gemarkeerde vaargeulen in het kombergingsgebied verbinden de havens en de zeegaten (Figuur 11-4). Via de sluisen in de Afsluitdijk bij Den Oever en Kornwerderzand staan de vaargeulen in verbinding met het IJsselmeer. In het verlengde van het Marsdiep ligt ook de haven van Harlingen in het kombergingsgebied Vlie. Gebruikers van de havens en vaargeulen zijn veerdiensten, beroepsvaart en recreatievaart. Alle havens en enkele delen van vaargeulen worden onderhouden door deze te baggeren. Het opgebaggerde sediment wordt in de Waddenzee verspreid, op daarvoor aangewezen verspreidingslocaties. De keuze voor deze locaties is mede gebaseerd op de morfologie. Soms worden de locaties verplaatst, vanwege opgetreden en/of verwachte morfologische veranderingen (de Wit & Verheijen, 2022).



Figuur 11-4 Vraagstukken op het gebied van bereikbaarheid bij de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie.

Het aantal locaties waar in het kombergingsgebied van het Marsdiep wordt gebaggerd voor het op diepte houden van de vaargeulen is beperkt tot twee (van der Vegt & Cleveringa, 2022). In het Visjagersgaatje wordt gebaggerd op de drempel, om de bereikbaarheid van de haven en schutsluisen bij Den Oever op orde te houden. De baggervolumes op deze drempel zijn relatief beperkt en stabiel in de afgelopen jaren. In de Boontjes, op de overgang van het kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie wordt op de drempel gebaggerd. Bij de Boontjes is sprake van een zeer sterke toename van het baggerbezwaar in de afgelopen jaren (zie paragraaf 6.5).

Niet alle gemarkeerde vaarwegen in het kombergingsgebied worden op diepte gehouden door baggeren. Zo wordt in de geulen Inschot, Oude Vlie en Zuidoostrak, die verbindingen vormen met het Vlie, niet gebaggerd. Het gebruik van deze geulen als vaarweg staat steeds verder onder druk door de afname in diepte en breedte. Ze worden, afhankelijk van de diepgang, alleen rond hoog water gebruikt. De bereikbaarheid van het Zeegat van het Vlie, inclusief Vlieland en Terschelling, vanaf het kombergingsgebied Marsdiep en het IJsselmeer is lastiger



geworden. Voor dieper stekende schepen is de route via Doove Balg-Boontjes-Blauwe Slenk de enige betrouwbare route.

## 11.4 Natuur

In vergelijking met de andere kombergingsgebieden van de Nederlandse Waddenzee wordt het Marsdiep gekenmerkt door een groot areaal dat niet droogvalt. Dat areaal bestaat uit getijdegeulen en de sublitorale platen, zoals beschreven in hoofdstuk 7. Het areaal droogvallende delen (wadplaten) is beperkt in verhouding tot de delen die niet droogvallen en het areaal aan kwelders is zeer klein. Deze situatie is het gevolg van de historische ontwikkeling van de Zuiderzee, dat zich geologisch gezien relatief jong heeft ontwikkeld als getijdebekken en lagune/estuarium. In 1932 heeft de Afsluitdijk voor zeer wezenlijke veranderingen heeft gezorgd in de waterbeweging en het sedimenttransport.

In de gehele westelijke Waddenzee is het areaal kwelders beperkt (zie hoofdstuk 9). Het grootste areaal ligt in de Schorren op Texel (Figuur 9-1). De reden voor het beperkte areaal aan kwelders ligt in de historie van het gebied, die anders is dan dat van de oostelijke Waddenzee. Veel van het oorspronkelijke gebied van deze kombergingen was erosief en leidde niet tot kweldervorming. De gebieden waar wel sedimentatie en kweldervorming plaatsvond zijn in de loop van de tijd bedijkt. Dit geldt voor de polders op Texel, waaronder de polder Eierland en de polders ten westen van Wieringen (het Koegras, Anna Paulowna Polder).

Lokaal is er nu autonome uitbreiding van het kwelderareaal. Misschien kan op het Balgzand, ten westen van het voormalige eiland Wieringen in de toekomst ook kweldervorming gaan plaatsvinden, als vervolg op de sedimentatie die daar heeft plaatsgevonden (zie 8.2). Andere autonome nieuwvorming of uitbreiding van kwelders wordt niet verwacht. Wel kan met menselijke ingrepen het areaal kwelders worden vergroot. Dit wordt overwogen bij de Schorren (paragraaf 9.2).

Het areaal kwelders in de westelijke Waddenzee zal beperkt blijven, evenals het areaal hooggelegen platen. Dit betekent dat alle functies die zijn verbonden aan kwelders en hooggelegen platen, zoals rusten en broeden door vogels en rusten, werpen en zogen door zeehonden, beperkt worden ingevuld in de westelijke Waddenzee. Alleen door in te grijpen in de autonome ontwikkelingen, bijvoorbeeld door het aanleggen van broedeilanden en het bevorderen van de aangroei van kwelders, kunnen deze functies worden uitgebreid. Er loopt op het moment een initiatief van de vogelbescherming om te verkennen of ergens in het Marsdiep een vogelbroedeiland te realiseren is.

Een van de ontwikkelingen ten bate van de natuurfunctie van de Waddenzee, het IJsselmeer en de wateren die daar mee in verbinding staan is de realisatie van de [Vismigratierivier](#) in de Afsluitdijk. Ten zuidwesten van de suizen bij Kornwerderzand wordt een doorgang aangelegd door de Afsluitdijk, met een watergang met ruimte voor een geleidelijke zoet-zout overgang. Deze doorgang kan gebruikt worden door diadrome vissen, die van zoet naar zout migreren of omgekeerd.

## 11.5 Overige gebruiksfuncties

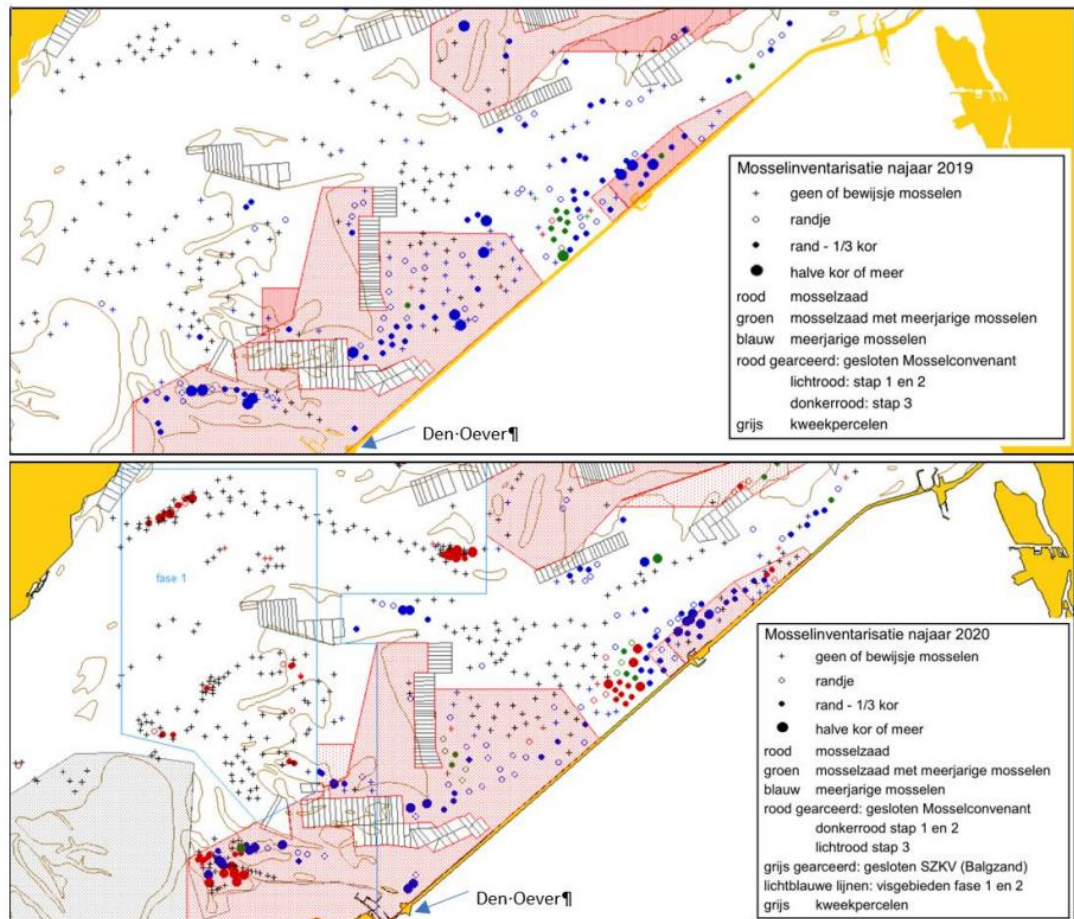
We beperken ons tot twee functies die een duidelijke relatie hebben met de morfologie.

### 11.5.1 Mosselpercelen en -cultuur en mosselzaadinvanginstallaties (MZI's)

Mosselpercelen zijn aangewezen gebieden in het sublitoraal waar mosselkwekers jonge mosselen (mosselzaad) laten uitgroeien tot volwassen mossels. Mosselzaadinvang-installaties

zijn aan drijvers opgehangen touwen of netten, waaraan mossellarven zich vestigen. De mossellarven groeien aan de installaties uit tot mosselzaad, dat door de mosselkwekers van de installaties wordt afgehaald en op de kweekpercelen wordt neergelegd. Voor deze drijvende constructies zijn locaties aangewezen in het sublitoraal.

De mosselpercelen zijn aangegeven in Figuur 11-5. In deze kaarten zijn ook de natuurlijke mosselvoorkomens aangegeven. De mosselpercelen liggen in zeer verschillende gebieden, waaronder meer dynamische gebieden nabij de geulen, maar ook minder dynamische gebieden bij de Java-ruggen. De Hanenkammen zijn niet in gebruik als mosselperceel, mogelijk vanwege de dynamiek van deze gebieden.



Figuur 11-5 Kaart met de mosselpercelen (gearceerde vakken) in het kombergingsgebied Marsdiep en de verspreiding van mosselen in het sublitoraal van de westelijke Waddenzee in september 2019 en september 2020 (Van Stralen et al. 2019, 2020, overgenomen uit Witteveen + Bos, 2021).

Zowel de mosselpercelen (Figuur 11-5) als de locaties voor de MZI's liggen vooral in de westelijke Waddenzee. Dat heeft te maken met het beschikbare areaal sublitoraal, dat hier het grootste is. Een afname van het sublitorale areaal betekent dus afname van het gebied dat geschikt is voor mosselpercelen en MZI's. Bij in gebruik zijnde locaties en percelen kunnen morfologische veranderingen (verondieping, verdieping) de bruikbaarheid wijzigen. In het sublitoraal bevinden zich ook de nog slecht begrepen fenomenen die ("Hananekammen", zie 7.3) worden genoemd. Dat maakt voorspellingen voor het beheer van sublitorale gebieden, ook rond de mosselpercelen en MZI's, lastig.

### 11.5.2 Schelpenwinning

In de Waddenzee worden schelpen gewonnen. De maximale winbare hoeveelheid is 80.000 m<sup>3</sup>, wat overeenkomt met de natuurlijke aanwas van de schelpen. De winning mag alleen plaatsvinden in de geulen dieper dan NAP -5 m, in de kombergingsgebieden Marsdiep, Vlie en het Friesche zeegat.

In de Waddenzee werd tot 2022 zand gewonnen bij het onderhoud van de vaargeulen. Het volume zand dat werd gewonnen, is afgebouwd in stappen van 100.000 m<sup>3</sup> van maximaal 500.000 m<sup>3</sup> tot 2017. Zandwinning in zandwinputten, buiten het onderhoud van de geulen, is sinds 1998 niet meer toegestaan. Het afbouwen van de zandwinning is ingegeven door de gevolgen van zandwinning voor de sedimentbalans van de Waddenzee en de kustzone.

### 11.5.3 Kabels en leidingen

Onder de bodem van de Waddenzee lopen verschillende kabels en leidingen die de Waddeneilanden met het vasteland verbinden. Het betreft infrastructuur voor de energiehuishouding en data-uitwisseling tussen de vaste wal en Texel. De meeste verbindingen liggen tussen de Kop van Noord-Holland en de zuidzijde van Texel (Figuur 11-1). Ook loopt er een verbinding vanaf Harlingen, via het sublitoraal naar de oostzijde van Texel. De diepte van de leidingen onder bodem van de Waddenzee is gebaseerd op de veranderingen die kunnen optreden door het ontstaan en het verplaatsen van de geulen en andere bodemvormen, zoals de Hanenkammen (zie paragraaf 7.3). Incidenteel is onderhoud nodig om te garanderen dat verbindingen niet worden blootgespoeld en beschadigd raken.

## 12 Referenties

### Beheerbibliotheek 2017-2022

- Vlie & Marsdiep: Oost, A. J. Cleveringa, M. Taal, 2019. Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Beheerbibliotheek Waddenzee, v 2019 (update van 2018). Deltares rapport 11203669-000-ZKS-0006
- Eierlandse gat: Cleveringa, J. & E. Elias, 2022. Kombergingsrapportage Eierlandse Gat. Deltares rapport 11208040-002-ZKS-0001.
- Borndiep: Cleveringa, J. & A.P. Oost, 2017. Morfologie Kombergingsgebied Borndiep; KPP 2017 BO03 Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden. Deltares rapport 11200521-000-ZKS-0004.
- Friesche Zeegat: Oost, A. J. Cleveringa, M. Taal, 2020. Kombergingsrapport Friesche Zeegat. Pinkegat en Zoutkamperlaag. Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0002
- Groninger wad: Elias E. & J. Cleveringa, 2021. Kombergingsrapportage Lauwers en Groninger Wad. Deltares rapport 11206799-002.

### Overige referenties

- Arcadis, 2022. Ecologische scenariovergelijking Vaargeul de Boontjes. Arcadis rapport met kenmerk YTF7QRNSQWEA-1723496104-1890:1.
- Battjes, J.A., 1961. Studie Zeegat van Texel. Rijkswaterstaat Studiedienst Hoorn Nota 62.2.
- Beckerling Vinkers, J.A., 1951. Zeegat van Texel; Nota betreffende het zeegat van Texel en de aangrenzende oevers. Rijkswaterstaat Arrondissement Hoorn Studie Nota no. 51-1.
- Berger G.W. , D. Eisma & A.J. Van Bennekom, 1987. 210Pb-Derived sedimentation rate in the vlieter, a recently filled-in tidal channel in the Wadden Sea. Netherlands Journal of Sea Research Volume 21, Pag. 287-294.
- Blok, M., & Mol, J. W., 2001. Debietmeting zeegat van Texel (in Dutch), Report. 01.03, Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, Informatiedienst Water, IJmuiden.
- Bouma, H., D.J. de Jong, F. Twisk, F. & 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 RIKZ, 2005.024.
- Buijsman, M.C & H Ridderinkhof, 2007. Long-term ferry-ADCP observations of tidal currents in the Marsdiep inlet. Journal of Sea Research 57, pag. 237-256
- Cleveringa, J. & Grasmeijer, B., 2010. Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijbekkens Vlie en Marsdiep; Grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee. Report A2062R3r5, Arcadis (Zwolle).
- Cleveringa, J., C.G. Israel, & D.W. Dunsbergen, 2005. De Westkust van Ameland. Resultaten van 10 jaar morfologisch onderzoek in het kader van de Rijkswaterstaat programma's KUST2000 en KUST2005. Rapport RIKZ/2005.029. Rijkswaterstaat RIKZ.
- Colina Alonso, A. (2020). Evolutie van het bodemslib in de Waddenzee. Data analyse. Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0003, 20 oktober 2020.



- Colina Alonso, A., Smits, B. en Vroom, J. (2021). Stijging Baggerhoeveelheden Vaargeul Boontjes. Data analyse op basis van morfologische ontwikkeling en baggerwerkzaamheden. Deltares rapport 11206799-007-ZKS-0001, 22 december 2021, definitief.
- Cowell, P.J., Stive, M.J.F., Niederoda, A.W., de Vriend, H.J., Swift, D.J.P., Kaminsky, G.M. and Capobianco, M., 2003a, 'The coastal-tract (part 1): a conceptual approach to aggregated modelling of low-order coastal change', *Journal of Coastal Research*, 19(4): 812 – 827.
- Cowell, P.J., Stive, M.J.F., Niederoda, A.W., Swift, D.J.P., de Vriend, H.J., Buijsman, M.C., Nicholls, R.J., Roy, P.S., Kaminsky, G.M., Cleveringa, J., Reed, C.W. and de Boer, P.L., 2003b, 'The coastal-tract (part 2): Applications of aggregated modelling of lower-order coastal change', *Journal of Coastal Research*, 19(4): 828 – 848.
- De Groot, H.L., 1992. Terugblik op Traiectum, een archeologische schets. Ter gelegenheid van het zeventig jarig jubileum van de vereniging Oud-Utrecht. Stichting pub. Oud-Utrecht, 31 pp.
- De Groot, Th.A.M., W.E. Westerhoff, & J.H.A. Bosch, 1994. Sea-level rise during the last 2000 years as recorded on the Frisian Islands, The Netherlands. Med. RGD, 3 pp.
- De Groot, B. & B. West, 2007. Advies en implementatie droogvalduurkaarten. Rapport projectnummer: NC6180421
- De Jong, D.J., K.S. Dijkema, J. Bossinade & J.A.M. Jansen, 1998, SALT97, een classificatieprogramma voor kweldervegetaties. Rijkswaterstaat-Meetekundige Dienst, afdeling GAE, Delft.
- De Kruijff, A. C., 2001. Bodemdieptegegevens van het Nederlandse Kustsysteem. Beschikbare digitale data en een overzicht van aanvullende analoge data, Rijkswaterstaat RIKZ Rapport RIKZ/2001.041.
- De la Ronciere, M. & M. Mollat du Jourdin, 1984. Portulane, seekarten vom 13. bis 17. Jahrhundert, Office de Livre, Fribourg.
- De Reus J. H., & Lieshout, M. F. M. 1982. Debieten Zeegat van Texel (in Dutch), Report WWKZ-82.H205. Rijkswaterstaat RIKZ, The Hague.
- De Vriend, H.J., 1991. Mathematical modeling and large-scale coastal behaviour (part 1: physical processes). *Journal of Hydraulic Research* 29:727–739.
- De Wit, L.M. & A.H. Verheijen, 2022. 3-jaarlijkse tussenevaluatie verspreidingslocaties Waddenzee 2017-2019 (inclusief 2020-2021); Morfologische studie. Witteveen + Bos rapport met kenmerk 127568/22-008.640.
- Dirx, J., Hommel, P. & J. Vervloet, 1996. Kampereiland, een wereld op de grens van zout en zoet. Matrijs, 112 pp.
- Dijkema, K.S., H.E. Reineck & W.J., Wolff (Eds), 1980. Geomorphology of the Wadden Sea Area. Rep. 1 of the Wadden Sea Working Group. 135 pp.
- Dillingh, D., Baart, F., and de Ronde, J. 2010. Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte. Technisch rapport 1201993–002, Deltares. Dillingh et al., 2010.
- Dissanayake, D.M.P.K., Ranasinghe, R. & Roelvink, J.A., 2012. The morphological response of large tidal inlet/basin systems to relative sea level rise. *Climate Change* 113: 253–276.
- Dissanayake, D.M.P.K., 2011. Modelling Morphological Response of Large Tidal Inlet Systems to Sea Level Rise. PhD-Thesis, Delft University, Netherlands, 180 pp.
- Doekes, J., 1985, Invloed van de afsluiting van de Zuiderzee op het getij in de Waddenzee. Rijkswaterstaat, Dienst getijdewateren, nota GWIO 85.001, 13 pp.

- Duran Matute, M., Gerkema, T., de Boer, G.J., Nauw, J.J. & Gräwe, U.. 2014. Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. *Ocean Science* Vol. 10, p. 611-632. Duran-Matute, 2014
- Edelman, T., 1974. Bijdrage tot de historische geografie van de Nederlandse kuststrook. Rijkswaterstaat, Dir. Waterhuishouding en waterbeweging, The Hague: 84 pp. Schrickx et al., 2014).
- Eisma, D. & De Wolff, W.J., 1980. The development of the westernmost part of the Wadden Sea in historical time. in: Dijkema, K.S., Reineck, H.E. & Wolff, W.1. (Eds) *Geomorphology of the Wadden Sea Area*. Rep. 1 of the Wadden Sea Working Group, 95-103.
- Elias, E.P.L. & T. Vermaas 2018. Een actuele sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee (1933-2015); *Sedimentbalans Westelijke Waddenzee*. Deltares rapport 11202190-000-ZKS-0005.
- Elias, E.P.L. 2019. Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Deltares rapport 11203683-001-ZKS-0002
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Vermaas T., Lazar M. 2019a. A “refined” approach to sediment budgets. understanding the sediment budget of the western Wadden sea, the Netherlands. *Coastal Sediments*.
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Pearson, P. and Cleveringa, J., 2019b. Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology*, 415.
- Elias, E.P.L. & Van der Spek, A.J.F., 2006. Long-term evolution of Texel Inlet and its ebb-tidal delta (the Netherlands). *Marine Geology* 225: 5–21.
- Elias, E.P.L., 2006. Morphodynamics of Texel Inlet. Proefschrift Technische Universiteit Delft.
- Elias, E.P.L., Van Der Spek, A.J.F. 2017. Dynamic preservation of Texel Inlet, the Netherlands: Understanding the interaction of an ebb-tidal delta with its adjacent coast. *Netherlands Journal of Geosciences* Volume 96, , Pages 293-317.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., en De Ronde, J., 2012, Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences*, 91(03), 293-310.
- Elias. E.P.L., M.J.F. Stive, J.G. Bonekamp & J. Cleveringa, 2003. Tidal inlet dynamics in response to human intervention. *Coastal engineering journal*, 45, pag. 629-658.
- Ente, P. J., 1973. De IJsseldelta. Overdruk nr. 88 uit de Kamperalmanak. Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Lelystad.
- Ente, P.J., 1986. het ontstaan van het Marsdiep en de Zuiderzee; lezing, gehouden te Amsterdam op 25-3-1983, met aanvullingen. Werkdocument Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders., 1986 - 102 abw.
- Ente, P.J., 1987. Bodemkundig onderzoek westelijke Waddenzee tussen GLW en NAP - 5 m. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, RIJP-rapport ; 1987-1 Cbw, 89 pp.
- Esselink, P., A. de Groot, E. Lofvers, C. Bakker, R. Temmink, Tj. van der Heide & S.Terlouw, 2017. Beheeradvies De Schorren, Texel Advies OBN-15 DK, 34 pp.
- Essink, K. & J. de Vlas, 2000. Visie kwelderontwikkeling in het Noord-Hollands deel van de Waddenzee, Rapport RIKZ/2000.054, 25 pp.
- Eysink, W.D. & E.J. Biegel, 1992. Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function; Investigations on empirical morphological relations, WL|Delft Hydraulics, rapport H1300.

- Eysink, W.D., 1979. Morfologie van de Waddenzee; gevolgen van zand- en schelpenwinning, WL|Delft Hydraulics, rapport R1336.
- Fokker, P.A., F.J. van Leijen, B. Orlic, H. van der Marel, R.F. Hanssen. 2018. Subsidence in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Geosciences* Volume 97, pag. 129-181.
- Folmer, E., A. Dekinga, S. Holthuisen, J. van der Meer, D. Mosk, T. Piersma, H. van der Veer, 2017. Species Distribution Models of Intertidal Benthos -Tools for Assessing the Impact of Physical and Morphological Drivers on Benthos and Birds in the Wadden Sea. NIOZ report.
- Geel, B. van, D.P. Hallewas & J.P. Pals, 1982/1983. A late Holocene deposit under the Westfriese Zeedijk near Enkhuizen - Review of palaeobotany and palynology 38: 269-335 Elsevier Amsterdam.
- Geel. B. van, J.M. Bos & J.P. Pals. 1986. Archaeological and palaeoecological aspects of a medieval house terp in a reclaimed raised bog area in North Holland. *Berichten van de Rijksdienst voor het Oudheidkundig Bodemonderzoek*, 33, 419-444.
- Glim G.W., G. Kool, M.F. Lieshout & M. de Boer, 1987. Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van Texel 1932-1982. deelonderzoek nr. 1, Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland, Rapport ANWX-87.H201.
- Gottschalk, M.K.E., 1971. Stormvloed en rivieroverstromingen in Nederland (Stormsurges and river floods in the Netherlands) deel 1, de periode voor 1400. *Sociaal Geografische Studies*, 10, De Vries, A.C. (Ed.), Van Gorcum Assen, Amsterdam, 581 pp.
- Gottschalk, M.K.E., 1975. Stormvloed en rivieroverstromingen in Nederland (Stormsurges and river floods in the Netherlands) deel 2, de periode 1400-1600. *Sociaal Geografische Studies*, 10, De Vries, A.C. (Ed.), Van Gorcum Assen, Amsterdam, 896 pp.
- Grasmeijer, B. L. Jaksic & J. Vroom, 2022. Verkenning morfologische ontwikkeling westelijke Waddenzee. Deltaresrapport met kenmerk 11208040-005-ZKS-0001.
- Hijma, M. 2017. Tidal-channel migration between 1997-2014 in relation to the local build-up of the subsurface, The Netherlands. Deltares rapport 11200538-004-ZKS-0003.
- Hijma, M. (2021). Bodemdalingsmonitor 2021 Kustfundament en getijdenbekkens. Deltares rapport 11206794-003-ZKS-0006, 30 november 2021.
- Hoeksema, H.J., Mulder, H.P.J., Rommel, M.C., De Ronde, J.G. & De Vlas, J., 2004. Bodemdalingstudie Waddenzee 2004. Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. Rapport RIKZ/2004.025. Rijkswaterstaat.
- Janssen, S. M. Taal, J. Cleveringa, E. Lofvers, H. Mulder, A.P. Oost, Z.B. Wang, 2016. Langjarig onderzoeksprogramma morfologie Waddenzee. Deltares rapport.
- Joustra, D., 1971. Geulbeweging in de buitendelta's van de Waddenzee. Rijkswaterstaat – Directie Waterhuishouding en Waterbeweging - Afdeling Kustonderzoek.
- Kragtwijk, N.G., Zitman, T.J., Stive, M.J.F. & Wang, Z.B., 2004. Morphological response of tidal basins to human interventions. *Coastal Engineering* 51: 207–221.
- LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svašek-Arcadis, 2013a. Samenhang in ontwikkelingen op verschillende tijd- en ruimteschalen project LTV veiligheid en toegankelijkheid; LTV V&T-rapport K-17
- LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svašek-Arcadis, 2013b. Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde; LTV V&T-rapport G-2
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016. Natura 2000-beheerplan Waddenzee; Periode 2016-2022.

- Nederhoff, K, A.P. Oost & T. Vermaas, 2016. Erosie op Ameland Noordwest; Evaluatie morfologische ontwikkelingen. Deltares rapport 1220040-001-ZKS-0003.
- Nederhoff, K., B. Smits & Z. B. Wang, 2017. KPP Wadden Data analyse: getij en morfologie Deltares rapport 11200521-000.
- Onselen, E. van, 2020. Moeilijk erodeerbare lagen in de Waddenzee en Westerschelde. Deltares rapport 11205236-002-ZKS-0005
- Oost, A.P. & P.L. de Boer, 1994. Sedimentology and development of barrier islands, ebbtidal deltas, inlets and back barrier areas of the Dutch Wadden Sea, Senckenbergiana Maritima, vol. 24, pag. 65-115 (ook als hoofdstuk in Oost, 1995).
- Oost, A.P., B.J. Ens, A.G. Brinkman, K.S. Dijkema, W.D. Eysink, J.J. Beukema, H.J. Gussinklo, B.M.J. Verboom & J.J. Verburgh, 1998. Integrale bodemdalingstudie Waddenzee, Nederlandse Aardolie Maatschappij, rapport.
- Oost, A.P., M. Bokhorst, & J. de Vlas, 2002. Effecten van spuilocaties op hydrologie, morfologie en ecologie; Effecten van alternatieve spuilocaties langs de Afsluitdijk op hydrologie, morfologie en ecologie van Waddenzee en IJsselmeer; Fase 1 effectenstudie [ES]2-Afsluitdijk-rapport.
- Oost, A.P., M. Bokhorst, J.M. de Kok, L. Heuer, E. Collard, 2003. Effecten van spuilocaties 1A en 2A op hydraulica, morfologie en ecologie van de Waddenzee, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Den Haag. Rapport RIKZ/2003.018, 118 pp.
- Oost, A.P., R. van Buren & A. Kieftenburg, 2017. Overview of the hydromorphology of ebb-tidal deltas of the trilateral Wadden Sea. Deltares report 11200926-001, 338 pp.
- Oost, A., Colina Alonso, A., Esselink, P., Wang, Z.B., van Kessel, T. & van Maren, B. (2020). Where mud matters. Towards a Mud Balance for the Trilateral Wadden Sea Area: Mud supply, transport and deposition. ISBN 978-94-90289-57-7.
- Ouwerkerk, S. en Vuik, V. (2012). Drempelverwijdering Boontjes. Effecten op hydrodynamica en morfologie. HKV rapport PR2051.10, maart 2012.
- Postma, J.T. & Reenders, R., 1984. De analyse van de ontwikkelingen van de Nederlandse kust ten bate van beleidsbeslissingen in het Kustgenese 1 project .
- Rappoldt, C., O.R. Roosenschoon, D.W.G. van Kraalingen, 2020. InterTides ; maps of the intertidal by interpolation of tidal gauge data. EcoCurves rapport 19, EcoCurves BV, Haren. Oorspronkelijk 2014, updated document, april 2020. 52 p
- Ridderinkhof, H., 1990. Reststromen en watermenging in de Waddenzee. Proefschrift Universiteit Utrecht.
- Ridderinkhof, W., 2016. Morphodynamics of ebb-tidal deltas. Proefschrift Universiteit Utrecht.
- Ridderinkhof, H., Van Haren, H., Eijgenraam, F., & Hillebrand, T. 2002. Ferry observations on temperature, salinity and currents in the Marsdiep tidal inlet between the North Sea and Wadden Sea. Proceedings of the second international conference on EUROGOOS. Operational oceanography: implementation at the European and re-gional scales. FLEMMING, N.C. et al., eds., Elsevier Oceanography Series, 66, pp: 139-148.
- Rietveld, C.F.W., 1962. The natural development of the Wadden Sea after the enclosure of the Zuider Sea. Proceedings 8th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Mexico City: 765-781.
- Rijkswaterstaat, 1998. Sedimentatlas Waddenzee, Ministerie van Verkeer en waterstaat Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor kust en zee cd-rom



- Rijkswaterstaat, 1935. Veranderingen in het Zeegat van het Vlie en der aangrenzende waddeneilanden Vlieland en Terschelling. Rijkswaterstaat Hoorn.
- Schulz, K. & T. Gerkema, 2018. An inversion of the estuarine circulation by sluice water discharge and its impact on sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 200, 31-40.
- Sha, L. P., 1990. Sedimentological studies of the ebb-tidal deltas along the West Frisian Islands, the Netherlands, *Geologia Ultraiectina*, Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen no. 64, Proefschrift Utrecht University.
- Stolte, W., Baart, F., Muis, S., Hijma, M., Taal, M., Le Bars, D. en Drijfhout, S. (2023). Zeespiegelmonitor 2022. Deltares rapport 11209266-000-ZKS-0001. Versie 1.0, 27-03-2023, definitief.
- Stolte, W., Vroom, J., Santinelli, G., Veenstra, J., Van Oeveren, C., Van Zelst, V. and Dijkstra, J. (2023). Digitale Systeemrapportage van de Waddenzee, versie 1.0. <https://systeemrapportage.nl/wadden/>.
- Smits, B. & K. Nederhoff, 2018. Mesoschaal volumebalans Westelijke Waddenzee. Deltares rapport 11202177-000-ZKS-0007.
- Smits, B., J. Vroom, R. van Weerdenburg & A. Colina Alonso, 2022. Morfologie en Onderhoud Vaargeul Boontjes; Systeembegrip en scenario's. Deltares rapport met kenmerk 11208040-004-ZKS-0004.
- Taal, M., E. Quataert, A.J.F. van der Spek, B. Huisman, E. Elias, Z. Wang & N. Vermeer, 2023. Sedimentbehoefte Nederlands kuststelsysteem bij toegenomen zeespiegelstijging. Deltares rapport met nummer: 11207897-002-ZKS-0004.
- Thijssen, J.T., 1972. Een Halve Eeuw Zuiderzeewerken 1920-1970. Tjeenk Willink (Groningen).
- Van Bendegom, 1949. Beschouwingen over de grondslagen van Kustverdediging, Hoorn.
- Van der Molen, J., Groeskamp, S. and Maas, L. R. M. (2022). Imminent reversal of the residual flow through the Marsdiep tidal inlet into the Dutch Wadden Sea based on multiyear ferry-borne acoustic Doppler current profiler (ADCP) observations, *Ocean Sci.*, 18, 1805–1816, <https://doi.org/10.5194/os-18-1805-2022>.
- Van der Spek, A. J.F. 2018. The development of the tidal basins in the Dutch Wadden Sea until 2100: the impact of accelerated sea-level rise and subsidence on their sediment budget – a synthesis; *Netherlands Journal of Geosciences* Volume 97, pag. 71-78.
- Van der Vegt, H. & J. Cleveringa. 2022. Dynamische Vaargeulbeheer Waddenzee. Deltares rapport met kenmerk 11208040-009-ZKS-0003.
- Van Geer, P.F.C., 2007. Long-term morphological evolution of the Western Dutch Wadden Sea. WL| Delft Hydraulics rapport Z4169.00
- Van Malde, J., 1984. Voorlopige uitkomsten van voortgezet onderzoek naar de gemiddelde zeeniveaus in de Nederlandse kustwateren. Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Nota WWWH8408.
- Van Stralen M. e.a.. 2019. Inventarisatie van het sublitorale wilde mosselbestand in de westelijke Waddenzee in het najaar van 2019.
- Van Stralen M. e.a.. 2020. Inventarisatie van het sublitorale wilde mosselbestand in de westelijke Waddenzee in het najaar van 2020.
- Van Straaten, L.M.J.U. 1964. De bodem der Waddenzee. In: Abrahamse, J. e.a. Het Waddenboek, Thieme, Zutphen, pp. 75-151.

- Van Veen, J., 1950. Ebb and flood channel systems in the Netherlands tidal waters, Tijdschrift Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap 67, 303 (1950).
- Vroom J., 2011. Tidal divide, a study on a simplified case and the Dutch Wadden Sea, Msc thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geo Sciences.
- Vroom, J., Elias, E., Lescinski, J. and Wang, Z.B. (2012). Assessment of the effects of the Zuider Sea closure on the hydrodynamics of the Wadden inlets. ICCE proceedings 2012.
- Vroom, J., B. van Maren, J. Marsh & A.C. van der Leij. 2017. Effectiveness of the mud motor near Koehool; Results and interpretation of a tracer study. Deltares rapport 1209751-004-ZKS-0001.
- Wang Z.B., Vroom J., Van Prooijen B.C., Labeur R.J., Stive M.J.F., 2013. Movement of tidal watersheds in the Wadden Sea and its consequences on the morphological development, International. J. of Sed. Res., Vol. 28, No. 2, 2013, pp. 162–171.
- Wang, Z.B., E.P.L. Elias, A.J.F. van der Spek, Q.J. Lodder, 2018. Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. Netherlands Journal of Geosciences Volume 97, pag. 183-214.
- Wang, Z.B. & K. Nederhoff, 2018. Witboek: Het sedimentdelende systeem van de Nederlandse Waddenzee. Deltares rapport 11202177 -000-ZKS-0009
- Werkgroep 1; Stuurgroep hydrografisch-sedimentologisch en biologisch ecologisch onderzoek met betrekking tot de winning van zand in de Waddenzee, 1981. Zandwinning in de Waddenzee; Resultaten van een hydrografisch-sedimentologisch en biologisch-ecologisch onderzoek. Rapport.
- Witteveen + Bos, 2021. Versterking Afsluitdijk Passende Beoordeling aanleg en gebruik. Rapport met kenmerk 125154/22-007.037.
- Zijl, F., Van Weerdenburg, R. en Laan, S. (2023). DWSM: a sixth-generation 3D model of the Dutch Wadden Sea. 2022 release. Deltares rapport 11208054-006-ZKS-0001, 20 februari 2023.

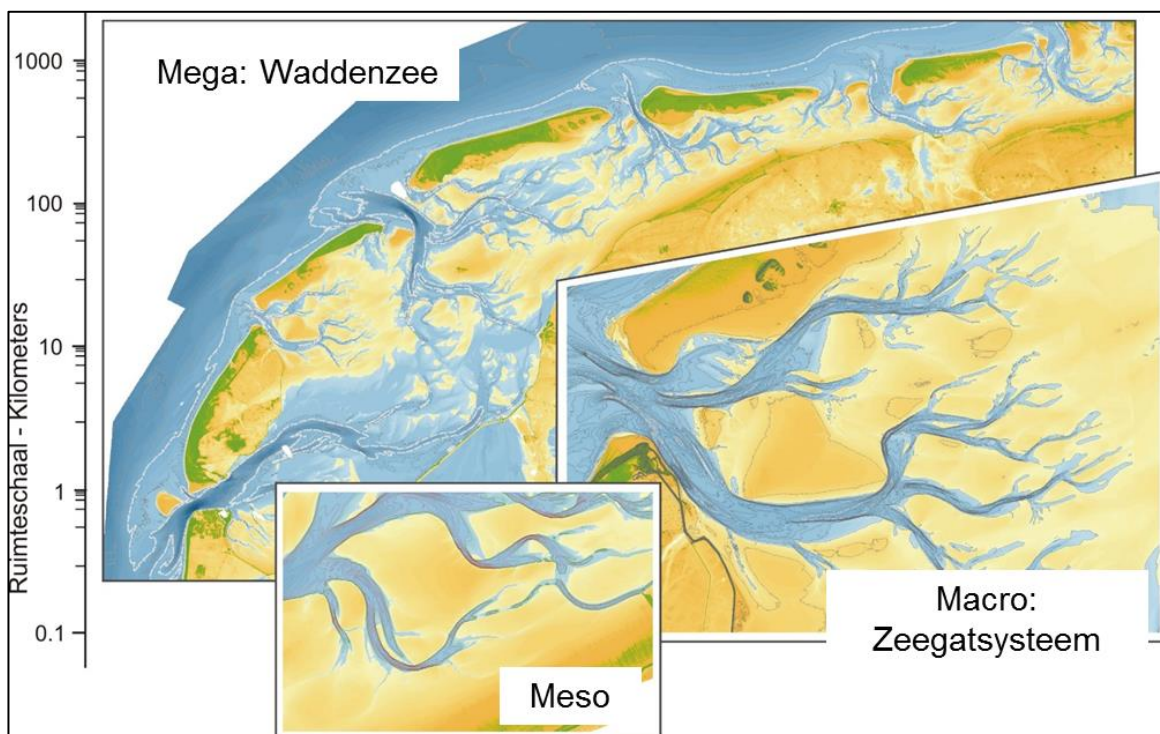
# A Morfologische schaalniveaus en eenheden

## A.1 Morfologische schaalniveaus

De kombergingsrapportages volgen de benadering van verschillende tijd- en ruimteschalen om begrip van de morfologische ontwikkeling te krijgen (Figuur 12-1). Zonder begrip van de ontwikkeling op de grotere schalen kunnen ontwikkelingen op kleinere ruimteschalen niet goed begrepen worden. Zie bijvoorbeeld Postma & Reenders (1984), Cleveringa et al. (2005) en Nederhoff et al. (2016).

De *megaschaal* is de grootste schaal, en bestrijkt het hele Waddengebied (zie Figuur 12-1), inclusief de aangrenzende kustzone en kent ontwikkelingen op een lange, veelal geologische, tijdschaal. Belangrijke factoren zijn de (relatieve) zeespiegelstijging, de beschikbaarheid van sediment (zand en slib) en de veranderingen in de begrenzing van het gebied (door bijvoorbeeld bedijkingen en afsluitingen, Wang et al., 2018).

De *macroschaal* is het schaalniveau van de Waddenzee dat meestal wordt gehanteerd. Het is het schaalniveau van het zeegatsysteem, dat bestaat uit buitendelta, eilanden en bekken of kombergingsgebied (Figuur 12-2). Het zeegat zelf (de geul) voorziet een bekken van getijdewater. Een kombergingsgebied wordt begrensd door het vasteland, de eilanden en naastliggende bekkens. De grens met het naastliggende bekken wordt bepaald door de getijdegolf en via welk zeegat deze een locatie bereikt. Die grens wordt het wantij genoemd. Op de macroschaal is de buitendelta onlosmakelijk verbonden met het kombergingsgebied. Geulen en banken vanuit de Waddenzee lopen door tot buiten het kombergingsgebied en er wordt zand uitgewisseld. Er bestaat een relatie tussen de omvang (sedimentvolume) van een buitendelta met de omvang van het kombergingsgebied (hoeveel water moet per getij door het zeegat stromen).



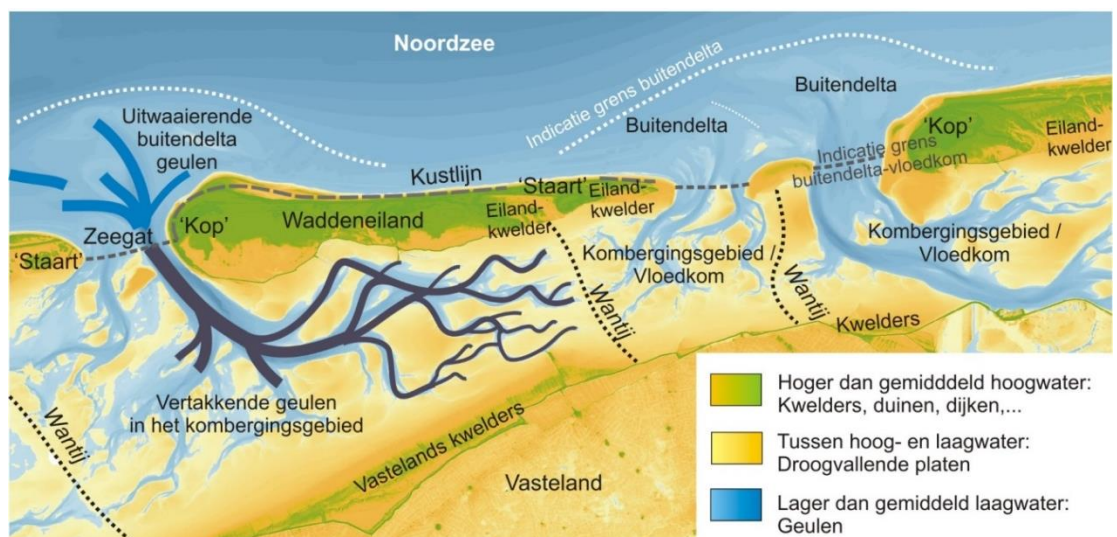
Figuur 12-1 Illustratie van de drie morfologische schaalniveaus (Janssen e.a., 2017).

Bij de *mesoschaal* kijken we naar individuele morfologische eenheden, zoals geulen en platen. Op dit schaalniveau vinden veel menselijke ingrepen plaats, zoals het baggeren van vaargeulen en het verspreiden van de baggerspecie op de aangewezen locaties in geulen. Ook de ecologische waarden van het Waddengebied worden vaak aan deze schaal gekoppeld. Denk bijvoorbeeld aan het foerageren door steltlopers op droogvallende platen, of de dichtheden van bodemdieren. Er is nog geen algemeen geldend morfologisch denkmodel voor de mesoschaal. Elk kombergingsgebied kent andere randvoorwaarden voor de ontwikkelingen op de mesoschaal.

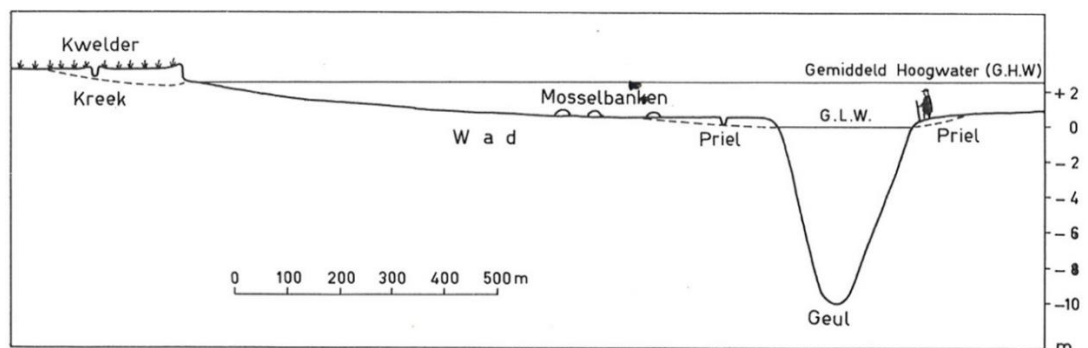
Tenslotte is er de kleinste ruimtelijke schaal: de *microschaal*. Hierbij wordt de ontwikkeling van fenomenen als zandribbels bestudeerd. Voor de vragen vanuit beleid en beheer is een uitweiding op deze schaal nu niet van belang.

## A.2 Morfologische elementen op de mesoschaal

Een 'modelkombergingsgebied' met de verschillende morfologische eenheden in de Waddenzee is opgenomen in Figuur 12-2. Het 'modelkombergingsgebied' is gebaseerd op beschrijvingen van de morfologie in Van Straaten (1964), Oost en de Boer (1994) en voor de kwelders in Dijkema et al. (1980). De definitie van de verschillende morfologische eenheden op basis van hun hoogte in verhouding tot de niveaus van hoog- en laagwater is opgenomen in de schematische dwarsdoorsnede in Figuur 12-3.



Figuur 12-2 Namen van morfologische eenheden in een 'zeegatsysteem' (uit Janssen, 2017).



Figuur 12-3 Schematische dwarsdoorsnede door de kwelder, wadplaat en getijdegeul, met in de stippellijnen de insnijding van kreek en priel. Uit Van Straaten (1964).



## B Historische ontwikkelingen westelijke Waddenzee

De huidige configuratie van het westelijke deel van de Waddenzee is vrij recent en is waarschijnlijk ontstaan tijdens de Middeleeuwen. Gezien de analyse van de kaarten en historische informatie zijn de daaraan gerelateerde veranderingen grotendeels afgelopen rond 1600 (Figuur B-1). Het probleem bij het vaststellen hiervan is dat het westelijke Waddenzeegebied en Zuiderzee(gebied) deels een veengebied was. Dit veengebied is tijdens het openbreken geërodeerd, waardoor het moeilijk te reconstrueren hoe het gebied er oorspronkelijk uitzag en hoe en wanneer de veranderingen zich voltrokken hebben. De laatste jaren is meer informatie aan het licht gekomen over de waarschijnlijke configuratie. Hieronder wordt een zo goed mogelijk chronologisch overzicht gegeven, waarbij onzekerheden worden benoemd.

### B.1 De Romeinse periode: het Flevomeer (400BC – 100AD)

Tijdens de Late IJzertijd en Vroeg Romeinse periode (400vC – 100nC) bestond het huidige Zuiderzeegebied waarschijnlijk uit meren en veenmoerassen omringt door hogere Pleistocene gebieden zoals rond Gaasterland, Utrecht, Wieringen en Texel. In het gebied ontwaterden de rivieren zoals Eem en Utrechtse en Overijsselse Vecht. Mogelijk raakten het zuidelijke en noordelijke Flevomeer in contact met elkaar door erosie. De Overijsselse Vecht ontwaterde al sinds 400BC (zo niet al sinds 700-1000 BC) af op het Vlie (Vos, 2015; Van Zijverden, 2016). De afwatering naar het westen, via het Oer-IJ, sloot zich rond 200 v.C. (Vos, 2015).

Uit bronnen valt af te leiden dat aan de zuidzijde van het Zuiderzeegebied één ('Lacus Flevo') of meerdere zoetwater meren aanwezig waren (Plinius, Hist. Nat., IV, 15; Pomponius Mela, III, 2). Dit komt ook overeen met de aangetroffen meer-sedimenten. De aanwezigheid van meren geeft aan dat er gedeeltelijke blokkades moeten hebben bestaan, die enerzijds nauw genoeg waren om de meerspiegel op hoogte en het water erin zoet te houden en anderzijds open genoeg om het overschot aan water naar de zee te laten afvloeien. Verkennende berekeningen laten zien dat een nauwe opening weliswaar genoeg zou zijn om getijdewerking in het Lacus Flevo te dempen, maar dat de stroomsnelheden zodanig oplopen (ordegrootte 7 m/s) dat in een zeer korte tijd de opening zich sterk zou verwijderen. Een logischer verklaring is als het meer via een rivier met de Noordzee verbonden zou zijn waardoor instroom van zoet water zou worden voorkomen. Hoe groter de lengte en hoe kleiner de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de rivier hoe geringer het debiet aan zeewater dat naar binnen kan worden gebracht. Indien de uitstroom voldoende is kan verzilting voorkomen worden. Uitgaande van een rivierafvoer vanaf het meer van -in deze periode- 100 m<sup>3</sup>/s moet gedacht worden aan een lengte van 1 tot 20 km bij een oppervlakte van 300 tot respectievelijk 1500 m<sup>2</sup>. Wel zou een getij aanwezig zijn in het meer. Gezien de naamgeving ('Lacus Flevo') verliep de afwatering waarschijnlijk via het Vlie.

De meren/het meer vergrootte(n) door erosie (Tacitus, Ann, I, 60; II,8; Pliny, Hist. Nat. XVI, 2; Van Es 1981), maar delen van de veenkussens strekten zich zeker uit tot voorbij de latere zeegrenzen van de 19<sup>e</sup>-eeuwse Zuiderzee. Aan de westzijde van het gebied ontwaterden de veenkussens via een reeks kleine veenrivieren naar het westen, welke mogelijk verbonden waren met het IJ en mogelijk naar openingen noordelijk van het toen al verdwenen Oer-IJ (Vos, pers. com.). Een ander deel van het water werd via het oosten (via o.a. Volen) afgevoerd via de centrale meren naar de Noordzee. Ook aan de oostzijde van het gebied ontwaterden de veenkussens via de centrale meren.



Figuur B12-1 "Grebbe verdrongen stad" zeewaarts van Wieringen, kaart van ca. 1730, handgemaakte kopie gebaseerd op de kaart van Witsen (1712).

## B.2 Vroege tot Hoge Middeleeuwen: Aelmere en Vlie-estuarium (450 -1000 AD)

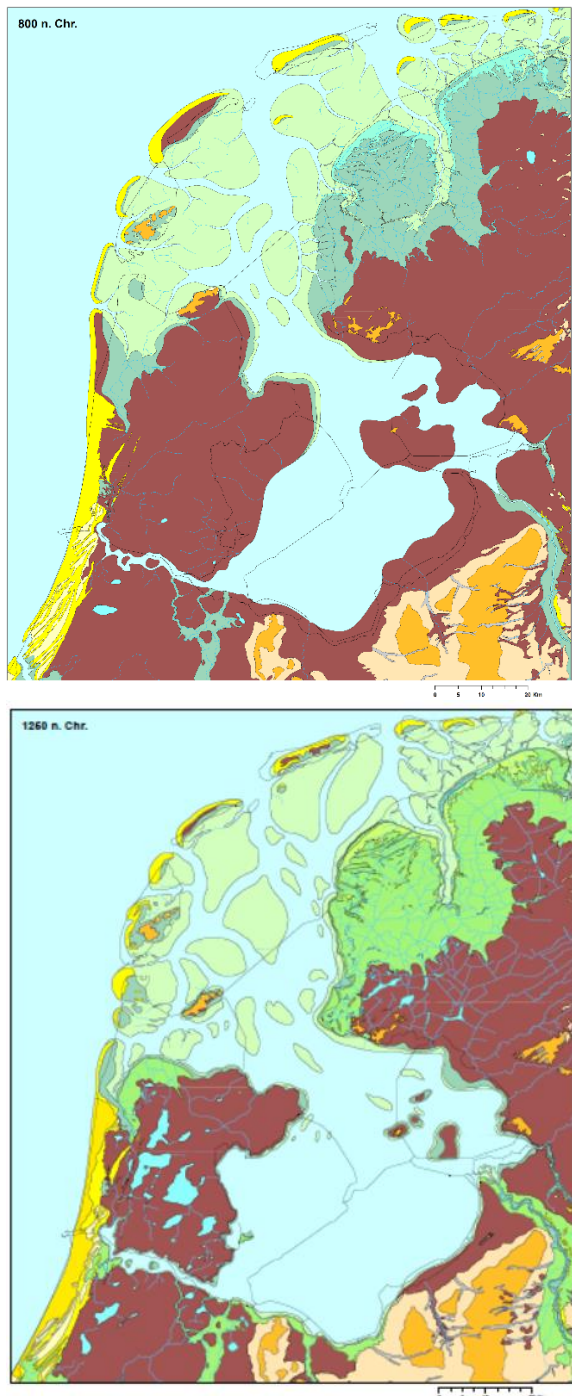
### B.2.1 Algemeen

De reconstructie voor 800 AD van Vos (2018) geeft een compleet ontwikkeld getijdesysteem met een getijlagune met daarachter, langs de lijn Urk-Enkhuizen, een veenrug met een relatief smalle opening (Figuur B.2). Rondom het gehele Zuiderzeegebied en lokaal in de westelijke Waddenzee worden middeleeuwse cultuursporen waargenomen. Ook zijn er schriftelijke bronnen die duiden op de aanwezigheid van een deels bewoond veengebied in de vroege tot hoge Middeleeuwen (St. Maartens Kerk Utrecht 948 AD; Allan 1854; Ente 1986; Taayke 1988; Koopstra et al. 1993; Bartels 2016; van Popta, 2020.).

### B.2.2 Marsdiep als veenstroom, zeegat of beiden?

Er is discussie over of het Marsdiep als zeegat al bestond rond 800 AD. Woltering (1997) en Vos (zoals getoond in Figuur x) gaan ervan uit dat het huidige Waddengebied ook toen al Waddengebied was. De zandige kust van Julianadorp tot en met Texel stak in de vroege 9<sup>e</sup> eeuw echter mogelijk tot 10 km verder zeewaarts uit (Schoorl, 1979). Vanaf de veengebieden oostelijk ervan liepen veenstromen naar het westen, waarvan het Marsdiep hoogstwaarschijnlijk één was (Maresdeop = moerasdiep of zeediep: Cartularium van Holland

en Zeeland; Codex Eberhardi, 817 A.D.; St. Maartens Kerk Utrecht 948 AD). Al met al is het goed denkbaar dat het huidige kombergingsgebied Marsdiep toen nog grotendeels zoet was. Dit wordt ook ondersteund door waarnemingen. Getijinvloed reikte waarschijnlijk tot ongeveer Den Helder, waar onder een 12<sup>e</sup>-eeuwse terp geulafzettingen waargenomen zijn (Woltering, 1997). Viereneenhalf kilometer naar het oosten op het huidige Balgzand was het gebied nog bewoond in de 8<sup>e</sup>, 9<sup>e</sup> en 11<sup>e</sup>-12<sup>e</sup> eeuw (Woltering, 1997).



*Figuur B-12-4: Reconstructies van de westelijke Waddenzee en het IJsselmeergebied rond 800 A.D. en 1250 A.D. (Vos, 2018). Merk op dat nieuwere waarnemingen het aannemelijk maken dat voor de 800 AD reconstructie de trechtervorm van de IJsselmonding bij Kampen meer richting Genemuiden lag, dat de rand van de Noordoostpolder nog niet zo sterk geërodeerd was en dat het grote eiland verbonden was met Kampen/Oldenbroek.*

### B.2.3 Vlie: een estuarium?

Het is vrij waarschijnlijk dat het Vlie nog tot in de 9<sup>e</sup>-10<sup>e</sup> eeuw een langgerekt estuarium was met aparte eb- en vloedgeulen, enigszins vergelijkbaar met de Westerschelde (Koerselman et al. 2002; Paap et al. 2012). De hoofdgeul liep naar het zuiden vrij dicht langs de Friese en Overijsselse kust. Vertakkingen liepen naar Medemblik en waarschijnlijk naar Wieringen. In het huidige kombergingsgebied Vlie was ook bewoond land (o.a. rond Griend en zuidelijk van Oost-Vlieland) en waarschijnlijk ook veengebied aanwezig.

### B.2.4 Aelmere

Het meer Aelmere (= groot meer) was oorspronkelijk nog zoet. Het getij moet vrij gering tot afwezig zijn geweest gezien de beschrijving van het meer als “stagnum” (Vita Boniface, 554-768 AD). De vermelding van een nauw naar de Waddenzee (“fretum” Vita Boniface, 754-768 AD) wijst erop dat de verbinding met open zee nog beperkt was. Vermoedelijk was de toestand tot in de 8<sup>e</sup> eeuw nog sterk vergelijkbaar met de beschrijving van de situatie in de vorige periode. Door de nauwe doorgang en de vele ondiepten in het meer zal de getijdemping vermoedelijk zeer groot zijn geweest. Mogelijk kon al wel in de zuidwest hoek rond Amsterdam zout doordringen in de 8<sup>e</sup>-9<sup>e</sup> eeuw getuige de kwelderafzettingen bij Poppendam, en IJperveld (Bakker & Van Smeerdijk 1982; Borger & Kluiving 2017). De precieze route hiervan is niet duidelijk. Waarschijnlijk toont de Sawley map van 1110 (Henry van Mainz) deze situatie nog. Zij geeft een inham te zien tussen Friesland en Holland (Figuur B-3). Ubbo Emmius claimt dat de opening nog klein was rond 1222 en dat deze groter was geworden in 1250<sup>7</sup> (Van der Aa, 1837-1854). Voor een nauwe doorgang moet wel sprake zijn geweest van een of meerdere barrières tussen het Aelmere en de zee. Mogelijke kandidaten zijn:

1. Een barrière vanaf de Pleistocene hoogte van Gaasterland naar Wieringen: argumenten hiervoor zijn de ondiepte van de geulen over die lijn en het grotendeels land zijn van het Wieringermeergebied. Ermee in tegenspraak lijkt de 7<sup>e</sup>-eeuwse verbinding van Medemblik met de zee en het aanwezig zijn van jutrechten, vermoedelijk voor het NO-O van Wieringen (Den Oever);
2. Een barrière ter hoogte van Enkhuizen/Oosterdijk-Stavoren. Argumenten zijn dat dit zelfs in de 20<sup>e</sup>-eeuwse Zuiderzee nog een nauw gebied was, waarbij duidelijk erosie is opgetreden en een ondiepte aanwezig is voor de kust tussen Enkhuizen en Oosterdijk;
3. Een barrière tussen Enkhuizen en Urk. Argumenten deels als bij 2) en Urk was groter dan tegenwoordig.

---

<sup>7</sup> In 't jaer oms Heeren 1250 heeft die zee grote scade gedaen an ende om Frieslandt en die grote meren binnen 't landt, als die by Staveren ende dat voert by Harlingen, ende van Staveren toe Enkhusen, ende toe Campen, want dat plach heel lant toe al totter Flee (Vlie)."





Figuur B-3 Aftekening van de Sawley map 1110 met herkenbaar Holland en Friesland met een opening ertussenin, wat als het Aelme/Vlie-estuarium gezien kan worden. Dit is de eerste bekende weergave van westelijke Waddenzee, met een sterk vertekende configuratie.

Dijkaanleg kwam op rond de 10<sup>e</sup> eeuw rondom tenminste het westelijke IJsselmeergebied (Acker Stratingh 1866; Rienks & Walther 1955; Van Giffen 1964; Edelman 1974; Schrickx et al. 2014). In het gebied tussen Amsterdam en Edam trad landverlies vroeg op, vóór de 12<sup>e</sup> eeuw (Bos, 1988). Waarschijnlijk werd de aanzet tot dijk aanleg gegeven door erosie optredende in het Aelme in combinatie met het landverlies ten gevolge van bodemdaling door veenontginning.

### B.3 Hoge tot Late Middeleeuwen: Het doordringen van de zee (1000-1500 AD)

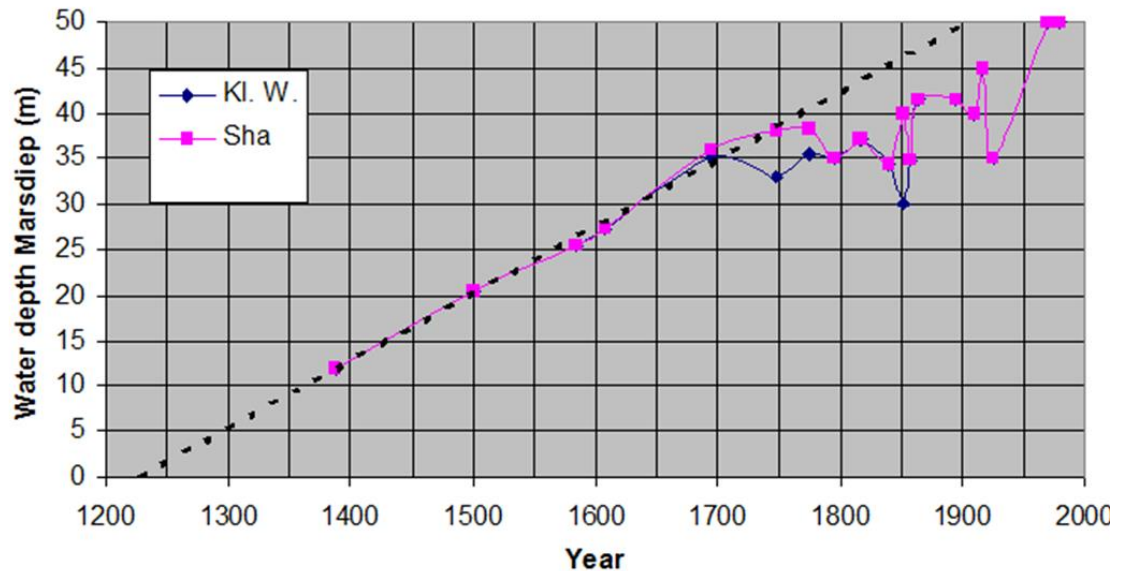
#### B.3.1 Algemeen

Tijdens de Hoge tot Late Middeleeuwen breidde het Marsdiep zich oostwaarts uit en nam een deel van de drainage van het Vlie over. Tegelijk nam de zee-invloed naar het zuiden toe en vormde de Zuiderzee zich. Deze sterke ontwikkelingen leidden tot een drastische verdieping van het gehele gebied.

#### B.3.2 Marsdiep: ontwikkeling van het 'zeegatsysteem'

De ver zeewaarts uitstekende kust van Texel-Den Helder werd geleidelijk geërodeerd, waardoor het Marsdiep zelf ook landwaarts verschoof (Schoorl, 1973). Hierdoor werd ook het achterliggende veengebied kwetsbaarder voor overstromingen. Deze processen zullen hebben geleid tot een toename van de invloed van getijwater (Oost et al. 2003). Terug-extrapolerend op grond van maximale diepte-waarnemingen, zoals getoond in Figuur B-412-5

en berekende getijdevolumes, die zijn getoond in Figuur B12-512-6 zou het Marsdiep als zeegat aanwezig kunnen zijn geweest rond 1220 of zelfs eerder (Oost et al. 2003). Het is waarschijnlijk dat zout getijwater via het Marsdiep al vanaf ca. 1100 het huidige kombergingsgebied van het Marsdiep begon in te dringen, rond 1200 het Balgzand had bereikt<sup>8</sup>. Ergens tussen ca. 1150 en 1300 werd waarschijnlijk contact gemaakt met het Vlie getijdesysteem, dat oorspronkelijk mogelijk zo ver reikte als de oostzijde van Wieringen. Het getijvolume van het Marsdiep was waarschijnlijk nog zeer bescheiden (Figuur B12-512-6).

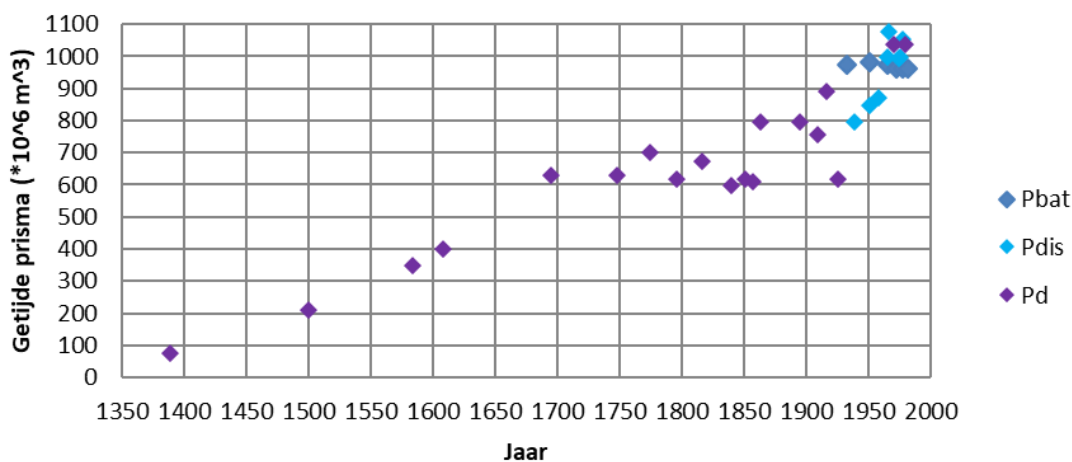


Figuur B-412-5 Ontwikkeling maximale diepte van het Marsdiep sinds 1388 (deze laatste meting is vrij onzeker), (data: Sha 1990; Klein Wassink 1991; Schoorl 1999a in Oost et al. 2003).

De uitbreiding in oostelijke richting van de getijinvloed van het Marsdiep leidde tot een sterke verandering in de westelijke Waddenzee en het huidige IJsselmeergebied (Edelman, 1964; Schoorl, 1973, 1999a; Eisma & Wolff 1980). Het zoute, zuurstofrijke en dynamische getijwater dat via het Marsdiep binnen kwam, brak het veen af, terwijl de drainage van inbraakgeulen het veen liet compacteren. De sedimentbedekking zal de overgebleven veenresten verder hebben laten compacteren. Het Marsdiep nam naar het oosten de drainage over van delen van het Vlie-estuarium (Paap et al., 2012). Het wantij tussen kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie was zeker al rond 1300 doorbroken door deze oostwaartse uitbreiding<sup>9</sup>. Een tijdlang waren beide zeegaten van groot belang voor de scheepvaart zoals blijkt uit hun weergave op middeleeuwse zeekaarten (Vesconte 1325; Abraham Cresques 1375; Mecia de Viladestas 1413; Petrus Roselli 1462; Lang 1955, 1958; Koeman 1985; Oost 1995).

<sup>8</sup> Het gebied westelijk van Wieringen werd brak rond 1100 AD en overstroomde rond 1200 (Ente, 1986; Woltering, 1997) en op zuid-Texel werden dijken aangelegd rond 1200-1250 (Schoorl, 1999a; Oost et al., 2004).

<sup>9</sup> 1303: Stavoren noemt Marsdiep als een haven; Schoorl 1999a; 1325: Marsdiep en Vlie worden verbonden weergegeven op een zeekaart van Vesconte.



Figuur B12-512-6 Ontwikkeling berekening getijdevolume 1388-1982 gebaseerd op maximale diepte (Pd), afvoermetingen (Pdis) en diepte kombergings\*0,9 (Pbat) (gebaseerd op: Oost et al. 2017).

Het Marsdiep was qua ligging in deze periode niet stabiel. Voor zover na te gaan op grond van kaartmateriaal, dieptegegevens van het zeegat en de gereconstrueerde ontwikkeling van zuidwest Texel verplaatste het Marsdiep zich naar het zuiden. Door de toename van het getijdeprisma oriënteerde het zeegat zich steeds meer in de richting van het inkomend getij en verplaatste ook geleidelijk die kant op (Sha, 1990). Dit leidde tot aanzanding aan de zuidpunt van Texel en afslag aan de kant van Den Helder. Aangroei van zuidwest Texel gebeurde na ca. 1400 eens in ca. 110 jaar als weer een grote zandplaat uit de buitendelta van het Marsdiep verheelde met het eiland (Oost et al. 2004). In het begin zal het getijprisma van het Marsdiep nog klein zijn geweest en zal het zeegat meer op het huidige Pinkegat hebben geleken gekarakteriseerd door meerdere geulen. De eerste getekende detailkaarten van het zeegat geven aan dat er in 1539 waarschijnlijk al sprake is van één geul, hoewel de tekeningen van de uiterst precieze Haeyen (1584) suggereren dat er dan nog sprake is van een Pinkegat-achtige situatie.

### B.3.3 Vlie: van estuarium naar kombergingsgebied

Het Vlie-estuarium veranderde door de overname van het Marsdiep van de Zuiderzee voor zover na te gaan van een estuarium met aparte eb- en vloedgeulen, zoals zichtbaar in de kaart van Sgrooten, (Figuur 4-1) in een kombergingsgebied met vertakkende geulen zonder duidelijke eb of vloed voorkeur. Daarbij raakten waarschijnlijk grote delen van de oorspronkelijke geulen verlaten. Inderdaad is er op een kaart van 1584 nog een "Oude Vlie" aangegeven die de richting laat zien van de verlaten geul. Ook is een verlaten geul afzetting aangetroffen onder ruwweg het knikpunt in de Afsluitdijk westelijk van de Kornwerderzandsluizen (Paap et al. 2012) en een verondieping van de resterende overblijvende Vliegeul ten westen van de Kornwerderzand-plaat (Koerselman et al. 2002; Paap et al. 2012). De sedimentaire afzettingen laten zien dat deze geul haar estuariene karakter verloor (er was niet langer sprake van een dominant getij) en een gewone waddengetijdegeul werd (Koerselman et al. 2002). De exacte timing van deze veranderingen is niet bekend.

Ook bij het Vlie heeft het opruimen van de veenpakketten geleid tot vergroting van het kombergingsgebied en daarmee waarschijnlijk tot vergroting van het getijvolume. De afname van de grootte van Griend wijst in die richting. Daarnaast zijn er tenminste 8 historische bronnen, legenden en namen die wijzen op veendoorgraving en/of landverlies in het gebied

tussen Vlie en Texel<sup>10</sup>. Hoewel de betrouwbaarheid van deze verhalen wordt betwijfeld sluiten ze qua timing en locaties goed aan op de bovenbeschreven veranderingen.

#### **B.3.4 Van Aelmer naar Zuiderzee**

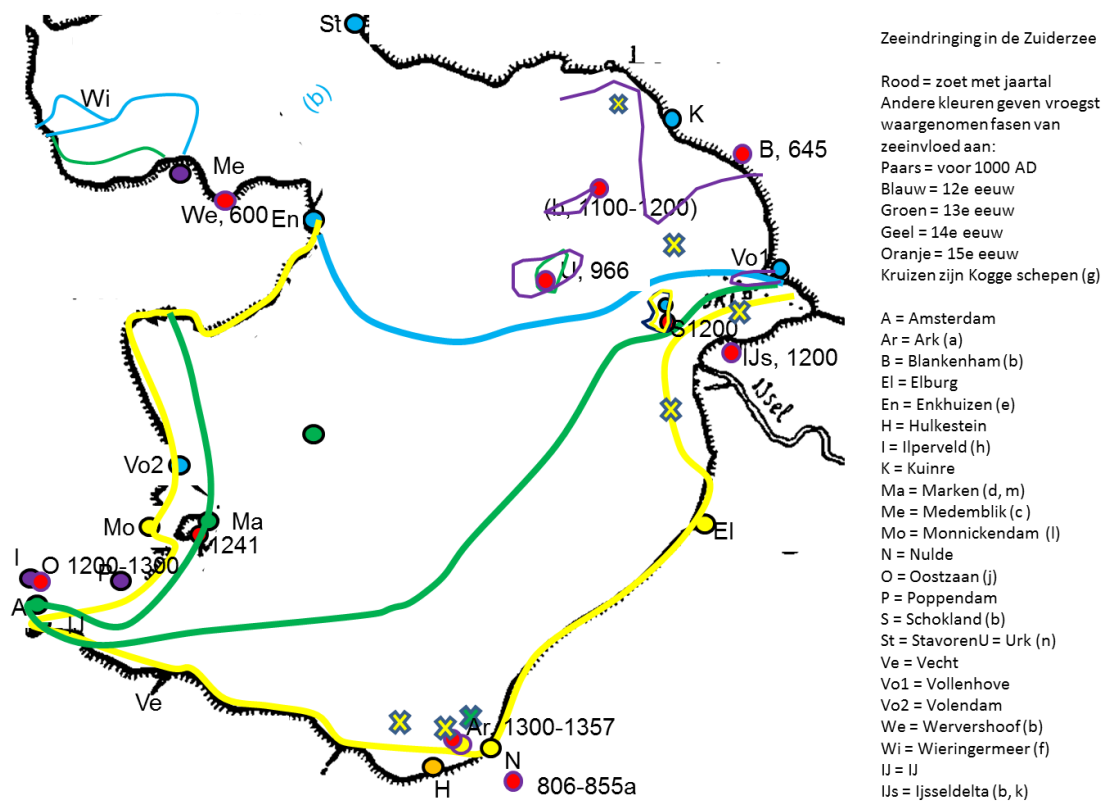
Tot deels in de 14e eeuw was er sprake van afnemende oppervlakken land in grote delen van: het Wieringermeer gebied; het Hoornse Hop; nabij Amsterdam; de Noordoostpolder (bewoond rond Nagele en Emmeloord; van Popta, 2020.); en zuidelijk van de IJsseldelta. Het (schier)eiland Schokland was al bewoond in de 8e eeuw en oorspronkelijk tenminste 24 km<sup>2</sup> groot (Wiggers, 1955; Hogestijn, 1992; Koopstra et al. 1993; van Popta, 2020.). Ook Urk moet groter zijn geweest dan tegenwoordig: aan de westkant strekte het rond 900 AD waarschijnlijk zeker nog 2 km verder uit. Steilranden bij Utrecht en de kliffen van Gaasterland suggereren dat ook daar erosie moet zijn opgetreden. Dit kan deels ook al tijdens de meer-fase van het Aelmer zijn gebeurd.

Als de beschikbare informatie voor het voormalige Zuiderzeegebied wordt samengebracht dan lijkt het erop dat zee-invloeden zich zuidwaarts uitbreidden vanaf de 12e tot en met de 15e eeuw (Figuur B12-512-7). Lokaal op plaatsen met veel rivierafvoer (IJssel, Overijsselse Vecht) was het water nog lange tijd zoet.

---

<sup>10</sup> 1) Het verhaal dat monniken van Ludinga-kerke van Harlingen een vaart door het veen naar Texel aanlegden (Van der Aa, 1837-1854), waar ze inderdaad kloosterbezittingen hadden; 2) De Wanda-saga van Vlieland die over landverlies door vaartgraverij door monniken verhaald; 3) Het verdwijnen van het omwalde stadje op Griend (Van der Aa, 1837-1854); 4) De Holckama's "welcke aen het Vlie ofte Yselstroom veele landen hadden" zouden "een sloot ofte vaert door den duynen in zee [hebben] laten graven", wat door velen werd nageaapt, waarna het gebied in 1237 overstroomde (Winsemius, 1622); 5) het verlies van buitendijks land bij Harlingen waar men voor het hooien een hele dag heen en weer onderweg was; 6) de Monnikesloot zuidelijk van West-Vlieland (hoewel deze naam ook later kan zijn gegeven); 7) de naam Moerwardt op de kaart van 's Grooten; 8) de vermelding van verdwenen veengebieden bij Texel (zie boven).





Figuur B12-512-7 Figuur Oudste waarnemingen van zee-ïnvloed en verzilting. Lijnen zijn vloeiende verbinding tussen de waarnemingspunten mede gebaseerd op topografie en saliniteit van 1913. Gebruikte literatuur: a = Vlierman, 1985; b = Ente, 1986; c = Besteman, 1974, d = Veldhuizen, 1980; e = van Geel et al., 1982/1983; f = Leek, 2016; g = Reinders, 1994; h = Bakker & Van Smeerdijk, 1982; i = Willemsen et al., 1996; j = van Geel et al., 1986; k = Ente, 1973; l = Hogestein, 1989; m = Dirx et al., 1996; n = Wiggers, 1955; o = Borger & Kluiving, 2017. & Hogestijn, 1991.

Het is niet precies bekend wanneer het Aelmeer Hoog opende door de invasie van de zee. De aanzet kan al zijn gegeven tijdens het middeleeuws klimaatsoptimum tussen de late 9<sup>e</sup> en 13<sup>e</sup> eeuw door de drogere condities. Hierdoor werd het mogelijk om het veen in cultuur te brengen (Casparie & Streefkerk, 1992). De combinatie van drogere condities en daling door cultivatie zal het veengebied gevoelig hebben gemaakt voor overstrooming. Het gemiddeld hoogwaterniveau kan tot een halve meter gestegen zijn in de periode 1200-1500 AD (De Groot et al. 1996). Al deze ontwikkelingen kunnen geleid hebben tot een wijder worden van de opening door het Aelmeer Hoog en overstrooming en erosie van het veenlandschap. De exacte timing is onbekend. Ubbo Emmius claimt dat de opening nog klein was rond 1222 en dat deze vergroot is in 1250 (Van der Aa, 1837-1854).

Daarbij zal zich vermoedelijk in de 12<sup>e</sup>-14<sup>e</sup> eeuw een fase hebben voorgedaan waarbij de getijweg vanaf het Marsdiep ongeveer een kwart getijgolf besloeg en eindigde tegen de boven beschreven barrière(s) (situatie 2 in Figuur B-7). Net als tijdens de latere barrière van de Afsluitdijk zal dit hebben geleid tot opslinging van het getijverschil naar ongeveer het dubbele (ca. 2 m ter hoogte van Harlingen). De opslinging van het getij moet geleid hebben tot een snelle doorbraak van aanwezige veenbarrières en het uitruimen van het Aelmeer gebied. Omdat stormvloed een bepaald niveau veel vaker halen bij hogere hoogwaterniveaus zal

ook dit van grote invloed zijn geweest<sup>11</sup>. In combinatie met het feit dat de veengebieden al zeer kwetsbaar waren geworden door verlaging ervan door de mens, moet e.e.a. hebben geleid tot sterke overstroming en erosie.

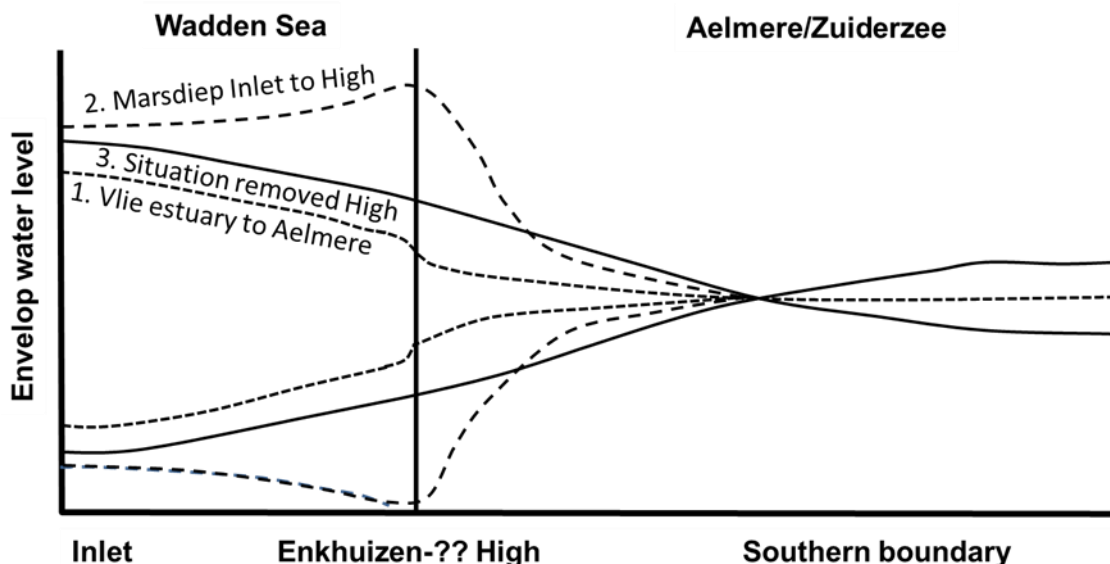
In de 12<sup>e</sup> eeuw lijkt de uitbreiding van de invloed van de zee vooral de noordzijde betreffen tot ruwweg de lijn Enkhuizen tot Vollenhove. Tijdens stormvloed en al erosie te zijn opgetreden o.a. west van Stavoren en in het Wieringermeergebied. In het uiterste zuidwesten (Vecht, Utrecht en Volendam) wordt in dezelfde tijd ook zee-invalde bemerkt, welke in ieder geval deels aan extreme stormvloed en al worden toegeschreven (Buisman, 1995).

In de 13<sup>e</sup> eeuw breidde de invloed van de zee zich zeker uit in het gebied tussen Schokland, Enkhuizen, Amsterdam. Zo ontstond er een situatie die sterk leek op de huidige situatie met de Afsluitdijk. Het patroon was wezenlijk anders dan in 800. Was er in 800 nog sprake van één geul naar de Zuiderzee, nu was het Marsdiep een redelijk belangrijke verbinding geworden.

In de 14<sup>e</sup> eeuw werd de invloed zeer duidelijk merkbaar in het zuidoosten van de Zuiderzee. Gedurende deze uitruiming werd de getijdeweg vanaf het Marsdiep verlengd tot een halve getijlengte. Dat leidde, samen met de bodemwrijving, tot een uitdoven van het getij (situatie 3 in Figuur B-7). Dit heeft mogelijk bijgedragen tot het tot staan komen van de afbraak van de kust. In 1340 wordt de Zuiderzee voor het eerst genoemd als Sudersee (Koopstra et al. 1993). In 1400, 1466 en 1477 werd aangegeven dat het Marsdiep en andere zeegaten wijder en dieper werden (Gottschalk, 1975). In 1447, 1466 en 1514 werd aangegeven dat de vloed steeds hoger werden in de Zuiderzee (Gottschalk, 1975). In Holland klaagde de bevolking in 1494 over het aanzienlijke verlies van land langs de Zuiderzee door erosie en stormvloed (*“Enqueste up 't stuck der verpondinghe... van Hollant ende Vrieslandt, gedaen in den jaere 1494”* in: Gottschalk, 1975). De grote geulen naar de Zuiderzee worden niet duidelijk anders of dieper na 1600. De toename in diepte (Figuur B-4) en de natte doorsnede van het zeegat van het Marsdiep geven echter aan dat het getijvolume waarschijnlijk sterk bleef toenemen in de periode tussen 1388 en 1700 (Figuur B-5; Oost et al. 2002; Elias & van der Spek, 2006, 2013). Onduidelijk is hoe zich dit laat verklaren. Mogelijk ging de erosie van de veenresten nog steeds door. Tot op de dag van vandaag worden bij de Afsluitdijk op platen tijdens zware stormen nog steeds veenbrokken waargenomen die boven de golven worden uit getild.

---

<sup>11</sup> Inundatie en erosie van eilanden, het Zuiderzeegebied en het vasteland trad volgens diverse, soms betwiste, bronnen (Gottschalk, 1971) op tijdens de stormvloed van 17/18-2-1164 (N storm, Friesland? & Groningen; Schmeidler & Lappenberg, 1910, 97, p. 227; Stoob, 1963, p. 33810; Emo, 1219); 2-11-1170 (Staveren in Friesland; Platner, 1867, p. 82; De Groot, 1992); 1237 Coronike van Vrieslant, 1450, in: Gottschalk, 1971); 16-1-1219? (NW storm, Friesland & Groningen; Zuidema & Douma, 1972); 28-12-1248 (NW storm, Friesland & Groningen); 28-1-1262 & 14-12-1287 (Noord Holland, Friesland & Groningen); 10-1375 (Gottschalk, 1971; Niemeijer, 1975; Buisman, pers. comm.); 14-11-1421; 18-11-1424; 10-4-1446 (NW storm); & 27-9-1477 (Gottschalk, 1975). Het bewoonde eiland Griend, een versterkte plaats in 1222, zou grotendeels zijn vernietigd in 1287 (Van der Aa, 1837-1854), maar werd genoemd als een bewoonde plaats tot tenminste 1401 (ogd1096). Sterke aantasting en snelle erosie van de veengebieden valt ook af te leiden uit overleveringen en uit waarnemingen van de snelheid waarmee langs de westzijde van de Zuiderzee de dijken werden teruggelgd en o.a. het landwaarts terugtrekken van het Klooster bij Stavoren, de Kuinerburcht en de afslag van Urk en Schokland. Pedologisch onderzoek in Noord Holland en het Zuiderzeegebied laat zien dat de veenkussens snel afgebroken werden na ca. 1150 (Pons & Wiggers, 1960; Gottschalk, 1971; Koopstra et al., 1993).



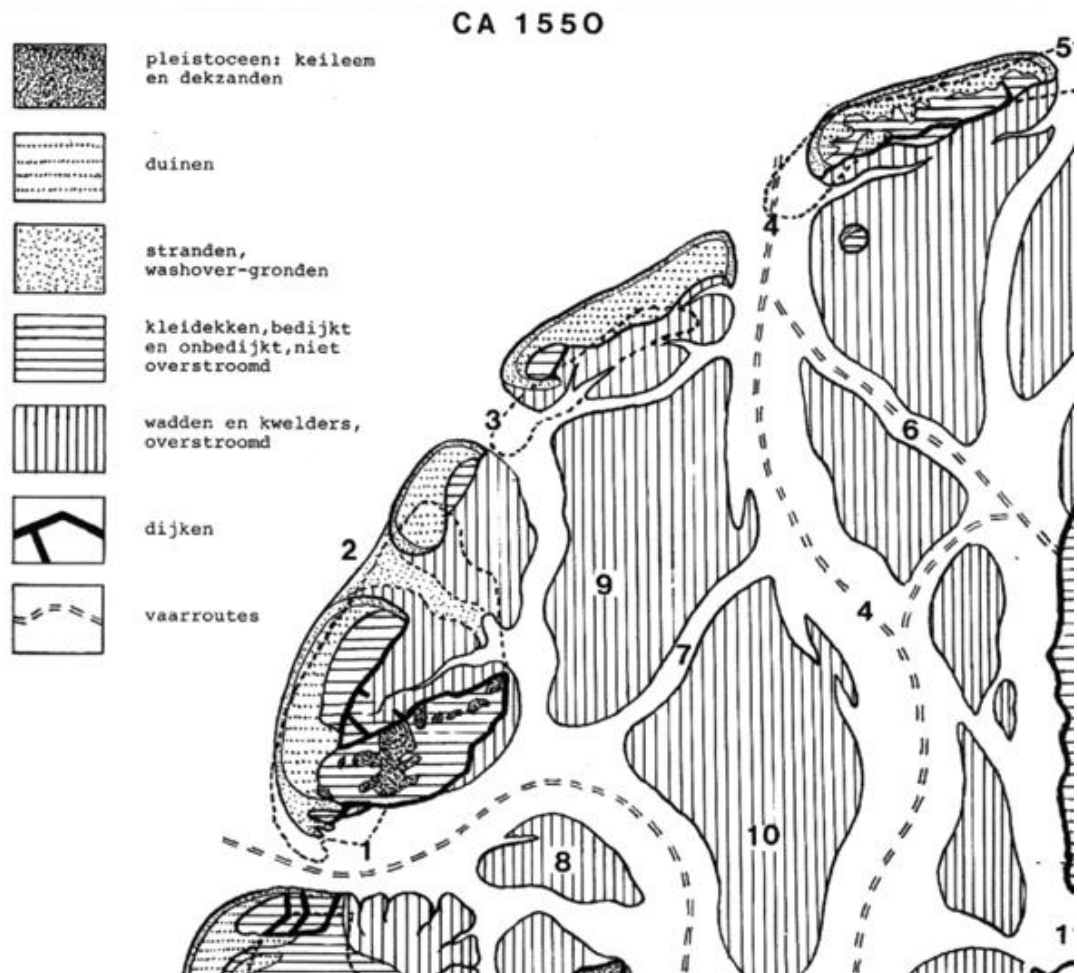
Figuur B-7 Schematische dwarsdoorsnede door de Zuiderzee vanaf de zeegaten ("Inlet", links) naar de zuidelijke oevers (rechts), met de veronderstelde niveaus van hoog- en laagwater. 1 = Aelmere met Vlie-estuarium; 2 = Situatie met verbinding Marsdiep tides tot Enkhuizen-Stavoren/ Urk Hoog; 3 = Marsdiep en Vlie samen verbonden met gehele Zuiderzeegebied ( $\approx$  1926 situation). Geinspireerd door Wang et al. (2013)

Zowel in de Zuiderzee als wat het huidige kombergingsgebied Marsdiep is, is waarschijnlijk veel veengebied verloren gegaan, waardoor sub-getijdeplaten normaal werden. Zowel in de Zuiderzee als in het kombergingsgebied Marsdiep was de sedimentatie ontoereikend om het gehele gebied op te vullen tot aan intergetijdenniveau. Daarbij speelt waarschijnlijk ook een rol dat erosie en klink van het veengebied gewoon doorging, net zoals dit in de Dollard gebeurde (Vos, 2015). Waar ooit 3-6 meter hoge veenmassieven aanwezig waren, is nu de dikte van het veen onder de Waddenzee maximaal enkele decimeters (Ente, 1986). De "overdiepte" van het Marsdiep is dus voor een belangrijk deel een erfenis uit de Middeleeuwen. Verwacht mag worden dat deze overdiepte nog eeuwenlang sediment zal vergen om het gebied op te vullen.

## B.4 De moderne tijd: 1500-1900

### B.4.1 Algemeen

Opvallend is dat behoudens het natuurlijke verleggen van geulen er weinig veranderde in het gebied tussen 1500 en 1900. De belangrijkste ontwikkeling is dat de configuratie van de diverse hoofdgeulen vrij stabiel wordt in deze periode. Dit zal pas sterk gaan veranderen na de afsluiting van de Zuiderzee. Het hoofdpatroon van drie zich vertakkende geulen (Marsdiep, Vlie en daartussenin geklemd het kleinere Eierlandse Gat) wordt nu min of meer definitief (Figuur B-12-8). Onduidelijk is in hoeverre dit mede bepaald werd door de –vanaf de 17<sup>e</sup> eeuw steeds uitgebreidere– kustbescherming in Noord-Holland en langs de eilanden. Daarbij werd in toenemende mate gewerkt met onderzeese bestortingen, strekdammen, palenrijen, (stuif)dijken en duinbeplanting. Tot 1731 gebeurde veel vastlegging nog vooral met wier en hout. Na de paalwormepidemie van 1731-1734 werd massaal overgegaan op steenwerk. De periode 1600-1900 is vooral gekenmerkt door consolidatie.



Figuur B-12-88 Het westelijk waddegebied rond 1550 A.D. Reconstructie van Schoorl (1999).

#### B.4.2 Marsdiep: toename getijdeprisma

De maximale diepte van het zeegat van het Marsdiep nam verder toe tot ca. 1700 en daarmee waarschijnlijk ook het getijvolume (Sha 1990; Figuur B12-512-6). Daarna is in de periode 1700-1850 geen sprake meer van een toename. De oorzaak kan gelegen zijn in:

- het beëindigen van belangrijke afname van veenafzettingen, waardoor het getijvolume niet verder vergrootte;
- het bereiken van een toestand waarin de aanzanding in het kombergingsgebied Marsdiep de zeespiegelstijging compenseerde;
- een (tijdelijke) stop in de stijging van de zeespiegel, zoals ook te zien in de metingen van de getijhoogte te Amsterdam vanaf 1700 (Oost, 1995) of zelfs een daling in de HW-curve (van Jensen et al. 1993); een mogelijk gevolg van de koudere klimaatscondities in de Kleine IJstijd (Oost, 1995);
- een “tegenreactie” vanuit het Vlie, wat door de oostwaartse uitbreiding van het Marsdiep systeem naar het oosten was teruggedrongen (dit verschijnsel is vaker te zien, bijvoorbeeld: Zoutkamperlaag/Eilanderbalg; Oost, 1995);
- een combinatie van bovenstaande.

Daarna gaat de toename weer verder (Figuur B12-512-6). De oorzaak daarvoor is onbekend. Ridderinkhof (2016) concludeerde op basis van theoretische modellen dat het kombergingsgebied Marsdiep sedimentexporterend was voorafgaand aan de afsluiting van de Zuiderzee door de grote lengte die het bekken had en de invloed daarvan op de getijdegolf.



### B.4.3 Het geulenpatroon

De hoofdgeul Texelstroom (12 in Figuur B-) liep in noordoostelijke richting en boog vervolgens af in zuidoostelijke richting alwaar het vertakte in Vlieter (14) en Doove Balg (18) rondom het Vogelzand. Op basis van het kaartmateriaal van 1886 kan gesteld worden dat de Vlieter de belangrijkste geul was van de Texelstroom. De Doove Balg ging verder in oostelijke richting min of meer parallel aan de huidige Afsluitdijk. Ongeveer op de plek waar nu de knik in de Afsluitdijk zit boog de Doove Balg af naar het noordoosten en ontmoette bij het Kornwerderzand de geul de Middelgronden. Deze geul, de Middelgronden, maakte toen nog onderdeel uit van de Vliestroom en was als zodanig een belangrijk onderdeel van de vaarweg vanaf de Waddenzee naar plaatsen als Harderwijk.

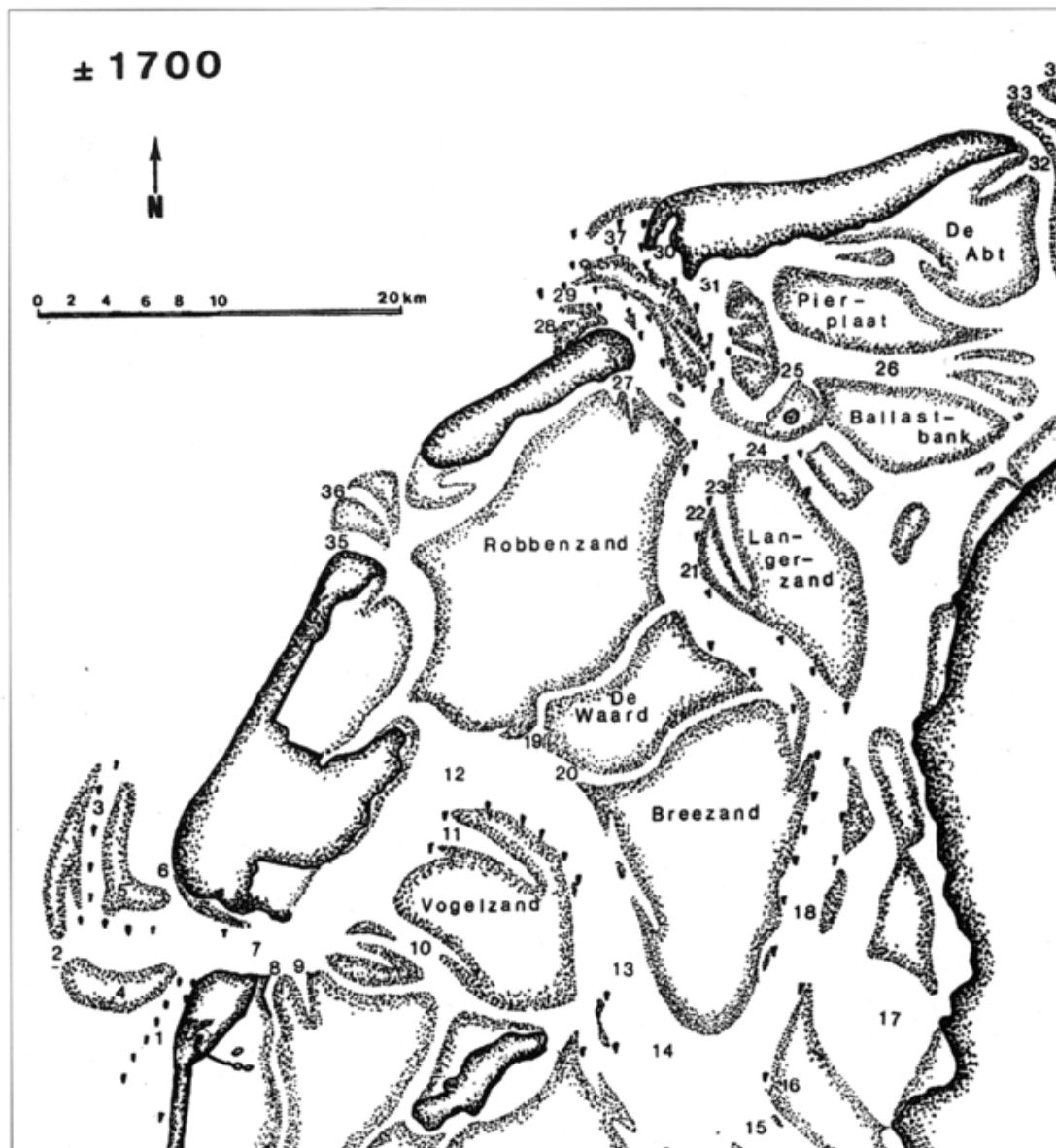
Direct na het zeegat van het Marsdiep splitste zich de geul de Balg af in zuidoostelijke richting. De Balg vertakte zich tot een geulenstelsel van west naar oost bestaande uit:

- het Amsteldiep dat tot in 1863 nog tussen Noord-Holland en het eiland Wieringen doorliep en
- het Zwin (bestaande uit de Wierbalg en het Visjagersgatje) aan de oostzijde van het eiland Wieringen.

Het Zwin is een geulencomplex dat al vanaf tenminste het eind van de 16<sup>e</sup> eeuw continu aanwezig was. Eén van de geulen, de Wierbalg, was in de 16<sup>e</sup> eeuw al aanwezig. In de periode van 1816 tot 1838 ontstonden het Visjagersgatje en het Zuiderzwin. In de periode 1838 tot 1851 onderging het Visjagersgatje geen significante veranderingen. Het Zuiderzwin breidde zich echter uit in westelijke richting. In de periode tot 1863 bleven de geulen stabiel.

De Balg was in de 18<sup>e</sup> eeuw een vloedschaar van de Texelstroom. Rond 1816 begon de geul zich te verdiepen tot 12 à 13 m. De geul had toen een west-oost oriëntatie. Tot 1863 breidde dit diepe deel zich verder uit en draaide door uitschuring van de buitenbocht in oostzuidoostelijke richting. Tegelijkertijd ontstond vrij snel na 1816 een nieuwe vloedschaar zuidelijk van de Balg. Deze nieuwe vloedschaar zou steeds belangrijker worden. Dit proces zette zich voort totdat in 1873 de nieuwe vloedschaar zo belangrijk was geworden dat ze de naam Malzwin kreeg. Omstreeks die tijd stond het diepe deel van de Balg niet meer in directe verbinding met de Texelstroom. De stroomrichting van dit Malzwin was, in tegenstelling tot de richting van de Balg, veel meer naar het oosten tot noordoosten gericht. Hierdoor werd de stroming meer op de buitenbocht gericht waardoor de aanstroming op het Visjagersgatje en de Wierbalg veranderde. Omstreeks 1896 resulteerde dit in het ontstaan van een nieuw Visjagersgatje als aftakking van het Zuiderzwin.

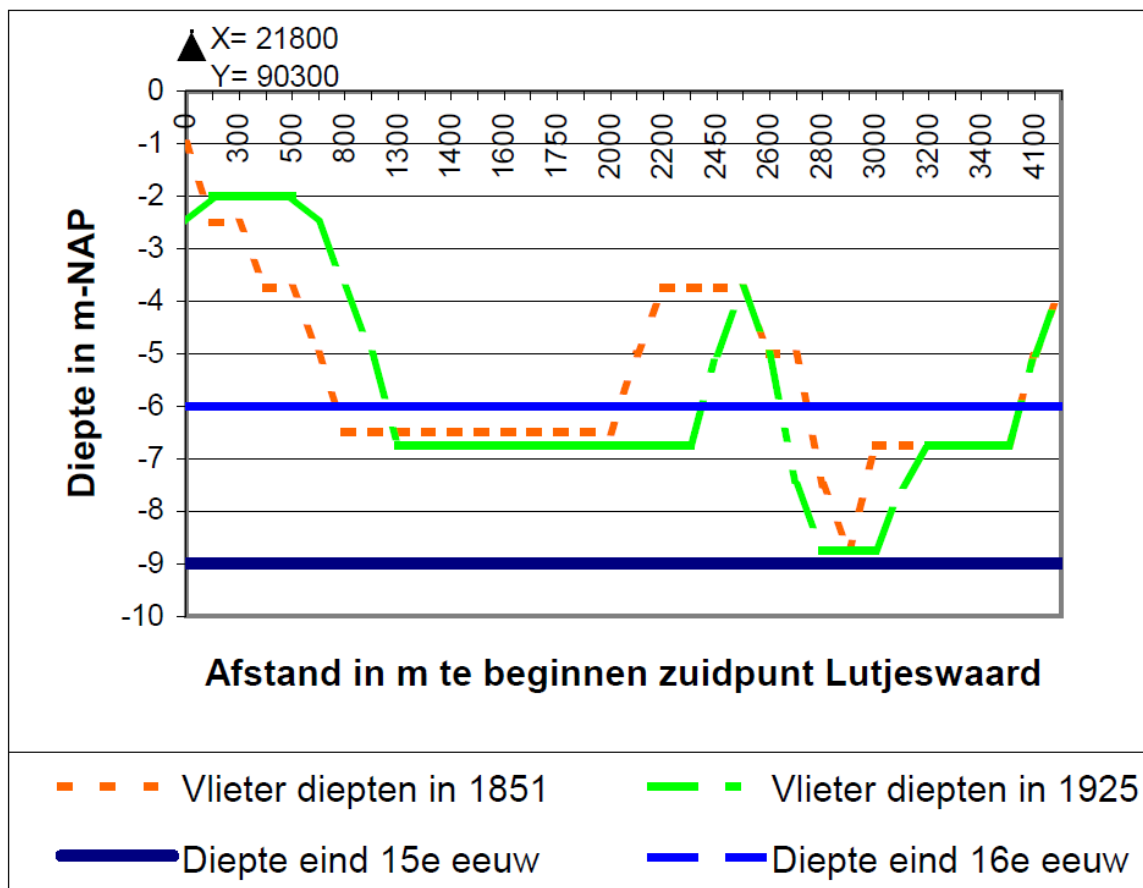
De Balg had in 1874 geen verbinding meer (binnen de -10 m NAP-lijn) met de Texelstroom. Het opvullen ging daarna door: in 1908 was het oostelijke diepe deel verdwenen en opgevuld tot circa -7,5 m NAP. De Balg breidde zich verder uit in zuidelijke richting. In 1921 begon de Balg zich langzaam terug te trekken als gevolg van het begin van de afsluiting van het Amsteldiep. In de periode 1921-1925 trad een sterke afname van de breedte van het Malzwin op bij de aansluiting op de Texelstroom. Ook trok de Wierbalg zich terug in deze periode.



Figuur B-9 Het westelijk waddengebied rond 1700 A.D. Reconstructie van Schoorl (1999).

Uit een kaart van Albert Haeyen uit 1585 blijkt dat in die tijd de Vlieter al een belangrijke geul was. De diepte van de Vlieter ten westen van de Javaruggen bedroeg in die tijd 4 vadem (circa 7 m; vermoedelijk ten opzichte van laagwater). Het laagwater is voor die tijd geschat op ca. -0,6 m NAP zodat voor de diepte van de Vlieter rond het eind van de 16<sup>e</sup> eeuw zo'n 7 à 8 m kan worden aangehouden. Ook de Doove Balg begon zich in die tijd te vormen.

Uit het dwarsprofiel bleek eveneens een zekere verschuiving van het profiel in oostelijke richting. Bij het Oude Vaarwater was over het tijdvak 1850 tot 1925 sprake van een oostwaartse verplaatsing van circa 100 m op een diepte van -10 m NAP. Deze oostwaartse verplaatsing werd veroorzaakt doordat de Vlieter daar onderdeel uitmaakte van de uitschurende buitenbocht van de Texelstroom. Behoudens deze oostwaartse verplaatsing lijken de diepten nauwelijks te veranderen vanaf de 15<sup>e</sup> eeuw (Figuur B-10).

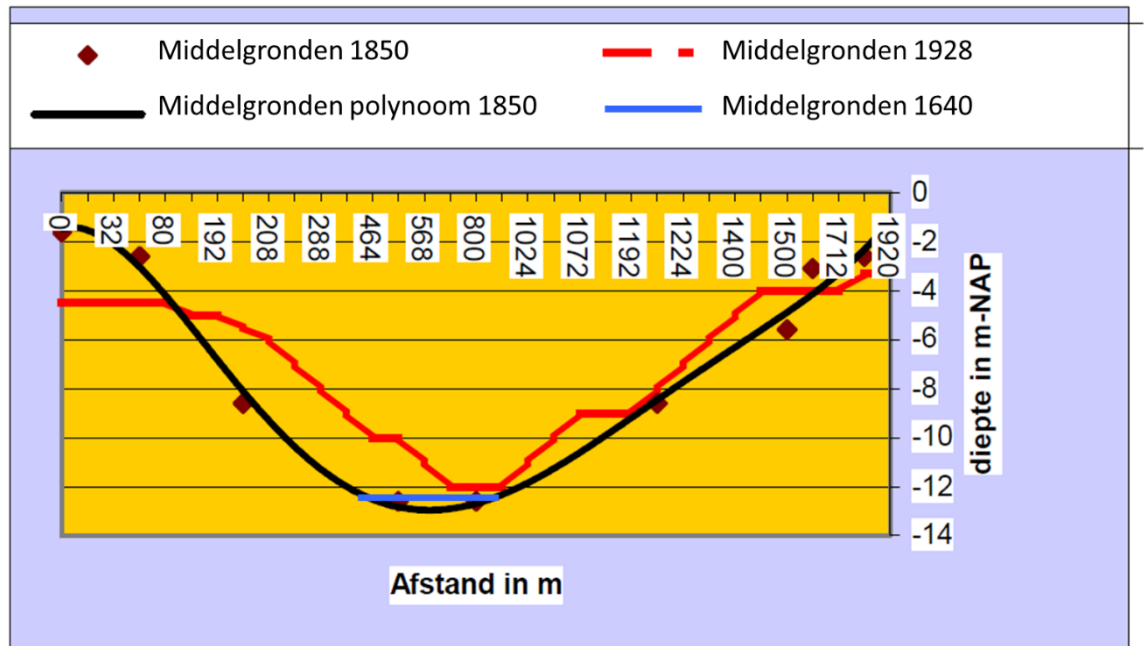


Figuur B-10 Overzicht van de diepteprofielen vanaf de zuidpunt van het Lutjeswaard naar het oosten. Diepten eind 15e eeuw ('sGrooten-kaart) en diepten eind 16e eeuw (Waghenaer) lijken niet te zijn veranderd t.o.v. 1851 en 1925 (Oost & Kleine Punte, 2003).

Uit een kaart van Albert Haeyen uit 1585 blijkt dat in die tijd oostelijk van de Vlieter de Jaep Vaersplaten (Javaruggen) ook al aanwezig waren. De Javaruggen vormden rond 1850 de overgang van de (diepere) Doove Balg naar het relatief ondiepe Zuiderzeebekken. In dit gebied waren in 1850 twee geulen te onderscheiden. De westelijke geul had een diepte van circa 6,5 m, met in het midden een ondieper deel. De oostelijke geul was het diepst: zo'n -10 m NAP. Tot 1928 veranderden deze geulen nauwelijks in diepte, wel verplaatsten zij zich in oostwaartse richting.

#### B.4.4 Het Zeegat van het Vlie

Het Zeegat van het Vlie is 2 km verschoven in noordoostelijke richting in de periode 1796 tot en met 1918. Zowel West-Terschelling en Oost-Vlieland breidden zeewaarts uit in deze periode. Dit leidde tot een verdieping van de Vliestroom. De geul Middelgronden maakte onderdeel uit van het Zeegat van het Vlie en was zo een belangrijk onderdeel van de vaarweg vanaf de Waddenzee naar plaatsen als Harderwijk. De Middelgronden hadden rond 1640 een geschatte diepte van -12,5 m NAP (Schoorl, 1999b, p. 800). Uit het geconstrueerde dwarsprofiel is voor 1850 een diepte af te leiden van ca. 12,5 m (Figuur B-12-9). In tegenstelling tot de Vlieter, de Wierbalg en het Zwin waar een oostwaartse verplaatsing vastgesteld werd, was bij de Middelgronden alleen sprake van een oostwaartse verplaatsing van de westelijke zijde van de geul. Na 1850 was in de periode tot 1925 (op basis van twee profielen) sprake van opvulling van de geul, waarbij de geuldiepte enigszins afnam van -12,6 tot -12 m NAP en sprake was van een versmalling van de geul.



Figuur B-12-9 Dwarsdoorsnede van de Middelgronden (naar Oost & Kleine Punte, 2003).

Rond het Zeegat van het Vlie worden regelmatig grote zandplaten gevormd. Voor zover na te gaan worden op de buitendelta regelmatig platen gevormd die oostwaarts migreren en verheelen met de westzijde van Terschelling. De laatste grote plaat die zich rond het einde van de 19<sup>e</sup> eeuw verheelde was de Noordsvaarder. Duinvorming op deze voormalige plaat is een handje geholpen met de aanleg van een stuifdijk in de jaren '30 van de vorige eeuw.

Richel is een plaat die juist in de binnendelta is gevormd in de 18<sup>e</sup> eeuw ten zuiden van Vlieland. Deze heeft aan het eind van de 19<sup>e</sup> eeuw haar huidige positie bereikt. De afgelopen 100 jaar is de plaat steeds hoger geworden, zodat de plaat tegenwoordig alleen bij zeer sterke waterstandsverhogingen onderloopt.

#### B.4.5 Zuiderzee

Het grootste deel van de Zuiderzeekusten kon door middel van dijken worden gehandhaafd en landverlies langs de randen werd grotendeels tot staan gebracht. De afname van de eilanden van de Zuiderzee ging echter door. Urk, Marken en Schokland namen geleidelijk af in grootte. Voor Schokland betekende het uiteindelijk een zodanige verarming dat in 1859 het eiland op bevel van koning Willem III werd ontruimd. Veranderingen in deze periode waren verder relatief gering.

## B.5 Referenties

Allan, F., 1854. Het Eiland Marken en Zijne Bewoners. Weijtingh & van der Haart, Amsterdam.

Bakker, M. & Van Smeerdijk, D.G., 1982. A palaeoecological study of a late Holocene section from "Het Ilperveld", western Netherlands, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 36, 95-163.

Bartels, M.H. (Ed.), 2016. Dwars door de dijk; archeologie en geschiedenis van de Westfriese Omringdijk tussen Hoorn en Enkhuizen; Archeologie West-Friesland, m.m.v. D. Aten, M. Bartels, J. de Bruin, D. Duijn, B.



van Geel, S. Gerritsen, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, G. Kazimier, C. van der Linde, C. Schrickx. Stichting Archeologie West-Friesland, Hoorn, 4 delen, 576 pp.

Besteman, J.C., 1974. Carolingian Medemblik - Berichten van de Rijksdienst v.h. Oudheidk. Bodemonderzoek 24: 43-106.

Borger G.J. & Kluiving, S.J., 2017. The wet heart of the Netherlands. In Kluiving et al (eds.) 2017:L Interdisciplinarity between humanities and science. Sidestone Press, Leiden, 37-54.

Bos, J.M., 1988. Landinrichting en archeologie: het bodemarchief van Waterland. Nederlandse Archeologische Rapporten 6, Amersfoort.

Buisman, J., 1995. Duizend jaar weer, wind en water in de Lage Landen 1, tot 1300. Uitgeverij van Wijnen, 656 pp.

Casparie W.A. & J.G. Streefkerk, 1992. Climatological, stratigraphic and palaeo-ecological aspects of mire development. In J.T.A. Verhoeven: Fens and Bogs in the Netherlands: Vegetation, History, Nutrient Dynamics and Conservation. P. 81-130.

Hogestein, J.W.H., 1989. Palaeobotanical analysis of Monnickendam and the salination of the Zuiderzee. Cingula 11, P. 115-124.

Hogestijn, J.W.H., 1991. "Archeologische kroniek van Flevoland." in: En het land was niet langer woest en ledig. Cultuur Historisch Jaarboek voor Flevoland. Zutphen. 110-129.

Hogestijn, J.W.H., 1992. Schokland in de late middeleeuwen. Verschenen in: Schokland revisited. Cultureel Historisch Jaarboek voor Flevoland, blz. 95-112. Lelystad.

Lang, A.W., 1955. Traces of lost North European sea charts of the 15th century. Imago Mundi, 12, 31-44.

Lang, A.W., 1958. Gestaltungswandel des Emsmündungstrichters. Untersuchungen zur Entwicklung der Emsmündung von der Mitte des 16. bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts. Veröffentlichungen des Niedersächsischen Amtes für Landesplanung und Statistik, Reihe A: Forschungen zur Landes- und Volkskunde. 1. Natur, Wirtschaft, Siedlung und Planung (Schriften der Wirtschaftswissenschaftlichen Gesellschaft zum Studium Niedersachsens e.V.) Bd.58, Walter Dom Verlag, Bremen, 1-153.

Leek, J., 2016. Onder golven bedolven; De archeologie van het verdwenen West-Friesland in de middeleeuwse Wieringermeer. Archeologie in West-Friesland 20, 7 pp.

Niemeijer, J.A., 1975. Land van terpen en dijken. Boekencentrum bY, the Hague, 2nd print, 118 pp.

Oost, A.P., 1995. Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet. A study of barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins, Geologica Ultraiectina, Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen no. 126, Utrecht University.

Oost, A.P., S. van Heteren, J. Wallinga & M. Ballarini, 2003: De Kalender van Texel op basis van luminescentie en historische gegevens, excursiegids, RIKZ/AB/2003.603x

Paap, B.F., C.W. Dubelaar, J.L. Gunnink, A.P. Oost, 2012. Unraveling the shallow geology of the western Wadden Sea using high resolution seismics. Neth. Journ. Of Geosc., 91,3, 341-355.

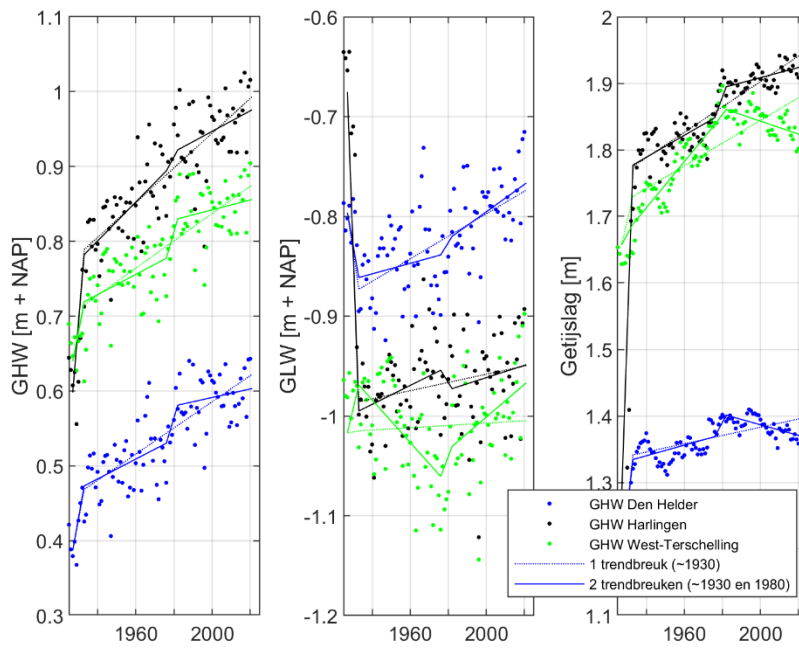
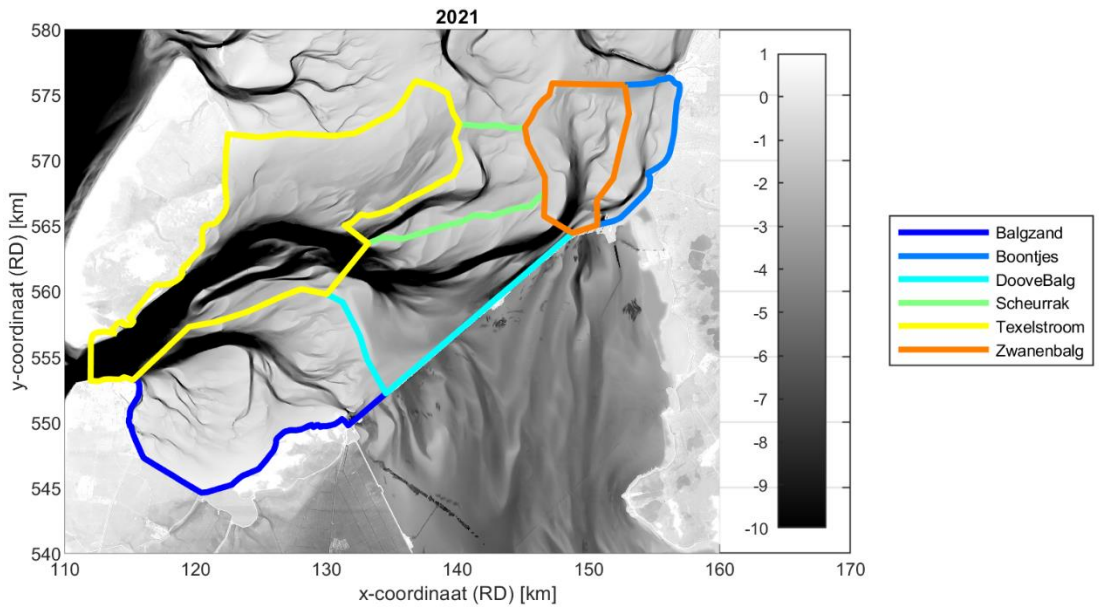
Platner, C., 1867. Die grossen kolnischen Jahrbücher, nach der Ausgabe der Monumenta Germaniae übersetzt (p. 82: 1170 A.D. contemporaneous perhaps by Burchard). Die Geschichtschreiber der deutschen Vorzeit, 13th Cent., 1. Band, Verlag von Franz Duncker, Berlin, 272 pp.

- Pons, L.J. & J.A. Wiggers, 1960. De holocene wordingsgeschiedenis van Noordholland en het Zuiderzeegebied, deel II. Tijdschrift KNAG, XX, 3-57.
- Reinders, R., 1994: Cog finds from the IJsselmeerpolders. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, RIJP, Flevovericht 248, 35 pp.
- Schmeidler, B. & J.M. Lappenberg, 1910. Helmolds Chronik der Slaven, nach der Ausgabe der Monumenta Germaniae iibersetzt von J.C.M. Laurent und W. Wattenbach (97, p. 227: Chronica Slavorum, witten 1164 A.D. by Helmold, contemporaneous). Die Geschichtschreiber der deutschen Vorzeit, Band 44, Verlag der Deutschen Buchhandlung, Leipzig, 3rd Ed. 271 pp.
- Schoorl, H., 1973. Zeshonderd jaar water en land. Bijdrage tot de historische Geo- en Hydrografie van de Kop van Noord-Holland in de periode 1150-1750. Verhandeling van het Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap, Nr.2, Wolters-Noordhoff, Groningen, 534 pp.
- Schoorl, H., 1999a. De Convexe Kustboog, deel 1, het westelijk waddengebied en het eiland Texel tot circa 1550. pp. 1- 187.
- Schoorl, H., 1999b. De Convexe Kustboog, deel 2, het westelijk waddengebied en het eiland Texel vanaf circa 1550. pp. 188-521.
- Stoob, H., 1963. Helmold von Bosau, Slawenchronik, neu iibertragen und erlautert (p. 339: Chronica Slavorum, witten 1164 A.D. by Helmold, contemporaneous). Ausgewahlte Quellen zur deutschen Geschichte des Mittelalters, 19th vol., Wissenschaftliche Buchgesellschaft E.V., Darmstadt, 399 pp.
- Taayke, E., 1988. Terpenaardewerk uit de ijzertijd en de Romeinse tijd', in: M. Bierma e.a. (red.), Terpen en wierden in het Groningse kustgebied, Groningen, 104-117.
- Van der Aa, A.J., 1837-1854: Aardrijkskundig Woordenboek der Nederlanden deel 1-14.
- Van Giffen, A.E., 1964. De ouderdom onzer dijken. Tijdschrift K.N.A.G., tweede reeks, deel LXXXI, No.3, 273-286.
- Van Popta, Y. 2020. When the Shore becomes the Sea'. Proefschrift Univesrsiteit Groningen.
- Veldhuizen, E., 1980. Vruchten en zaden van Marken - Intern rapport Instituut voor Pre- en Protohistorie Univ. van Amsterdam.
- Vlierman, K., 1985. Neolithische en middeleeuwse vondsten op de kavels OZ 35 en OZ 36 in Zuidelijk Flevoland Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders. - Lelystad : R.I.J.P.-rapport, 1985. – 51 39p.
- Vos, P.C., 2015. Origin of the Dutch coastal landscape. Long-term landscape evolution of the Netherlands during the Holocene, described and visualized in national, regional and local palaeogeographical map series. PhD thesis Utrecht Univ. Barkhuis Publishing, Eelde.
- Vos, P.C., 2018: Holocene reconstructie kaarten Nederland, versie 2018.
- Wiggers, A.J., 1955: De wording van het Noordoostpoldergebied. Een onderzoek naar de fysisch-geografische ontwikkeling van een sedimentair gebied. W.E.J. Tjeenk-Willink, Zwolle, 216 pp.
- Willemsen, J. van't Veer, R. & van Geel, B. 1996: Environmental change during the medieval reclamation of the', raised-bog area Waterland (The Netherlands): a palaeophytosociological approach. Review of Palaeobotany and Palynology , 94, 75-100

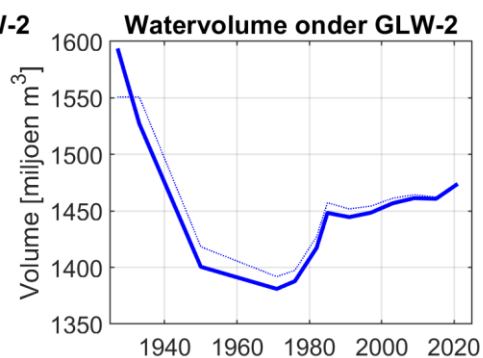
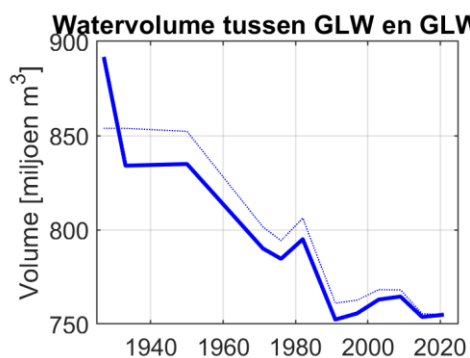
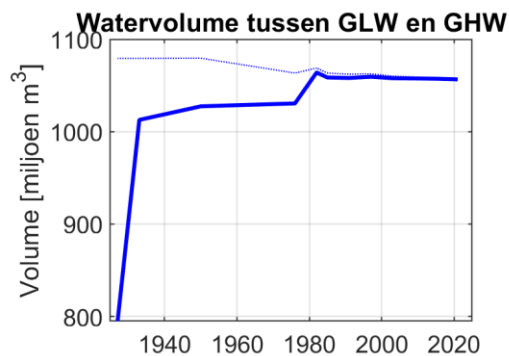
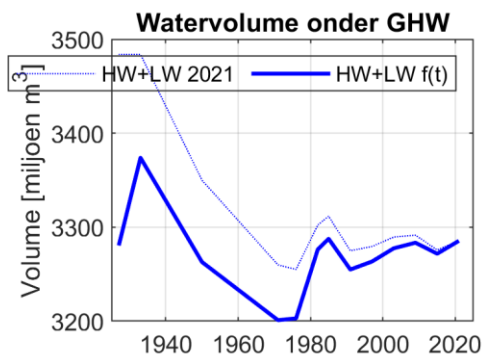
Woltering, P.J., 1998 (1996–1997). Occupation History of Texel, III: The Archaeological Survey, Paleodemography and Settlement Patterns, BROB 42, 209–363.

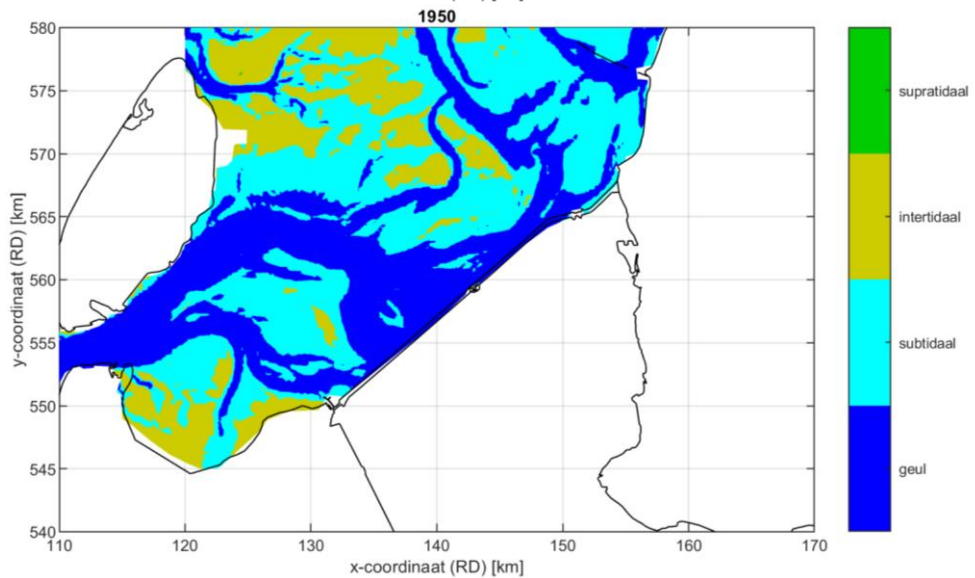
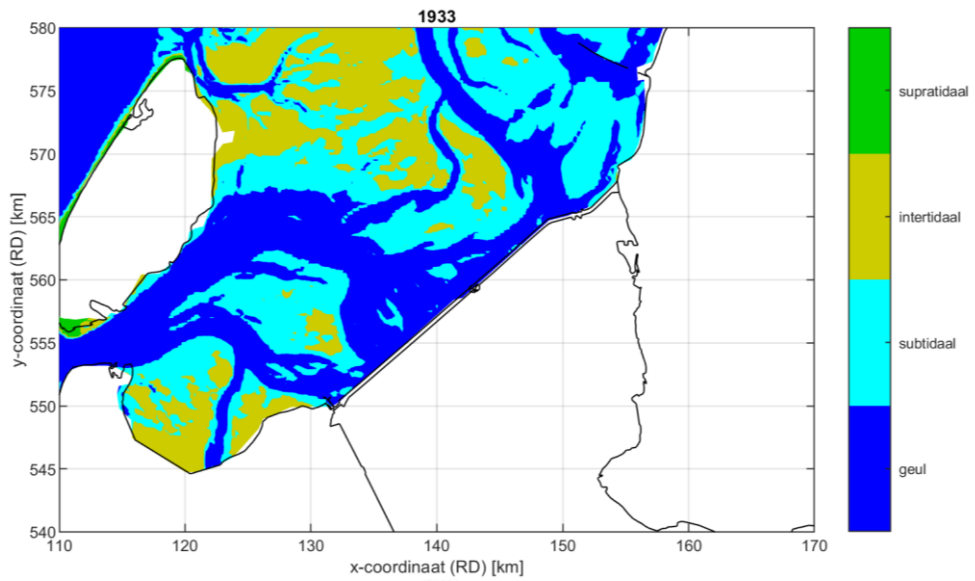
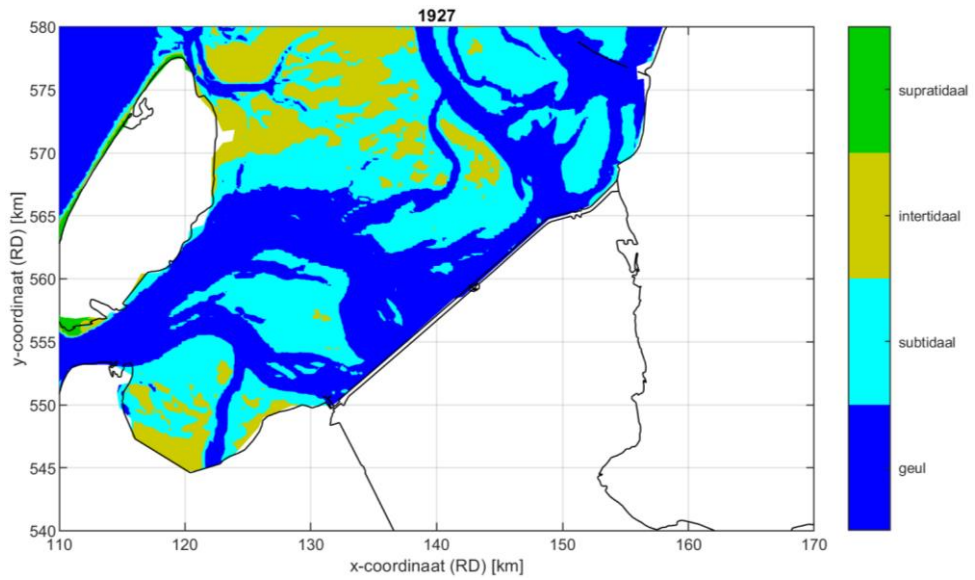
Zuidema, W. & J. Douma, 1972. Kronieken van de abdij Bloemhof te Wittewierum, loopende over de dertiende eeuw, door de Abten Emo, Menko en een Ongenoeemde. In opdracht van het Hoofdbestuur der Algemeene Vereeniging "Groningen" uit het Latijn vertaald en uitgegeven met medewerking van Dr. C.D.J. Brandt. Broekhoff N.V. v/h Kemink en zoon over den Dom te Utrecht, 268 pp.

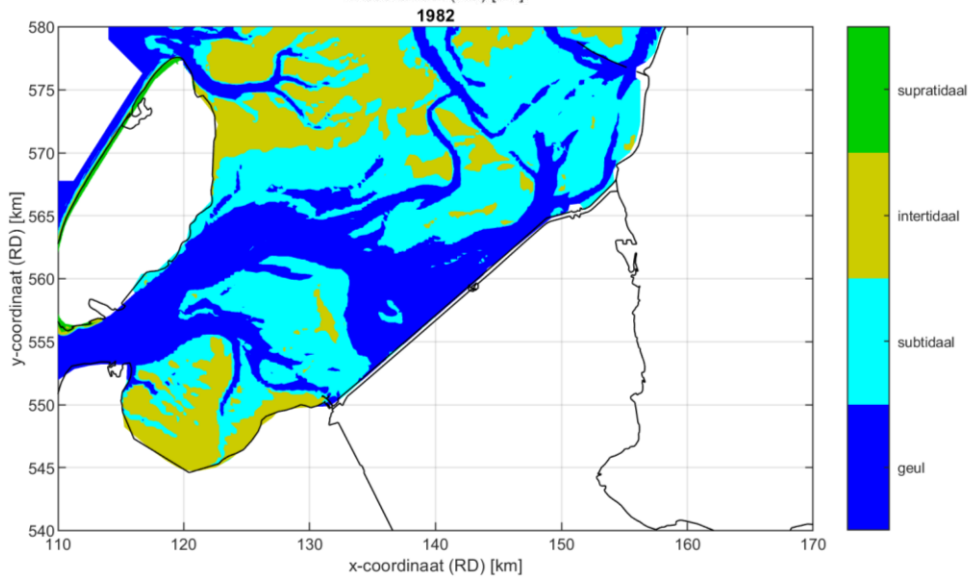
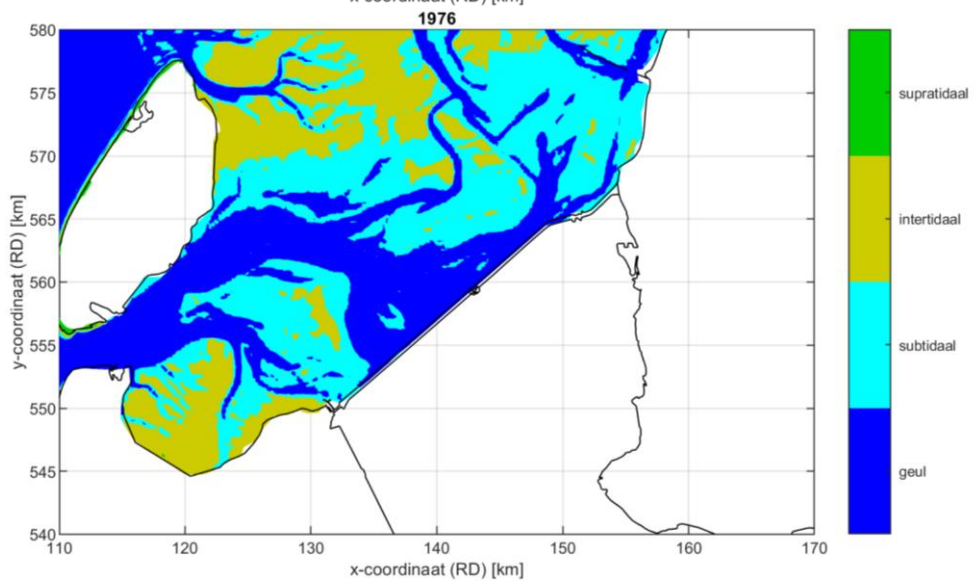
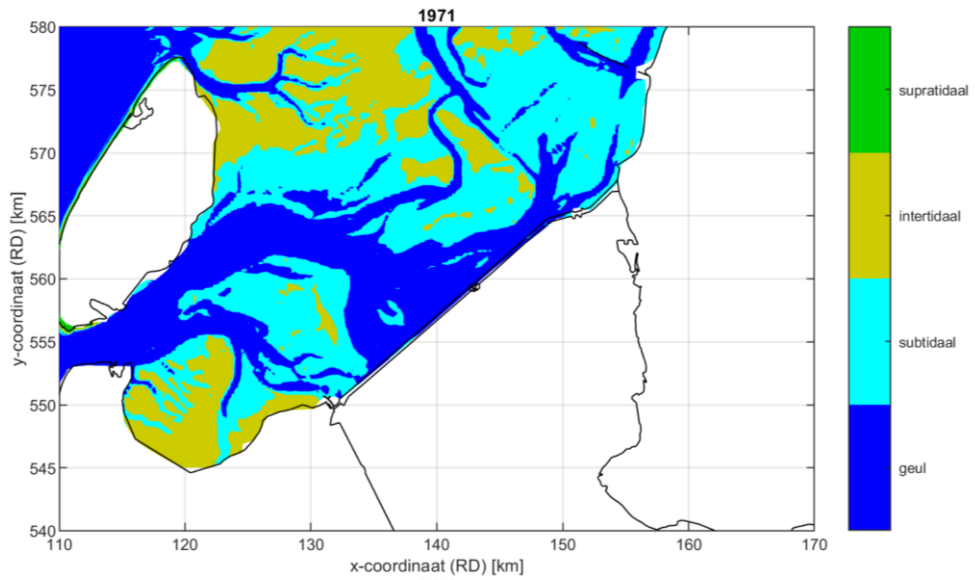
# C Watervolumes

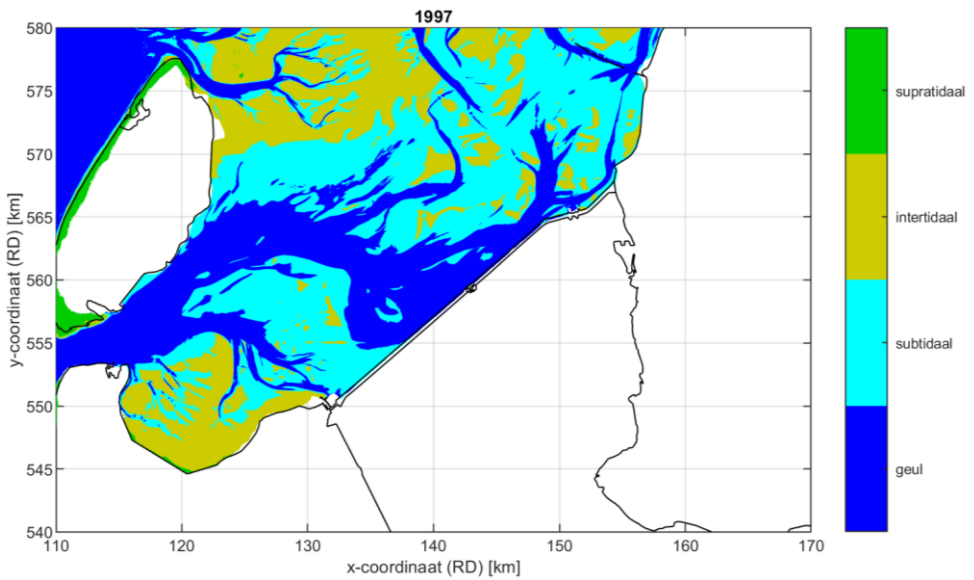
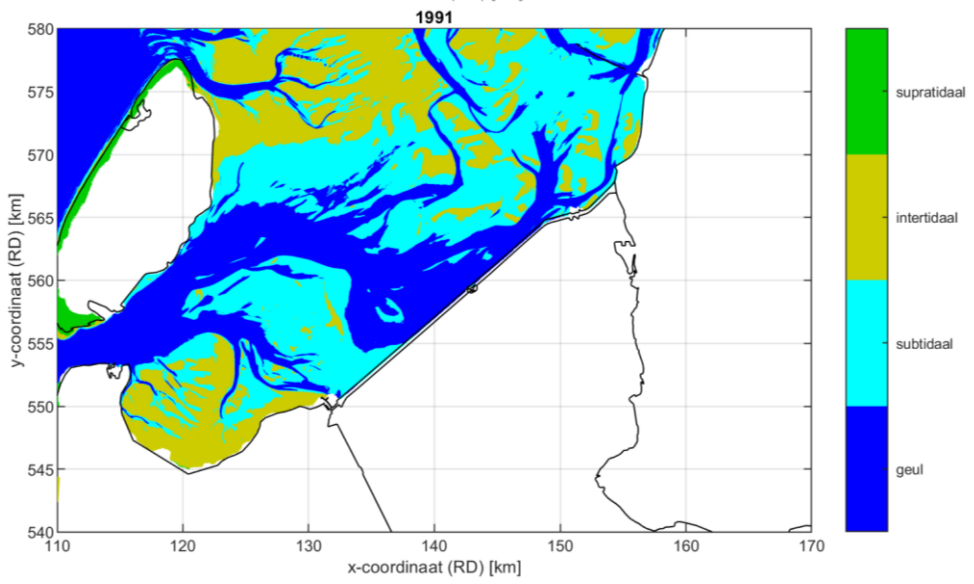
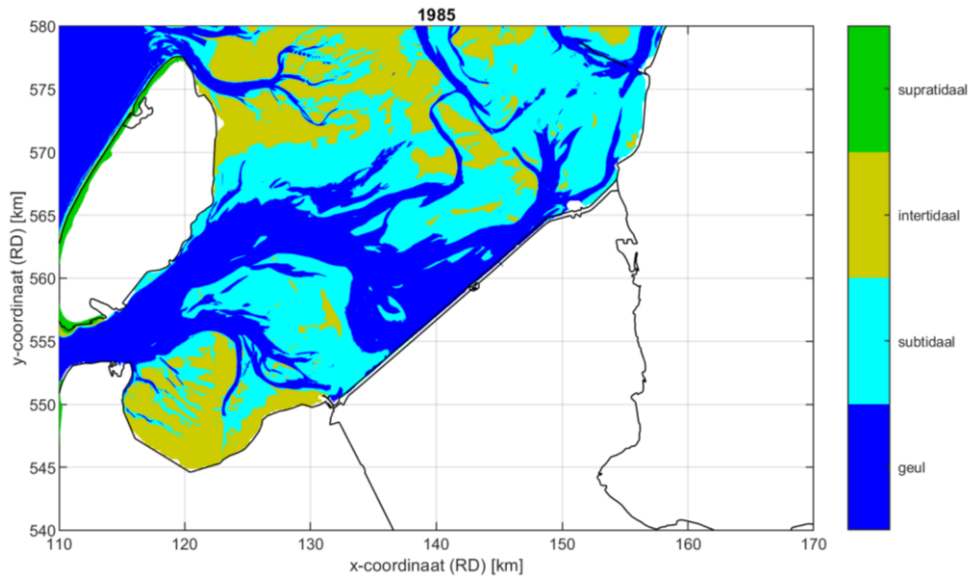




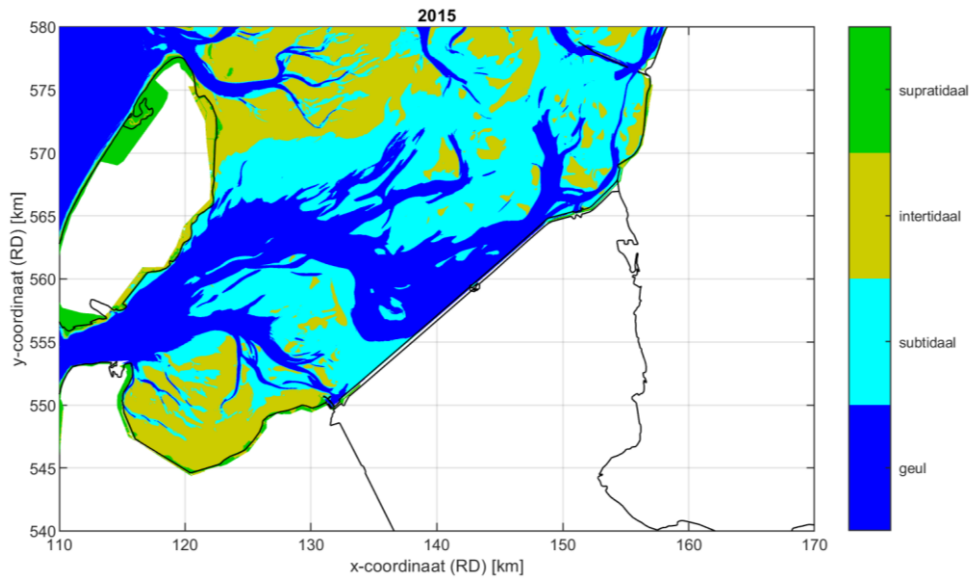
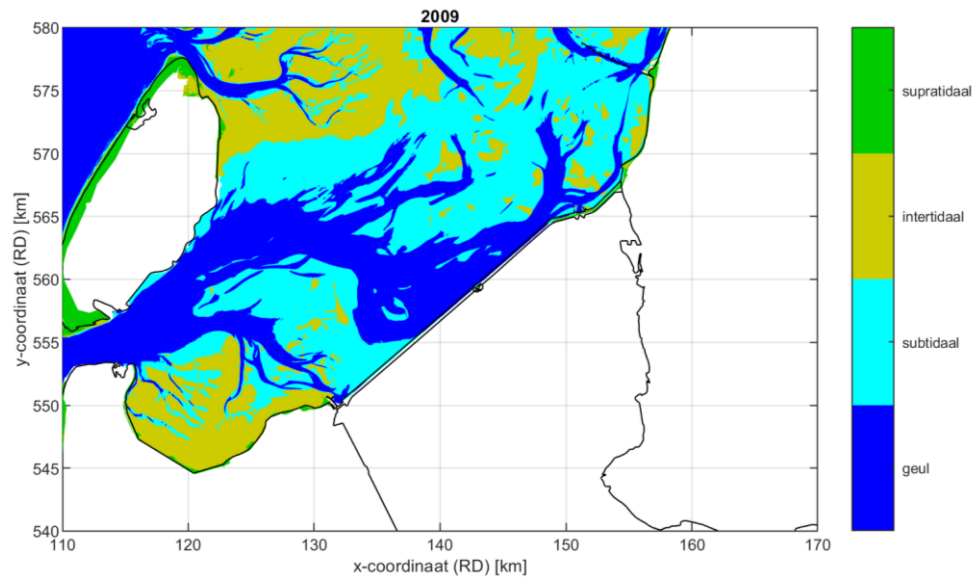
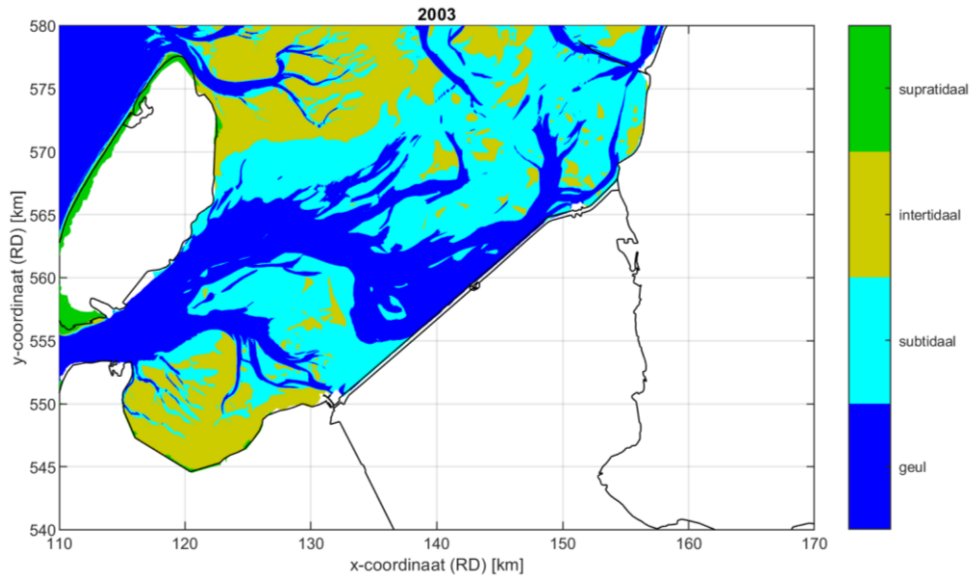


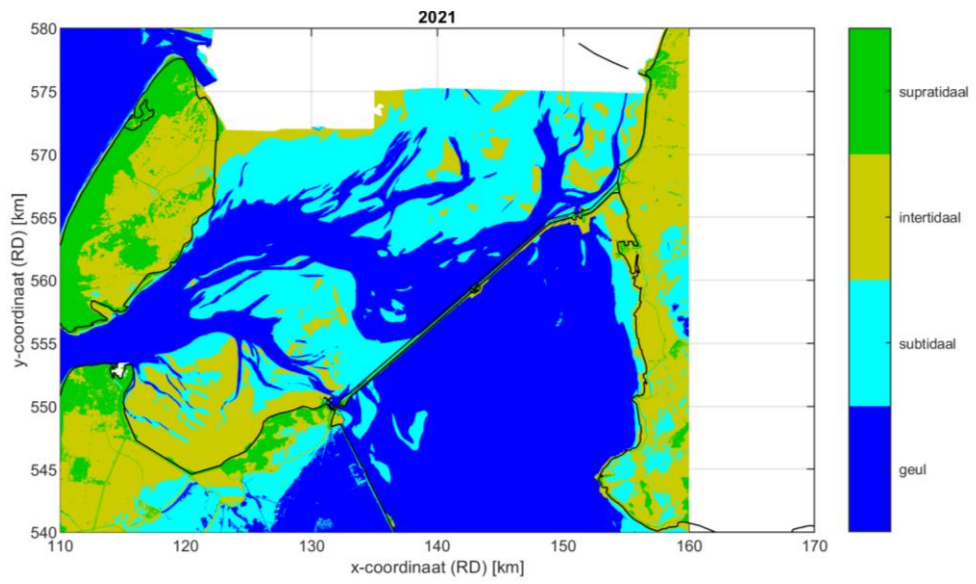














Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

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