

**Morfologie
Kombergingsgebieden
Marsdiep en Vlie**

Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2019



Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie

Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2019

Albert Oost
Jelmer Cleveringa
Marcel Taal

Titel
Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie

Project 11203669-000	Kenmerk 11203669-000-ZKS-0006	Pagina's 104
--------------------------------	---	------------------------

Trefwoorden





Waddenzee, morfologie, Zeegat van Ameland, Borndiep, kombergingsgebied rapportage, beheerbibliotheek.

Samenvatting

Dit rapport geeft een overzicht van de actuele kennis van de morfologie van de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie, en een overzicht van de beheer- en beleidsvraagstukken, en is onderdeel van de 'beheerbibliotheek' van de kombergingsgebieden van de Waddenzee.

Referenties

KPP 2018 BO02 Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.1	dec. 2018	Albert Oost Jelmer Cleveringa (Arcadis) Marcel Taal		Edwin Elias		Frank Hoozemans	
0.2	dec 2019	Albert Oost Jelmer Cleveringa (Arcadis) Marcel Taal		Edwin Elias		Toon Segeren	

Status
definitief

Inhoud

Samenvattende beschouwing	v
1 Inleiding	1
1.1 Gezamenlijk onderzoek morfologie Waddenzee	1
1.2 Doelen kombergingsrapport / beheerbibliotheek	1
1.3 Benaming	2
1.4 Leeswijzer	2
2 Gebruik, beleid en beheer	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Toegankelijkheid	3
2.2.1 Gebruik: Vaarwegen en havens	3
2.2.2 Beleid	4
2.2.3 Beheer	5
2.2.4 Historische case: De aanleg van de Pollendam en de vaargeul	6
2.3 Veiligheid tegen overstromingen	7
2.3.1 Beleid	7
2.3.2 Beheer	7
2.4 Natuur, recreatie, visserij	7
2.4.1 Gebruik	7
2.4.2 Beleid	8
2.4.3 Beheer	8
2.5 Andere functies	9
3 Grootschalige kenmerken en ontwikkelingen	13
3.1 Sterke samenhang tussen kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie	13
3.2 Grootschalige fysische kenmerken van het kombergingsgebied Marsdiep	13
3.3 Grootschalige fysische kenmerken van het kombergingsgebied Vlie	14
3.4 Aanvoer van zoetwater	16
3.5 Belangrijke verschillen tussen de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie	16
3.6 Ontstaan Westelijke Waddenzee door openbreken Marsdiep en Zuiderzee	17
3.7 Afsluiting Zuiderzeegebied	20
3.7.1 De afsluiting en het getij	20
3.7.2 Verplaatsing wantij tussen kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie	20
3.7.3 Areaalveranderingen na afsluiting	24
3.8 De sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee	25
4 Getijdegeulen	29
4.1 Basisbegrippen	29
4.1.1 Getijstroming stuurt geulvolume	29
4.1.2 Andere stromingspatronen	32
4.2 Kenmerkende geulvormen en -dynamiek	32
4.2.1 Zeegaten, de grote en diepe geulen tussen de eilanden	32
4.2.2 Geulbochten of meanders	35
4.2.3 Eb- en vloedscharen	37
4.2.4 Stabiele geulen	38
4.3 Veranderingen in geulen in relatie tot gebruik en beheer	39

4.3.1	Het Zeegat van Texel en de oevers bij Den Helder en 't Horntje	40
4.3.2	Zuiderstortemelk en Vliesloot	41
4.3.3	Slenk en Schuitengat en de vaarweg naar Terschelling	42
4.3.4	De Boontjes	46
4.3.5	Kimstergat, baggeren en verspreiden bij Harlingen, Slibmotor Koehoal	48
5	Permanent onder water liggende (sublitorale) platen	53
5.1	Inleiding	53
5.2	Vlieter en Javaruggen	54
5.3	Sublitoraal met "Hankenammen"	55
5.4	Beleid en beheer	58
6	Wadplaten	61
6.1	Kenmerken, gebruiksfuncties en belangrijkste gebieden	61
6.2	Ontwikkelingen over de gehele kombergingsgebieden	62
6.3	Het stabiele Balgzand en de dynamische Lutjeswaard	64
6.4	Dynamische platen ten zuiden en zuidwesten van de Pollendam	67
6.5	Het plaatgebied voor het Friese vasteland	69
6.6	De vloedgetijde delta van het Vlie met Richel en de Engelschhoek	70
6.7	Griend en Grienderwaard	73
6.8	Beleid en beheer	74
7	Kwelders	75
7.1	Inleiding	75
7.2	Kwelders in de Westelijke Waddenzee	76
7.2.1	De Schorren	76
7.2.2	Kwelders van het Puntje en Karhoek, Mokbaai	77
7.2.3	Balgzand tot en met Den Oever	78
7.2.4	De kwelders van Koehoal tot Westhoek	79
7.2.5	Griend	79
7.2.6	Kwelders bij Terschelling	79
7.3	Beleid en beheer	80
8	Bevindingen gestructureerd via gebruiksfuncties	85
8.1	Inleiding	85
8.2	Veiligheid tegen overstromingen	85
8.2.1	Dijkstabiliteit in relatie tot geulmigratie en ontgroning	85
8.2.2	Sedimentatie van het voorland en belasting van de waterkering	87
8.3	Bereikbaarheid: vaarwegen en havens	88
8.3.1	Lokale dynamiek van de bodem met gevolgen voor gebruik van de vaarweg	88
8.3.2	Grootschalige veranderingen in bodemligging met beperkingen voor gebruik	89
8.4	Natuur	90
8.4.1	Afsluiting Zuiderzee en veranderingen in arealen	91
8.4.2	Beperkt areaal kwelders	92
8.5	Overige gebruiksfuncties	92
8.5.1	Mosselpercelen en -cultuur en mosselzaadinvanginstallaties (MZI's)	92
8.5.2	Zand- en schelpenwinning en de morfologie	93
9	Referenties	95

Bijlage(n)

A Bijlage A. Morfologische schaalniveaus en eenheden	A-1
B Bijlage B. Historische ontwikkelingen Westelijke Waddenzee	B-1

Samenvattende beschouwing

Inleiding

Voorliggend rapport is het tweede 'kombergingsrapport' van de Nederlandse Waddenzee en behandelt de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Samen met het veel kleinere kombergingsgebied 'Eierlandse Gat' vormen ze de Westelijke Waddenzee.

Kombergingsrapporten worden gemaakt binnen het gezamenlijke morfologische onderzoeksprogramma van Rijkswaterstaat en het Programma naar een Rijke Waddenzee. Een kombergingsrapport heeft twee functies. Het bevat de actuele kennis van de morfologie op de middelgrote ruimteschaal (de mesoschaal) en is een naslagwerk voor de beheerders van de Waddenzee (beheerbibliotheek).

Deze beschouwing is niet gericht op het volwaardig samenvatten van de inhoudelijke hoofdstukken. Dat past niet bij een naslagwerk. In hoofdstuk 8 wordt wel per gebruiksfunctie besproken wat de beschreven ontwikkelingen op de mesoschaal betekenen.

Historische ontwikkeling

De ontwikkeling van de gehele Westelijke Waddenzee begon met het ontstaan van een verbinding tussen Vlie en Zuiderzee voor het begin van de jaartelling. Daarna is ze gedomineerd door het ontstaan van het Marsdiep systeem, vanaf middeleeuwen, door erosie van veengebied. Dat leidde tot een veel dieper systeem dan de Oostelijke Waddenzee. Ook is er vanaf dat moment al een 'gedeeld bekken': zowel het Marsdiep als het Vlie maken contact met de Zuiderzee. In dat diepere bekken werd vervolgens de Afsluitdijk aangelegd. Op dat moment verandert de getijkarakteristiek in het overgebleven (gedeelde) bekken.

Morfologische samenhang beide kombergingsgebieden

De belangrijkste reden om de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie gezamenlijk te bespreken is de substantiële uitwisseling van sediment over het wantij. De wantijzone tussen Marsdiep en Vlie bestaat maar voor een beperkt deel uit wadplaten en is daardoor meer 'open' dan andere wantijen in de Waddenzee, die over de wadplaten lopen. Netto sedimenttransport is er vooral vanuit het kombergingsgebied Marsdiep naar het kombergingsgebied Vlie, in het bijzonder naar de Vlake van Oosterbierum.

Verschillen tussen Marsdiep en Vlie

De grote, diepe geulen hebben zich in het kombergingsgebied van het Marsdiep (in tegenstelling tot dat van het Vlie) sinds aanleg van de Afsluitdijk gehandhaafd. Er is dientengevolge ook een relatief veel beperkter areaal droogvallende platen dan in de rest van de Waddenzee. In plaats daarvan liggen in het kombergingsgebied Marsdiep uitgestrekte sublitorale gebieden. Het diepe karakter van het Marsdiep lijkt in vrijwel alle toekomstscenario's behouden. Er zal waarschijnlijk een veel dieper systeem blijven, dat niet naar een bodem ontwikkelt die vergelijkbaar is met de kombergingsgebieden van de Oostelijke Waddenzee. Deze hypothese is van belang in de beoordeling van kwetsbaarheid voor en effecten van (versnelde) zeespiegelstijging en onderwerp van toekomstig onderzoek.

Een tweede belangrijk verschil tussen de kombergingsgebieden van Marsdiep en Vlie is de oriëntatie (zie Figuur 3-3). De grote, ver in oostelijke richting uitstreckende hoofdgeul van het Marsdiep lijkt daarmee meer op de hoofdgeul van een 'lang bekken', wat een heel andere voortplanting van het getij kent. Dit verklaart mogelijk ook een deel van de, van de andere

kombergingsgebieden afwijkende, morfologische ontwikkeling en de grotere uitwisseling van water en sediment naar andere delen van de Waddenzee.

Onderzoeksopgave Vlie

Het is belangrijk inzicht te krijgen in hoeverre inzichten over de bekkens in de Oostelijke Waddenzee (zoals gerapporteerd in het position paper van de Waddenacademie) ook toepasbaar zijn voor het kombergingsgebied Vlie. Het gaat in het bijzonder om de ontwikkeling van de hoogte van de wadplaten in relatie tot zeespiegelstijging.

Hierbij wordt opgemerkt dat de morfologische evolutie van, eigenlijk alle, kombergingsgebieden uniek is. Een morfologische beschouwing op megaschaal (met uitspraken die voor de hele Waddenzee zouden gelden) geeft inzicht, maar zal niet voldoende kwantitatief en specifiek zijn voor concrete vraagstukken vanuit beleid en beheer.

Morfologische eenheden op mesoschaal

Dit rapport bespreekt in de hoofdstukken 4 tot en met 7 achtereenvolgens (getijde)geulen, het sublitoraal (anders dan geulen), de wadplaten en de kwelders. Hieronder de meest opvallende zaken.

De Westelijke Waddenzee kent een andere verhouding in ecotopen en morfologische elementen dan de Oostelijke Waddenzee. Dit leidt tot een ander zwaartepunt in gebruiksfuncties en natuurwaarden. Dit geldt in sterkere mate voor het kombergingsgebied Marsdiep dan voor het kombergingsgebied Vlie. De wadplaten en kwelders vormen in het kombergingsgebied Vlie de helft van het areaal, terwijl dat in het kombergingsgebied Marsdiep 15% is. Qua areaal spelen de kwelders een kleine rol (minder dan 1% van het gebied). De kwelders zijn ook over het algemeen jong

Er is grootschalige sedimentatie nabij de Friese kust. Het areaal wadplaten in dat gebied kent daarom een stijgende trend. Dit speelt vooral in het kombergingsgebied Vlie en vooral bij de Vlakte van Oosterbierum.

De sedimentatie leidt tot minder komberging, waardoor geulen verondiepen. De ligging van de grote geulen (op een tijdschaal van een eeuw, Figuur 4-8 en Figuur 4-9) is wel behoorlijk stabiel.

De evolutie van de wadplaten is zeer variabel. Er is gemiddelde netto sedimentatie, maar er zijn belangrijke verschillen in lokale ontwikkelingen. Een generiek toepasbare verklaring voor de veranderingen in de hoogte van de platen is er niet.

De permanent onder water liggende (sublitorale) platen zijn karakteristiek voor de twee kombergingsgebieden, in het bijzonder voor die van het Marsdiep (51 % van het areaal ten opzichte van 30% van het areaal in dat van het Vlie). De sublitorale platen hebben karakteristieke bodemvormen die nog beperkt bestudeerd zijn. Onder het gebruik van de gebieden vallen mosselkweek, mosselzaadinvanginstallaties en (garnalen)-visserij.

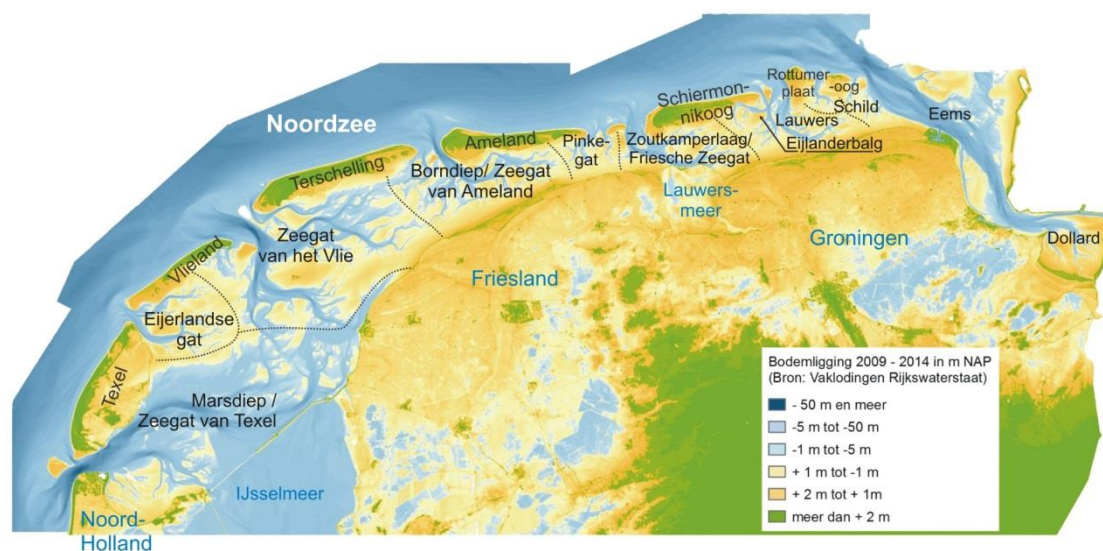
1 Inleiding

1.1 Gezamenlijk onderzoek morfologie Waddenzee

Rijkswaterstaat en Programma naar een Rijke Waddenzee zijn in 2016 gestart met een programma voor de ontwikkeling van kennis over de morfologie van de Nederlandse Waddenzee en voor het inbedden hiervan in beleid en beheer. In het programma wordt morfologische kennis op een structurele manier verzameld, geanalyseerd, geordend en geborgd. Daarnaast wordt de kennis toegankelijk gemaakt voor beleids- en beheervraagstukken op het gebied van veiligheid, bereikbaarheid, natuur en overige gebruiksfuncties. Hiertoe wordt afstemming gezocht met beleidsmakers, beheerders, adviseurs, wetenschappers en gebruikers van het wad. Het voorliggende rapport wordt uitgebracht als onderdeel van dit kennisprogramma.

1.2 Doelen kombergingsrapport / beheerbibliotheek

Voorliggend rapport is het tweede 'kombergingsrapport' van de Nederlandse Waddenzee en behandelt de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Het eerste kombergingsrapport behandelde het Borndiep (Zeegat van Ameland). De kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie worden samen beschreven omdat de morfologische ontwikkelingen van de beide gebieden zeer met elkaar zijn verweven en ze worden gekenmerkt door veel uitwisseling van water en sediment.



Figuur 1-1 De Waddenzee en haar kombergingsgebieden.

De Westelijke Waddenzee omvat ook het Eierlandse gat. Het Eierlandse Gat zeegat maakt geen deel uit van dit rapport. Dit zeegat heeft een duidelijke morfologische scheiding van het Vlie en Marsdiep en kan daardoor als apart kombergingsgebied worden beschouwd. Er volgt nog een apart kombergingsrapport van het Eierlandse gat.

Een kombergingsrapport heeft twee functies:

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

- Het is een inleiding en naslagwerk voor de beheerders van de Waddenzee. Het sluit daarin aan bij het maken en onderhouden van **beheerbibliotheken**¹.

Het is (2018) de ambitie om voor alle kombergingsgebieden (Figuur 1-1 benoemt ze) van de Waddenzee dergelijke rapporten te maken en deze i.s.m. Rijkswaterstaat periodiek bij te werken om voldoende up-to-date kennis en informatie te leveren. Een mogelijke frequentie is zes jaar, gelijk aan het tempo van beschikbaar komen van vaklodgingen. Bij het beschikbaar komen van doorslaggevende nieuwe inzichten kan van deze frequentie worden afgeweken.

1.3 Benaming

Er zijn voor zowel het Marsdiep als het Vlie verschillende benamingen in omloop. Daarnaast kan gemakkelijk verwarring optreden omdat de diverse namen vaak ook nog een dubbele betekenis hebben. Zo wordt Marsdiep zowel voor een deel van het systeem gebruikt als voor het geheel. Ook verwijst "Zeegat" zowel naar het nauwe deel tussen de eilanden als naar het hele 'zeegatsysteem' dat ook kombergingsgebied, eilanden en buitendelta omvat.

Marsdiep en Vlie zijn de oudste en oorspronkelijke namen². Om verwarring te voorkomen spreekt dit rapport steeds over 'kombergingsgebied Marsdiep' en 'kombergingsgebied Vlie'. Voor de hoofdgeulen zal kortweg Marsdiep en Vlie worden gebruikt. Alleen wanneer specifiek de opening / geul tussen twee eilandkoppen wordt bedoeld spreekt dit rapport van het 'zeegat' (van het Marsdiep of het Vlie).

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is als een naslagwerk opgezet. Na een hoofdstuk over de grootschalige ontwikkelingen (hoofdstuk 3) volgen nog vier inhoudelijke hoofdstukken, elk gewijd aan een van de vier belangrijkste morfologische eenheden op mesoschaal:

- Getijdegeulen, vertakkend van groot (bij het zeegat) naar klein (hoofdstuk 4);
- Permanent onder water liggende platen (hoofdstuk 5);
- Intergetijdeplaten, ook wel wadplaten (hoofdstuk 6);
- Kwelders, bij het vasteland en onder de eilanden (hoofdstuk 7);

Deze hoofdstukken volgen op een overzicht van de vraagstukken die spelen bij beleid en beheer (hoofdstuk 2).

Hoofdstuk 8 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.

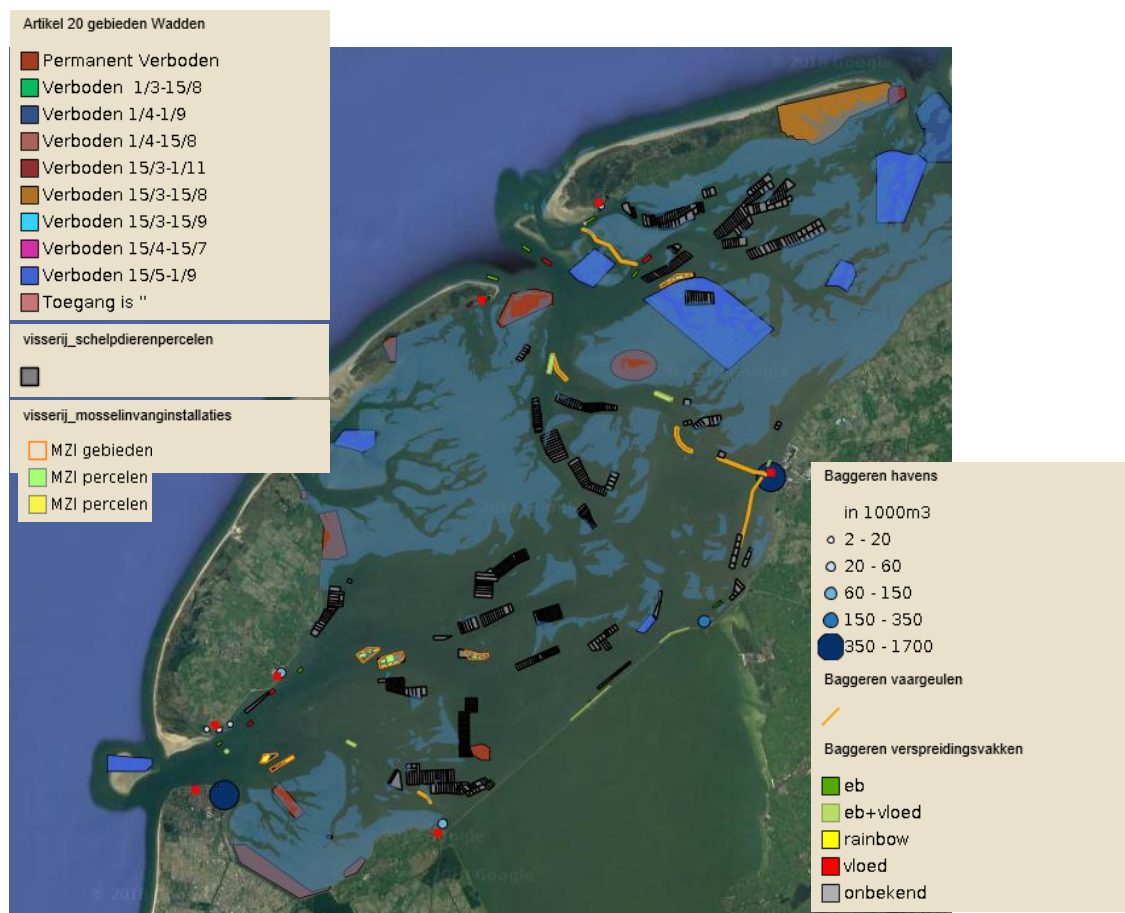
¹ Het concept beheerbibliotheek is ontwikkeld bij Rijkswaterstaat-kustlijn­zorg. Het geeft per kustvak of morfologische eenheid een overzicht van het morfologische systeembegrip in samenhang met de spelende beheer- en beleids­vraagstukken. Het biedt qua morfologische kennis een gezamenlijk vertrekpunt voor de verschillende beheerders. Het rapport is ook bruikbaar voor beleidsmakers, wetenschappers, gebruikers en andere geïnteresseerden.

² Marsdiep: *Cartularium van Holland en Zeeland*; Codex Eberhardi, 817 A.D.; St. Maartens Kerk Utrecht 948 A.D.; Vlie: *Lex Frisionium*, 790 A.D.

2 Gebruik, beleid en beheer

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft het gebruik, beleid en beheer voor die onderwerpen die raken aan de morfologie van (een van) de beide kombergingsgebieden (Figuur 2-1). Beheerders zijn onder andere Rijkswaterstaat, het Ministerie van LNV, waterschappen, Staatsbosbeheer, Natuurmonumenten, Fryske Gea, Hollands Landschap en havenbedrijven (beheren de havens).



Figuur 2-1 Overzichtskartaart met gebruiksfuncties (bron: WaLTer-website).

2.2 Toegankelijkheid

2.2.1 Gebruik: Vaarwegen en havens

De kombergingsgebieden wordt gebruikt door allerlei vaartuigen, zowel beroepsvaart (vrachtvaart, veerboten etc.) als recreatievaart. Een deel is vanwege diepgang gebonden aan de betonde vaargeulen. Aanwezige havens in het kombergingsgebied Marsdiep zijn:

- Veerhaven Den Helder
- Marine en werkhaven Den Helder
- Veerhaven Texel
- Haven van NIOZ op Texel
- Visserij- en recreatiehaven Oudeschild

- Haven Den Oever
- Werkhaven Breezand

De havens die aanwezig zijn in het kombergingsgebied Vlie zijn:

- Industrie-, recreatie - en veerhaven Harlingen
- Veerhaven West-Terschelling
- Haven West-Terschelling
- Recreatiehaven Vlieland
- Veerhaven Vlieland

De havens van Den Helder en Harlingen zijn het grootst, met een uitgebreid stelsel van dammen om luwte verschaffen. Van en naar de havens lopen verschillende vaargeulen. De verbindingen voor veerboten vertegenwoordigen een specifiek belang, naar Texel (Den Helder - 't Horntje, concessiehouder TESO) Vlieland en Terschelling (beiden vanuit Harlingen, concessiehouder Doeksen).



Figuur 2-2 Kaart van de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie met de havens.

2.2.2 Beleid

In de SVW zijn dieptes van vaarwegen gespecificeerd³. De situatie van 2006 is maatgevend en er is ruimte gelaten voor verdiepingen. In de Blauwe slenk en de Boontjes zijn inderdaad drempels verdiept. Ook geeft het SVW specifieke aanwijzingen voor baggerwerken:

- Ze zijn beperkt in omvang,
- Volgen de natuurlijke morfologische ontwikkelingen en

³ De planperiode van de Structuurvisie loopt af in 2019. Daarom is de gebiedsagenda van belang. Daarin gaan Rijk en regio gezamenlijk ambities formuleren. (<https://www.gebiedsagendawadden2050.nl/>).

- Vinden uitsluitend plaats indien de bereikbaarheid van de havens, de Waddeneilanden of de verkeersveiligheid in het geding zijn.

2.2.3 Beheer

Het beheer voor toegankelijkheid omvat toezicht, monitoring, het aanbrengen, verleggen en onderhouden van betonning, baggeren en verspreiden, inrichting en onderhoud van veerhavens, scheepvaartbegeleiding en ook het onderhoud van havendammen. In een kader op de volgende pagina wordt de situatie bij de stroomleidam Pollendam bij Harlingen eruit gelicht vanwege het speciale karakter.

Het beheer van de havens ligt bij gemeentes, havenbedrijven en marine. Alleen de veerhavens zijn in beheer bij Rijkswaterstaat. Voor de vaargeulen is Rijkswaterstaat verantwoordelijk.

Morfologische veranderingen beïnvloeden het vaarwegbeheer sterk in Schuitengat (paragraaf 4.3.2) en Boontjes (paragraaf 4.3.4). Tabel 2-1 geeft een overzicht van het gemiddeld jaarlijks onderhoud van havens en vaarwegen, zoals dat de afgelopen jaren (periode 2013-2017 of 2013-2015) is uitgevoerd.

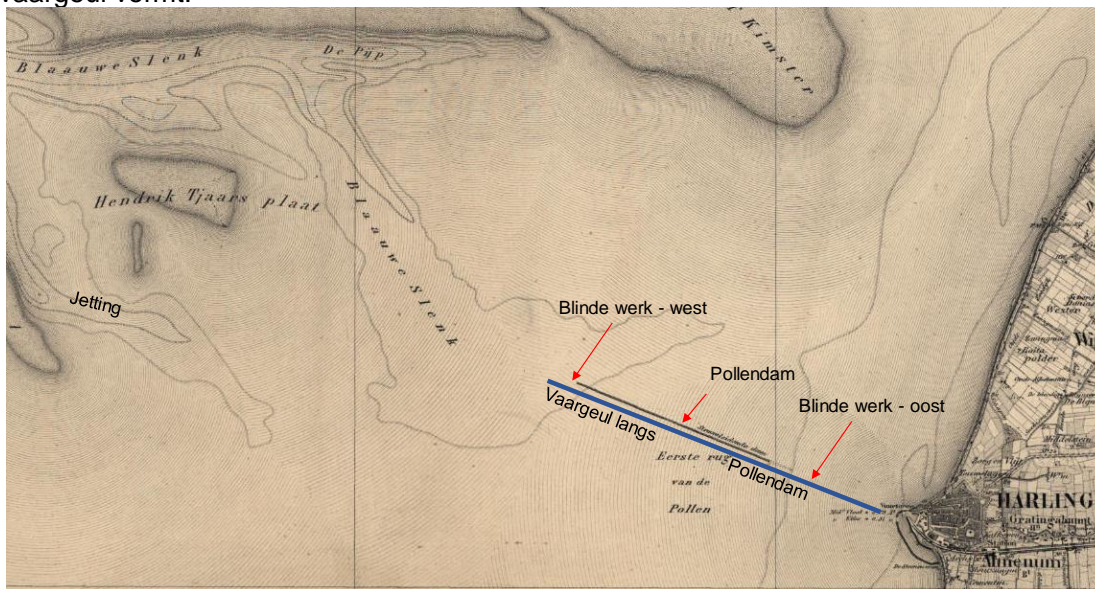
Tabel 2-1 Overzicht baggervolumes in en nabij de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Bronnen: Wadden in beeld, 2016 en persoonlijke communicatie Herman Mulder (Rijkswaterstaat).

Kombergingsgebied Marsdiep	Hoeveelheid (m ²)	Periode & Bron
Havens		
Marinehaven Den Helder	702.000	2013-2015 WiB2016
Veerhaven Den Helder	600	2013-2017 HM RWS
Veerhaven Texel	3.900	2013-2017 HM RWS
Mokbaai Texel	39.000	2013-2015 WiB2016
NIOZ haven Texel	23.000	2013-2015 WiB2016
Oudeschild	55.000	2013-2015 WiB2016
Den Oever	149.400	2013-2017 HM RWS
Breezanddijk	4.900	2013-2017 HM RWS
Kornwederzand	165.700	2013-2017 HM RWS
Totaal	1.190.000*	2013-2015 WiB2016
Vaargeulen		
Visjagersgaatje	31.700	2013-2017 HM RWS
Boontjes	84.200	2013-2017 HM RWS
Totaal	190.000*	2013-2015 WiB2016
Kombergingsgebied Vlie		
Havens		
Veerhaven Vlieland	500	2013-2017 HM RWS
Haven Harlingen	1.238.000	2013-2015 WiB2016
Haven Terschelling	100	2013-2017 HM RWS
Totaal	1.270.000*	2013-2015 WiB2016
Vaargeulen		
Slenk	236.500	2013-2017 HM RWS
Pollendam	70.500	2013-2017 HM RWS
Blauwe Slenk	373.766	2013-2017 HM RWS
Pannengat	2.800	2013-2017 HM RWS
Totaal	730.000*	2013-2015 WiB2016

*: De opgave per locatie is het gemiddelde over verschillende jaren, Hierom kan het totaal gemiddelde afwijken van de optelsom van de locaties.

2.2.4 Historische case: De aanleg van de Pollendam en de vaargeul

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



Figuur 2-3 Topografische kaart 1875 van de omgeving van Harlingen, met daarin de Pollendam.

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

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

2.3 Veiligheid tegen overstromingen

Langs de Waddenzee liggen primaire waterkeringen die de bewoonde Waddeneilanden, het vasteland en het IJsselmeer beschermen.

2.3.1 Beleid

Het Nederlandse beleid voor veiligheid tegen overstromingen is vastgelegd in o.a. de Waterwet. Daarbij worden karakteristieke maatgevende condities gehanteerd die de primaire kering moet kunnen weerstaan. Daarin verschillen Waddenzee en Noordzee sterk. De Waddenzee is veel ondieper en de daarin optredende golven zijn daar kleiner.

Recente beleidsmatige ontwikkelingen staan in het Nationale waterplan 2016-2021 (Ministeries van I&M & EZ, 2015). De wettelijk vastgelegde cyclus van het toetsen van de waterkeringen vindt iedere twaalf jaar plaats. Tekortkomingen bij de toetsing kunnen leiden tot het versterken van (onderdelen) van de waterkering. Nieuwe inzichten en (morfologische) ontwikkelingen worden meegenomen bij zowel de toetsing, het wettelijk instrumentarium ervoor en de metingen die bij de toetsing horen. Dijkversterkingen bij Texel en de Afsluitdijk volgden op het afkeuren van de waterkering tijdens de voorgaande toetsronde.

2.3.2 Beheer

Het morfologisch beheer heeft invloed op de veiligheid. Dat kan omdat het de belastingen verandert (andere geulen en voorlanden beïnvloeden golfopzet en/of maatgevende waterstanden) of omdat het de sterkte van de kering beïnvloedt (denk aan de invloed van bestortingen op de morfologie en vice versa). Dit vraagt om aandacht bij onderzeese bestortingen zoals langs het Marsdiep; 't Horntje, Texel; oost en Zuidoost Vlieland, de Afsluitdijk en bestortingen langs de vastelandskust. Een bijzondere categorie waterkeringen zijn de sluizen. Voorbeelden zijn Balgzandkanaal, Kornwerderzand, Stevin sluizen en bij Harlingen. Zeker bij de grotere spuisluzen is een uitgebreide onderzeese bestorting aanwezig om erosie ten gevolge van het uitstromende water te voorkomen.

Hoofdstuk 8 behandelt de kwesties 'geulmigratie en dijkstabiliteit' en 'de rol van kwelders als voorland'.

2.4 Natuur, recreatie, visserij

2.4.1 Gebruik

Natuur:

De Waddenzee is één Natura 2000-gebied, dat ook de vastelandskwelders en de Schorren bij Texel omvat. Belangrijke ecologische functies zijn 'rust en foerageergebied voor zeehonden', 'foerageer- en rustgebied voor vogels', 'paaigebied voor vissen', 'ontwikkelingsgebied voor kwelders' en 'groeigebied voor ongewervelde dieren'. Elk van deze functies wordt sterk bepaald door de hydromorfodynamische ontwikkelingen, want die hebben effect op de arealen en hun kwaliteit. De droogvallende platen en de geulen zijn qua omvang het grootst. Kwelders omvatten slechts een beperkt areaal.

Recreatie:

Dankzij de ecologische functies/kwaliteit komen er veel toeristen/recreanten voor activiteiten zoals wadlopen, vissen, varen, wandelen en fietsen over de dijk. Dit heeft ook economische betekenis.

In de beide kombergingsgebieden gebeurt het zwemmen vanaf de vastelandskust vrijwel niet meer. Tot voor kort gebeurde dit nog bij de noordwestkust van Wieringen, bij het strand ten westen van Harlingen en bij Westhoek. Bij Westhoek is nog kleinschalige recreatie en bij Harlingen is een strand en strandtent aanwezig. Zwemmen in de Waddenzee is op deze plekken echter nauwelijks meer mogelijk, omdat daar veel sediment is afgezet en bij laagwater valt er een slibrijke wadplaat droog (informatie gemeente Harlingen). Oorspronkelijk was bij deze locaties sublitoraal gebied. Een grote getijdegeul met gevaarlijke sterke stroming was niet aanwezig.

De verandering van ondiep water naar intergetijdengebied hangt samen met de grootschalige morfologische veranderingen na de aanleg van Afsluitdijk en de Amstelmeerdijk.

Visserij:

Een andere afgeleide functie is de 'oogst' uit het gebied. Er wordt gevestigd (voornamelijk op garnalen, in de geulen), er worden kokkels (handmatig) geoogst en ook de pierenstekerij is nog toegestaan (op de wadden bij Texel en op de Balgzand). Verder is de mosselsector van belang, waarop in hoofdstuk 8 extra wordt ingegaan.

2.4.2 Beleid

Natuur:

In de praktijk zijn de Europese richtlijnen de meest dwingende kaders, in Nederland geïmplementeerd via de Wet Natuurbescherming. De (instandhoudings)doelstellingen voor het Natura2000-gebied zijn geformuleerd op de schaal van het gehele Natura2000-gebied (Ministerie van LNV, 2008). De morfodynamiek van de Waddenzee is daarin een zogenaamd 'kwaliteitselement'. Veel morfologische ontwikkelingen hebben effect op de arealen van de verschillende beschermde habitattypen, bijvoorbeeld doordat permanent onderstaande zandplaten (Habitattype H110) verandert in wadplaten (Habitattype H140).

Er zijn geen specifieke doelstellingen voor een enkel kombergingsgebied. Bij het opstellen van de Natuurdoelstellingen is onderkend dat autonome veranderingen plaatsvinden in de arealen van de verschillende habitattypen.

De Kaderrichtlijn Water (KRW) heeft ook relatie met de morfologie. Ze kent ook doelstellingen voor abiotische aspecten, in het bijzonder eilandkwelders en de aanwezigheid van zeegras.

Visserij:

Er zijn verschillende transitie ingezet, waarover met de sector afspraken zijn gemaakt. Het mosselconvenant is een voorbeeld daarvan.

2.4.3 Beheer

Natuur:

Voor Natura 2000-gebieden zijn er beheerplannen. Deze beschrijven ook de relaties tussen andere activiteiten en de natuur. In het Beheerplan Rijks Wateren (BPRW, Rijkswaterstaat, 2015) zijn maatregelen met betrekking tot de waterkwaliteit (om aan doelstellingen in KRW te voldoen) opgenomen. De beheerplannen bestrijken niet hetzelfde gebied. De Natura2000 beheerplannen richten zich op de onder Natura 2000 aangewezen gebieden. Het BPRW gebruikt de deelstroomgebieden van de KRW.

Recreatie:

Het strand bij Harlingen (in 1997 aangelegd) wordt om de twee jaar opgespoten met zand dat vrijkomt bij het onderhoud van de vaargeulen in de Waddenzee (informatie gemeente Harlingen). Er is in 2017 een steiger geplaatst zodat de badgasten het water van de Waddenzee kunnen bereiken zonder door het slib te lopen.

Visserij

p.m.

2.5 Andere functiesGas- en zoutwinning

Beleid rond de diepe delfstoffenwinning is vastgelegd in de Structuurvisie derde nota Waddenzee (SVW, Ministerie van VROM, 2007a en b). In het kombergingsgebied Vlie speelt gas- en zoutwinning. Het huidige beleid staat het plaatsen van boor- en productieplatformen in de Waddenzee niet meer toe. Schuin vanaf het vasteland of vanaf de eilanden boren naar gas en zout onder de Waddenzee is nog wel toegestaan, maar het te winnen volume gas of zout is begrensd. De gaswinning bij de 'Zuidwallocatie' (aangelegd voor huidig beleid van kracht werd) heeft geleid tot bodemdaling onder het wad ter grootte van $2,5-5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ over de totale periode van gaswinning (Fokker et al, 2018). Dit komt overeen met 0,1 tot 0,3 mm/jaar over het kombergingsgebied Vlie.

Voor zoutwinning heeft de Provincie Friesland besloten deze van het vasteland weg te halen en te concentreren onder de Waddenzee. De zoutwinning is vergund bij Harlingen, maar nog niet begonnen. Het berekende bodemdalingsvolume daardoor is van de orde $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ over 20 tot 30 jaar (Fokker et al., 2018).

Zand- en schelpenwinning

Zand dat in de Waddenzee wordt gewonnen, wordt voornamelijk toegepast als ophoogzand, bijvoorbeeld in de wegebouw en in het verleden ook voor de versterking van dijken. In de Waddenzee is de zandwinning gekoppeld aan het onderhoud van de vaargeulen, zoals is vastgelegd in de Beleidsregels ontgrondingen in Rijkswateren ("landwaarts van de doorgaande NAP -20 meter dieptelijn in de Noordzee kan alleen vergunning worden verleend voor: a. de zandwinning uit de vaargeulen..."). Zandwinning uit putten, buiten en binnen de vaargeulen, zonder onderhoudsdoelstelling, is sinds 1998 niet meer toegestaan. Het volume zand dat mag worden gewonnen was maximaal 500.000, maar wordt afgebouwd, volgens het schema in Tabel 2-2. De reden voor de afbouw ligt in de gevolgen ervan voor de sedimentbalans van de Waddenzee en de kustzone.

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

Jaar	Zandwinqotum (m ³)
2012	500.000
2013	500.000
2014	500.000
2015	500.000
2016	500.000
2017	500.000
2018	400.000
2019	300.000
2020	200.000
2021	100.000
2022	0

Er worden schelpen gewonnen in de diepere geulen van de kombergingsgebieden Marsdiep, Vlie en Friese Zeegat, beneden de NAP -5 diepte. Op basis van de jaarlijkse schelpenproductie is het totale jaarlijkse quotum is de vigerende vergunning (Ministerie van I&M, 2016.) bepaald

op 160.000 m³ per jaar in het Waddenzeegebied, waarvan maximaal de helft in de kombergingsgebieden en de rest in de buitendelta's en de Noordzeekust.

Archeologie

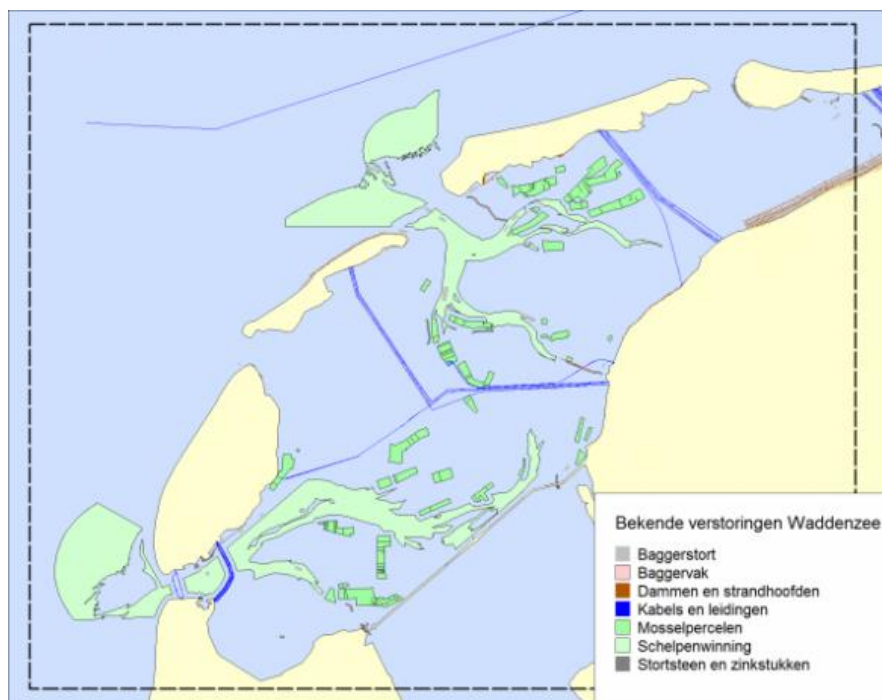
In de gehele Waddenzee zijn wrakken aanwezig. Maar ook andere archeologische waarden. Deze zijn beschermd (besluit algemene regels ruimtelijke ordening, artikel 2.5.2). Een deel heeft de status van archeologisch monument.

Vooraf in het westelijke deel zijn veel wraklocaties bekend. Al voor de VOC-tijd was de Waddenzee een drukbevaren gebied, zodat wrakken van veel verschillende ouderdommen aanwezig zijn. In de prehistorie is er bewoning geweest op wat nu de zeebodem is en in de vroege Middeleeuwen waren er nog delen bewoond.

Menselijke activiteiten mogen in beginsel niet leiden tot aantasting van in de bodem aanwezige archeologische waarden. Echter, als door natuurlijke fysische processen archeologische waarden aan de oppervlakte komen kan onderzoek en berging worden toegestaan. Dit speelt vooral in de omgeving van de Texelstroom, waar de afgelopen jaren wrakken zijn bloot gespoeld. Behalve door natuurlijke degradatie worden ze bedreigd door illegale opgravingen.

Kabels en leidingen

Onder de wadbodem lopen verschillende kabels en leidingen die de Waddeneilanden met het vasteland verbinden. Van west naar oost lopen deze door het Marsdiep en vanaf Harlingen over de platen naar Texel en Vlieland. Daarnaast is er nog een leidingstraat vanaf Zwarte Haan naar Terschelling over het wantij. De diepte van de leidingen is gebaseerd op de veranderingen die kunnen optreden door het ontstaan en het verplaatsen van de geulen en prielen. Om ingraafdiepte en kans op vrijspoelen te beperken gebeurt aanleg bij voorkeur onder het wantij.



Figuur 2-4 Overzicht van de positie van de verschillende kabels en leidingen in de westelijke Waddenzee.

Beleid en beheer overige functies

Het beleid is vastgelegd in de Ruimtelijke Structuurvisie Waddenzee (SVW, eerder PKB Waddenzee). Vanwege het eindigen van de planperiode van de Structuurvisie is de gebiedsagenda van belang (<https://www.gebiedsagendawadden2050.nl/>). Het beheer **is** opgenomen in de beheerplannen voor de Natura2000-gebieden.

Er worden metingen en onderzoek uitgevoerd in de kombergingsgebieden, zowel regulier voor het beheer als voor specifieke projecten. Sommige metingen zijn afhankelijk van de morfologie, omdat ze specifiek op platen of in geulen plaatsvinden. Morfologische veranderingen kunnen dan aanleiding zijn voor aanpassing van de meetlocatie.

3 Grootschalige kenmerken en ontwikkelingen

3.1 Sterke samenhang tussen kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie

Er is een relatief grote uitwisseling van sediment tussen de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie, in vergelijking met uitwisseling tussen andere kombergingsgebieden (zie o.m. Elias et al. (2012), Elias & Vermaas (2018) en Elias (2019)). Studies naar de waterbeweging laten namelijk een grote uitwisseling van water zien tussen de beide kombergingsgebieden (Ridderinkhof 1990; Vroom 2011; Wang et al., 2013; Duran-Matute et al., 2014). Over de grens van beide kombergingsgebieden liggen sublitorale gebieden, Er loopt ook een geul over het wantij (zie Figuur 3-10). Al deze elementen zorgen voor uitwisseling van water 'achterlangs'. Dit wantij heeft daarom een wezenlijk ander karakter dan dat van de andere kombergingsgebieden, waar zulke geulen ontbreken.

De kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie hebben een gezamenlijke ontstaansgeschiedenis, te beginnen bij het openbreken van Marsdiep en Zuiderzee in de tweede helft van de Middeleeuwen (zie 3.6) en ook de grootschalige en langjarige gevolgen van de aanleg van de Afsluitdijk (zie 3.7). Voordat die ontstaansgeschiedenis wordt besproken zet dit hoofdstuk eerst de grootschalige fysische kenmerken van beide kombergingsgebieden op een rij (paragrafen 3.2 en 3.3) en worden ook de verschillen ertussen aangestipt (paragraaf 3.5). In de afsluitende paragraaf (3.8) wordt de sedimentbalans beschouwd.

3.2 Grootschalige fysische kenmerken van het kombergingsgebied Marsdiep



Figuur 3-1 Namen in het kombergingsgebied Marsdiep (bodem 2009).

Het kombergingsgebied Marsdiep (Figuur 3-1) is het grootste getijdebekken van de Nederlandse Waddenzee. Het zeegat van dit kombergingsgebied bestaat uit één zeer grote geul (Marsdiep), die op de buitendelta andere namen heeft: Helsdeur (op het diepste punt voor de Kop van Noord-Holland) en verder naar buiten Schulpengat. Fysische kentallen over het bekken staan in Tabel 3-1. De grootste plaatgebieden in het bekken zijn het Balgzand en de Vlakte van de Kerken. De vlakte van de Kerken vormt het wantij met het Eierlandse gat. Hierover loopt dus de grens van het kombergingsgebied Marsdiep.

Tabel 3-1 Kenmerkende waarden voor de waterstanden en arealen van het kombergingsgebied Marsdiep (uit Oost, 2017). 1 = Dillingh et al., 2010; 2 = Dillingh, 2013; 3 = Biegel, 1992; 4 = Duran-Matute, 2014.

Parameter	Observatie	Jaar	Referentie
Zeespiegelstijging (mm/jr)	1,5	1890-2008	1 (Den Helder)
Significante golfhoogte Hs (m) buitengaats	1,3		CoastDat
gemiddelde piekperiode Tp (s) buitengaats	5,49		CoastDat
GHW (m NAP)	0,61	2011 slotgemiddelde	2
GLW (m NAP)	-0,8	2011 slotgemiddelde	2
GHW springtij (m NAP)	0,66	2011 slotgemiddelde	2
GLW springtij (m NAP)	-0,89	2011 slotgemiddelde	2
GHW doortij (m NAP)	0,47	2011 slotgemiddelde	2
GLW doortij (m NAP)	-0,67	2011 slotgemiddelde	2
Getijslag (gemiddeld getij, doortij en springtij in m)	1,41 (1,14-1,55)	2011 slotgemiddelde	2
Stormvloedhoogte (m NAP; 1:100)	+3,4		2
"Natte" oppervlakte kombergingsgebied (A _{ghw} in m ²)	712*10 ⁶	1990	3
Getijdeprisma kombergingsgebied (10 ⁶ m ³)	990.5±177	2009/2010	4

3.3 Grootschalige fysische kenmerken van het kombergingsgebied Vlie

Het zeegat omvat drie geul(system)en (zie Figuur 3-2). De centraal gelegen Vliestroom is de grootste. De andere geulsystemen zijn Zuiderstortemelk-Vliestroom en Boomkensdiep-Schuitengat. De belangrijkste wadplaatgebieden zijn de Grienderwaard, de Ballastplaat en de Vlakte van Oosterbierum, de Waardgronden (die worden gedeeld met het Eierlandse gat) en de verschillende platen ten zuiden van Terschelling. Kentallen over het bekken staan in Tabel 3-2.



Figuur 3-2 kombergingsgebied Vlie (bodem 2010).

Tabel 3-2 Kenmerkende waarden voor de waterstanden en arealen van het kombergingsgebied Vlie (uit Oost, 2017). 1 = Dillingh et al., 2010; 2 = Dillingh, 2013; 3 = Biegel, 1992 (fixed tidal heights); 4 = Duran-Matute, 2014.

Parameter	Observatie	Jaar	Referentie
Zeespiegelstijging (mm/jr)	1,3	1890-2008	1 (Harlingen)
Significante golfhoogte H_s (m) buitengaats	1,34		CoastDat
gemiddelde piekperiode T_p (s) buitengaats	5,84		CoastDat
GHW (m NAP)	0,85	2011 slotgemiddelde	2 (West-Terschelling)
GLW (m NAP)	-1,01	2011 slotgemiddelde	2 (West-Terschelling)
GHW springtij (m NAP)	0,94	2011 slotgemiddelde	2 (West-Terschelling)
GLW springtij (m NAP)	-1,14	2011 slotgemiddelde	2 (West-Terschelling)
GHW doortij (m NAP)	0,69	2011 slotgemiddelde	2 (West-Terschelling)
GLW doortij (m NAP)	-0,84	2011 slotgemiddelde	2 (West-Terschelling)
Getijslag (gemiddeld getij, in m)	1,86	2011 slotgemiddelde	2 (West-Terschelling)
Stormvloedhoogte (m NAP; 1:100)	+3,6		2 (West-Terschelling)
“Natte” oppervlakte kombergingsgebied (A_{ghw} in m^2)	$665 \cdot 10^6$	1982	3
Getijdeprisma kombergingsgebied ($10^6 m^3$), modelberekening	934 ± 169	2009/2010	4

3.4 Aanvoer van zoetwater

Langs de randen van de beide kombergingsgebieden liggen op verschillende plekken spuisluizen en gemalen waar zoetwater op de Waddenzee wordt gespuid. Van deze spuilocaties zijn de debieten vanuit de Afsluitdijk (een harde grens zoet-zoutgrens) het grootst. Bij Kornwerderzand en Den Helder liggen de spuisluizen waardoor het zoete water vanuit de Afsluitdijk 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 lager is dan de waterstand in het IJsselmeer ter plaatse van de spuisluizen. Beide locaties liggen aan het kombergingsgebied Marsdiep. Overigens wordt een deel van het zoete water afgevoerd via het kombergingsgebied Vlie, nadat het over het wantijgebied is getransporteerd.

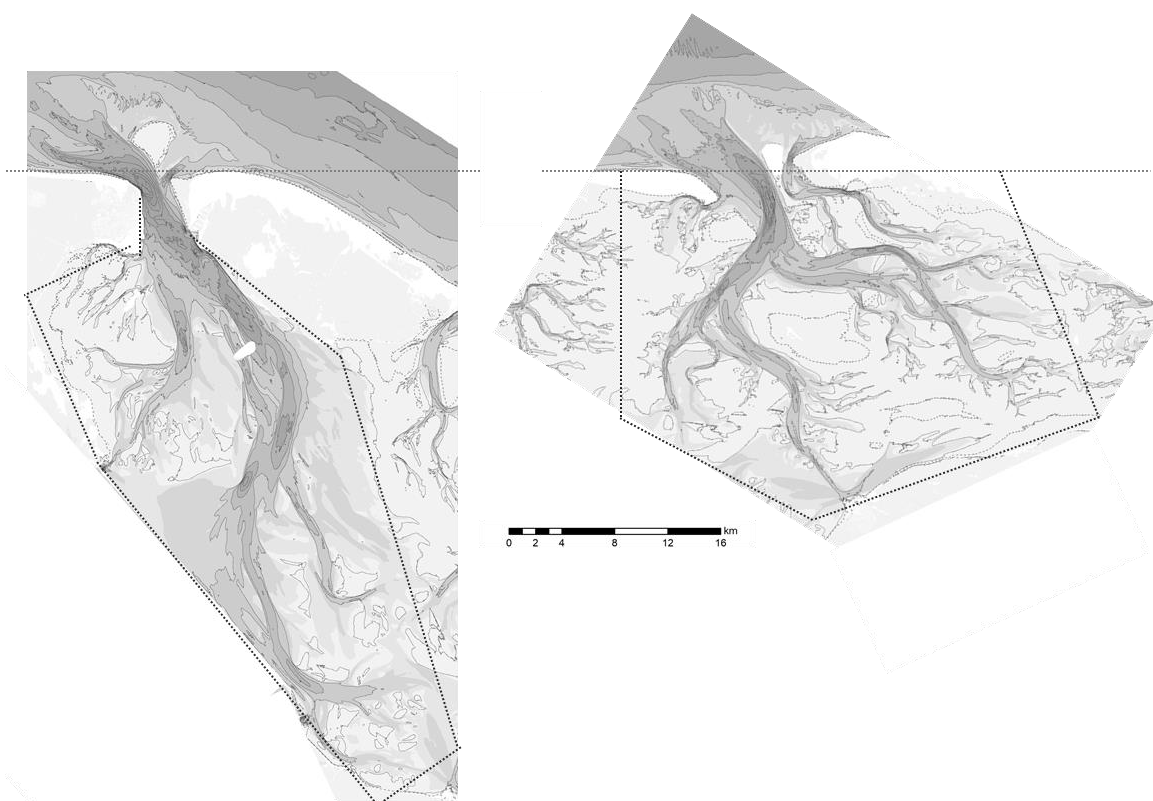
Bij hoge spuidebieten treden korte scherpe stoten van zoetwater uit in de vrij zoute westelijke Waddenzee. Deze kunnen ook als zoetwaterbellen aan het oppervlak blijven drijven en zich met het getij verplaatsen langs de kust. Over het algemeen, echter, is bij lagere spuidebieten het mixen voldoende om een situatie te verkrijgen met isohaliënen (waarden van gelijk zoutgehalte) evenwijdig aan de Afsluitdijk, met kleine uitstulpingen bij de spuisluizen in de Afsluitdijk. Op enkele kleine gebieden blijven de zoutgehaltes boven 20 promille, een belangrijke ecologische grenswaarde voor veel Waddenzeeorganismen (Oost et al., 2002, 2003a).

3.5 Belangrijke verschillen tussen de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie

Deze liggen in vorm en oriëntatie en in de omvang van de wadplaten.

Vorm en de oriëntatie

De Noordzeekustlijnen bij het Marsdiep lopen ruwweg noord-zuid en de buitendelta geulen zijn op het zuidwesten georiënteerd. De geulen in het bekken lopen ruwweg van zuidwest naar noordoost en ook de vorm van het bekken heeft deze oriëntatie. Daarmee is de oriëntatie van dit bekken wezenlijk anders dan dat van de andere getijdebekken in de Waddenzee. Ook de vorm van het bekken is anders dan dat van de andere bekkens in de Waddenzee (Figuur 3-3). De grenzen van het kombergingsgebied Marsdiep vormen globaal een langgerekte rechthoek, in het verlengde van het zeegat. De grenzen van de andere bekkens, waaronder die van het Vlie, vormen een minder langgerekte rechthoek.



Figuur 3-3 Geometrie van de kombergingsgebieden Marsdiep (links) en Vlie (rechts), waarbij ter vergelijking de oriëntatie gelijk is gemaakt (de kombergingsgebieden zijn geroteerd, verder geen bewerking).

Relatieve en absolute omvang van de wadplaten

Het kombergingsgebied Marsdiep heeft verhoudingsgewijs naar totaal oppervlak een beperkter areaal droogvallende platen dan het kombergingsgebied Vlie, zoals zichtbaar is in Tabel 3-3. In plaats daarvan liggen in het kombergingsgebied Marsdiep uitgestrekte sublitorale gebieden. De omvang en kenmerken daarvan zijn zo bijzonder voor het Waddengebied dat voor deze sublitorale gebieden een hoofdstuk 5 is opgenomen in dit kombergingsrapport.

Tabel 3-3 Arealen wadplaten en geulen in de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie, op basis van de analyse van Nederhoff et al. (2017).

	Marsdiep		Vlie	
Wadplaten	142 km ²	21%	330 km ²	50%
Geulen	548 km ²	79%	326 km ²	50%
Totaal	690 km ²		656 km ²	

3.6 Ontstaan Westelijke Waddenzee door openbreken Marsdiep en Zuiderzee

Het gehele Marsdiep systeem (zeegat, buitendelta en kombergingsgebied) is een relatief jong systeem in vergelijking met het Vlie en de zeearmen en bekkens van de oostelijke Waddenzee. Ten tijde van de aanleg van de Afsluitdijk (1932) was het kombergingsgebied daardoor dieper dan de andere kombergingsgebieden. Dat het kombergingsgebied van het Marsdiep dieper was ten tijde van de afsluiting van de Zuiderzee is nog steeds bepalend voor de morfologie, zoals het beperkte areaal wadplaten (Tabel 3-3) en de aanwezigheid van grote gebieden met permanent onder water liggende platen (Hoofdstuk 5).

De belangrijkste gebeurtenissen die geometrie, morfologie en functioneren van de Westelijke Waddenzee bepaalden en dat doen tot op de dag van vandaag zijn:

- (i) het tussen circa 1100 en 1500 snel uitbreiden van Marsdiep en Zuiderzeegebied door het verdwijnen van de veengebieden;
- (ii) de bedijkingsgeschiedenis van het gebied, en
- (iii) de aanleg van de Afsluitdijk. In alle gevallen speelt de mens een doorslaggevende rol. In deze paragraaf wordt beknopt ingegaan op de eerste twee punten. In paragraaf 3.7 komt de afsluiting van de Zuiderzee aan de orde.

Voor en tijdens de Middeleeuwen

De huidige configuratie van het westelijke deel van de Waddenzee is vrij recent ontstaan, waarschijnlijk tijdens de Middeleeuwen (Figuur 3-4). Het westelijke Waddenzeegebied en het Zuiderzeegebied 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-estuarium hoogstwaarschijnlijk de drainage van het Aelmeer. Toen stak de kust van Noord-Holland ver zeewaarts uit (tot max. 10 km). Het Marsdiep (= moerasdiep) was toen slechts een veenstroompje richting kust. 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 erosie.

Vanaf 1100

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. 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.

Het voorafgaande verklaart waarom er op het moment van aanleg van de afsluitdijk een grote accommodatieruimte aanwezig was, waar in potentie zand en slib afgezet zou kunnen worden. Bodemonsters maken duidelijk dat in de eeuwen daarvoor weinig sediment tot afzetting kwam (Ente, 1987). Ridderinkhof (2016) suggereert dat het Marsdiep voor de afsluiting wel eens sediment kon afvoeren.

Het voorafgaande geeft beknopt weer dat het gehele Marsdiep systeem uit de Middeleeuwen dateert en daarmee een relatief jong systeem is in vergelijking met het Vlie en de zeearmen en bekkens van de oostelijke Waddenzee. Bijlage B geeft meer detail over de ontstaansgeschiedenis van de gehele Westelijke Waddenzee. Het gevolg van het recente ontstaan van het kombergingsgebied van het Marsdiep was dat, op het moment van aanleggen van de Afsluitdijk, de bodem gemiddeld lager lag dan bij de andere kombergingsgebieden.



Figuur 3-4 Gedeelte van de kaart Phrisia occidentalis et Waterlandia uit de handgetekende atlas van Christianus Sgrooten, ca. 1573. Kopie uit Rijkswaterstaat, 1935.

3.7 Afsluiting Zuiderzeegebied

3.7.1 De afsluiting en het getij

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

- De Amsteldiep-dijk van Noord-Holland naar Wieringen (2,5 km), van 1920 tot 1925. Deze dijk scheidde het Amsteldiep van de Zuiderzee. Het achterliggende land werd deels ingepolderd.
- De Afsluitdijk van Wieringen naar Friesland (32 km), van 1927 tot 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 km², met een lengte 130 km. Daarna was het oppervlak ongeveer 712 km² 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 staand karakter. Door de resonantie en reflectie en de verminderde wrijving (grotere diepte overgebleven deel) tegen de Afsluitdijk nam de getijslag toe (Tabel 3-4; Rietveld, 1962; Thijsse, 1972; Doekes, 1985; Kragtwijk, 2004; Dissaniyake, 2011). Door de veranderingen groeide het getijprisma van het Marsdiep met ca. een kwart (Rietveld 1962; Thijsse 1972; Elias et al., 2003). Ook trad er een faseverschuiving op tussen de getijden in de open Noordzee via het zeegat.

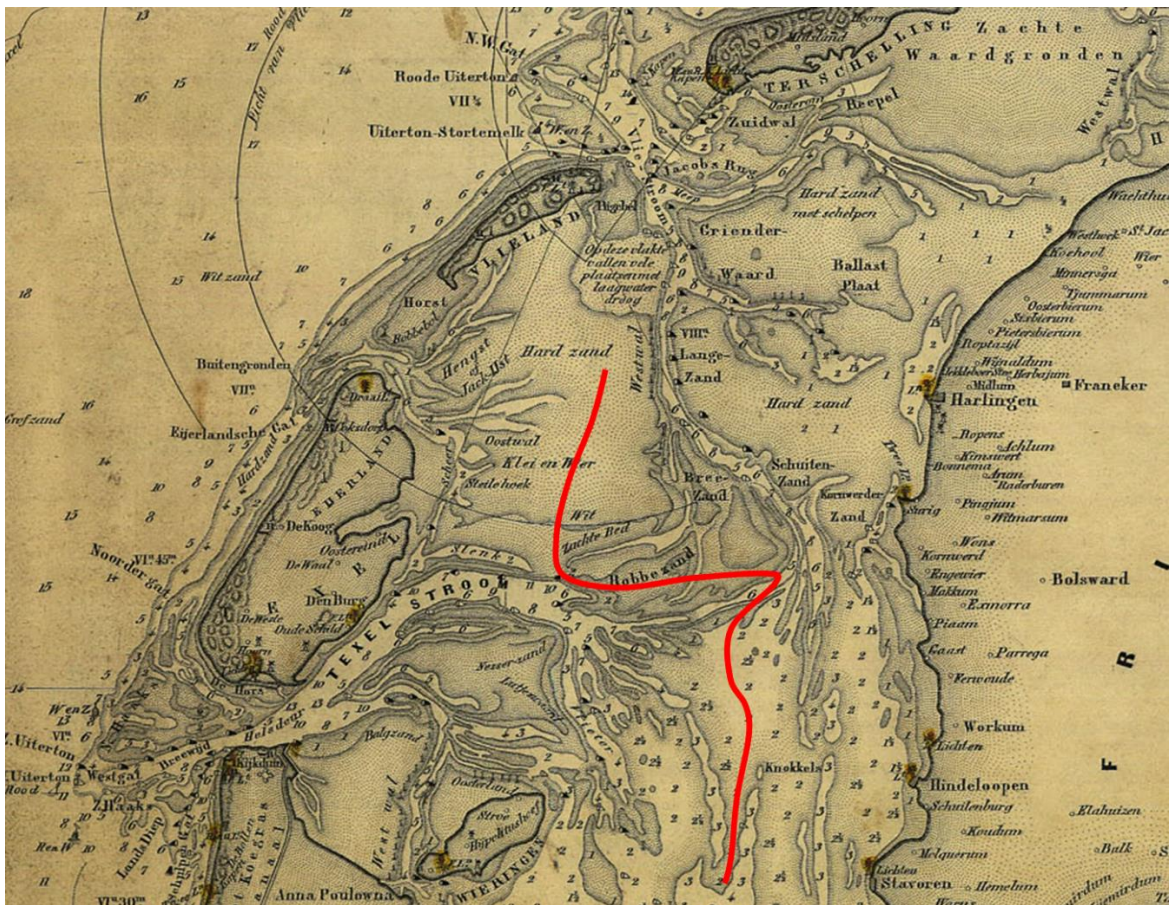
Tabel 3-4 Getijdarakteristieken voor en na de afsluiting volgens "SLOTG2" (voor uitleg zie van Malde, 1984).

Getallen gebaseerd op Doekes (1985); afrondingen leiden tot kleine verschillen voor Den Helder.

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

3.7.2 Verplaatsing wantij tussen kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie

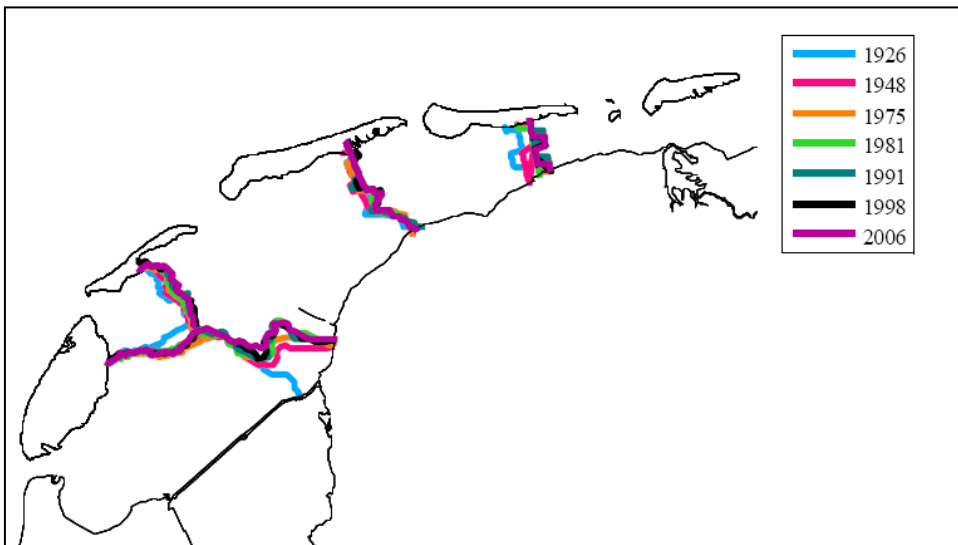
De ligging van het wantij is bepalend voor de oppervlakte van de kombergingsgebieden. Verschuivingen erin betekenen dat de kombergingsgebieden in omvang veranderen, evenals veel andere morfologische karakteristieken. In de situatie van voor de aanleg van Afsluitdijk liepen de geulen van het ene gebied naar het andere gebied (Figuur 3-5).



Figuur 3-5 Historische topografische kaart uit de periode 1883 (J. Swart, 1883) van de kombergingsgebieden Marsdiep, Eierlandse Gat en Vlie. De rode lijn geeft de waterscheiding aan gebaseerd op geulpatronen en het ondiepste punt (het morfologische wantij).

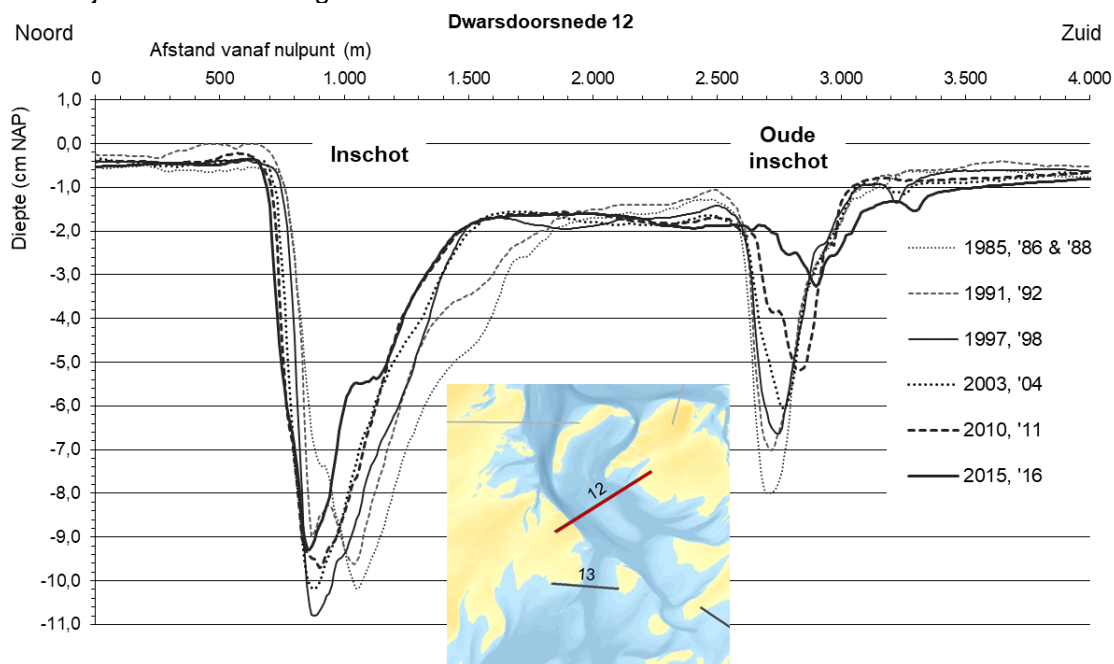
De ligging van het wantij⁴ is in verschillende studies steeds anders getrokken (Eysink, 1979; Werkgroep I, 1981; Eysink & Biegel, 1992; Kragtwijk, 2004; Hoeksema *et al.*, 2004; Van Geer, 2007; Vroom 2011; Wang *et al.*, 2013). Door van Geer (2007) zijn stromingsberekeningen van het getij voor de verschillende bodems gebruikt om de (hydrodynamische) wantijen te definiëren, die zijn weergegeven in Figuur 3-6. Uit die berekeningen volgt een verschuiving van het wantij naar het noordoosten na aanleg van de Afsluitdijk, vooral in de periode direct aansluitend op de aanleg. Het kombergingsgebied Marsdiep nam daardoor in oppervlakte toe ten koste van het kombergingsgebied Vlie.

⁴ 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. Het morfologische wantij wordt gevormd door de ondiepste gebieden tussen de kombergingsgebieden, die meestal niet doorsneden worden door geulen. In de oostelijke Waddenzee en bij de overgang van het Eierlandse gat naar Vlie en Marsdiep komt het hydrodynamische wantij vrijwel overeen met het morfologische wantij.



Figuur 3-6 Berekende hydrodynamische wantijen op basis van bodemliggingen uit verschillende jaren, in de westelijke Waddenzee, uit Van Geer (2007).

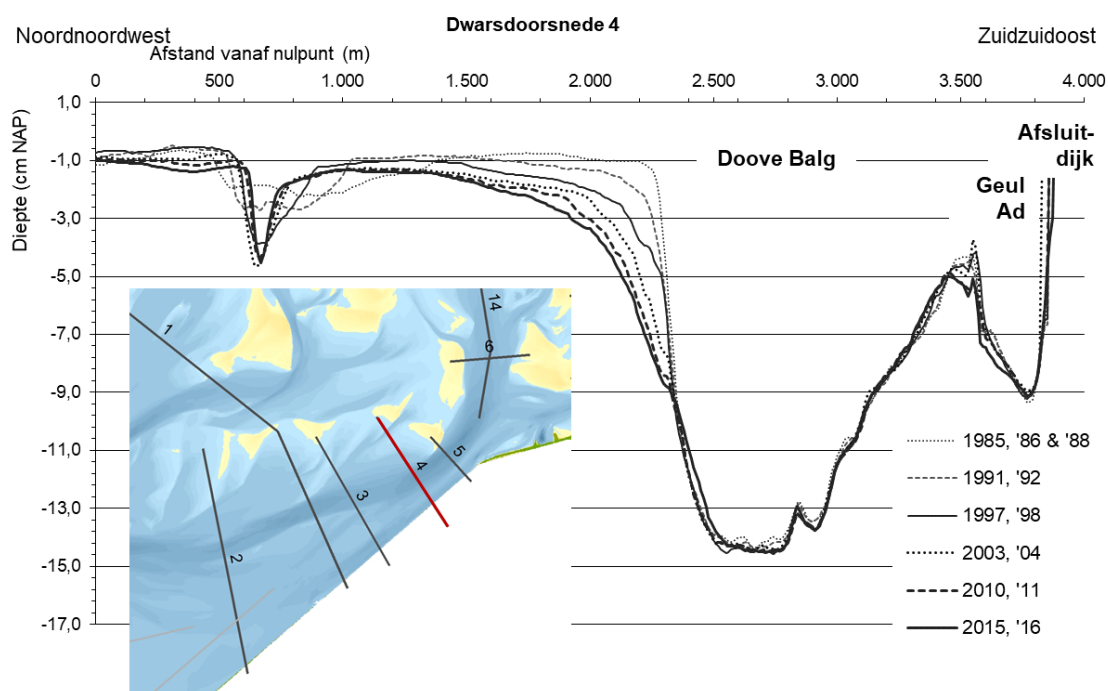
Door te kijken naar de omvang van de getijgeulen die de gebieden verbinden (Cleveringa & Grasmeyer, 2010) kan het verschuiven van het wantij ook bestudeerd worden. Zij laten zien dat de verhouding tussen de Doove Balg en de Blauwe Slenk een duidelijke verschuiving laat zien, van 0,7 tot bijna 1,0 in de periode van 1933 tot 1950. Een dergelijke toename wijst er op dat de invloed vanuit het Marsdiep (de Doove Balg) is toegenomen ten opzichte van het Vlie (Blauwe Slenk). Deze toename stopt na 1950 wat de suggestie geeft dat daarna de ligging van het wantij relatief stabiel is geweest.



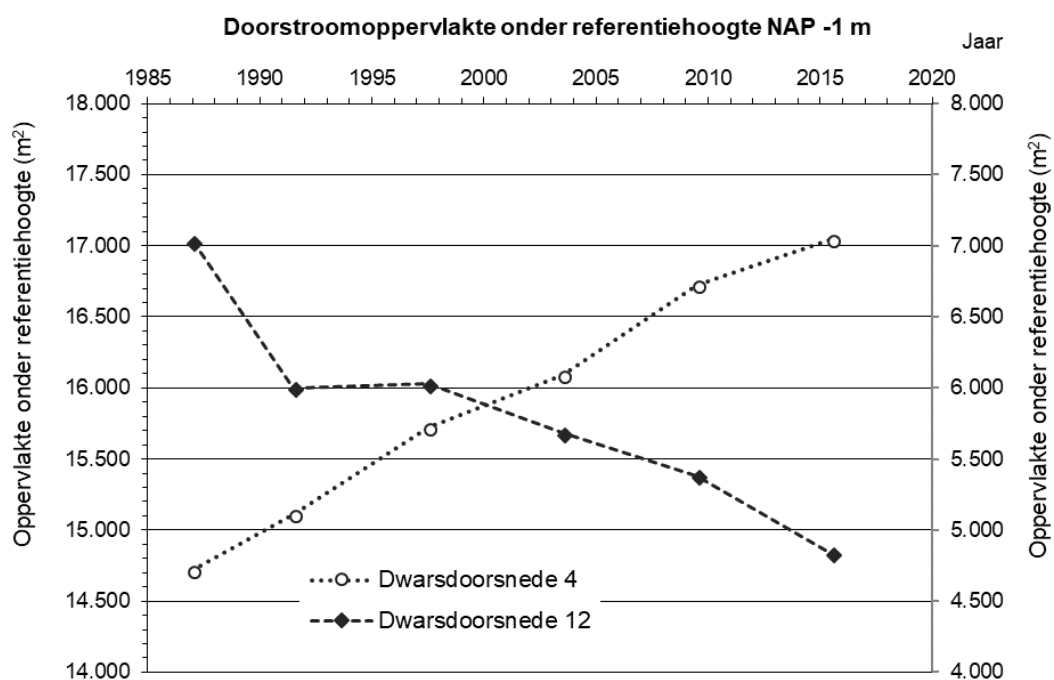
Figuur 3-7 Dwarsdoorsnede 12 van de geulen Inschot en Oude Inschot (zie inzet voor locatie).

Het belang van de verschillende geulen in de nabijheid van het wantij verandert wel nog na 1950. 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 3-7). De omvang van de Doove Balg neemt toe, zoals zichtbaar is in de

dwarsdoorsnede in Figuur 3-8. Figuur 3-9 toont een grafiek met de doorstroomoppervlaktes van de Doove Balg en Inschot. Die laat zien dat de trendmatige afname van de ene geul wordt opgevangen door de andere geul. Het gevolg ervan is dat het verschil in de geometrie (Marsdiep is langgerechter) van de beide bekken, zoals getoond in Figuur 3-3, de afgelopen jaren is versterkt.

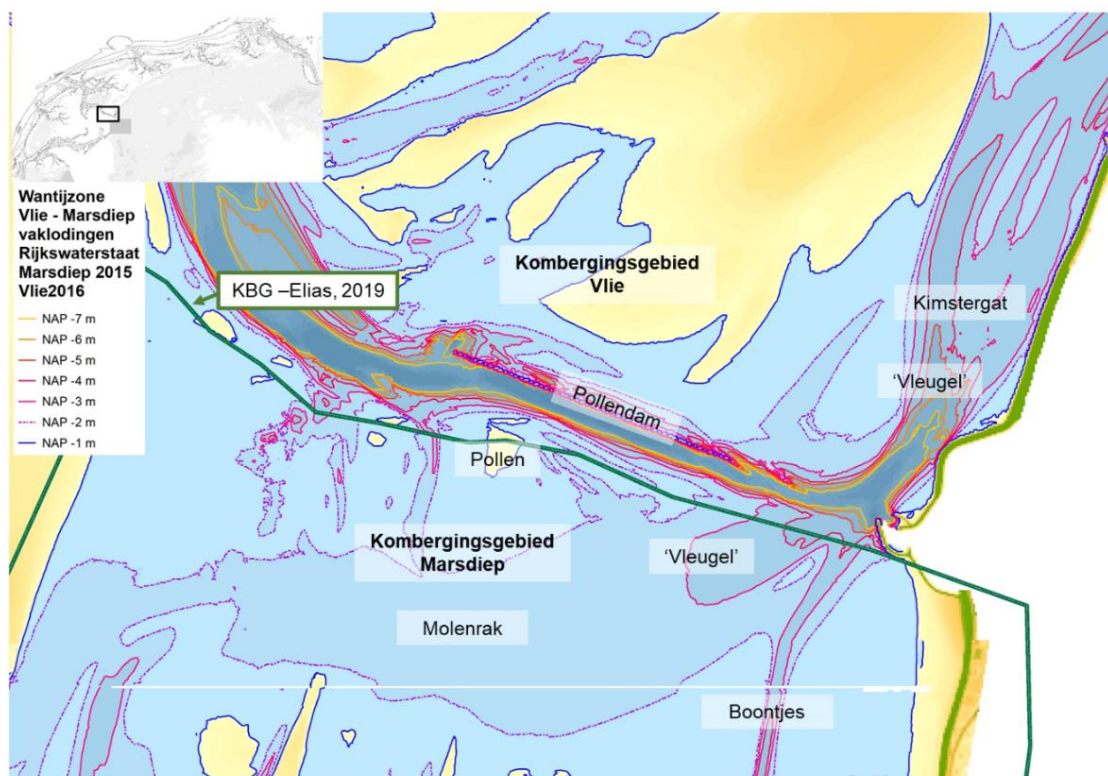


Figuur 3-8 Dwarsdoorsnede 4 van de geul Doove balg (zie inzet voor locatie).



Figuur 3-9 Grafiek van de doorstroomoppervlakte van de geulen Inschot en Oude Inschot in dwarsdoorsnede 12 (locatie in Figuur 3-7) en Doove balg in dwarsdoorsnede 4 (locatie in Figuur 3-8).

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 niet goed mogelijk. Dit betekent dat bij analyses waarbij de ligging van de kombergingsgrenzen een rol speelt, zoals het bepalen van volume- en areaalveranderingen een (arbitraire) keuze gemaakt dient te worden. Omdat de ligging van het wantij een rol speelt bij interpretaties van de analyseresultaten van sedimentbudgetten is het van belang de ligging van het wantij vast te leggen, totdat er nieuwe inzichten ontstaan. Elias (2019) gaat hier uitvoerig op in , als onderdeel van de beschrijving van de onzekerheden bij het opstellen van een sedimentbalans. Zie Figuur 3-10.



Figuur 3-10 Detail van de zone waar de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie aan elkaar grenzen. De groene lijn is het wantij die is gebruikt in Elias (2019). Door de aantakking van Boontjes op Kimstergat is er een verbinding 'achterlangs'. Daar ligt ook de haven van Harlingen. Meer westelijk liggen nog sublitorale gebieden waar ook uitwisseling plaatsvindt.

3.7.3 Areaalveranderingen na afsluiting

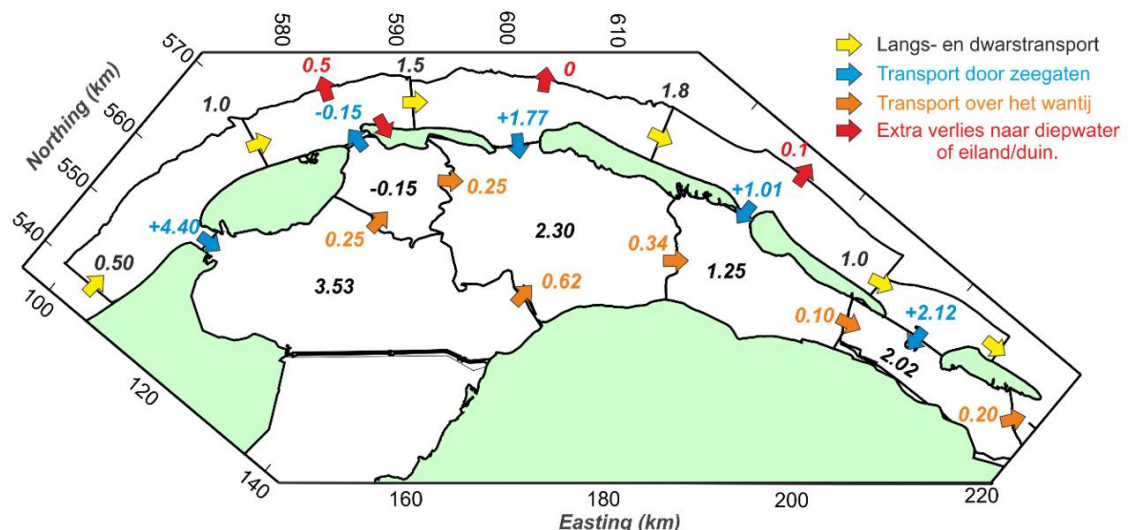
De opgetreden sedimentatie sinds de afsluiting van de Zuiderzee heeft geresulteerd in duidelijke veranderingen in de arealen van de geulen en de platen. Het areaal platen is toegenomen in het kombergingsgebied van het Vlie, waarbij de trend een toename van 156 ha per jaar is. Het areaal geulen is met dezelfde trend afgenomen. Hierbij moet worden bedacht dat bij deze analyse een vaste referentiehoogte is gehanteerd van de overgang van plaat naar geul van -1,0 m NAP. In werkelijkheid is ook het niveau van gemiddeld laagwater in de beschouwde periode hoger geworden. De daadwerkelijke toename van het plaatareaal, dat wordt begrensd door het niveau van laagwater is kleiner.

3.8 De sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee

Inzicht in de sedimentbudgetten van Waddenzee en Noordzeekustzone is fundamentele kennis die nodig is voor onderbouwing van het beleid en beheer van kust en Waddenzee, in het bijzonder in het licht van zeespiegelstijging. Voor het Nederlandse kustonderhoud is de hoeveelheid sediment die zich verplaatst naar de Waddenzee een belangrijke factor bij het vaststellen van zandtekorten in het kustfundament. Een belangrijke vraag voor het beheer van de Waddenzee is de mate waarin de sedimentvoorraden en morfologie zich kunnen ontwikkelen. Het beleid is gericht op behoud van de karakteristieken van het systeem en daarvoor moet, gezien de kans op versnelling van de zeespiegelstijging, op termijn meer sediment in het systeem worden geïmporteerd.

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). 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.

Smits en 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 tussen de 13% en 29%. Zij constateren dat het merendeel van de geulen in de Westelijke Waddenzee sedimenteert, met uitzondering van Malzwin (Marsdiep) en Robbengat (Eierlandse Gat). 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.

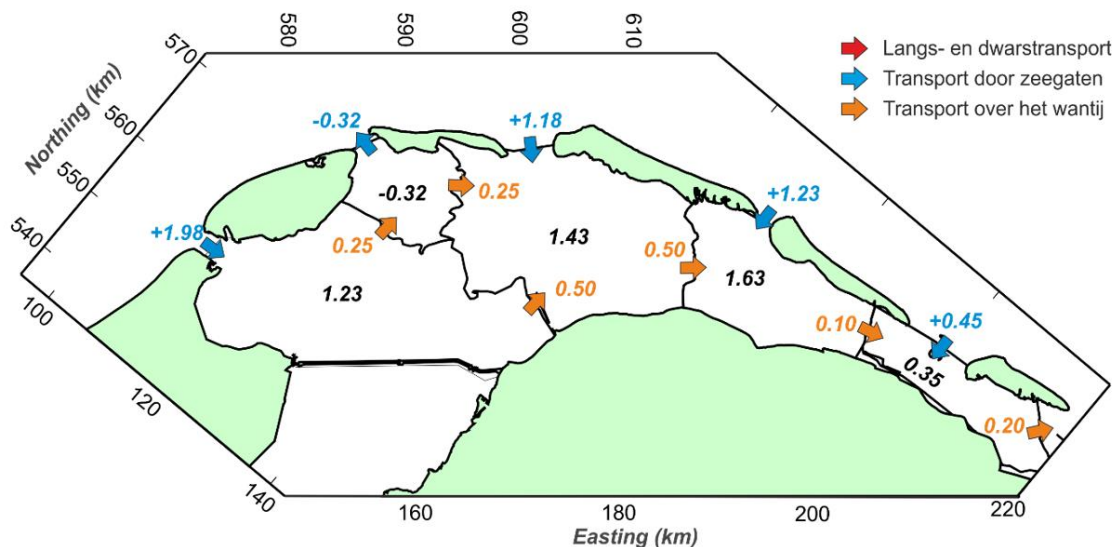


Figuur 3-11 Overzicht van het grootschalige zandbalansmodel representatief voor de langetermijntrends, uitwerking op schaal van de zeegaten, gecorrigeerd voor bagger, storten, bodemdaling en overige winst- en verliesposten (Elias, 2019)

De meest actuele en omvattende studie is Elias (2019). Deze maakt een schatting van de volumeveranderingen op lange termijn en voor de huidige trends en gaat daarbij uit van een nieuwe methode van trendlijnanalyse, zie voor een uitgebreide toelichting op die methode Elias en Vermaas (2018). Dit geeft een aanzienlijk verschil met de "klassieke" volumeberekeningen die hiervoor niet of slechts beperkt zijn gecorrigeerd. Dit werd de basis van een

zandbalansmodel waarin ook de samenhang tussen de verschillende kombergingsgebieden kon worden bepaald. Zie Figuur 3-11 en Figuur 3-12. Via aannamen van de uitwisseling over de wantijen kon een schatting gemaakt worden van de bijdrage per zeegat. Uit dit zandbalansmodel volgt een import voor de periode vanaf 1991 door het Marsdiep van +2,0 Mm³/jaar (lange termijn trend was +4,4 Mm³/jaar). Voor het Zeegat van het Vlie wordt voor die periode een import van +1.2 Mm³/jaar berekend (lange termijn trend was +1,8 Mm³/jaar). Het sedimentvolume van het Eierlandse Gat neemt af (-0.3 Mm³/jaar).

Elias (2019) geeft ook de meest actuele trends van de sedimentbudgetten per kombergingsgebied. Opvallend is de afname in de sedimenterende volumetrend in het kombergingsgebied van het Marsdiep. De meest plausibele verklaring is dat de lange termijn trend (1933-2015) van opvulling⁵ met ca 3,5 Mm³/jaar) wordt gedomineerd door de eerste decennia na de aanleg van de afsluitdijk. De recente trend van opvulling is veel lager, ca. 1,2 Mm³/jaar. Ook de trend van het kombergingsgebied van het Vlie kent een sterke afname (van ca 2,3 Mm³/jaar over 1933-2015, naar 1.4 Mm³/jaar over 1991-2015).



Figuur 3-12 Overzicht van het zandbalansmodel representatief voor de huidige trends, uitwerking op schaal van de zeegaten, gecorrigeerd voor bagger, storten, bodemdaling en overige winst- en verliesposten (Elias, 2019)

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, ook voor slibrijk materiaal, wat in veel mindere mate gelimiteerd is door de transportcapaciteit dan zand. Als het grootste deel van extra sedimentatieruimte is opgevuld moet de trend in sedimentatie wel afnemen. Voor een definitie van de ruimte voor sedimentatie versus potentiële accommodatie ruimte wordt verwezen naar Elias et al (2019a), wat gebaseerd is op Elias en Vermaas (2018). Er is in Elias (2019) niet specifiek gekeken naar het aandeel zand versus slib. Schattingen daarvoor in de bodemvolumina liggen tussen de 8 en 37% (Oost et. al., 2018).

In 2019 is door een detailstudie van de buitendelta van het zeegat van Ameland een beter begrip gekregen van het langstransport tussen de Waddeneilanden (Elias et al, 2019b.) De

⁵ Die minder is dan het transport door het zeegat omdat er ook transporten over het wantij zijn. De gegeven getallen zijn volumeveranderingen gecorrigeerd voor bagger, storten, bodemdaling en overige winst- en verliesposten

aangenomen cycliciteit van 50-60 jaar van het gedrag van de buitendelta bleek minder duidelijk dan eerder aangenomen. Veranderingen in langstransport kunnen ook aangedreven worden door veranderingen op veel kleinere morfologische ruimteschaal en een duidelijk onderscheid tussen ruimteschalen ontbreekt eigenlijk. Zij onderscheiden een ontwikkeling in vijf stappen. Deze nieuwe inzichten zijn ongetwijfeld ook van belang in het begrijpen van de ontwikkeling van de eilanden rondom de Westelijke Waddenzee, maar kunnen echter hier niet zo maar naar vertaald worden.

Tenslotte wordt de studie van Wang et al (2018) genoemd. Dit geeft een overzicht van meest relevante beschikbare wetenschappelijke (objectieve) kennis en/of hypothesen over 'hoe de Nederlandse Waddenzee morfologisch werkt'. Dit is gedaan met het doel deze te structureren en met beheerders en beleidsmakers te kunnen delen. De focus van hen is op de grootschalige morfologische processen.

4 Getijdegeulen

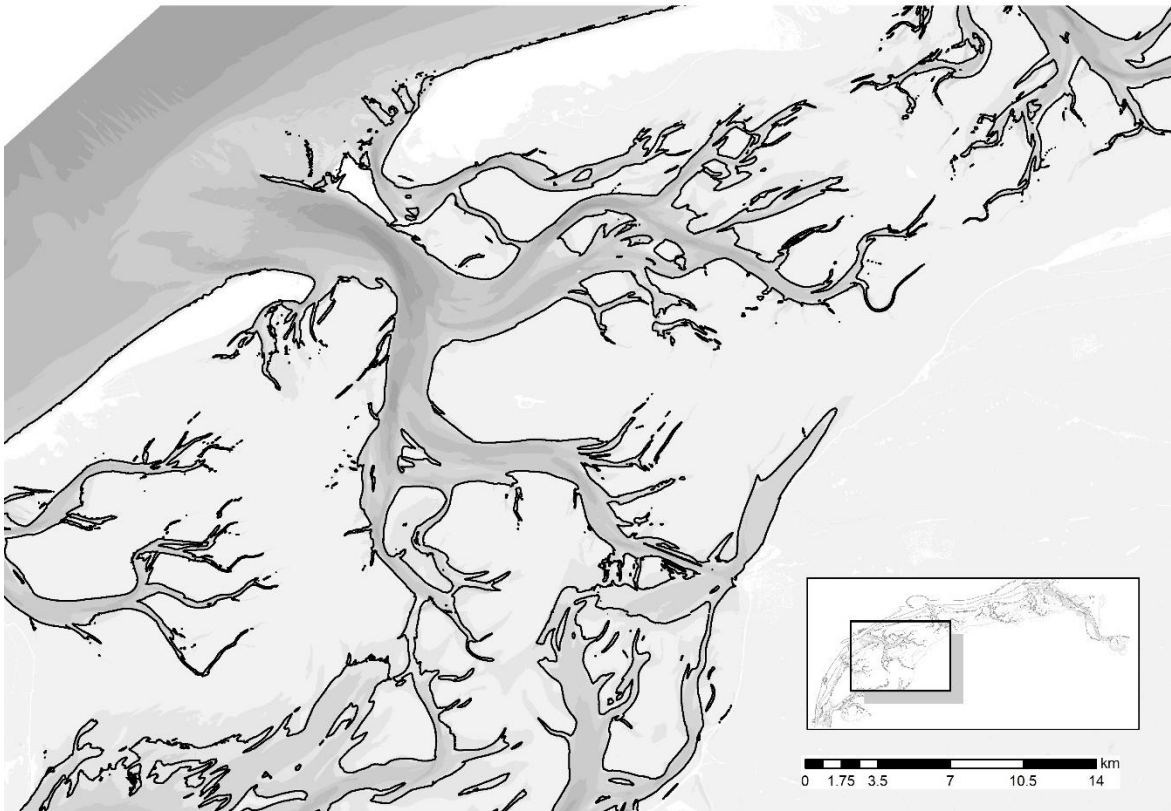
4.1 Basisbegrippen

4.1.1 Getijstroming stuurt geulvolume

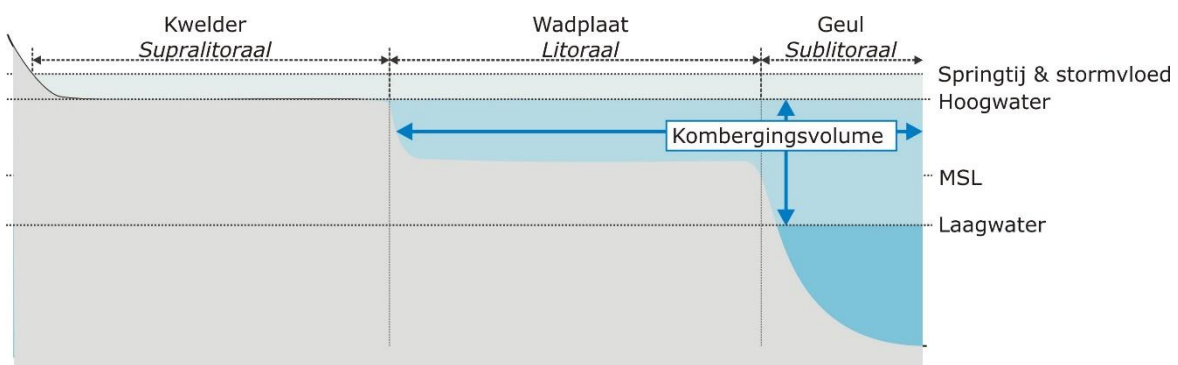
Waar zeer veel getijdewater heen en weer stroomt en de stroming hoge snelheden bereikt schuurt de bodem uit en vormen zich geulen. Deze getijdegeulen voeren niet alleen water aan, maar ook sediment en nutriënten. De geulen vertakken zich op vrij regelmatige wijze (Figuur 4-1). Elke zijtak en 'zij-zijtak' voorziet een steeds kleiner deel van het gebied van water. Samen vormen de takken en de hoofdgeul een netwerk dat wel iets lijkt op een boom (Van Veen, 1950) als ervan bovenaf op wordt gekeken: het geulenstelsel. Dit geldt overigens voor het kombergingsgebied van het Vlie, dat is getoond in Figuur 4-1, veel duidelijker dan voor het kombergingsgebied van het Marsdiep, waar de grote arealen sublitoraal het vertakkende geulenpatroon deels verhullen.

De hoeveelheid getijdewater dat door een geul moet kunnen wordt ruwweg bepaald door (zie Figuur 4-2) de oppervlakte van het kombergingsgebied, vermenigvuldigd met het getijverschil (minus de oppervlakte van de droogvallende platen, vermenigvuldigd met de gemiddelde hoogteligging van de platen).⁶ Minder getijdvolume betekent dat de natte doorsnede van de geul ook minder groot hoeft te zijn (voorbeeld in Figuur 4-3). Dat betekent dat veranderingen in het lokale getijdeprisma (bijvoorbeeld door verplaatsing van het wantij, concurrentie met andere geulen, sedimentatie en erosie op platen, veranderingen in areaal kwelders) morfologische veranderingen in de geulen tot gevolg hebben. Afhankelijk van de lokale condities kan sedimentatie in de geul plaatsvinden met zand, slib of een mengsel van de twee. Een illustratie van dit fenomeen staat in Figuur 4-4 en Figuur 4-5. Deze tonen de ontwikkeling van de dwarsdoorsnede en de doorstroomoppervlakte van het Kimstergat. Van deze geul is de doorstroomoppervlakte zeer gestaag afgenomen, waarschijnlijk door de afname van het kombergingsvolume door sedimentatie op de Vlakte van Oosterbierum.

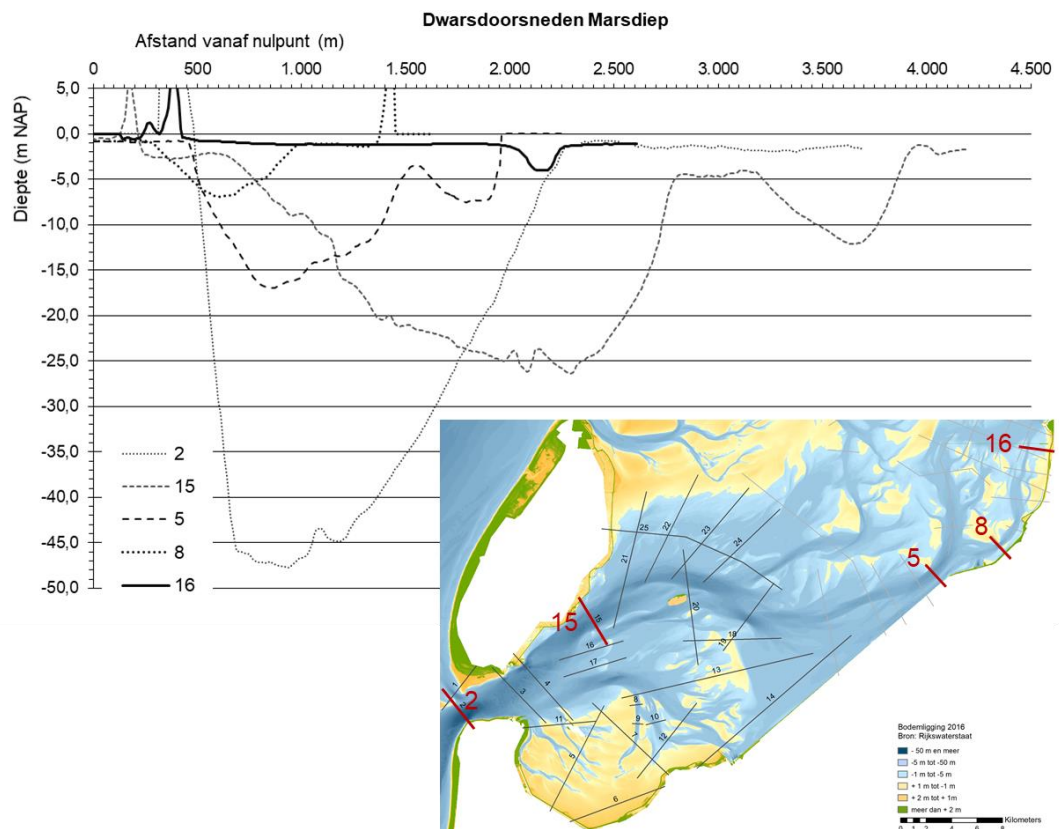
⁶ *Helemaal correct is dat niet omdat nu eenmaal het water nog afstroomt tijdens eb terwijl de vloed alweer naar binnen komt: daardoor is het werkelijke volume dat heen en weer stroomt door een zeegat ongeveer 0,9* het hierboven gegeven volume op basis van morfologie (Van Veen, 1950).*



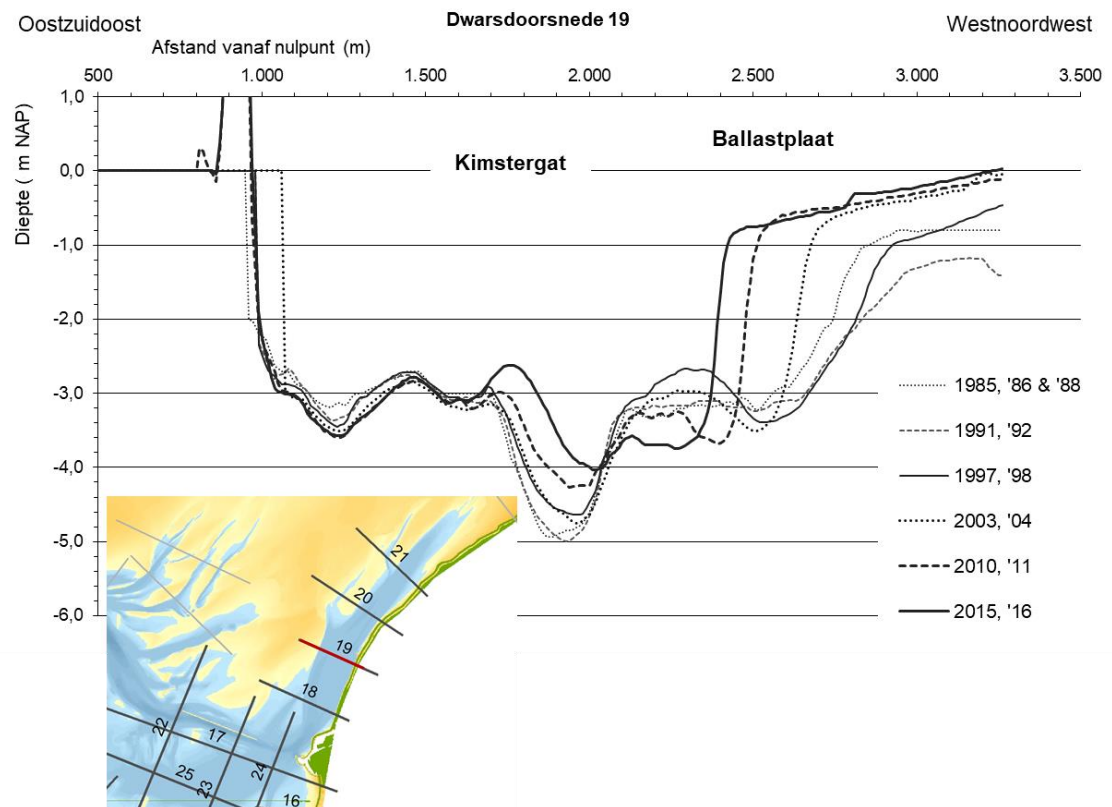
Figuur 4-1 Contouren van de geulen in het kombergingsgebied Vlie in 2016.



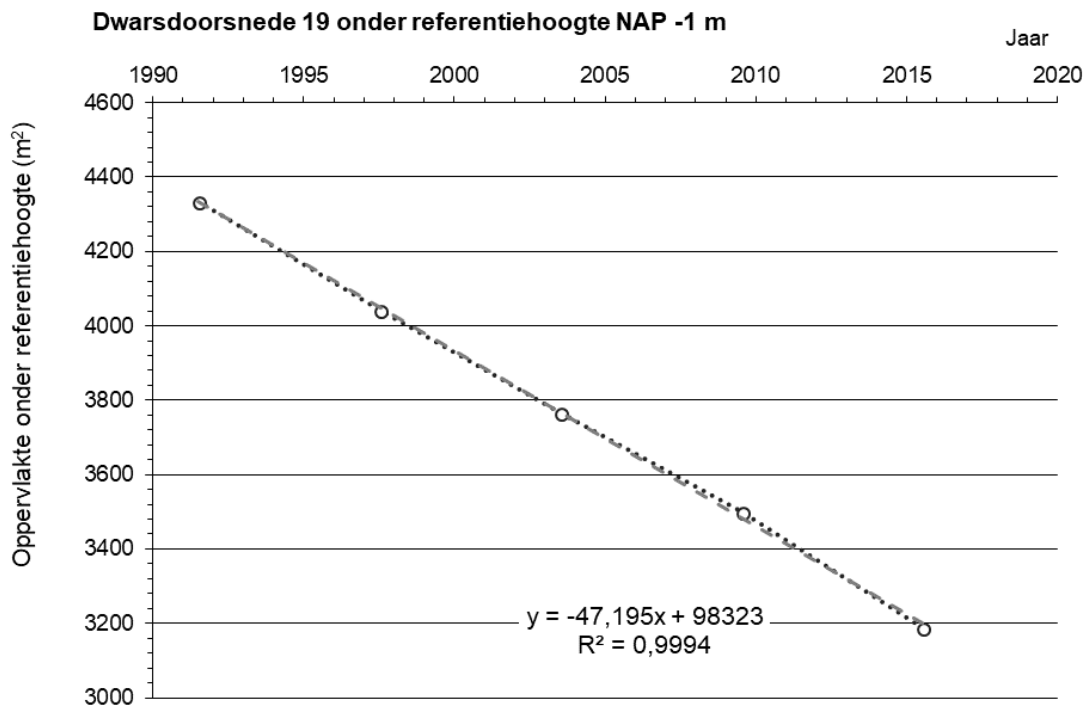
Figuur 4-2 Hoogte van geul, wadplaat en kwelder ten opzichte van het niveau van laag- en hoogwater en het kombergingsvolume (uit LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svašek-Arcadis, 2013)



Figuur 4-3 Voorbeeld van de afname van de geulomvang van het zeegat tot verder in het kombergingsgebied.



Figuur 4-4 Dwarsdoorsnede 19 van het Kimstergat ten noordoosten van Harlingen (zie inzet voor locatie).



Figuur 4-5 Doorstroomoppervlakte onder NAP -1,0 m (bovenste grafiek) van dwarsdoorsnede 19 (weergegeven in Figuur 4-4).

4.1.2 Andere stromingspatronen

Stroming heeft ook andere oorzaken, waaronder de verhoging van de waterstand door stormvloed en golfgedreven stromingen. Die invloed kan belangrijk zijn. Als het niet stormt, 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.

Ook 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 Marsdiep (Elias, 2006; Buijsman & Ridderinkhof, 2007) en bij Harlingen (Schulz & Gerkema, 2018).

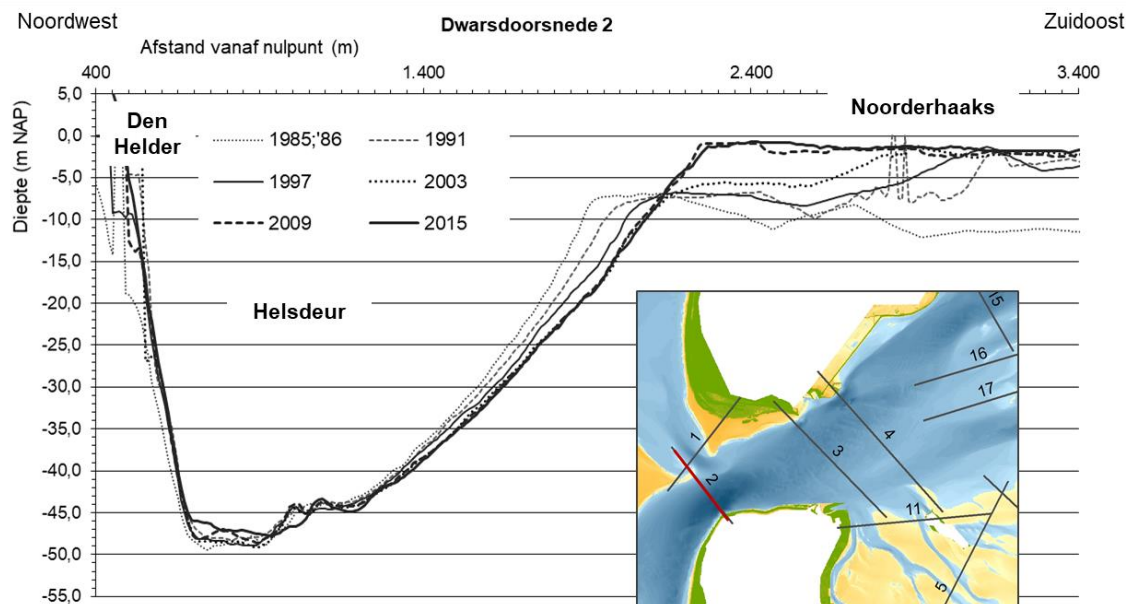
Binnen de geulen zijn nog allerlei morfologische verschijnselen aanwezig (bochten, eb- en vloedcharen, parallelle geulen, etc.), die ook in dit hoofdstuk worden besproken.

4.2 Kenmerkende geulvormen en -dynamiek

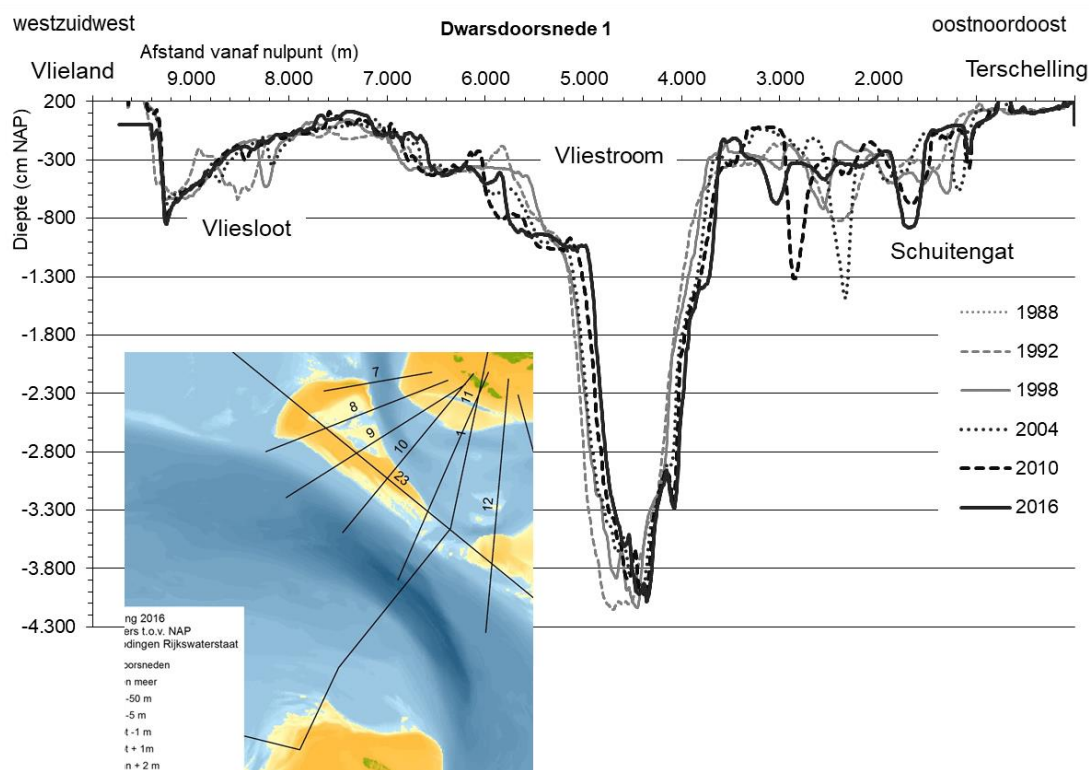
4.2.1 Zeegaten, de grote en diepe geulen tussen de eilanden

Dwarsdoorsneden van het Marsdiep en het Vlie staan Figuur 4-6 en Figuur 4-7. Beide dwarsdoorsneden lopen door het diepste deel van het zeegat. In beide gevallen is sprake van één diepe geul, die tot diepten van NAP -49 m (Marsdiep) en NAP -41 m (Vlie) is ingesneden in de ondergrond. Bij het Marsdiep liggen in de keel van het zeegat geen geulen naast deze grote geul. Bij het Vlie is sprake van parallelle geulen aan weerszijden van de hoofdgeul

Vliestroom. Beide situaties zijn anders dan in de Oostelijke Waddenzee, waar de zeegaten (tenminste een deel van de tijd) bestaan uit twee geulen.



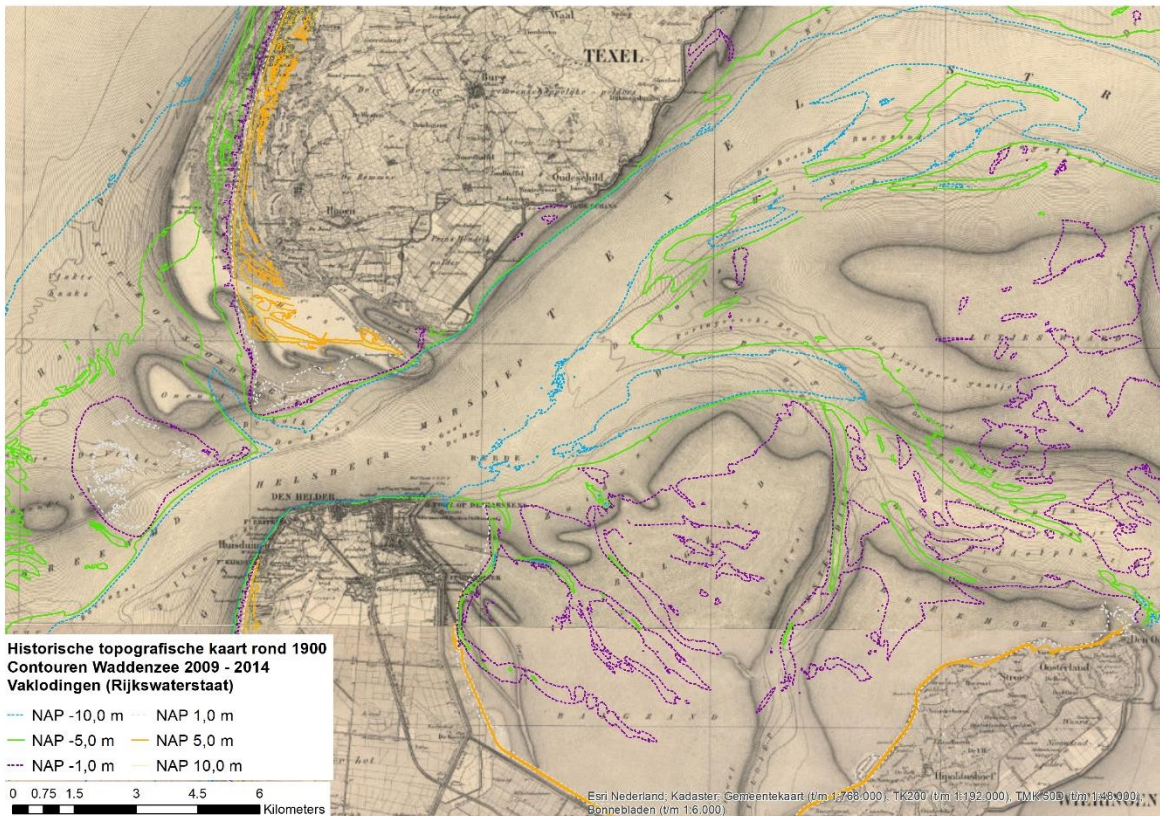
Figuur 4-6 Dwarsdoorsnede 2 door het Zeegat van Texel (zie inzet voor locatie).



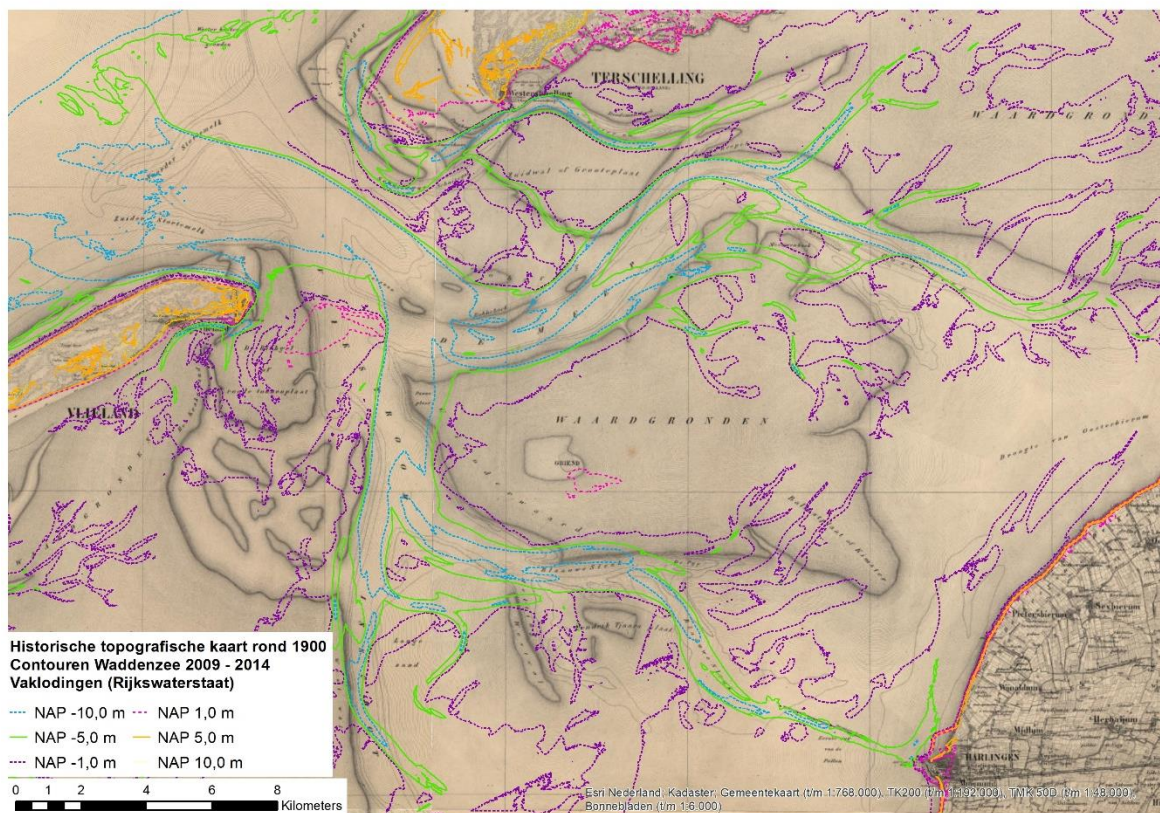
Figuur 4-7 Dwarsdoorsnede 1 door het zeegat van het Vlie (zie inzet voor locatie).

Op de grote schaal en de lange tijd schaal van ruim honderd jaar is de ligging van de grote geulen verrassend gelijk, zoals zichtbaar is in Figuur 4-8 en Figuur 4-9. Het is verrassend, omdat het beeld dat van de Waddenzee bestaat sterke nadruk legt op het dynamische karakter van

het gebied. De grote en snelle verplaatsing van geulen vinden echter niet plaats in de Waddenzee, maar op de buitendelta's. Uitzondering zijn de geulen die vroeger doorliepen tot in de Zuiderzee, zoals de Vlieter, en die hun functie hebben verloren na de voltooiing van de Afsluitdijk en geulen nabij de waterscheiding tussen kombergingsgebied Marsdiep en Vlie.



Figuur 4-8 Kaart van de situatie in het kombergingsgebied Marsdiep rond 1900, met de contouren van de geulen en platen in het kombergingsgebied in 2009.

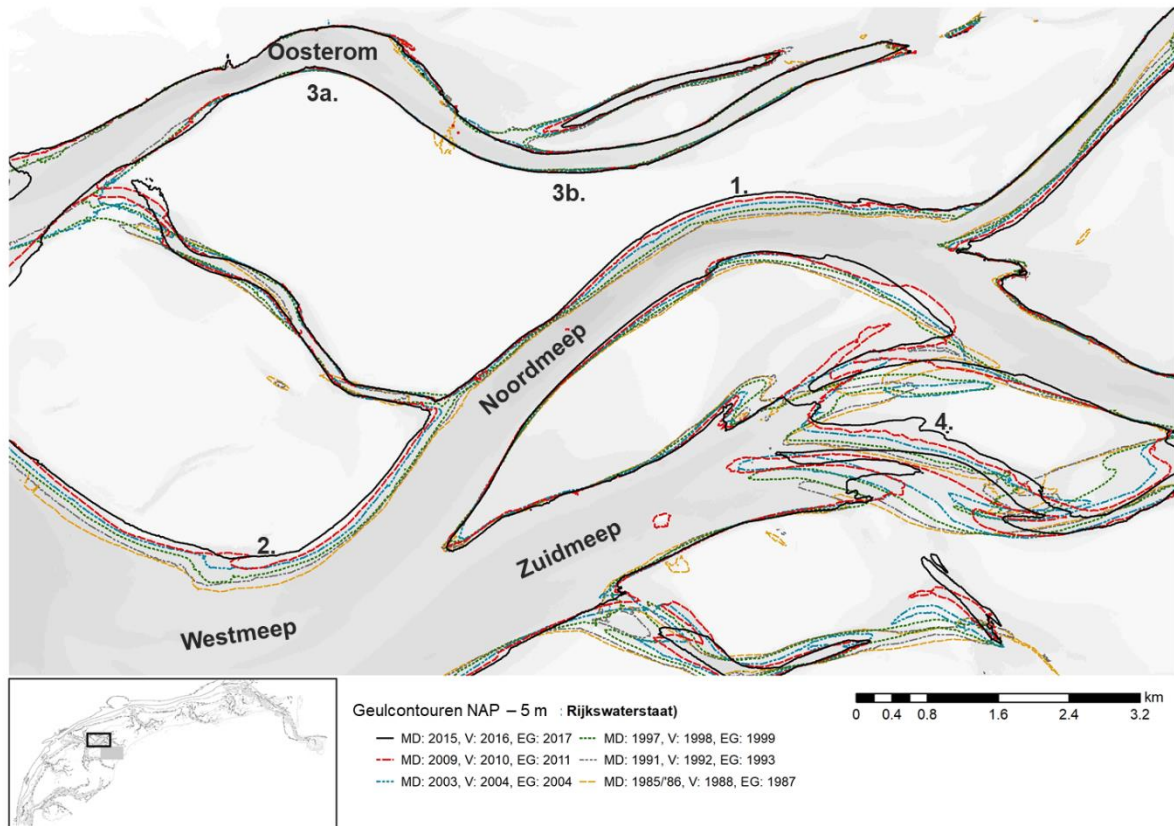


Figuur 4-9 Kaart van de situatie in het kombergingsgebied Vlie rond 1900, met de contouren van de geulen en platen in het kombergingsgebied in 2010.

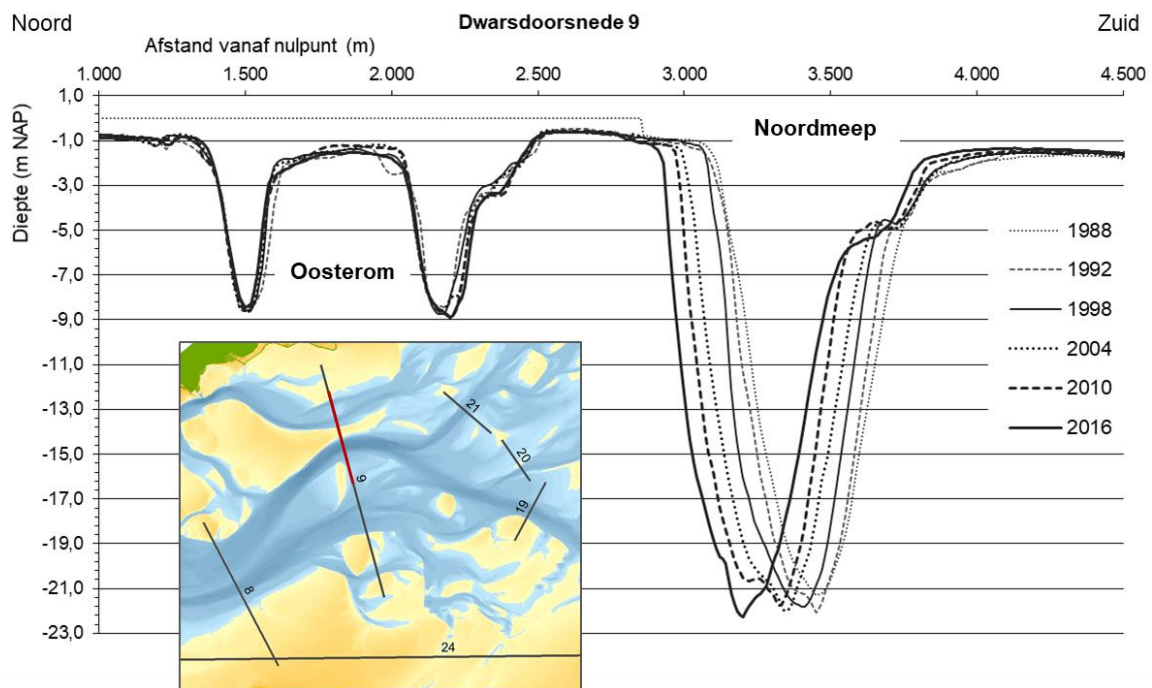
4.2.2 Geulbochten of meanders

Vrijwel alle geulen in de Waddenzee vertonen bochten. Deze hebben in sommige gevallen de neiging om te verplaatsen. Dit is te zien bij 1 in Figuur 4-10, waar de buitenbocht van de Noordmeep gestaag naar het noorden verplaatst. De Noordmeep komt daardoor steeds verder in de buurt van de geul Oosterom te liggen. Uit Figuur 4-11 (dwarsdoorsnede van de Noordmeep) valt af te leiden dat de beide geulwanden van de Noordmeep gestaag naar het noorden verplaatsen. De verplaatsing bedraagt ongeveer 230 m in een periode van 28 jaar. In Figuur 4-10 is bij 2 ook zichtbaar dat de binnenbocht van de Westmeep naar het noorden verplaatst. Een dergelijke verplaatsing van een binnenbocht kan wel in een getijdegeul, maar niet in een rivier gebeuren.

Figuur 4-10 toont bij 3a en 3b ook de bochten in de Oosterom. Deze verplaatsen vrijwel niet. De aanwezigheid van geulbochten is dus geen indicatie van dynamiek. Ten slotte zijn in Figuur 4-10 bij 4 ook de uitlopers van de Zuidmeep zichtbaar, waar sprake is van zeer veel dynamiek. De tegenstelling met de geul Zuidmeep zelf is groot. Die is namelijk heel stabiel. De dynamiek van deze uitlopers is een voorbeeld van de vorming en verplaatsing van vloed- en ebscharen die in de volgende paragraaf wordt beschreven.



Figuur 4-10 Kaart van de NAP - 5 contour van de geulen Oosterom, Noordmeep en Zuidmeep in de opeenvolgende vaklodingen.



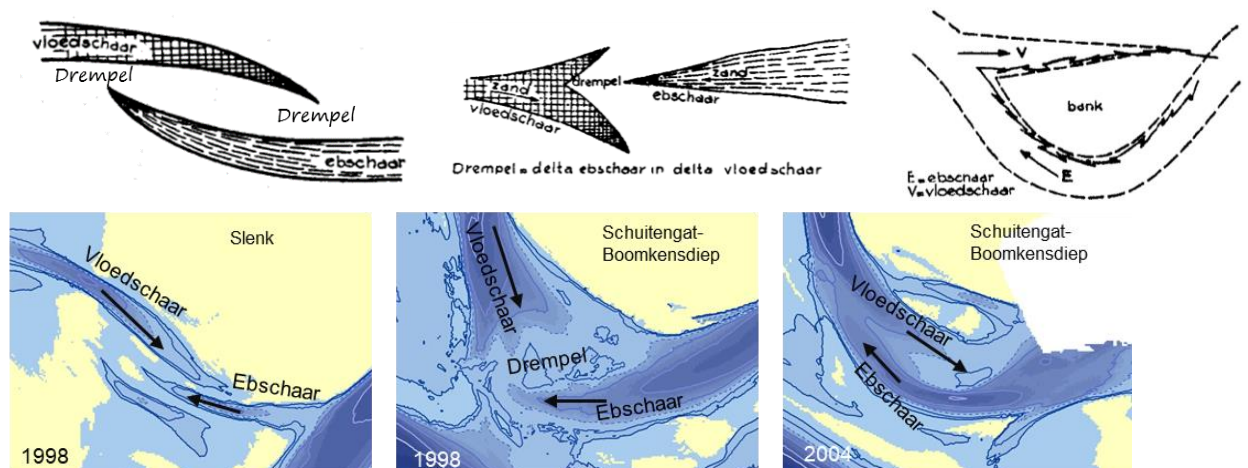
Figuur 4-11 Dwarsdoorsnede 9 door de geulen Oosterom en Noordmeep ten zuiden van Terschelling (zie inzet voor locatie).

4.2.3 Eb- en vloedscharen

Van Veen (1950) heeft deze kenmerkende geulpatronen in getijdebieden beschreven. Eb- en vloedscharen zijn geulen die eruitzien alsof ze 'uit de bocht' geschoten zijn en die eindigen in een ondiepte of drempel (Figuur 4-12). Een vloedschaar is georiënteerd in de richting van de vloedstroom, van het zeegat naar het kombergingsgebied. Een ebschaar heeft de omgekeerde oriëntatie. De aanwezigheid van de drempel aan het einde van schaar betekent dat er geen directe aansluiting op de rest van de geul mogelijk is. Het resultaat daarvan is dat geulen opsplitsen. Dit resulteert in het door Van Veen beschreven systeem van elkaar vermijdende eb- en vloedscharen. Eb- en vloedscharen komen voor in verschillende karakteristieke vormen, die zijn getoond in Figuur 4-12. Deze patronen kunnen worden herkend in de opeenvolgende kaarten met de bodemligging uit het aandachtsgebied.

Ook de uitlopers van de Zuidmeep (bij 4 in Figuur 4-10) zijn vloedscharen. Vanuit de Noordmeep-Oostmeep steken ebscharen in de richting van de Zuidmeep en tussen de eb- en vloedscharen liggen drempels. Dit soort gebieden zijn zonder uitzondering zeer dynamisch, omdat er veel zand in beweging is en er geen stabiele (evenwichts)liggingen zijn). Voor de scheepvaart kan deze dynamiek kansen en problemen opleveren. Kansen ontstaan daar waar nieuwe verbindingen voldoende diepte bieden voor schepen. Problemen ontstaan daar waar de ondieptes obstakels vormen voor de scheepvaart.

Naast doorgaande geulen, die eindigen in een eb- en vloedschaar, zijn er ook geulen die aan beide zijden worden begrensd door een drempel. De Noordschaar en de Zuidschaar zijn zulke geulen. Het patroon van de geulen en drempels in het Boomkensdiep-Schuitengatsysteem is in sommige jaren beduidend complexer dan het schematische eb- en vloedschaaarsysteem in Figuur 4-12.



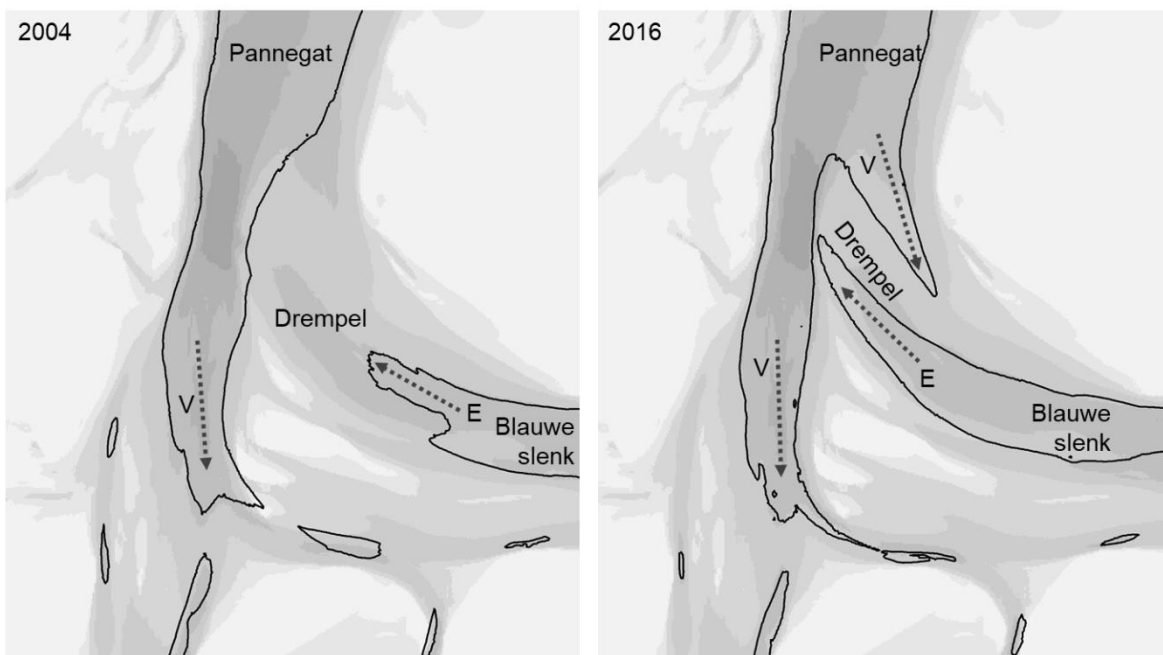
Figuur 4-12 Boven: Eb- en vloedschaar configuraties volgens (Van Veen, 1950). Links: 'flankaanval'; midden: 'vorkvorming'; rechts: 'zandneren', met zandbeweging in de vloedschaar stroomopwaarts, stroomafwaarts in de ebschaar. Onder: Vergelijking met de schematische configuraties van Van Veen. Links: Slenk in 1998 met 'flankaanval'; Midden: 'vorkvorming' op de drempel van Boomkensdiep en Schuitengat in 1998; Rechts: De structuur van 'zandneren' op dezelfde drempel in 2004 (uit Van Til en Cleveringa, 2018).

Eb- en vloedscharen en de bijbehorende drempels worden ook binnen de grenzen van de getijdegeulen aangetroffen. Een voorbeeld daarvan is de drempel tussen het Pannengat en de Blauwe slenk, die is weergegeven in Figuur 4-13. De ligging van deze voor de scheepvaart belangrijke geul verandert slechts beperkt, zoals zichtbaar is in de kaart met NAP -2 m contouren in de opeenvolgende vaklodingen in Figuur 4-14. Binnen de grenzen van deze geulen verandert de positie van de eb- en de vloedscharen wel degelijk, zoals zichtbaar is in

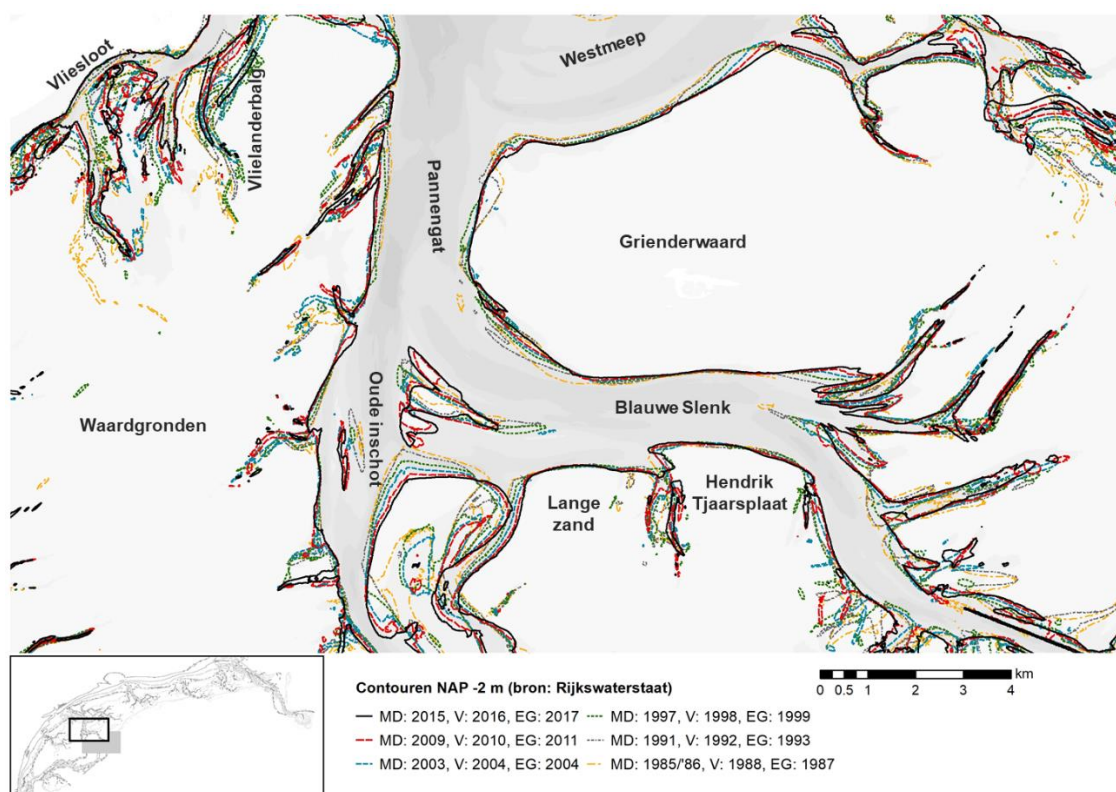
Figuur 4-13. In 2004 is sprake van één eb- en één vloedchaar met een brede drempel daartussen. In 2006 is sprake van twee vloedscharen en één ebschaar, met daartussen een heel smalle drempel. De betonning in deze geul wordt aangepast aan de ligging van de diepe delen, die hier worden gevormd door de scharen.

4.2.4 Stabiele geulen

De meeste hiervoor getoonde voorbeelden zijn dynamische situaties, met uitbochtende geulen en verplaatsende eb- en vloedscharen. Niet alle geulen in de beide kombergingsgebieden zijn zo dynamisch. Bij Figuur 4-10 werd al duidelijk dat de Oosterom vrijwel niet van positie is veranderd. De kaart van de omgeving van de Grienderwaard leert dat ook de positie van de oevers van de grote geulen bij de wadplaten (Westmeep, Pannengat bij de Grienderwaard, Pannengat en Oude Inschot bij de Waardgronden, Blauwe slenk bij Lange zand en Henrik Tjaarsplaat) relatief stabiel is. De reden voor deze stabiliteit is niet bekend, gedacht wordt aan de aanwezigheid van harde -niet-erodeerbare lagen in de ondergrond waardoor de geul als het ware vastligt in de ondergrond (Hijma, 2017).



Figuur 4-13 Kaarten uit 2004 (links) en 2016 (rechts) met de NAP -10 m contour bij de drempel tussen het Pannengat en Blauwe slenk in het kombergingsgebied Vlie. V: Vloedchaar; E: Ebschaar.



Figuur 4-14 Kaart van de NAP – 2 contour van de omgeving van de Grienderwaard in de opeenvolgende vaklodingen.

4.3 Veranderingen in geulen in relatie tot gebruik en beheer

Getijdegeulen zijn op verschillende manieren van belang voor beleid en beheer (Tabel 4-1).

Tabel 4-1 Overzicht van de belangrijkste beleids- en beheervraagstukken rond getijdegeulen.

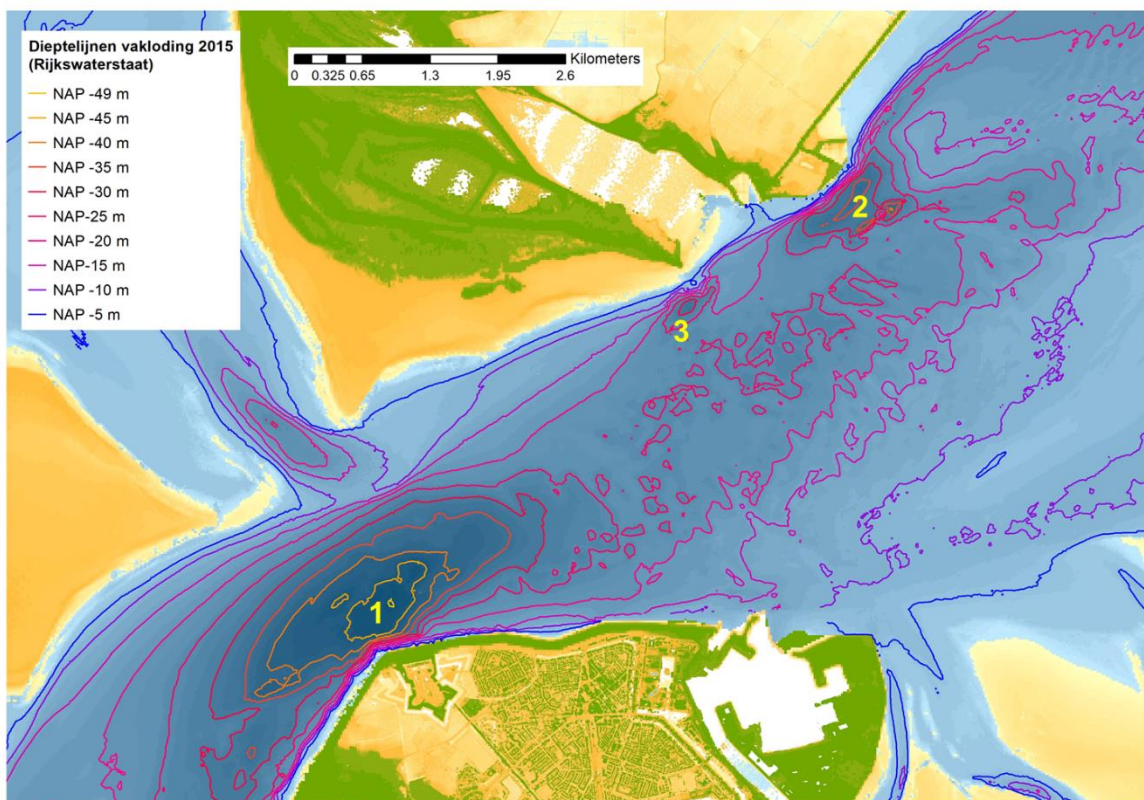
Beleids- of beheervraag(stuk)	Morfologische indicatoren
Gevolgen van erosie voor de kust	Geuldiepte en –migratie Cyclische morfologische ontwikkelingen (geulen) Bodemdynamiek (op diverse tijdschalen; o.a. geulmigratie) Stabiliteit bestortingen Verhouding getijvolume/-prisma en geulgrootte
Noodzaak vaargeul- en havenonderhoud	Geuldiepte en –migratie Cyclische morfologische ontwikkelingen (geulen) Bodemdynamiek (op diverse tijdschalen; o.a. geulmigratie) Stabiliteit bestortingen Verhouding getijvolume/-prisma en geulgrootte
Gevolgen van vaargeul- en havenonderhoud	Baggervolumes Geulvolume Sedimentsamenstelling bodem Troebelheid
Dekking kabels en leidingen	Lokale diepte

Hieronder worden de vijf meest in het oog springende veranderingen in de ligging van een geul met gevolgen voor gebruiksfuncties behandeld.

4.3.1 Het Zeegat van Texel en de oevers bij Den Helder en 't Horntje

Rond het Marsdiep is op drie plekken sprake van ontgrondingskuilen: (zeer) diepe delen van de geul met zeer steile oevers. Op deze plekken zijn de oevers uitgebreid bestort en ligt de oever vast. De locaties zijn genummerd in Figuur 4-15:

1. Bij Huisduinen, ten westen van Den Helder loopt de Helsdeur, die insnijdt tot bijna 50 m diepte (Figuur 4-6);
2. Bij het 't Horntje en het terrein van het NIOZ loopt de geul tot een diepte van bijna 37,5 m (Figuur 4-16);
3. Aan de oostzijde van de Hors bereikt de bodem een diepte van ruim 37,5 m.

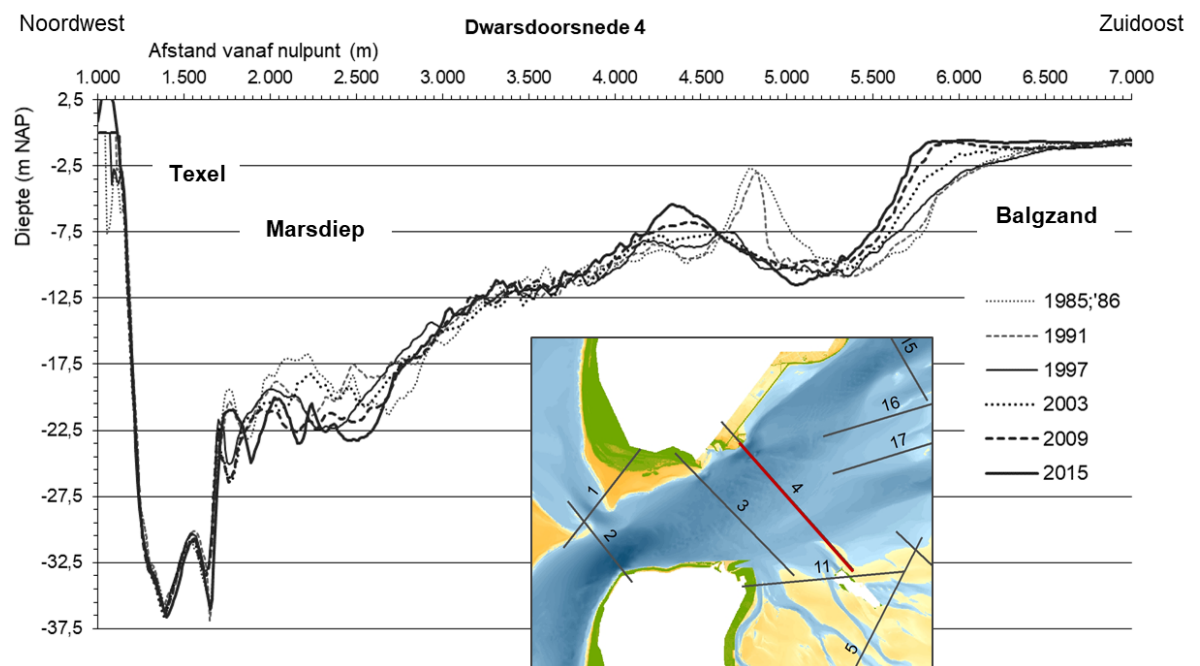


Figuur 4-15 Satellietopname van 16 januari 2016, met de contouren van waterdiepte in 2009 (rood= NAP -40m; oranje= NAP -35 m; geel = NAP -30 m).

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. Het beschermen van de oever is gebeurd 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 ontgrondingenkuilen 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 is de oriëntatie van de geulen in het zeegat gewijzigd. Er 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 (Beckering 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. Beckering 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 geworden.

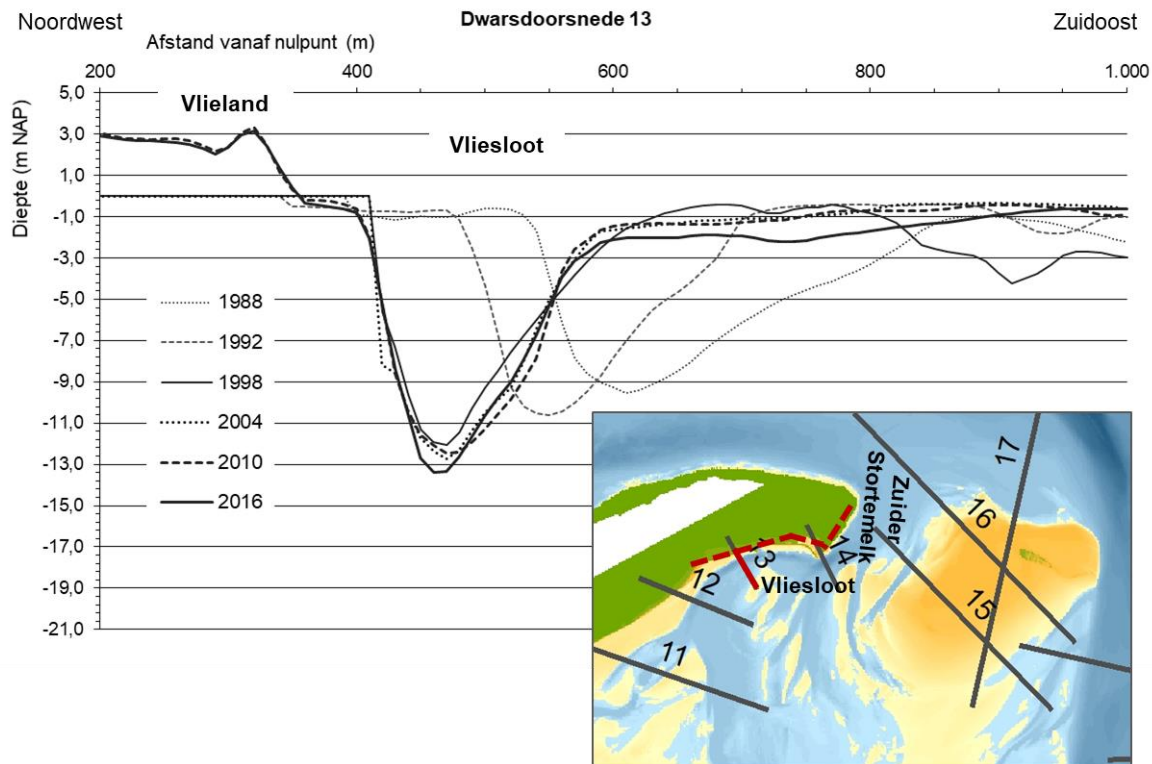


Figuur 4-16 Dwarsdoorsnede door het Marsdiep, ten oosten van Harlingen (locatie in inzet).

4.3.2 Zuiderstortemelk en Vliesloot

Bij de Zuiderstortemelk en Vliesloot (oost- en zuidoostkust Vlieland) is ook sprake van een fixatie. Daar is sprake van strekdammen en (aan de zuidkant) bestortingen die de eilandkop tegen erosie en strandvallen moeten beschermen. Aan de noordoostzijde tot aan de jachthaven van Vlieland is er sprake van een basiskustlijn, waarmee het gebied onder kustlijnverzorg valt. Hier en meer naar het zuiden is sinds tenminste het einde van de 19^e eeuw regelmatig sprake van strandvallen.

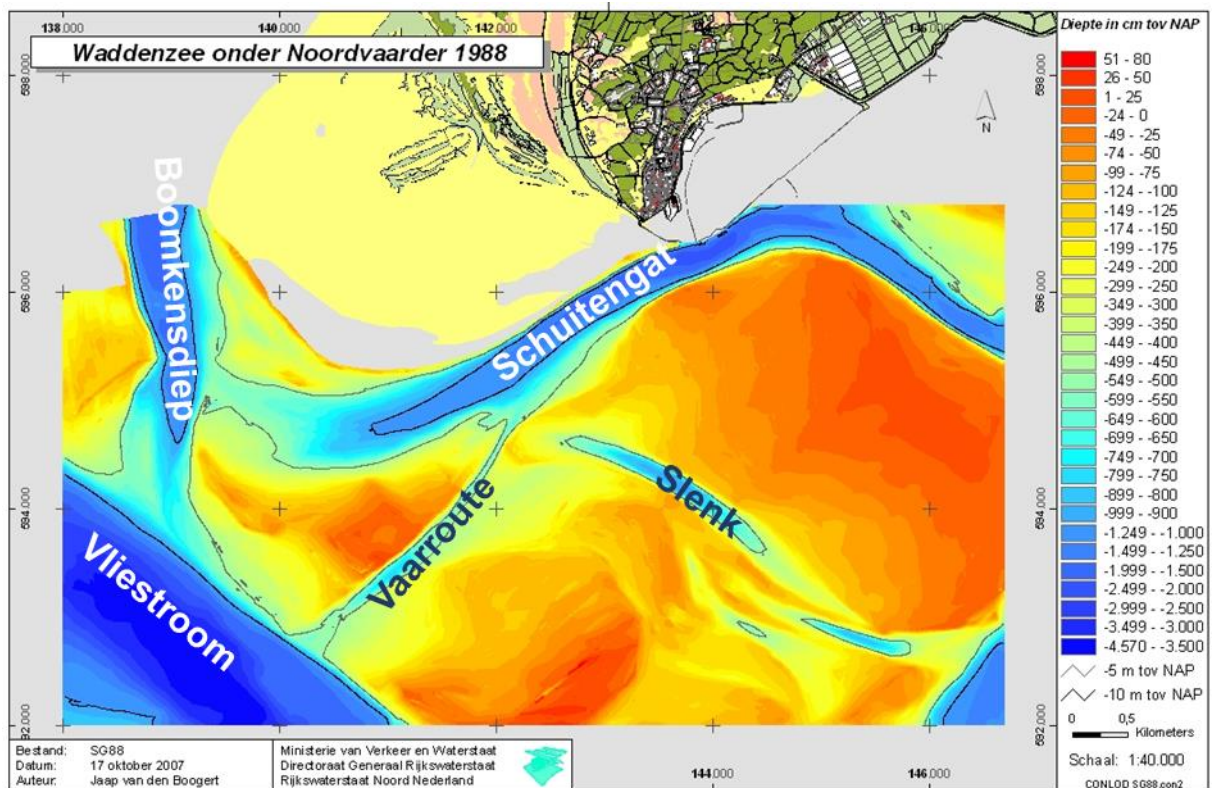
Aan de zuidkust is de geul Vliesloot steeds verder naar de kust verplaatst (Figuur 4-17). Door de verplaatsing naar de oever en versteiling van de geulwand was rond 2006 een situatie ontstaan waarbij met het voorland ook een gedeelte van de dijk en lokaal zelfs het gehele dijklichaam de diepe geul in kon glijden. Aan de zuidkust is in 2007 de oever van Vliesloot bestort om de stabiliteit van de dijk te kunnen blijven garanderen.



Figuur 4-17 Dwarsdoorsnede door de Vliesloot, bij Vlieland-oost (locatie in inzet).

4.3.3 Slenk en Schuitengat en de vaarweg naar Terschelling

De vaargeul voor de veerboot naar Terschelling loopt tegenwoordig via de Westmeep en Slenk. Voor 1996 liep de verbinding via het Schuitengat naar de Vliestroom (Figuur 4-18). Door morfologische veranderingen liep het baggerbezwaar van de route via het Schuitengat sterk op. Omdat de route via het Schuitengat korter is dan de route via Slenk bestaat er bij de belanghebbenden de wens om de route via het Schuitengat weer in gebruik te nemen. Door natuurlijke ontwikkeling is in 2015 opnieuw een verbinding ontstaan tussen het Schuitengat en de Vliestroom (de Doorsteek in Figuur 4-19). Deze verbinding is betond, maar heeft van nature niet voldoende diepgang voor de grote veerboten. In 2017 is onderzocht of het baggeren van de Schuitengat verbinding een duurzaam alternatief biedt voor de route via Slenk en de resultaten hiervan zijn gerapporteerd in van Til & Cleveringa (2018). Hieronder volgt een samenvatting van de bijbehorende morfologische ontwikkelingen.



Figuur 4-18 Vaklodingenkaarten omgeving Schuitengat-Slenk uit powerpointpresentatie van Lofvers (2015).

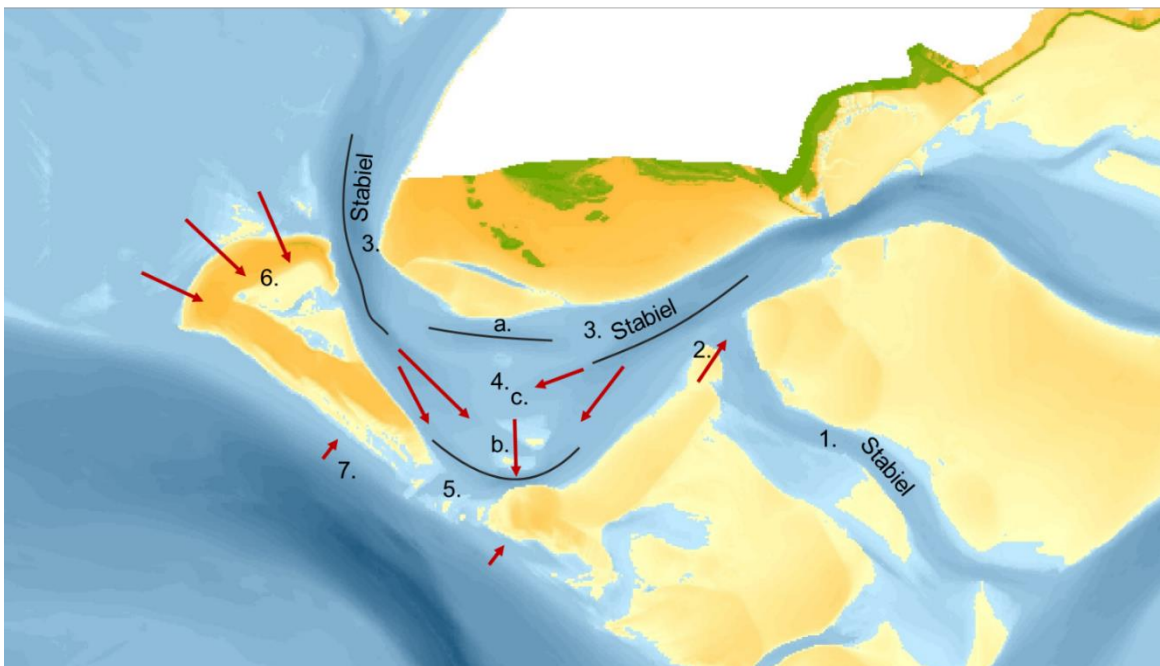


Figuur 4-19 Detailoverzicht van de naamgeving van de geulen en platen in het aandachtsgebied, situatie 2016 (Vakloding Rijkswaterstaat), uit Van Til & Cleveringa, 2018.

Het aandachtsgebied bevindt zich op de overgang van de buitendelta naar het kombergingsgebied Vlie. Het zeevat van het Vlie bestaat uit drie geul(system)en. Het Boomkensdiep-Schuitengat ligt aan de oostzijde bij Terschelling, gescheiden van de

Vliestroom door een aantal aaneengeschakelde ondieptes: de Engelschoek en de Jacobsruggen. Ten opzichte van de situatie van halverwege de jaren '90, toen het Schuitengat nog in gebruik was als vaargeul voor de veerboot, is de hoogte van de ondieptes sterk toegenomen. Vanwege deze verandering wordt een terugkeer naar die morfologische situatie niet verwacht.

Kaartanalyses brengen, naast de toename van de hoogte van de zandbanken Engelschoek-Jacobsruggen, zeer veel morfologische veranderingen laten zien. Deze morfodynamiek is direct gekoppeld aan de positie in het zeeget, waarbij zowel grote transporten van zand plaatsvinden door de getijstromingen, als verplaatsing van zand onder invloed van golven.



Figuur 4-20 Samenvatting van de ontwikkelingen in het studiegebied in de periode 2010-2017, op basis van de beheerslodingen, getekend op de bodem van 2017 (vakloding).

De morfologische ontwikkelingen in het gebied zijn schematisch weergegeven in Figuur 4-20 en deze worden hieronder kort toegelicht:

1. Slenk: de huidige vaargeul heeft een stabiele ligging. De stabiele ligging van Slenk wordt geholpen door de baggerwerkzaamheden die hier jaarlijks worden uitgevoerd.
2. De overgang van Slenk naar het Schuitengat: Deze ingang van Slenk verschuift naar het noordoosten.
3. Schuitengat en Boomkensdiep: De posities en de omvang van het Schuitengat en het Boomkensdiep liggen min-of-meer vast.
4. Het drempelgebied tussen Boomkensdiep en Schuitengat is sinds de verzanding van het oorspronkelijke Schuitengat in de jaren 90 nog steeds zeer veranderlijk, met
 - a. De aanwezigheid van de Noordschaar met drempels (ondiepe delen) aan de west- en oostzijde, als een stabiele factor;
 - b. De verplaatsing van de Zuidschaar, met circa 80 - 130 m in 3 jaar naar het zuiden. Daarbij is de Zuidschaar plaatselijk dieper ingesneden (zie Figuur 36), maar gemiddeld wel ondieper en steeds smaller geworden.
 - c. Het drempelgebied tussen de Noordschaar en de Zuidschaar is zeer veranderlijk, zonder een duidelijke trendmatige ontwikkeling.

5. De positie van de Doorsteek varieert sinds deze is ontstaan in 2015, waarbij de opeenvolgende lodingen verschillende locaties voor de diepste delen laten zien.
6. De hoge bank Engelschhoek verplaatst gaandeweg naar het zuidoosten, met een snelheid van meer dan honderd meter per jaar. De hoogte van deze zandbank is net als de hoogte van de Jacobsruggen sterk toegenomen, zodat de scheiding van Vliestroom en het Boomkensdiep-Schuitengat systeem onder normale getijcondities vrijwel compleet is. Alleen via de Doorsteek vindt sinds 2015 getijstroming tussen de twee systemen plaats.
7. De noordoostelijke geulwand van Vliestroom verplaatst geleidelijk, met circa 10 m/j naar het oosten (richting het Schuitengat).

De mogelijke toekomstige ontwikkelingen zijn beschouwd op basis van de waargenomen trendmatige veranderingen. Hierbij is als verwachting genomen dat zich de komende jaren (1 tot 3 jaar) nog geen grote veranderingen zullen voordoen die tot een wezenlijk andere ligging van de geulen zal leiden. Zo'n wezenlijk andere ligging ontstaat bijvoorbeeld als het Boomkensdiep weer verbinding vindt met de Vliestroom, of als de verbinding tussen het Schuitengat en Boomkensdiep wordt geblokkeerd door een toename van het zandvolume van het drempelcomplex.

Op de iets langere termijn (van meer dan 3 jaar) zullen naar verwachting zeker wel grote veranderingen optreden in de ligging van geulen en platen. De ontwikkelingen van de Doorsteek zijn niet voorspelbaar. De meest recente waarnemingen wijzen op het vergroten van de geul vanuit de Zuidschaar, zodat de Doorsteek een ebschaar vormt. Eerder wees de ontwikkeling op de vorming van een vloedschaar vanuit de Vliestroom.

Voor het gebruik en het beheer van het drempelgebied tussen Schuitengat en Boomkensdiep en de zandbanken tussen deze geulen en de Vliestroom is het belangrijk om vast te stellen dat het gebied intrinsiek instabiel is. Veranderingen in de ligging van de geulen en platen onder invloed van het getij en de golven zijn kenmerkend voor deze omgeving nabij de buitendelta. Het is niet mogelijk om met een ingreep (baggeren, suppleren, stroomgeleidingsdam, etc.) een stabiele situatie te creëren. Voor het gebruik van de aanwezige vaargeulen betekent de grote autonome variatie dat het aanpassen van de betonning frequent plaats zal blijven vinden. Het betekent ook dat het baggeren van een voldoende diepe Schuitengat verbinding geen garantie geeft voor een langere levensduur van een dergelijke verbinding.

De morfologische ontwikkelingen van de huidige vaargeul in Slenk zijn beperkt, evenals de fluctuaties in het baggerbezwaar. Slenk is daarmee een betrouwbare verbinding voor de gebruiker en een behoorlijke voorspelbare geul voor de beheerder. Een nieuwe verbinding via het Schuitengat is zeker niet voorstelbaar, omdat er veel morfologische veranderingen plaatsvinden rond de drempel en bij de Doorsteek. Plotselinge verondiepingen onder invloed van golfgedreven transporten zijn zeker mogelijk bij de Doorsteek. Het is ook niet uitgesloten dat de morfologische ontwikkelingen op het drempelcomplex leiden tot een situatie die voor de scheepvaart minder gewenst is. Vanwege de complexe processen en ontwikkelingen in dit gebied kan geen uitspraak gedaan worden over welk toekomstscenario het meest waarschijnlijk zal zijn.

De bestaande verbinding via Slenk is weliswaar relatief lang, maar wel betrouwbaar en voorspelbaar. Een verbinding via het Schuitengat is korter, maar niet voorspelbaar en niet betrouwbaar.

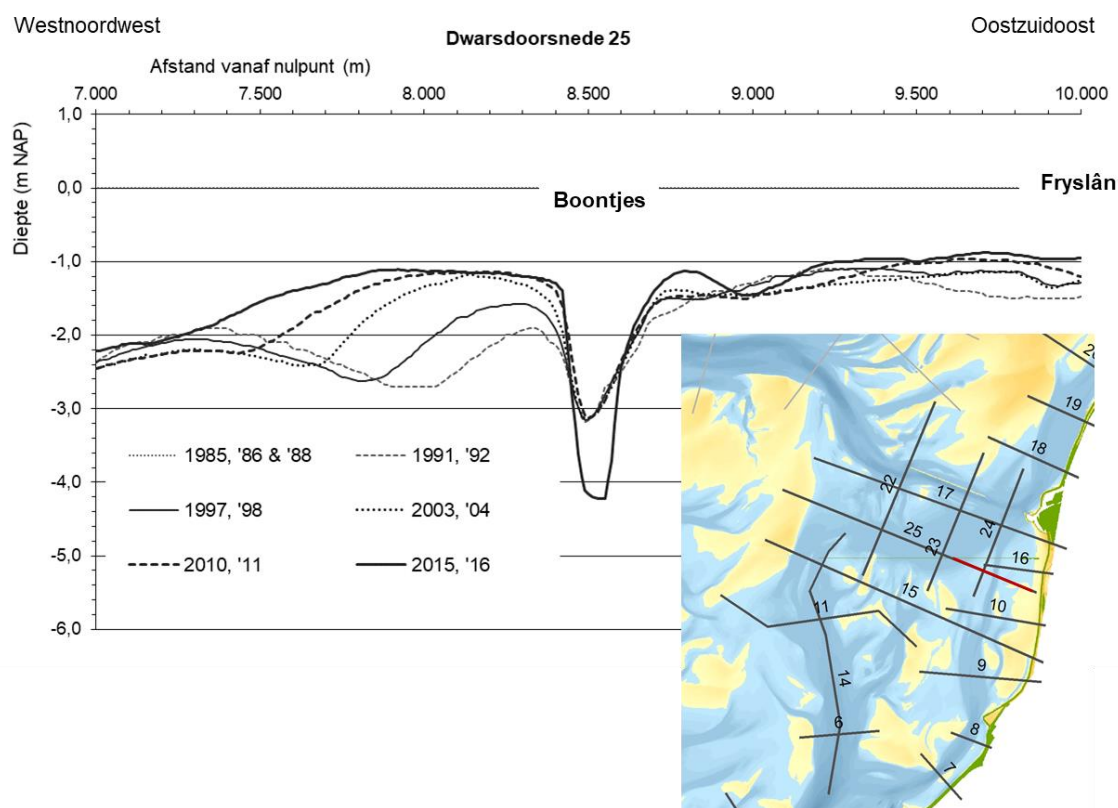
4.3.4 De Boontjes

Dit is de betonde vaarweg die Kornwerderzand verbindt met Harlingen (Figuur 4-21). 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 NAP-3,8 m (de maximale baggerdiepte is NAP-4,3 m.), 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 4-21 Nautische kaart van de vaarweg Boontjes, tussen Kornwerderzand en Harlingen, met de tonnen in rood en groen (bron: Navionics.com).

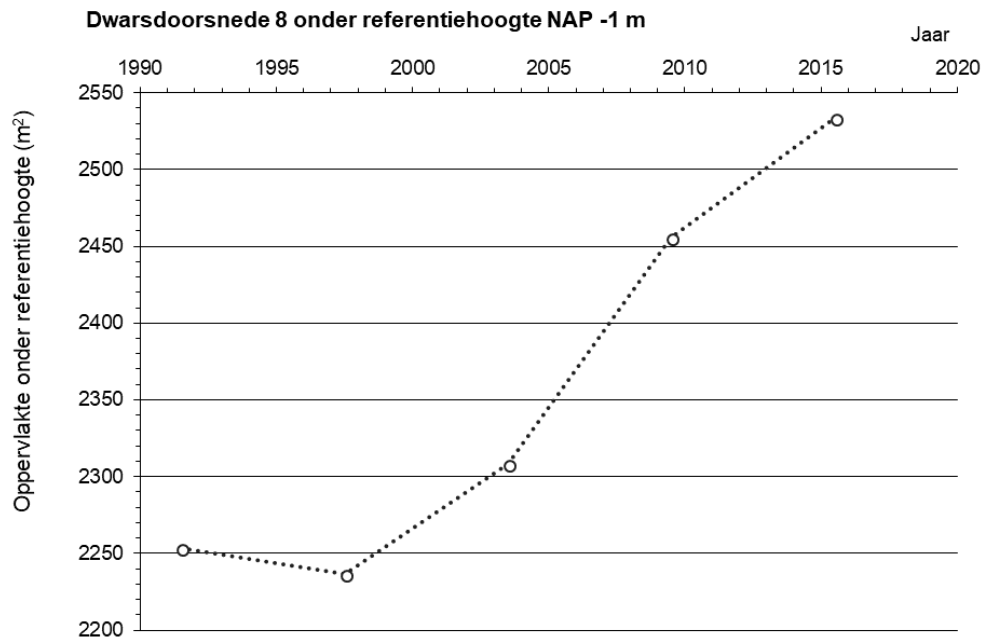
Figuur 4-22 toont dwarsdoorsnede 25, die dwars door het drempelgebied loopt waar het meeste aanlegbaggerwerk heeft plaatsgevonden. In deze dwarsdoorsnede is ook zichtbaar dat ten westen van de vaargeul het ondiep gebied van jaar op jaar aan het uitbreiden is. Ten oosten van de vaargeul neemt de ondiepte 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.



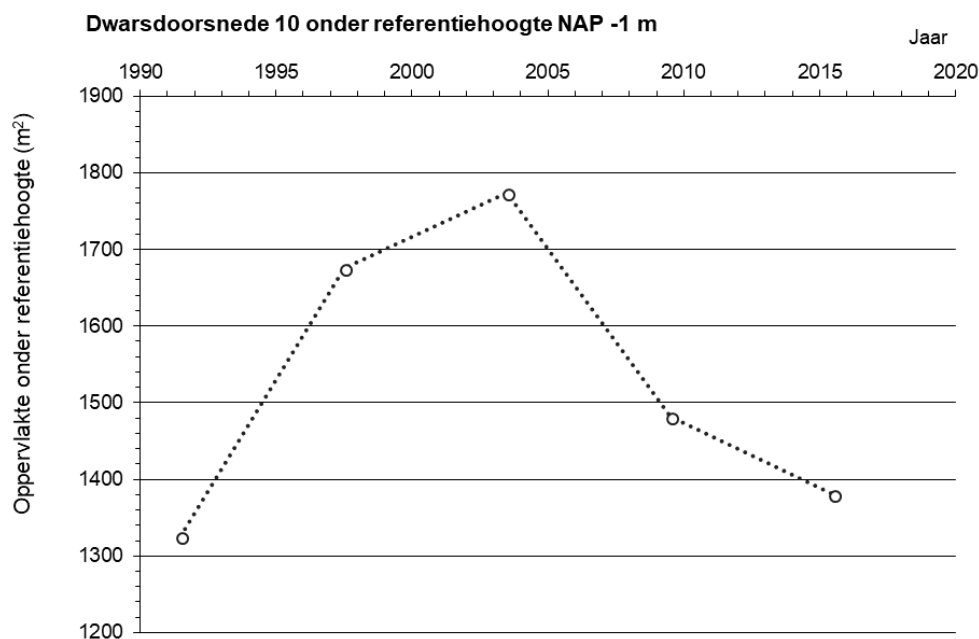
Figuur 4-22 Dwarsdoorsnede 25 door de vaargeul Boontjes en de aangrenzende ondieptes (zie inzet voor locatie).

Het zuidelijke deel van de Boontjes laat een tegenovergestelde trend zien: hier neemt de omvang van de geul toe. Figuur 4-23 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 (zie Figuur 3-8). Het knippunt 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 ongeveer 160.000 m³. Dit is veel groter dan de 20.000 m³ die was voorspeld (op basis van modelberekeningen en expert judgement). Het verschil is mogelijk het gevolg van een onderschatting van de gevolgen golfgedreven sedimenttransport vanaf de aangrenzende ondieptes naar de geul. De gevolgen van stormen zijn mogelijk ook onderschat.



Figuur 4-23 Doorstroomoppervlakte van de Boontjes in dwarsdoorsnede 8 (zie voor locatie de inzet in Figuur 4-22)



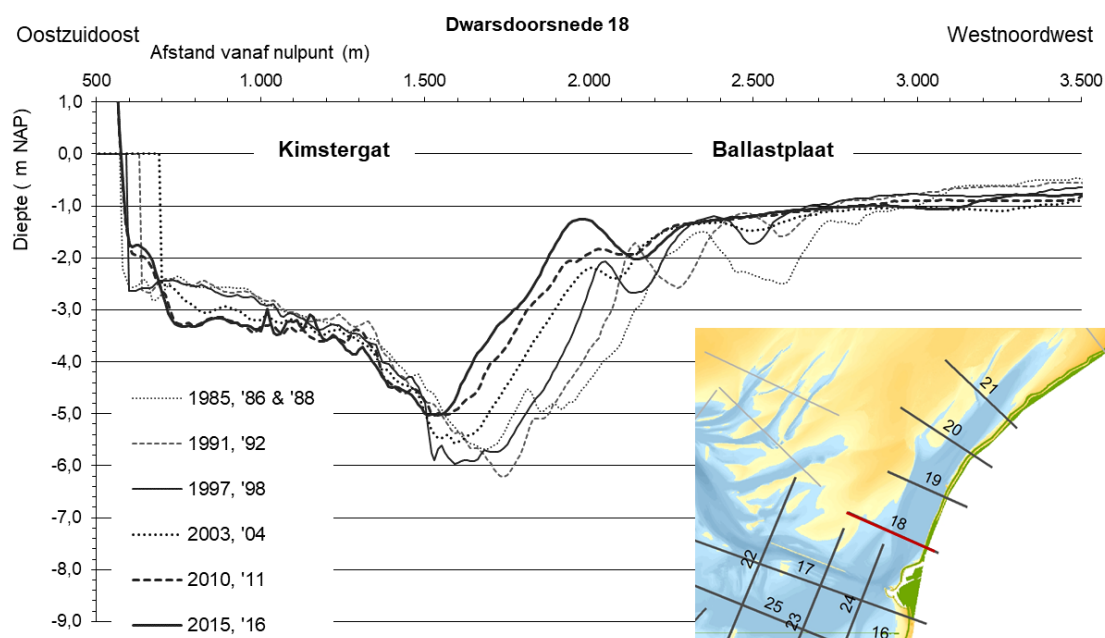
Figuur 4-24 Doorstroomoppervlakte van de Boontjes in dwarsdoorsnede 10 (zie voor locatie inzet in Figuur 4-22).

4.3.5 Kimstergat, baggeren en verspreiden bij Harlingen, Slibmotor Koehoal

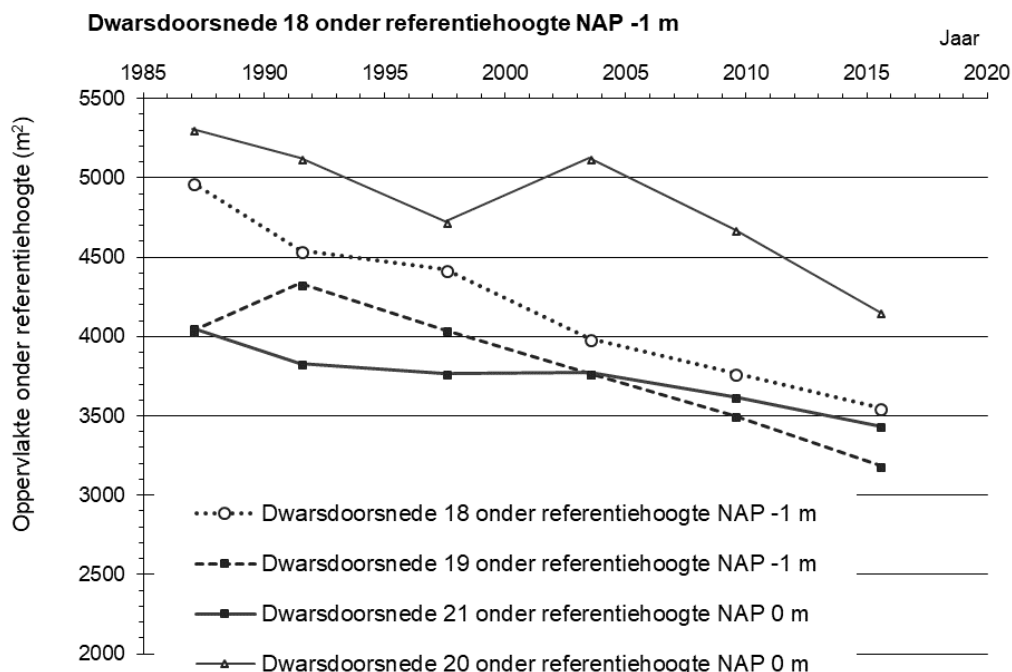
Ten noordoosten van Harlingen ligt de geul Kimstergat, vlak voor de dijk. Deze getijdegeul stond vroeger (via de destijds sublitorale Vlakte van Oosterbierum, Abt en het Vaarwater van de Zwarte Haan) in verbinding met het kombergingsgebied van Ameland. Tegenwoordig eindigt de geul in de getijdeplaat Vlakte van Oosterbierum. De omvang van het Kimstergat neemt al af sinds de afsluiting van de Afsluitdijk en gaat samen op met de afname van het kombergingsvolume in de Vlakte van Oosterbierum-Abt. De afname van de omvang van het

Kimstergat gaat gelijk op met de toename van het areaal van de Ballastplaat, zoals ook zichtbaar is in de dwarsdoorsnedes in Figuur 4-25. De Ballastplaat bouwt in deze dwarsdoorsnede uit naar het zuiden, waarbij het uitgebouwde deel nog onder het niveau van laagwater ligt.

Figuur 4-25 toont een dwarsdoorsnede van het Kimstergat, nabij Harlingen. In deze dwarsdoorsnede is duidelijk zichtbaar dat de omvang van de geul afneemt, doordat de ondiepte aan de westnoordwest zijde steeds verder uitbouwt. Deze afname is ook zichtbaar in de grafiek in Figuur 4-26, waarin de doorstroomoppervlakte van deze geul onder NAP -1m staat. In de grafiek zijn ook de doorstroomoppervlaktes van drie andere dwarsdoorsnedes van het Kimstergat getoond, die grotendeels vergelijkbare afnames vertonen. In sommige jaren is sprake van een tijdelijke toename van het doorstroomprofiel. De afname van de doorstroomoppervlaktes van de dwarsdoorsnedes 19 verloopt sinds 1992 vrijwel lineair. Extrapolatie van deze trend geeft een afname tot nul in respectievelijk 68 en 91 jaar.



Figuur 4-25 Dwarsdoorsnede 18 door het Kimstergat en de aangrenzende Ballastplaat (zie inzet voor locatie).

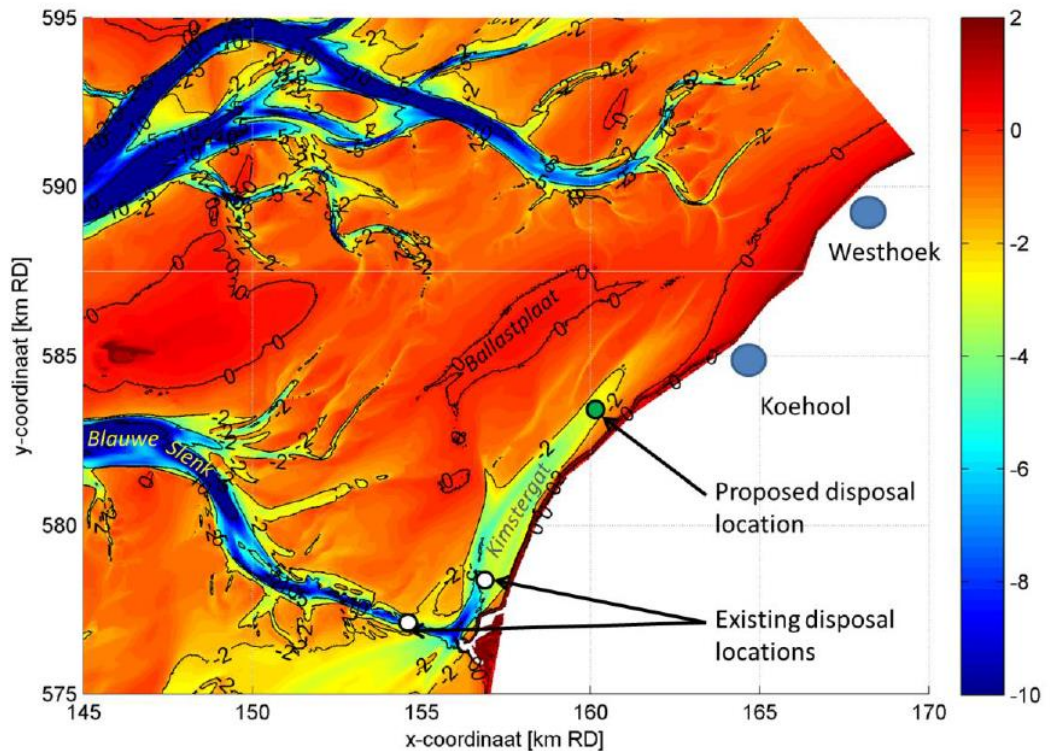


Figuur 4-26 De doorstroomoppervlaktes van het Kimstergat in dwarsdoorsnedes 18-21 (zie voor de locaties van de dwarsdoorsnedes de inzet in Figuur 4-25).⁷

Aan de westzijde van het Kimstergat ligt één van de twee reguliere verspreidingslocaties voor baggerspecie (Figuur 4-27). De andere reguliere verspreidingslocatie ligt ten oosten van de Pollendam. De sedimentatie en afname van de omvang van het Kimstergat betekent dat het lastiger zal worden om de baggerspecie daar te verspreiden. Dit heeft voornamelijk te maken met de bereikbaarheid voor 'kleppen' (lossen van de baggerspecie via de bodemluiken van het schip).

In de pilot Slibmotor Motor Koehoal is onderzocht of met het verspreiden van de baggerspecie uit de haven van Harlingen op een locatie verder naar het noordoosten in het Kimstergat de aangroei van kwelders wordt gestimuleerd en het baggerbezwaar in de haven beperkt. Ook zou sedimentatie op de vooroever een positief effect hebben op het voorland van de waterkering. Als onderdeel van de proef is in de winter van 2016 300.000 m³ verspreid op de alternatieve verspreidingslocatie (Figuur 4-27) en in de daaropvolgende winter van 2017 170.000 m³. De definitieve resultaten van de pilot zijn nog niet beschikbaar. Meer informatie: <https://www.ecoshape.org/nl/projecten/slibmotor-haven-van-harlingen/>.

⁷ Bij de twee dwarsdoorsnedes aan de noordoostzijde van het Kimstergat is de doorstroomoppervlakte onder NAP 0 m bepaald, omdat de oppervlakte onder NAP -1 m heel klein is en de grootste afname hoger in het profiel optreedt.



Figuur 4-27 Kaart omgeving Kimstergat, met de verspreidingslocaties voor baggerspecie (existing disposal locations) en verspreidingslocatie voor de pilot (Proposed disposal location), uit Vroom et al., 2017.

De oorzaak van de sedimentatie in het Kimstergat en op de Vlakte van Oosterbierum heeft wel een relatie met het baggeren in de haven van Harlingen en het verspreiden van de baggerspecie, maar wordt er niet door veroorzaakt. De sedimentatie is onderdeel van de zeer langjarige aanpassingen die plaatsvinden in de westelijke Waddenzee na de afsluiting van de Zuiderzee. De sedimentatie in dit gebied lijkt voornamelijk uit slib te bestaan. Dezelfde processen leiden ook tot de sedimentatie van slib (en een beetje zand) in de haven van Harlingen.

5 Permanent onder water liggende (sublitorale) platen

5.1 Inleiding

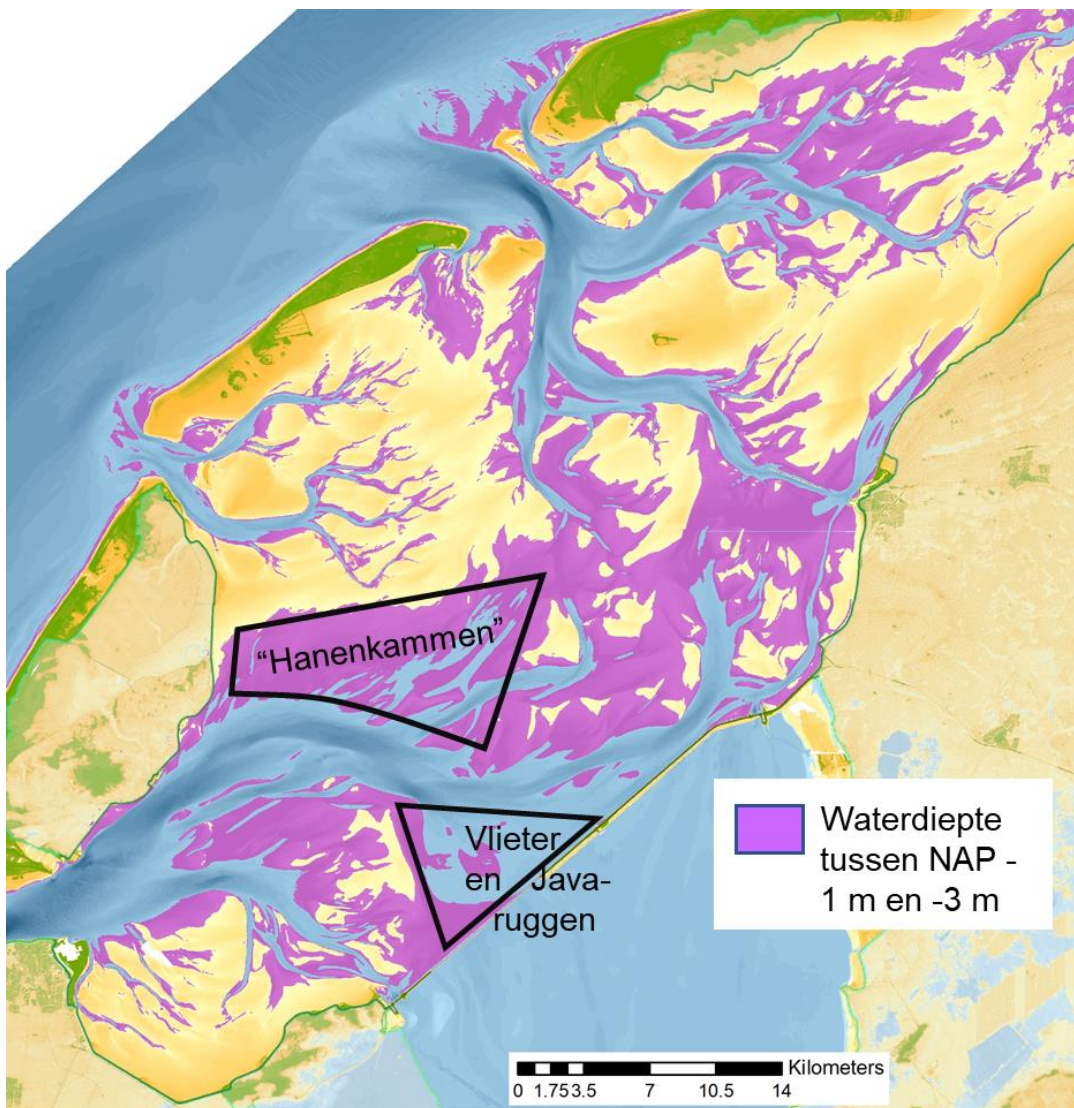
Permanent onder water liggende platen of sublitorale platen zijn een mesoschaal-element, dat in de Westelijke Waddenzee relatief veel aanwezig is, zeker in vergelijking met de Oostelijke Waddenzee. We komen tot 51% (kombergingsgebied Marsdiep), respectievelijk 30% (kombergingsgebied Vlie) van de oppervlakte (Tabel 5-1).

Tabel 5-1 Relatieve arealen in de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie (gebaseerd op Nederhoff et al., 2017 en Oost et al., 2017).

	Marsdiep	Vlie
Wadplaat en kwelder (boven NAP -1 m)	15%	52%
Getijdegeul (onder -3m NAP)	34%	18%
Permanent onder water liggende (sublitorale) platen	51%	30%

De getallen in Tabel 5-1 zijn bepaald door het gebied onder de laagwaterlijn onder te verdelen in een dieper geul deel en een ondieper sublitoraal deel. In de kaart in Figuur 5.1 zijn deze sublitorale gebieden gemarkeerd in paars. De overgang van geul naar sublitoraal is op basis een knikpunt in de hypsometrische curve van het Marsdiep vastgesteld op NAP -3 m. Dit is een eerste inschatting. In Figuur 5-1 zijn ook twee deelgebieden aangegeven die in de volgende paragrafen worden beschreven. Beide gebieden omvatten niet alleen paarse delen met een diepte tussen NAP -1 en -3 m, maar ook diepere delen. En bij de gehanteerde begrenzing worden ook alle delen van de getijdegeulen in dit diepte bereik tot het areaal sublitoraal gerekend. Een betere bepaling vraagt echter om scherper omschreven definities van getijdegeul en sublitoraal en deze zijn (nog) niet beschikbaar.

Er bestaat nog geen uitgebreide morfologische beschrijving van deze platen in de literatuur. Daarom wordt begonnen met een overzicht van de kenmerken. De sublitorale platen hebben verschillende bodemvormen en we bespreken de twee die aanwezig zijn in de gebieden 'Vlieter en Javaruggen' en 'Hankenammen'.

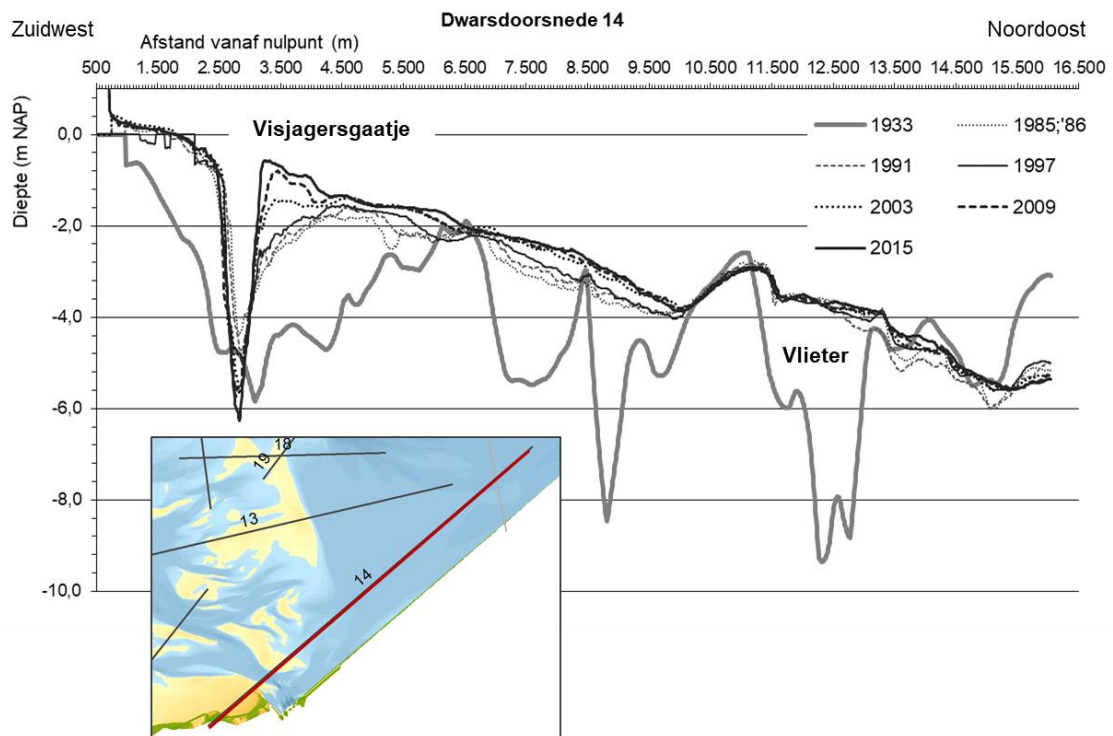


Figuur 5-1 Het areaal tussen NAP -1 en -3 m en de twee sublitorale gebieden in het kombergingsgebied Marsdiep waarop in de tekst nader op in wordt gegaan.

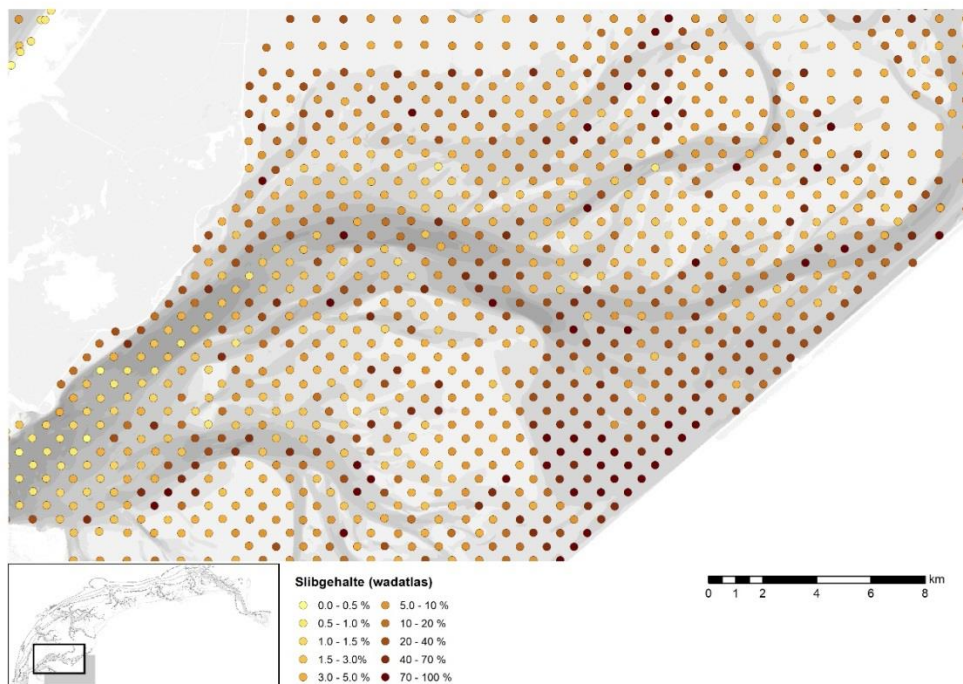
5.2 Vlieter en Javaruggen

De Vlieter en Jaap Vaars-ruggen (Javaruggen) waren tot voor de aanleg van de Afsluitdijk belangrijke geulsystemen die de drainage verzorgden voor 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 5-2).

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. Dit wijst erop dat de stroomsnelheden laag zijn. Dit past bij wat in de literatuur 'abandoned channels' (verlaten geulen) heet.



Figuur 5-2 Dwarsdoorsnede 14 door het Visjagersgaatje en de Vlieter (zie inzet voor locatie).



Figuur 5-3 Kaart met de slibpercentages uit de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998).

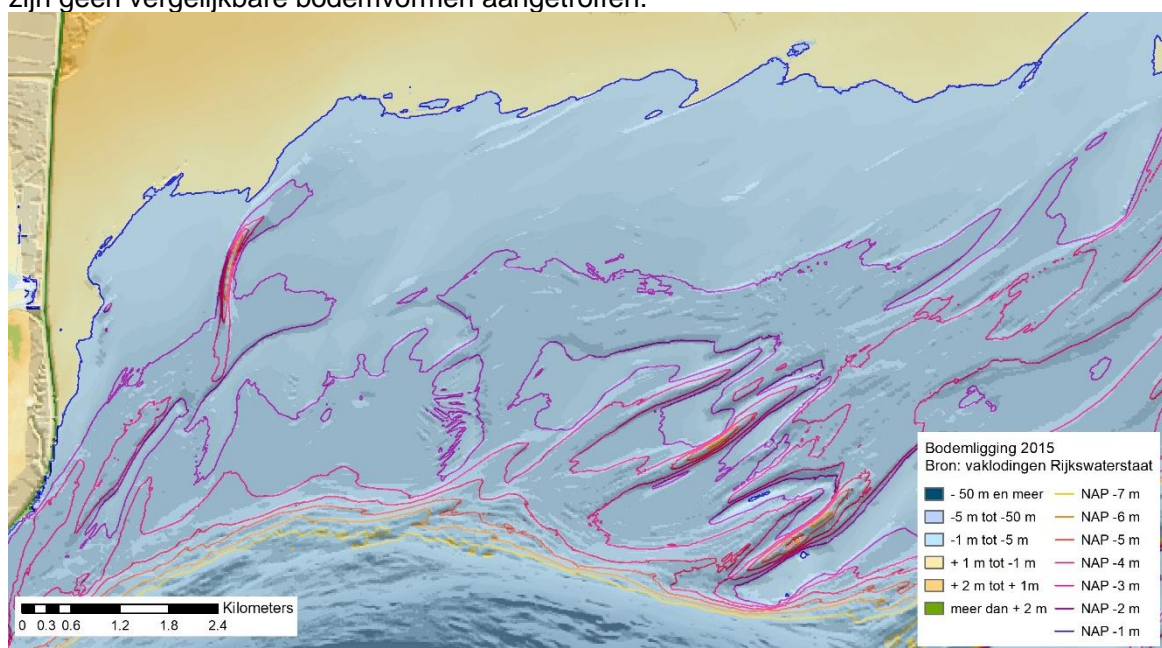
5.3 Sublitoraal met “Hankenammen”

Dit gebied ligt ten zuiden van de wadplaat Vlake van de Kerken en ten noorden van de geul Doove balg (Figuur 5-1). 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

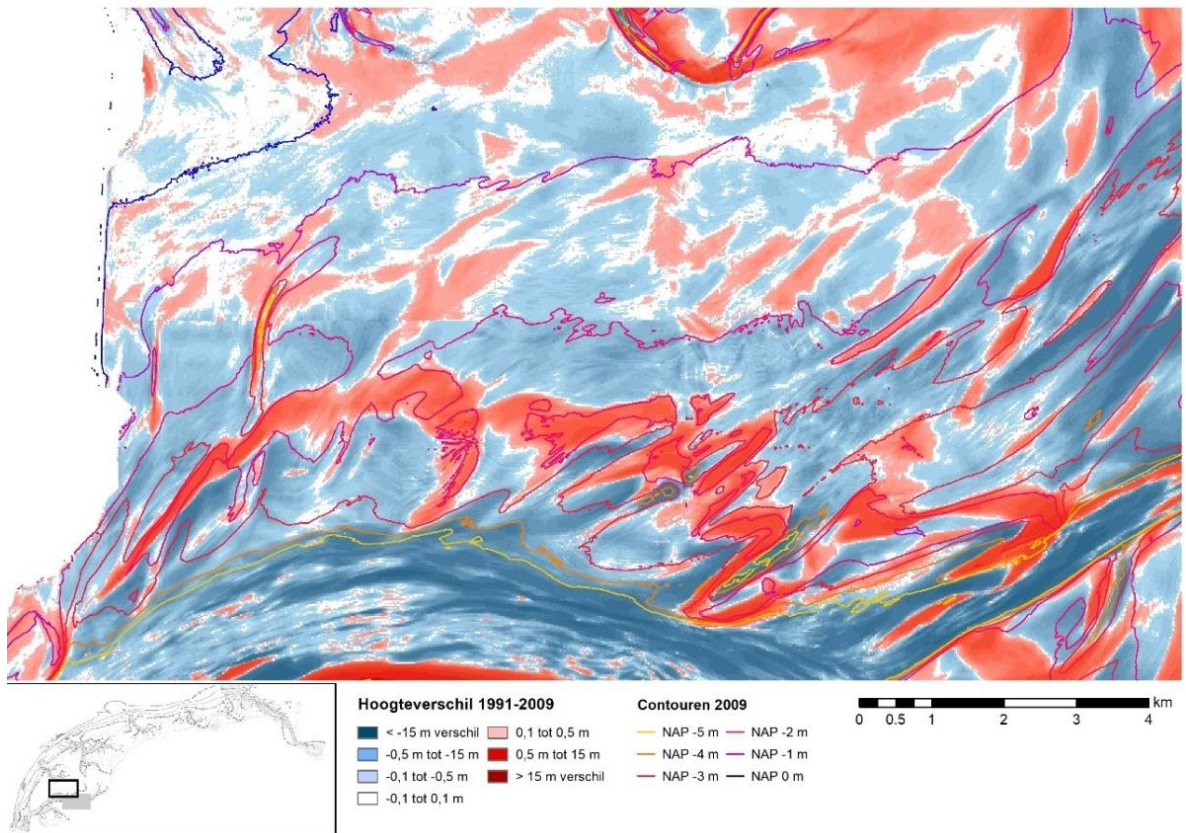
km lang die een lichte verhoging van 0,5 m vormen boven het oppervlak en die zichtbaar zijn in Figuur 5-4. In de kaart met het hoogteverschil tussen de vakloding zijn de paraboolachtige vormen nog duidelijker zichtbaar. Dat deze vormen in de verschilkaart zichtbaar zijn, komt omdat ze verplaatsen. In de dwarsdoorsnede in Figuur 5-6 is dat duidelijk zichtbaar. Uit de dwarsdoorsnede is af te leiden dat de bodemvormen niet alleen uit een bank (verhoging) bestaan, maar dat ervoor ook een verdieping aanwezig is. Beide verplaatsen naar het oostnoordoosten, waarbij de ondiepte 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 verplaatsingssnelheid 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 5-6 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 verder migratie hoger op de plaat geleidelijk.

“Hanenkammen” verwijst naar de kenmerkende vorm. Het gebied van de Hanenkammen is vrij zandrijk (Figuur 5-3). In combinatie met de aanwezigheid van de bodemvormen wijst dit op grotere bodemschuifspanningen. Het is niet duidelijk welk aandeel getijdestroming 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 Kimstergat naar Ballastplaat in Figuur 4-25 en let daarbij op het verschil in de afstand waarover de verandering van diep naar ondiep water optreedt).

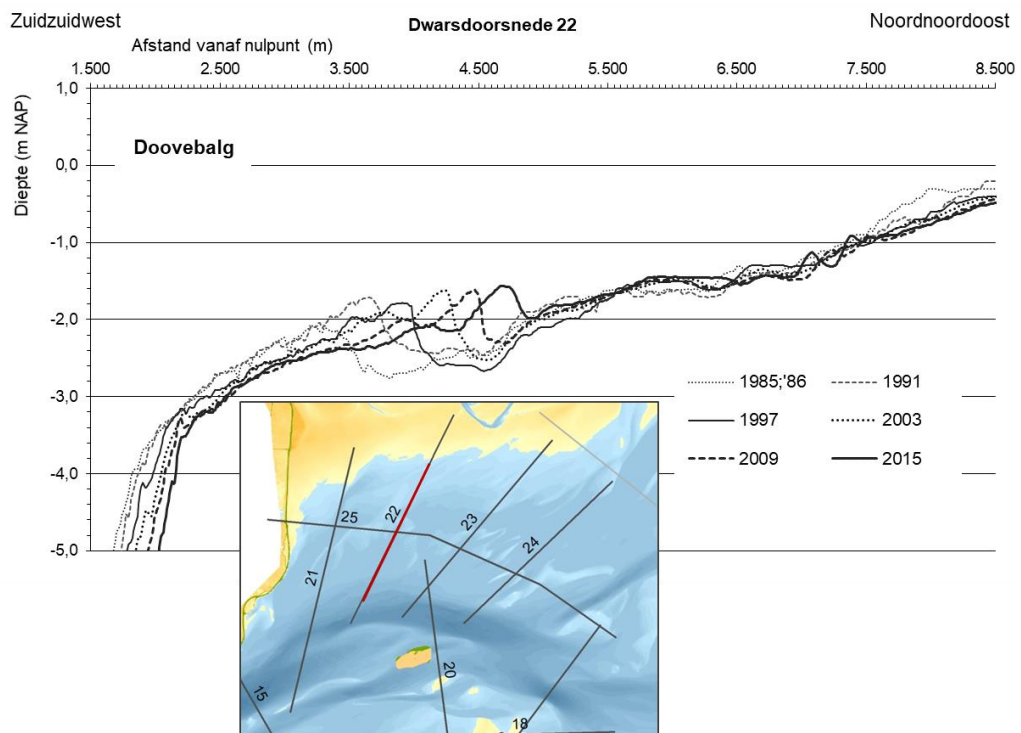
De Hanenkammen zijn dus een nog onverklaarde bodemvorm. Nadere bestudering van bodemkaarten en verschilkaarten leert dat vergelijkbare bodemvormen aanwezig zijn bij de Bollen, tussen Texelstroom en Malzwin. De dwarsdoorsnede in Figuur 5-7 laat zo'n “Hanenkam” zien, met vergelijkbare vorm, maar hogere hoogste delen dan bij de Vlakte van de Kerken. Ook de verplaatsing is bij de Bollen kleiner. In andere delen van het waddengebied zijn geen vergelijkbare bodemvormen aangetroffen.



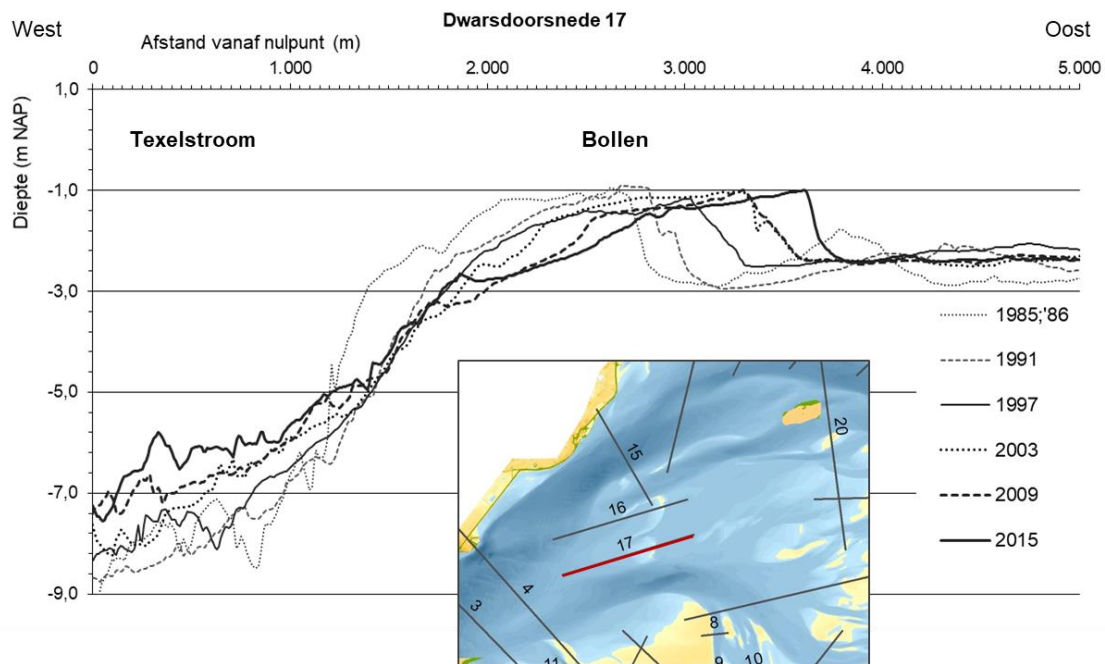
Figuur 5-4 Kaart van sublitoraal in de omgeving van Vlakte van de Kerken.



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



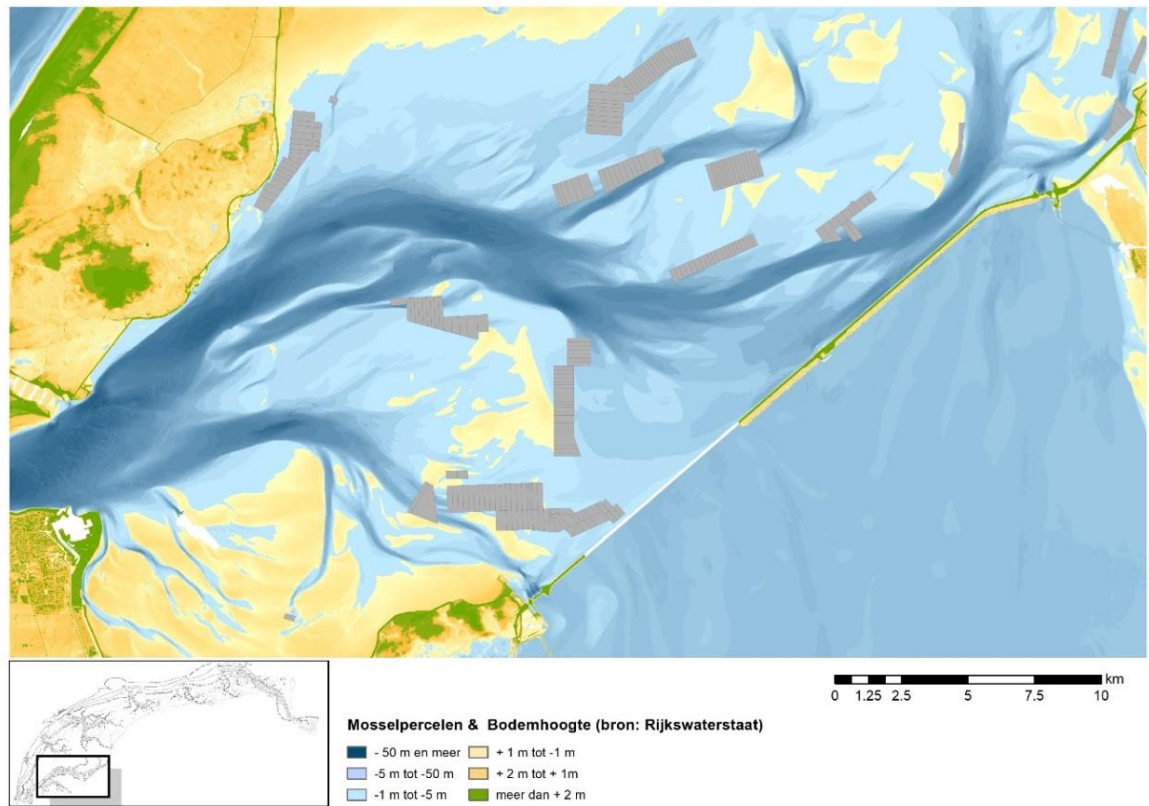
Figuur 5-6 Dwarsdoorsnede 22 in het sublitoraal bij de Vlakte van de Kerken, locatie in inzet.



Figuur 5-7 Dwarsdoorsnede 17 in sublitoraal ten oosten van het zeegat van het Marsdiep (zie inzet voor locatie).

5.4 Beleid en beheer

Er is geen beleid en beheer dat specifiek is gericht op permanent onder water liggende platen. Onder het gebruik van de gebieden vallen mosselkweek, mosselzaad-Invanginstallaties en (garnalen)-visserij. De mosselpercelen zijn aangegeven in Figuur 5-8, waarbij opvalt dat deze voornamelijk in de meer dynamische gebieden nabij de geulen liggen. De hanenkammen zijn niet in gebruik als mosselperceel, mogelijk vanwege de dynamiek van deze gebieden. Het belang voor specifieke natuurwaarden, waarbij gedacht zou kunnen worden aan foerageren door duikeenden of rusten door eenden is niet bekend.



Figuur 5-8 Kaart met de mosselpercelen (grijs) in het kombergingsgebied Marsdiep.

6 Wadplaten

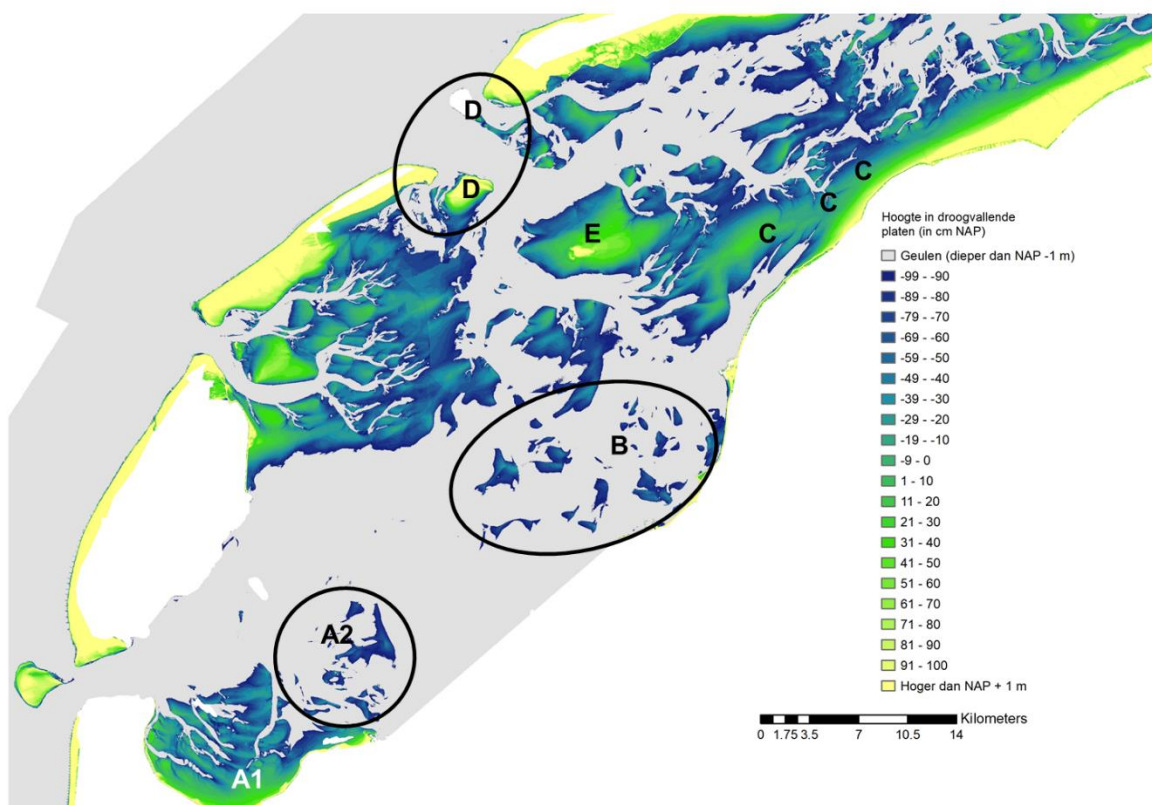
6.1 Kenmerken, gebruiksfuncties en belangrijkste gebieden

Wadplaten zijn de gebieden met een hoogte tussen laag- en hoogwater. Door hun hoogteligging vallen de wadplaten tijdens laagwater vrijwel geheel droog. Alleen op de diepere delen van de wadplaten, die niet direct afwateren op de geulen, kan een laagje water blijven staan tijdens laagwater.

Voor de beschrijving van de wadplaten is een onderscheid naar verschillende gebieden zinvol, zie Figuur 6-1:

- A. Het Balgzand (A1) en de Lutjeswaard (A2) (paragraaf 6.3);
- B. De dynamische platen ten zuiden van de Pollendam (paragraaf 6.4);
- C. De plaatgebieden voor het Friese vasteland (paragraaf 6.5);
- D. De vloedgetijde delta van het Vlie (paragraaf 6.6)
- E. Griend en de Grienderwaard (paragraaf 6.7).

Voordat deze gebieden worden behandeld wordt eerst het beeld over de gehele kombergingsgebieden besproken.



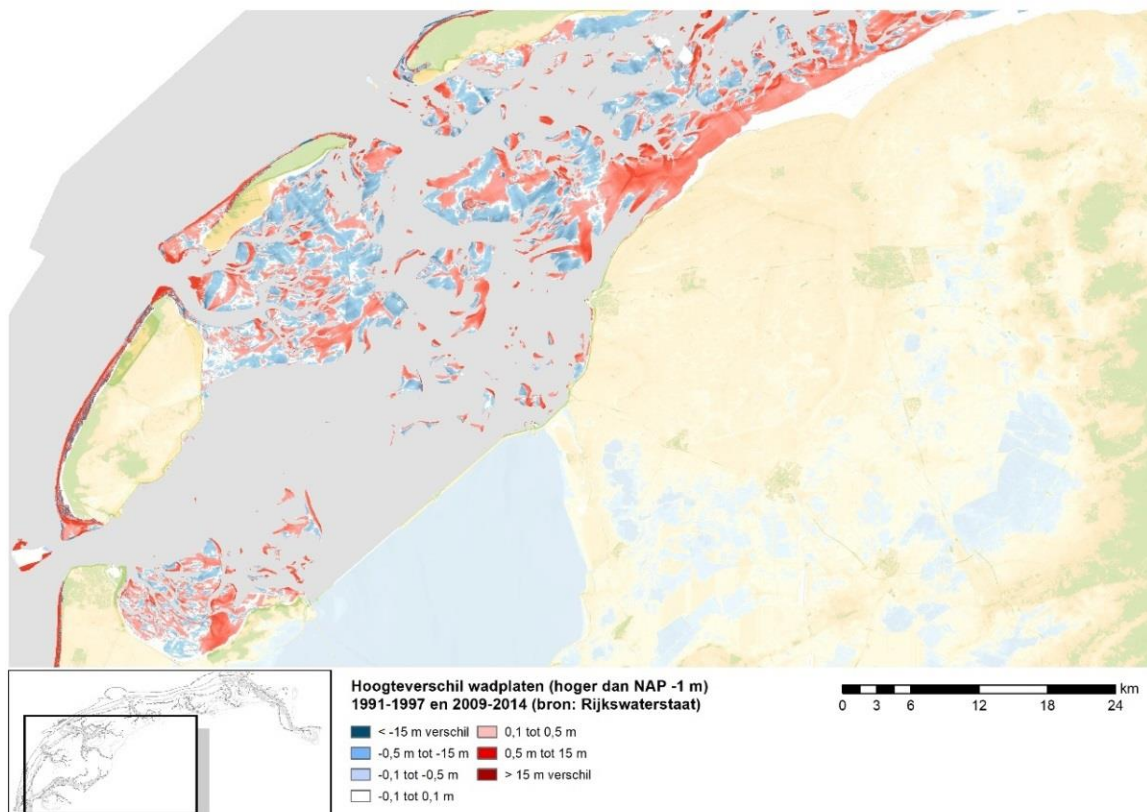
Figuur 6-1 Bodemliggingen ten zuiden van Ameland (2011), waarbij de hoogteschaal voor de platen flink is opgerekt, waardoor hoogteverschillen duidelijk zichtbaar zijn.

Uit Figuur 6-1 is ook af te leiden dat wadplaten een veel grotere variatie in hoogte vertonen dan wordt verondersteld op basis van overzichtskaarten.

6.2 Ontwikkelingen over de gehele kombergingsgebieden

Figuur 6-2 laat zien dat alleen het Balgzandgebied en de Vlakte van de Kerken aaneengesloten gebieden van droogvallende platen vormen in het kombergingsgebied Marsdiep. Verder zijn er clusters van kleinere plaatgebieden zichtbaar. In het kombergingsgebied Vlie zijn veel omvangrijkere wadplaten zichtbaar.

Figuur 6-2 toont ook de verschillen in verandering in hoogte, zowel in gebieden met voornamelijk sedimentatie (rood), als in gebieden met voornamelijk erosie (blauw). Een aantal van deze veranderingen worden behandeld in de paragrafen 6.3 tot en met 6.7.



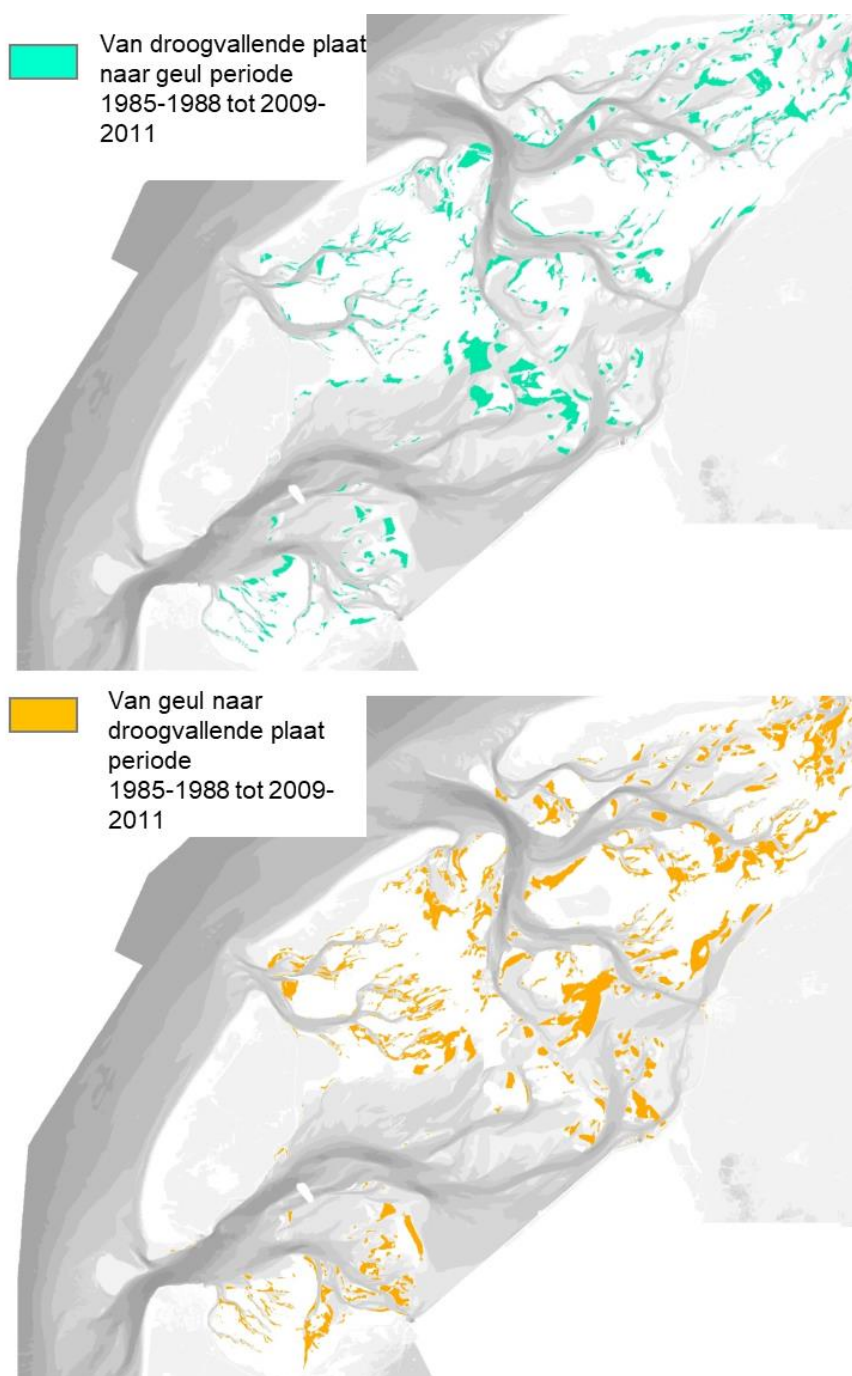
Figuur 6-2 Verschilkaart van de hoogteligging in een periode van 18 jaar (vaklodgingen van 2009-2010-2011 vergeleken met 1991-1992-1993). Rood: sedimentatie; Blauw: erosie. Grijs: dieper dan NAP -1m in één of beide vaklodgingen.

Naast hoogteverandering vindt er ook toe- en afname plaats van het areaal. Figuur 6-3 laat in twee kaarten zien welke delen van het kombergingsgebied in de periode 1985-1988 droogvallende plaat waren, maar in de periode 2009-2011 niet, en omgekeerd (dus delen die in 2009-2011 droogvallend waren, maar in de periode 1985-1988 nog niet). De grootste veranderingen vinden plaats in de omgeving van de wantijzone tussen de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Bij de Vlakte van Oosterbierum ontstaat duidelijk meer droogvallend gebied. Andere plekken hebben meer balans in verdwijnen en verschijnen van platen.

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 lokaal ook erosie en verlaging platen plaats. Voor kabels en leidingen zijn de trendmatige veranderingen in de hoogte van de wadplaten rond het wantij van bijzonder belang.



Figuur 6-3 Kaarten met de delen die in 1985-1988 nog droogvallende plaat waren, maar in 2009-2011 niet meer (boven) en delen die in 1986-1988 geen droogvallende plaat waren, maar wel in 2009-2011 (onder).

De hoogte- en areaalontwikkeling van wadplaten hebben aandacht in verband met de relatieve stijging van de zeespiegel. Tot nu toe zijn de wadplaten in staat zijn om mee te groeien met de zeespiegel (Oost et al., 1999, Van der Spek, 2018).

6.3 Het stabiele Balgzand en de dynamische Lutjeswaard

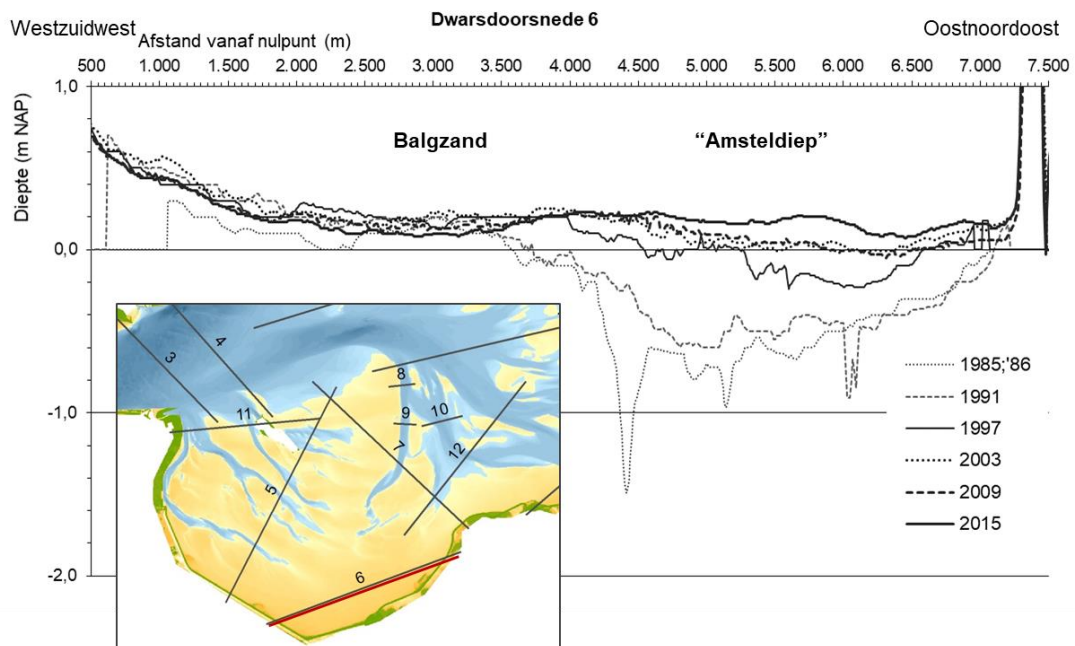
Deze plaatgebieden liggen aan de zuidwestzijde van het kombergingsgebied Marsdiep (Figuur 6-4). Ze worden gescheiden door de geulen Wierbalg en Visjagersgaatje. De morfologische ontwikkelingen van de twee gebieden verschillen, zoals hieronder uiteen wordt gezet.

Balgzand

Het overgrote deel van de Ballastplaat is een stabiel plaatgebied, met een min of meer vergelijkbare hoogte, dezelfde geulen die slechts beperkt zijn gemigreerd en vrijwel dezelfde buitencontour. Dat blijkt ook na het bekijken van de historische kaart in Figuur 4-8, waarop de recente contouren zijn weergegeven. De uitzondering is de hoek aan de noordwestzijde van het voormalige eiland Wieringen (1 in Figuur 6-4), 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 6-4. Figuur 6-5 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 de Ballastplaat blijkt pas echt als deze wordt vergeleken met de naastgelegen Lutjeswaard.



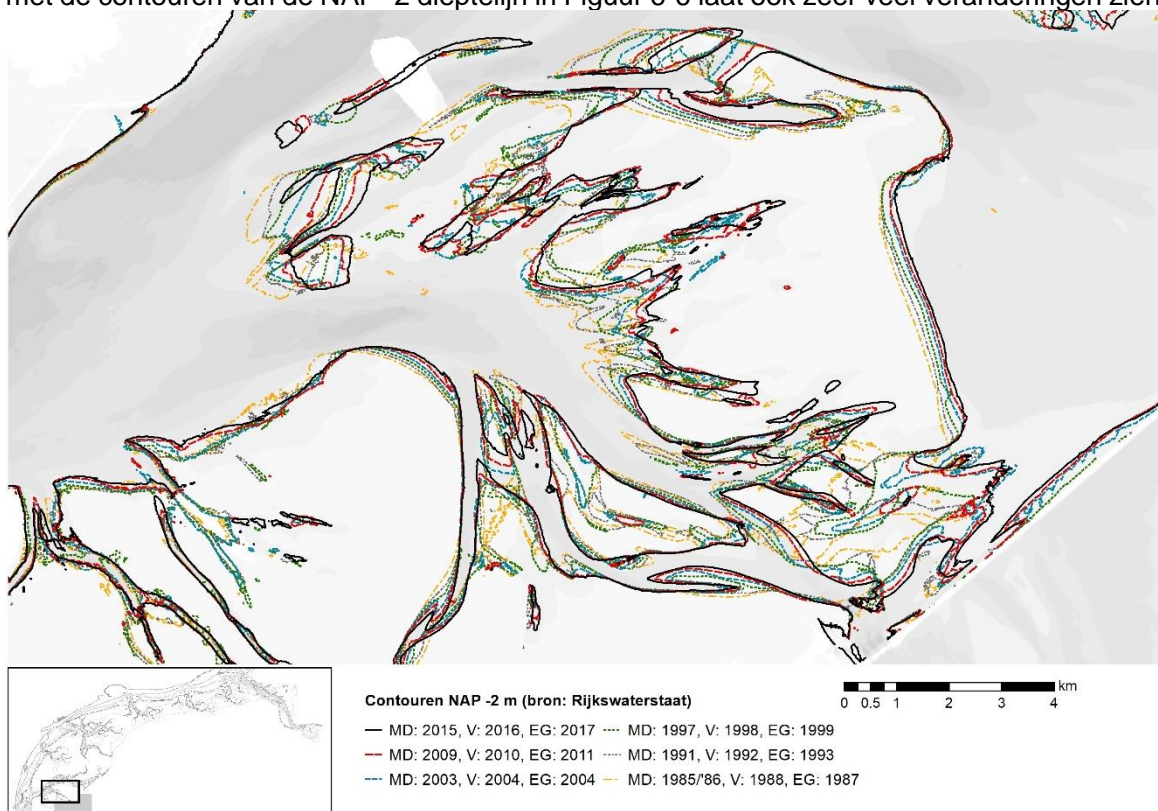
Figuur 6-4 Kaart van het Balgzand en Lutjeswaard



Figuur 6-5 Dwarsdoorsnede 6 aan de zuidzijde van het Balgzand (locatie in inzet).

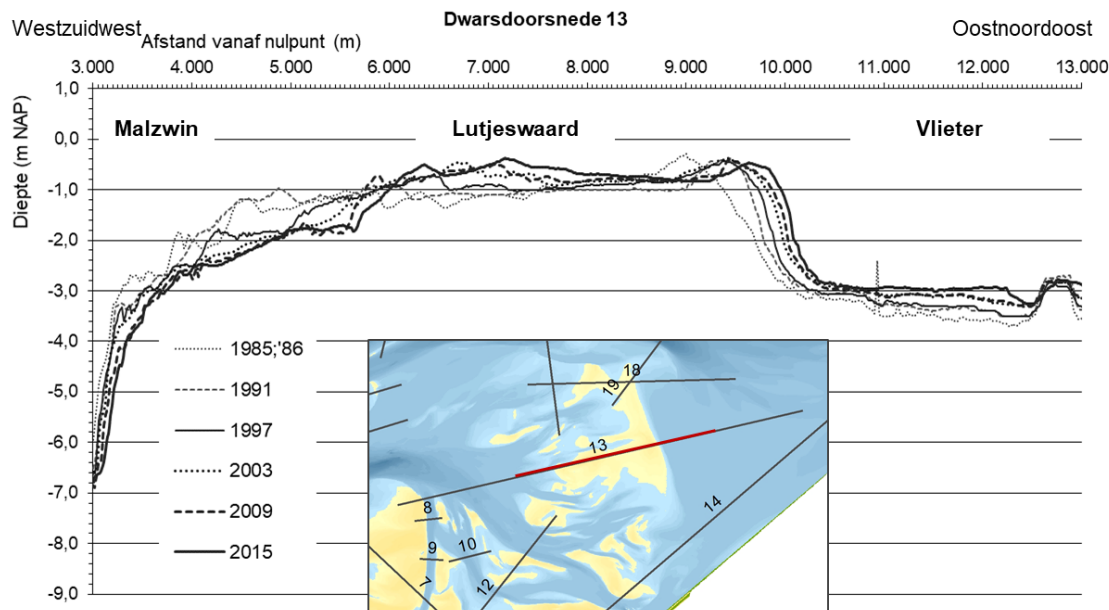
Lutjeswaard

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



Figuur 6-6 Kaart met de NAP -2 m contour in het Lutjeswaard gebied.

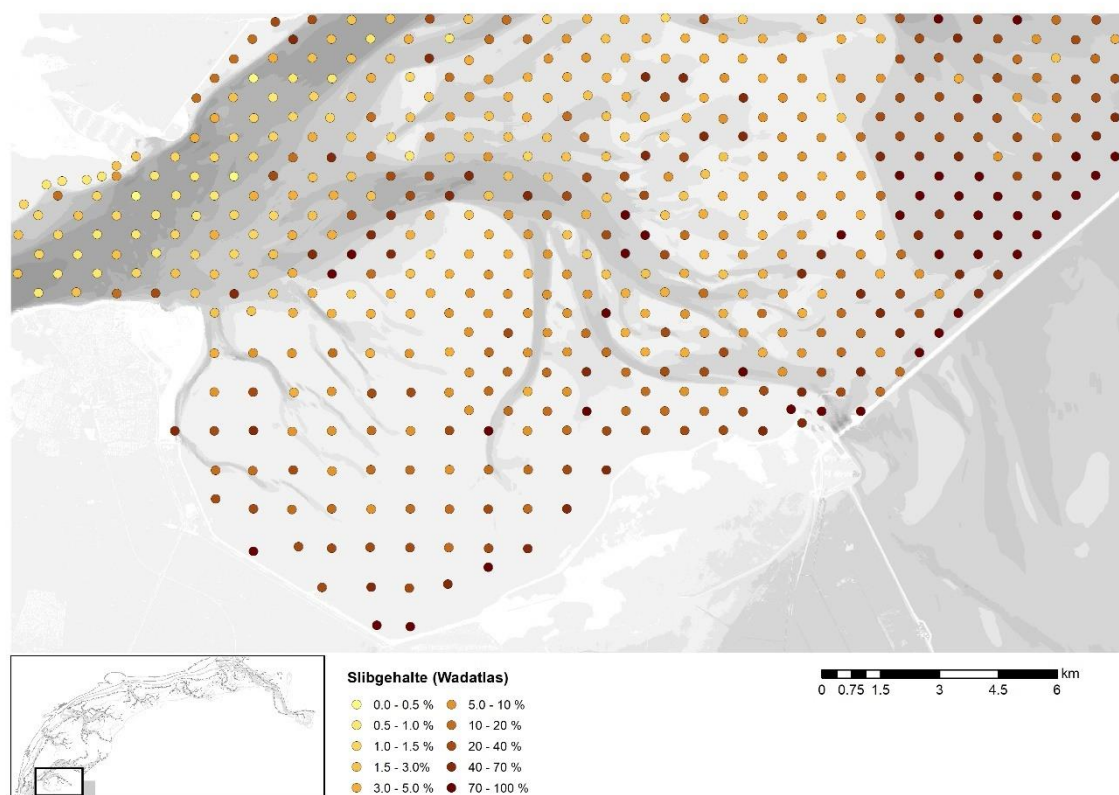
Deze dieptelijntoon niet zozeer de begrenzing van de droogvallende platen, als wel de verplaatsing van de geulen die de platen begrenzen. Veel van deze contouren laten een structurele verplaatsing naar het oosten laten zien. Deze oostwaartse verplaatsing is duidelijk zichtbaar in de dwarsdoorsnede 13 in Figuur 6-7. Deze structurele verplaatsing van de plaalementen van de Lutjeswaard naar het oosten is geen ontwikkeling die zich overal in het waddegebied voordoet, maar hij wordt wel aangetroffen bij de platen bij de Pollendam (zie paragraaf 67).



Figuur 6-7 Dwarsdoorsnede 13 door de Lutjeswaard (locatie in inzet).

Het Balgzand wordt in vergelijking met de Lutjeswaard meer afgeschermd van de golven vanuit het zeegat. Dit is een mogelijke verklaring voor het verschil in ontwikkeling. De spuisluzen bij den Oever liggen voor beide gebieden even nabij. Dat maakt het moeilijk voorstelbaar dat (het verschil in) de dynamiek is gerelateerd aan het spuien van zoetwater.

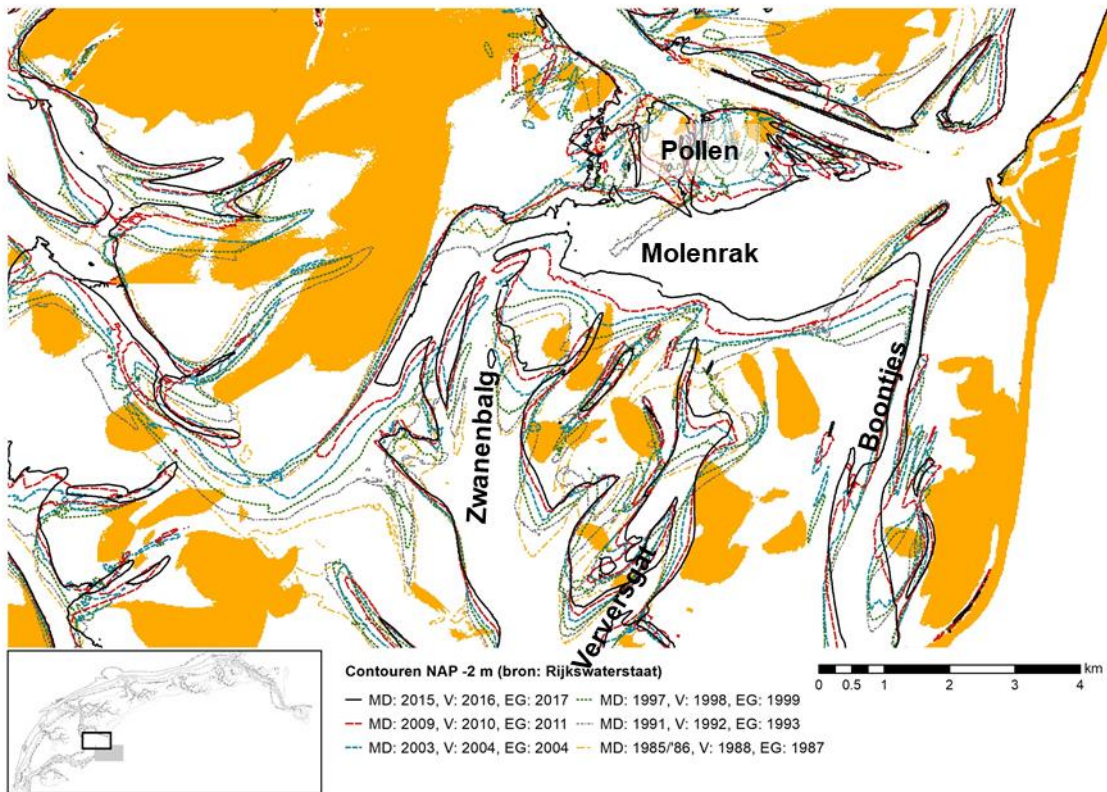
Figuur 6-8 toont een kaart met de slibpercentages uit de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998). Het is niet mogelijk om objectief vast te stellen of in de omgeving van het Balgzand en de Lutjeswaard meer zand aanwezig is dan vroeger. Onderling vergelijkbare metingen van de Sedimentatlas korrelgrootteverdelingen 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 de geobserveerde veranderingen in de sedimentsamenstelling.



Figuur 6-8 Kaart met de slibpercentages van het Balgzand en de Lutjeswaard uit de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998).

6.4 Dynamische platen ten zuiden en zuidwesten van de Pollendam

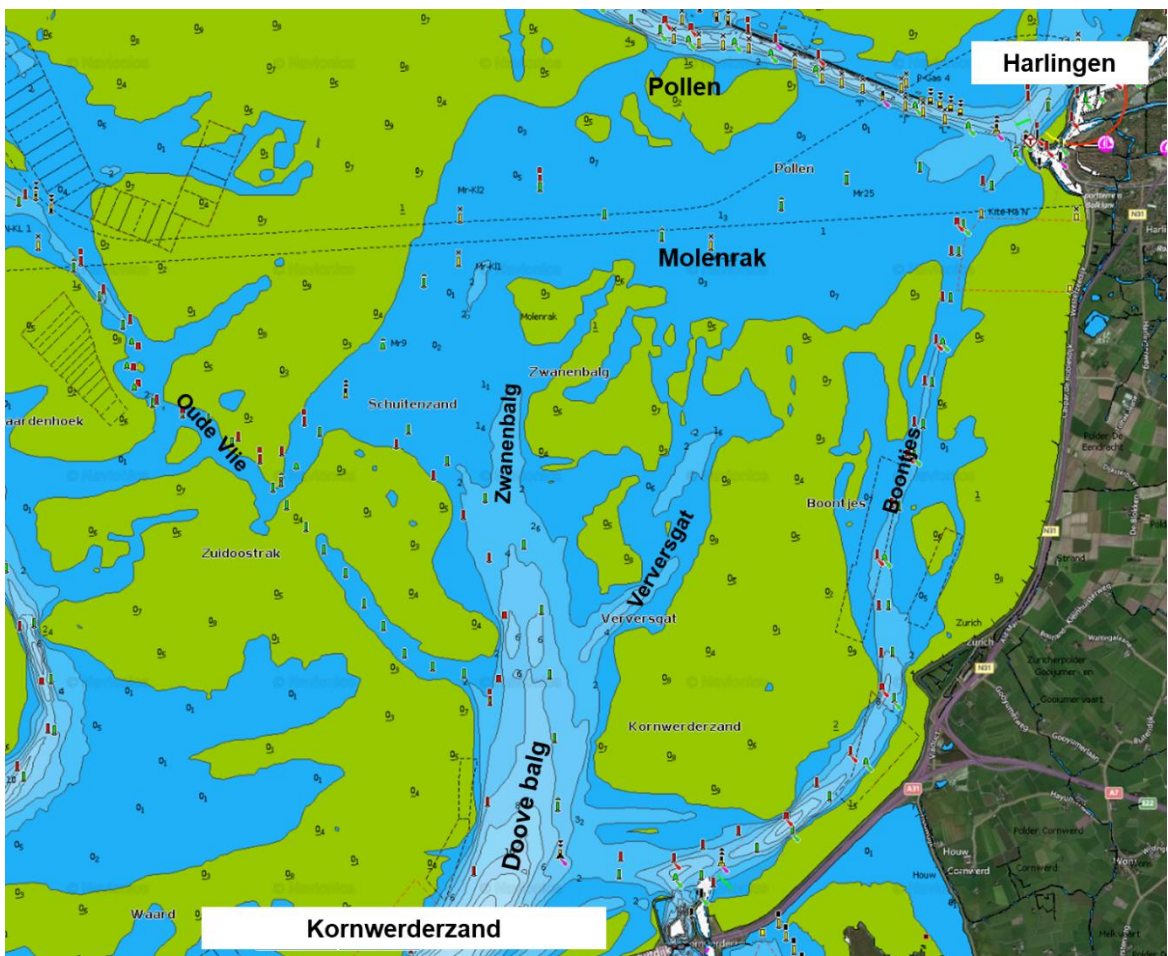
In het gebied ten zuiden en zuidwesten van de Pollendam zijn enkele kleinere droogvallende platen aanwezig en is relatief veel ondiep water. De ligging van de kleine droogvallende platen in het gebied verschilt sterk van vakloding op vakloding. In de kaart met de contouren van de NAP -2 m in Figuur 6-9, waarin ook de wadplaten uit een van de vaklodingen 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 westen van de Pollendam.



Figuur 6-9 Kaart met de droogvallende platen (oranje in 2009 (Marsdiep) en 2010 (Vlie)) en de NAP -2 m contour in de omgeving ten zuiden en zuidwesten van de Pollendam

In de geulen ten zuiden van de Pollen (Verversgat en de Zwanenbalg) zijn wel trendmatige veranderingen zichtbaar (zie de contouren in Figuur 6-9). 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-Terschelling (Figuur 6-10). Voor de scheepvaart betekenen de veranderingen dat de betonde routes steeds aangepast dienen te worden.



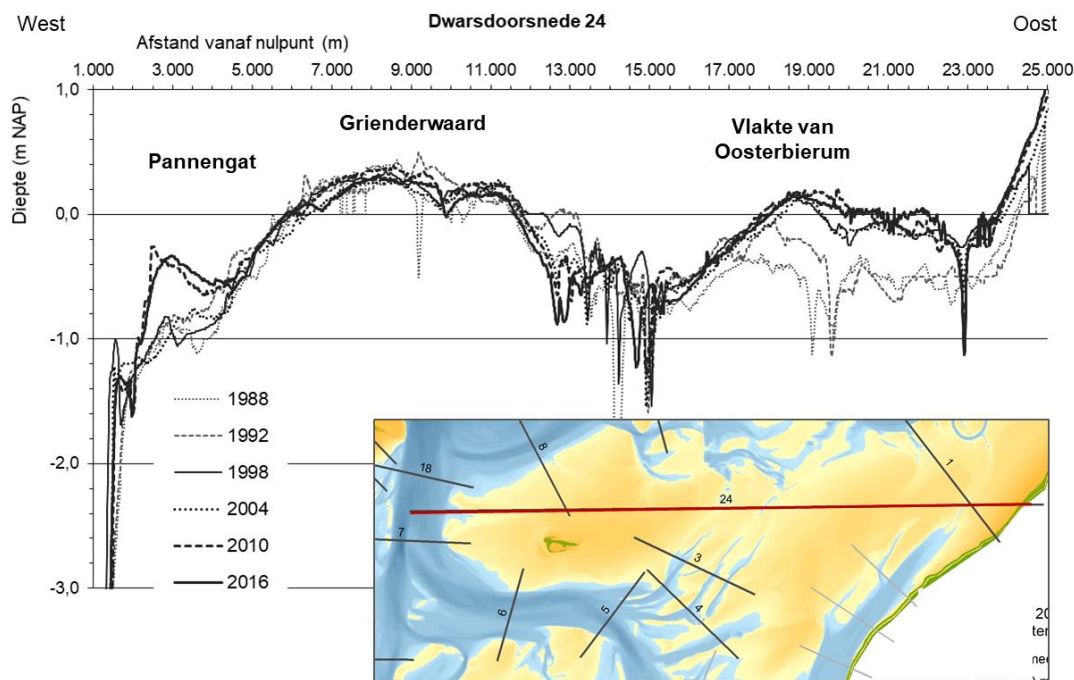
Figuur 6-10 Nautische kaart van de omgeving ten zuiden en zuidwesten van de Pollendam, met de tonnen in rood en groen (bron: Navionics.com).

6.5 Het plaatgebied voor het Friese vasteland

Voor de Friese vastelandskust ligt tegenwoordig ten oosten van de Slachtedyk (ongeveer 9 km langs de Waddenzeedijk ten oosten van Harlingen) een aangesloten droogvallende plaat. Dit plaatgebied loopt door tot over het wantij en eindigt bij de vaargeul naar Ameland, in het kombergingsgebied Borndiep. Dit plaatgebied is sinds de aanleg van de Afsluitdijk ontstaan, de oppervlakte is sterk uitgebreid en de hoogte is toegenomen. Figuur 6-2 toont dat het hele gebied in de Waddenzee, zeewaarts van het Friese vasteland een aangesloten sedimentatiegebied is. Uit Figuur 6-3 blijkt dat in deze omgeving vooral plaatgebied is, evenals uit de dwarsdoorsnede in Figuur 6-11. Die dwarsdoorsnede laat ook zien dat de hoogte van de Vlake van Oosterbierum in de jaren '80 en begin jaren '90 nog rond de -0,5 m NAP lag. Eind jaren '90 ligt de hoogte rond de 0 m NAP zien. Dat is ook de waarde waaromheen de hoogte in de jaren daarna schommelt. Langer geleden was de Vlake van Oosterbierum sublitoraal (zie de afwezigheid van droogvallende platen daar in Figuur 4-9). De oorzaak van de sedimentatie in dit gebied ligt waarschijnlijk in de gewijzigde stromingspatronen na de afsluiting van de Zuiderzee.

Samengaande en waarschijnlijk ook samenhangend met deze hoogtetoename van de platen is er ook een netto uitbreiding van de kwelders voor de Waddenzeedijk. Merk op dat uit metingen van het Slibmotor Koehoal project bleek dat lokaal er tijdelijk ook afname van het kwelderareaal kan plaatsvinden.

De sedimentatie bij de Vlakte van Oosterbierum gaat ook gelijk op met de afname van de omvang van het Kimstergat (zie 4.3.5). Het getijsprisma van het Kimstergat wordt gevormd door de Vlakte van Oosterbierum. Als deze Vlakte sedimenteert betekent dat een afname van het getijsprisma en gaat de aanvoerende geul verkleinen.



Figuur 6-11 Dwarsdoorsnede 1 over de Vlakte van Oosterbierum en de Grienderwaard (locatie in inzet).

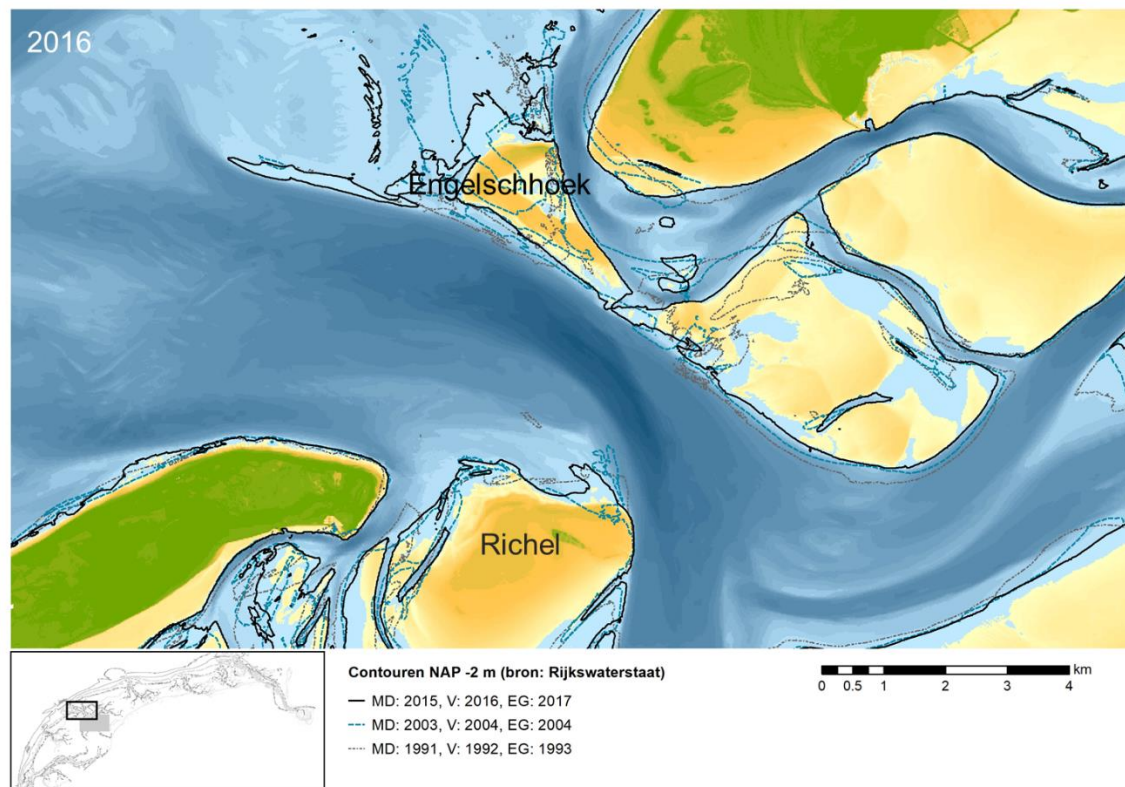
6.6 De vloedgetijde delta van het Vlie met Richel en de Engelschhoek

Om de Richel en de Engelschhoek te beschrijven helpt een blik op de oostkust van de Verenigde Staten, bijvoorbeeld in Hayes (1980). In de 'back-barrier basins' daar zijn 'flood-tidal delta's' herkenbare elementen (waarin geulen eindigen in platen en ondieptes, die vloedschilden vormen). Dit zijn de tegenhangers van de 'ebb-tidal deltas', oftewel buitendelta's. In het kombergingsrapport Borndiep (Cleveringa & Oost, 2017) is dit beschreven voor het Zeegat van Ameland en is geconstateerd dat de hoge platen in dat kombergingsgebied het Waddenzee-equivalent van de 'flood-tidal delta' zijn.

Ook in het kombergingsgebied Vlie is sprake van de aanwezigheid van hogere platen in de nabijheid van het zeegat, die een 'flood-tidal delta' vormen. Van deze platen zijn er tegenwoordig enkele die vrijwel altijd boven het niveau van hoogwater liggen, namelijk Richel (ten zuiden van de hoofdgeul) en de Engelschhoek-Jacobsruggen (aan de noordoostzijde van het zeegat), zie ook Figuur 6-12. De Engelschhoek-Jacobsruggen zijn een relatief jonge ontwikkeling, pas zichtbaar in de vaklodingen van 2010. Daarvoor was de Engelschhoek een zandbank die niet droogvalt. Het droogvallende deel van de Jacobsruggen lag verder naar het zuidwesten. Een beschrijving van de ontwikkeling van de Engelschhoek-Jacobsruggen kan worden gevonden in van Til & Cleveringa, 2018.

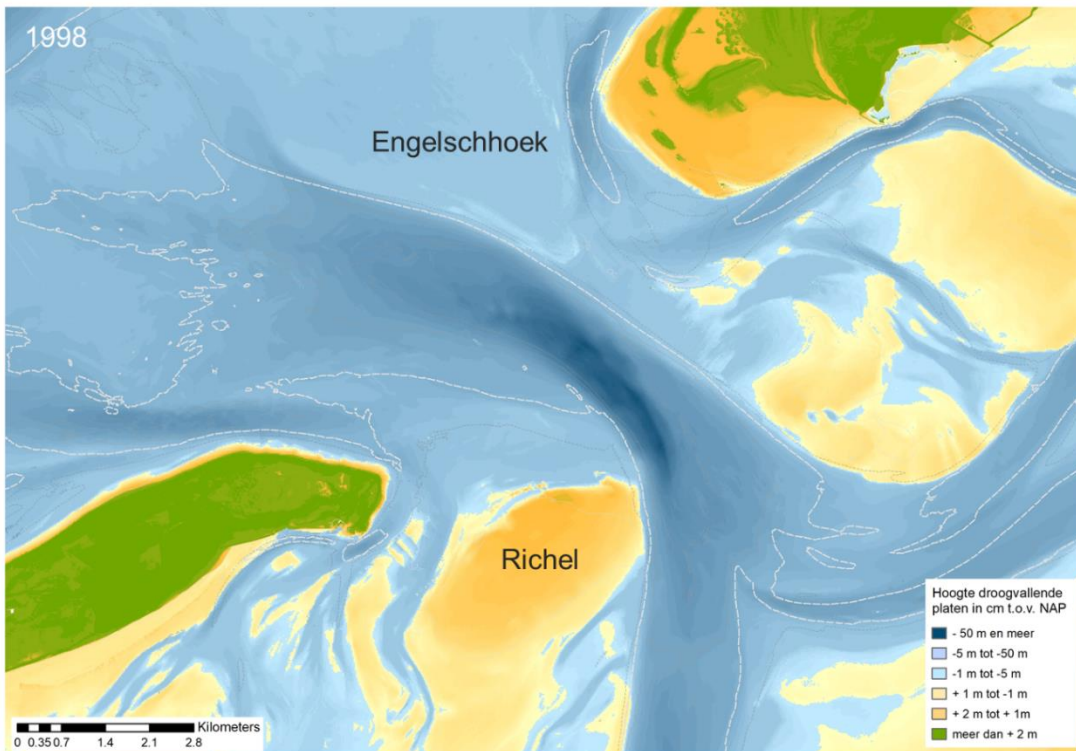
De Richel heeft al een langere geschiedenis en is een hoge droogvallende plaat geworden na de afsluiting van de Zuiderzee. Figuur 6-14 toont dwarsdoorsnedes uit de periode 1988 tot 2016. De hoogte van het hoge deel van Richel is sinds 1992 min of meer vergelijkbaar, rond

de NAP + 1 m ⁸. Veranderingen zijn er voornamelijk bij de noordwestrand, die is blootgesteld aan de golfenergie die vanaf de Noordzee binnenkomt (vergelijk Figuur 6-12 met de situatie in 2016 met de situatie in 1998 in Figuur 6-13). Aan die kant verandert ook de ligging van de geul Zuiderstortemelk, zodat de diepere delen van de oever ook veranderlijk zijn. Opmerkelijk is dat geen sprake is van een structurele landwaartse of zeewaartse verplaatsing. In 2016 ligt het ondiepe bereik meer zeewaarts dan in eerdere opnamen. Dit is een duidelijk verschil met de ontwikkeling van de Engelschhoek, waar de zeewaartse rand consequent in landwaartse richting verplaatst. Dat is weer vergelijkbaar met de ontwikkeling van de Zeehondenplaat in het zeevat van Ameland (Cleveringa & Oost, 2017).

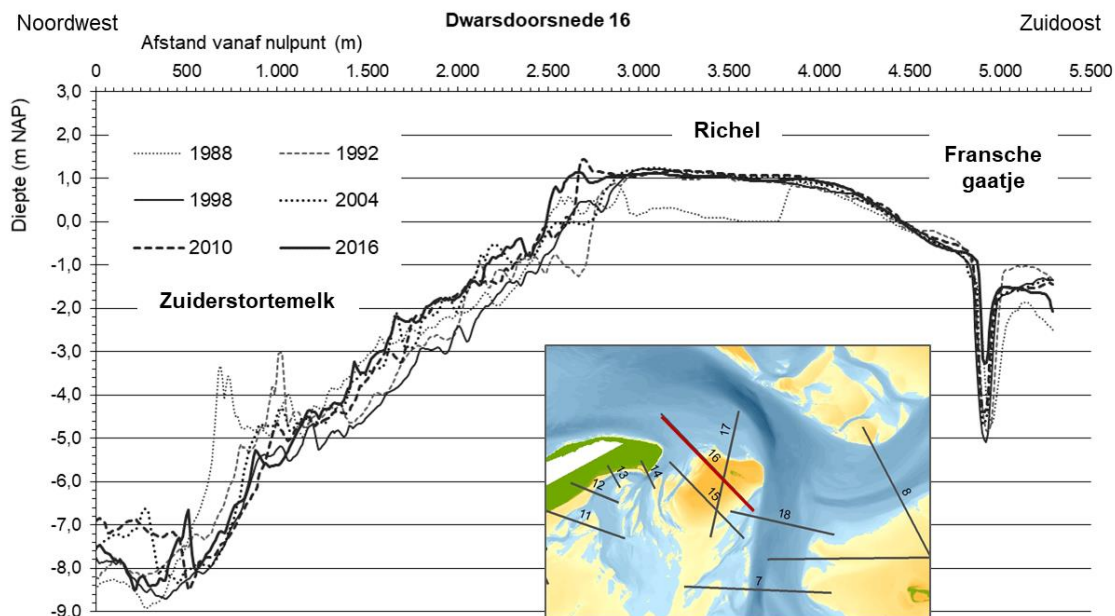


Figuur 6-12 Het Vlie, met de zandplaten Richel en Engelschhoek in 2016 en de NAP -2 m contouren van 2016 en andere jaren.

⁸ de lagere delen in 1988 zijn mogelijk het gevolg van problemen met de gegevens en geen echte morfologie



Figuur 6-13 Het Vlie, met de zandplaat Richel in 1998.



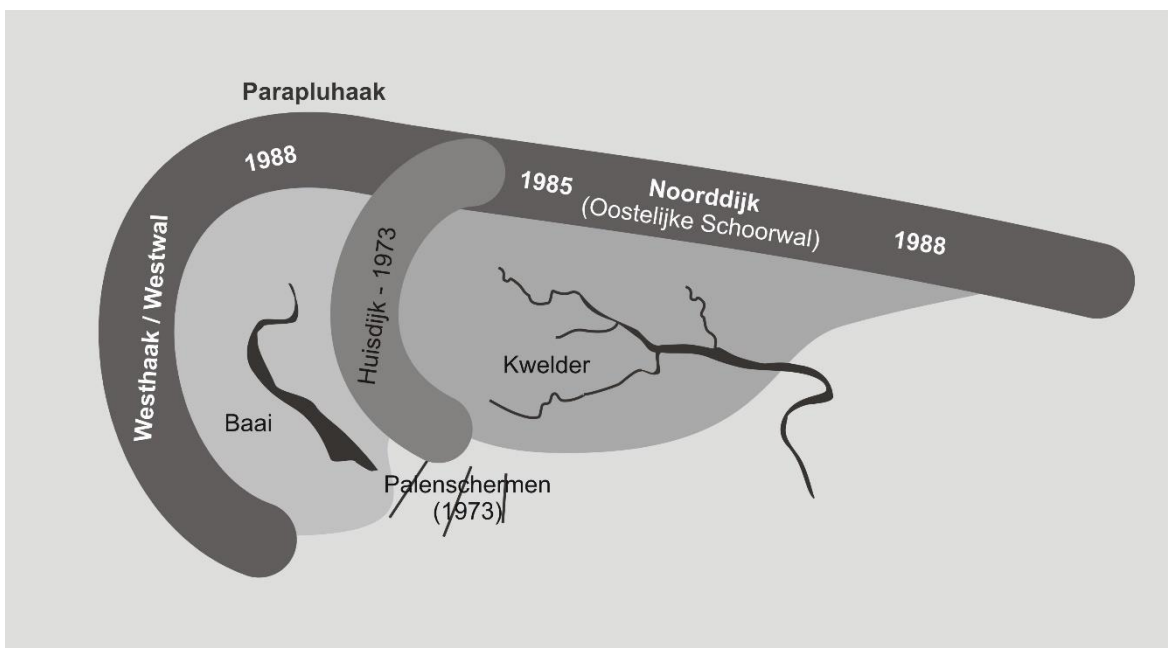
Figuur 6-14 Dwarsdoorsnede van Richel nabij, in het Zeegat van het Vlie.

De meest waarschijnlijke oorzaak voor het verschil in gedrag van Richel en de Engelschhoek in het Zeegat van het Vlie, is het verschil in positie in relatie tot de dynamiek van het zeegat. Richel ligt aan de binnenzijde van het zeegat. Richel ligt daarmee enigszins afgeschermd voor de golven van de Noordzee. De Engelschhoek ligt op de buitendelta, aan de buitenzijde van het zeegat en wordt daarom veel meer blootgesteld aan de golven van de Noordzee.

6.7 Griend en Grienderwaard

Griend is een eilandje midden op de wadplaat Grienderwaard. Delen van Griend liggen hoger dan het niveau van hoogwater en het heeft zelfs hogere delen dan hoogwater tijdens springtij en meeste stormen. Griend is vooral bekend geworden als broedeiland, onder andere voor de Grote stern. Het eiland is ook een hoogwatervluchtplaats voor wadvogels en een werp- en zooggebied voor de Griuze zeehond. Het bevat een klein areaal kwelder.

In oorsprong is Griend een restant van oude en bewoonde en beweide kwelders uit de Middeleeuwen. De omvang van het eiland nam echter steeds verder af en Griend schoof naar het oosten. In de 20^{ste} eeuw zijn, vanwege de grote natuurwaarden, verschillende ingrepen gepleegd om het eiland te behouden: In 1925/26 werd een erosieve geul geblokkeerd, in 1958/1959 kwam de 1^e suppletie (zandlichaam op de halve maanvormige schoorwal en duinbeplanting), in 1973 de 2^e suppletie (zandlichaam aan westkant) en aanleg van palenschermen, in 1985 de 3^e suppletie en versterkingen met klei, in 1988 de aanleg van een zanddijk aan de noord- en westkant (Figuur 6-15). In 2016 is Griend opnieuw versterkt (van Veen & Dallmeijer, 2016). Hiertoe is een buffer van zand aangebracht aan de westzijde, die is voorzien van schelpenmateriaal. Verwacht wordt dat de transportprocessen zullen zorgen voor de vorming van een beschermende schoorwal van zand en schelpen.



Figuur 6-15 Schematische overzichtkaart van de ingrepen op Griend vanaf 1973 en voor de meest recente versterking in 2016.

De Grienderwaard is een van de meest stabiele plaatgebieden in de Waddenzee. Uit de historische kaart (Figuur 4-9) is op te maken dat de grens met het Pannengat-Blauwe slenk en de Westmeep-Zuidmeep niet veel is veranderd sinds begin 20^{ste} eeuw. Ook de hoogte lijkt niet veel te veranderen, zie het linkerdeel van Figuur 6-11. De Grienderwaard ontvangt sediment van (de versterkingsmaatregelen van) Griend.

Het is verrassend dat de veranderingen bij de Grienderwaard beperkt zijn, gezien de flinke veranderingen die hebben plaatsgevonden na de afsluiting van de Zuiderzee. De meest waarschijnlijke oorzaak van de beperkte veranderingen is de aanwezigheid van moeilijk erodeerbare lagen in de ondergrond (Hijma, 2017).

6.8 Beleid en beheer

De belangrijkste vragen vanuit beleid en beheer over de wadplaten betreffen de ontwikkeling van het areaal en de kwaliteit ervan. Er zijn ook veel vragen over de gevolgen van menselijke activiteiten. In Tabel 6-1 staat een overzicht, met bijbehorende morfologische indicatoren.

Tabel 6-1 Overzicht van de belangrijkste beleids- en beheervraagstukken rond wadplaten.

Beleids- of beheervraag(stuk)	Morfologische indicatoren
Autonome ontwikkeling kwaliteit en kwantiteit van habitattypen	Arealen (opp.) platen en ecotopen Droogvalduur platen Sedimentsamenstelling bodem
Autonome ontwikkeling hydromorfologie	Erosie/sedimentatie
Gevolgen van kustsuppleties voor de Waddenzee	Sedimentsamenstelling bodem
Gevolgen van bodemberoerende visserij voor de Waddenzee	Sedimentsamenstelling bodem
Dekking kabels en leidingen	Lokale diepte

7 Kwelders

7.1 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:

- Vastelandskwelders, voornamelijk kwelders die ontstaan zijn door de kwelderwerken.
- 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 van deze soort in de Westelijke Waddenzee is de kwelder in de Mokbaai.
- Eilandkwelders aan de Noordzeezijde, zoals in de Slufter. Ze vallen buiten het bestek van dit rapport.

In Figuur 7-1 zijn in een schematische dwarsdoorsnede de verschillende onderdelen van de kwelder benoemd, waarbij ook de relatie met de waterstanden is aangeduid.

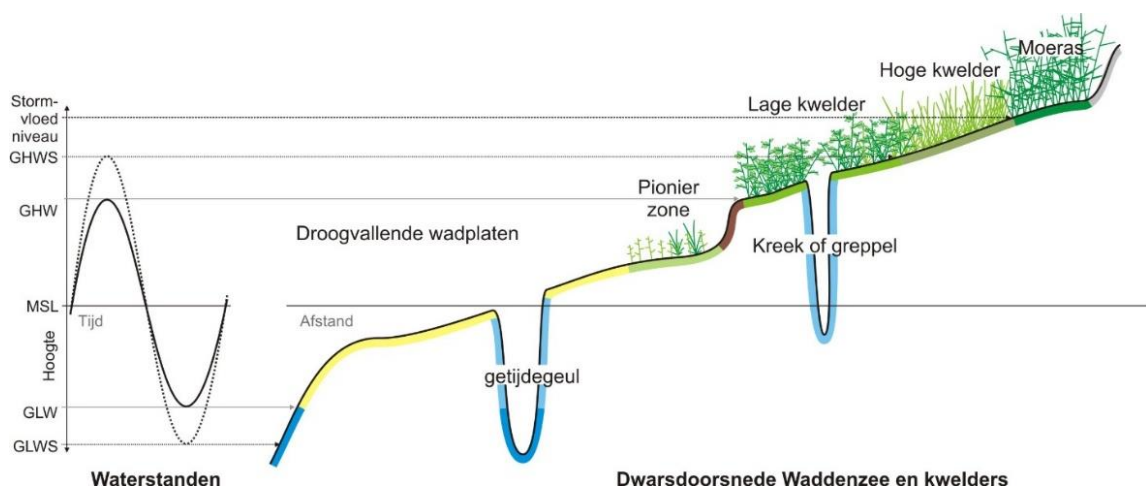
Pionierzone: De pionierzone, of pionierkwelder wordt gevormd door de hoogste delen van het wad, die vrijwel ieder hoogwater onder water staan. Hier vestigen zich typische soorten zoals zeekraal (*Salicornia*) en slijkgras (*Spartina*).

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

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

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

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

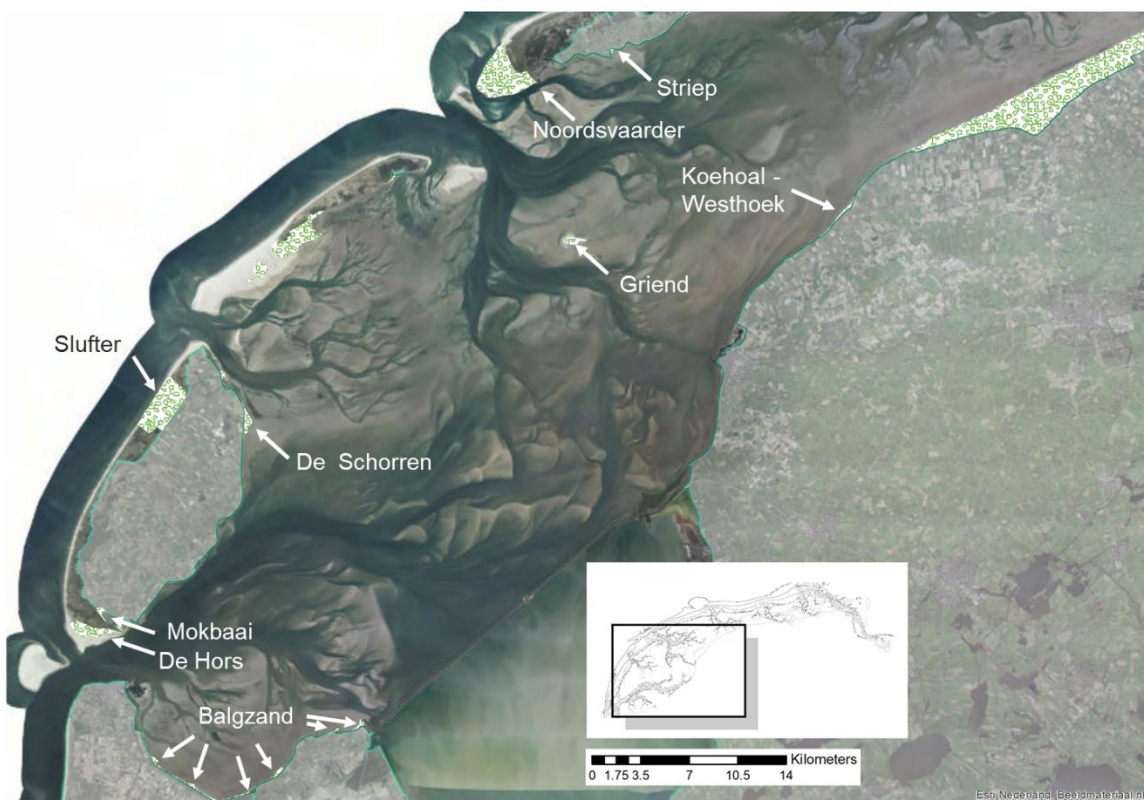


Figuur 7-1 Schematische dwarsdoorsnede van een kwelder met voorliggende wadplaat en de verschillende eenheden.

Er zijn ook indelingen die zijn gebaseerd op de kenmerkende vegetatie. Rijkswaterstaat gebruikt zulke voor de kartering, zoals Salt97 (1989 t/m 2007, de Jong et al.) en Salt08 (vanaf 2008, Reitsma, 2012). Voor de ecotopenkaart wordt de classificatie uit ZES gehanteerd (Bouma et al, 2005). De indeling van de Natura2000 en de habitatkaarten volgt de profielbeschrijvingen van habitattypen (Ministerie van EZ, 2012). De kweldervegetatiekaart kan met een vertaaltabel worden omgezet naar een vegetatiezoneringskaart, een vegetatiestructuurkaart, een Habitattypenkaart en een KRW-zoneringskaart.

7.2 Kwelders in de Westelijke Waddenzee

Figuur 7-2 toont de kwelders in de Westelijke Waddenzee. Ze worden in de paragrafen hieronder stuk voor stuk besproken. Het geheel blijft een relatief beperkte hoeveelheid ten opzichte van andere kombergingsgebieden in de Waddenzee gezien de omvang van het gebied. Ook zijn ze over het algemeen jong (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) en kwelders bij Terschelling. Kwelderwerken zijn in de Westelijke Waddenzee vrijwel afwezig.



Figuur 7-2 Kaart met de kwelders rond de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie.

7.2.1 De Schorren

De Schorren, achter de dijk van polder De Eendracht op Texel, is een **70 hectare groot** kweldergebied, met veel kreken. Ze vormen, samen met een deel van de Vlakte van Kerken, 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.

Voor de toekomstige ontwikkeling van de Schorren is een citaat uit Esselink et al., (2017) geschikt, waar op grond van een morfologische analyse wordt gesteld: *“De Vlake van Kerken lijkt de afgelopen decennia langzaam gevoed te zijn vanuit het Eierlandse Gat, en later ook vanuit het zuiden. De geul Kiltje lijkt hierbij langzaam te verzanden. Op termijn van decennia kunnen deze ontwikkelingen gunstig zijn voor de ontwikkeling van De Schorren, maar op een korter tijdsbestek zullen de grootschalige ontwikkelingen nog geen verandering betekenen voor de ontwikkeling van de kwelder (ofwel: natuurlijke kwelderuitbreiding wordt komende decennia niet verwacht). Migratie van Vogelzwin kan op termijn van decennia mogelijk leiden tot verdere laterale erosie van de platen ten noorden van De Schorren, maar ook tot strandwalvorming.”*

Er is beheer nodig op de Schorren ter voorkoming van erosie. Dit gebeurde met rijnshoutdammen, maar momenteel is er sprake van grootschalig achterstallig onderhoud. Esselink et al. (2017) beveelt aan meer gebruik te maken van de kennis van – en ervaringen met rijnshoutdammen in de kwelderwerken langs de Friese en Groningse kwelderwerken.



Figuur 7-3 De Schorren, kijken naar het noorden in 2005 (<https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat/ Rens Jacobs).

7.2.2 Kwelders van het Puntje en Karhoek, Mokbaai

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 pioniervegetaties. 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.

7.2.3 Balgzand tot en met Den Oever

Langs het Balgzand en langs de kust van Wieringen zijn diverse kleine kwelders aanwezig. De meeste zijn het gevolg van menselijke ingrepen, drie door spontane 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^e en 3^e Balgzandschor. Bij de verhoging van de Balgzanddijk (periode 1983-1989) is dit deels weer verloren gegaan. Daarom is het 3^e schor kunstmatig vergroot (Essink & de Vlas, 2000).
- Slikhoek is door spontane aanslibbing gevormd. De aansluitende kwelders langs de zuidzijde van het Balgzand zijn ontstaan door 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 (zie Figuur 7-4). 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 duidelijke recreatieve functie. Het balanceren tussen de natuur- en de recreatiefunctie is een duidelijke beheeropgave voor deze kwelders.



Figuur 7-4 Werkbezoek door Rijkswaterstaat aan de kwelder van Vatrop, begin 21^{ste} eeuw.

7.2.4 De kwelders van Koehoal tot Westhoek

Bij de Waddenzeedijk die van Harlingen naar het noordoosten loopt liggen kleine gebieden met kweldervegetatie en een grotere kwelder bij Westhoek. Verder naar het oosten bij Zwarte Haan, ter hoogte van het wantij beginnen de veel grotere kwelders van Friesland Buitendijks (beschreven in het kombergingsrapport Borndiep, Cleveringa & Oost, 2017).

De totale oppervlakte kwelders van Koehoal tot Westhoek is 31 ha. Het grootste deel van de kwelder bij Koehoal ligt in een knik in de dijk. Ten westen hiervan liggen tussen de aanwezige dijkhoofden kleine 'plukjes' kwelder en pioniervegetatie. De kweldervegetatie in dit gebied is relatief jong, het is in de jaren '90 van de vorige eeuw ontstaan.

Momenteel wordt getracht om met aanbrengen van slib opgebaggerd uit de haven van Harlingen de kwelderontwikkeling te bevorderen (Vroom et al., 2017). De condities voor de vestiging van de vegetatie zijn waarschijnlijk verbeterd door de doorgaande sedimentatie op de Vlakte van Oosterbierum en in het Kimstergat.

7.2.5 Griend

In de luwte van de dijken van Griend is binnen de deels omsluitende zandwal een kwelder ontstaan van ca. 22,5 ha. Dit gebied moet mede door de nieuwe ingrepen grotendeels blijven bestaan. Deze kwelder is in zijn huidige vorm een eilandkwelder, hoewel de oorsprong ervan anders is omdat het een restant is van een groter en ouder kwelderlandschap.

7.2.6 Kwelders bij Terschelling Noordsvaarder

De kweldervegetatie is hier op een strandvlakte spontaan ontstaan. Het gebruik van de vlakte is van invloed op ontwikkeling; reden voor SBB om recreatie en strandrijden te reguleren.

Zuidkust Terschelling

Aan de zuidkust van Terschelling liggen voor de waddendijk zeven fragmenten van kwelders, waarvan Striep de grootste is. Deze kwelders zijn, met uitzondering van de kwelder in de haven van Terschelling West, restanten van de oorspronkelijke eilandkwelder, die aanwezig was voordat de dijken aan de Waddenzeezijde werden aangelegd. Bij versterkingen van de waddendijk zijn vervolgens steeds meer delen van de kwelders binnendijs komen te liggen. De kwelders zijn ook gebruikt voor de winning van klei. Striep vormt een belangrijk rustgebied voor vogels. Van al deze kwelders eroderen de kwelderranden. De hoogte van de aanwezige hoge delen met vegetatie neemt wel toe.

Oost van Oosterend-De Grie

Dit is een oude kwelder welke tegenwoordig wordt beschermd door een stenen dam. De kwelder wordt begraasd en is deels particulier bezit.

De Groede

Dit is een grote kwelder die grotendeels (ca. 90%) beweid wordt, terwijl ook een deel een natuurlijke ontwikkeling kent. Het wordt beheerd door Staatsbosbeheer.

7.3 **Beleid en beheer**

Vraagstukken

Beleids- en beheervraagstukken rond kwelders staan in Tabel 7-1. De omvang is een belangrijke indicator. De arealen veranderen door aangroei en afslag, maar ook door veranderingen in de vegetatie. Veranderingen in vegetatie kunnen gevolg zijn van veranderingen in waterstanden of successie. Het beheer en het gebruik (beweiding) van kwelders zijn van oudsher belangrijk voor de ontwikkeling van de kwelders. Dit valt buiten dit rapport, dat gericht is op de morfologische componenten van de ontwikkelingen.

Tabel 7-1 Overzicht van de belangrijkste beleids- en beheervraagstukken rond de kwelders.

Beleids- of beheervraag(stuk)	Indicatoren
Autonome ontwikkeling kwaliteit en kwantiteit van habitattypen	Arealen (opp.) kwelders, ecotopen Sedimentsamenstelling bodem
Gebruik van de kwelder	Intensiteit beweiding
Ingrepen gericht op behoud en verbetering	Lengte bestorte kwelderrand; lengte en areaal kwelderwerken
Autonome ontwikkeling hydromorfologie	Erosie/sedimentatie Waterstanden
Dekking kabels en leidingen	Lokale diepte

Het natuurbeleid vereist op zich geen toename van het kwelderareaal, omdat voldoende areaal aanwezig is in het gehele Waddengebied. Omdat in het westelijke Waddengebied weinig kwelders zijn (Tabel 7-2 komt uit op een oppervlak van ca. 732 ha in totaal⁹) worden door beheerders en stakeholders toch plannen ontwikkeld tot uitbreiding van het areaal, waaronder:

- Kwelderontwikkeling Koehoal, via stimuleren van de aangroei door het verspreiden van baggerspecie uit de haven van Harlingen op een alternatieve locatie;
- Striep, waar plannen zijn gemaakt voor het realiseren van de “Mondriaankwelder”.

⁹ Meer precies een kwart procent van het oppervlak bij Marsdiep en ca. 0,8% van het oppervlak bij het Vlie

- De Schorren bij Texel, waar, onder andere in het kader van mogelijke mitigatie van de kustversterking Noord-Holland, is gekeken naar uitbreiding.

Beheersituatie

Tabel 7-2 laat een brede range aan eigenaren en beheerders van kwelders zien. Het is onbekend hoe de onderlinge afstemming is.

Tabel 7-2 Overzicht van de kwelders van de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie (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; F. Zwart, Staatsbosbeheer Terschelling; E. Jansen, NM Griend; C. Bakker, Fryske Gea; P. Lieverdink, Wetterskip Fryslan). Grootte kwelders is veelal geschat.

Naam	Oppervlak (ha)	Ontstaan	Beheer	Functie	Beheerder
Marsdiep: Texel					
De Schorren	70	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)
Karhoek, Mokbaai	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
het Puntje, Mokbaai	9	Spontaan, na aanleg stuifdijk	Geen	Vegetatie en landschap Deels oefenterrein.	Defensie
Kwelder zuidoostelijk van weg tussen de Horsmeertjes door	Wisselend door duin dynamiek	Kwelder en sluftervorming zuidoostelijk van duingebied	Geen	Vegetatie en landschap Hoogwatervluchtplaats en broedgebied voor vogels	Defensie, voor deze Staatsbosbeheer
NIOZ kwelder	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
Volharding	11	Spontaan	Geen	Vegetatie en landschap Hoogwatervluchtplaats en broedgebied voor vogels.	Natuurmonumenten

Naam	Opper- vlak (ha)	Ontstaan	Beheer	Functie	Beheerder
Marsdiep: Balgzand					
Kooihoekschor	14	Restant oude kwelder bij dijkverzwaring aangevuld met grond. Ca. 8 jaar geleden grondlichaam en rijshoutdammen aangebracht. Aan zuidzijde natuurlijke aanslibbing	Klepelen/maaien + nabeweidning na het broedseizoen	Hoogwatervlucht- plaats en broedgebied voor vogels	Landschap Noord- Holland
2^e Schor	2	Door grond van de dijkverhoging	Geen beweiding	gering, Hoogwater- vluchtplaats en broedgebied voor vogels	Landschap Noord- Holland
3^e Schor Ewijcksluis- schor	14	Ongeveer 8 jaar geleden grondlichaam en rijshoutdammen aan gebracht. Aan zuidzijde natuurlijke aanslibbing dijkverhoging.	Klepelen/maaien + nabeweidning na het broedseizoen	Hoogwatervlucht- plaats en broedgebied voor vogels	Landschap Noord- Holland
Slikhoek + rand langs zuidzijde Balgzand	Ca.26	Slikhoek = spontane aanslibbing; rest door grond van dijkverhoging	Deels niets doen deels klepelen(verrietting /verruiging tegen gaan)	Hoogwatervlucht- plaats voor vogels, spontane kweldervorming	Landschap Noord- Holland
Marsdiep: Wieringen					
Normerven	20	Zandopspuiting 1986 en daarna gerestaureerd met kaden van steenbestorting	Geen beweiding	Hoogwatervlucht- plaats en broedgebied voor vogels	Staatsbosbeheer
Vatrop	5	Voormalige winput keileem; ingericht als vogelgebied	Geen beweiding; uitdiepen slenk i.v.m. voorkomen van verstoring	Landschap	Staatsbosbeheer
Schor Den Oever	8	Spontane aanslibbing	Geen beweiding	Hoogwatervlucht- plaats voor vogels, vegetatie	Hoogheemraadsch- ap Hollands Noorderkwartier
TOTAAL MARSDIEP	179				

Naam	Oppervlak (ha)	Ontstaan	Beheer	Functie	Beheerder
Vlie: Friesland					
Kwelders van Koehoal tot Westhoek	31	Spontane aanslibbing. In de Jaren 2016-2017: Building with Nature experiment "Slibmotor"	Geen begrazing. Toezicht op behoud rust.	Hoogwatervluchtplaats en broedgebied voor vogels, ruiplaats bergeend (voor de kust) vegetatie, vooroever, CO2 vastlegging, recreatieve benutting: vanaf zeedijk en één paadje van dijk naar wad.	It Fryske Gea
Vlie: Griend					
Griend	22,5	Spontane ontwikkeling in de luwte van Griend	Diverse beheeringrepen om Griend te behouden; betredingsregulering	Hoogwatervluchtplaats en deels broedgebied: geleidelijke overgang naar duinen.	Natuurmonumenten
Vlie: Terschelling					
Kwelders Noordsvaarder	10 – 20 ha	Spontane ontwikkeling op strandvlakte	Regulering recreatie en gemotoriseerd verkeer (strandrijden)	Vegetatie, landschap, hoogwatervluchtplaats; foerageer- en broedgebied vogels	Staatsbosbeheer
West Terschelling haven De Kom	0,1		Spontane ontwikkeling/erosie	Landschap, vegetatie	Gemeente Terschelling
Kwelder NO zijde haven Terschelling (Dellewal)	Ca. 1	Oude vastelandskwelder, geërodeerd,	Spontane ontwikkeling kwelderrand en deels kleidepot	Landschap, vegetatie	Gemeente Terschelling
Kwelders nabij Seerijp	Ca 10 – 15	Oude landaanwinning	Spontane ontwikkeling	Hoogwatervluchtplaats; foerageer- en broedgebied vogels Vegetatie. Landschap	Rijkswaterstaat
Kwelder Landerum 't Sehaal	1?	Oude kwelder met bescherming van strekdam, erosie	Spontane ontwikkeling/ erosie	Hoogwatervluchtplaats, landschap	Rijkswaterstaat?
Kwelder zuid van Formerum ;de Keag	1 -2?	Oude kwelder met strekdam; erosie	beweiding	Hoogwatervluchtplaats; landschap,	Rijkswaterstaat

Naam	Oppervlak (ha)	Ontstaan	Beheer	Functie	Beheerder
Kwelder zuid van Lies; de Ans	0,5 ?	Oude kwelder met stenen dammen; erosie	Spontane ontwikkeling, deels afgegraven	Foerageergebied, landschap	Rijkswaterstaat?
Kwelders Z van Oosterend	2-3?	Oude kwelder, erosie	beweiding	Vegetatie, landschap	Rijkswaterstaat
Kwelder oost va Oosterend De Grie	Ca. 40	Oude kwelder, beschermd door stenen dam	Beweiding, maaien.	Landschap, vegetatie, hoogwatervluchtplaats ; foerageer- en broedgebied vogels,	Staatsbosbeheer ca. 60%, particulier ca. 40%
De Groede kwelders O van Oosterend¹⁰	Ca. 420 - 430 .	Spontane ontwikkeling	Beweiding 380 ha, spontane ontwikkeling ca. 40 -50 ha.	Hoogwatervluchtplaats; foerageer- en broedgebied vogels. Vegetatie en landschap	Staatsbosbeheer
TOTAAL VLIE	553				

¹⁰ De opgegeven oppervlakte voor de Groede (beweid en onbeweid) is inclusief verspreide duinen (Witduin en Gat van de Scherm, St Janshoek , ruw geschat samen ca. 25 ha.) en kleinere duingroepjes (ook een ruwe schatting ca. 10 ha.).

8 Bevindingen gestructureerd via gebruiksfuncties

8.1 Inleiding

Dit hoofdstuk vat de vorige hoofdstukken samen door beleid- en beheervraagstukken per gebruiksfunctie (veiligheid, bereikbaarheid, natuur en overig) te bespreken.

8.2 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), in uitvoering (de dijkversterking op Texel, inclusief Prins Hendrik zanddijk) of in voorbereiding (w.o. de Afsluitdijk). De relatie en effecten tussen de (veranderingen in de) morfologie mesoschaal op de versterkingen en omgekeerd wordt onderzocht in studies voor deze specifieke versterkingen en zijn geen onderwerp van dit rapport. Met betrekking tot dijkveiligheid worden de twee belangrijkste typen mesoschaalontwikkelingen besproken, migrerende geulen en aangroeiende voorlanden, inclusief de locaties waarop ze in de nabije toekomst actueel kunnen worden (Figuur 8-1).

8.2.1 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.

Waar speelt dit?

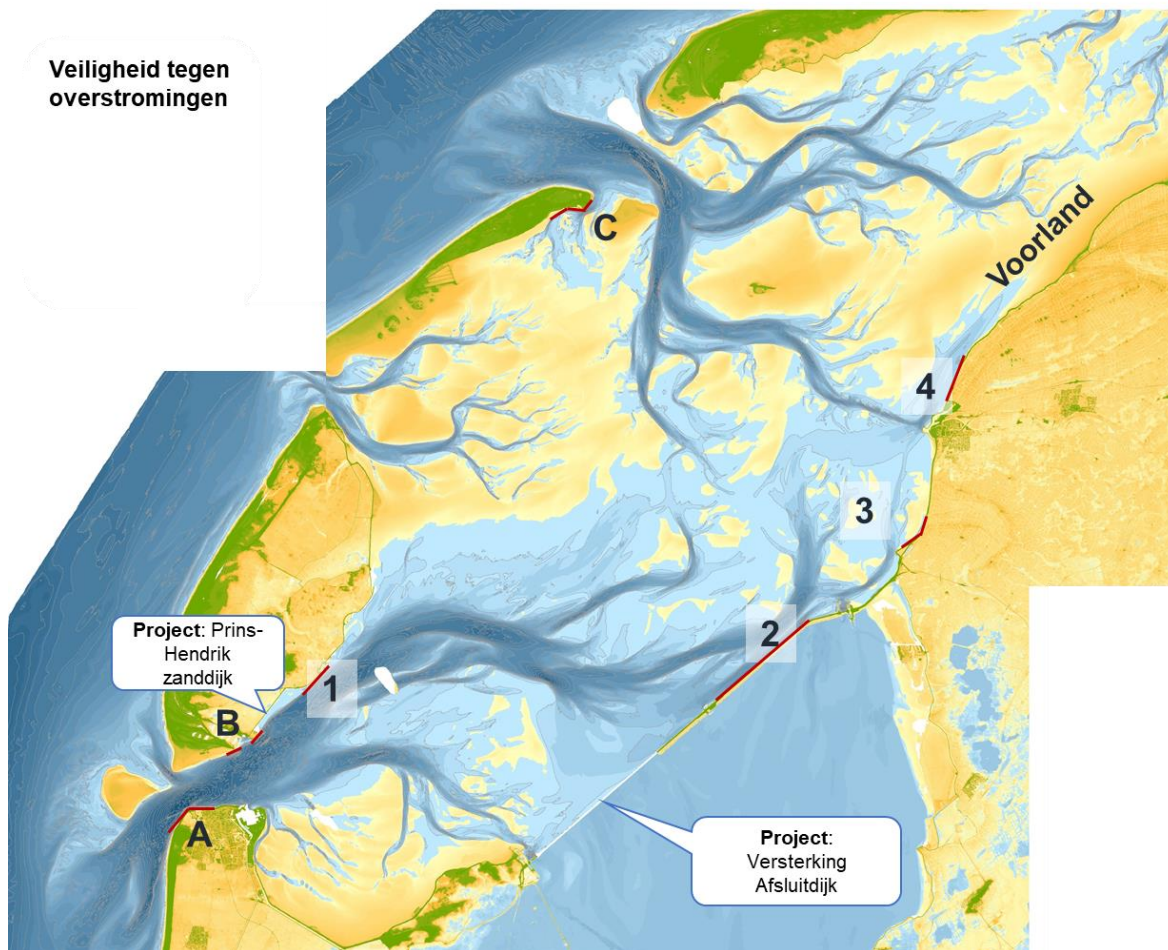
Figuur 8-1 toont drie plaatsen waar sprake is van getijdegeulen die dicht tegen de waterkering aanliggen en waar de geulwanden zijn bestort. Dit is het geval bij Huisduinen aan de Kop van Noord-Holland (A), bij 't Horntje op Zuid Texel (B) en bij Oost-Vlieland (C). De situaties zijn beschreven in 4.3.1 en 4.3.2.

Er zijn nog vier andere locaties waar (nrs. 1 - 4 in Figuur 8-1) 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. De Afsluitdijk, ten noordoosten van de werkhaven bij Breezanddijk;
3. De Waddenzeedijk ten noordoosten van Zurich;
4. De Waddenzeedijk ten Noordoosten van Harlingen bij het Kimstergat.

Alleen bij locatie 2 (Afsluitdijk, ten noordoosten van de werkhaven bij Breezanddijk Figuur 8-2) 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 locaties 3 en 4, beide bij de Friese Waddenzeedijk, is er op korte termijn ook geen risico, want de omvang van de getijdegeul neemt er juist af, waardoor de invloed ervan afneemt. Wel is de diepte van het Kimstergat, direct onder de dijk, de afgelopen jaren toegenomen.



Figuur 8-1 Vraagstukken rond de veiligheid.

Versterken met zand of steen?

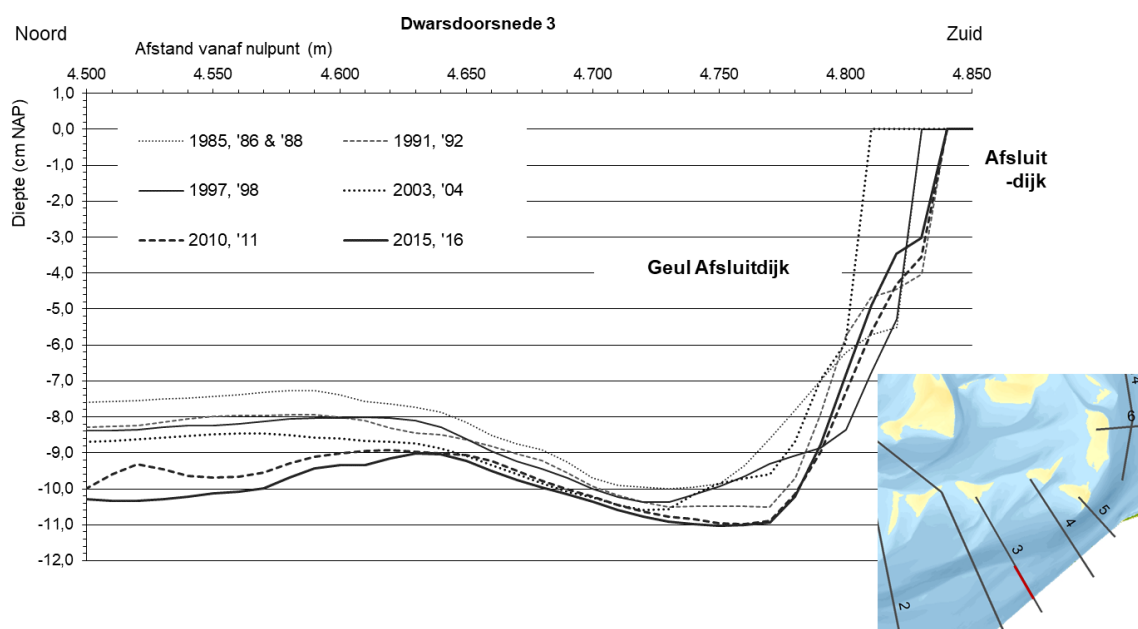
De uitgevoerde bestortingen vormen op dit soort locaties zowel een oplossing als een deel van het probleem. Door de bestortingen wordt verdere verplaatsing van de geul tegengegaan (= oplossing), maar ontstaat ook ontgronding (= probleem), wat regelmatig dwingt tot uitbreiding van de bestortingen.

Alternatieve maatregelen, bijvoorbeeld in de vorm van zandsuppleties van de geulwand, zijn nog niet beschikbaar als volwaardig alternatief voor bestortingen. Aanvullende zandsuppleties op bestortingen, zoals die bij de Helsdeur zijn uitgevoerd, behoren wel al tot het beheer. De zandige versterking bij de Prins-Hendrik zanddijk is wellicht een voorloper van een zandig alternatief, maar is niet gericht op het stabiliseren van de geulwand of onderwateroever.

Bij onderzoek binnen POV¹¹ Waddenzeedijken voor het Vierhuizergat (Friesche zeegat) is bekeken of een geulwandsuppletie, met zand dat is gewonnen in de geul, dan wel het geheel verleggen van de geul alternatieven waren voor een bestorting. Het onderzoek wees voor het Vierhuizergat uit dat bestortingen de aangewezen maatregel waren. Het meenemen van

¹¹ Binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) zijn er verkenningen die individuele versterkingsprojecten overstijgen (POV's). Er is er ook een voor de Waddenzeedijken.

zandige alternatieven bij het aanpakken van geulinstabiliteit bij geulen blijft voor andere locaties wellicht wel een optie.



Figuur 8-2 Dwarsdoorsnede 3, loodrecht op de Afsluitdijk, door de geul parallel aan de Afsluitdijk (locatie in inzet).

8.2.2 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.

Waar speelt dit?

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 aan¹². Zie ook de omschrijvingen in 7.2 en 7.3.

Verschillende wadplaten vervullen ook een golfdempende functie. Ten oosten van Westhoek aan de Friese kust heeft op de Vlakte van Oosterbierum na de afsluiting van de Zuiderzee overwegend sedimentatie plaatsgevonden. Het gebied is daardoor veranderd van een altijd overstroomde vlakte in een wadplaat. Deze uitgestrekte wadplaat is het voorland van de Waddenzeedijk. De verwachte ontwikkeling van de wadplaten die als voorland fungeren is afhankelijk van de grootschalige en langjarige trends van sedimentatie in de kombergingsgebieden. De afgelopen tientallen jaren heeft, nog steeds onder invloed van de afsluiting van de Zuiderzee, netto sedimentatie en uitbreiding van het plaatareaal plaatsgevonden. Of en hoe lang deze trend doorgaat is niet zeker.

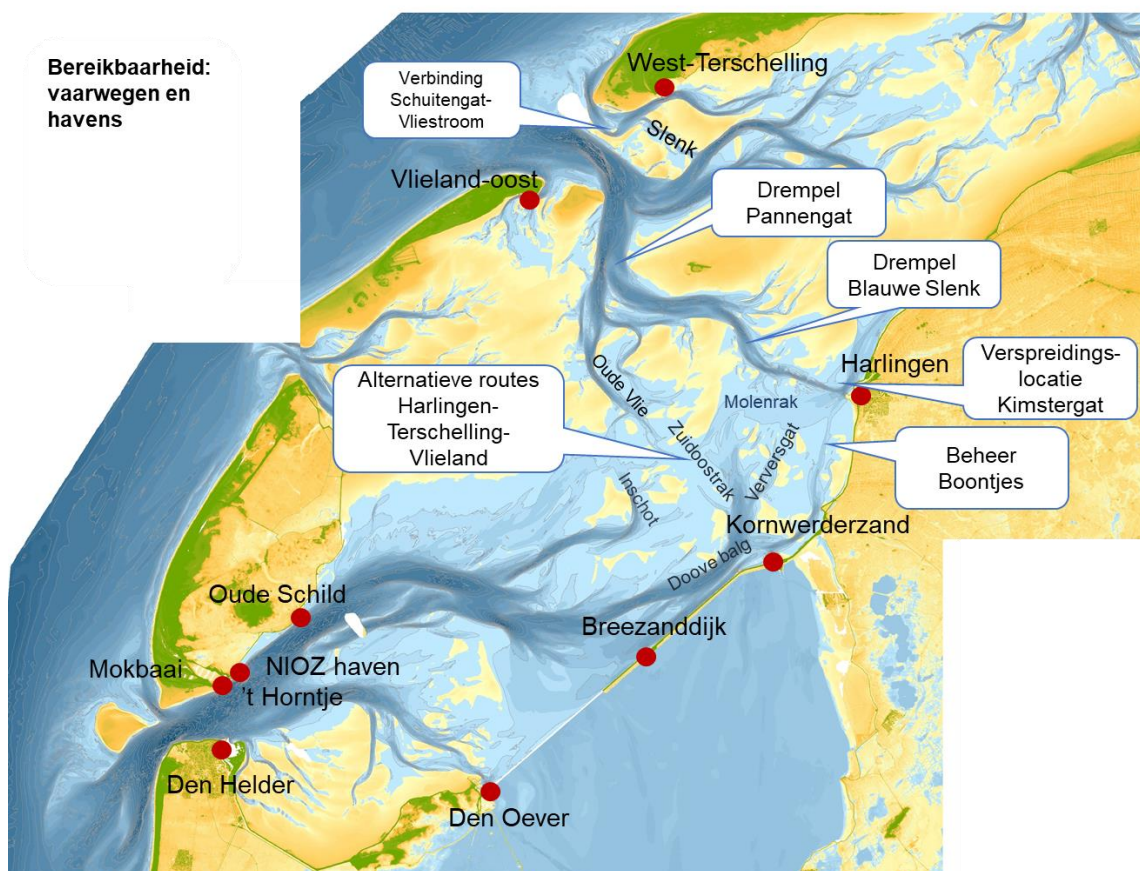
De beschreven ontwikkeling is relatief langzaam en geleidelijk geweest. De consequentie was dat de maatgevende golfaanval op sommige waterkeringen afnam. De systematiek van de

¹² 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.

beoordeling van de waterkering biedt voldoende mogelijkheden om de veranderingen in belasting van de waterkering door morfologisch veranderingen mee te nemen.

8.3 Bereikbaarheid: vaarwegen en havens

Rond de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie liggen verschillende havens (met Den Helder¹³ en Harlingen als grootsten) en er lopen verschillende gemarkeerde vaargeulen die de havens en de zeegaten verbinden (Figuur 8-3). Gebruikers zijn veerdiensten, beroepsvaart en recreatievaart. Alle havens en een aantal van de vaargeulen worden onderhouden (baggeren). Gebaggerd materiaal moet weer verspreid worden. De locatiekeuze daarvoor kan mede gebaseerd zijn op morfologische ontwikkelingen.



Figuur 8-3 Vraagstukken op het gebied van bereikbaarheid bij de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie.

8.3.1 Lokale dynamiek van de bodem met gevolgen voor gebruik van de vaarweg

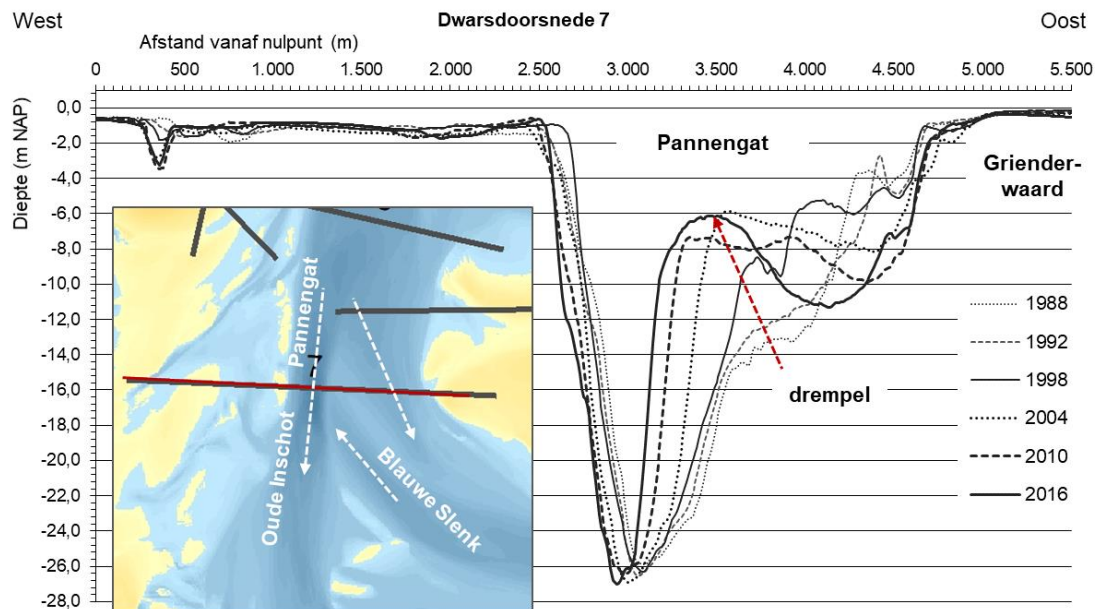
In dit rapport zijn plekken besproken waar veranderingen in geulen en drempels het gebruik door de scheepvaart (kunnen) beïnvloeden. De situatie bij het Schuitengat is uitgebreid beschreven in paragraaf 4.3.3 en wordt kort samengevat. Een andere locatie waar dit speelt is de Blauwe Slenk (niet uitvoerig besproken in dit rapport).

Bij het Schuitengat draait het om de verbinding via het Schuitengat met de Vliestroom (zie ook Beenhakker et al, 2018). Deze was tot begin jaren negentig bruikbaar zonder baggerinspanning. Veranderingen nabij de drempel tussen Schuitengat en Boomkensdiep en het ontstaan van een relatief hoge zandbank tussen Schuitengat-Boomkensdiep en Vliestroom

¹³ Op planvorming rond haven Den Helder wordt niet ingegaan. Hiervoor loopt een eigenstandig onderzoekstraject.

maakten de verbinding naar de Vliestroom ondieper. Er moest gebaggerd worden, maar dat liep sterk op. Halverwege de jaren'90 werd daarom de voorkeur gegeven aan het op diepte brengen van Slenk, als een alternatieve verbinding voor het Schuitengat (van der Weck, 1995). Slenk is een voorspelbare verbinding gebleken, met een baggerbezwaar dat slecht beperkte fluctuaties vertoont over de jaren. De afgelopen drie jaar is opnieuw een verbinding ontstaan tussen Schuitengat en Vliestroom, wat aanleiding is geweest om de bruikbaarheid van die route te onderzoeken. Het resultaat daarvan is dat de verbinding via het Schuitengat onvoorspelbaar is en voor de langere termijn geen betrouwbaar alternatief biedt voor Slenk. Ingrepen voor het stabiliseren van de Schuitengatverbinding worden in dit dynamische gebied niet mogelijk geacht.

In de Blauwe Slenk worden drempels gevormd tussen de diepe delen van de geul, die rond de drempel een eb- en vloodschaarsysteem vormen. De omvang van de drempel varieert met de ligging van de eb- en vloodschaar. De noodzaak tot het baggeren van de drempel varieert daarmee ook.



Figuur 8-4 Dwarsdoorsnede 7, door de geul Pannengat-Oude Inschot (locatie in inzet).

8.3.2 Grootschalige veranderingen in bodemligging met beperkingen voor gebruik

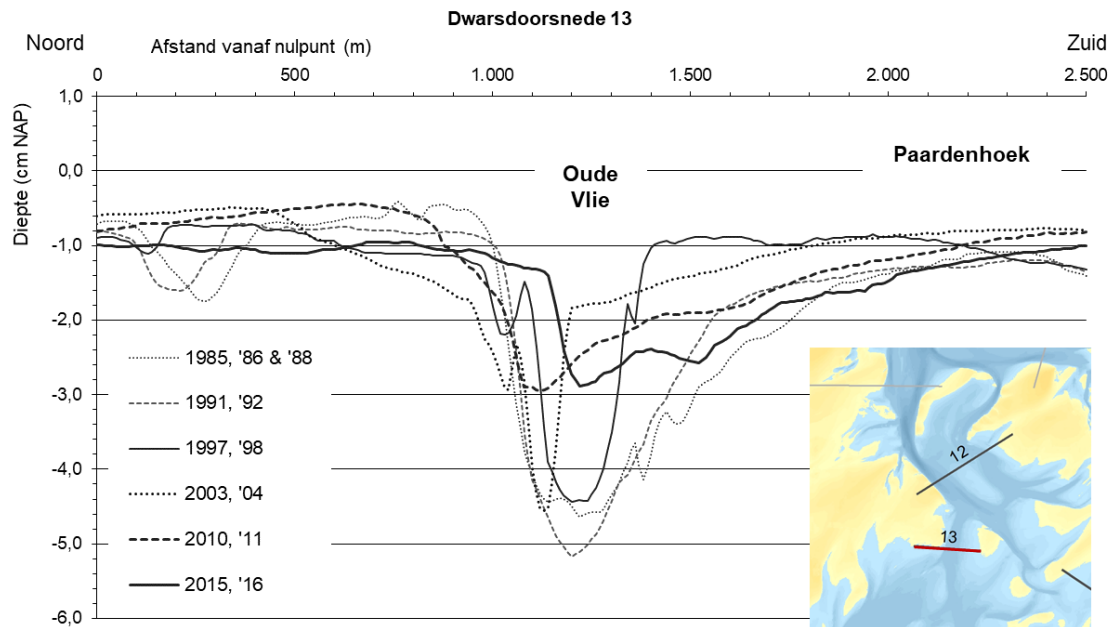
In omvang afnemende geulen beperken steeds meer het gebruik als vaarweg of als verspreidingslocatie voor baggerspecie.

Waar speelt dit?

Bij de Boontjes is er toename van het baggerbezwaar (zie paragraaf 4.3.4). Bij het Kimstergat wordt het gebruik als verspreidingslocatie moeilijker door verondieping (zie paragraaf 4.3.5). In de geulen Inschot, Oude Vlie (Figuur 8-5) en Zuidoostrak wordt niet gebaggerd. Daar staat het gebruik als vaarweg steeds verder onder druk door de afname in diepte en breedte. Ze worden, afhankelijk van de diepgang, alleen rond hoog water gebruikt.

Naar verwachting zal zowel sedimentatie als heroriëntatie van al deze geulen doorgaan. Specie uit de haven bij Harlingen en geulen in de nabijheid zal lastiger verspreid kunnen worden. De bereikbaarheid van het Zeegat van het Vlie, inclusief Vlieland en Terschelling, vanaf het kombergingsgebied Marsdiep (Den Helder, Texel) en het IJsselmeer wordt lastiger. Voor dieper

stekende schepen wordt de route via Doove Balg-Boontjes-Blauwe Slenk de enige betrouwbare route.



Figuur 8-5 Dwarsdoorsnede 13, door de geul Oude Vlie (locatie in inzet).

8.4 Natuur

Morfologische veranderingen op mesoschaal lijken een beperkte invloed te hebben op de natuurwaarden in het kombergingsgebied. Er zijn uitzonderingen, zoals bij Griend (paragraaf 6.7), waar om de tiental jaren herstelmaatregelen nodig blijken. In paragraaf 6.6 zijn twee hoge platen beschreven in het zeegat van het Vlie met een vergelijkbare functie: Richel en Engelschhoek. Vooral Richel speelt vanwege de ligging boven het niveau van hoogwater een belangrijke rol voor vogels (hoogwatervluchtplaats, broedgebied) en zeehonden (rusten, baren en zogen).

De invloed van morfologische veranderingen op mesoschaal op de natuur is niet eenvoudig te duiden. Figuur 8-6 illustreert dit. Onduidelijk is of de natuurwaarde van dynamische plaatcomplexen (A en B, beschreven in 6.3 en 6.4) anders is dan die van stabiele plaatgebieden, zoals Balgzand (6.3), Waardgronden en Grienderwaard (6.7). Deze paragraaf memoreert alleen twee specifieke morfologische aspecten die voor het hele kombergingsgebied gelden.



Figuur 8-6 Gebieden genoemd bij de onderwerpen 'Natuur' en 'Overige functies'

8.4.1 Afsluiting Zuiderzee en veranderingen in arealen

Er zijn grootschalige en langjarige morfologische veranderingen aan de gang sinds de afsluiting van de Zuiderzee. Het areaal droogvallende plaat is toegenomen en het areaal sublitoraal is afgenomen. Dit heeft in 2018 veel aandacht gehad. Elias (2018) geeft een gedetailleerde analyse van de sedimentvolumes in de belangrijkste sedimentatie- en erosiegebieden. De fysische mechanismen achter de grote netto transporten naar de beide kombergingsgebieden zijn onderwerp van aantal lopende onderzoeken (zie ook Wang et al., 2018).

Elias (2018) laat zien dat de trends in de belangrijkste sedimentatie- en erosiegebieden de laatste decennia zeer robuust zijn. De verwachting dat dit zich zo voortzet bij de huidige zeespiegelstijging lijkt gerechtvaardigd. Voor de nog verdere toekomst is de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt belangrijk. Bij een gelijkblijvende snelheid verwachten Cleveringa & Grasmeijer (2010) een toename van de wadplaten in de sedimentatiegebieden. Elias (2018) kan die verwachting niet doen, want de robuuste trends in de data zijn niet noodzakelijk geldig voor kleinere morfologische eenheden binnen de belangrijkste sedimentatie- en erosiegebieden.

Bij een versnelde stijging van de zeespiegel wordt een minder grote toename of een afname verwacht. Ook de bodemdaling door gaswinning (uit het Zuidwal-gasveld) en zoutwinning (vergund, nog niet begonnen) zal invloed hebben.

8.4.2 Beperkt areaal kwelders

In de gehele westelijke Waddenzee is het areaal kwelders beperkt (zie hoofdstuk 7). Het grootste areaal ligt in de Schorren en bij de Groede op Terschelling. De reden voor het beperkte areaal aan kwelders ligt in de historie van het gebied, die anders is dan dat van de oostelijke Waddenzee (zie paragraaf 3.6). 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 noordwest Friesland, de polders op Texel, waaronder de polder Eierland en de polders ten westen van Wieringen (het Koe gras, Anna Paulowna Polder).

Lokaal is er nu autonome uitbreiding van het kwelderareaal, bijvoorbeeld ten oosten van Koehoal, bij Westhoek (1 in Figuur 8-6). Dit past in het beeld van sedimentatie na de aanleg van de Afsluitdijk. In het gebied is voldoende (fijn) sediment aanwezig en er is luwte ontstaan door de verondieping van het gebied voor de dijk. Naar verwachting zal die uitbreiding geleidelijk doorgaan. Het is mogelijk dat ook ten westen van Harlingen vorming en uitbreiding van kwelders gaat plaatsvinden, als vervolg op de sedimentatie die daar al plaatsvindt. 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 (2 in Figuur 8-6, zie ook 6.3). Andere autonome nieuwvorming of uitbreiding van kwelders wordt niet verwacht. Wel kan met menselijke ingrepen het areaal kwelders worden vergroot. Dit is onderzocht voor Striep en wordt overwogen bij de Schorren (paragraaf 7.2.1).

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. Om de wenselijkheid van dit soort ingrepen te bepalen is nog geen voldoende afwegingskader. Dit soort ingrepen heeft namelijk enerzijds positieve gevolgen, bijvoorbeeld voor het areaal kwelders en het aantal broedvogels, maar hebben ook negatieve gevolgen, bijvoorbeeld voor het areaal droogvallende plaat of sublitoraal.

8.5 Overige gebruiksfuncties

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

8.5.1 Mosselpercelen en -cultuur en mosselzaadinvanginstallaties (MZI's)

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

Zowel de mosselpercelen (Figuur 8-6) 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 ("Hanenkammen", zie 5.3) worden genoemd. Dat maakt voorspellingen voor het beheer van sublitorale gebieden, ook rond de mosselpercelen en MZI's, lastig. Het is aangeraden dit als een apart habitat met eigenstandige ontwikkelingen te (h)erkennen.

8.5.2 Zand- en schelpenwinning en de morfologie

Het beleid en het beheer zijn bij zand- en schelpenwinning duidelijk geformuleerd. In de Waddenzee werd de afgelopen jaren zand gewonnen bij het onderhoud van de vaargeulen. Het volume zand dat daarbij mag worden gewonnen was maximaal 500.000 m³ (Tabel 2-2). Zandwinning in zandwinputten, buiten het onderhoud van de geulen, is sinds 1998 niet meer toegestaan. De zandwinning ten behoeve van het vaargeulonderhoud wordt de komende jaren afgebouwd, volgens het schema in paragraaf 2.5, vanwege de gevolgen van zandwinning voor de sedimentbalans van de Waddenzee en de kustzone.

In de Waddenzee worden ook schelpen gewonnen. De maximale winbare hoeveelheid is 80.000 m³, wat overeen komt 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. Zie verder paragraaf 2.5.

9 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 IJperveld", western Netherlands, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 36, 95-163.
- Baptist, M. J. T. Gerkema, B.C. van Prooijen, D.S. van Maren, M. van Regteren, K. Schulz, I. Colosimo, J. Vroom, T. van Kessel, B. Grasmeijer, P. Willemsen, K. Elschot, A.V. de Groot, J. Cleveringa, E.E. van Eekelen, F. Schuurman, H.J. de Lange & M.E.B. van Puijenbroek (submitted to *Ecological Engineering*). Beneficial use of dredged sediment to enhance salt marsh development applying a Mud Motor.
- 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.
- 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.
- Beenhakker, C., J. Postma, J. Klooster, G. Hanon, 2018: Snelvaren in het Schuitengat. Arcadis, projectnummer C05062, 38 pp
- Berger G.W. , D. Eisma & A.J. Van Bennekom, 1987. ^{210}Pb -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.
- 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.
- 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.
- Buisman, J., 1995. Duizend jaar weer, wind en water in de Lage Landen 1, tot 1300. Uitgeverij van Wijnen, 656 pp.
- 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. & A.P.Oost, 2-017. Morfologie Kombergingsgebied Borndiep; KPP 2017 BO03 Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden. Deltares rapport 11200521-000-ZKS-0004.

- Cleveringa, J. & Grasmeyer, 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.
- 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 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 Kruif, 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.
- Dirkx, 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. Holthuijsen, 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.
- Hayes, M.O., 1980. General morphology and sediment patterns in tidal inlets. *Sedimentary Geology*, 26(1), 139–156.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Kernteam basismonitoring Wadden, 2016.
- 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.
- 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 Emsmundungstrichters. Untersuchungen zur Entwicklung der Emsmundung 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.
- Lofvers, E., 2015. Ontwikkelingen Schuitengat: Inzichten tot november 2015. Voor: Beheer Overleg Groep Terschelling. Rijkswaterstaat Noord-Nederland.
- LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svašek-Arcadis, 2013. Samenhang in ontwikkelingen op verschillende tijd- en ruimteschalen project LTV veiligheid en toegankelijkheid; LTV V&T-rapport K-17

- Ministerie van Economische zaken, 2012. Profielen habitattypen en soorten, Internetbron synbiosys Natura 2000, 2012
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu & Ministerie van Economische Zaken, 2015. Nationaal Waterplan 2016-2021 (NWP).
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2012 Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016. Natura 2000-beheerplan Waddenzee; Periode 2016-2022.
- Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, 2008. Besluit Natura 2000-gebied Waddenzee. Directie Regionale Zaken.
- Ministerie van VROM, 2007a. Deel 4 van de planologische kernbeslissing Derde Nota Waddenzee, tekst na parlementaire instemming (SVW, ook wel PKB Waddenzee)
- Ministerie van VROM, 2007b. Nota van toelichting bij deel 4 van de planologische kernbeslissing Derde Nota Waddenzee (bij de SVW, ook wel PKB Waddenzee).
- Mulder, H.P.J., E. Nuijen, G.A. Liek & D.C. van Maldegem, 2005. Drempelverwijdering vaarweg Harlingen-Noordzee; Baggerwerk en morfologische en ecologische gevolgen. Rijkswaterstaat RIKZ, Rapport RIKZ/2005.026, 87 pp.
- Nederhoff, K., A.P. Oost & T. Vermaas, 2017. 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.
- Niemeijer, J.A, 1975. Land van terpen en dijken. Boekencentrum bY, the Hague, 2nd print, 118 pp.
- Noordstra, P., 1992. Verwachting toekomstig baggerwerk in de vaargeul langs de Pollendam. Rijkswaterstaat, Directie Friesland, notitie ANW 92.27, 3.
- 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. & P.L. de Boer, 1994. Sedimentology and development of barrier islands, ebbsidal 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, 2003a. Haskoning, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Den Haag. Rapport RIKZ/2003.018, 118 pp.
- Oost, A.P., S. van Heteren, J. Wallinga & M. Ballarini, 2003b: De Kalender van Texel op basis van luminescentie en historische gegevens, excursiegids, RIKZ/AB/2003.603x
- 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 2017

- Oost, A.P., van der Spek, A.J.F., van Oeveren, C., Tonnon, P.K. 2018. The contribution of mud to the net yearly sedimentation volume in the Dutch Wadden Sea. Deltares rapport 1220339-006-ZKS-0009
- 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.
- Postma & Reenders, 1984. de analyse van de ontwikkelingen van de Nederlandse kust ten bate van beleidsbeslissingen in het Kustgenese 1 project .
- Reinders, R., 1994: Cog finds from the IJsselmeeroorders. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, RIJP, Flevobericht 248, 35 pp.
- Reitsma, J.M., J. de Jong, P. Boddeke & G. Hoefsloot, 2014. Toelichting bij de Vegetatiekartering Boschplaat 2012 Op basis van false colour-luchtfoto's 1:10.000.
- Ridderinkhof, H., 1990. Reststromen en watermenging in de Waddenzee. Proefschrift Universiteit Utrecht.
- Ridderinkhof, W., 2016. Morphodynamics of ebb-tidal deltas. Proefschrift Universiteit Utrecht.
- Rienks, K.A. & G.L. Walther, 1955. Zur Geschichte der Binnendeiche und Schlafdeiche im westerlauwerschen Friesland. *Friesisches Jahrbuch* 1955, 123 pp.
- 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.
- Rijkswaterstaat, 1944. Verdieping van het Zeegat van het Vlie. Rijkswaterstaat Directie Benedenrivieren. Opdracht no. 12
- Rijkswaterstaat, 1957. Toestand Oeverwerken Schulpengat. Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland Arrondissement Hoorn Nota 57.5.
- Rijkswaterstaat, Arrondissement Friesland-West, 1974. Mogelijke verbetering vaarwegen in de Waddenzee in het bijzonder wat betreft de vaargeul langs de Pollendam, 30 pp.
- Rijkswaterstaat-NN, 1998. Instandhoudingsplannen Vaargeul Harlingen – Terschelling-Vlieland. Rijkswaterstaat Directie Noord-Nederland, Leeuwarden, maart 1998.
- Rijkswaterstaat, 2015. Beheer- en Ontwikkelplan voor de Rijkswateren (BPRW)
- 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, written 1164 A.D. by Helmold, contemporaneous)*. Die Geschichtschreiber der deutschen Vorzeit, Band 44, Verlag der Dutschen 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.
- 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.
- Smits, B. & K. Nederhoff, 2018. Mesoschaal volumebalans Westelijke Waddenzee. Deltares rapport 11202177-000-ZKS-0007
- Stoob, H., 1963. Helmold von Bosau, *Slawenchronik*, neu iibertragen und erlautert (p. 339: *Chronica Slavorum, written 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.
- 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 Aa, A.J., 1837-1854: *Aardrijkskundig Woordenboek der Nederlanden deel 1-14*.
- Van der Molen, P., 1982. Verhoging en verkorting oostelijk blinde werk van de Pollendam. Directie waterhuishouding en waterbeweging, district kust en zee, adviesdienst hoorn, notitie . WWKZ-82.HZ34, 12 pp.
- Van 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 Weck, A.W., 1995. Vooronderzoek naar alternatieven voor de vaarroute naar Terschelling, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Directie Noord-Nederland (RWS, NN), met bijdr. van J.M.. van den Boogert, 19 p
- Van Geer, P.F.C., 2007. Long-term morphological evolution of the Western Dutch Wadden Sea. WL| Delft Hydraulics rapport Z4169.00
- Van Geer, P.F.C., 2007. Long-term morphological evolution of the Western Dutch Wadden Sea. WL| Delft Hydraulics rapport Z4169.00
- Van Giffen, A.E., 1964. De ouderdom onzer dijken. *Tijdschrift K.N.A.G.*, tweede reeks, deel LXXXI, No.3, 273-286.
- Van Malde, J., 1984. Voorlopige uitkomsten van voortgezet onderzoek naar de gemiddelde zeeniveaus in de Nederlandse kustwateren. Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Nota WWWWH8408.
- Van Straaten, L.M.J.U. 1964. De bodem der Waddenzee. In: Abrahamse, J. e.a. *Het Waddenboek*, Thieme, Zutphen, pp. 75-151.

- Van Til, S. & J. Cleveringa. 2018. Morfologische dynamiek Schuitengat; Analyse t.b.v. de scheepvaartfunctie. Arcadis rapport.
- Van Veen, J. Ebb and flood channel systems in the Netherlands tidal waters, Tijdschrift Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap 67, 303 (1950).
- Veen, J. & H. Dallmeijer, 2016. Griend; Eiland voor vogels.
- Veldhuizen, E., 1980. Vruchten en zaden van Marken - Intern rapport Instituut voor Pre- en Protohistorie Univ. van Amsterdam.
- Vermeersen, B.L.A., A.B.A. Slangen, T. Gerkema, F. Baart, K.M. Cohen, S. Dangendorf, M. Duran-Matute, T. Frederikse, A. Grinstead, M.P. Hijma, S. Jevrejeva, P. Kiden, M. Kleinherenbrink, E.W. Meijles, M.D. Palmer, R. Rietbroek, R.E.M. Riva, E. Schulz, D.C. Slobbe, M.J.R. Simpson, P. Sterlini, P. Stocchi, R.S.W. van de Wal, M. van der Wegen. 2018. Sea-level change in the Dutch Wadden Sea; Netherlands Journal of Geosciences Volume 97, pag. 79-127.
- 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.
- 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. B. van Maren, J. Marsh & A.C. van der Lelij. 2017. Effectiveness of the mud motor near Koehool; Results and interpretation of a tracer study. Deltares rapport 1209751-004-ZKS-0001.
- W.A. Casparie & 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.
- 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.
- 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 Ongenoemde. 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.

KAARTEN

Vesconte, P., 1325. Atlantic map –Noordzee, British Library.

Abraham Cresques, 1375. Atlas Catalan", Portulano atlas, BNP, Ms Espagnol 30. Depicted in Mecia de Viladestes, 1413. Balthic to Niger, Portulano, 1 page, BNP, Res. Ge AA 566. Depicted in De la Ronciere & Mollat du Jourdin (1984).

Petrus Roselli, 1462. Atlantic, Mediterranean and Black Sea, manuscript Portulano, 1 page, BNP, Res. Ge C.5090. Depicted in Lang (1955, 1958) & Koeman (1985). The chart is one of the first known, giving a fairly accurate depiction of the Dutch coast and the Wadden Sea.

Swart, J., 1883: Noordzee van Texel tot de Elbe en Weser; Wed. G. Hulst van Keulen, Amsterdam.

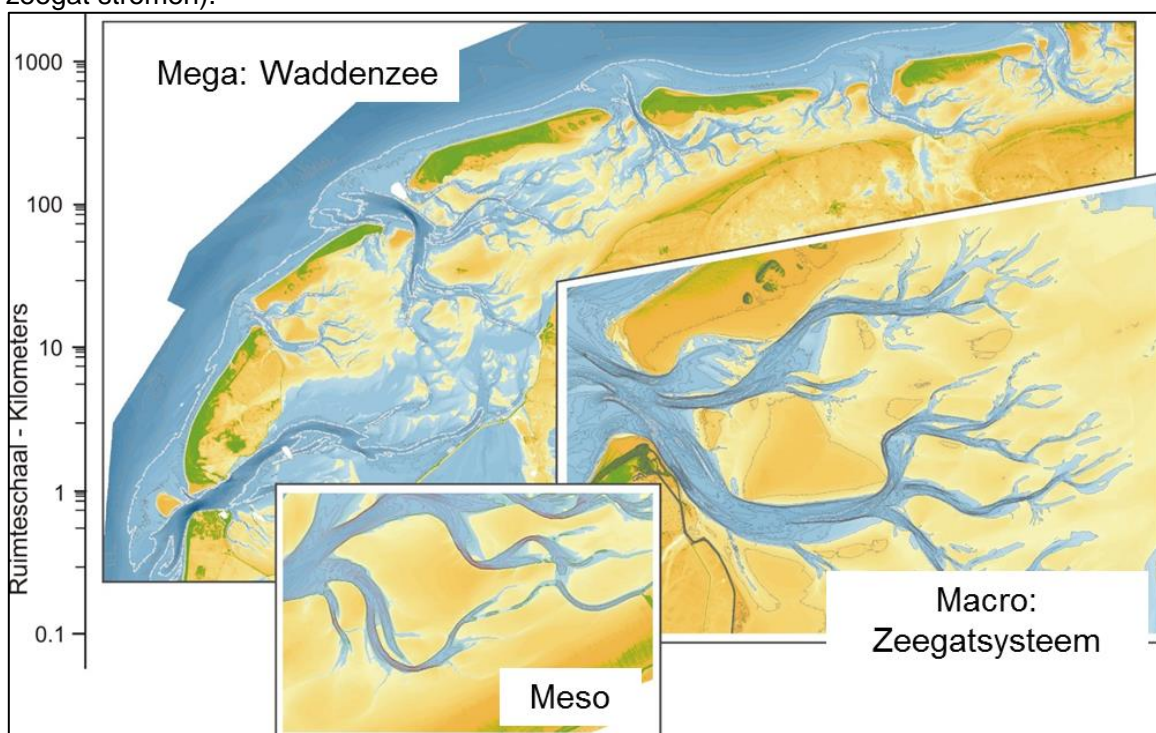
A Bijlage A. Morfologische schaalniveaus en eenheden

Morfologische schaalniveaus

Dit rapport volgt de benadering dat kijken naar verschillende tijd- en ruimteschalen nodig is om begrip van de morfologische ontwikkeling te krijgen (Figuur 9-1). 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., 2015).

De *megaschaal* is de grootste schaal, en bestrijkt het hele Waddengebied (zie Figuur 9-1), 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, welke bestaat uit buitendelta, eilanden en bekken of kombergingsgebied (Figuur 9-2). 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 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).



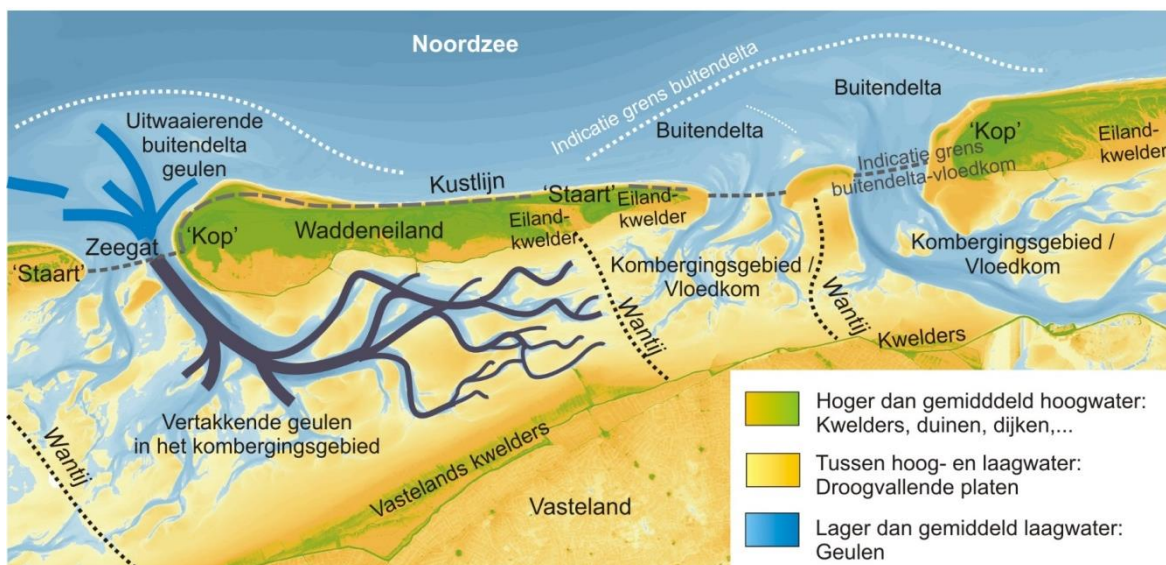
Figuur 9-1 Illustratie van de drie morfologische schaalniveaus (Janssen e.a., 2017).

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.

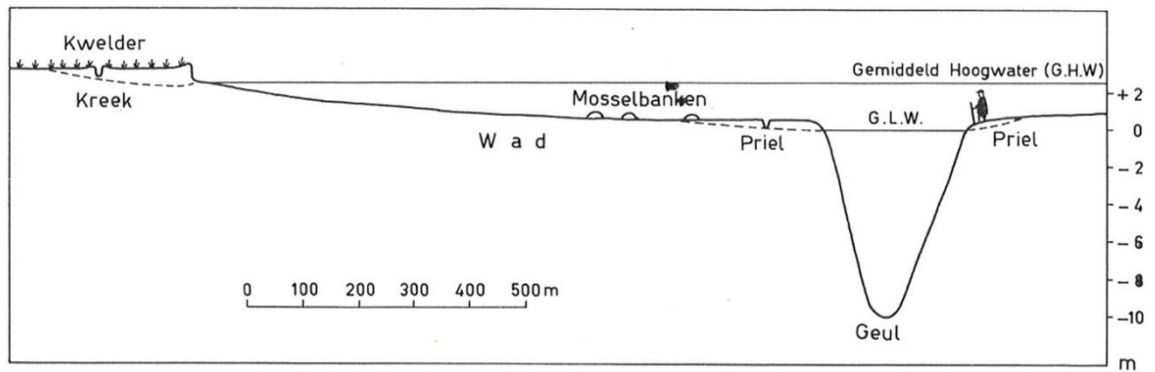
Tenslotte is er de kleinste ruimtelijke schaal: de *microschaal*. Hierbij wordt de ontwikkeling van fenomenen als zandribbels bestudeerd. Voor de vragen vanuit beleid- en beheer is een uitweiding op deze schaal nu niet van belang.

Eenheden op de mesoschaal

Een 'modelkombergingsgebied' met de verschillende morfologische eenheden in de Waddenzee is opgenomen in Figuur 9-2. 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 9-3.



Figuur 9-2 Namen van morfologische eenheden in een 'zeegatsysteem' (uit Janssen, 2017).



Figuur 9-3 Schematische dwarsdoorsnede door de kwelder, wadplaat en getijdegeul, met in de stippellijnen de insnijding van kreek en priel, uit Van Straaten, 1964.

B Bijlage 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 dit alles 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.

De Romeinse periode: het Flevomeer (400BC – 100AD)

Tijdens de Late IJzertijd en Vroeg Romeinse periode (400vC – 100nC) bestond het huidige Zuiderzee-gebied 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 7m/s) dat in een zeer korte tijd de opening zich sterk zou verwijden. Het zou logischer zijn 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 het 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 m³/s moet gedacht worden aan een lengte van 1 tot 20 km bij een oppervlakte van 300 tot respectievelijk 1500 m². 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^e-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 B9-1 "Grebbe verdrongen stad" zeewaarts van Wieringen, kaart van ca. 1730, handgemaakte kopie gebaseerd op de kaart van Witsen, 1712.

Vroege tot Hoge Middeleeuwen: Aelmere en Vlie-estuarium (450 -1000 AD)

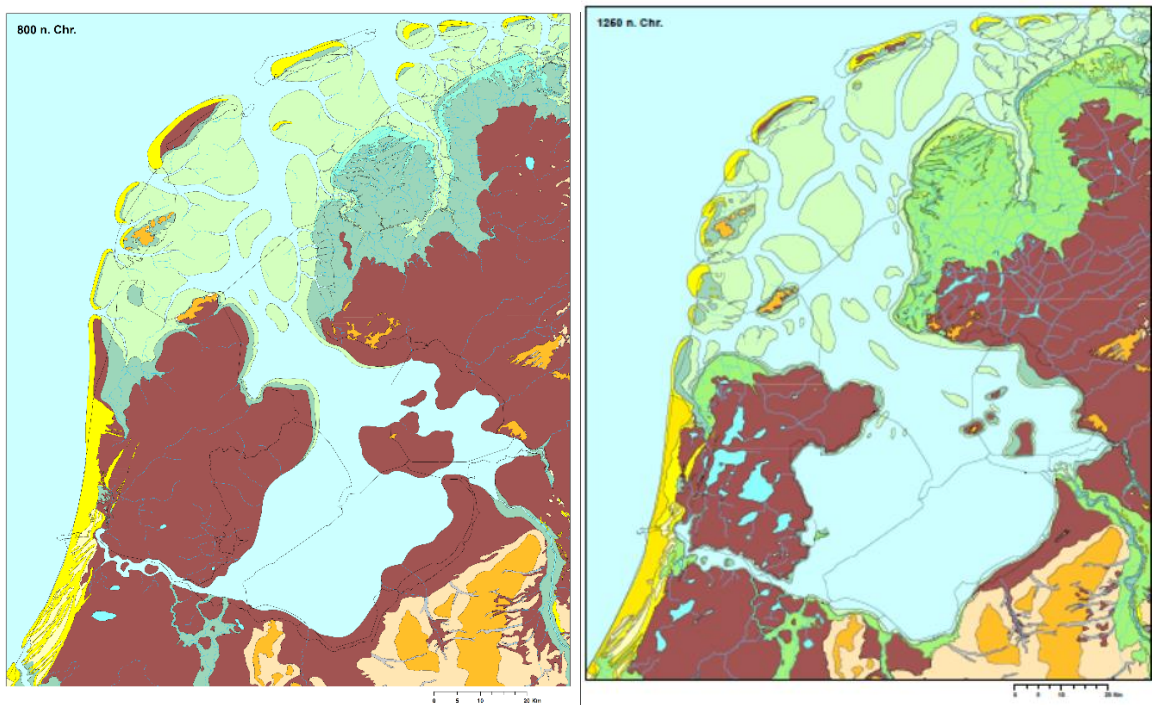
Algemeen

De reconstructie voor 800 AD van Vos (2018) geeft een compleet ontwikkeld getijdesysteem te zien met een getijde lagune met daarachter, langs de lijn Urk-Enkhuizen, een veenrug met een relatief smalle opening in 800 AD (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, in prep.).

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 2-1) 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 9e eeuw echter mogelijk tot 10 km verder zeewaarts uit (Schoorl, 1979). Vanaf de veengebieden oostelijk ervan liepen naar het westen veenstromen, 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 Waddengebied van het kombergingsgebied Marsdiep nog

grotendeels zoet was. Dit wordt ook ondersteund door waarnemingen. Getijde-invloed reikte waarschijnlijk tot ongeveer Den Helder, waar onder een 12^e-eeuwse terp geulafzettingen waargenomen zijn (Woltering, 1997). Viereneenhalf kilometer naar het oosten op het huidige Balgzand was het gebied nog bewoond in de 8e, 9e en 11e-12e eeuw (Woltering, 1997).



Figuur B-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.

Vlie: een estuarium?

Het is vrij waarschijnlijk dat het Vlie nog tot in de 9^e-10^e 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.

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^e 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 getijdedemping vermoedelijk zeer groot zijn geweest. Mogelijk kon al wel in de ZW hoek rond Amsterdam zout doordringen in de 8^e-9^e eeuw getuige de kwelderafzettingen bij Poppendam, en Ilperveld (Bakker & Van Smeerdijk, 1982; Borger en 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 geeft 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 1250¹⁴ (Van der Aa, 1837-1854). Voor een nauwe doorgang moet wel sprake zijn geweest van een of meerdere barrières tussen het Aelmeer 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. Er mee in tegenspraak lijkt de 7^e-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^e-eeuwse Zuiderzee nog een nauw gebied was, waarbij duidelijk erosie is opgetreden en een ondiepte aanwezig is voor de kust tussen Enkhuizen – Oosterdijk;
3. een barrière tussen Enkhuizen en Urk. Argumenten deels als bij 2) en Urk was groter dan tegenwoordig.



Figuur B-3 Aftekening van de Sawley map 1110 met herkenbaar Holland en Friesland met een opening ertussenin, wat als het Aelmeer/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^e eeuw rondom tenminste het westelijke IJsselmeergebied (Acker Stratingh, 1866; Rienks & Walther, 1955; Van Giffen, 1964; Edelman, 1974; Schrickx

¹⁴ 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)."

et al., 2014). In het gebied tussen Amsterdam en Edam trad landverlies vroeg op, vóór de 12^e 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.

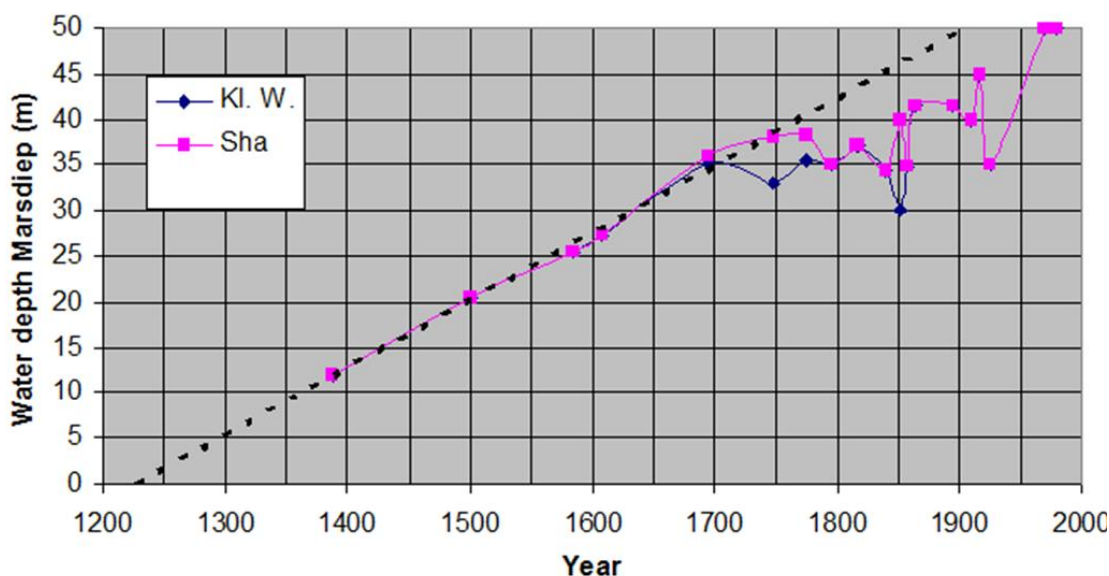
Hoge tot Late Middeleeuwen: Het doordringen van de zee (1000-1500 AD)

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-invoel naar het zuiden toe en vormde de Zuiderzee zich. Deze sterke ontwikkelingen leidden tot een drastische verdieping van het gehele gebied.

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 getijdewater (Oost et al., 2003b). Terug-extrapolerend op grond van maximale diepte-waarnemingen, zoals getoond in Figuur B-45 en berekende getijddevolumes, die zijn getoond in Figuur B9-56 zou het Marsdiep als zeegat aanwezig kunnen zijn geweest rond 1220 of zelfs eerder (Oost et al, 2003b). Het is waarschijnlijk dat zout getijdewater via het Marsdiep al vanaf ca. 1100 het huidige kombergingsgebied van het Marsdiep begon in te dringen, rond 1200 het Balgzand had bereikt¹⁵. 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 getijddevolume van het Marsdiep was waarschijnlijk nog zeer bescheiden (Figuur B9-56).

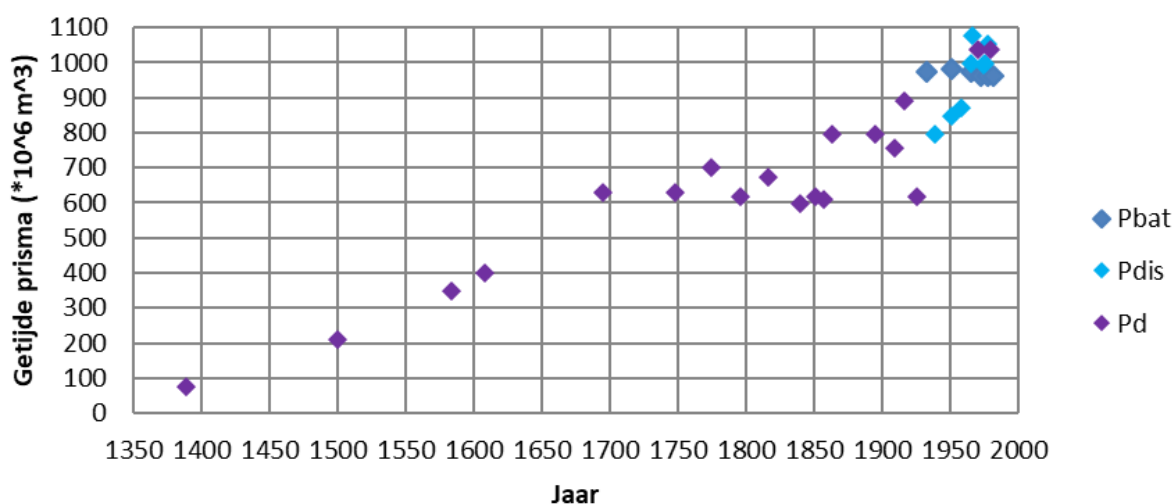


Figuur B-45 Ontwikkeling maximale diepte van het Marsdiep sinds 1388 (deze laatste meting is vrij onzeker), (data: Sha, 1990; Klein Wassink, 1991 & Schoorl, 1999a in Oost et al., 2003b).

De uitbreiding in oostelijke richting van de getijde-invoel van het Marsdiep leidde tot een sterke verandering in de westelijke Waddenzee en het huidige IJsselmeergebied (Edelman, 1964;

¹⁵ 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).

Schoorl, 1973, 1999a; Eisma & Wolff 1980). Het zoute, zuurstofrijke en dynamische getijdewater 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 uitbreiding¹⁶. 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).



Figuur B9-56 Ontwikkeling berekening getijdenvolume 1388-1982 gebaseerd op maximale diepte (Pd), afvoermetingen (Pdis) en diepte komberging*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 ZW 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 getijdeprisma 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.

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 3-4) in een kombergingsgebied met vertakkende geulen zonder duidelijke eb- of vloed voorkeur. Daarbij raakten waarschijnlijk grote delen van de

¹⁶ 1303: Stavoren noemt Marsdiep als een haven; Schoorl 1999a; 1325: Marsdiep en Vlie worden verbonden weergegeven op een zeekaart van Vesconte.

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 Kornwerderzand Sluizen (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.

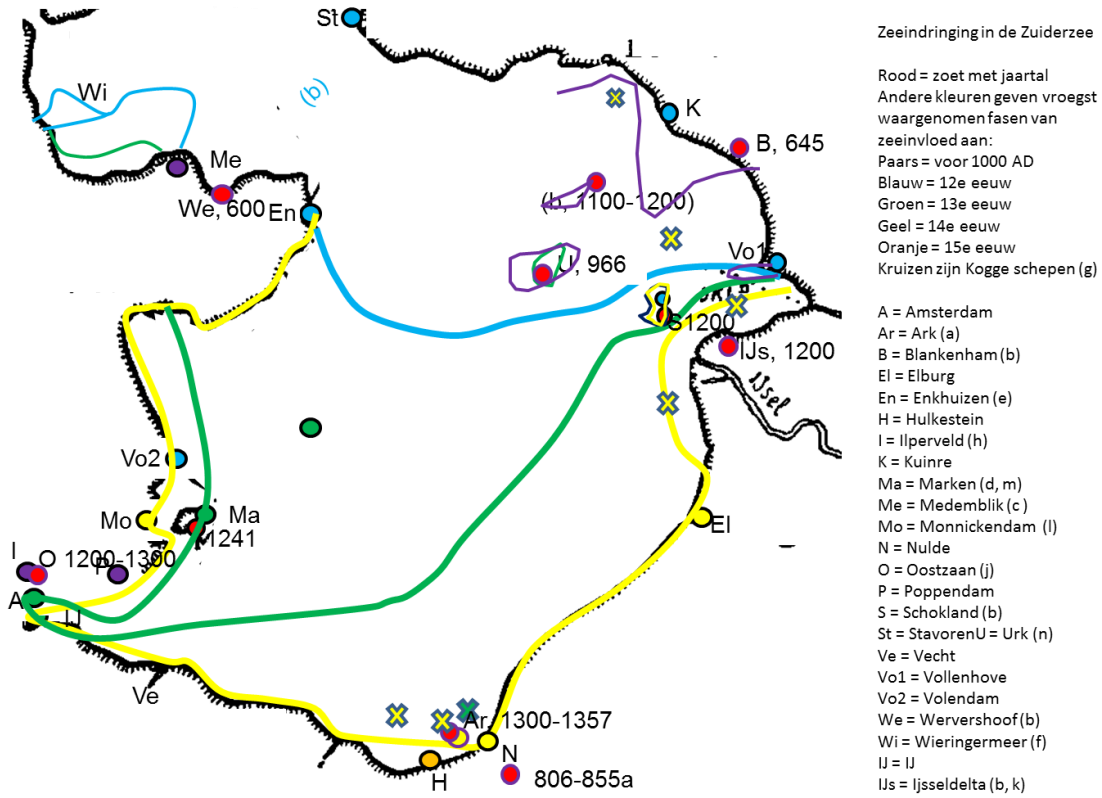
Ook bij het Vlie heeft het opruimen van de veenpakketten geleid tot vergroting van het kombergingsgebied en daarmee waarschijnlijk tot vergroting van het getijdvolume. De afname van de grootte van Griend wijst in die richting. Daarnaast zijn er tenminste 8 historische bronnen, legenden en namen die wijzen op veendoorgraving en/of landverlies in het gebied tussen Vlie en Texel¹⁷. Hoewel de betrouwbaarheid van deze verhalen wordt betwijfeld sluiten ze qua timing en locaties goed aan op de bovenbeschreven veranderingen.

Van Aelmere naar Zuiderzee

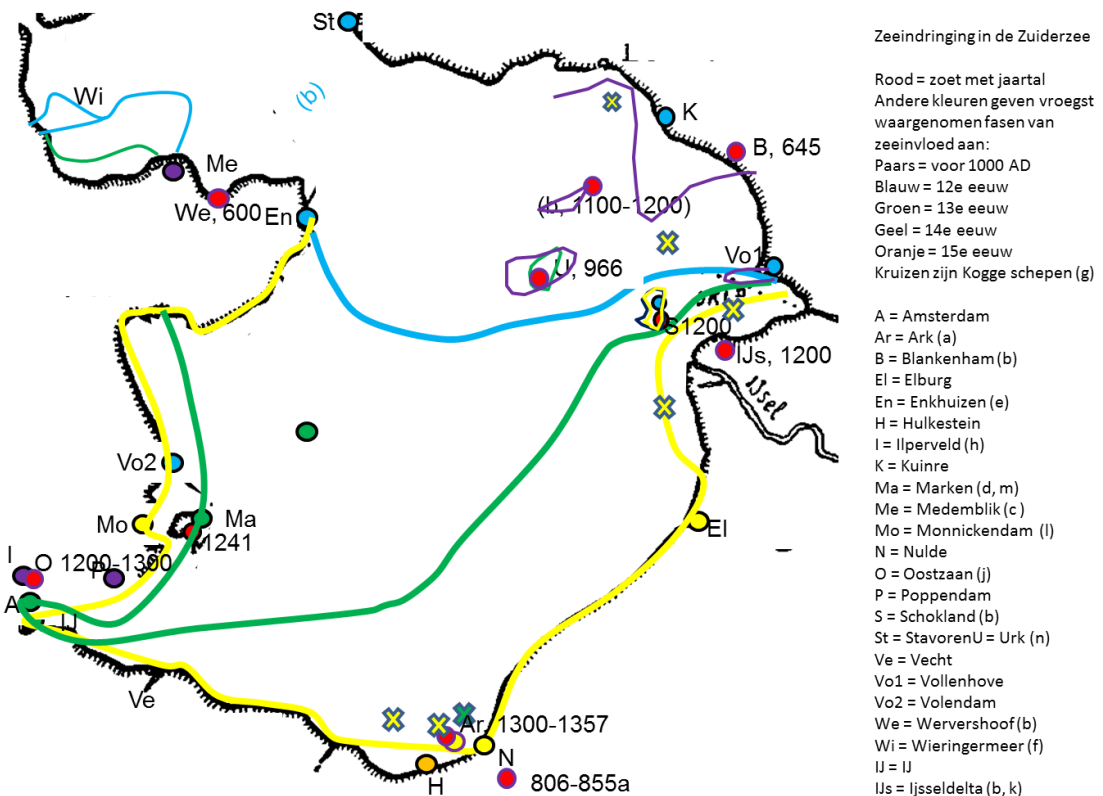
Tot deels in de 14e eeuw was er sprake van afnemende oppervlakken land in grote delen van: het Wieringermeer gebied; het Hoornse Hop; nabij Amsterdam; de Noordoostpolder (bewoond rond Nagele en Emmeloord; van Popta, in prep.); en zuidelijk van de IJsseldelta. Het (schier-)eiland Schokland was al bewoond in de 8e eeuw en oorspronkelijk tenminste 24 km² groot (Wiggers, 1955; Hogestijn, 1992; Koopstra et al., 1993; van Popta, in prep.). 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 de relatief steile randen dat ook daar erosie moet zijn opgetreden. Dit kan deels ook al tijdens de meer-fase van het Aelmere zijn gebeurd.

¹⁷ 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).

Als de beschikbare informatie in rij en gelid wordt gezet voor het voormalige Zuiderzeegebied dan lijkt het erop dat zee-invloeden zich zuidwaarts uitbreidden vanaf de 12e tot en met de 15e eeuw (



Figuur B-67). Lokaal op plaatsen met veel rivierafvoer (IJssel, Overijsselse Vecht) was het water nog lange tijd zoet.



Figuur B-67 Oudste waarnemingen van zeeïnvloed 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 Aemere Hoog opende door de invasie van de zee. De aanzet kan al zijn gegeven tijdens het middeleeuws klimaatoptimum tussen de late 9e en 13e 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 extreme 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 Aemere 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: "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." (Van der Aa, 1837-1854).

Daarbij zal zich vermoedelijk in de 12-14^e eeuw zich een fase hebben voorgedaan waarbij de getijdeweg vanaf het Marsdiep ongeveer een kwart getijdeweg 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 geweest¹⁸. 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.

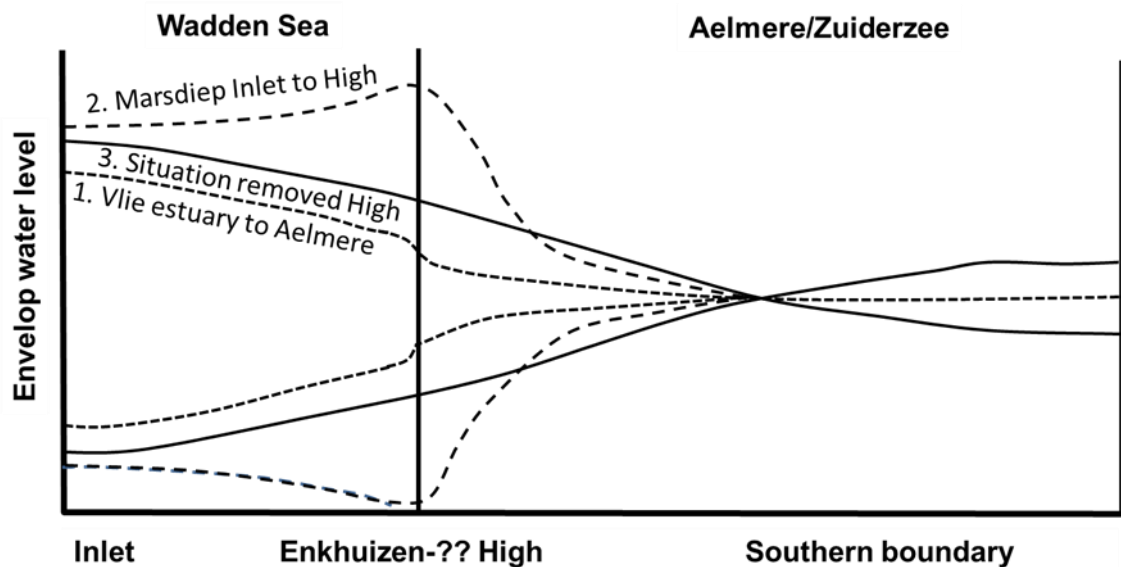
In de 12^e eeuw lijkt de uitbreiding van de invloed van de zee vooral de noordzijde betreffen tot ruwweg de lijn Enkhuizen tot Vollenhove. Tijdens stormvloed lijkt dan al erosie te zijn opgetreden o.a. W van Stavoren en in het Wieringermeergebied. In het uiterste ZW (Vecht, Utrecht en Volendam) wordt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

In de 13^e 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^e eeuw werd de invloed zeer duidelijk merkbaar in het ZO van de Zuiderzee. Gedurende deze uitruiming werd de getijdeweg vanaf het Marsdiep verlengd tot een halve getijd lengte. 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 (Enquete 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 getijdvolume 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

¹⁸ *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 (Gotschalk, 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 teruggelegd 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).*

dag van vandaag worden bij de Afsluitdijk op platen tijdens zware stormen nog steeds veenbrokken waargenomen die boven de golven worden uit getild.



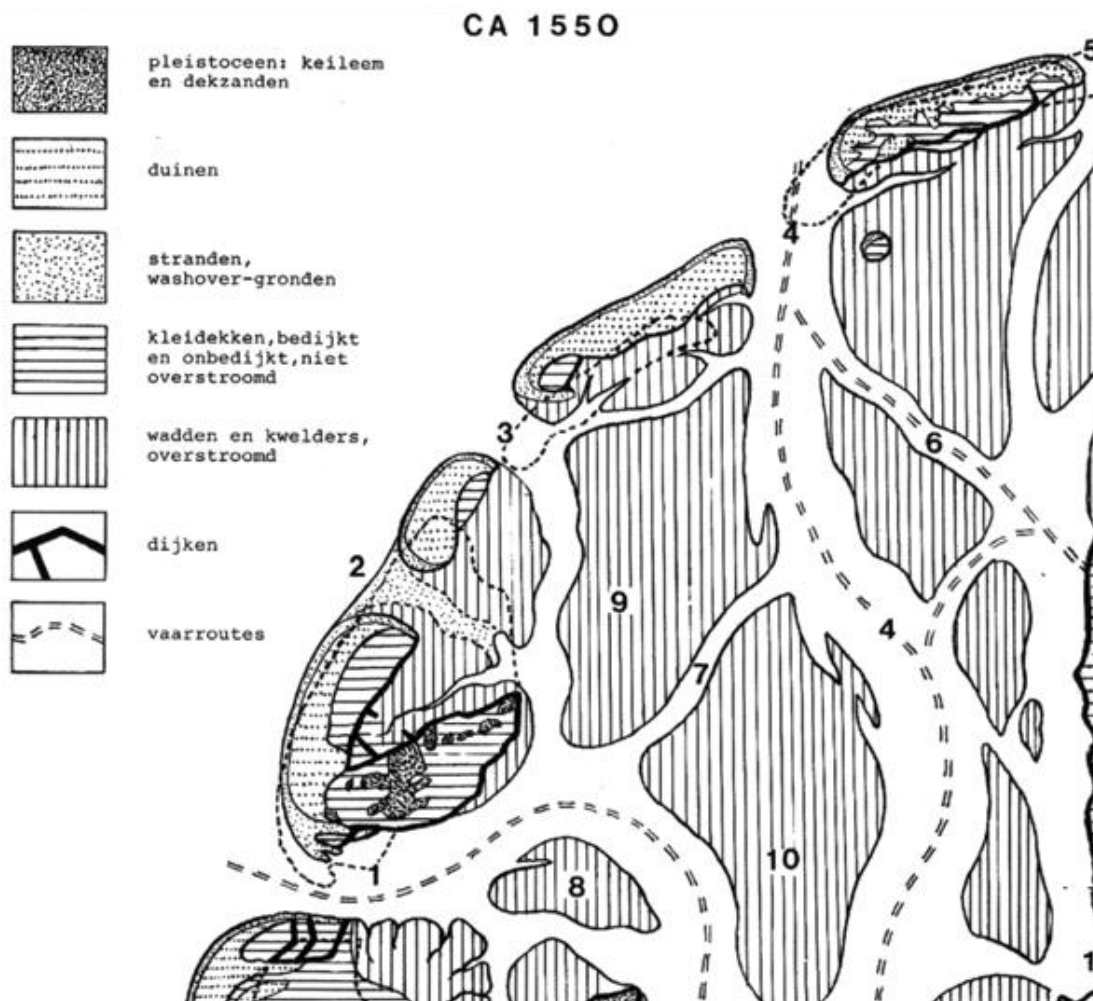
Figuur B-7 Schematische dwarsdoorsnede door de Zuiderzee vanaf de zeegeaten ("Inlet", links) naar de zuidelijke oevers (rechts), met de veronderstelde niveaus van hoog- en laagwater. 1 = Aelmeer met Vlie-estuarium; 2 = Situatie met verbinding Marsdiep tides tot Enkhuizen-Stavoren/ Urk Hoog; 3 = Marsdiep en Vlie samen verbonden met gehele Zuiderzeegebied (\approx 1926 situatie). Geïnspireerd 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 intergetijdeniveau. 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.

De moderne tijd: 1500-1900

Algemeen

Opvallend is dat behoudens het natuurlijke verleggen van geulen er weinig veranderde in het gebied. 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-8). Onduidelijk is in hoeverre dit mede bepaald werd door de –vanaf de 17^e 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-88 Het westelijk waddegebied rond 1550 A.D. Reconstructie van Schoorl (1999).

Marsdiep: toename getijdeprisma

De maximale diepte van het zeegat van het Marsdiep nam verder toe tot ca. 1700 en daarmee waarschijnlijk ook het getijdevolume (Sha, 1990; Figuur B9-56). Daarna is in de periode 1700-1850 er geen sprake meer van een toename. De oorzaak kan gelegen zijn in:

1. het beëindigen van belangrijke afname van veenafzettingen, waardoor het getijdevolume niet verder vergrootte;
2. het bereiken van een toestand waarin de aanzanding in het kombergingsgebied Marsdiep de zeespiegelstijging compenseerde;
3. een (tijdelijke) stop in de stijging van de zeespiegel, zoals ook te zien in de metingen van de getijde-hoogte 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);
4. 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);
5. een combinatie van bovenstaande.

Daarna gaat de toename weer verder (Figuur B9-56). De oorzaak daarvoor is onbekend. Ridderinkhof (2016) concludeerde op basis van theoretische modellen dat het kombergingsgebied Marsdiep sediment exporterend was voorafgaand aan de afsluiting door de grote lengte die het bekken had en de invloed daarvan op de getijdegolf.

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.

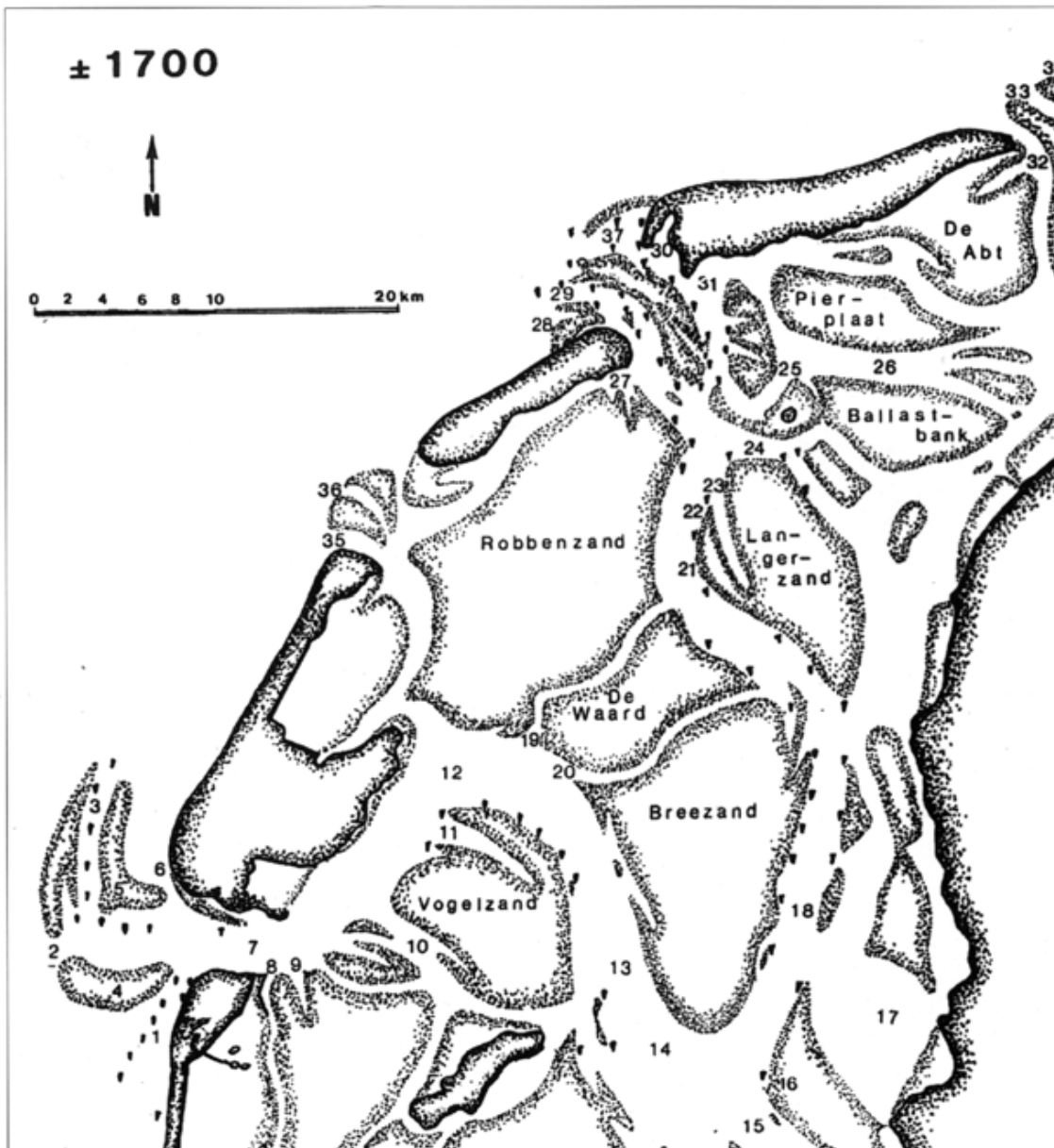
Direct na het zeegat van het Marsdiep splitste zich de geul de Balg af in zuidoostelijke richting. De Balg vertakte zich tot een geulenstelsel van west naar oost bestaande uit:

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

Het Zwin is een geulencomplex dat al vanaf tenminste het eind van de 16e eeuw continue aanwezig was. Eén van de geulen, de Wierbalg, was in de 16e eeuw al aanwezig. In de periode van 1816 tot 1838 ontstonden het Visjagers-gaatje en het Zuiderzwin. In de periode 1838 tot 1851 onderging het Visjagersgaatje 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 18e 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 oost-zuidoostelijke 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 Visjagersgaatje en de Wierbalg veranderde. Omstreeks 1896 resulteerde dit in het ontstaan van een nieuw Visjagersgaatje als aftakking van het Zuiderzwin.

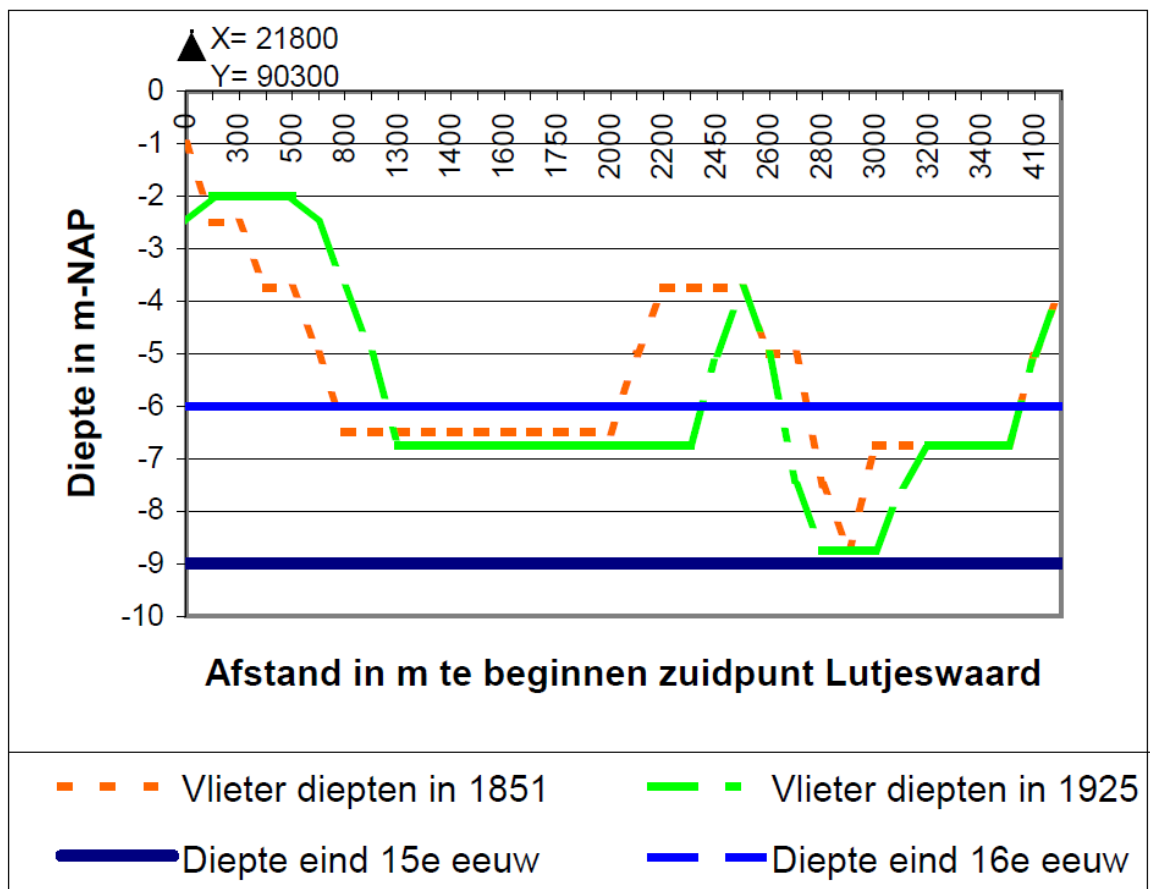
De Balg had in 1874 geen verbinding meer (binnen de 10 m –NAP-lijn) met de Texelstroom. Het opvullen ging daarna door: In 1908 was het oostelijke diepe deel verdwenen en opgevuld tot circa 7,5m –NAP. De Balg breidde zich verder uit in zuidelijke richting. In 1921 begon de Balg zich langzaam terug te 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 waddegebied 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. 0,6m -NAP zodat voor de diepte van de Vlieter rond het eind van de 16^e 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 meter 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^e eeuw (Figuur B-).

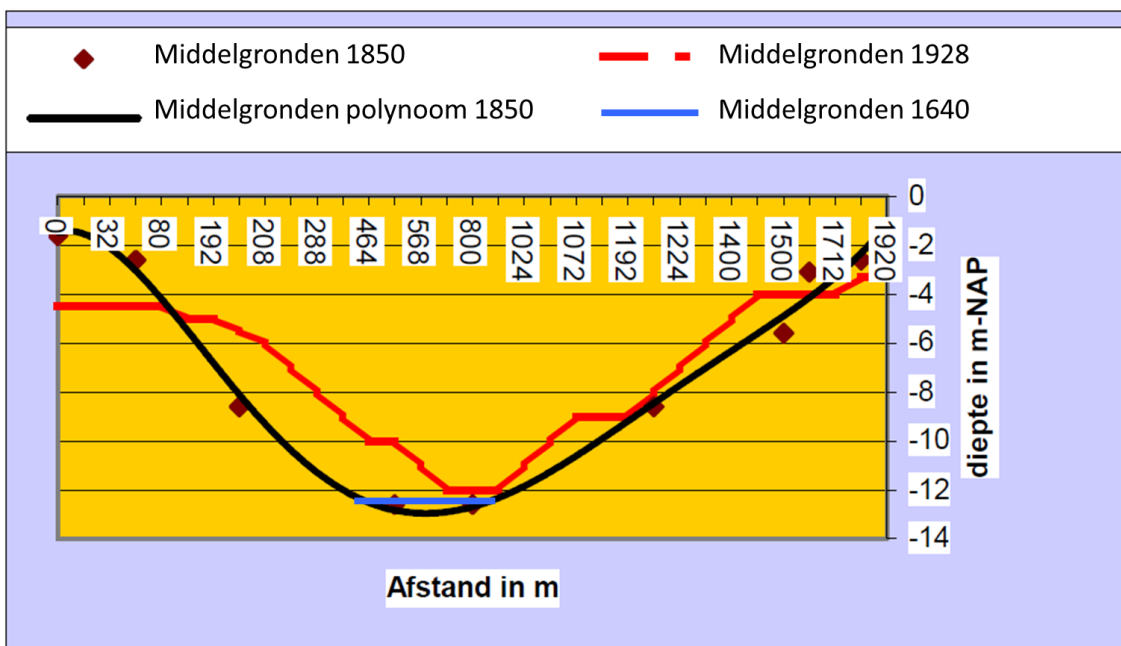


Figuur B-10 Overzicht van de diepteprofielen vanaf de zuidpunt van het Lutjeswaard naar het oosten. Diepten eind 15e eeuw (*sGrooten-kaart*) en diepten eind 16e eeuw (*Waghenaer*) lijken niet te zijn veranderd t.o.v. 1851 en 1925 (*Oost & Kleine Punte*, 2003).

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-NAP, 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.

Het Zeegat van het Vlie

Het Zeegat van het Vlie is 2 km verschoven in NO 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 -12,5m NAP (Schoorl, 1999b, p. 800). Uit het geconstrueerde dwarsprofiel is voor 1850 een diepte af te leiden van ca. 12,5 meter (Figuur B-). 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 -12m NAP en sprake was van een versmalling van de geul.



Figuur B-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 verhelen met de westzijde van Terschelling. De laatste grote plaat die zich rond het einde van de 19^e 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^e eeuw ten zuiden van Vlieland. Deze heeft aan het eind van de 19^e 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.

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 het eiland werd ontruimd. Veranderingen in deze periode waren verder relatief gering.