

Kombergingsrapportage Vlie

Overzicht van informatie en kennis van het fysisch systeem. Versie 2024



enabling delta life

Kombergingsrapportage Vlie

Overzicht van informatie en kennis van het fysisch systeem. Versie 2024

Auteur(s)

Carlijn Meijers

Met bijdragen uit eerdere kombergingsrapportages van

Albert Oost

Jelmer Cleveringa

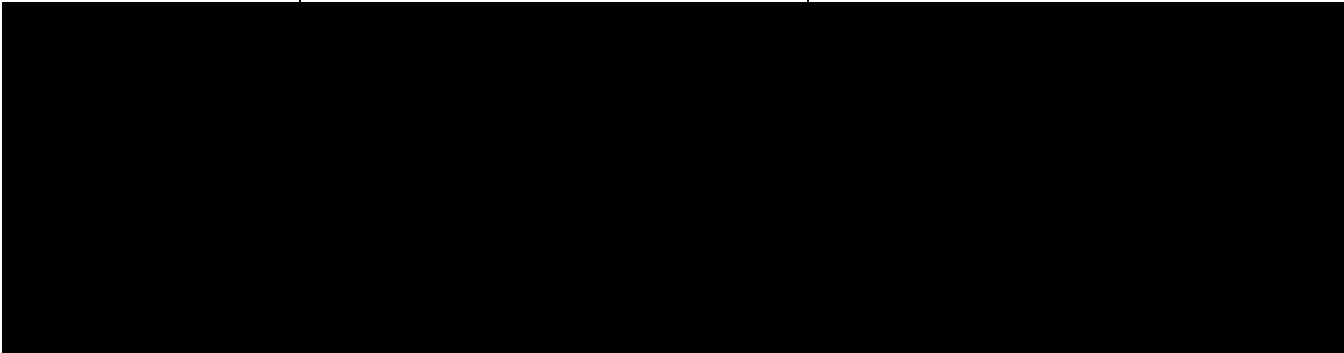
Marcel Taal

Kombergingsrapportage Vlie
Overzicht van informatie en kennis van het fysisch systeem. Versie 2024

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Martijn klein Obbink
Referenties	Referenties
Trefwoorden	Trefwoorden

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	28-01-2025
Projectnummer	11210370-001
Document ID	-
Pagina's	105
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)		
Carlijn Meijers		
Albert Oost		
Jelmer Cleveringa		
Marcel Taal		



Samenvatting

Dit rapport is de kombergingsrapportage van het bekken van het Vlie. Een kombergingsrapport heeft twee functies. Het bevat de actuele kennis van de morfologie en is een naslagwerk voor de beheerders van de Waddenzee (beheerbibliotheek). Het voorliggende rapport is een update van de versie uit 2019, die de bekkens van het Marsdiep en het Vlie in één rapport beschreef. Vanwege de behapbaarheid is besloten deze bekkens te beschrijven in twee separate rapportages. In deze update zijn inzichten uit de nieuwste studies verwerkt en zijn figuren geactualiseerd met de meest recente bodemdata.

In dit rapport wordt het Vlie besproken aan de hand van verschillende schaalniveaus, waarbij wordt begonnen met de grootschalige kenmerken van het hele bekken en in de daaropvolgende hoofdstukken wordt ingezoomd. Tot slot wordt de gehele ontwikkeling en systeemwerking van het Vlie samengevat in een conceptueel model in Hoofdstuk 9. Lezers die een overkoepelend beeld willen vormen van het systeemgedrag van het Vlie en de samenhang tussen verschillende ontwikkelingen willen begrijpen wordt aangeraden zich te richten op dit hoofdstuk. Het laatste hoofdstuk, Hoofdstuk 10, beschrijft de samenhang tussen de (morfologische) ontwikkelingen in het Vlie zoals beschreven in dit rapport en de belangrijkste gebruiksfuncties en beheervragen. Hier worden onder anderen waterveiligheid, bereikbaarheid van havens, natuur en schelpenwinning besproken.

Macroschaal (schaal van het bekken)

Hoofdstuk 3 beschrijft de hydrodynamica van het Vlie. Het bekken is sterk beïnvloed door de afsluiting van de Zuiderzee in 1932. Zo nam de getijslag bij Harlingen na de afsluiting met 40% toe en namen door de toegenomen getijslag ook de debieten door het zeegat in eerste instantie toe. De huidige trend is dat de debieten en stroomsnelheden juist licht afnemen, met name nabij de kust. Het zoutgehalte in het Vlie is zeer variabel en wordt sterk beïnvloed door de spuisluizen in de Afsluitdijk.

In Hoofdstuk 4 wordt de morfologische ontwikkeling van het Vlie besproken, waarbij eerst wordt ingegaan op de historie vanaf het ontstaan van een gedeeld bekken van het Marsdiep, Vlie en de Zuiderzee (§4.1 en bijlage B). De afsluiting van de Zuiderzee had een grote invloed op het bekken: de wantijen verplaatsen in (noord)oostelijke richting, er ontstond een nieuw morfologisch wantij tussen het Marsdiep en het Vlie en geulen die vroeger doorliepen naar de Zuiderzee trokken zich terug (§4.2). De geulen in het zuiden en westen van het Vlie nemen hierdoor nog altijd in omvang af (§4.3).

In sedimentbalansen die zijn opgesteld voor de Waddenzee is te zien dat de afsluiting van de Zuiderzee zorgde voor een trend van sedimentimport in het bekken (Hoofdstuk 5, §5.1). Dit leidde tot sedimentatie en een toename van het plaatareaal, wat gepaard ging met een afname van het subgetijdegebied. Deze trend was het sterkste in de decennia na de afsluiting en is sindsdien afgezwakt, al importeert het bekken nog steeds netto sediment. Wanneer de volumeverandering in meer detail wordt bekeken valt op dat met name de plaatgebieden dichtbij de Friese kust toenemen in volume, oppervlakte en hoogte, terwijl centraal in het bekken en nabij de eilandkusten juist sprake is van erosie (§5.2).

Mesoschaal (schaal van geulen en platen)

In de hoofdstukken die hierop volgen wordt ingezoomd op individuele elementen zoals geulen, platen en kwelders. Hoofdstuk 6 beschrijft de ontwikkelingen van de belangrijkste getijgeulen, waaronder de geulen waar baggeronderhoud plaatsvindt, op volgorde van nabij het zeegat tot achterin het bekken. Hoofdstuk 7 behandelt vervolgens enkele belangrijke en kenmerkende

wadplaten: de Richel en Engelschhoek nabij het zeegat, die worden gevoed door een sterke aanvoer van sediment vanuit de buitendelta. Grienderwaard in het centrale deel van het bekken kent een erosieve trend, terwijl de Vlake van Oosterbierum en Ballastplaat nabij de Friese kust juist sterk ophogen en uitbreiden, waarbij de slibgehaltes toenemen. Tot slot wordt een overzicht van de belangrijkste kwelders (zowel vastelands- als eilandkwelders) en hun ontwikkeling gegeven in Hoofdstuk 8.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Kennisbasis morfologie Waddenzee	9
1.2	Achtergrond en doelstelling	9
1.3	Update van 2024	10
1.4	Leeswijzer	10
2	Grootschalige kenmerken	12
2.1	Gebiedsbeschrijving	12
2.1.1	Samenhang tussen kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep	13
2.2	Areaalontwikkeling	13
2.2.1	Keuze voor begrenzing	13
2.2.2	Ontwikkeling van areaaltypen	15
2.3	Hypsometrie	16
3	Hydrodynamica	18
3.1	Waterstanden	18
3.2	Stroomsnelheden en debieten	19
3.3	Relatieve zeespiegelstijging	21
3.4	Zoetwaterafvoer en saliniteitsverdeling	23
4	Langjarige morfologische ontwikkelingen	25
4.1	Ontstaan westelijke Waddenzee	25
4.1.1	Voor en tijdens de Middeleeuwen	25
4.1.2	Vanaf 1100 tot de 20 ^{ste} eeuw	25
4.2	De afsluiting van de Zuiderzee	26
4.2.1	De afsluiting en het effect op het getij	26
4.2.2	De ontwikkeling van het wantij	27
4.3	Recente morfologische ontwikkelingen	29
5	Sedimentbalans en volumeveranderingen	31
5.1	Sedimentbalans van de westelijke Waddenzee	31
5.1.1	Sedimentvolumes	31
5.1.2	Slibsedimentatie	32
5.2	Volumeveranderingen in het bekken vanaf 1992	33
5.2.1	Volumeveranderingen totale kombergingsgebied	34
5.2.2	Volumeverandering geulen (Referentievlak: NAP -3m)	34
5.2.3	Droogvallende platen	35
6	Getijgeulen	37

6.1	Schuitengat en Slenk	39
6.2	Zuiderstortemelk en Vliesloot	41
6.3	Blauwe Slenk	43
6.4	Geul langs Pollendam	45
6.5	Kimstergat	47
7	Wadplaten	50
7.1	Vlakte van Oosterbierum	51
7.2	Richel en Engelschhoek	53
7.3	Griend en Grienderwaard	56
8	Kwelders	59
8.1	Overzicht	59
8.2	Griend	61
8.3	Koehoal – Westhoek	61
8.4	Kwelders bij Terschelling	62
9	Conceptueel denkmodel systeemgedrag	63
9.1	Schaal westelijke Waddenzee	63
9.2	Schaal bekken	65
10	Relatie morfologie en gebruiksfuncties	68
10.1	Veiligheid tegen overstromingen	68
10.2	Bereikbaarheid: vaarwegen en havens	69
10.3	Natuur	71
10.3.1	Veranderingen in arealen	71
10.3.2	Waddenmozaïek	72
10.3.3	Zeegras	72
10.4	Overige gebruiksfuncties	73
10.4.1	Mosselpercelen en -cultuur en mosselzaadinvalinstallaties (MZI's)	73
10.4.2	Zand- en schelpenwinning	74
11	Bibliografie	76
A	Morfologische schaalniveaus en eenheden	80
A.1	Morfologische schaalniveaus	80
A.2	Morfologische elementen op de mesoschaal	81
B	Historische ontwikkeling westelijke Waddenzee	82
B.1	De Romeinse periode: het Flevomeer (400BC – 100AD)	82
B.2	Vroege tot Hoge Middeleeuwen: Aelmere en Vlie-estuarium (450 -1000 AD)	83
B.2.1	Algemeen	83
B.2.2	Marsdiep als veenstroom, zeegat of beiden?	83
B.2.3	Vlie: een estuarium?	85

B.2.4	Aelmere	85
B.3	Hoge tot Late Middeleeuwen: Het doordringen van de zee (1000-1500 AD)	86
B.3.1	Algemeen	86
B.3.2	Marsdiep: ontwikkeling van het 'zeegatsysteem'	86
B.3.3	Vlie: van estuarium naar kombergingsgebied	88
B.3.4	Van Aelmere naar Zuiderzee	89
B.4	De moderne tijd: 1500-1900	92
B.4.1	Algemeen	92
B.4.2	Marsdiep: toename getijdeprisma	92
B.4.3	Het geulenpatroon	93
B.4.4	Het Zeegat van het Vlie	95
B.4.5	Zuiderzee	96
B.5	De aanleg van de Pollendam	96
B.6	Referenties	97
C	Morfologische principes van getijgeulen	100
C.1	Getij stuurt geulvolume	100
C.1.1	Andere stromingspatronen	101
C.2	Kenmerkende geulvormen en -dynamiek	101
C.2.1	Eb- en vloedscharen	101
D	Overzicht kwelders	103

1 Inleiding

1.1 Kennisbasis morfologie Waddenzee

Rijkswaterstaat wil de morfologische kennisbasis voor het beleid en beheer op orde brengen en onderhouden. Hiervoor is een onderzoeksprogramma met Deltares ontwikkeld via de zogenaamde SITO-PS (Programma Subsidie). In dit onderzoeksprogramma 'Beheer & Onderhoud Waddenzee' 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 Achtergrond en doelstelling

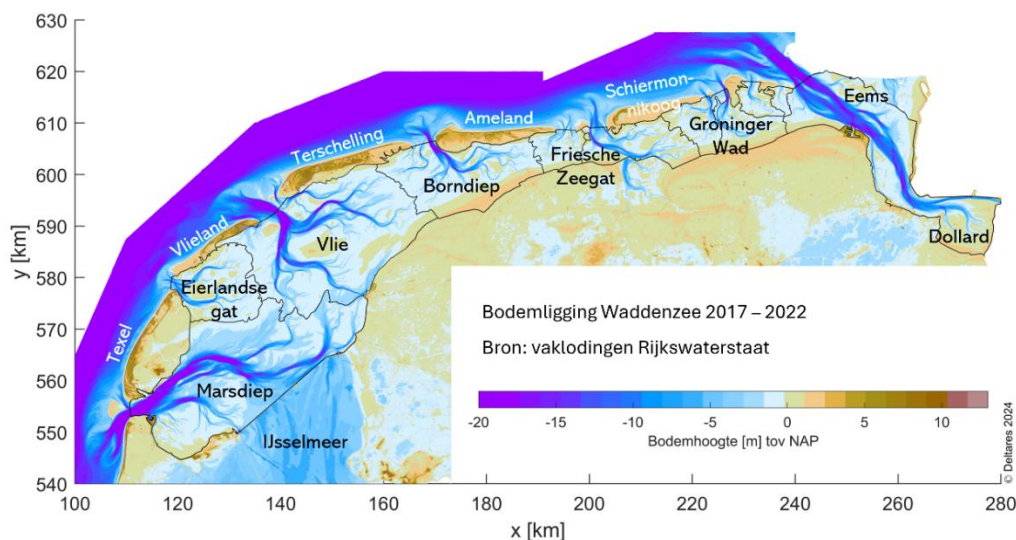
Voorliggend rapport is een update van de in 2019 uitgebrachte Kombergingsrapportage Marsdiep en Vlie. Bij deze update is besloten de rapportage voor het Marsdiep en het Vlie te scheiden. De gebieden zijn nauw met elkaar verweven en ondervonden beiden een grote impact van het afsluiten van de Zuiderzee, maar ontwikkelen zich ook meer en meer tot twee 'zelfstandige' bekkens. Voor de behapbaarheid van de rapportage is besloten twee losse documenten te maken.

De kombergingsrapportages zijn vergelijkbaar met de [beheerbibliotheken](#) die voor de Nederlandse kust zijn gemaakt¹. Met de nieuwe cyclus van kombergingsrapportages wordt de focus gelegd op het uniformeren van de rapporten, zodat informatie sneller kan worden teruggevonden en er één standaard ontstaat voor alle rapportages. Hiermee is begonnen in het kombergingsrapport voor het Marsdiep (Vroom, et al., 2023) en deze nieuwe structuur is ook in dit rapport vastgehouden.

Een kombergingsrapportage heeft twee functies:

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

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.

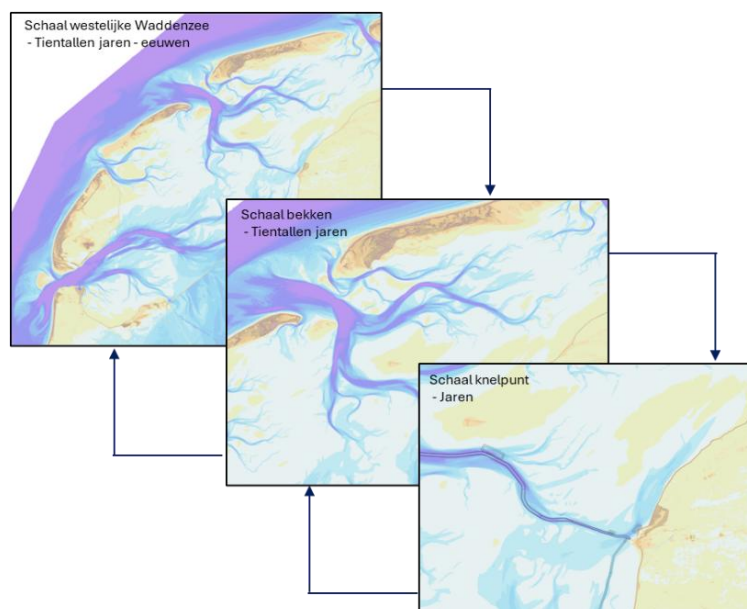


Figuur 1.1 De Waddenzee, haar kombergingsgebieden op basis van vaklodingen data opgenomen tussen 2017 en 2022.

1.3 Update van 2024

De belangrijkste veranderingen ten opzichte van de kombergingsrapportage in 2019 zijn het splitsen van het Marsdiep en het Vlie, en het toevoegen van een conceptueel denkmodel dat de systeemwerking van het gebied samenvat (zie Hoofdstuk 9). Verder zijn in deze update veel kaarten en grafieken geactualiseerd met de nieuwe bodemopname uit 2022 en beheerlodingen in de vaarwegen tot 2024. Ook is zoveel mogelijk aansluiting gezocht bij de indicatoren uit de in 2022 gelanceerde Digitale Systeemrapportage Waddenzee (www.systeemrapportage.nl/wadden). Relevante resultaten van een recente onderzoeken naar dit gebied die sinds de vorige kombergingsrapportage uit 2019 zijn verschenen zijn toegevoegd aan het rapport.

1.4 Leeswijzer



Figuur 1.2 Schaalniveaus aan de hand waarvan de ontwikkelingen van het bekken worden besproken.

In dit rapport wordt het Vlie besproken aan de hand van verschillende schaalniveaus (zie Figuur 1.2 en Bijlage A voor een uitgebreidere omschrijving van de verschillende schaalniveaus en morfologische elementen in de Waddenzee). Hoofdstuk 2 begint met het geven van een globaal overzicht over de grootschalige kenmerken en belangrijkste areaalontwikkelingen in het Vlie. Hierna wordt op de schaal van het bekken dieper ingegaan op de belangrijkste ontwikkelingen in de hydrodynamica (Hoofdstuk 3), de morfologie (Hoofdstuk 4, verdeeld in de historische ontwikkelingen vanaf het ontstaan van de westelijke Waddenzee tot de afsluiting van de Zuiderzee (paragraaf 4.1 en bijlage B) en daarna recente ontwikkeling (paragraaf 4.2 en 4.3)). Hoofdstuk 5 bespreekt de sediment- en volumebalans van het Vlie.

In de drie hoofdstukken die hierop volgen wordt ingezoomd op de morfologische eenheden op mesoschaal:

- Getijgeulen, op volgorde vanaf het zeegat tot achterin het bekken (Hoofdstuk 6), gekoppeld aan een algemene uitleg over de sturende principes achter de morfodynamiek van geulen in Bijlage C;
- Intergetijdenplaten, ook wel wadplaten (Hoofdstuk 7);
- Kwelders, van het vasteland en van de eilanden (Hoofdstuk 8, met een gedetailleerd overzicht van alle kwelders in het bekken opgenomen in de tabel in Bijlage D);

Hoofdstuk 9 bevat het conceptueel denkmodel van het systeemgedrag, dat de belangrijkste aandrijvende processen voor de morfologie in kaart brengt. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de belangrijkste ontwikkelingen die spelen in het Vlie en hoe deze elkaar beïnvloeden. Hierbij is ook een korte doorkijk naar de toekomstige ontwikkelingen opgenomen.

Hoofdstuk 10 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.

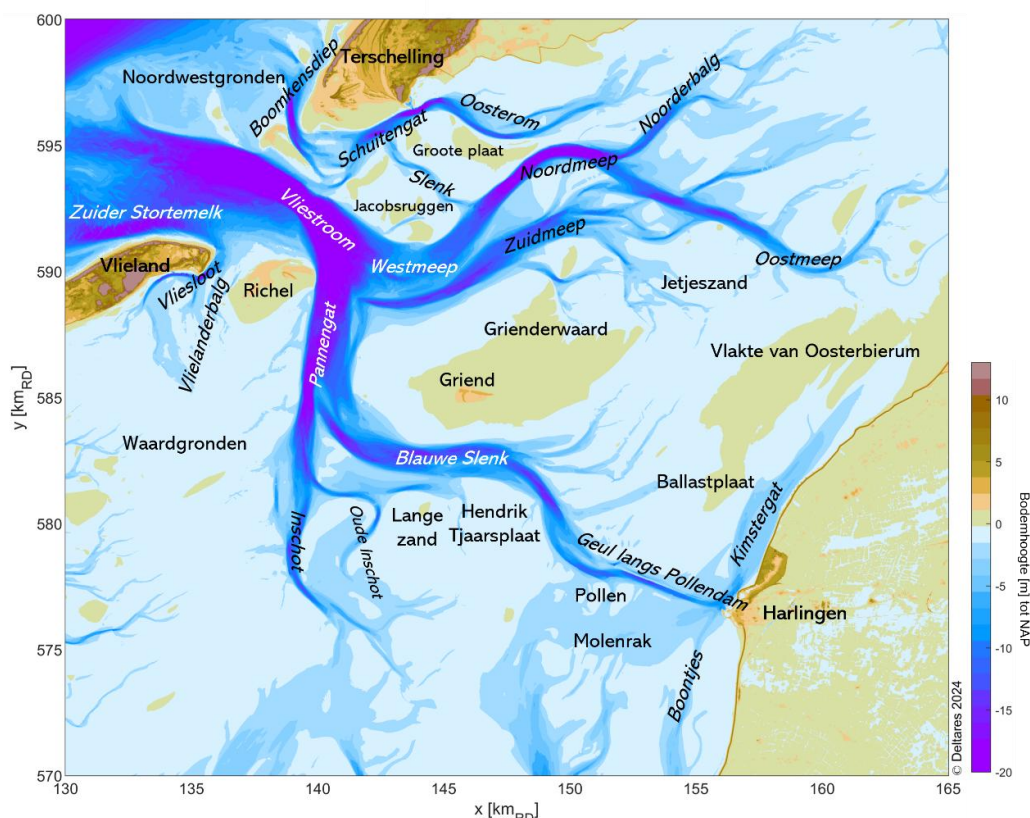
2 Grootschalige kenmerken

Het bekken van het Vlie is sterk veranderd na de afsluiting van de Zuiderzee. Het doel van dit hoofdstuk is om een eerste beeld te geven van het bekken (§2.1), en van de belangrijkste ontwikkelingen in arealen (§2.2) en bodemhoogte (§2.3). Voor een verdere verdieping en de achtergronden achter deze ontwikkelingen wordt verwezen naar de Hoofdstukken 4 en 5.

2.1 Gebiedsbeschrijving

De keel en buitendelta van het zeegat van het Vlie omvatten drie geulsystemen (Figuur 2.1). De centraal gelegen Vliestroom is de grootste. Langs de eilandkoppen bevinden zich de secundaire geulsystemen Zuiderstortemelk-Vliesloot en Boomkensdiep-Schuitengat. Het bekken bestaat uit twee primaire hoofdgeulen: de Mepen (Westmeep, Noordmeep, Zuidmeep en Oostmeep) in het oosten, en in het westen opeenvolgend de geulen Pannengat, Blauwe Slenk en Geul langs Pollendam, die de nautische verbinding vormen tussen de haven van Harlingen met de Noordzee en de eilanden Vlieland en Terschelling. De hoofdgeulen vertonen vele, kleinere vertakkingen. Het Pannengat maakt verbinding met de Blauwe Slenk, maar ook met de zuidelijk gerichte geulen Inschot en oude Inschot. Deze geulen in het zuidwestelijke deel van het bekken liepen vroeger deels door richting de Zuiderzee en zijn sinds de afsluiting voor een groot deel opgevuld met sediment.

De grootste wadplaatgebieden zijn de Grienderwaard, de Ballastplaat en de Vlakte van Oosterbierum, de Waardgronden (die worden gedeeld met het Eierlandse gat) en het Terschellinger wantij.



Figuur 2.1 Kombergingsgebied Vlie (bodem 2022).

2.1.1 Samenhang tussen kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep

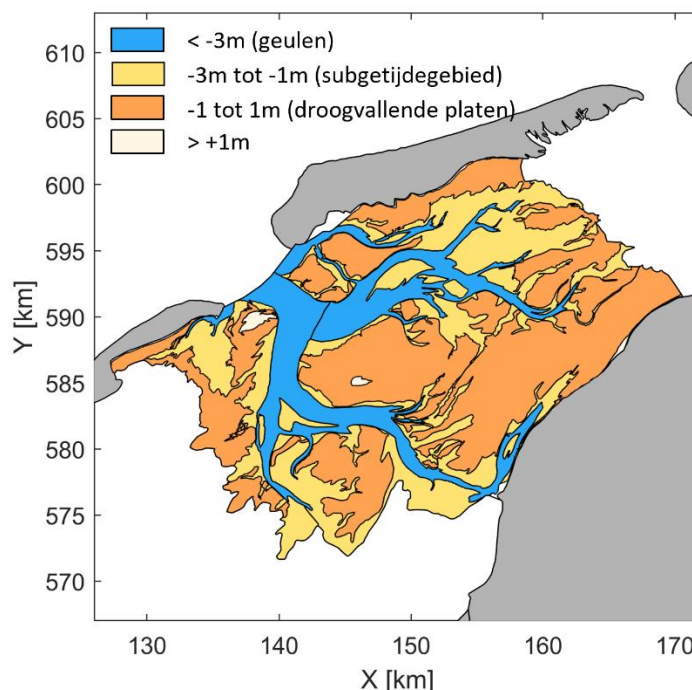
Omdat in het verleden zowel het Marsdiep als het Vlie in directe verbinding stonden met de Zuiderzee is er nog altijd een sterke uitwisseling van water en sediment 'achterlangs' tussen deze twee bekken (zie o.m. Elias et al., 2012, Elias & Vermaas, 2018 en Elias, 2019). In de situatie voor de afsluiting liepen de geulen van Marsdiep en Vlie van het ene naar het andere gebied. Studies naar de waterbeweging laten een uitwisseling van water zien tussen de beide kombergingsgebieden (Ridderinkhof, 1990; Vroom, 2011; Wang et al., 2013; Duran-Matute et al., 2014; Grasmeyer et al., 2022). Over de grens van beide kombergingsgebieden liggen sublitorale gebieden en er lopen geulen over het wantij (Figuur 2.1). Dit wantij heeft daarom een wezenlijk ander karakter dan dat van andere kombergingsgebieden, waar zulke geulen ontbreken.

2.2 Areaalontwikkeling

2.2.1 Keuze voor begrenzing

Een bekken kan worden verdeeld in verschillende areaaltypen zoals bijvoorbeeld 'geul' of 'plaat', gebaseerd op hoogteligging. In deze studie zijn de volgende begrenzingen aangehouden (Figuur 2.2), gebaseerd op de begrenzingen die worden gebruikt in de volumebalansen van Quataert et al. (2024) en de Beer et al. (2024):

- Dieper dan NAP -3m: Geulen
- Tussen NAP -3 en -1m: Subgetijdegebied, hieronder vallen bijvoorbeeld permanent onder water liggende platen en zeer ondiepe geulen
- Hoger dan NAP -1m: (Droogvallende) platen, ook wel intergetijdegebied

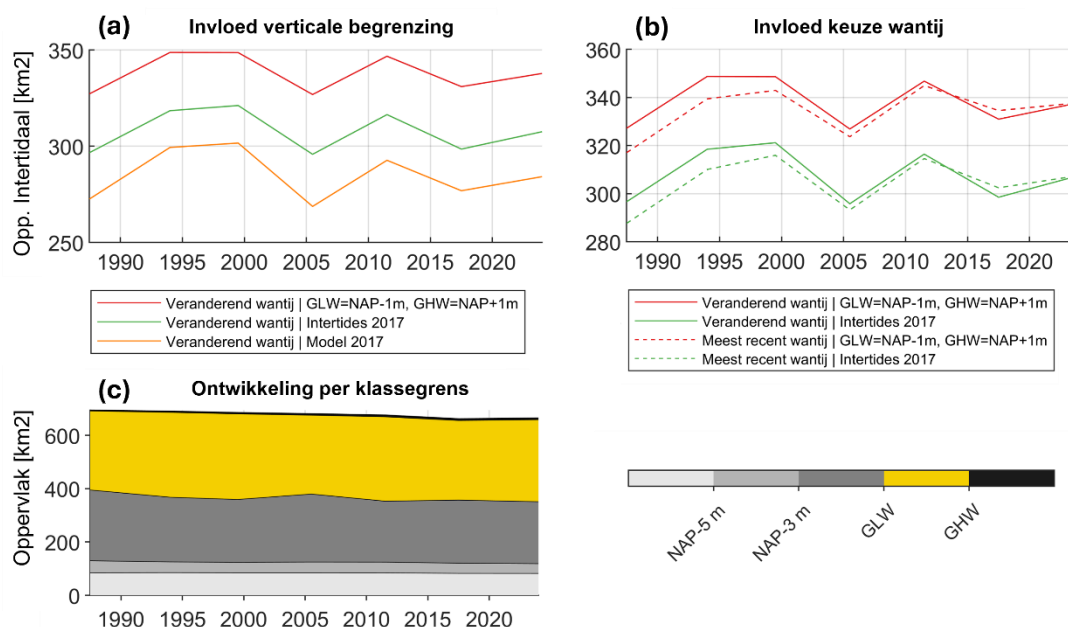


Figuur 2.2 Overzicht van de arealen geul (< NAP -3m), subgetijdegebied (NAP -3m tot -1m) en droogvallende platen (>NAP -1m) waarvoor de volumes zijn bepaald (kaart op basis van bodemdata 2022).

De keuze voor een verticale begrenzing is niet triviaal. In verschillende studies worden verschillende begrenzingen aangehouden. In de Digitale Systeemrapportage Wadden wordt de grens tussen geulen en subgetijdegebied bijvoorbeeld getrokken op NAP -5m en in

Quataert et al. (2024) op NAP -3m. De NAP -3m begrenzing uit Quataert et al. (2024) die in dit rapport wordt gebruikt is vastgesteld op basis van morfologische criteria: vanuit morfologisch oogpunt is het zinvol dat zoveel mogelijk van de vertakkende geultjes een onderdeel vormen van de klasse 'geul' ².

De grens tussen droogvallende platen en subgetijdegebied wordt vaak getrokken op NAP -1m als grove benadering van GLW. Wanneer één verticale begrenzing wordt aangehouden voor de gehele Waddenzee kan de morfologische betekenis van een begrenzing echter verschillen per kombergingsgebied, onder anderen omdat GLW varieert van NAP -0,8m bij Den Helder tot NAP -1,3m bij Eemshaven. In de Vet et al. (ongepubliceerd) is onderzocht hoe gevoelig de berekende arealen zijn voor de keuze van verticale begrenzing. Deze gevoeligheidsanalyse toont dat voor het Vlie het berekende plaatareaal (intergetijdegebied) met 10 tot 20% kan verschillen afhankelijk voor de keuze voor verticale begrenzing. Hoewel de absolute getallen verschillen zijn de trends echter gelijk voor alle begrenzingen (Figuur 2.3).



Figuur 2.3 Gevoeligheidsanalyse voor de keuze van begrenzingen voor het Vlie. a) Invloed van verticale begrenzing op het intergetijdegebied, dat is begrensd door respectievelijk de NAP -1/+1m contour (rode lijn), de ligging van GLW en GHW op basis van Intertides 2017 (groene lijn) en de ligging van GLW en GHW op basis van het DWSM D-Flow FM model (oranje lijn), b) invloed van vast of variërend wantij op het areaal intergetijdegebied, c) ontwikkeling per diepteklasse incl. het verschil tussen NAP -5m en NAP -3m (met variërend wantij en GHW en GLW obv. Intertides 2017). Figuren aangepast uit de Vet et al. (ongepubliceerd).

Een andere keuze moet worden gemaakt in het hanteren van een met de tijd variërende wantijligging of een vast wantij voor alle jaren (waarbij kan worden gekozen tussen een 'gemiddelde' wantijligging over alle jaren, het meest recente wantij³ of het wantij uit een specifiek jaar).

² Een praktijkvoorbeeld waarin het gebruik van de NAP -5m begrenzing voor een geul nadelen heeft kan bijvoorbeeld worden gevonden in de rapportage van de abiotische effecten van baggeren in de Waddenzee (de Wit et al., 2024). Hierin wordt het areaal geul gedefinieerd als dieper dan NAP -5m terwijl veel van de beschreven geulen waarin wordt gebaggerd in de Waddenzee ondieper zijn dan 5m (bijvoorbeeld de vaargeul Holwerd – Ameland en de Boontjes hebben een streefdiepte van NAP -3.8m en zouden volgens dit criterium niet meetellen in de analyses van het geulareaal).

³ Merk op dat het gebruiken van het meest recente wantij vraagt om het zorgvuldig documenteren van het gebruikte wantij en kan leiden tot inconsistenties tussen studies wanneer nieuwe lodingen beschikbaar komen en een nieuwe meting de meest recente is.

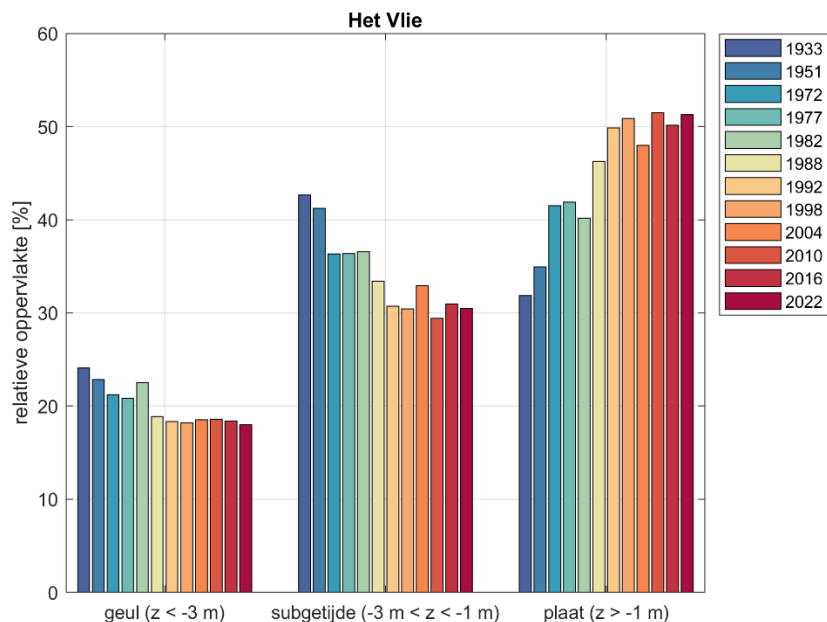
Het gebruik van een veranderend wantij representeert het areaal dat feitelijk onderdeel uitmaakt van het bekken en helpt om ontwikkelingen te duiden in termen van het (lokale) kombergingsvolume. Het gebruiken van een combinatie van een vast en veranderend wantij kan inzicht geven in welke veranderingen morfologisch van aard zijn en welke het gevolg zijn van veranderingen in het wantij. De gevoeligheidsanalyse toont dat het gebruik van een vast of variabel wantij voor het Vlie nauwelijks verschil maakt: met een vast wantij (op basis van de bodem van 2022) is de toename in intergetijdengebied sinds 1990 slechts enkele procenten groter vergeleken met een tijdsvariërend wantij (Figuur 2.3, de Vet, et al., ongepubliceerd). Daarom wordt in deze studie gebruik gemaakt van een in de tijd variërend morfologisch wantij, vastgesteld voor ieder jaar waarin vaklodingen zijn opgemeten op basis van verschillende indicatoren (oa. bodemligging, gradiënt en afstroomanalyse) door Wagenaar (2024).

2.2.2 Ontwikkeling van areaaltypen

De ontwikkeling in oppervlakte van het gehele bekken en van de verschillende arealen is weergegeven in Tabel 2-1 en Figuur 2.4. Door verplaatsing van de wantijen neemt het oppervlakte van het bekken af tussen 1992 en 2022 (zie ook Hoofdstuk 4.2.2). Tussen 1933 en 1992 is een sterke verschuiving te zien in de arealen: het aandeel geulen en subgetijdegebied neemt af en het aandeel platen neemt sterk toe als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee (Figuur 2.4). Na 1992 vlakt deze trend af en blijft de verdeling in arealen relatief constant.

Tabel 2-1 Ontwikkeling oppervlakte van het bekken en het aandeel van platen, geulen en subgetijdegebieden op basis van Quataert et al. (2024) en de variërende wantijen vastgesteld in Wagenaar (2024).

	Oppervlakte bekken	Geulen < NAP -3m		Subgetijde Tussen NAP -3m tot -1m		Platen > NAP -1m	
	[km²]	[km²]	[%]	[km²]	[%]	[km²]	[%]
1992	690,4	125,0	18,1	218,2	31,6	347,2	50,3
1998	685,0	123,3	18,0	214,4	31,3	348,7	50,9
2004	680,6	123,9	18,2	234,8	34,5	321,9	47,3
2019	675,8	125,0	18,5	211,5	31,3	339,3	50,2
2016	661,8	120,4	18,2	216,4	32,7	324,9	49,1
2022	664,8	119,0	17,9	214,7	32,3	331,1	49,8

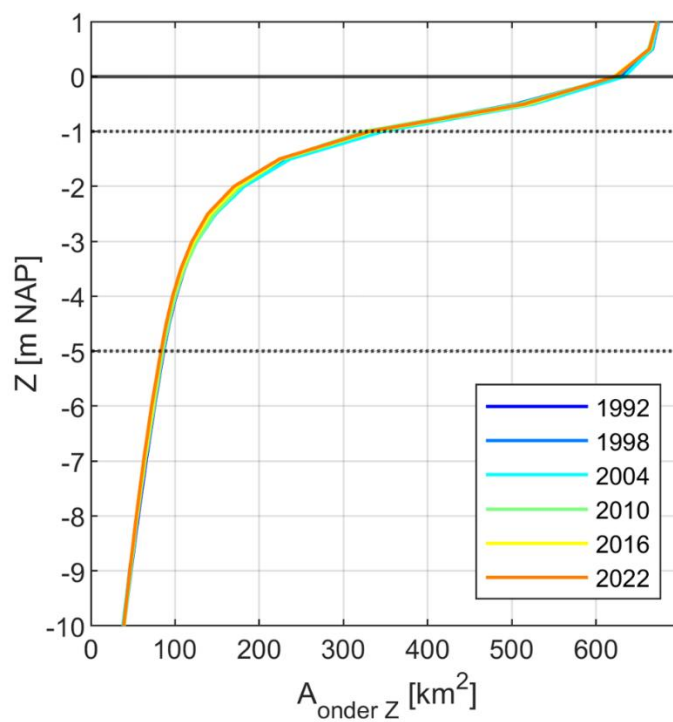
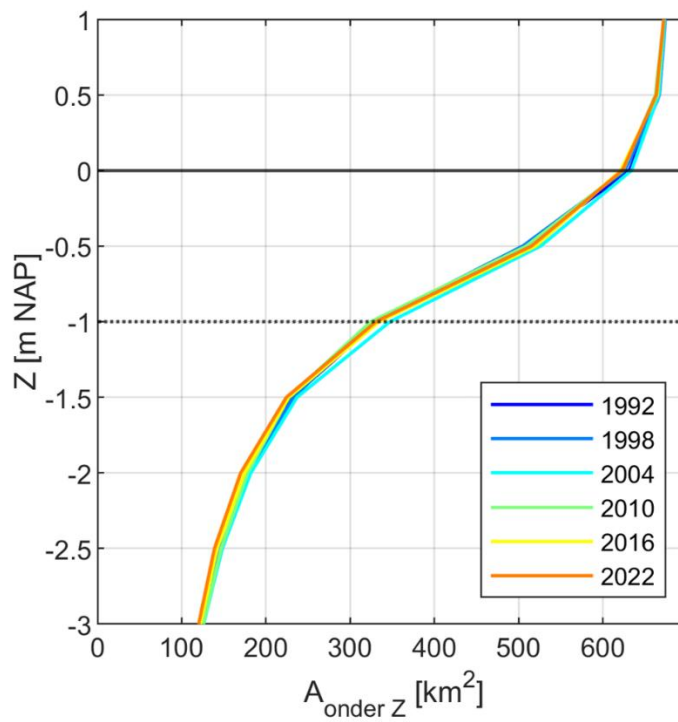


Figuur 2.4 Ontwikkeling van het areaal van geulen (dieper dan NAP -3m), subgetijdegebieden (tussen NAP -3m en NAP -1m) en platen (hoger dan NAP -1m) tussen 1933 en 2022. Tot 1988 is een vaste begrenzing van het wantij gebruikt, vanaf 1992 een variabele begrenzing zoals vastgesteld in Wagenaar (2024).

2.3 Hypsometrie

Een van de manieren om snel inzicht te krijgen in de kenmerken van kombergingsgebieden is om te kijken naar de hypsometrische curves. In deze curves wordt de cumulatieve oppervlakte per diepteklasse geplot, van diep naar ondiep. Figuur 2.5 geeft de hypsometrische curve van het Vlie vanaf 1992. Het bekken van het Vlie is hierbij afgekaderd met een vaste begrenzing gebaseerd op de gemiddelde ligging van het wantij voor de periode 1992 – 2022. Voor een uitgebreidere uitleg van de manier waarop de bodemdata is verwerkt wordt verwezen naar bijlage B3 uit Quataert, et al. (2024)

De hypsometrische curves laten zien dat grootschalige trends in hoogteligging sinds 1992 beperkt zijn, in lijn met de resultaten voor areaalontwikkeling in de vorige paragraaf. Er vindt een lichte ophoging plaats in het bekken van het Vlie, met name in het subgetijdegebied tussen -3 m en -1 m NAP en op de hogere gedeeltes van droogvallende platen (hoger dan NAP 0m). In het lagere intertidale gebied (tussen -1 m en 0 m NAP) is geen duidelijke trend te herkennen.

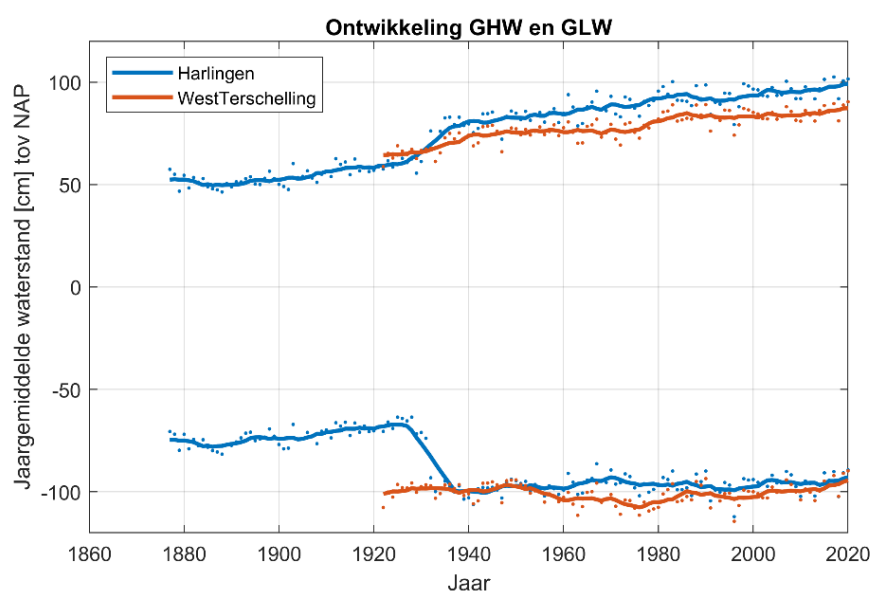


Figuur 2.5 Hypsometrische curves voor het Vlie gebaseerd op de vaklodingen data tussen 1992 en 2022. Boven: zoom van bodemligging tussen -3 en 1 m NAP. Onder: bodemligging tussen -10 en 1 m NAP. Het bekken van het Vlie is afgekaderd met een vaste begrenzing gebaseerd op de gemiddelde ligging van het wantij voor de periode 1992 – 2022.

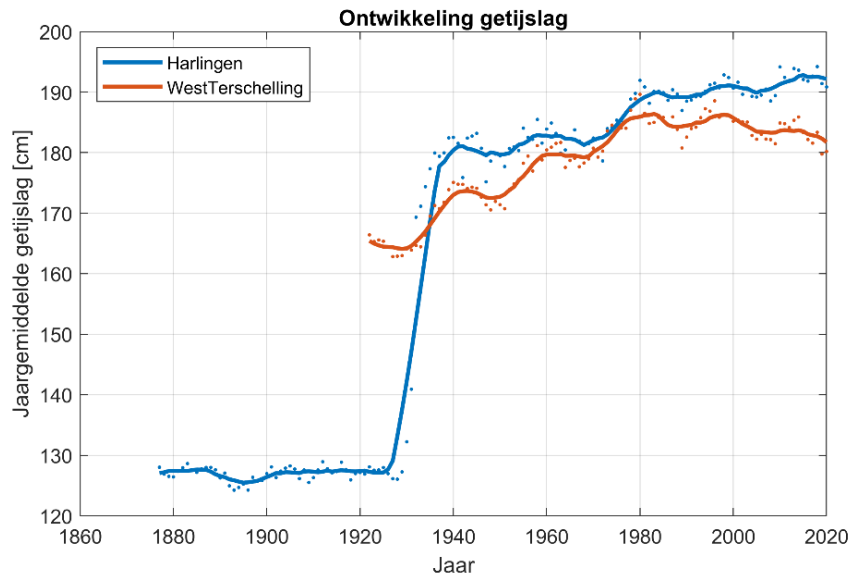
3 Hydrodynamica

3.1 Waterstanden

Jaargemiddelde waterstanden zijn beschikbaar voor meetstations bij Harlingen en West-Terschelling en gaan terug tot respectievelijk 1877 (Harlingen) en 1922 (West-Terschelling). Het effect van de afsluiting van de Zuiderzee op de waterstanden is duidelijk zichtbaar op de gemiddelde waterstanden in Harlingen (Figuur 3.1). Zowel het gemiddeld hoogwater als het gemiddeld laagwater vertonen tijdens de afsluiting een sprong. Doordat het gemiddeld hoogwater stijgt en het gemiddeld laagwater daalt neemt de getijslag bij Harlingen sterk toe van 128 cm voor afsluiting tot 180 cm direct na de afsluiting (Figuur 3.2). Bij West-Terschelling is dit effect nauwelijks zichtbaar. De getijslag in Harlingen blijft ook na de afsluiting nog toenemen doordat het GHW blijft stijgen en bedraagt in 2020 193 cm. In West-Terschelling stijgt de getijslag tot de jaren 1980 maar neemt sindsdien weer af, met name door een toename van de laagwaters.



Figuur 3.1 Jaargemiddeld hoogwater en laagwater bij Harlingen en West-Terschelling tov NAP. Data afkomstig uit de Digitale Systeemrapportage Wadden. Stippen geven meetwaarden per jaar, de lijn geeft het lopend gemiddelde over 10 jaar.



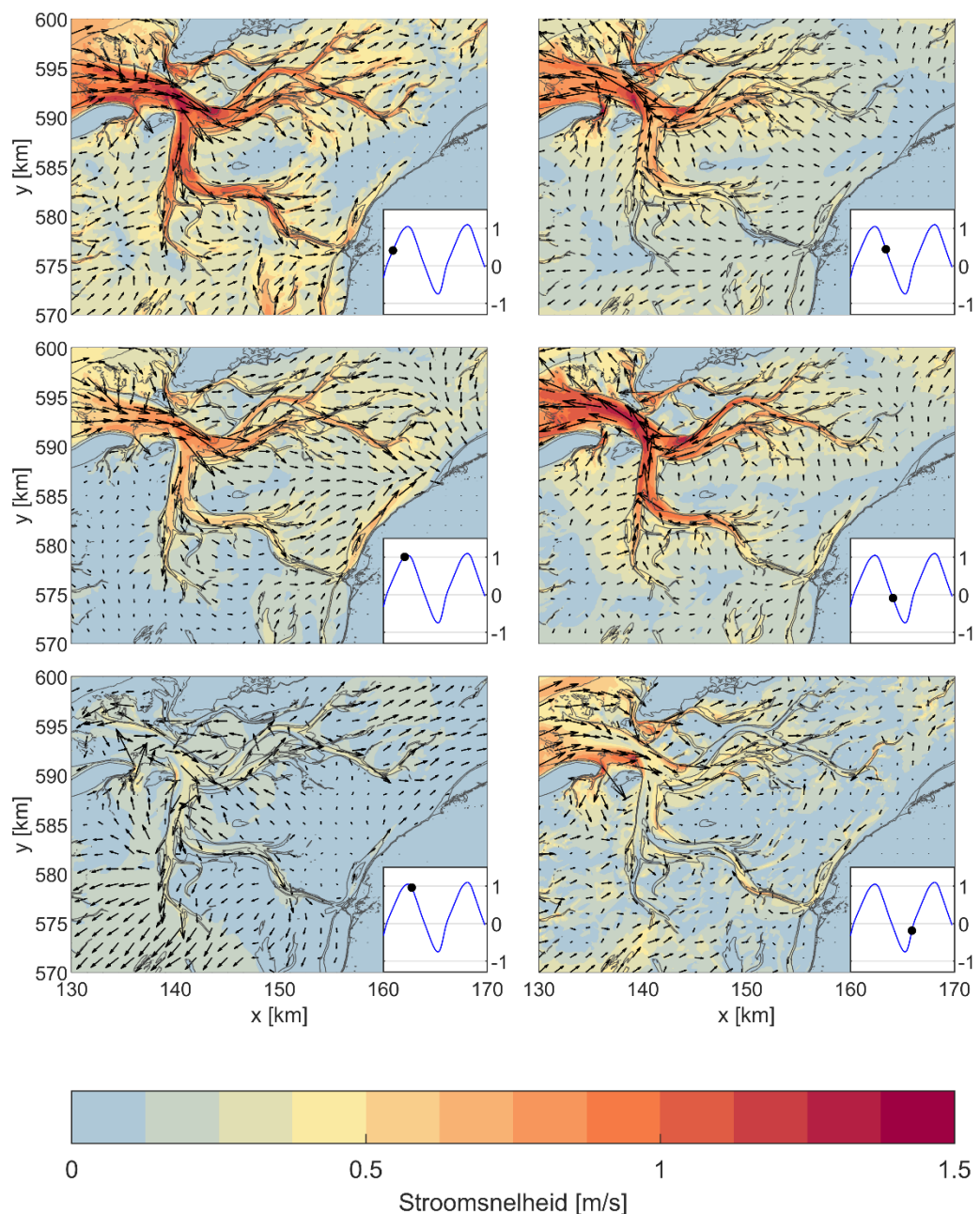
Figuur 3.2 Jaargemiddelde getijslag bij Harlingen en West-Terschelling. Data afkomstig uit de Digitale Systeemrapportage Wadden. Stippen geven meetwaarden per jaar, de lijn geeft het lopend gemiddelde over 10 jaar.

3.2 Stroomsnelheden en debieten

Het kombergingsgebied van het Vlie bestaat uit een hoofdgeul (de Vliestroom) die zich meerdere keren splitst (Figuur 3.4). De verdeling van debieten over de geulen en de ontwikkeling in stroomsnelheden zijn gemodelleerd door Grasmeijer et al. (2022) en Quataert et al. (2024) voor bodems van 1976 tot 2022⁴.

De stroomsnelheden bij verschillende getijfasen zijn weergegeven in Figuur 3.3. De stroming concentreert zich veelal in de hoofdgeulen. Bij kentering van het tij bij laagwater (paneel rechtsonder in Figuur 3.3 is er nog een ebstroom te zien nabij de kust (in Kimstergat, Geul langs Pollendam en Blauwe Slenk) terwijl door de keel van het zeegat de vloedstroom al binnenkomt.

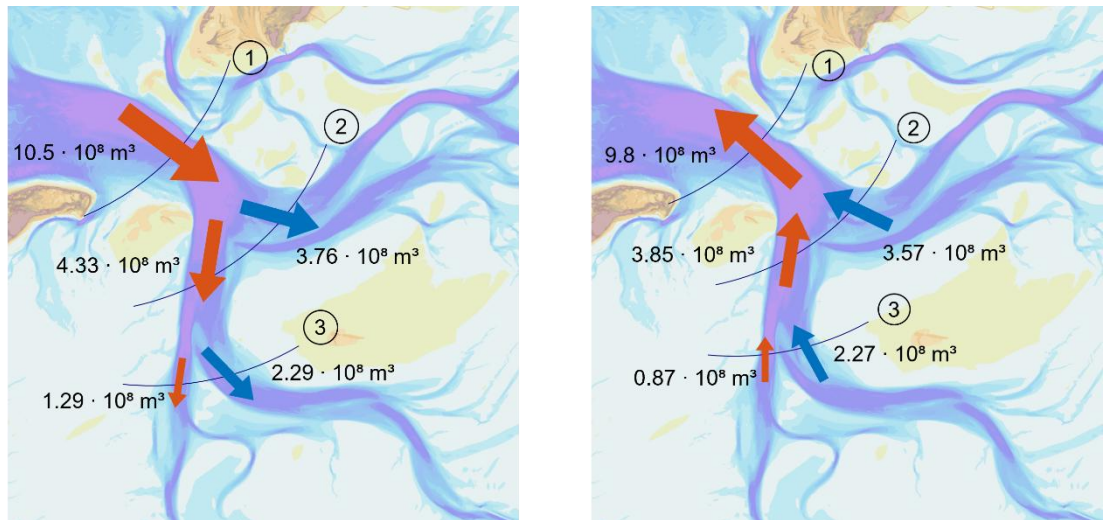
⁴ In Grasmeijer et al. (2022) is de hydrodynamica voor de bodems uit 1976, 1991, 2003 en 2015 berekend en in Quataert et al. (2024) is de bodem van 2022 hier aan toegevoegd. De forcering is in alle simulaties gelijk en gebaseerd op de waterstanden en meteorologie van 2017.



Figuur 3.3 Stroomsnelheden in het bekken van het Vlie bij verschillende getijfasen. Gemodelleerd in Quataert et al. (2024) met een bodem van 2022, gebruikmakend van het model uit Grasmeijer et al. (2022).

Het totale getijprisma door het zeegat neemt licht af (cijfer (1) in Figuur 3.4). Dit werd al geconcludeerd door Grasmeijer et al. (2022) en deze trend lijkt zich ook met de nieuwste bodem door te zetten. Achter het zeegat splitst de Vliestroom zich in twee hoofdgeulen die respectievelijk het noordoostelijke en het zuidwestelijke deel van het bekken bedienen: de Westmeep en de zuidelijke Vliestroom (2). Iets meer dan de helft van het totale getijprisma stroomt door de zuidelijke Vliestroom. Wanneer de verschillende jaren worden vergeleken nemen de debieten door de Vliestroom, zowel tijdens de eb- en vloedperiode, licht af. Het getijprisma richting de Westmeep blijft gelijk, waardoor het verschil in getijprisma tussen de twee geulen afneemt.

Dieper in het bekken splitst de Vliestroom vervolgens in de Blauwe Slenk, die doorloopt richting Harlingen, en het Inschot, dat vroeger doorliep naar de Zuiderzee (3). Het Inschot heeft zich sinds de afsluiting sterk opgevuld. Het merendeel van het getijprisma stroomt door de Blauwe Slenk. Tussen 1976 en 2003 nemen de debieten door het Inschot af. Sinds 2003 lijkt deze ontwikkeling gestagneerd en zijn de getijprisma's in beide geulen relatief constant.



Figuur 3.4 Verdeling van debieten over het Vlie (links vloed, rechts eb) op basis van modelsimulaties. Rode pijlen geven afnemende debieten (sinds 1976) aan, blauwe pijlen gelijkblijvende debieten. De getallen geven het gemiddelde getijprisma tijdens respectievelijk vloed en eb voor de modelsimulatie met de bodem van 2022 (Quataert, et al., 2024)).

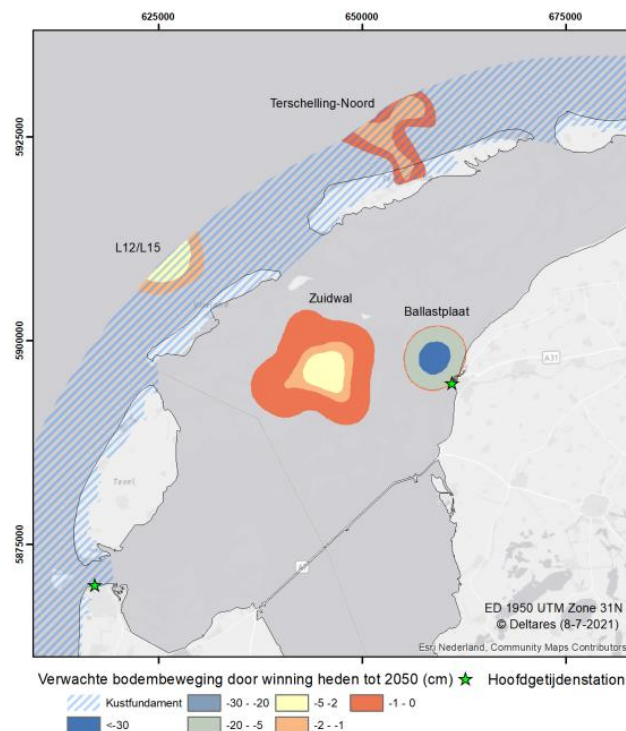
3.3 Relatieve zeespiegelstijging

De toename van de zeespiegel ten opzichte van NAP bestaat uit een stijging van de langjarige gemiddelde waterstanden (absolute zeespiegelstijging) en daling van de ondergrond. Samen vormen deze de relatieve zeespiegelstijging.

Bodemdaling

De bijdrage van bodemdaling van de diepe ondergrond aan de relatieve zeespiegelstijging in de Waddenzee bestaat uit geologische bodemdaling en bodemdaling door delfstofwinning, die met name lokaal optreedt. In het Vlie is sprake van bodemdaling door delfstofwinning op twee locaties, bij het gasveld bij Zuidwal, en door zoutwinning op de Ballastplaat (zie Figuur 3.5).

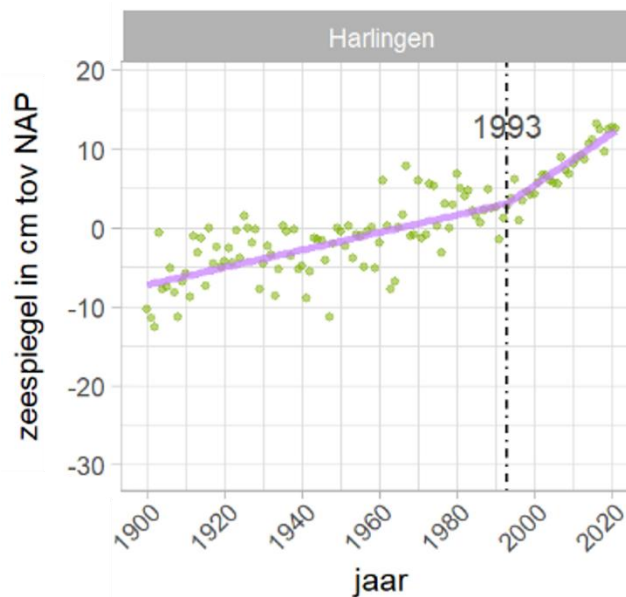
De geologische bodemdaling bedraagt 0,6 mm/j bij meetstation Harlingen met een onzekerheidsmarge van 0,3 mm/j (Hijma, 2021). In het bekken van het Vlie bedraagt de gemiddelde totale bodemdaling volgens Hijma (2021) 0,7 mm/j in de periode 1991 – 2020 met een verwachte bodemdaling van 1,3 mm/j voor de periode 2021 – 2050.



Figuur 3.5 Verwachte bodemdaling tussen 2021 en 2050 door winning in de westelijke Waddenzee. Figuur overgenomen uit Hijma (2021).

Zeespiegelstijging

Een actueel overzicht van de snelheid van zeespiegelstijging bij de meetstations Harlingen en Den Helder wordt gegeven door Stolte et al. (2023) en is samengevat in Tabel 3-1 en Figuur 3.6.



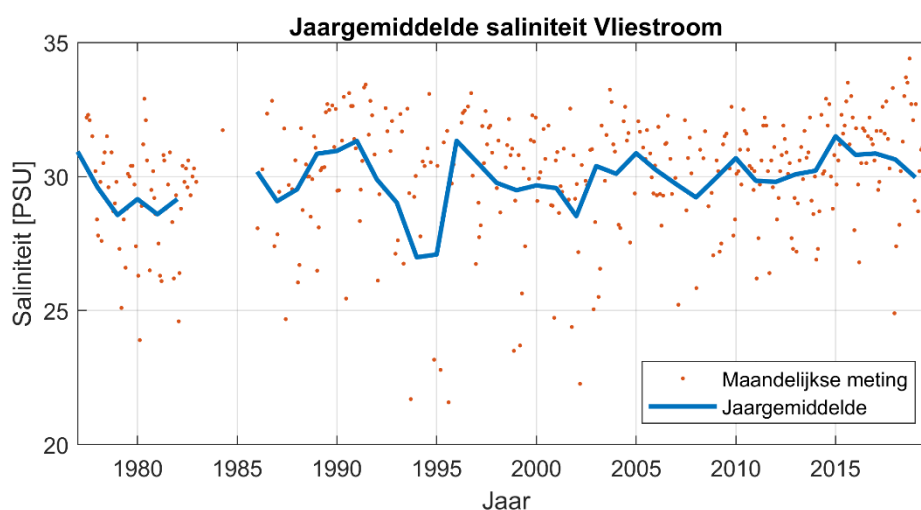
Figuur 3.6 Zeespiegelstijging bij meetstation Harlingen in cm t.o.v. NAP. Groene punten geven het de jaargemiddelde zeespiegel voor het betreffende jaar, de paarse lijn geeft de lineaire trend. Figuur afkomstig uit de Zeespiegelmonitor 2022 (Stolte, et al., 2023).

Tabel 3-1: GHW, GLW en getijslag bij Den Helder en Harlingen, gemiddelde over de periode 2011-2020. Bron: Digitale Systeemrapportage Wadden. Zeespiegelstijging uit Stolte et al. (2023).

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

3.4 Zoetwaterafvoer en saliniteitsverdeling

In het kader van de Monitoring Waterstaatskundige Toestand Des Lands (MWTL) wordt tweewekelijks tot maandelijks de saliniteit gemeten op verschillende punten, waaronder in de Vliestroom. De saliniteit varieert hier grofweg tussen de 26 en 34 PSU (zie Figuur 3.7). De gemiddelde saliniteit ligt rond de 30 PSU met een lichte toenemende trend over de afgelopen 35 jaar. Met het dagelijks getij kan de saliniteit met zeker 5 PSU variëren, afhankelijk van het seizoen (de saliniteit is over het algemeen hoger in de zomer) en de getijcyclus (Zijl et al. 2023).



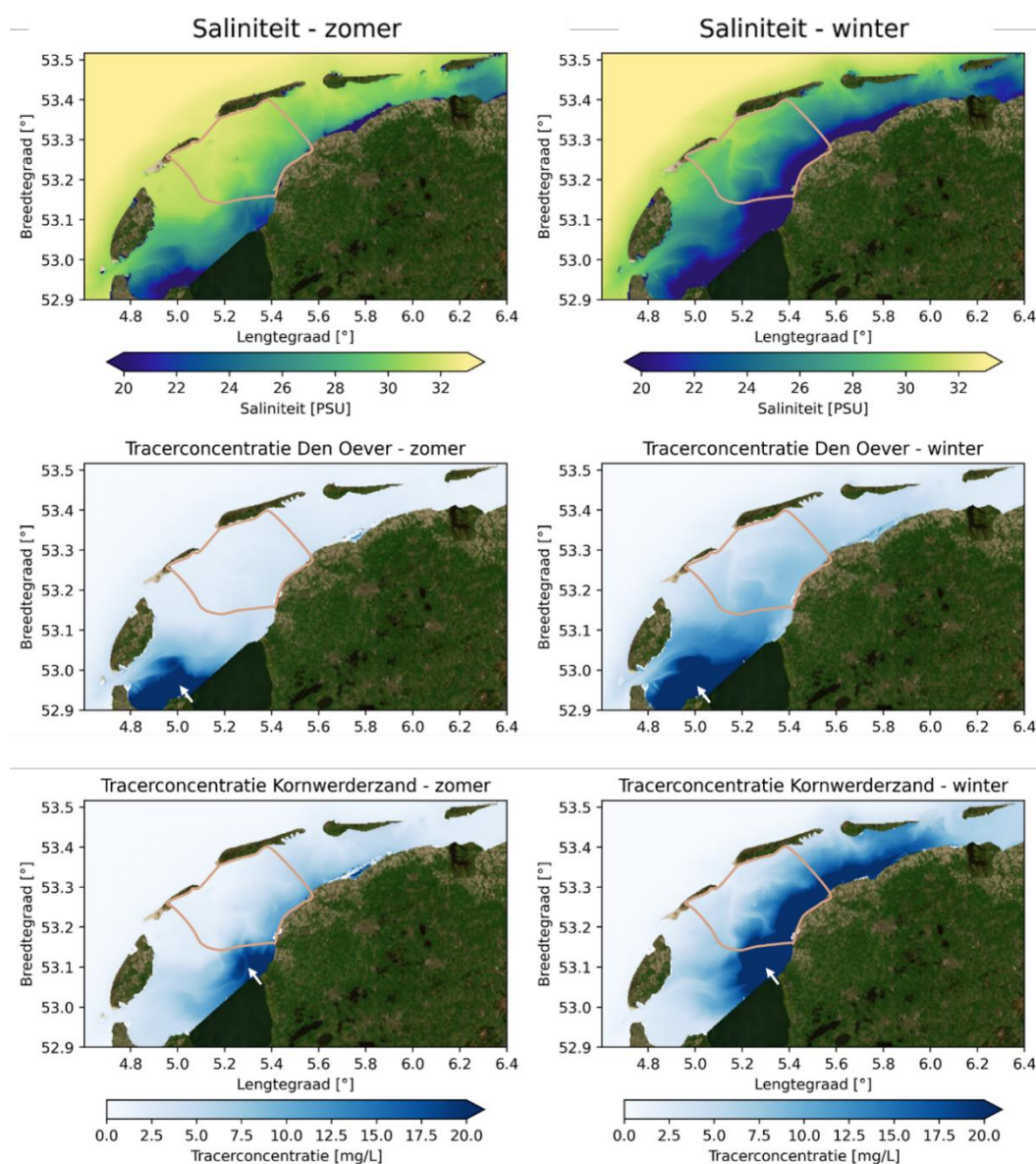
Figuur 3.7 Jaargemiddelde saliniteit in de Vliestroom op basis van MWTL-metingen. Data afkomstig van de Digitale Systeemrapportage Wadden (Stolte, et al., 2023). Voor de andere tijdseries en de exacte locatie van de MWTL-meetpunten wordt verwezen naar de Digitale Systeemrapportage.

Langs de randen van het kombergingsgebied liggen op verschillende plekken spuisluizen en gemalen waar zoetwater op de Waddenzee wordt geloosd (zie Duran-Matute et al. (2014) voor een overzicht). Van deze spuilocaties zijn de debieten vanuit de Afsluitdijk het grootst. Bij Kornwerderzand en Den Oever bevinden zich spuisluizen waardoor het zoete water vanuit het IJsselmeer bij laagwater op de Waddenzee wordt gespuid. Beide sluizen zijn spuisluizen en geen gemalen, wat betekent dat alleen gespuid kan worden onder vrij verval, dat wil zeggen wanneer de waterstand in de Waddenzee lager is dan de waterstand in het IJsselmeer. In de toekomst zal dit bij verdere zeespiegelstijging gestaag afnemen. Momenteel wordt de capaciteit van het spuicomplex bij Den Oever vergroot en worden hierbij gemalen met een pompcapaciteit van 235 m³/s geïnstalleerd, waardoor het mogelijk wordt om ook wanneer de waterstand in de Waddenzee hoger is dan op het IJsselmeer water af te voeren (Witteveen + Bos, 2022). De aanleg van deze gemalen en de keuzes die worden gemaakt in het afvoerregime beïnvloeden de saliniteit in het Vlie.

In Jaksic et al. (2024) is het effect van de zoetwaterafvoer vanuit de Afsluitdijk op de saliniteit van het Waddengebied onderzocht met behulp van verschillende scenario's. Hieruit blijkt dat structurele veranderingen in de (seizoensgebonden) afvoerhoeveelheid, bijvoorbeeld door

klimaatverandering, een grote invloed hebben op de saliniteit in de Waddenzee, en op de mate waarin de saliniteit fluctueert. Zoetwaterextremen waarbij de saliniteit dagenlang onder de 15 PSU blijft zijn te linken aan periodes met veel afvoer vanuit het IJsselmeer. Daarnaast blijkt uit deze studie dat het Vlie met name wordt beïnvloed door zoet water vanuit Kornwerderzand. Veranderingen in het afvoerregime bij Den Oever hebben veel minder invloed op het Vlie (zie middelste en onderste paneel in Figuur 3.8).

Het grootste effect van een veranderende zoetwaterafvoer bij Kornwerderzand is te zien in de ondiepe en laagdynamische strook langs de Friese kust (Ballastplaat en Vlake van Oosterbierum). In dit gebied is het zoutgehalte het laagst en de variatie in saliniteit het hoogst. Ook zijn er langs de Friese kust en dichtbij de spuisluizen gebieden waar de saliniteit in zoete periodes dagenlang onder de 15 PSU blijft (Jaksic, et al., 2024).



Figuur 3.8 Bovenste paneel: ruimtelijke verdeling van saliniteit in de Waddenzee in de zomer (links) en de winter (rechts). Midden: verspreiding van zoet water vanuit de spuisluizen van Den Oever. Onderste paneel: verspreiding van zoet water vanuit de spuisluizen van Kornwerderzand. Het bekken van het Vlie is aangegeven met de lichtrode lijn. Figuur aangepast overgenomen uit Jaksic et al. (2024).

4 Langjarige morfologische ontwikkelingen

In dit hoofdstuk wordt een beknopt overzicht gegeven van de langjarige morfologische ontwikkelingen van de westelijke Waddenzee op chronologische volgorde. Paragraaf 4.1 gaat in op het ontstaan van de westelijke Waddenzee. In bijlage B is een uitgebreidere beschrijving beschikbaar van de morfologische ontwikkelingen vóór de aanleg van de Afsluitdijk. In Paragraaf 4.2 worden de gevolgen van de afsluiting besproken en Paragraaf 4.3 gaat in op de recente morfologische ontwikkelingen.

4.1 Ontstaan westelijke Waddenzee

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

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

In alle gevallen speelde de mens een doorslaggevende rol.

4.1.1 Voor en tijdens de Middeleeuwen

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

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

4.1.2 Vanaf 1100 tot de 20^{ste} eeuw

Deze kwetsbaarheid bleek 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). Het drainagegebied van het Vlie werd deels overgenomen door het Marsdiep-systeem (Figuur 4.1). De omvang van het Marsdiep (kombergingsgebied) nam verder toe als gevolg van afbraak van veengebieden. Het Marsdiep-Vlie-Zuiderzee-systeem ontstond door afslag van dikke veenpakketten, waardoor een heel groot areaal slechts uit sublitoraal bestond, vooral het zuidelijke deel. Ook het noordelijke deel kende vanwege de geschiedenis en de bijzondere hydrodynamische condities weinig droogvallende wadplaten. Dat betekent dat al voor de aanleg van de Afsluitdijk het aantal en areaal van droogvallende wadplaten klein was in vergelijking met andere kombergingsgebieden. Bodemonsters maken duidelijk dat voor de afsluiting van de Zuiderzee weinig sediment tot afzetting kwam in het gebied (Ente, 1987). Ridderinkhof (2016) suggereert dat het Marsdiep voor de afsluiting van de Zuiderzee sediment exporterend kan zijn geweest.

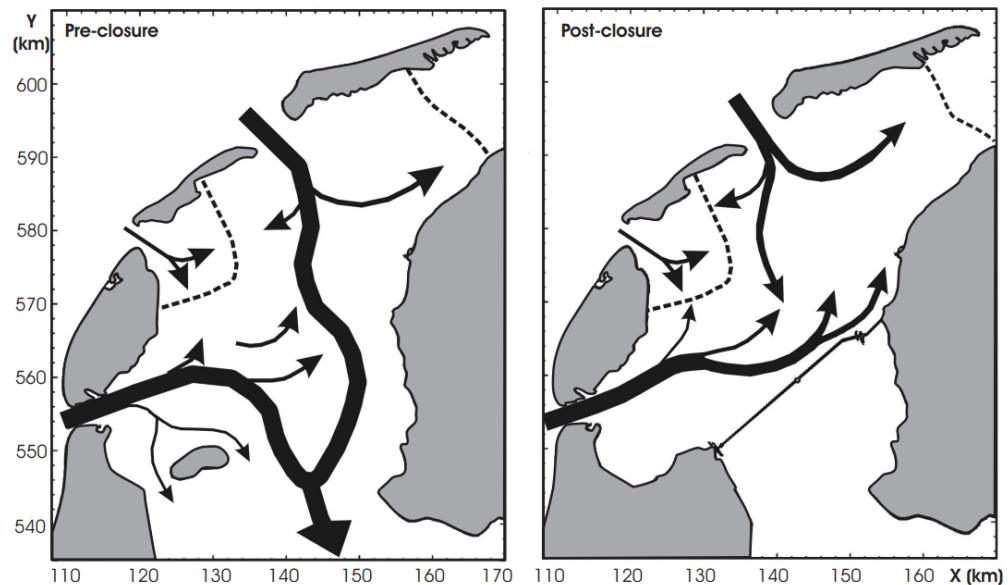


Figuur 4.1 Gedeelte van de kaart *Phrisia occidentalis et Waterlandia* uit de handgetekende atlas van Christianus Sgrooten, ca. 1573. Kopie uit Rijkswaterstaat (1935).

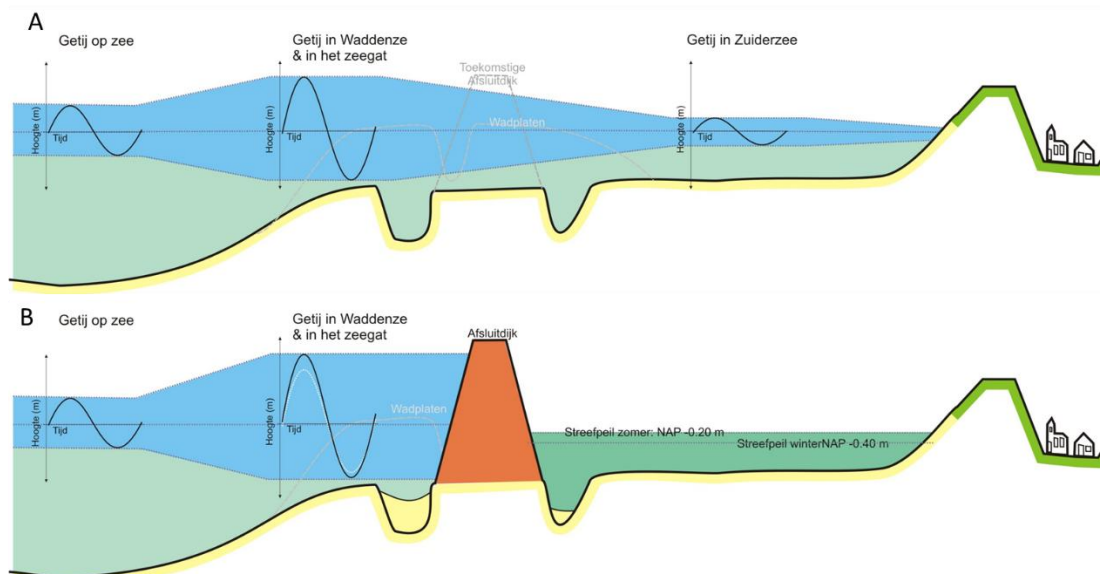
4.2 De afsluiting van de Zuiderzee

4.2.1 De afsluiting en het effect op het getij

In 1932 was de afsluiting van de Zuiderzee voltooid. Voor de afsluiting was de oppervlakte van het gecombineerde kombergingsgebied Marsdiep en Vlie $\sim 4000 \text{ km}^2$, en de lengte $\sim 130 \text{ km}$. Na afsluiting was het oppervlak van het Vlie gereduceerd tot ongeveer 700 km^2 en de lengte ca. 25 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. Ook de getijstrooming naar en uit de zeegaten Marsdiep en Vlie veranderde, zoals schematisch is weergegeven in Figuur 4.2. Door de resonantie, reflectie en de verminderde wrijving (grotere diepte in het overgebleven deel) nam de getijslag toe met 39% bij Harlingen en met 13% bij Den Helder (zie Figuur 3.1 en Doekes, 1985; Rietveld, 1962; Thijsse, 1972). Dit principe is schematisch weergegeven in Figuur 4.3. Door de combinatie van veranderingen nam het getijprisma van het Vlie met ca. 10% toe (Vroom et al., 2012). Ook trad er een faseverschuiving op tussen de getijden in de Noordzee en die in het zeegat.



Figuur 4.2 Schematische weergave van de getijndringing in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee vóór (links) en na (rechts) de afsluiting van de Zuiderzee (Elias et al., 2003; naar Thijsse, 1972).



Figuur 4.3 Schematische dwarsdoorsnede door de Zuiderzee (A) en de huidige Waddenzee en het IJsselmeer (B).

4.2.2 De ontwikkeling van het wantij

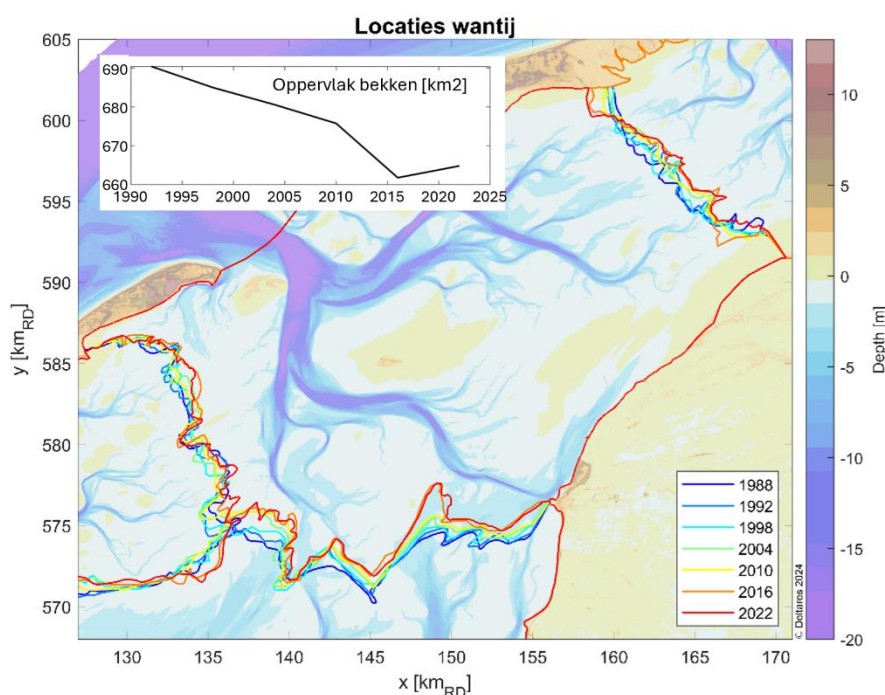
Een wantij vormt de begrenzing tussen twee kombergingsgebieden. Er zijn twee typen wantijen te onderscheiden: het hydrodynamische en het morfologische wantij.

Het hydrodynamische wantij is de zone waar de watermassa's die door de zeegaten naar binnen stromen elkaar ontmoeten (van Straaten, 1964). Omdat deze locatie per getij varieert en mede afhankelijk is van de optredende getij- en windcondities is dit een zone en geen scherpe grens. De stroomsnelheden zijn hier doorgaans laag, waardoor zich een uitgestrekt plaatgebied kan ontwikkelen: hier vormt zich het morfologische wantij, dat wordt gedefinieerd als de ondiepste gebieden tussen de kombergingsgebieden, meestal niet doorsneden door geulen. Het morfologische wantij wordt vaak gebruikt als afbakening van het kombergingsgebied en is dus belangrijk voor o.a. het berekende oppervlakte.

Verschuivingen van het wantij hebben niet alleen invloed op de oppervlakte van de kombergingsgebieden, maar ook op het getijprisma van geulen in het bekken.

Voor de afsluiting van de Zuiderzee bestond er geen duidelijk morfologisch wantij tussen het Marsdiep en het Vlie omdat deze bekkens beide in directe verbinding stonden met de Zuiderzee (zie o.a. Figuur 4.1 en Figuur 4.2). Sinds de afsluiting is een morfologisch wantij in ontwikkeling zuidelijk van de Geul langs Pollendam en over de Boontjes. Vanwege deze geschiedenis heeft het wantij tussen het Vlie en Marsdiep nog altijd een bijzonder karakter vergeleken met andere wantijen in de Waddenzee; het is dieper en er lopen nog geulen over het wantij. Hierdoor is het lastig een eenduidige ligging van het wantij vast te stellen, en is dit in verschillende studies steeds anders getrokken⁵. Uit de meeste studies volgt echter hetzelfde beeld: een verschuiving naar het noordoosten van het morfologische wantij tussen Marsdiep en Vlie sinds de aanleg van de Afsluitdijk.

Voor de volume-analyses in deze kombergingsrapportage is gebruik gemaakt van de locatie van het morfologische wantij dat is vastgesteld voor de jaren 1988 – 2022 met behulp van bodemligging, gradiënt en afstroomanalyse (Figuur 4.4; Wagenaar, 2024). Door de noordoostelijke verschuiving neemt het kombergingsgebied Marsdiep in oppervlakte toe ten koste van het kombergingsgebied Vlie. Aan de oostzijde van het Vlie verschuift het wantij met het Borndiep ook in oostelijke richting. Het wantij met het Marsdiep migreert sneller dan het wantij met het Borndiep, waardoor het bekkenoppervlak van het Vlie afneemt (Wagenaar, 2024).



Figuur 4.4 Locatie van het morfologisch wantij over de periode 1988-2022 (Wagenaar, 2024).

⁵ Zie o.a. Eysink, 1979; Werkgroep I, 1981; Eysink & Biegel, 1992; Kragtwijk, 2004; Hoeksema et al., 2004; Van Geer, 2007; Vroom, 2011 en Wang et al., 2013.

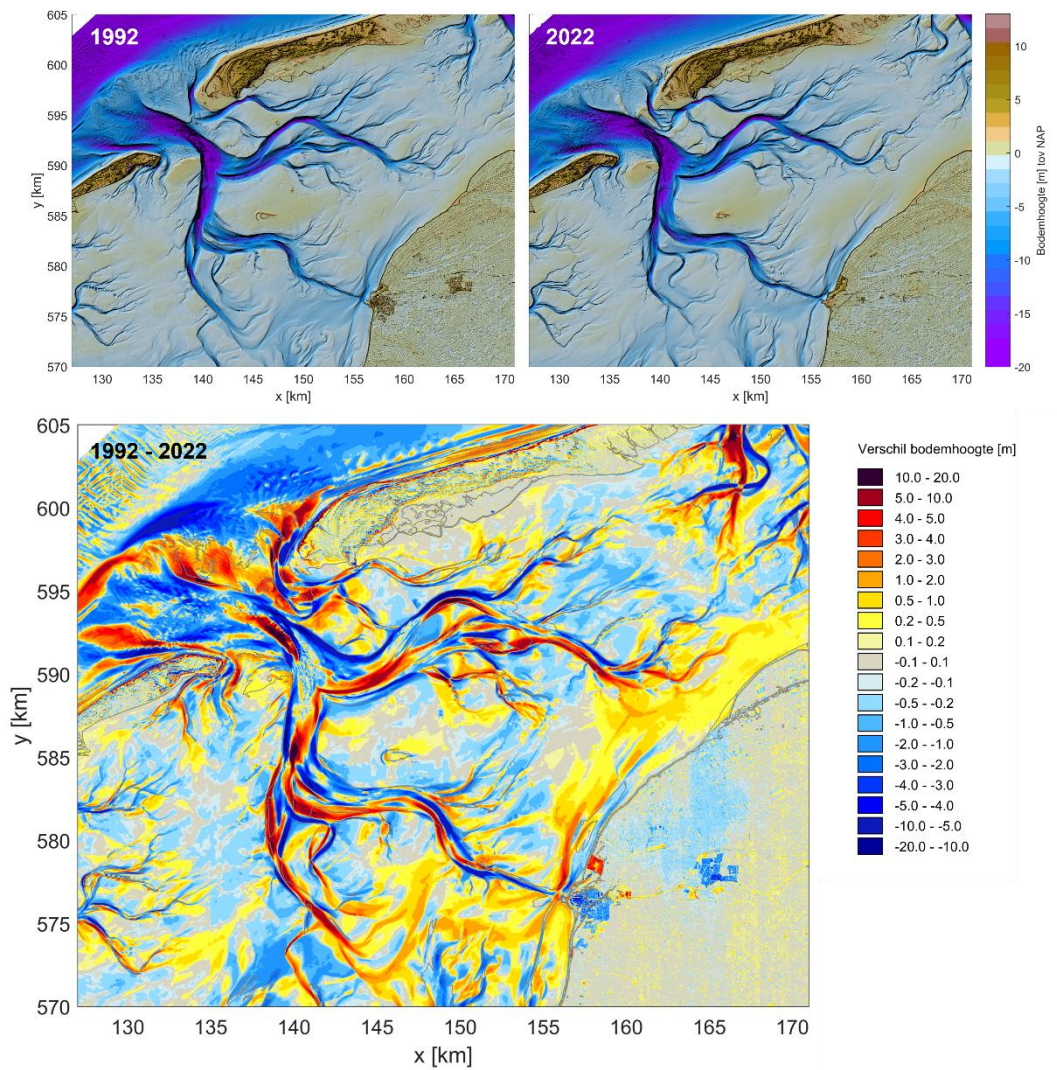
4.3 Recente morfologische ontwikkelingen

Sinds de afsluiting is er sprake van netto sedimentatie in het bekken van het Vlie. Deze sedimentatie was de eerste jaren na de afsluiting het sterkst.

De laatste decennia is de sedimentatie minder sterk, al importeert het bekken nog steeds sediment. Sedimentatie vindt vooral plaats langs de Friese vastelandskust. De Vlake van Oosterbierum en de Ballastplaat zijn de laatste decennia sterk uitgebreid en verhoogd (Figuur 4.5). Met name in deze gebieden is het aandeel slib in de totale sedimentatie groot: 37 – 39% van de totale volumeveranderingen hier wordt veroorzaakt door slibsedimentatie (Colina Alonso, 2020). Tegelijkertijd is er sprake van een erosieve trend dicht bij de eilanden, op het Terschellinger wantij en op de Waardgronden bij het wantij tussen het Vlie en het Eierlandse gat. Een analyse van sedimentsamenstelling laat ook zien dat het Terschellinger wantij minder slibrijk lijkt te zijn geworden over de afgelopen 125 jaar (Colina Alonso, 2020).

Het huidige bekken bestaat uit twee delen, een zuidwestelijk deel (Pannengat, Inschot en Blauwe Slenk) en een oostelijk deel (Westmeep, Noordmeep en Zuidmeep), gescheiden door de platen Grienderwaard en Vlake van Oosterbierum. In de meest recente bodem (2022) zijn deze twee geulenstelsels qua oppervlakte van dezelfde orde grootte. In het verleden was dit echter niet het geval: voor afsluiting van de Zuiderzee maakte het Inschot (via het Oude Vlie) verbinding met de Zuiderzee en lag het zwaartepunt van het kombergingsgebied in het zuidelijke deel. In de morfologie is nog altijd te zien dat de Westmeep een secundaire geul is die aantakt op de Vliestroom, met een groot drempelgebied ertussen.

In de 2022 bodem, 90 jaar na de afsluiting van de Zuiderzee, zet het diepe deel van de Vliestroom zich nog steeds zuidelijk door richting Inschot (Figuur 4.5). Aan de westzijde van Griend is dan een tweede vertakking zichtbaar. Voor de afsluiting was het Inschot de dominante geul, hetgeen nog altijd te zien is in het drempelgebied tussen de Blauwe Slenk en het Pannengat. Na afsluiting heeft het Inschot vrijwel haar gehele kombergingsgebied verloren. Een deel van deze geul is ingevuld en een deel is overgenomen door het Marsdiep. Door de sterke krimp van het Inschot-systeem is het Blauwe Slenk-systeem qua omvang en kombergingsgebied relatief veel groter geworden dan het geulenstelsel van Inschot.



Figuur 4.5 Bodemkaarten voor 1992 en 2022 (boven) en verschil in bodemligging tussen 1992 en 2022 (onder).

5 Sedimentbalans en volumeveranderingen

Inzicht in de sedimentbudgetten van de Waddenzee is fundamentele kennis in het systeembegrip van de ontwikkeling van de Waddenzee. Een sedimentbalans geeft de erosie- en sedimentatievolumes voor de gehele Waddenzee, per bekken of per kleiner deelgebied. Dit geeft inzicht in de morfologische ontwikkeling van een gebied, zoals bijvoorbeeld trends van verlanding en veranderende kombergingsvolumes.

In dit hoofdstuk worden sedimentbudgetten voor het Vlie beschreven, waarbij steeds verder wordt ingezoomd. Paragraaf 5.1 geeft een samenvatting van de resultaten voor het Vlie die volgen uit recente volumebalansen voor de gehele Waddenzee voor zand (5.1.1; Elias 2019) en slib (5.1.2; Colina Alonso 2020). In §5.2 wordt vervolgens verder ingezoomd op de recente volumeveranderingen waarbij de ontwikkeling van morfologische elementen zoals geulen en platen wordt gevolgd op basis van de analyse uit Quataert et al. (2024).

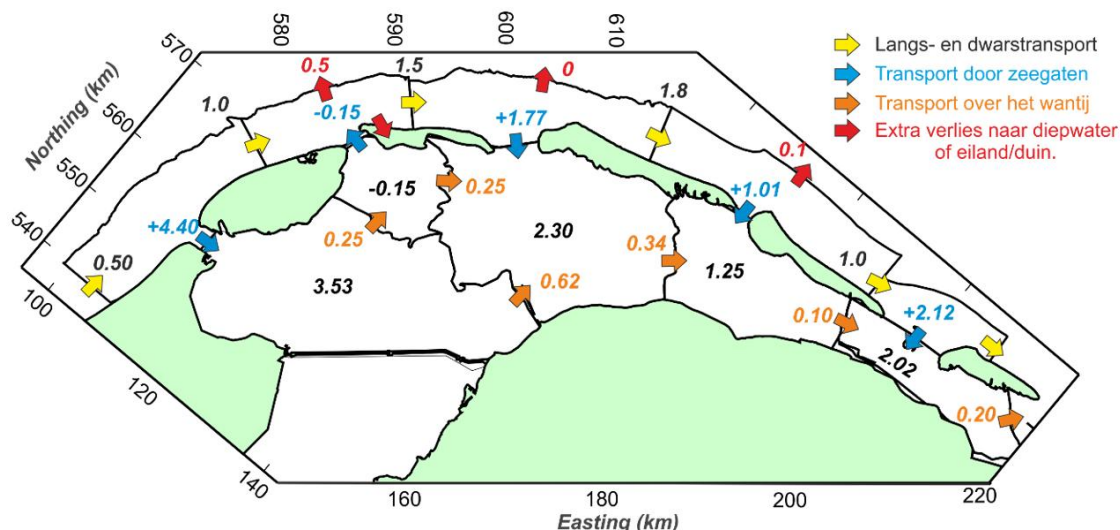
5.1 Sedimentbalans van de westelijke Waddenzee

Over de ontwikkeling van het sedimentvolume van de Waddenzee is in het verleden al veel gerapporteerd⁶. Deze analyses laten zien dat zeer veel sedimentatie heeft plaatsgevonden in de kombergingsgebieden en dat door de afsluiting van de Zuiderzee de westelijke Waddenzee sterk van karakter is veranderd.

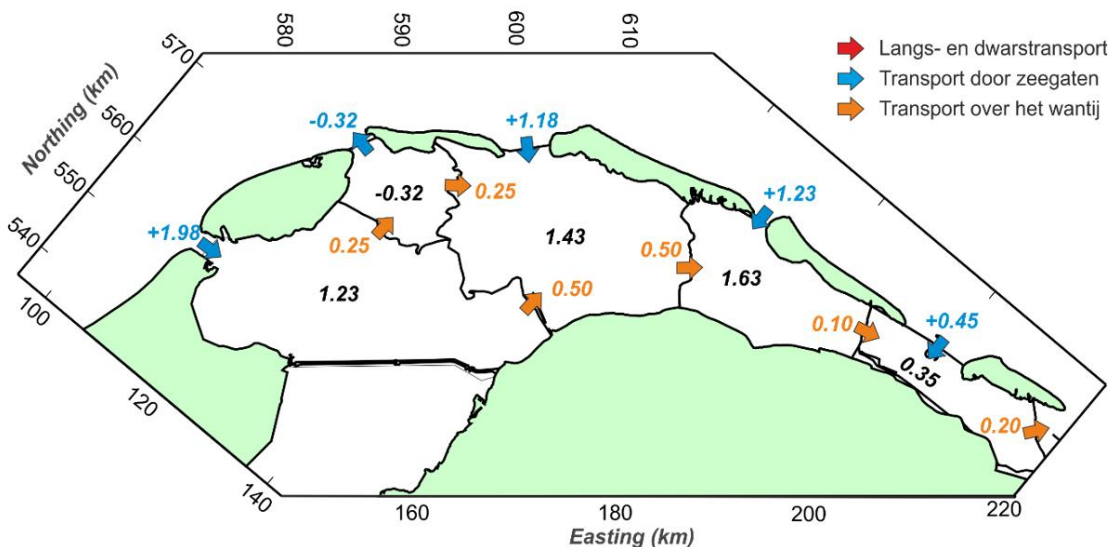
5.1.1 Sedimentvolumes

In Elias (2019) is een volumebalans van de Waddenzee gemaakt op basis van de volumeveranderingen in de bekkens en de buitendelta. Hierbij is gekeken naar de totale volumeveranderingen en is geen onderscheid gemaakt tussen zand en slib. Een schatting van de import per zeegat is gemaakt op basis van aannamen over de uitwisseling over de wantijen. Voor het bekken van het Vlie is voor de lange termijn (1933 – 2015) een sedimentatie berekend van 2,3 Mm³/j (Figuur 5.1). Wanneer wordt gekeken naar meer recente trends (1991 – 2015) is de sedimentatie lager; 1,43 Mm³/j (Figuur 5.2). De verklaring hiervoor die in Elias (2019) wordt gegeven is dat de lange termijn trend wordt gedomineerd door de snelle respons van opvulling de eerste decennia na de aanleg van de Afsluitdijk. De recente trends (1991 – 2015) geven een beter beeld van de langere termijn respons, waarin de veranderingen geleidelijker zijn.

⁶ Zie o.a. Werkgroep 1, 1981; Glim et al., 1987; Hoeksema et al., 2004; Elias et al., 2012; Nederhoff et al., 2017; Smits & Nederhoff, 2018; Elias, 2019; Colina Alonso, 2020



Figuur 5.1 Overzicht van het grootschalige sedimentbalansmodel (totale volumeveranderingen incl zand en slib) representatief voor de lange termijn trends (1933-2015), uitwerking op schaal van de zeegaten, gecorrigeerd voor baggeren, verspreiden, bodemdaling en overige winst- en verliesposten. Getallen geven volumeveranderingen in miljoen m^3/j . Oranje pijlen zijn de geschatte transporten over de wantijen (Figuur 7.2d uit Elias, 2019).



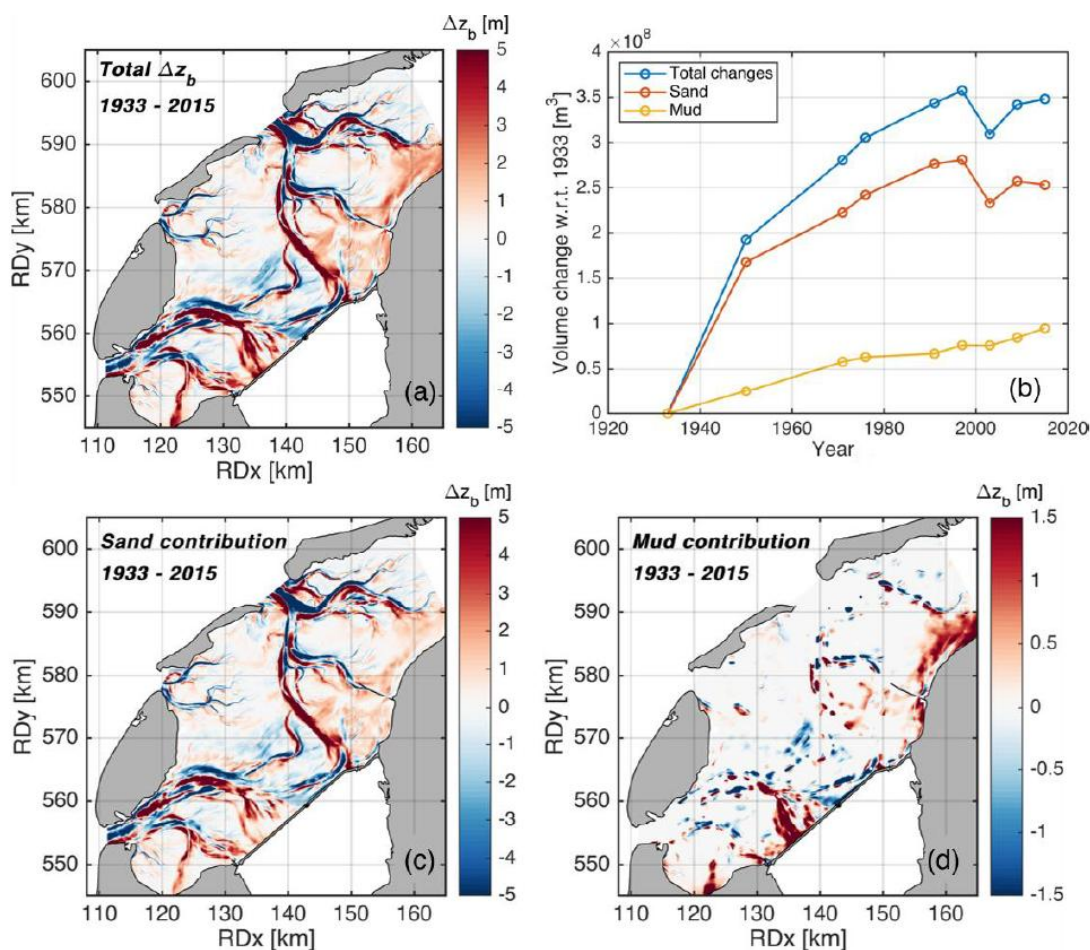
Figuur 5.2 Overzicht van het grootschalige sedimentbalansmodel (totale volumeveranderingen incl zand en slib) representatief voor de huidige trends (1991-2015), uitwerking op schaal van de zeegaten, gecorrigeerd voor baggeren, verspreiden, bodemdaling en overige winst- en verliesposten. Getallen geven volumeveranderingen in miljoen m^3/j . Oranje pijlen zijn de geschatte transporten over de wantijen (Figuur 7.3d uit Elias, 2019).

5.1.2 Slibsedimentatie

Recente studies maken onderscheid tussen zand en slib. Zand wordt vanaf de kustzone geïmporteerd in de Waddenzee, en dit verlies wordt veelal met zandsuppleties aangevuld. Slib wordt niet vanaf de Hollandse kust, maar van verder aangevoerd. De hoeveelheid slib die in de trilaterale Waddenzee wordt afgezet, lijkt ongeveer even groot te zijn als de hoeveelheid die naar Den Helder wordt aangevoerd (Oost et al., 2020). Smits & Nederhoff (2018) schatten het slibpercentage in de bodem van de westelijke Waddenzee op basis van de Sedimentatlas tussen de 13 en 29%.

Colina Alonso (2020) heeft een zand- en slibbalans opgesteld voor de Waddenzee. Ook hier wordt een sterke afname van de sedimentatie over tijd geconstateerd in de decennia na de afsluiting van de Zuiderzee. De import van zand is sterk afgenomen sinds de jaren '90, maar de slibsedimentatie zet gestaag door. Het aandeel slib in de totale sedimentatie is hierdoor toegenomen (Figuur 5.3).

De bijdrage van slib aan de sedimentatie is met name groot in het gebied rond Oosterbierum langs de Friese kust (Figuur 5.3). Hier bestond de ondergrond rond 1890 al voor een groot deel uit fijn sediment en is het slibgehalte door sterk weggevalen stromingen nog verder toegenomen en beslaat 37% van de totale volumeverandering. In grote delen van dit gebied is sinds 1933 meer dan 1,5 m slib bezonken. Bovendien lijkt de grens waar het sediment van slibrijk naar zandig verspringt zeewaarts te zijn verschoven, onder anderen doordat geulen zich terugtrekken.

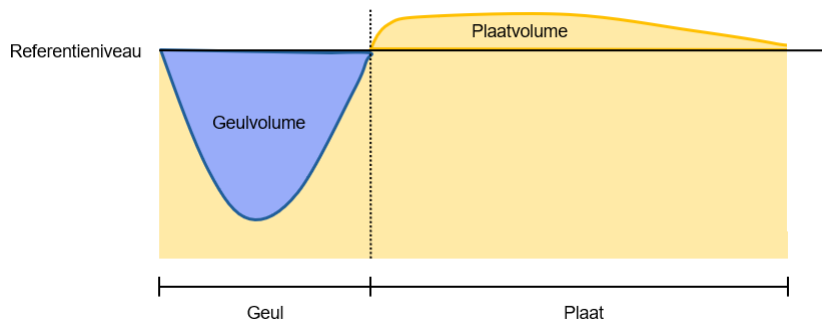


Figuur 5.3 Volumebalans van de Westelijke Waddenzee: a) bathymetrische veranderingen op basis van Vaklodingen data, b) berekende volumeveranderingen in de bekkens, c) geschatte bodemveranderingen op basis van zand sedimentatie en erosie, d) geschatte bodemveranderingen op basis van slib sedimentatie en erosie. Merk op dat de kleurenbalken verschillende assen hebben. Figuur overgenomen uit Colina Alonso (2020).

5.2 Volumeveranderingen in het bekken vanaf 1992

De meest recente volumeanalyse van het bekken van het Vlie is uitgevoerd in de studies van Quataert et al. (2024) en de Beer et al. (2024). Deze analyse beschrijft de volumeveranderingen ten opzichte van de referentieniveaus beschreven in §2.2.1. Dit geeft inzicht in het plaatvolume, gelegen boven het referentieniveau, of het geulvolume, gelegen

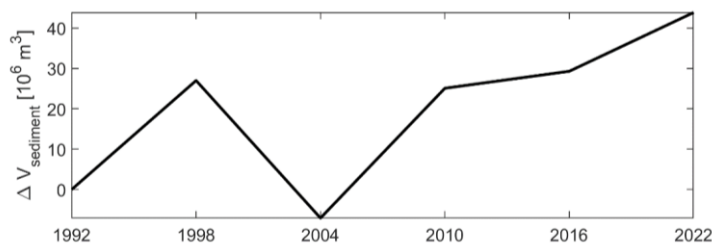
onder het referentieniveau (Figuur 5.4). Hiermee kan van individuele elementen zoals platen of geulen worden gevolgd hoe het volume, oppervlak en gemiddelde plaathoogte of geuldiepte zich ontwikkelen. De informatie in dit hoofdstuk is afkomstig uit Hoofdstuk 4 van Quataert et al. (2024). Voor een meer uitgebreide beschrijving van de methode wordt verwezen naar Bijlage B in Quataert et al. (2024).



Figuur 5.4 Principeschets van het bepalen van plaat- en geulvolumes op basis van een referentieniveau.

5.2.1 Volumeveranderingen totale kombergingsgebied

Het sedimentvolume in het Vlie neemt toe tussen 1992 en 2022 (Figuur 5.5). Opvallend is de dip in volumeontwikkeling die in 2004 optreedt. Het hier gevonden volumeverloop, inclusief dip, is ook in de eerdere studie van Wang et al. (2018) geconstateerd en is mogelijk gerelateerd aan een systematische meeton nauwkeurigheid in dit jaar. Het sedimentvolume is tussen 1991 en 2022 toegenomen met ca 44 Mm³, of 1,46 Mm³/j. Gemiddeld gezien vult het bekken zich dus op. De opvulsnelheid komt overeen met die gerapporteerd in Elias (2024), waar een toename van 1,43 Mm³/j werd gevonden.



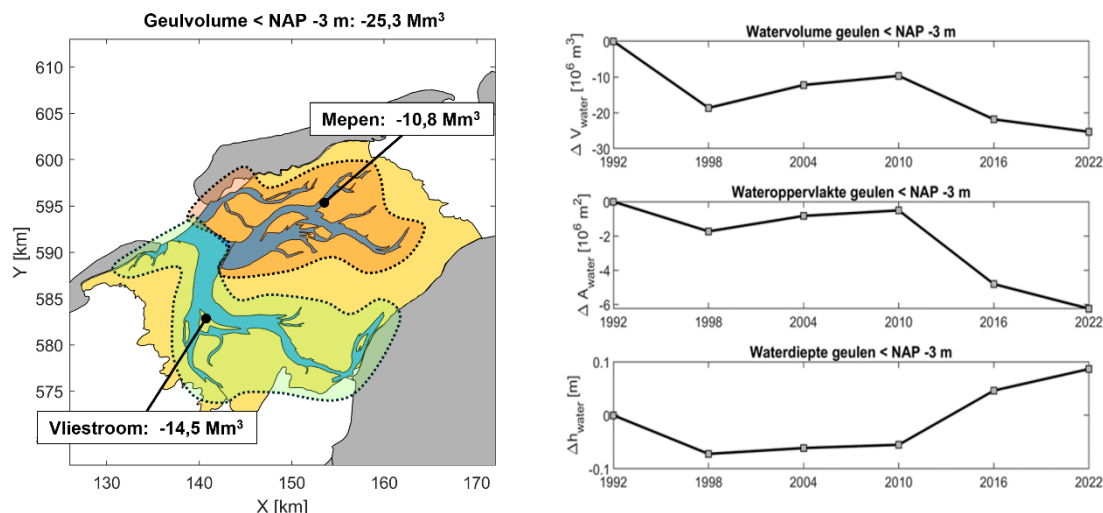
Figuur 5.5 Ontwikkeling sedimentvolume van het bekken over de periode 1992 – 2022 ten opzichte van 1992.

5.2.2 Volumeverandering geulen (Referentievlak: NAP -3m)

Het geulvolume in het Vlie neemt af met 25,3 Mm³ over de periode 1992-2022 (Figuur 5.6). Dit kan je ook interpreteren als een invulling van het geulenstelsel met 24,3 Mm³ aan sediment. Het geulenstelsel in het Vlie kan in twee delen gesplitst worden: de Vliestroom en daarop aantakende geulen (Vliesloot, Inschot, Blauwe Slenk, Geul langs Pollendam en Kimstergat) en het oostelijk gerichte geulenstelsel van de Mepen (inclusief Schuitengat en Slenk).

De grootste afname in oppervlakte, -10% vindt plaats in het geulenstelsel van de Vliestroom. Hier vullen de oude getijgeulen richting de Zuiderzee (zoals het Oude Vlie en het Inschot) nog steeds op met sediment. De afname in watervolume is kleiner dan de afname in oppervlakte, namelijk -3% (-14,5 Mm³), omdat met name de ondiepere geulen zich opvullen. Dit betekent dat de gemiddelde waterdiepte van het geulenstelsel toeneemt. Deze toename in diepte zit voornamelijk in de diepe delen.

Het geulenstelsel van de Mepen neemt licht toe in omvang (2%) en het geulvolume neemt af met 4% (-10,8 Mm³). De gemiddelde waterdiepte neemt dus af. De volumeveranderingen van de hoofdgeulen zijn klein ten opzichte van de totale watervolumes in deze geulen, wat betekent dat deze geulen relatief stabiel zijn.



Figuur 5.6 Links: Ontwikkeling van geulvolume in de twee geulstelsels tussen 1992 en 2022. Rechts: ontwikkeling van geulvolume, oppervlak en gemiddelde diepte van het areaal onder NAP -3m.

5.2.3 Droogvallende platen

De droogvallende platen worden gedefinieerd als het areaal gelegen boven NAP -1m. Het aandeel platen binnen het bekken blijft constant sinds 1992, terwijl de gemiddelde plaathoogte toeneemt. Op basis van het morfologisch gedrag kunnen in het bekken op hoofdlijnen drie zones met eigen ontwikkeling worden onderscheiden.

Platen langs de vastelandskust

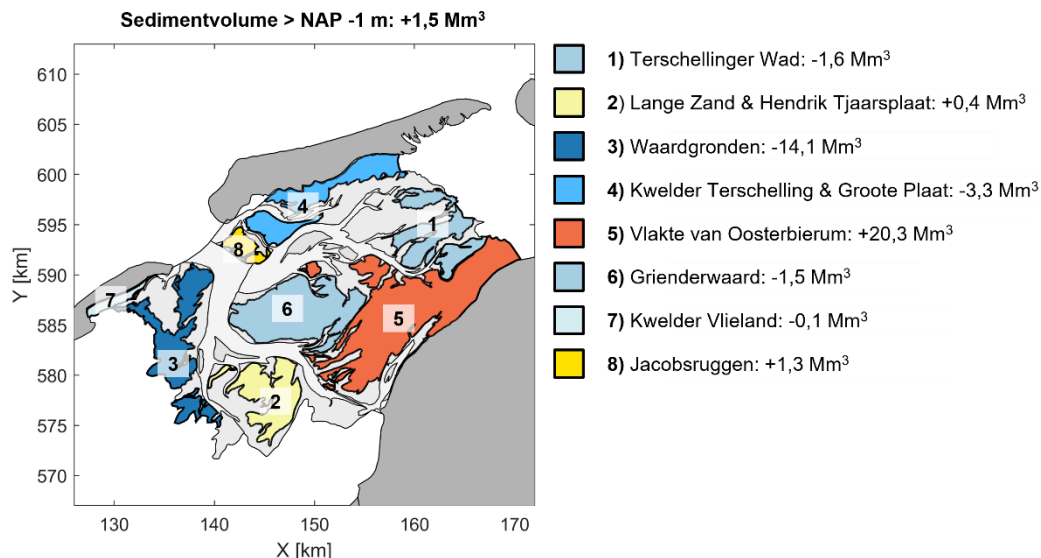
Er is een significante groei te observeren van de plaatcomplexen langs de vastelandskust, de Vlake van Oosterbierum ((5) in Figuur 5.7) en Lange Zand & Hendrik Tjaarsplaat (2). Beide plaatcomplexen nemen toe in sedimentvolume en oppervlakte. De Vlake van Oosterbierum, neemt daarnaast ook toe in hoogte. Deze groei is in lijn met de grootschalige die wordt geobserveerd in het gebied.

Platen centraal in het bekken

Het Terschellinger Wad (1), de Waardgronden (3) en de Grienderwaard (6) bevinden zich centraal in het bekken. Deze platen tonen een trend tegengesteld aan platen langs de vastelandskust. Alle drie de platen nemen af in sedimentvolume, oppervlakte en plaathoogte. Deze erosie centraal in het bekken is ook duidelijk te zien in de sedimentatie-erosiepatronen (zie Figuur 4.5).

Platen langs de eilandkusten

De plaatcomplexen 'Kwelder Terschelling & Groote Plaat' (4), Kwelder Vlieland (7) en de Jacobsruggen (8) bevinden zich dichtbij de keel van het zeegat en de eilanden. Het gemiddelde sedimentvolume en plaatoppervlak neemt af voor de complexen Kwelder Terschelling en Kwelder Vlieland. De Jacobsruggen vertonen juist een tegenovergestelde trend en nemen toe in volume, oppervlakte en hoogte. Deze toename kan worden verklaard door de grote zandtoevoer vanaf de buitendelta (zie ook de Beer et al., 2024).



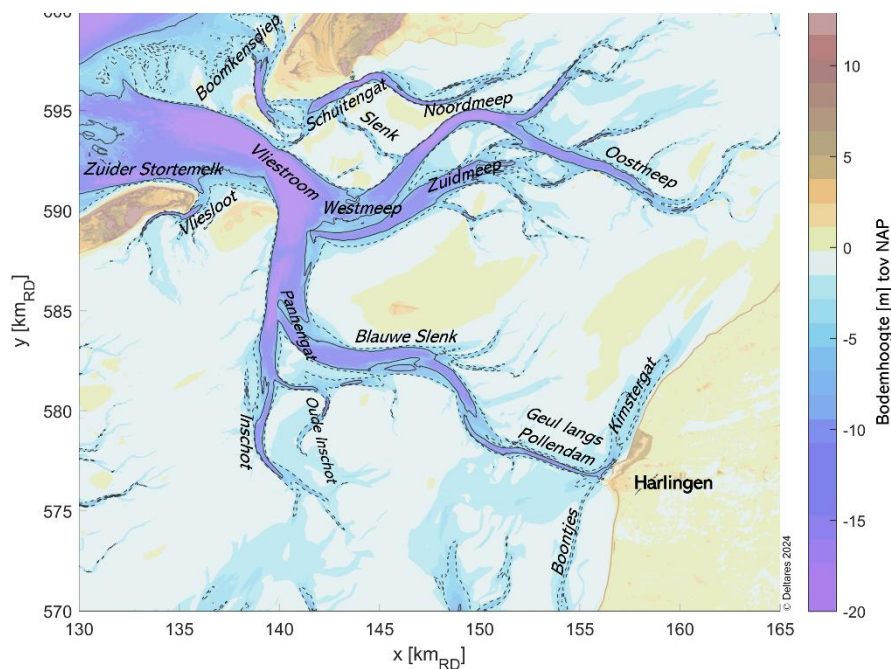
Figuur 5.7 Ontwikkeling van sedimentvolume op de droogvallende platen (> NAP -1 m) tussen 1992 en 2022. Platen weergegeven in gele en rode kleuren nemen toe in volume, platen weergegeven in blauw nemen af in volume.

Samenvattend vinden er geen grote verschuivingen plaats in de verhouding tussen de typen arealen. De netto oppervlaktes van de geulen, subgetijdegebied en droogvallende platen in het Vlie nemen af vanwege de netto afname van het kombergingsgebied door de verplaatsing van de wantijen. De percentages van deze arealen in het totale veranderende bekkenoppervlak blijven daardoor gelijk.

Er vindt een toename aan sedimentvolume in het bekken plaats: dit betekent dat er sprake is van opvulling in het bekken. Deze opvulling vindt met name plaats in de geulen en op de droogvallende platen langs de vastelandskust. Centraal in het bekken en dichtbij de eilandkusten is juist sprake van erosie.

6 Getijgeulen

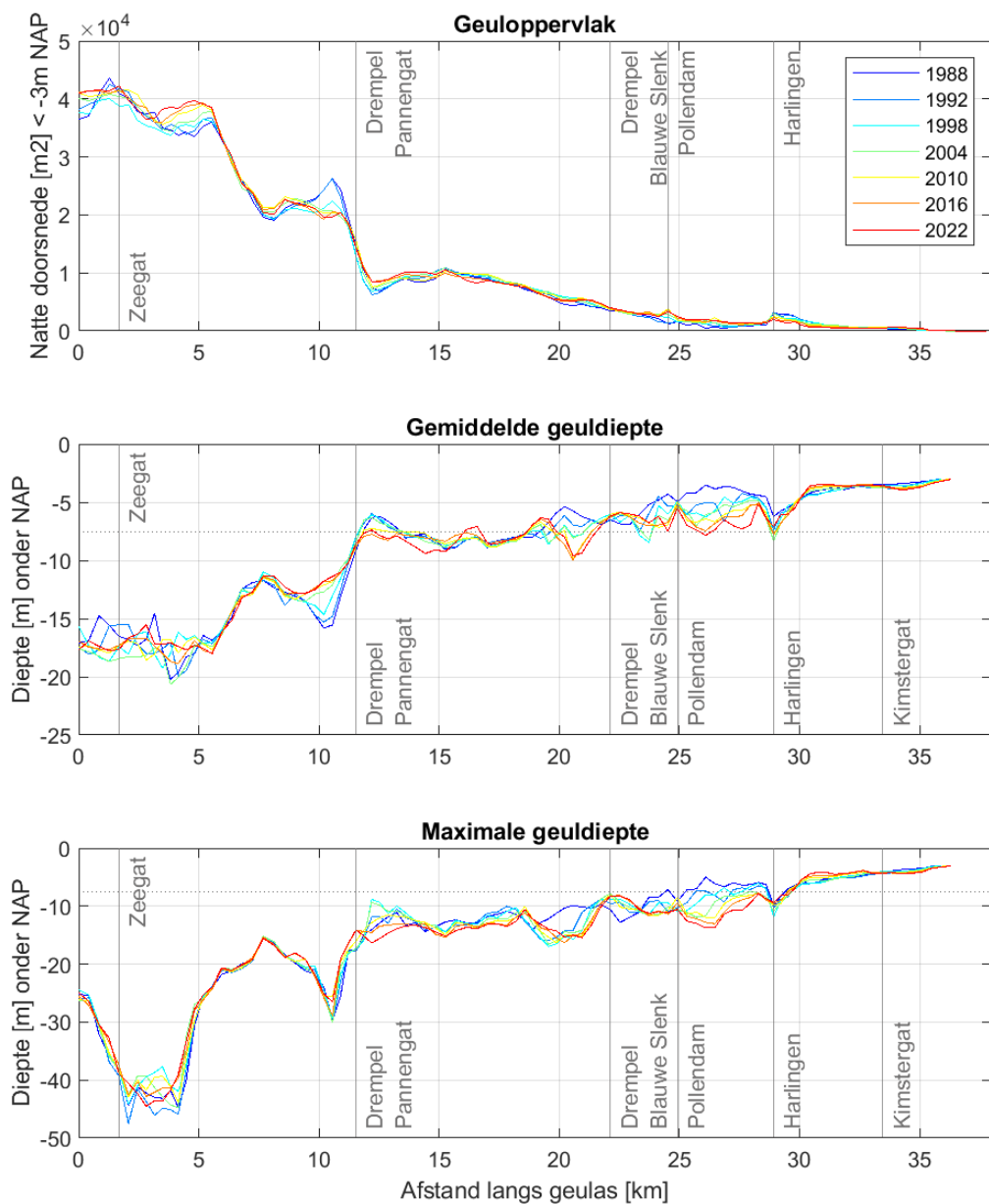
De belangrijkste getijdegeulen in het Vlie worden in dit hoofdstuk ‘van buiten naar binnen’ besproken, beginnend in het zeegat en vanuit daar steeds dieper het bekken in. De locaties van deze geulen zijn weergegeven in Figuur 6.1. Een algemene uitleg van de sturende principes achter de morfologie van getijgeulen uit eerdere kombergingsrapportages is te vinden in Bijlage C.



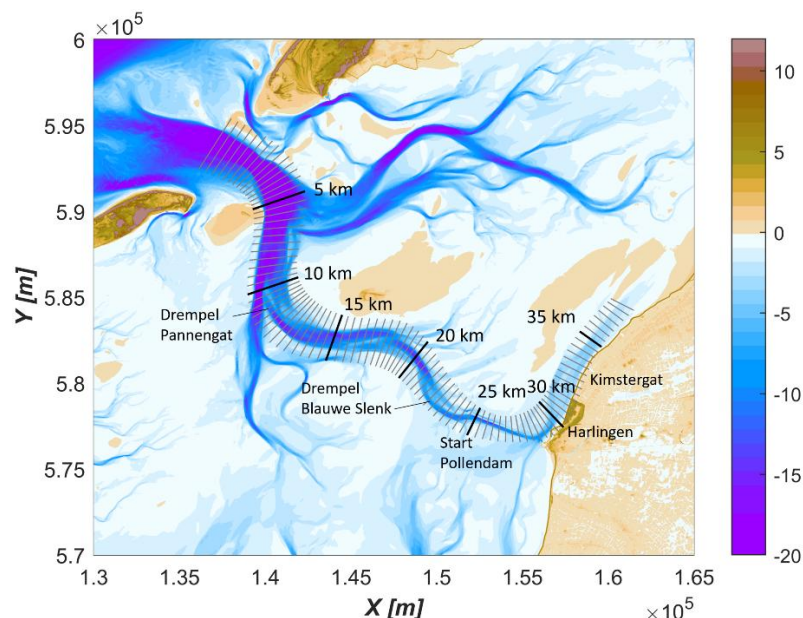
Figuur 6.1 Locaties van de getijgeulen in het Vlie die in dit hoofdstuk worden besproken. De doorgetrokken zwarte lijn geeft de NAP -7.5m contour (onderhoudsdiepte van de vaarweg Harlingen - Noordzee), en de gestippelde lijn de -3.5m contour (minimale diepte voor de veerboten naar de eilanden).

Het zeegat van het Vlie omvat drie geulsystemen: de centraal gelegen Vliestroom, het geulstelsel Boompensdiep – Schuitengat langs de kop van Terschelling (§6.1, inclusief de Slenk) en Zuiderstortemelk – Vlieslout langs de kop van Vlieland (§6.2). De Vliestroom vormt de hoofdgeul en voedt het grootste deel van het bekken. Vlak achter de keel van het zeegat vertakt de Vliestroom zich in twee hoofdgeulsystemen: de Mepen in het noordoosten en in het zuiden het geulstelsel dat naar de haven van Harlingen loopt. Dit geulstelsel bestaat uit de Blauwe Slenk (6.3), de Vaargeul langs Pollendam (6.4) en het Kimstergat (6.5). De Mepen, bestaande uit de Noord-, Oost-, Zuid- en Westmeep worden in deze kombergingsrapportage niet in detail besproken. Voor de algemene volume-ontwikkeling van de Mepen wordt verwezen naar Hoofdstuk 5.2.2.

De ontwikkeling in geuloppervlakte, gemiddelde geuldiepte en maximale geuldiepte van de Vliestroom tot aan de haven van Harlingen is weergegeven in Figuur 6.2. De diepte en het geuloppervlak zijn het grootst in de keel van het zeegat en nemen sprongsgewijs af: de eerste afname bevindt zich bij de splitsing Vliestroom – Westmeep (km 6 – 8) en de tweede bij de splitsing Vliestroom - Blauwe Slenk – Inschot ('Drempel Pannengat', km 12). In de Blauwe Slenk en de Vaargeul langs Pollendam (tussen km 12 en 29) nemen diepte en geuloppervlak geleidelijk af.



Figuur 6.2 Ontwikkeling van het geuloppervlak dieper dan NAP -3m (boven), de gemiddelde geuldiepte (midden) en de maximale geuldiepte (onder) voor doorsneden langs de vaarroute Harlingen – Noordzee. (Figuur 6.3 geeft de locaties van de doorsneden).



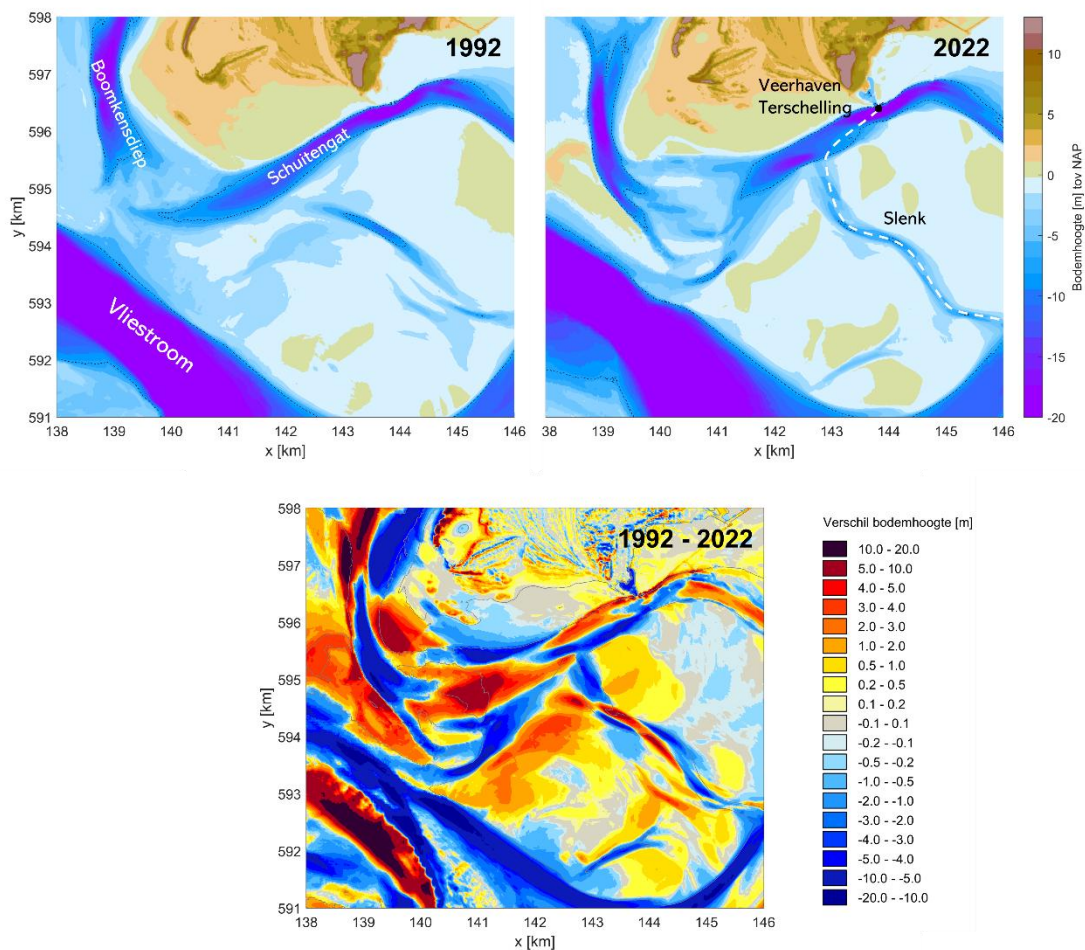
Figuur 6.3 Locaties van de doorsnedes weergegeven in Figuur 6.2.

6.1 Schuitemgat en Slenk

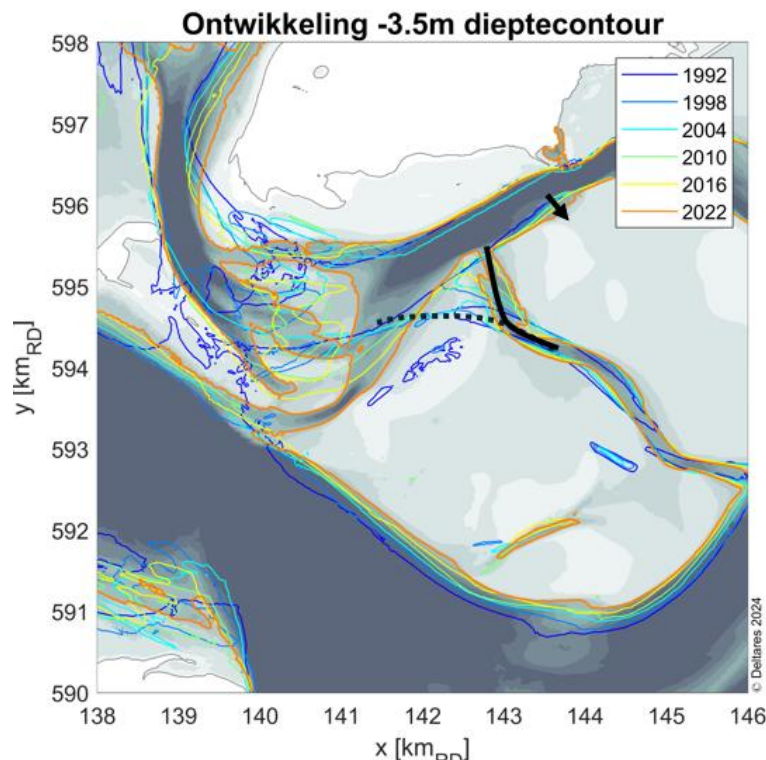
De veerbootroute naar Terschelling loopt tegenwoordig via de Slenk: een kortsluitgeul die de Westmeep en het Schuitemgat met elkaar verbindt (Figuur 6.4). De veerroute liep oorspronkelijk via de Vliestroom en het Schuitemgat, maar nadat de verbinding tussen het Schuitemgat en de Vliestroom verdween door sterke verzanding, werd de Slenk halverwege de jaren '90 doorgebaggerd en vormt sindsdien de veerbootroute naar Terschelling.

De ontwikkelingen in het Schuitemgat zijn nauw gerelateerd aan Engelschoek. Tot medio jaren 90 was er nog sprake van een verbinding tussen Boomkensdiep/Schuitemgat en de Vliestroom (Elias, 2021). Door het ontstaan van Engelschoek concentreerde de stroming zich in de daaropvolgende jaren rond de eilandkop van Terschelling en verdween de verbinding met de Vliestroom (Figuur 6.4 en Figuur 6.5). Het drempelgebied tussen Boomkensdiep en Schuitemgat is sterk dynamisch met verschillende in elkaar grijpende eb- en vloedscharen. In 2015 ontstond er weer een verbinding tussen Vliestroom en Schuitemgat, tussen de staart van Engelschoek en de Jacobsruggen in: de Doorsteek (Figuur 6.5). Naar aanleiding hiervan heeft Arcadis (2018) in opdracht van Rijkswaterstaat onderzocht of het Schuitemgat opnieuw als vaarroute gebruikt kan worden. Uit deze analyse bleek dat vanwege de hoge dynamiek de voorspelbaarheid van het openblijven van deze doorsteek te laag is en daarmee het risico voor een stabiele veerbootroute te groot om hierop in te zetten (van Til & Cleveringa, 2018).

Slenk is relatief stabiel in zijn ligging. Het noordelijke deel van de geul is langzaam aan het uitbochten en de uitstroom richting het Schuitemgat migreert steeds verder naar het noordoosten (Figuur 6.4 en Figuur 6.5). Hiermee is ook de oriëntatie van de aansluiting met het Schuitemgat geroteerd, waardoor deze minder gunstig is voor aanstroom tijdens vloed (van Til & Cleveringa, 2018). De veranderende oriëntatie aan de noordwestzijde van de Slenk hoeft voor de scheepvaart niet per se negatief te zijn, maar het effect is afhankelijk van de toekomstige ontwikkeling. De verschuiving van de aansluiting Slenk – Schuitemgat vertoont voorsnog een doorgaande trend, wat een verdere verschuiving in de toekomst kan betekenen (de Beer, et al., 2024).



Figuur 6.4 Bodemligging van het Schuitengat en de Slenk in 1992 en 2022 op basis van de vaklodingen. De zwarte stippellijn geeft de -7,5 m NAP dieptecontour. De witte stippellijn is de route van de veerboot naar Terschelling. Onder: erosie - sedimentatiekaart op basis van het verschil in bodemligging tussen 1992 en 2022.

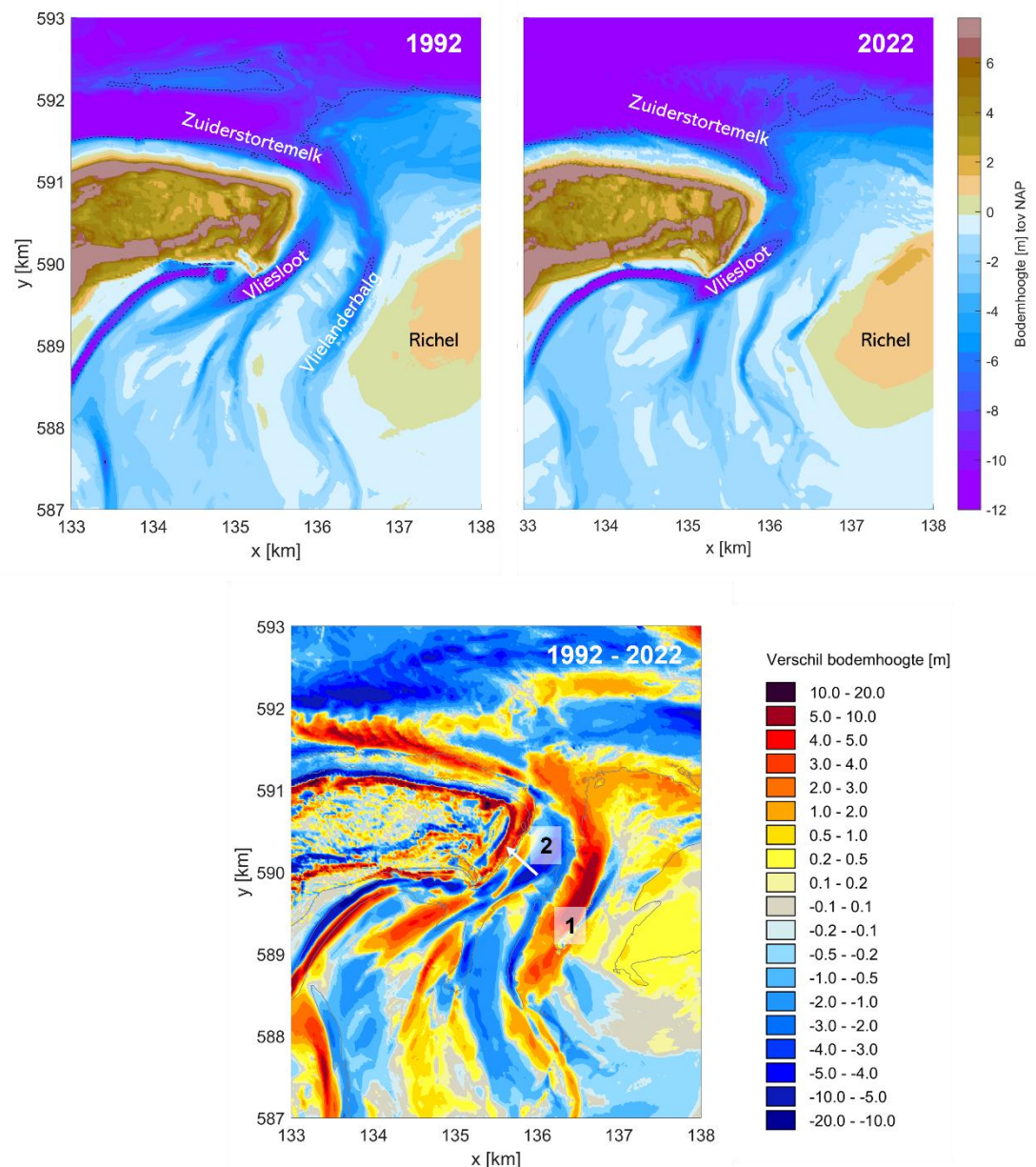


Figuur 6.5 -3,5m dieptecontour van het Schuitengat en de Slenk van 1992 tot 2022. De achtergrond geeft de bodemligging in 2022.

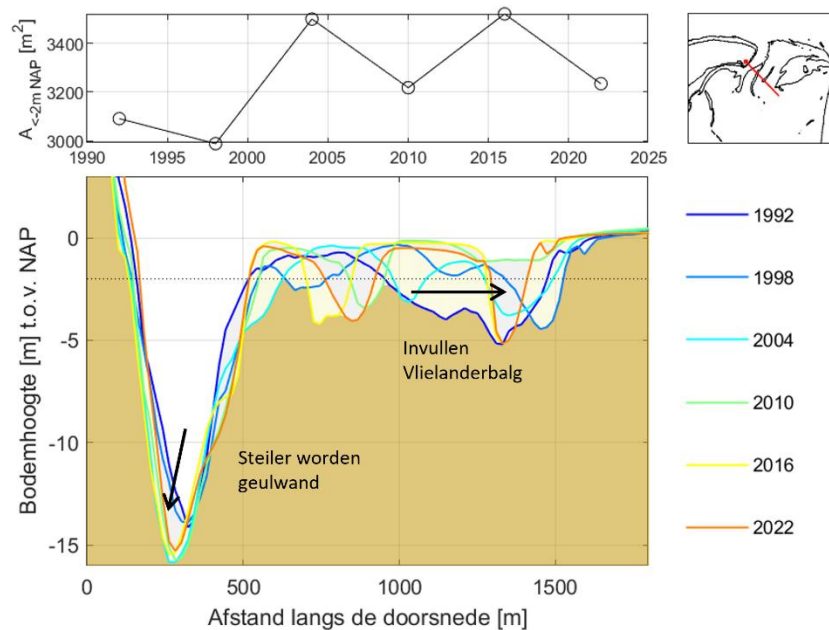
6.2 Zuiderstortemelk en Vliesloot

De geulen Zuiderstortemelk en Vliesloot omsluiten samen de eilandkop van Vlieland en staan in directe verbinding met elkaar. Aan de oostkop van Vlieland is er hierdoor een diepe geul direct langs het strand aanwezig. Deze geulen bepalen in grote mate de kustlijnontwikkeling in het noordoosten van Vlieland (de Beer, et al., 2024). Sinds de 19^{de} eeuw is er hier regelmatig sprake geweest van strandvallen en sindsdien is de kust meerdere malen versterkt door middel van strandhoofden, strekdammen en een oeverbestorting van de Vliesloot in 2007 (Oost, et al., 2019). In 2023 heeft er op het havenstrand, tijdens de uitvoering van een strandsuppletie, een strandval plaatsgevonden: er is toen een gedeelte van het strand in de stroomgeul verdwenen (de Beer, et al., 2024).

In het verleden bestonden er hier twee geulen, de Vliesloot direct langs de eilandkop en de Vlielanderbalg, die meer noord-zuid georiënteerd was (Figuur 6.6). Uit modelsimulaties blijkt dat tussen 1976 en 2022 de stroming door de Vlielanderbalg is verminderd terwijl de stroming in de Vliesloot toeneemt, met name dichtbij de eilandkop. In recentere bodemkaarten is te zien dat de Vlielanderbalg grotendeels is ingevuld (Figuur 6.6 en Figuur 6.7). De Vliesloot verplaatst zich richting de kust, met name ter hoogte van het Havenstrand. De geulwand is steiler geworden en de geul is dieper geworden (Figuur 6.7). Hierdoor treedt structurele erosie op bij het havenstrand en is er weinig ruimte voor suppleties (de Beer, et al., 2024).



Figuur 6.6 Ontwikkeling van de Vliesloot tussen 1992 en 2022 op basis van de vaklodingen. De zwarte stippellijn geeft de -7.5 m NAP dieptecontour. Onder: erosie - sedimentatiekaart op basis van het verschil in bodemligging tussen 1992 en 2022. 1) Opvullen van de Vlielanderbalg. 2) Verplaatsen Vliesloot richting de kust.

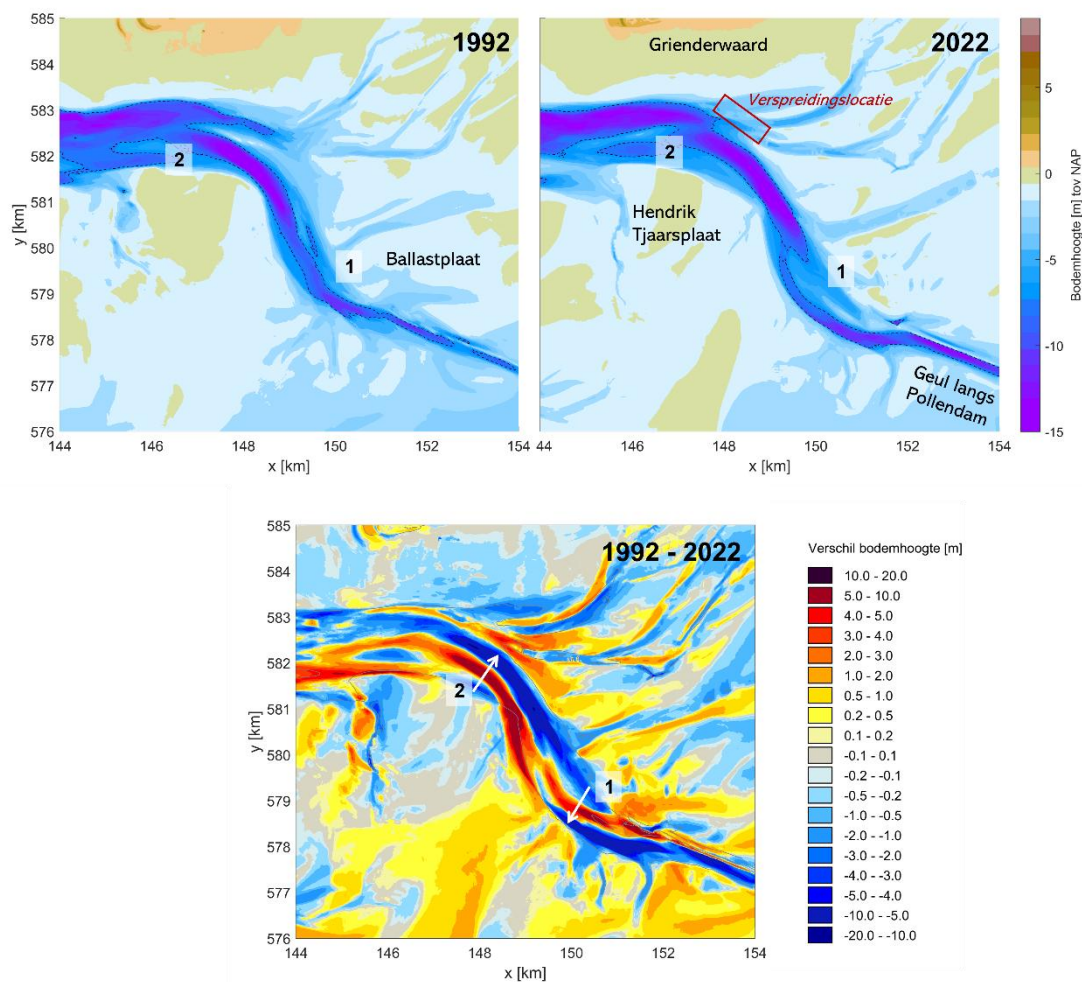


Figuur 6.7 Doorsnede van de Vlieslout langs het Havenstrand op basis van vaklodingen van 1992 tot 2022.

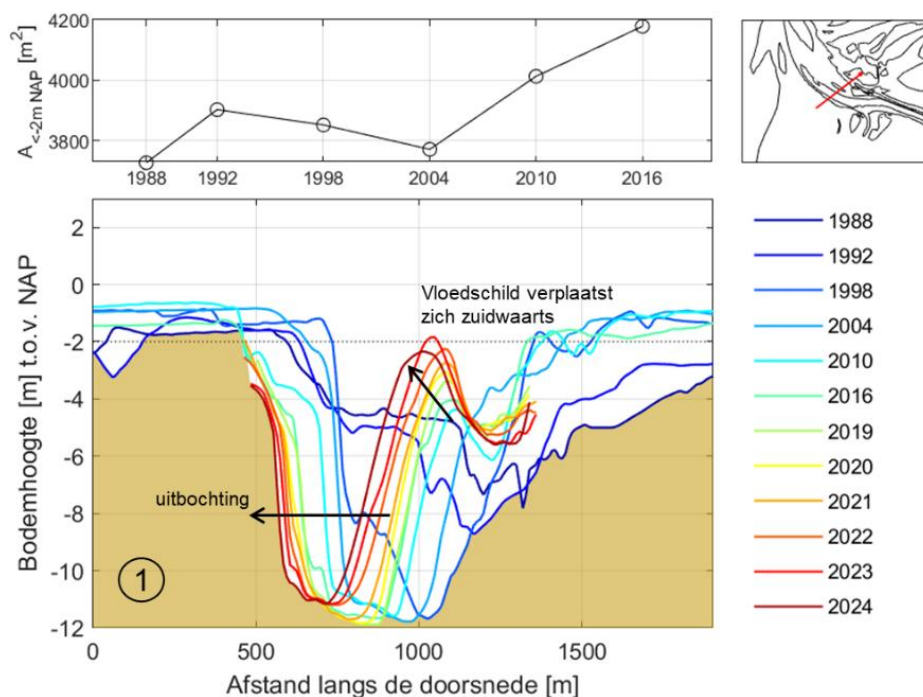
6.3 Blauwe Slenk

De Blauwe Slenk strekt zich uit vanaf de Vliestroom richting Harlingen. De geul vertoont daarbij twee knikpunten (cijfers 1 en 2 in Figuur 6.8). Beide knikpunten worden gekenmerkt door elkaar ontwijkende eb- en vloedscharen met daartussen drempelgebieden. De laatste 30 jaar zijn deze steeds verder gaan uitbochten. De Pollendam vormt daarbij een vast ophangpunt dat de beweging van de geul limiteert. Bij de aansluiting op de Pollendam neemt de geul bovendien sterk in omvang, diepte en oppervlakte af.

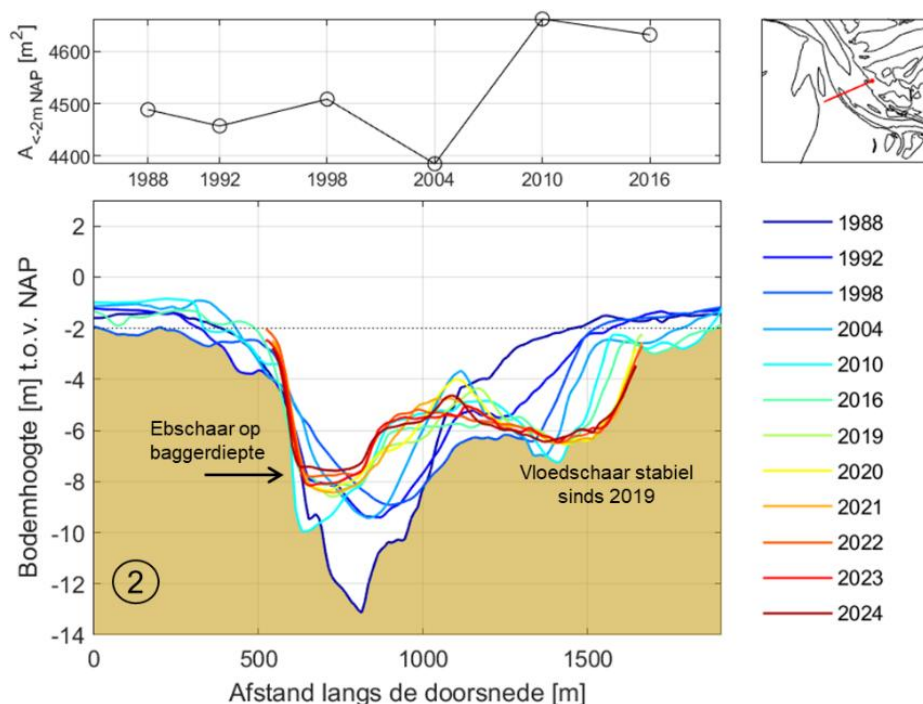
Bij de zuidelijke drempel (cijfer 1 in Figuur 6.8) wordt jaarlijks 300.000 – 500.000 m³ gebaggerd om de vaarweg op de streefdiepte van -7,5 m NAP te houden. Het baggervolume is hier groot, ruim de helft van het totale jaarlijkse baggeronderhoud van het Vlie, vanwege de lange en ondiepe drempelgeul en het dynamische drempelgebied (van der Vegt & Cleveringa, 2022). In Figuur 6.8 is te zien hoe de Blauwe Slenk in 1992 nog als een vloeiende lijn richting de Pollendam loopt en het drempelgebied nog nauwelijks is ontwikkeld. In de daaropvolgende jaren en ontwikkelen zich een elkaar ontwijkende eb- en vloedschaar met drempelbanken eromheen, waarbij de vaarroute door ebschaar loopt. Bij de kop van de Pollendam bocht de ebschaar steeds verder uit, een ontwikkeling die ook in de meest recente bodems gestaag doorzet, waardoor de vaarroute door de ondiepe ebschaar steeds langer wordt (te zien in de doorsnede in Figuur 6.9 en Figuur 6.10). Er ontwikkelt zich een langgerekt drempelgebied, wat een significante baggerinspanning vereist om op de gewenste vaardiepte te houden (Quataert, et al., 2024).



Figuur 6.8 Bodemligging van de Blauwe Slenk tussen 1992 en 2022 op basis van de vaklodingen. De zwarte stippellijn geeft de -7.5 m NAP dieptecontour. Onder: erosie - sedimentatiekaart op basis van het verschil in bodemligging tussen 1992 en 2022. De witte pijlen laten de uitbocht zien op beide knikpunten.



Figuur 6.9 Doorsnede door het zuidelijke drempelgebied bij Blauwe Slenk, op basis van vaklodingen van 1988 tot 2016 en beheerlodingen van 2019 tot 2024. Geuloppervlak in het bovenste paneel is enkel op basis van vaklodingen omdat de beheerlodingen niet het volledige gebied onder NAP -2 m dekken.



Figuur 6.10 Doorsnede door het zuidelijke drempelgebied bij Blauwe Slenk over de baggerlocatie, op basis van vaklodingen van 1988 tot 2016 en beheerlodingen van 2019 tot 2024. Geuloppervlak in het bovenste paneel is enkel op basis van vaklodingen omdat de beheerlodingen niet het volledige gebied onder NAP -2 m dekken.

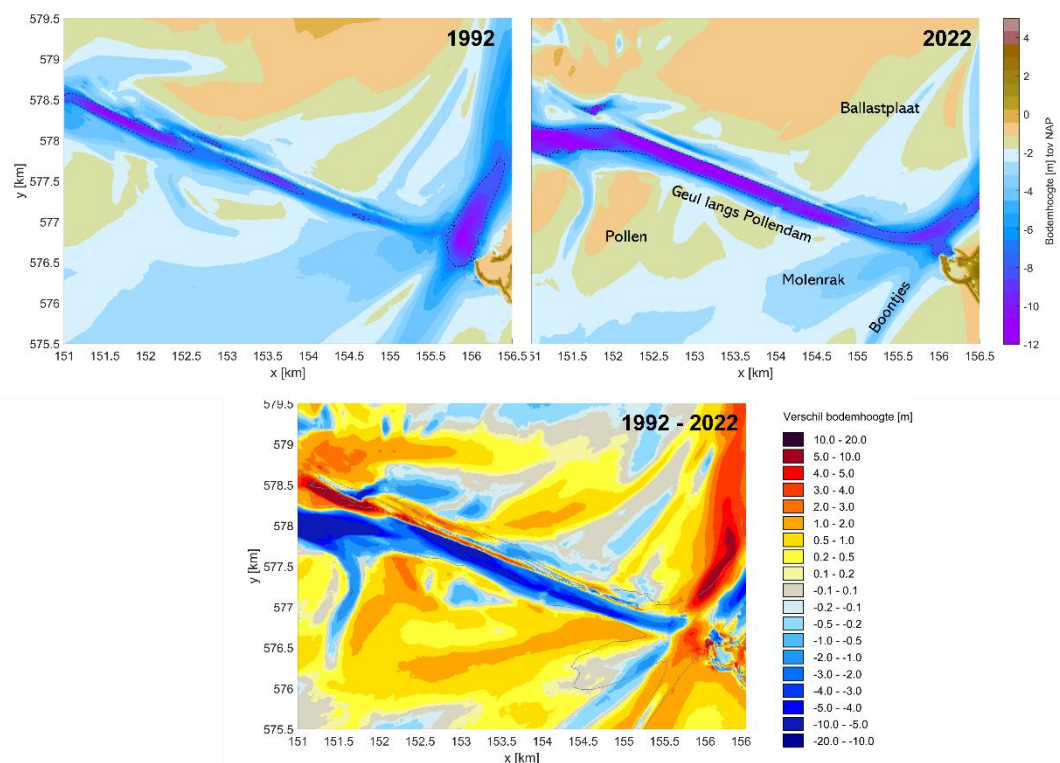
6.4 Geul langs Pollendam

De Pollendam ligt ten westen van de haven van Harlingen, en is in 1874-1875 aangelegd om de geul op diepte te houden (zie Bijlage B.5). Er vormde een geul ten zuiden van de dam, de Vaargeul langs Pollendam, die tot heden wordt gebruikt als vaargeul naar de haven van Harlingen. In 1930 was de diepte -3,6 m tot NAP -3,9 m en de breedte 50 m.

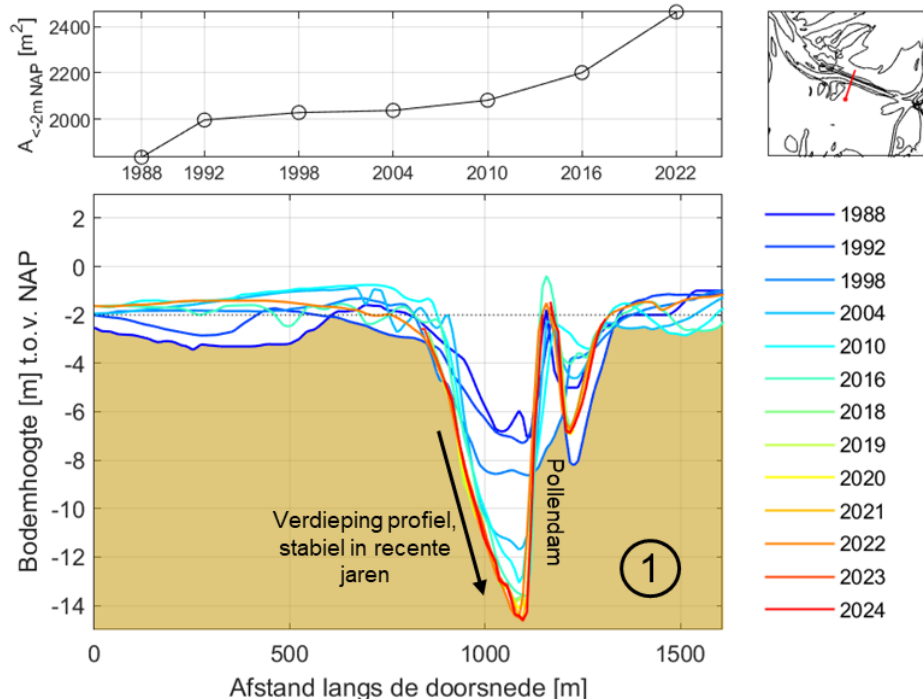
Sinds de verdieping in 2007 (Mulder et al., 2005) is de streefdiepte NAP -7,5 m en de breedte 100 m (Oost et al, 2019; van der Vegt & Cleveringa, 2022). Aan het landwaartse einde van de dam nabij de haven van Harlingen is baggeronderhoud nodig om de vaargeul op diepte te houden, gemiddeld 60.000 tot 120.000 m³ per jaar.

Langs de dam zelf is de geul door insnijding flink verdiept sinds 1992 (Figuur 6.11 en Figuur 6.12). Het omliggende plaatgebied, zowel de Pollen aan de zuidzijde van de geul als de Ballastplaat aan de noordzijde neemt echter gestaag toe in hoogte, waardoor het lokale kombergingsvolume dat wordt bediend door de Geul langs de Pollendam afneemt. Uit modelresultaten blijkt dat deze ontwikkeling de afgelopen decennia heeft geresulteerd in het afnemen van de stroming over het plaatgebied en het concentreren van de stroming in de geul, die hierdoor in diepte toeneemt (Quataert, et al., 2024). Tegelijkertijd verplaatst het wantij tussen het Marsdiep en het Vlie zich hier steeds verder richting de Pollendam (zie ook Hoofdstuk 4.2.2 en Figuur 4.4).

Tussen het landwaartse einde van de Pollendam en de haven van Harlingen vindt deze verdieping echter niet meer plaats en wordt de geul op diepte gehouden door baggeronderhoud. Het afnemende kombergingsvolume lijkt vooralsnog niet te resulteren in een toename van het baggerbezwaar van de Geul langs Pollendam, maar kan hier in de toekomst mogelijk wel toe leiden (Quataert, et al., 2024).



Figuur 6.11 Bodemligging van de Geul langs de Pollendam tussen 1992 en 2022 op basis van de Vaklodgingen. De zwarte stippellijn geeft de NAP -7.5 m dieptecontour. Onder: Sedimentatie – erosie kaart op basis van het verschil in bodemligging tussen 2022 en 1992. Duidelijk zichtbaar is de opvulling van uitlopers (ebscharen) van Kimstergat in de Pollen.



Figuur 6.12 Doorsnede door de Geul langs Pollendam, op basis van vaklodingen van 1988 tot 2016 en beheerlodingen van 2018 tot 2024.

6.5 Kimstergat

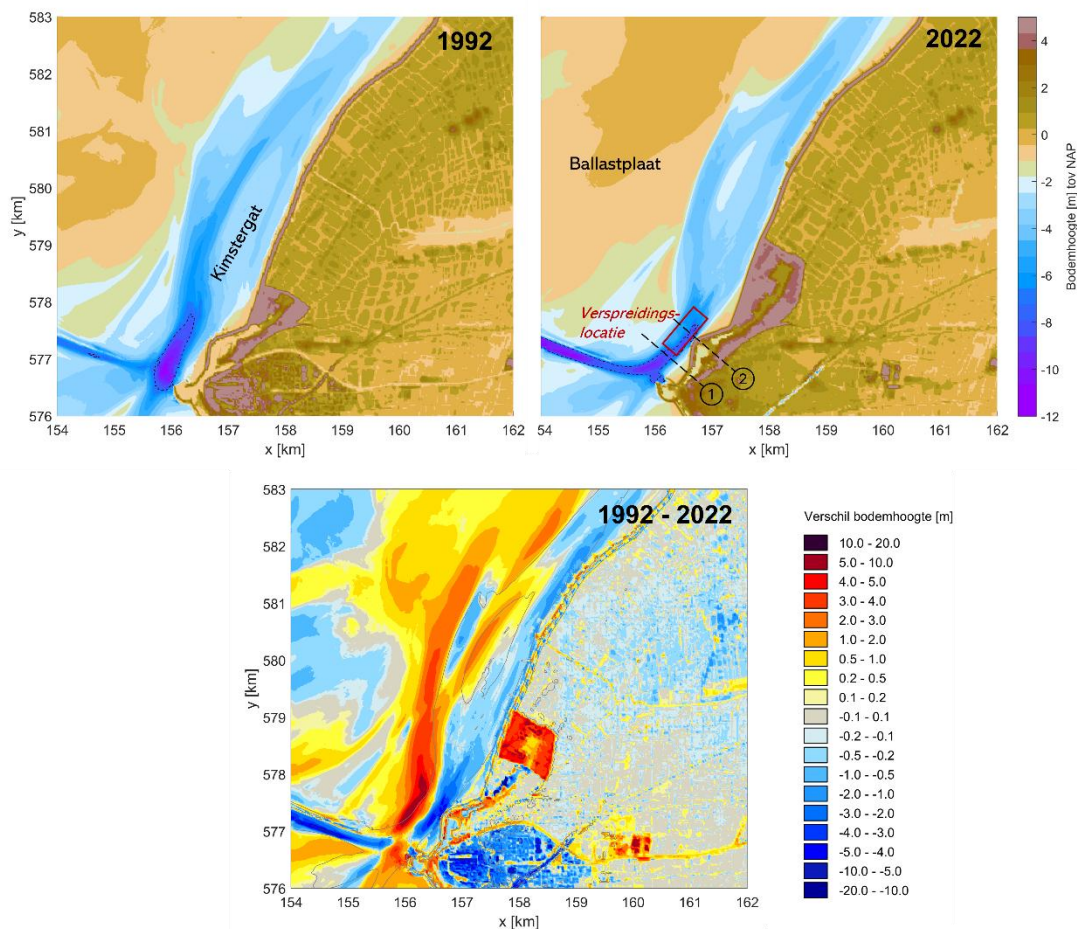
Het Kimstergat loopt van Harlingen naar het noordoosten langs de kust. Bij de ingang van het Kimstergat ligt verspreidingslocatie Kimstergat (Figuur 6.13), welke veel gebruikt wordt voor het verspreiden van baggerspecie afkomstig uit baggeronderhoud bij de Geul van Pollendam, Boontjes en door de haven van Harlingen. Jaarlijks wordt hier 110.000 - 406.000 m³/j verspreid door Rijkswaterstaat. Daarnaast wordt 0,7 – 1,2 miljoen m³/j verspreid door de haven van Harlingen (Cleveringa, 2024; Baptist, et al., 2019). Vanwege de opvulling van het gebied zijn er zorgen over of het Kimstergat in de toekomst geschikt blijft als verspreidingslocatie.

De Ballastplaat, die naast het Kimstergat ligt, hoogt op en breidt in oostelijke richting uit, waardoor het Kimstergat steeds sterker tegen de kust gedrukt wordt (Figuur 6.14 en Figuur 6.15). Deze ontwikkeling maakt onderdeel uit van een grotere trend van sedimentatie en ophoging van de plaatgebieden langs de Friese vastelandskust. Hierdoor neemt het kombergings- en geulvolume van het Kimstergat sterk af en wordt de geul ondieper, met name in het zuidelijke deel van de geul nabij het verspreidingsvak, waar het doorstroomoppervlak sinds 1988 is gehalveerd. Ook de debieten nemen hier af (Quataert, et al., 2024; Grasmeijer, et al., 2022). De ordegrrootte van sedimentvolumes die in het Kimstergat worden verspreid (~ 1 – 1,5 miljoen m³/j) is ongeveer 10 keer zo groot als de autonome afname van het geulvolume ($8,4 \cdot 10^4$ m³/j). De relatief grote hoeveelheden baggerspecie kunnen de natuurlijke trends van sedimentatie in dit gebied versnellen en daarmee het kombergingsvolume van de geul verkleinen.

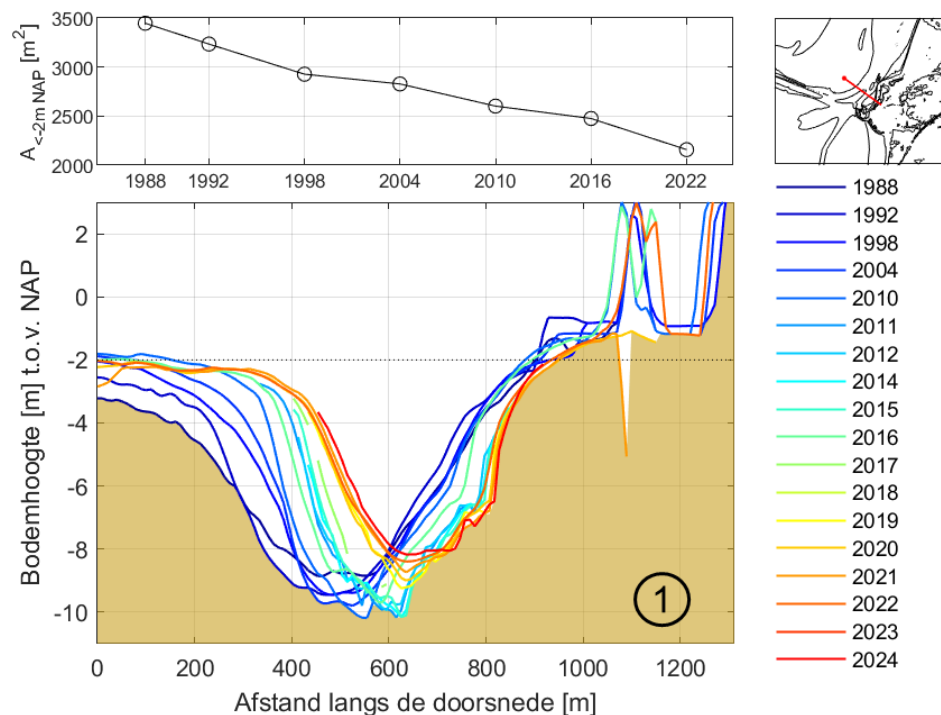
Tegelijkertijd is bij de dijk van Harlingen een andere ontwikkeling te zien: omdat de geul tegen de dijk gedrukt wordt, wordt de geul lokaal dieper en de geulwand steiler (Figuur 6.15). Dit kan potentieel zorgen voor stabiliteitsproblemen langs de dijk (zie ook Hoofdstuk 10.1).

De sedimentatie en afname van de omvang van het Kimstergat betekent dat het lastiger zal worden om de baggerspecie daar te verspreiden. Door afnemende diepte is het verspreidingsvak al meerdere malen verplaatst.

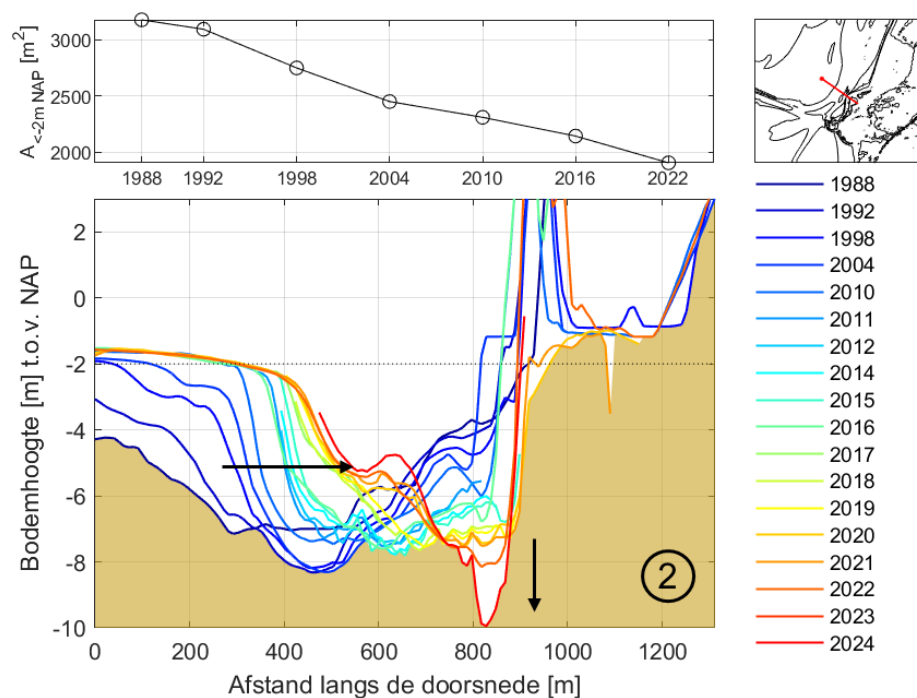
Op langere termijn zal de sedimentatie van het Kimstergat en de Vlake van Oosterbierum zorgen voor een afname en uiteindelijk het geheel verdwijnen van het kombergingsgebied van het Kimstergat. Dit zal invloed hebben op de stroming richting de haven van Harlingen en leiden tot sedimentatie in de geulen (Boontjes en Geul langs de Pollendam). Hierdoor is het te verwachten dat het baggerbezwaar aan het einde van de geul langs de Pollendam en in de Boontjes in de toekomst zal toenemen (Quataert et al., 2024; Smits et al., 2022).



Figuur 6.13 Bodemligging van het Kimstergat tussen 1992 en 2022 op basis van de vaklodingen. De zwarte stippellijnen met nummers 1 en 2 geven de locaties van doorsnede 1 en 2. Onder: erosie-sedimentatiekaart van het Kimstergat tussen de vaklodingen van 1992 en 2022.



Figuur 6.14 Doorsnede door het Kimstergat, direct zuidelijk van de verspreidingslocatie, op basis van vaklodingen van 1988 – 2010 en beheerlodingen van 2011 tot 2024. Geuloppervlak in het bovenste paneel is enkel op basis van vaklodingen omdat de beheerlodingen niet het volledige gebied onder NAP -2 m dekken. De oostwaartse uitbouw van de ballastplaat is hier duidelijk te zien. Het Kimstergat migreert in oostelijke richting en wordt ondieper, de natte doorsnede neemt trendmatig af.

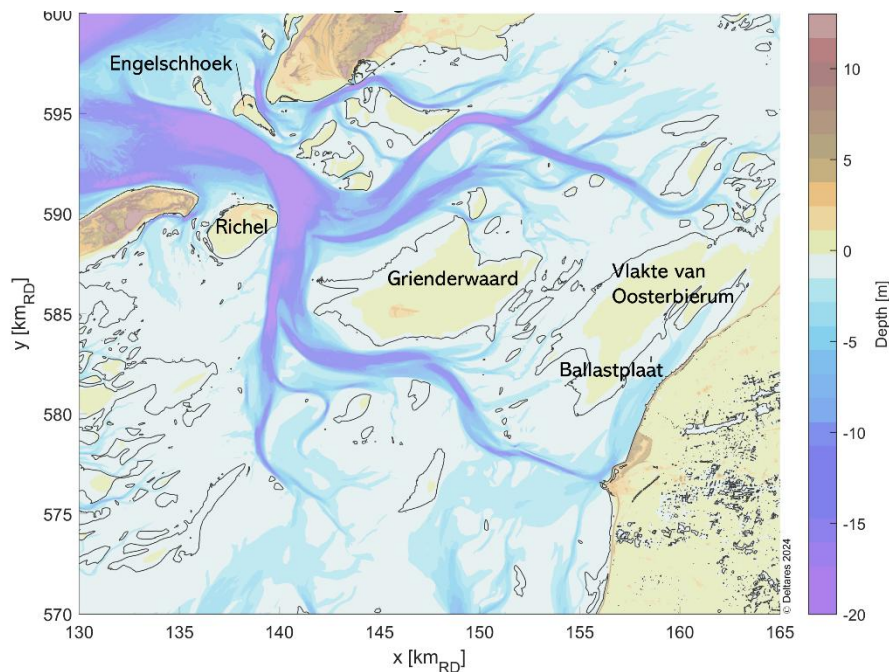


Figuur 6.15 Doorsnede door het Kimstergat over de verspreidingslocatie, op basis van vaklodingen van 1988 – 2010 en beheerlodingen van 2011 tot 2024. Geuloppervlak in het bovenste paneel is enkel op basis van vaklodingen omdat de beheerlodingen niet het volledige gebied onder - NAP 2 m dekken. Het Kimstergat is hier zover oostwaarts opgeschoven dat deze nu direct tegen de dijk aan ligt en wordt lokaal dieper terwijl de natte doorsnede trendmatig blijft afnemen.

7 Wadplaten

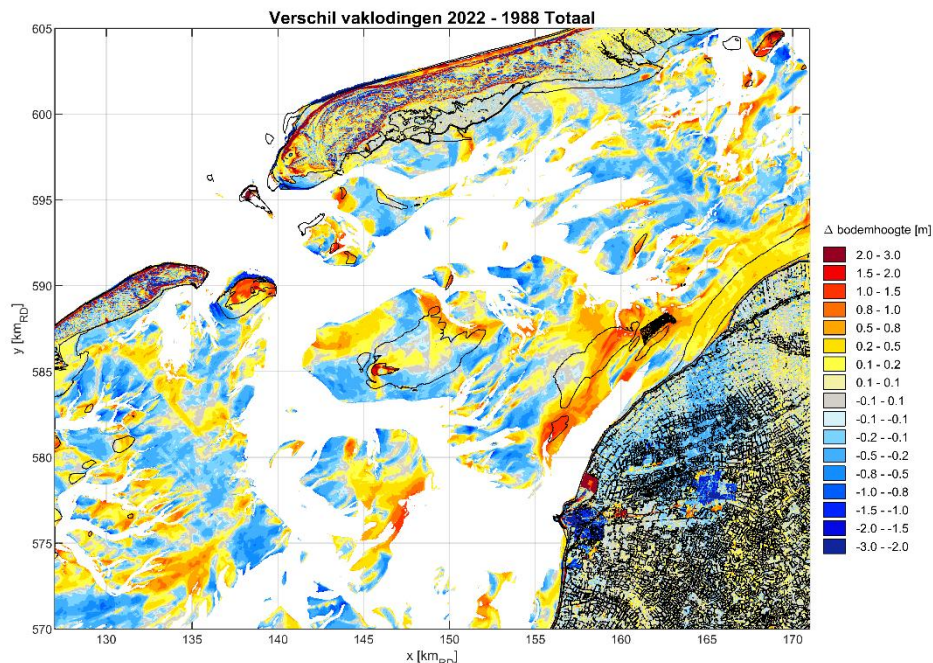
Wadplaten zijn de gebieden met een hoogte tussen laag- en hoogwater. Door hun hoogteligging vallen de wadplaten tijdens laagwater vrijwel geheel droog. Alleen op de diepere delen van de wadplaten, die niet direct afwateren op de geulen, kan een laagje water blijven staan tijdens laagwater.

De belangrijkste wadplaten in het Vlie zijn de Vlakte van Oosterbierum en de Ballastplaat nabij het Friese vasteland, de Grienderwaard in het midden van het bekken, en de Richel (die ook tijdens hoogwater boven water ligt) en Engelschhoek in het zeegat (Figuur 7.1).



Figuur 7.1 Locaties van de grootste wadplaten in het Vlie (achtergrond: vaklodingen 2022, de zwarte lijn is de NAP -0.5m contour).

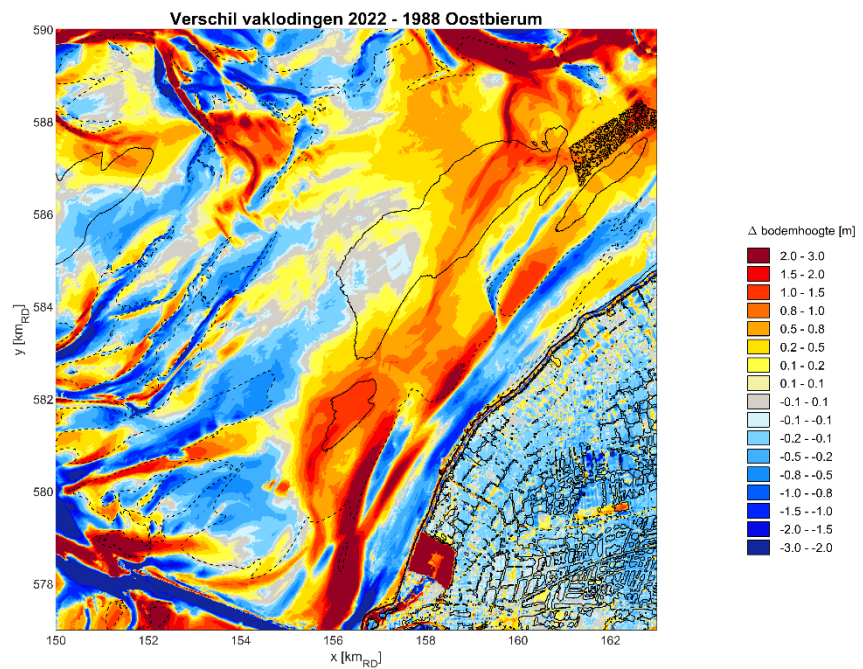
Het plaatareaal in het Vlie is relatief constant in oppervlakte maar vertoont sterke ruimtelijke verschillen in morfologisch gedrag. Langs de Friese kust, vooral bij de vlakte van Oosterbierum neemt het areaal droogvallend gebied toe terwijl er erosie van de wadplaten plaatsvindt in het centrale deel van het bekken en nabij de eilandkusten (hier wordt nader op in gegaan in Hoofdstuk 5.2). Deze trends zijn terug te zien in de erosie-sedimentatiekaart in Figuur 7.2.



Figuur 7.2 Verschil in hoogteligging tussen 1988 en 2022 van de plaatgebieden in het Vlie met een hoogteligging boven de NAP -1m. De zwarte lijnen geven de 0m en 1m dieptecontour in 2022.

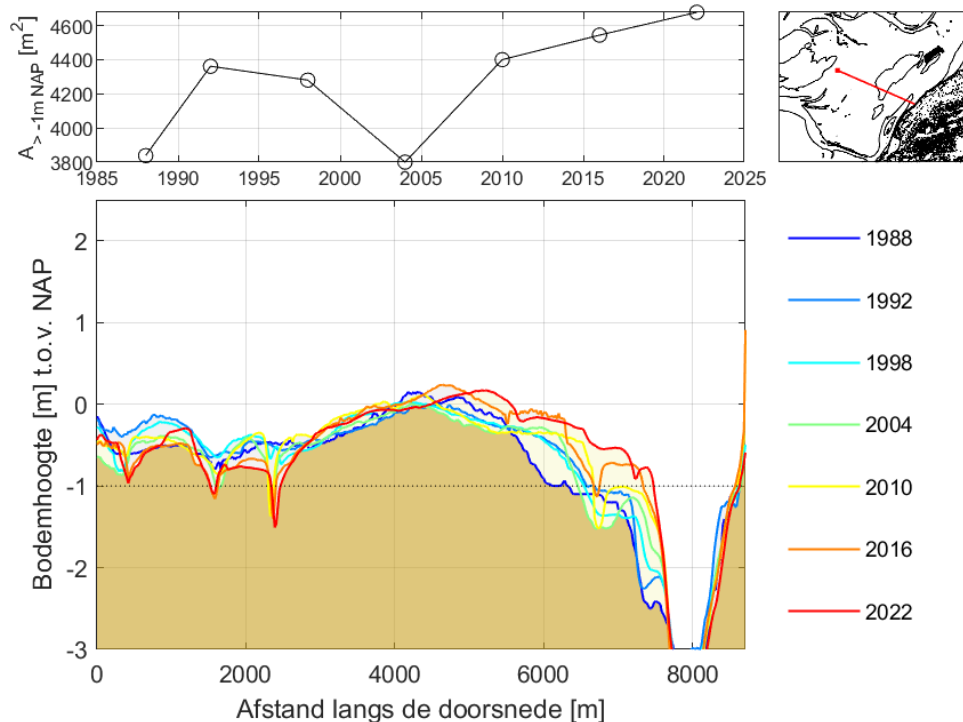
7.1 Vlakte van Oosterbierum

De plaatgebieden voor de Friese vastelandskust vertonen een sterke sedimentatie. Deze plaatgebieden zijn sinds de aanleg van de Afsluitdijk ontstaan, het oppervlakte is sterk uitgebreid en de hoogte is toegenomen (Figuur 7.3). Deze trend wordt bevestigd door de volume-analyse in Hoofdstuk 5.2. Het hele gebied zeewaarts van het Friese vasteland is een aangesloten sedimentatiegebied dat doorloopt over het wantij tot in het kombergingsgebied van het Borndiep (Figuur 7.2). De oorzaak van de sedimentatie in dit gebied ligt in de gewijzigde stromingspatronen na de afsluiting van de Zuiderzee. Een toenemend aandeel van de sedimentatie hier bestaat uit slib. Samengaande en waarschijnlijk ook samenhangend met deze hoogtetoeename van de platen is er ook een netto uitbreiding van de kwelders voor de Waddenzeedijk. Uit metingen van het Slibmotor Koehoal project bleek dat lokaal er tijdelijk ook afname van het kwelderareaal kan plaatsvinden.



Figuur 7.3 Verschil in hoogteligging tussen 1988 en 2022 van de plaatgebieden voor de Friese vastelandskust. De zwarte lijnen geven de 0m en 1m dieptecontouren in 2022, de gestippelde lijn de NAP - 3m contour.

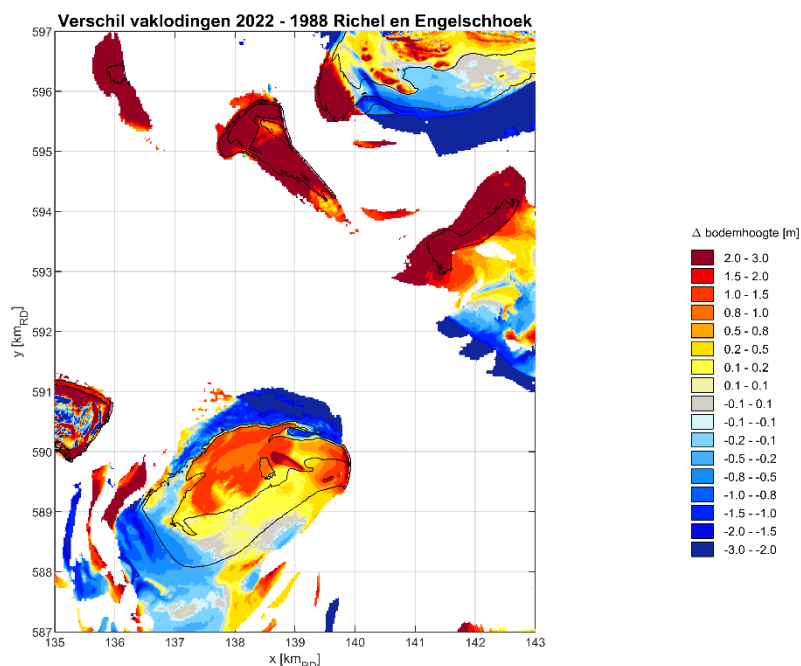
De doorsnede in Figuur 7.4 toont hoe de plaat steeds verder ophoogt en richting de vastelandskust opschuift. Hierdoor komt het Kimstergat, dat zich tussen dit plaatgebied en de dijk bevindt, in de verdrukking (zie paragraaf 6.5). Daarnaast neemt het lokale kombergingsvolume van het Kimstergat af door de ophoging van deze plaatgebieden.



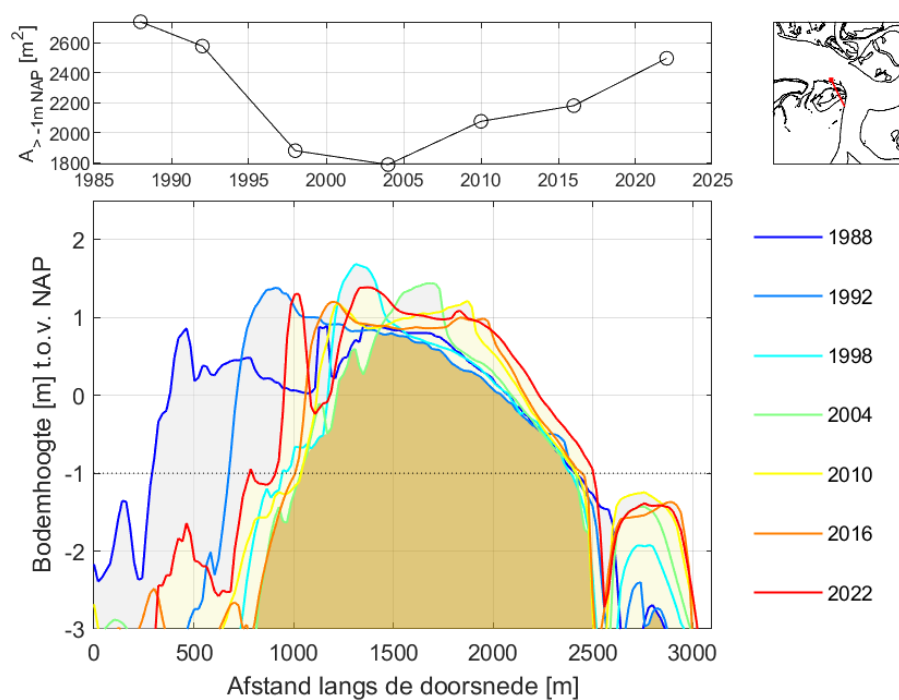
Figuur 7.4 Doorsnede over de Vlake van Oosterbierum en het Kimstergat. Het bovenste paneel toont het droogvallende plaatoppervlak in de doorsnede (hoger dan NAP -1m).

7.2 Richel en Engelschhoek

De Richel heeft al een langere geschiedenis en is een hoge droogvallende plaat geworden na de afsluiting van de Zuiderzee. Het centrale en hoogst gelegen gedeelte van de Richel is sinds 1988 ruim een meter hoger geworden en bevindt zich tegenwoordig permanent boven de hoogwaterlijn (Figuur 7.5). De positie van de Richel is opvallend stabiel, met name wanneer deze wordt vergeleken met Engelschhoek; er is geen sprake van structurele migratie. Uit de volumebalans in Quataert et al. (2024) blijkt wel dat zowel het oppervlakte als het volume dat permanent boven water ligt ($> \text{NAP } 1\text{m}$) sinds 1991 significant zijn toegenomen. Een doorsnede over de Richel toont hoe de noordelijke rand van de plaat zuidwaarts is opgeschoven en aan de zuidelijke kant met name ophoging plaatsvindt (Figuur 7.6).



Figuur 7.5 Verschil in hoogteligging tussen 1988 en 2022 van de Richel en Engelschoek. Punten die in 2022 boven NAP -1m liggen worden getoond. De zwarte lijnen geven de 0m en 1m dieptecontour in 2022. In 1988 was Engelschoek nog een zandbank en geen droogvallende wadplaat.

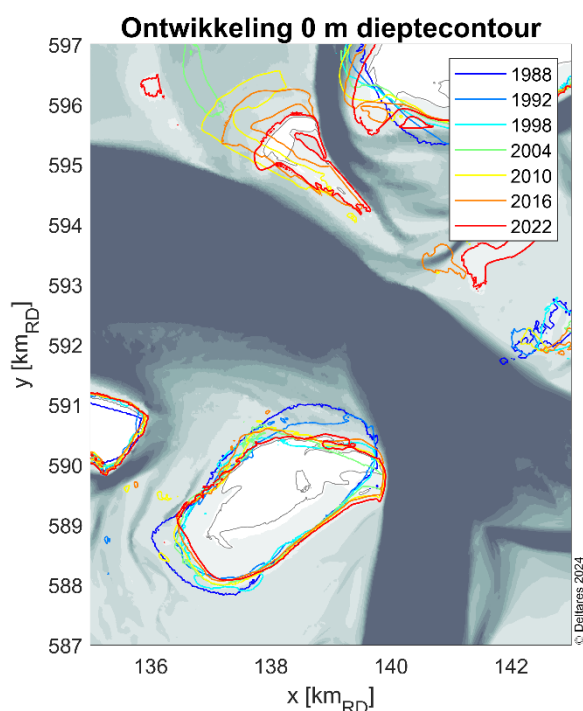


Figuur 7.6 Doorsnede over de Richel. De plaat is aan noordelijke zijde (links in de doorsnede) steeds kleiner geworden, terwijl aan zuidelijke zijde sedimentatie en ophoging heeft plaatsgevonden.

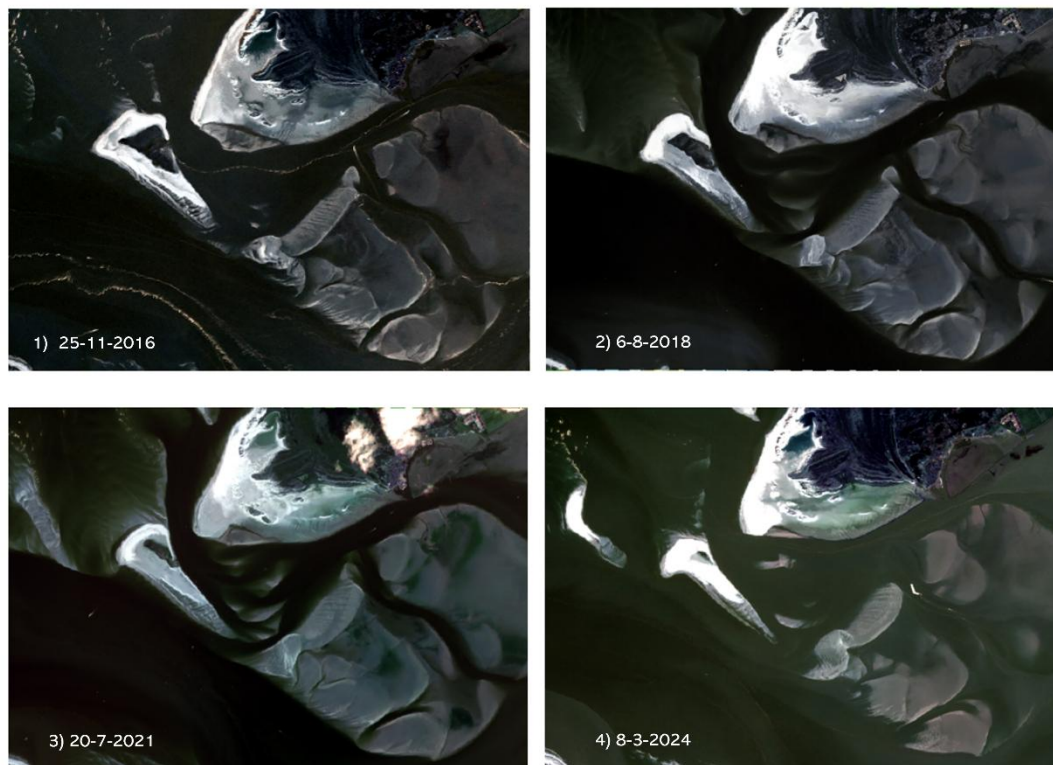
De Engelschoek-Jacobsruggen zijn een relatief jonge ontwikkeling, pas zichtbaar als droogvallende bank in de vaklodingen van 2010. Daarvoor was de Engelschoek een zandbank die niet droogviel (in de verschilkaart is dan ook een sterke ophoging te zien op de locatie van de huidige Engelschoek; zie Figuur 7.5). In tegenstelling tot de stabiele Richel vertoont Engelschoek een sterke migratie in landwaartse richting (Figuur 7.7; van Til &

Cleveringa, 2018). Gelijktijdig met deze migratie is de plaat ook sterk van vorm veranderd. Op basis van satellietbeelden is de migratie van Engelschhoek in meer detail gevolgd door Löhr (2024) waarbij ook veranderingen op de tijdschaal van enkele weken zijn meegenomen (Figuur 7.8). Hierdoor kunnen ook ontwikkelingen die zich in de periode tussen twee Vaklodingen meetmomenten voltrekken in beeld gebracht worden. Satellietbeelden laten zien dat vanaf 2018 een nieuwe bank vormt ten noordwesten van Engelschhoek, die een vorm heeft vergelijkbaar met de vorm van Engelschhoek in 2003. Naar verwachting zal deze bank op termijn gaan samenvoegen met Engelschhoek. Het ligt dus niet in de lijn der verwachting dat Engelschhoek op termijn zal verdwijnen (Löhr 2024; de Beer et al. 2024). Deze naar binnen migrerende banken in de keel van het zeegat zorgen voor een zandtoevoer het bekken in en voeden de achterliggende plaatgebieden zoals Jacobsruggen.

De oorzaak voor het verschil in gedrag van Richel en de Engelschhoek is het verschil in positie in relatie tot de dynamiek van het zeegat. De Richel ligt aan de binnenzijde van het zeegat en 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 golfwerking.



Figuur 7.7 Ontwikkeling van de NAP 0m contour bij Richel en Engelschhoek. De positie van de Richel is opvallend stabiel, terwijl Engelschhoek een sterke migratie en vormverandering laat zien.

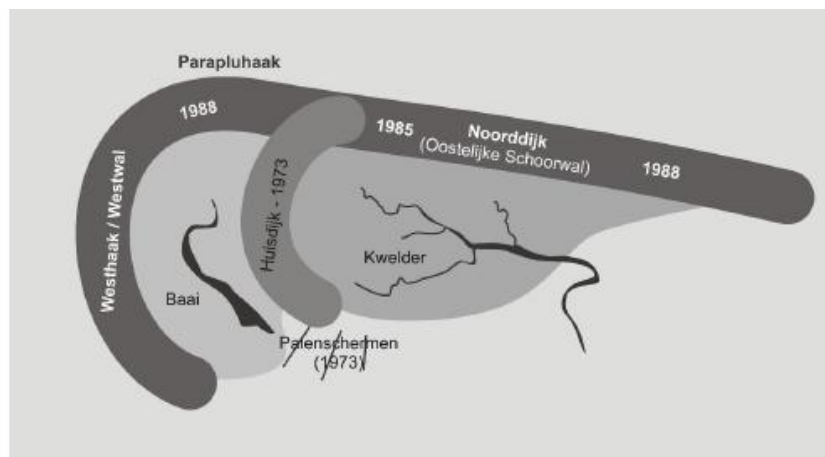


Figuur 7.8 Satellietbeelden van de omgeving van Engelschhoek op vier momenten tussen 2016 en 2024 (Löhr, 2024).

7.3 Griend en Grienderwaard

Griend is een eilandje midden op de wadplaat Grienderwaard. Delen van Griend liggen hoger dan het niveau van hoogwater en het eiland bevat zelfs delen die tijdens hoogwater bij springtij en de meeste stormen droog blijven. Griend is vooral bekend geworden als broedeiland, onder anderen voor de Grote Stern. Het eiland is ook een hoogwatervluchtplaats voor wadvogels en een werp- en zooggebied voor de Grijze Zeehond. Het bevat een klein areaal kwelder.

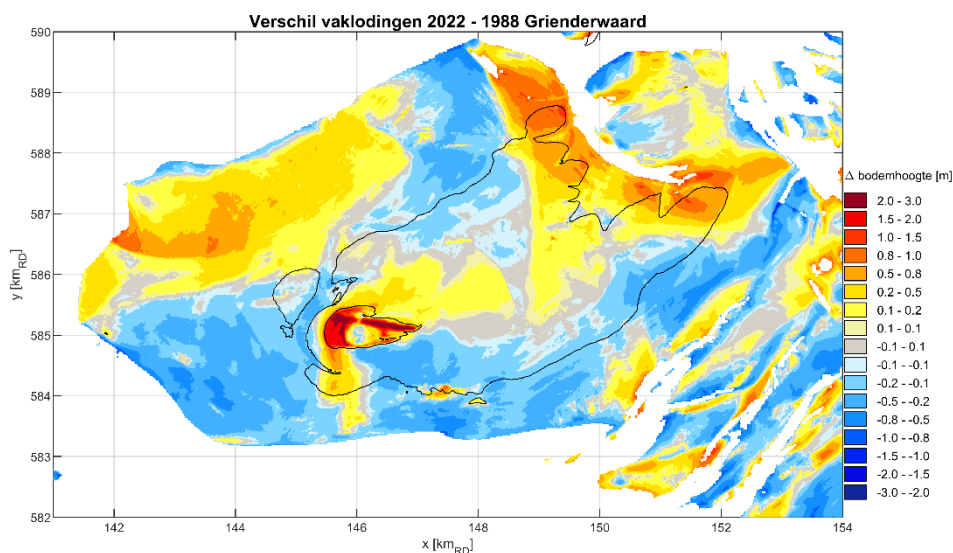
In oorsprong is Griend een restant van oude bewoonde en beweide kwelders uit de Middeleeuwen. De omvang van het eiland nam echter steeds verder af en Griend migreerde naar het oosten. In de 20^{ste} eeuw zijn, vanwege de grote natuurwaarden, verschillende ingrepen gepleegd om het eiland te behouden: in 1925/26 werd een erosieve geul geblokkeerd, tussen 1958 en 1985 is een drietal suppleties aangebracht en in 1988 is een zanddijk aan de noord- en westkant van het eiland aangelegd (Figuur 7.9). 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.



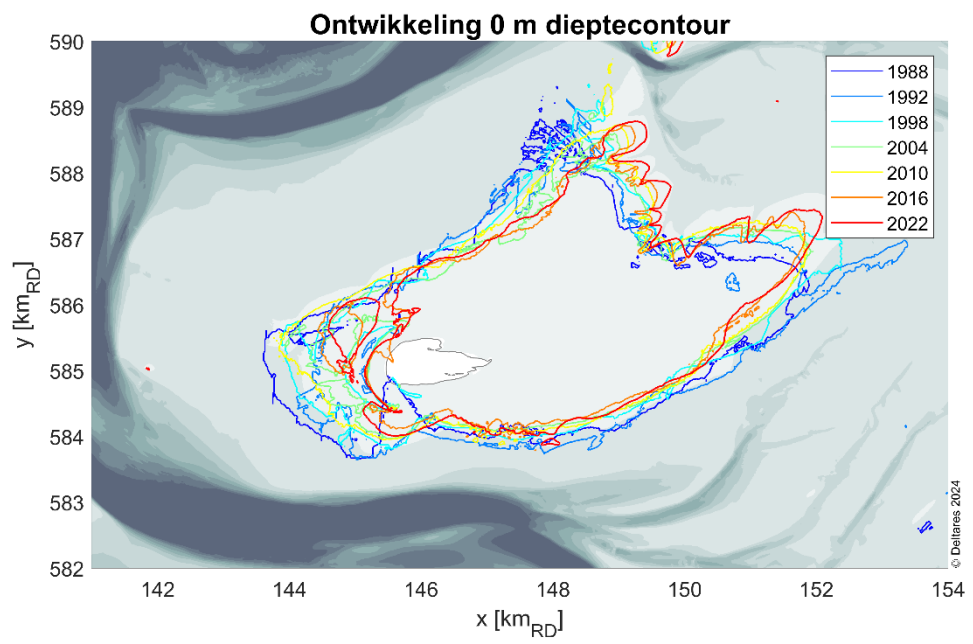
Figuur 7.9 Schematische overzichtskaart van de ingrepen op Griend vanaf 1973 en voor de meest recente versterking in 2016.

Op de verschilkaart van 1988 – 2022 is te zien dat de Grienderwaard aan de noordzijde is opgehoogd, terwijl met name aan de zuidwestzijde erosie heeft plaatsgevonden (Figuur 7.10). Hierdoor schuift de 0m contour in (noord)oostelijke richting op (Figuur 7.11). Het droogliggende oppervlak en het volume van de plaat boven NAP 1m is afgenomen tussen 1991 en 2015 maar nam tussen 2015 en 2022 weer toe (Quataert et al., 2024). Mogelijk is hier een relatie met de versterking die is aangebracht in 2016. Het eiland Griend is tussen 1998 en 2022 lokaal tot 2m hoger geworden als gevolg van de versterkingsingrepen en duinvorming.

De Grienderwaard is wat betreft ligging een van de meest stabiele plaatgebieden in de Waddenzee. Uit historische kaarten is op te maken dat de grens met het Pannengat - Blauwe Slenk en de Westmeep - Zuidmeep niet veel is veranderd sinds het begin van de 20^{ste} eeuw. Deze beperkte veranderingen zijn verrassend, 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).



Figuur 7.10 Verschil in hoogteligging tussen 1988 en 2022 op Grienderwaard. De zwarte lijn geeft de 0m dieptecontour. Aan de noordzijde is overwegend sedimentatie te zien, aan de zuidzijde erosie. Het eiland Griend is sterk in hoogte toegenomen. Punten die in 2022 boven NAP -1m liggen worden getoond. De zwarte lijnen geven de 0 m en 1 m dieptecontour in 2022.



Figuur 7.11 Ontwikkeling van de NAP 0m dieptecontour van Grienderwaard. Deze contour is in oostelijke richting opgeschoven.

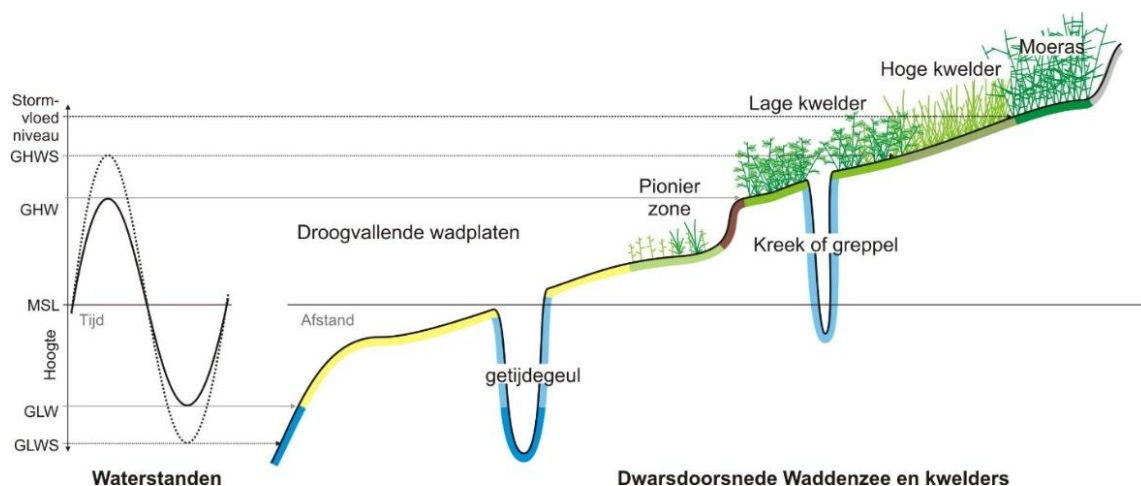
8 Kwelders

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 stormvloeduren reiken. In het Waddengebied zijn drie soorten kwelders aanwezig:

1. Vastelandskwelders, voornamelijk kwelders die ontstaan zijn door de kwelderwerken.
2. Eilandkwelders aan de Waddenzeezijde, vrij natuurlijke kwelders die zich vormen in de luwte van de duinen. De meesten zijn ingedijkt en omgezet in polders.
3. Eilandkwelders aan de Noordzezijde, zoals in de Slufter op Texel. Deze vallen buiten het bestek van dit rapport.

In de laatste jaren is er steeds meer interesse naar de functie van kwelders in het kader van waterveiligheid, onder anderen door de golfdempende werking (oa. Willemsen, et al., 2020; Sipma, 2023). Daarnaast beïnvloedt de kwelderontwikkeling het getijdvolume, waardoor ze invloed uitoefenen op geulen en platen ver buiten de kwelder. Bij een groeiende kwelder neemt het lokale kombergingsvolume bijvoorbeeld af en kunnen geulen zich terugtrekken, en vice versa.

Kwelders hebben ook vaak een belangrijke ecologische functie, bijvoorbeeld vanwege de aanwezigheid van unieke zouttolerante planten en als foerageergebied en broedgebied voor vogels. De ecologische kenmerken van kwelders verschillen, omdat de hoogte verschilt en daarmee de frequentie van overstromingen. Door het verschil in overstromingsfrequentie komen op de lagere delen andere kwelderplanten voor dan op de hogere delen. In Figuur 8.1 zijn in een schematische dwarsdoorsnede de verschillende onderdelen van de kwelder benoemd, waarbij ook de relatie met de waterstanden is aangeduid. Op gebieden die met regelmaat overstroomd worden is veelal zogenoemde pioniersvegetatie te vinden, terwijl op de hogere delen van de kwelder de begroeiing zich in een verder successiestadium bevindt.

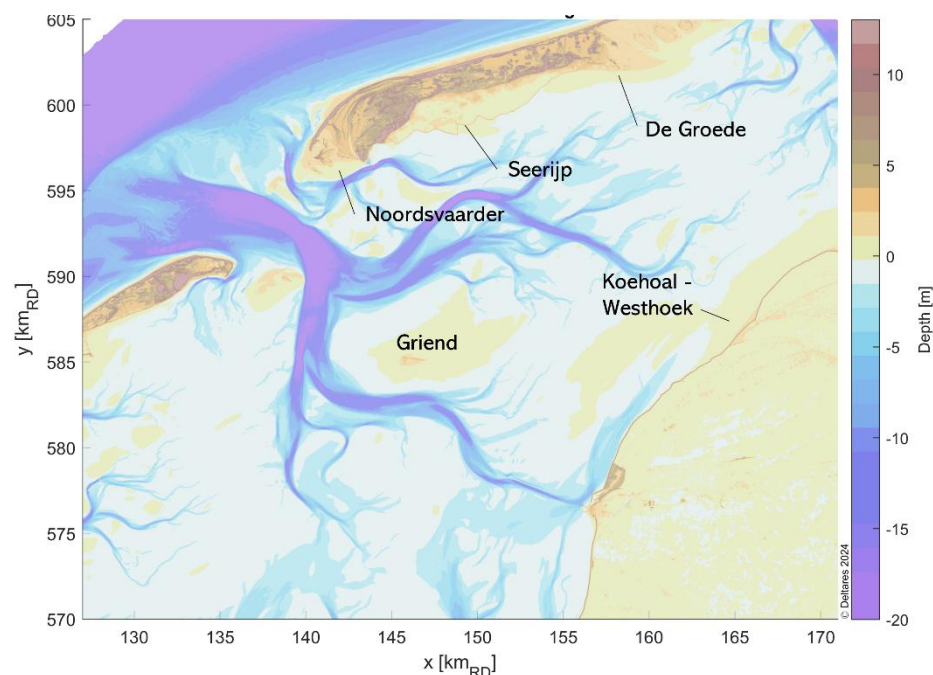


Figuur 8.1 Schematische dwarsdoorsnede van een kwelder met voorliggende wadplaat en de verschillende zones.

8.1 Overzicht

Figuur 8.2 toont de locaties van de belangrijkste kwelders in het Vlie. Ze worden in de paragrafen hieronder stuk voor stuk besproken. Het betreft een relatief beperkt areaal ten opzichte van andere kombergingsgebieden in de Waddenzee gezien de omvang van het

gebied en over het algemeen jonge kwelders (Essink & de Vlas, 2000). De afwezigheid van oude kwelders komt voornamelijk door de sterke landafslag die plaatsvond in de Middeleeuwen. De gebieden waar wel sedimentatie en kweldervorming plaatsvond zijn in de loop van de tijd bedijkt. Kwelderwerken zijn in de westelijke Waddenzee vrijwel afwezig. Tabel 8-1 geeft een overzicht van de grootste kwelders, met de beheerders ervan. Voor het volledige overzicht met alle kwelders van het kombergingsgebied wordt verwezen naar Bijlage D.



Figuur 8.2 Locaties van de kwelders in het Vlie (achtergrond vaklodingen 2022).

Binnen Natura2000, de Kaderrichtlijn Water (KRW) en de Trilaterale Waddenzeeovereenkomst bestaan doelen om de kwaliteit van kwelders te verbeteren, onder anderen door een evenwichtige verdeling in vegetatiezones (Heidinga, et al., 2023). Hoewel het kwelderareaal in de Waddenzee de laatste decennia toeneemt, staat de kwaliteit van de kwelders onder druk. Een steeds groter aandeel van het kwelderoppervlak betreft hoge kwelders waar de vegetatie een climaxstadium heeft bereikt en de diversiteit afneemt (Elschot, et al., 2020). In Smits, et al. (2024b) is een kansenkaart opgesteld voor ingrepen die de kwaliteit van het kwelderareaal kunnen bevorderen. Deze ingrepen kunnen bijvoorbeeld het afgraven van delen van kwelders zijn, of het stoppen van onderhoud aan kwelderwerken zoals rijshouten dammen. Echter mag vanuit Natura2000-regelgeving het kwelderareaal op de lange termijn niet verminderen en is het dus belangrijk dat een kwelder na een ingreep de mogelijkheid heeft te herstellen. De meeste kwelders in het Vlie zijn eilandkwelders, met uitzondering van de kwelder tussen Koehoal en Westhoek. In Smits et al. (2024b) wordt afgeraden om ingrepen aan eilandkwelders te uit te voeren omdat dit over het algemeen natuurlijk ontstane kwelders zijn. Zo zijn er op de eilandkwelders vrijwel nergens rijshouten dammen. Bovendien zijn de bodemslibgehalten en concentraties zwevend stof (SPM) hier lager dan bij vastelandskwelders, waardoor de natuurlijke opslibbing ook lager is.

Tabel 8-1 Overzicht van de grootste kwelders van kombergingsgebied 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
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, vegetatie vooroever, CO ₂ vastlegging, recreatieve benutting	It Fryske Gea
Griend					
Griend	22,5	Spontane ontwikkeling in de luwte van Griend	Diverse beheeringrepen om Griend te behouden; betredings-regulering	Hoogwatervluchtplaats en deels broedgebied: geleidelijke overgang naar duinen	Natuur-monumenten
Terschelling					
Kwelders Noordsvaarder	10 – 20	Spontane ontwikkeling op strandvlakte	Regulering recreatie en gemotoriseerd verkeer	Vegetatie, landschap, hoogwatervluchtplaats; foerageer- en broedgebied vogels	Staatsbos-beheer
Kwelders nabij Seerijp	10 – 15	Oude landaanwinning	Spontane ontwikkeling	Hoogwatervluchtplaats; foerageer- en broedgebied vogels, vegetatie, landschap	Rijkswater-staat
Kwelders oost van Oosterend: de Grie	Ca. 40	Oude kwelder, beschermd door stenen dam	Beweiding, maaien	Landschap, vegetatie, hoogwatervluchtplaats, foerageer- en broedgebied vogels.	Staatsbos-beheer ca. 60%, particulier ca. 40%
De Groede kwelders Oost van Oosterend	420 – 430	Spontane ontwikkeling	Beweiding 380 ha, spontane ontwikkeling ca 40 – 50 ha	Hoogwatervluchtplaats, foerageer- en broedgebied vogels. Vegetatie en landschap	Staatsbos-beheer
Totaal Vlie	553				

8.2 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 (zie ook §7.3 voor een overzicht van ingrepen op Griend). 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.

8.3 Koehoal – Westhoek

Bij de Waddenzeedijk die van Harlingen naar het noordoosten loopt liggen kleine gebieden met kweldervegetatie en een grotere kwelder bij Westhoek. 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, ontstaan in de jaren '90 van de vorige eeuw. Deze kwelder is op vrij natuurlijke wijze ontstaan, dwz. er zijn geen kwelderwerken aanwezig, en kent een autonome uitbreiding met een opslibbing van 18 mm/j tussen 2018 en 2023 (Smits et al., 2024b; Jentink, 2023; Baptist et al., 2019). In Smits et al. (2024b) is geconcludeerd dat het niet wenselijk is deze kwelder af te graven omdat deze relatief smal is en een waardevol ecosysteem beheerbert.

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

8.4 Kwelders bij Terschelling

Noordsvaarder

De kweldervegetatie is hier op een strandvlakte spontaan ontstaan en er vindt nog altijd uitbreiding van het kwelderareaal plaats (Elschot et al., 2020). Het gebruik van de vlakte is van invloed op de ontwikkeling ervan; reden voor Staatsbosbeheer 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. Seerijp 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 in particulier bezit.

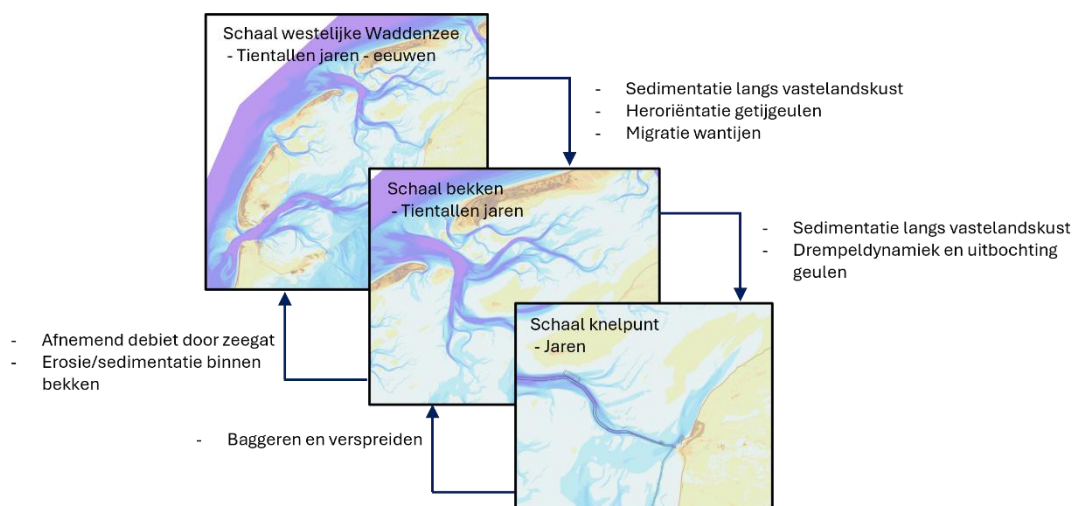
De Groede

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

9 Conceptueel denkmodel systeemgedrag

In dit hoofdstuk wordt een conceptueel denkmodel opgesteld waarmee de morfologische en hydrodynamische ontwikkeling van het kombergingsgebied kan worden omschreven, samen met de processen die hieraan ten grondslag liggen. De morfologische ontwikkelingen worden beschouwd aan de hand van de schaalcascade. Hierin worden de ontwikkelingen per schaalniveau beschreven, waarbij van grote schaal steeds verder wordt ingezoomd. Ontwikkelingen op grote tijd- en ruimteschaal scheppen de randvoorwaarden voor het gedrag op kleinere schalen. Tegelijkertijd kan er ook sprake zijn van een terugkoppeling waarbij ontwikkelingen of processen op kleine schaal de grotere schaal beïnvloedt (zie Figuur 9.1). Voor een meer uitgebreide uitleg van het principe van de schaalcascade wordt verwezen naar Bijlage A.

In deze kombergingsrapportage worden de schaalniveaus van de westelijke Waddenzee (paragraaf 9.1) en de schaal van het bekken (paragraaf 9.2) inhoudelijk besproken (Figuur 9.1). De ontwikkelingen op de schaal van het bekken vormen op hun beurt de context voor veranderingen van individuele geulen of platen. Het conceptueel model van deze individuele morfologische elementen is opgesteld in de studies die naar deze elementen zijn uitgevoerd. Voor het conceptuele model van het gebied rondom Harlingen wordt verwezen naar de Knelpuntanalyse Harlingen – Noordzee (Quataert, et al., 2024), en voor het conceptuele model van de eilandkoppen van Vlieland en Terschelling naar de studie 'Morfologie van de eilandkoppen van het Zeegat van het Vlie' (de Beer, et al., 2024).



Figuur 9.1 Overzicht van de schaalniveaus waaruit het conceptuele model is opgebouwd. De pijlen geven de interactie tussen de schaalniveaus aan. In deze kombergingsrapportage worden de schaal van de westelijke Waddenzee en de schaal van het bekken besproken.

9.1 Schaal westelijke Waddenzee

De westelijke Waddenzee kent een andere ontstaansgeschiedenis dan de oostelijke Waddenzee (zie Hoofdstuk 4 en Bijlage B). Hierdoor is het systeem van de westelijke Waddenzee relatief diep met een groot aandeel sublitoraal. Ook voor de afsluiting van de Zuiderzee werd de Waddenzee al steeds verder ingeperkt door opeenvolgende bedijkingen en landaanwinningen.

De aanleg van de Afsluitdijk in 1932 heeft een vormende invloed gehad op de westelijke Waddenzee. De effecten van de afsluiting, die hieronder besproken worden aan de hand van Figuur 9.2, waren het sterkst in de decennia na de afsluiting, tot ca 1975. In deze periode vulde het bekken sterk op met sediment. Sinds 1975 is de respons minder sterk, maar de effecten werken nog altijd door (o.a. Thijsse, 1972; Elias et al., 2012).

Heroriëntatie getijstroming en migratie wantijen

Voor de afsluiting liepen geulen vanuit het Marsdiep en het Vlie door naar de Zuiderzee. Als gevolg van de afsluiting heeft een heroriëntatie van de getijstroming plaatsgevonden. Door het plotsklaps afgenomen oppervlak van het bekken nam de getijslag toe, waardoor initieel de debieten door de zeegaten toenamen en veranderde de getijgolf van een lopende getijgolf naar een golf met een meer staand karakter (Thijsse, 1972; Rietveld, 1962). In het Vlie is hierdoor het zwaartepunt van het bekken van het zuiden naar het oosten verschoven.

Als gevolg van deze heroriëntatie van de getijstroming verschoven de wantijen in de Waddenzee in oostelijke richting. Het kombergingsgebied Marsdiep nam hierdoor in oppervlakte toe ten koste van het Vlie. Door de combinatie van de afname van het kombergingsgebied en de invulling van het bekken nemen de debieten door het zeegat in het Vlie nu weer af.

Verzanden en terugtrekken oude geulen naar Zuiderzee

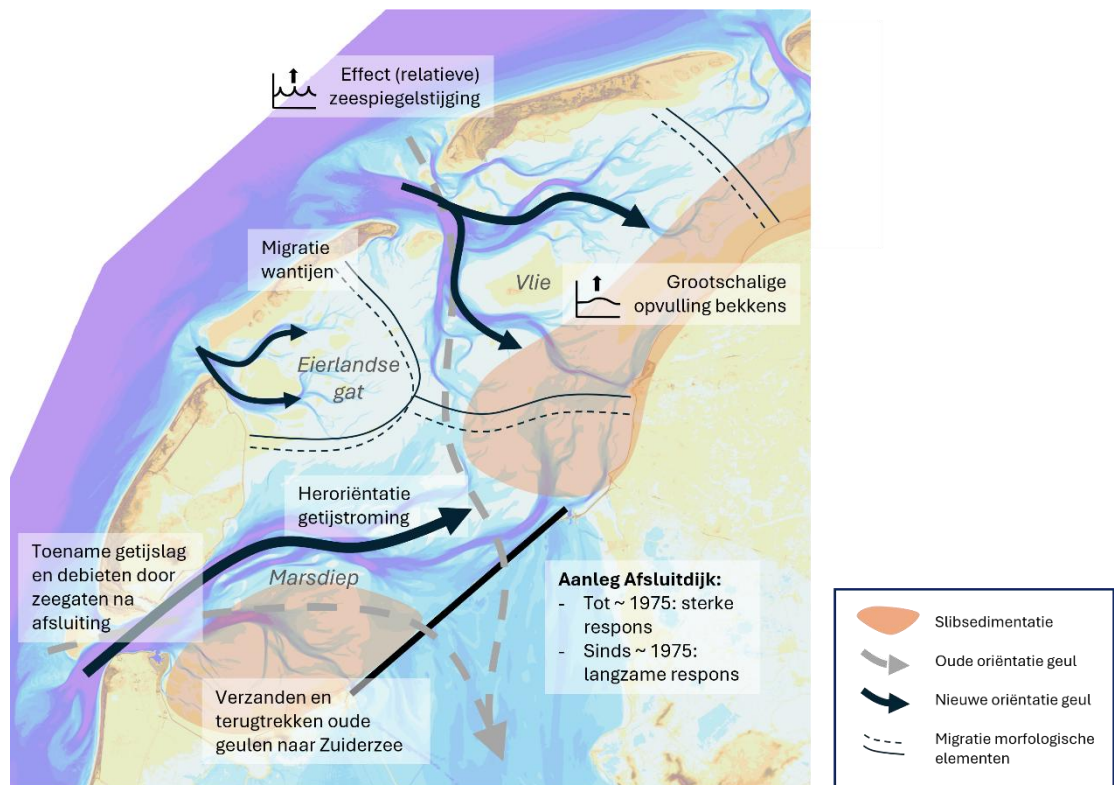
In geulen die vroeger naar de Zuiderzee liepen zoals het Inschot in het Vlie en de Vlieter in het Marsdiep vond grootschalige sedimentatie plaats door het wegvallen van het getijvolume van deze geulen. De veranderde bekkenconfiguratie leidde tot een veranderende debietverdeling waardoor een heroriëntatie van de getijstroming ontstond. In het Vlie is dit proces bijvoorbeeld zichtbaar bij de splitsing tussen Inschot en Blauwe Slenk, waar debieten door het Inschot afnemen en in de Blauwe Slenk (relatief) toenemen.

Grootschalige opvulling bekkens

De bekkens begonnen als gevolg van bovenstaande veranderingen veel sediment te importeren om tot een nieuwe evenwichtssituatie te komen (Elias et al., 2012). Initieel was deze respons van opvulling en netto sedimentimport het sterkst, in recente jaren neemt de trend in sedimentatie af van ca 2,3 Mm³/jaar over 1933 – 2015, naar 1,44 Mm³/jaar over 1991 – 2022 (totale volumeverandering inclusief zand en slib uit Elias, 2019). De toename in plaatvolume vindt met name plaats langs de Friese vastelandskust en bestaat voor een toenemend deel uit slibsedimentatie (Colina Alonso, 2020).

Effect zeespiegelstijging

De effecten van zeespiegelstijging laten zich op dit moment nog niet duidelijk zien in de westelijke Waddenzee en worden overschaduwd door de morfologische ontwikkelingen zoals het opvullen van het bekken. Uit verschillende studies blijkt dat de komende decennia (tot 2050) de huidige trend van sedimentatie sterker is dan de versnelde zeespiegelstijging (Wang, et al., 2018; Huismans, et al., 2022; Lodder, et al., 2022; Cleveringa & Grasmeijer, 2010). Naast zeespiegelstijging is er ook sprake van bodemdaling (zowel geologische bodemdaling als lokale bodemdaling door zout- en gaswinning, zie Hoofdstuk 3.3).



Figuur 9.2 Ontwikkelingen op de schaal van de westelijke Waddenzee, op de tijdschaal van tientallen jaren tot eeuwen.

9.2 Schaal bekken

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

Sedimentimport in het bekken en volumeveranderingen

De grootschalige sedimentimport als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee is ook zichtbaar in het Vlie. Vanwege de netto sedimentimport en het kleiner worden van het bekken neemt het kombergingsvolume van het Vlie af. Hierdoor neemt ook het debiet door het zeegat gestaag af. Deze sedimentimport is echter niet overal in het bekken even sterk merkbaar. In het bekken kunnen drie zones worden onderscheiden:

- *Langs de vastelandskust:* De plaatgebieden langs de Friese vastelandskust nemen toe in volume, hoogte en oppervlakte. Een relatief groot (en toenemend) deel van deze volumetoename bestaat uit slibsedimentatie. Als gevolg hiervan nemen lokale kombergingsvolumes van de geulen in de buurt van de kust sterk af, zoals de Geul langs Pollendam, het Kimstergat en de Boontjes, waardoor ook de doorsnede van deze geulen op termijn afneemt.
- *Centraal in het bekken:* De plaatgebieden centraal in het bekken, zoals de Grienderwaard en het Terschellinger wantij ondervinden juist erosie. De volumes en gemiddelde hoogtes van deze platen nemen af.
- *Langs de eilandkusten:* In het zeegat is sprake van aanzanding van banken. Er is hier een continue toevoer van zand uit de buitendelta die door de gecombineerde werking van getij en golven het bekken in getransporteerd wordt. Deze aanvoer zorgt ervoor dat de aanliggende banken (Jacobsruggen) groeien. In de gebieden achter de eilanden, die niet in de directe invloedssfeer van het zeegat liggen vindt erosie plaats.

Effect van verplaatsende wantijen op het Vlie

Een andere grootschalige ontwikkeling die doorwerkt naar dit schaalniveau is de noordoostelijke verplaatsing van de wantijen. Door deze verplaatsing krimpt het Vlie aan de westzijde en breidt het bekken uit naar het oosten. Netto neemt het kombergingsgebied van het Vlie af met gemiddeld 1 km²/j.

Ontwikkeling in hoofdgeulensysteem en debietverdeling

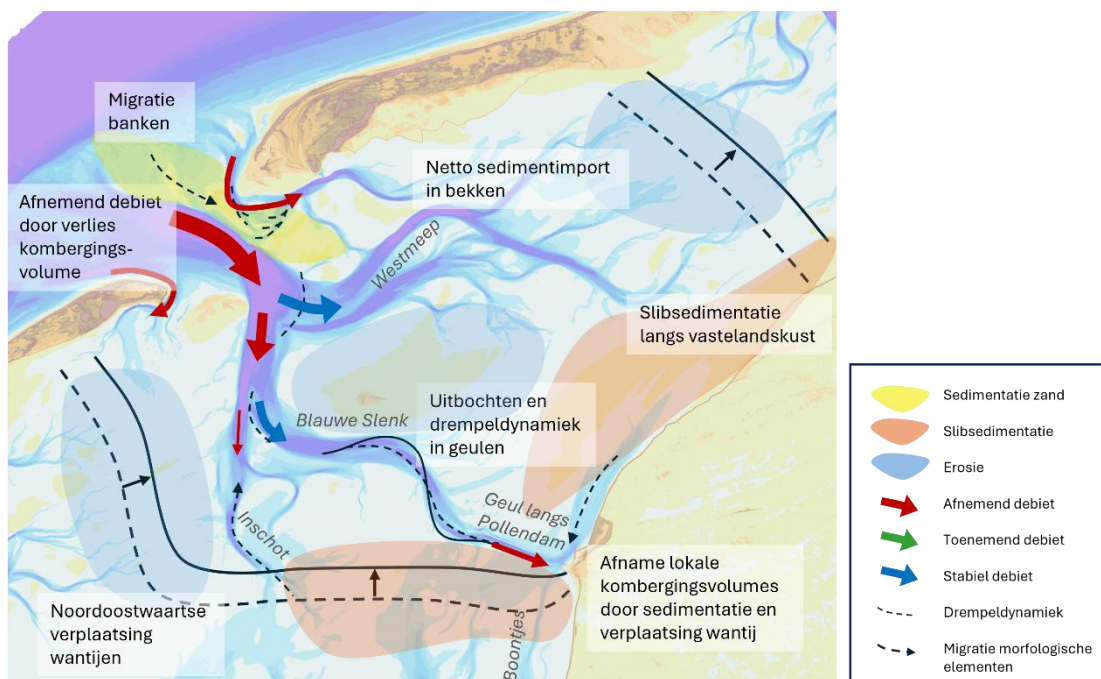
Het hoofdgeulensysteem van het Vlie bestaat uit de centraal gelegen Vliestroom, die zich in het bekken splitst in twee parallelle geulensels: de Mepen in het oosten en Blauwe Slenk in het zuiden. Door het afnemende kombergingsvolume nemen de debieten door zowel de Vliestroom als de andere geulensels in het zeegat, Zuiderstortemelk – Vliesloot en Boomkensdiep – Schuitengat, gestaag af (Quataert, et al., 2024).

De ontwikkelingen op grote schaal hebben gevolgen voor de hydrodynamica in het bekken. De debieten in het westelijke deel van het bekken nemen licht af terwijl de debieten in het oostelijke deel constant blijven. Ook de debieten door het Inschot nemen af. Dit kan direct gerelateerd worden aan de opvulling van het Inschot na de afsluiting van de Zuiderzee. Door de ophoging van wadplaten langs de kust en de verplaatsing van het wantij neemt het kombergingsvolume van het zuidelijke deel van het Vlie bekken verder af, waardoor de debieten hier verder af zullen nemen.

Uitbochten en drempeldynamiek in geulen

In het Vlie zijn drie typen drempelgebieden te onderscheiden:

- *In het zeegat:* In het zeegat bevindt zich een dynamisch en complex drempelgebied tussen Boomkensdiep en Schuitengat rondom de eilandkop van Terschelling. Kenmerkend voor dit drempelgebied is dat aanzanding van banken in het zeegat (met name de migratie van Engelschhoek) een grote invloed heeft op de ontwikkeling van het drempelgebied. Door het ontstaan van Engelschhoek werden het geulsysteem Boomkensdiep – Schuitengat gescheiden van de Vliestroom. Vanwege de hoge stroomsnelheden en een grote zandbeschikbaarheid is dit drempelgebied zeer dynamisch met eb- en vloedscharen en tussenliggende banken en schilden die continu vormen en migreren. Het conceptuele model van de ontwikkeling van dit gebied is te vinden in de Beer et al. (2024).
- *Bij splitsingen:* Op de punten waar een geul splitst in twee zijtakken zijn drempelgebieden te vinden. Voorbeelden hiervan zijn de splitsing van de Vliestroom en de Westmeep en iets verder de splitsing waarbij de Vliestroom overgaat in het Inschot en de Blauwe Slenk. Deze laatste splitsing bevindt zich in een overgangssituatie: de drempel bevindt zich momenteel nog tussen Vliestroom en Blauwe Slenk en het diepe deel van de geul zet zich door naar het Inschot. Gezien het toenemende relatieve belang van de Blauwe Slenk ten opzichte van het Inschot is het waarschijnlijk dat de drempel naar het westen verplaatst, zodat een drempelgebied vormt tussen Vliestroom en Inschot, en het diepe deel van de geul doorloopt richting de Blauwe Slenk.
- *Bij knikpunten en geulbochten:* Drempels in geulbochten zijn onder anderen te vinden in de Blauwe Slenk. In bodemkaarten is te zien dat de Blauwe Slenk tussen 1992 en 2022 steeds verder uitbocht. Hierbij vormen in de knikpunten elkaar ontwijkende eb- en vloedscharen, gescheiden door een langgerekt en ondiep drempelgebied. Deze processen hebben effect op de bevaarbaarheid en baggeronderhoud: deze relatie wordt in meer detail beschreven in de Knelpuntanalyse Harlingen – Noordzee (Quataert, et al., 2024).



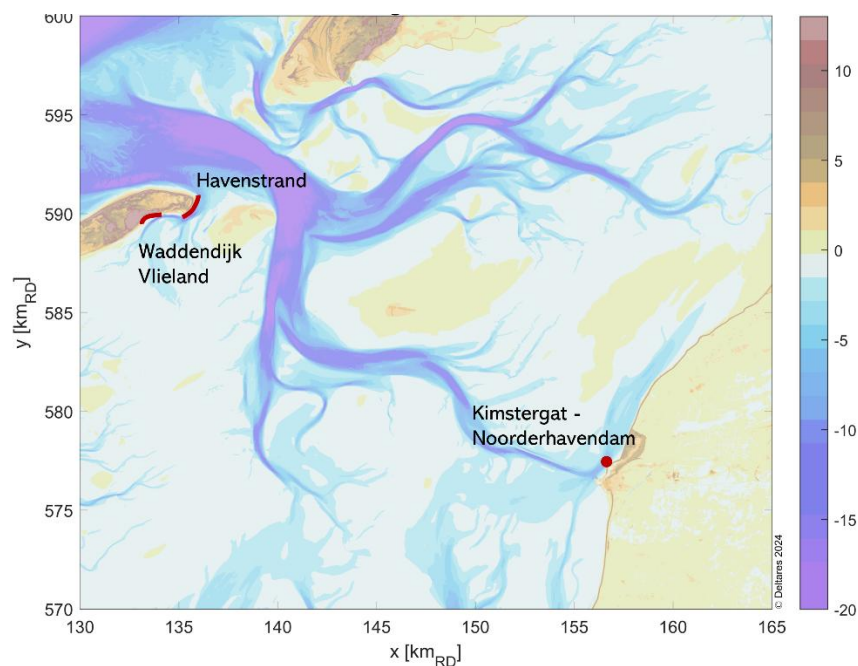
Figuur 9.3 Ontwikkeling op de schaal van het kombergingsgebied Vlie, op de tijdschaal van tientallen jaren.

10 Relatie morfologie en gebruiksfuncties

Dit hoofdstuk geeft de belangrijkste verbanden tussen de morfologie van het kombergingsgebied, zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken en de verschillende gebruiksfuncties.

10.1 Veiligheid tegen overstromingen

Op een aantal locaties in het kombergingsgebied is het mogelijk nuttig om extra aandacht te besteden aan het functioneren van de waterkeringen door de morfologische veranderingen. De belangrijkste locaties (zie Figuur 10.1) worden hier uitgelicht.



Figuur 10.1 Overzicht van locaties waar vraagstukken rondom waterveiligheid spelen.

Havenstrand Vlieland

De eilandkop van Vlieland wordt gekenmerkt door structurele erosie, veroorzaakt door de aanwezigheid van geulen vlak langs de eilandkust. Modelsimulaties laten zien dat de afgelopen decennia de stroomsnelheden direct langs de kust zijn toegenomen (de Beer, et al., 2024). Met behulp van strekdammen en periodieke kleine suppleties wordt de erosie bestreden. Suppleties van reguliere omvang zijn hier niet mogelijk door de beperkte beschikbare ruimte omdat het strand direct aan een diepe geul grenst. Bij het Havenstrand heeft in september 2023 tijdens een suppletie een strandval plaatsgevonden.

Kimstergat

Een geul vlakbij een waterkering kan de 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. Dit is onder anderen recent gebeurd langs het Kimstergat, bij de Noorderhavendam in Harlingen die de haven van Harlingen scheidt van de Waddenzee. Ter hoogte van de verspreidingslocatie Kimstergat 1 wordt het Kimstergat steeds dichtert tegen de dijk aan gedrukt en wordt de geul langs de dijk lokaal dieper en de geulwand steiler (zie ook Figuur 6.15). Dit wordt veroorzaakt doordat de stroming bij de ingang van het

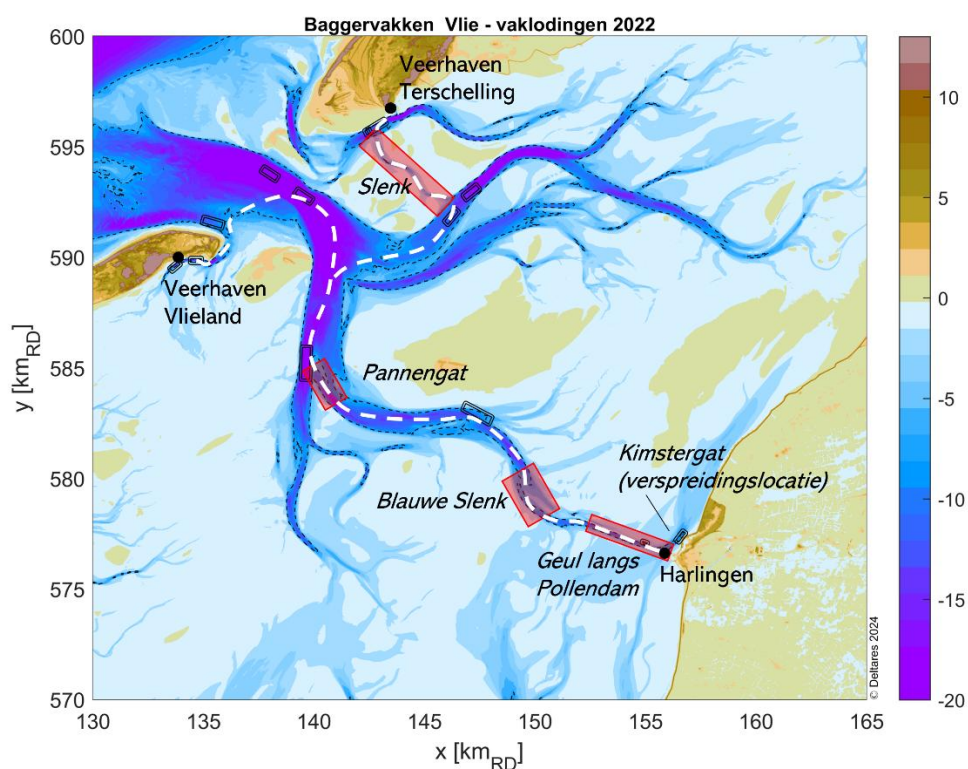
Kimstergat in een steeds smaller gebied wordt geconcentreerd waardoor lokaal hoge stroomsnelheden ontstaan (een analyse van de ontwikkeling van de stroming in het Kimstergat tussen 1972 en 2022 is te vinden in Quataert et al. (2024)) en brengt de stabiliteit van de dijk in gevaar. Daarom is enkele jaren geleden een vooroeverbestorting uitgevoerd bij de teen van de Noorderhavendam. Met de huidige ontwikkelingen in het Kimstergat is het waarschijnlijk dat de trend van migratie richting de dijk, lokale verdieping langs de teen van de dijk en steiler worden van de geulwand de komende jaren doorzet. Het is daarom van belang de dijkstabiliteit van de Noorderhavendam goed te blijven monitoren.

Dijkversterking Vlieland

De Waddendijk van Vlieland is in 2024 versterkt in het kader van het Hoogwaterbeschermingsprogramma. Bij deze versterking is de bekleding van het buitentalud vervangen en zijn het binnen- en buitentalud verflauwd, waardoor de dijk breder is geworden (Rijkswaterstaat, 2024).

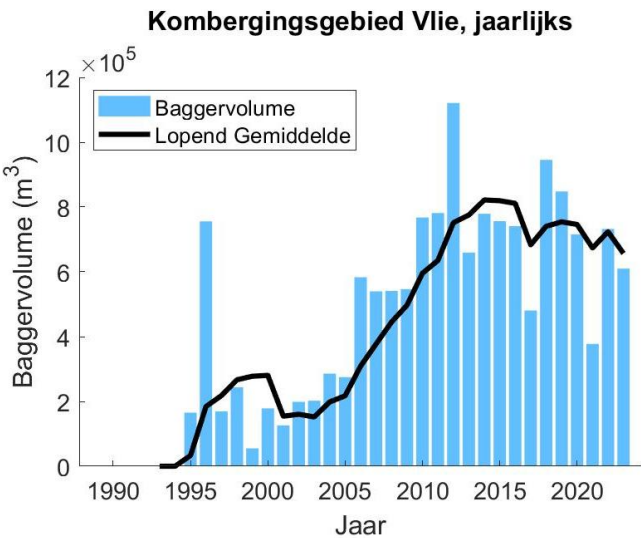
10.2 Bereikbaarheid: vaarwegen en havens

In het bekken van het Vlie bevindt zich de haven van Harlingen, die in verbinding staat met de Noordzee. Daarnaast staat Harlingen via de veerdienst in verbinding met de eilanden Vlieland en Terschelling. Op de scheepvaartroute Harlingen – Noordzee (streefdiepte NAP -7,5 m) vinden baggerwerkzaamheden plaats in de geul langs Pollendam, de Blauwe Slenk, en in het verleden (tot 2015) ook in het Pannengat (Figuur 10.2). Daarnaast wordt ook de Slenk op diepte gehouden voor de veerboot naar Terschelling (streefdiepte NAP -5 m).



Figuur 10.2 Actuele baggerlocaties in het Vlie. De verspreidingsvakken worden aangegeven met doorgetrokken zwarte lijnen, de veerverbinding met Vlieland en Terschelling met een witte stippellijn. In de rood gearceerde gebieden vindt actueel baggeronderhoud plaats. De zwarte stippellijn geeft de NAP -7,5m contour, de streefdiepte voor de vaarweg Harlingen – Noordzee. Figuur overgenomen uit de Wit, et al., (2024).

In 2007 is de vaarweg Harlingen – Noordzee verdiept tot NAP -7,5 m om de toegankelijkheid van de haven van Harlingen te verbeteren (Mulder, et al., 2005). Na deze verdieping zijn de baggervolumes sprongsgewijs toegenomen (Figuur 10.3). De hoogste volumes in de vaarweg worden gebaggerd bij de drempel in de Blauwe Slenk (ca 400.000 m³ per jaar, grofweg de helft van het totale volume), gevolgd door de Slenk en de Geul langs Pollendam. De morfologische ontwikkelingen per baggerlocatie worden besproken in Quataert et al. (2024). Voor een analyse van de trends in baggervolumes wordt verwezen naar de Wit, et al. (2024). Naast de vaarweg, die door Rijkswaterstaat wordt onderhouden worden ook grote volumes gebaggerd in de haven van Harlingen (ca 1 miljoen m³/j, Tabel 10-1). Dit slibrijke sediment uit de haven wordt met name in het Kimstergat verspreid.



Figuur 10.3 Jaarlijks baggervolume 1989 – 2023 van Rijkswaterstaat in het bekken van het Vlie, excl. Havens (bron: jaarrapportage Rijkswaterstaat 2024).

Tabel 10-1 Jaarlijkse baggervolumes 2019 – 2023 in bekken Vlie per baggerlocatie, incl havens, in m³ (bron: jaarrapportage Rijkswaterstaat 2023). Tussen haakjes staat het baggervolume door methode ploegen.

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

De potentiële knelpunten die zijn geïdentificeerd in Quataert et al. (2024) worden hier kort samengevat:

- Slenk: de uitstroom van de Slenk migreert in noordoostelijke richting, waardoor de aanstroming vanuit Schuitengat minder efficiënt plaatsvindt. Dit zou op termijn kunnen leiden tot afnemende debieten door de Slenk en toenemende meandering. Door de hoge plaatselijke dynamiek zijn de ontwikkelingen hier slecht te voorspellen en sterk afhankelijk van de ontwikkeling van het Schuitengat.
- Drempel Pannengat: op deze drempel vindt sporadisch baggeronderhoud plaats. De ontwikkeling hier lijkt over het algemeen gunstig: de diepe ebschaar van de Blauwe Slenk maakt steeds meer een verbinding met het Pannengat. Vanwege de dynamiek van het gebied zou hier echter de komende jaren nog periodiek baggeronderhoud noodzakelijk kunnen zijn.
- Blauwe Slenk bij verspreidingslocatie: op het knikpunt in de Blauwe Slenk naast de verspreidingslocatie vormt zich een drempel tussen de eb- en vloedschaar die langzaam in hoogte toeneemt. Dit houdt mogelijk verband met de hoeveelheid baggerspecie die hier verspreid wordt. Hierdoor zou hier in de toekomst baggeronderhoud noodzakelijk kunnen zijn.
- Blauwe Slenk bij aanhechting Pollendam: bij de verbinding met de Pollendam is de Blauwe Slenk steeds verder gaan uitbochten. Hier loopt nu een lange relatief ondiepe ebschaar waar significante hoeveelheden gebaggerd moeten worden. Momenteel heeft de ebschaar een stabiele positie en is er geen toenemende trend in baggervolumes. Indien de ebschaar in de toekomst verder uitbocht is het mogelijk dat de baggervolumes hier toenemen.
- Geul langs Pollendam en Kimstergat: de getijvolumes door de Geul langs Pollendam en het Kimstergat worden kleiner. Hierdoor komt de geschiktheid van het Kimstergat als verspreidingslocatie in gevaar. De laatste jaren vertoont de Geul langs Pollendam nog voornamelijk verdieping maar de afnemende debieten kunnen op termijn gevolgen hebben voor de bevaarbaarheid.

10.3 Natuur

Morfologische veranderingen op mesoschaal kunnen invloed hebben op de natuurwaarden in het kombergingsgebied. Dit lijkt in het Vlie slechts beperkt het geval te zijn. In deze paragraaf wordt de relatie tussen verandering in arealen en de natuurwaarden in het gebied besproken (10.3.1). Daarnaast zijn er enkele lopende projecten met als doel de natuurwaarden in kaart te brengen en/of te verbeteren. Twee projecten worden hier uitgelicht: het Waddenmozaïek (10.3.2) en het herstel van zeegras in de westelijke Waddenzee (10.3.3).

10.3.1 Veranderingen in arealen

Morfologische veranderingen op mesoschaal lijken slechts een beperkte invloed te hebben op de natuurwaarden in het bekken van het Vlie. Er zijn uitzonderingen, zoals bij Griend (paragraaf 7.3), waar om de tiental jaren herstelmaatregelen nodig blijken. In paragraaf 7.2 zijn twee hoge platen beschreven in het zeegat van het Vlie met een vergelijkbare functie: Richel en Engelschoek. Vooral Richel speelt vanwege de ligging boven het niveau van hoogwater een belangrijke rol voor vogels (hoogwatervluchtplaats, broedgebied) en zeehonden (rusten, baren en zogen). In deze paragraaf worden de areaalontwikkelingen in het Vlie besproken die effect hebben op de natuurwaarden.

Areaal droogvallende platen

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.

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 & Grasmeyer (2010) een toename van de wadplaten in de sedimentatiegebieden.

Areaal kwelders

In de gehele westelijke Waddenzee is het areaal kwelders beperkt (zie hoofdstuk 8). 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 4.1). 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, bijvoorbeeld in noordwest Friesland.

Lokaal is er nu autonome uitbreiding van het kwelderareaal, bijvoorbeeld ten oosten van Koehoal, bij Westhoek. Dit past in het beeld van sedimentatie na de aanleg van de Afsluitdijk. In het gebied is voldoende (fijn) sediment aanwezig en er is luvte 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. Andere autonome nieuwvorming of uitbreiding van kwelders wordt niet verwacht.

Het areaal kwelders in het Vlie 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 ook negatieve gevolgen omdat hierdoor de natuurlijke ontwikkeling van het systeem wordt beperkt en dit ten koste gaat van het areaal droogvallende plaat of sublitoraal.

10.3.2 Waddenmozaïek

Het Waddenmozaïek is een project dat zich richt op het beter begrijpen van de onderwaternatuur in de Waddenzee, met een focus op de gebieden die permanent onder water staan en bij laagwater dus niet droogvallen. Het project is een initiatief van Natuurmonumenten, Rijksuniversiteit Groningen en het NIOZ (Govers, et al., 2018). In het kader van het Waddenmozaïek wordt geëxperimenteerd met natuurherstel in de ondergedoken Waddenzee en wordt de huidige natuur in kaart gebracht. Het project bestaat uit verschillende subprojecten die focussen op onder anderen het herstel van harde substraten en schelpdierbanken, zeegrasherstel, en het onderzoeken van autonoom herstel wanneer gebieden worden gesloten voor bodemberoerende visserij.

10.3.3 Zeegras

Tot circa 1930 kwamen er in de westelijke Waddenzee grote velden ondergedoken Groot zeegras (*Zostera Marina*) voor. Met het uitbreken van de 'wasting disease' (*Labyrinthula zosterae*) verdwenen grote delen van de Noord-Atlantische zeegraspopulaties in de jaren '30. In tegenstelling tot andere gebieden heeft het zeegras zich in de Nederlandse Waddenzee nooit hersteld.

Zeegras vervult een belangrijke waarde in het ecosysteem: door de bijdrage aan de bezinking van zwevend stof neemt de troebelheid af en lichtbeschikbaarheid op de bodem toe. Daarnaast heeft zeegras een stabiliserend effect op bodemsediment en zorgt het voor demping van stroming en golven. Ook heeft het een belangrijke functie als kraamkamer, foerageergebied en schuilplaats voor diverse diersoorten (Smits, et al., 2024).

Vanuit het Waddenmozaïek lopen er experimenten om de zeegraspopulatie te herstellen en nieuwe zeegrasvelden aan te planten, onder anderen bij Griend. In Smits et al. (2024) wordt onderzoek gedaan naar de oorzaken waarom het zeegras in de Nederlandse Waddenzee nooit is hersteld, en er wordt een kansenkaart ontwikkeld die laat zien welke locaties potentieel geschikt zijn voor zeegrasherstel. Hiervoor zijn de abiotische omstandigheden in de westelijke Waddenzee voor en na de afsluiting van de Zuiderzee gemodelleerd. Uit deze studie volgt dat de troebelheid van de westelijke Waddenzee in 2017 is toegenomen ten opzichte van de situatie voor de afsluiting, waardoor de lichtbeschikbaarheid is afgenomen. Ook zijn stroomsnelheden nabij de bodem toegenomen op voormalige zeegraslocaties. Deze factoren hebben de groei van zeegras belemmerd. Tegelijkertijd speelde het zeegras in de situatie van voor de afsluiting een belangrijke rol in het reduceren van stroomsnelheden en vergroten van de lichtbeschikbaarheid. Een andere factor die na de afsluiting tijdelijk de groei van zeegras belemmerde is lokale erosie van zeegrasvelden en het plots droogvallen van ondergedoken zeegrasvelden door de toegenomen getijslag na de afsluiting. Vanwege de stijging van de laagwaters en de morfologische respons kwamen veel voormalige zeegraslocaties vanaf 1950 weer in subtidaal gebied te liggen, en de morfologische condities in deze gebieden lijken inmiddels weer geschikt voor het zeegras. Op basis van de kansenkaart lijkt de geschiktheid voor zeegrasgroei in de gehele westelijke Waddenzee en in het bijzonder op de historische zeegraslocaties te zijn afgenomen, met name vanwege de afgenomen lichtbeschikbaarheid.

10.4 Overige gebruiksfuncties

10.4.1 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 10.4) 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 grootst 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.



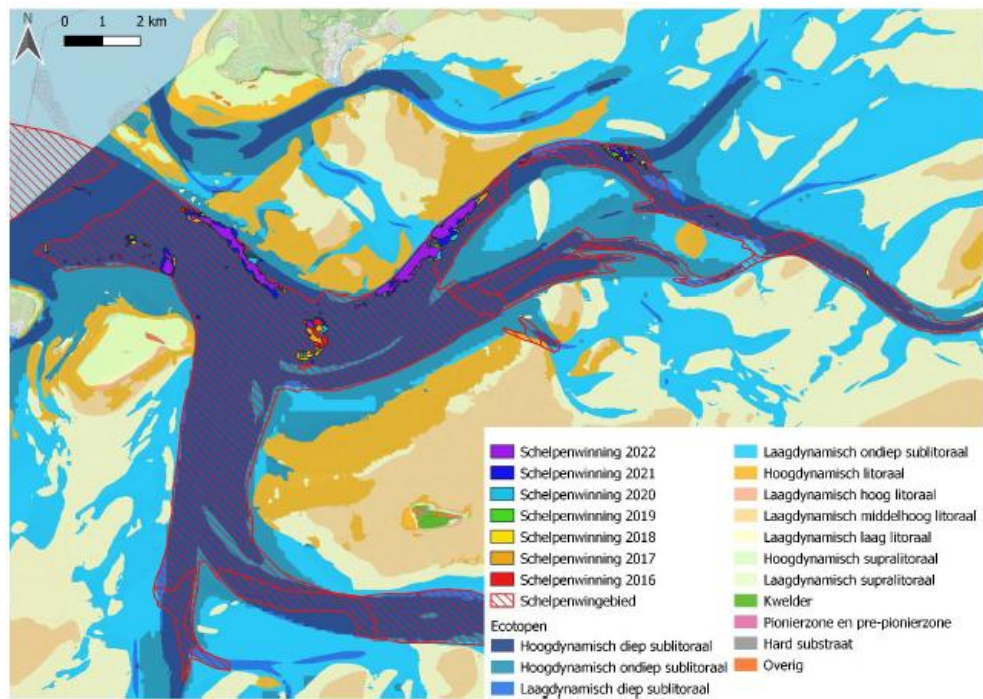
Figuur 10.4 Locaties van mosselpercelen in de westelijke Waddenzee.

10.4.2 Zand- en schelpenwinning

In de Waddenzee worden schelpen gewonnen. De winning mag alleen plaatsvinden in de geulen dieper dan NAP -5 m, in de kombergingsgebieden Marsdiep, Vlie en het Friesche zeegat. In het Vlie komt Schelpenwinning met name voor in de Vliestroom, de Westmeep en de Noordmeep (Figuur 10.5).

De maximale winbare hoeveelheid in de gehele Waddenzee is 80.000 m³. De afgelopen jaren is in het Vlie gemiddeld tussen de 10.000 en 20.000 m³ gewonnen (Mestdag, 2024). Dit quotum wordt elke drie jaar bepaald op basis van het langjarig gemiddelde van de schelpkalkproductie in de Waddenzee. In werkelijkheid is dit quotum echter niet representatief voor de schelpenbanken in diepe geulen waar de winning plaatsvindt, omdat het jaren tot decennia duurt om schelpen van de droogvallende platen naar de grote geulen te transporteren (Mestdag, 2024). Voor de morfologie van het bekken is de schelpenwinning waarschijnlijk van te kleine schaal om een rol te spelen in de autonome dynamiek. Vanuit ecologisch perspectief vormen de schelpenbanken wanneer ze zich nabij of aan het bodemoppervlak bevinden een uniek habitat voor bodemsoorten die op hard substraat leven. Deze ecologische functie en het effect van schelpenwinning hierop is echter nog weinig onderzocht (Mestdag, 2024).

In de Waddenzee werd tot 2022 zand gewonnen bij het onderhoud van de vaargeulen. Het volume zand dat werd gewonnen, is afgebouwd in stappen van 100.000 m³ van maximaal 500.000 m³ tot 2017. Zandwinning in zandwinputten, buiten het onderhoud van de geulen, is sinds 1998 niet meer toegestaan. Het afbouwen van de zandwinning is ingegeven door de gevolgen van zandwinning voor de sedimentbalans van de Waddenzee en de kustzone.



Figuur 10.5 Locaties van schelpenwinning in het Vlie gedurende de periode 2016 - 2022. Figuur overgenomen uit Mestdag (2024).

- Baptist, M. et al., 2019. *Beneficial use of dredged sediment to enhance salt marsh development by applying a 'Mud Motor': evaluation based on monitoring*, Dordrecht: Ecoshape.
- Buijsman, M. & Ridderinkhof, H., 2007. Long-term ferry-ADCP observations of tidal currents in the Marsdiep Inlet. *Journal of Sea Research*, Volume 57, pp. 237 - 256.
- Cleveringa, J., 2024. *Ecosysteemgericht Baggeren. Fase 2: Literatuuronderzoek t.b.v. beantwoording kennisvragen*, Leeuwarden: Waddenacademie.
- Cleveringa, J. & Grasmeyer, B., 2010. *Meegroeivermogen en gebruikruimte in de getijbekkens Vlie en Marsdiep: grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee*, Zwolle: Arcadis .
- Cleveringa, J. & Grasmeyer, B., 2010. *Meegroeivermogen en gebruikruimte in de getijbekkens Vlie en Marsdiep; Grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee*, Zwolle: Arcadis.
- Cleveringa, J. & Oost, A. P., 2017. *Morfologie Kombergingsgebied Borndiep: KPP 2017 BO03 Waddenzee. Kennisontwikkeling Morfologie en baggerhoeveelheden*, Delft: Deltares rapport 11200521-000-ZKS-004.
- Colina Alonso, A., 2020. *Evolutie van het bodemslib in de Waddenzee. Data analyse*, Delft: Deltares rapport 11205229-001-ZKS-003.
- de Beer, A., Vermeer, N., Elias, E. & Löhr, J., 2024. *Morfologie van de eilandkoppen van het Zeegat van het Vlie*, Delft: Deltares rapport 11210370-005-ZKS-0002.
- de Vet, L., Jaksic, L. & Quataert, E., ongepubliceerd. *Methodologie analyse areaalontwikkeling Waddenzee t.b.v. Digitale Systeem Rapportage (DSR)*, Delft: Deltares .
- de Wit, L. et al., 2024. *Abiotische effecten baggeren en verspreiden in de Waddenzee: voorbereidende studie voor het opstellen van het tweede Natura2000 beheerplan Waddenzee*, Delft: Deltares rapport 11210370-014-ZKS-0001.
- Doekes, J., 1985. *Invloed van de afsluiting van de Zuiderzee op het getij in de Waddenzee*, sl: Rijkswaterstaat, Dienst getijdewateren, nota GWIO 85.001.
- Duran Matute, M. et al., 2014. Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. *Ocean Science*, Volume 10, pp. 611 - 632.
- Elias, E., 2019. *Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee*, Delft: Deltares rapport 11203683-001-ZKS-0002.
- Elias, E., 2021. *Morfologie van het Zeegat van het Vlie*, Delft: Deltares rapport 11206794-004-ZKS-0003.
- Elias, E., 2024. *Sedimentbalans Nederlandse Kust*, Delft: Deltares.
- Elias, E., Stive, M., Bonekamp, J. & Cleveringa, J., 2003. Tidal inlet dynamics in response to human intervention. *Coastal engineering journal*, Volume 45, pp. 629 - 658.
- Elias, E., van der Spek, A., Wang, Z. & de Ronde, J., 2012. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences Volume 91*, pp. 293 - 310.
- Elias, E. & Vermaas, T., 2018. *Een actuele sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee (1933-2015)*, Delft: Deltares rapport 11202190-000-ZKS-0005.
- Elschot, K. et al., 2020. *Lange-termijnontwikkeling van kwelders in de Waddenzee (1960 - 2018)*, Wageningen: Wageningen Marine Research.
- Ente, P., 1987. *Bodemkundig onderzoek westelijke Waddenzee tussen GLW en NAP -5m*, sl: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, RIJP-rapport; 1987-1 Cbw.
- Essink, K. & de Vlas, J., 2000. *Visie kwelderontwikkeling in het Noord-Hollands deel van de Waddenzee*, sl: Rapport RIKZ/2000.052.

Eysink, W., 1979. *Morfologie van de Waddenzee; gevolgen van zand- en schelpenwinning*, Delft: Delft Hydraulics, rapport R1336.

Eysink, W. & Biegel, E., 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*, Delft: Delft Hydraulics, rapport H1300.

Glim, G. et al., 1987. *Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van Texel 1932 - 1982*, sl: Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland, Rapport ANWX-87.H201.

Govers, L., van der Heide, T., Olff, H. & Smeele, Q., 2018. *Waddenmozaïek: naar een rijkgeschakeerde wadbodem - projectplan majeure opgaven investeringskader Waddengebied 2016 - 2022*, sl: Natuurmonumenten.

Grasmeijer, B., Jaksic, L. & Vroom, J., 2022. *Verkenning morfologische ontwikkeling westelijke Waddenzee*, Delft: Deltares rapport 11208040-005-ZKS-0001.

Hayes, M. O., 1980. General morphology and sediment patterns in tidal inlets. *Sedimentary Geology*, 26(1), pp. 139-156.

Heidinga, D. et al., 2023. *Ecologische evaluatie Natura 2000 beheerplannen*, sl: Rijkswaterstaat/Witteveen+Bos.

Hijma, M., 2017. *Tidal-channel migration between 1997-2014 in relation to the local build-up of the subsurface*, Delft: Deltares rapport 11200538-004-ZKS-0003.

Hijma, M., 2021. *Bodemdalingsmonitor 2021 Kustfundament en getijdenbekkens*, Delft: Deltares rapport 11206794-003-ZKS-0006.

Hoeksema, H. et al., 2004. *Bodemdalingsstudie Waddenzee 2004. Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd*, sl: Rapport RIKZ/2004.025. Rijkswaterstaat.

Huismans, Y. et al., 2022. Development of intertidal flats in the Dutch Wadden Sea in response to a rising sea level: Spatial differentiation and sensitivity to the rate of sea level rise. *Ocean & Coastal Management*.

HWBP, 2024. *Hoogwaterbeschermingsprogramma*. [Online]
Available at: <https://www.hwbp.nl/projecten/overzicht-projecten/rijkswaterstaat/vlieland> [Geopend 1 8 2024].

Jaksic, L., Rienstra, J., Meijers, C. & Blauw, A., 2024. *Invloed afvoerregimes IJsselmeer op ecologie Waddenzee; verkennende modelstudie met signaalwaarden saliniteit als ecologische indicatoren*, Delft: Deltares rapport 11209267-007.

Jentink, R., 2023. *Ontwikkeling kwelder en schorvegetaties Nederland, in de verschillende waterlichamen in Nederland, periode 1991 - 2020*, Middelburg: Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening, Inwinning en Gegevensanalyse, Gisanalyse en Procesadvisering Datastromen.

Kragtwijk, N., Zitman, T., Stive, M. & Wang, Z., 2004. Morphological response of tidal basins to human interventions. *Coastal Engineering*, Volume 51, pp. 207 - 221.

Lodder, Q. et al., 2022. Future sediment exchange between the Dutch Wadden Sea and North Sea Coast - Insights based on ASMITA modelling. *Ocean & Coastal Management*, Volume 219.

Löhr, J., 2024. *Morphodynamics of the Vlie inlet*, Delft: Deltares stagerapport.

Mestdag, S., 2024. *Kennisoverzicht en aanbevelingen schelpenwinning Waddenzee*, Delft: Deltares.

Mulder, H., Nuijen, E., Liek, G. & van Maldegem, D., 2005. *Drempelverwijdering vaarweg Harlingen - Noordzee; baggerwerk en morfologische en ecologische gevolgen*, sl: Rijkswaterstaat RIKZ, Rapport RIKZ/2005.026, 87pp.

Nederhoff, K., Smits, B. & Wang, Z., 2017. *KPP Wadden Data analyse: getij en morfologie*, sl: Deltares rapport 11205236-002-ZKS-0005.

Oost, A., Cleveringa, J. & Taal, M., 2019. *Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie; beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2019*, Delft: Deltares rapport 11203669-000-ZKS-0006.

Oost, A. et al., 2020. *Where mud matters. Towards a Mud Balance for the Trilateral Wadden Sea Area: mud supply, transport and deposition*, sl: Waddenacademie ISBN 978-94-90289-57-7.

Quataert, E., Meijers, C., de Beer, A. & Elias, E., 2024. *Knelpuntanalyse Harlingen - Noordzee - Conceptueel model en handelingsperspectief voor knelpunten in de vaargeul Harlingen - Noordzee*, Delft: Deltares report, 11210370-005-ZKS-0002.

Ridderinkhof, H., 1990. *Reststromen en watermenging in de Waddenzee*, Utrecht: Proefschrift Universiteit Utrecht.

Ridderinkhof, W., 2016. *Morphodynamics of ebb-tidal deltas*, Utrecht: Proefschrift Universiteit Utrecht.

Rietveld, C., 1962. *The natural development of the Wadden Sea after the enclosure of the Zuider Sea*. Mexico City, 8th International Conference on Coastal Engineering, ASCE.

Rijkswaterstaat, 1935. *Veranderingen in het Zeegat van het Vlie en der aangrenzende waddeneilanden Vlieland en Terschelling*, sl: Rijkswaterstaat Hoorn.

Rijkswaterstaat, 2024. *Rijkswaterstaat*. [Online]
Available at: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/projectenoverzicht/waddenzee-dijkversterking-vlieland>
[Geopend 18 2024].

Schultz, K. & Gerkema, T., 2018. An inversion of the estuarine circulation by sluice water discharge and its impact on sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, Volume 200, pp. 31 - 40.

Sipma, E., 2023. *Flood protection by Living Dikes: From salt marsh dynamics to coastal safety (literature report)*, Enschede: University of Twente.

Smits, B., Jaksic, L., Dijkstra, J. & Vroom, J., 2024. *Modellering van abiotiek voor en na afsluiting Zuiderzee: relevantie voor herstelkansen ondergedoken Groot zeegras*, Delft: Deltares rapport 11209267-006-ZKS-0001.

Smits, B., Jaksic, L., Willemsen, P. & van Puijenbroek, M., 2024b. *Herstelpotentieel kwelders Waddenzee na ingrepen ten behoeve van dynamiek: verkenning op basis van abiotische condities met een nadruk op sedimentbeschikbaarheid*, Delft: Deltares.

Smits, B. & Nederhoff, K., 2018. *Mesoschaal volumebalans Westelijke Waddenzee*, Delft: Deltares rapport 11202177-000-ZKS-007.

Smits, B., Vroom, J., van Weerdenburg, R. & Colina Alonso, A., 2022. *Morfologie en onderhoud vaargeul Boontjes: systeembegrip en scenario's*, Delft: Deltares rapport 11208040-004-ZKS-0004.

Stolte, W. et al., 2023. *Zeespiegelmonitor 2022*, Delft: Deltares rapport 11209266-000-ZKS-0001.

Stolte, W. et al., 2023. *Digitale Systeemrapportage van de Waddenzee, versie 1.0*. [Online]
Available at: <https://systeemrapportage.nl/wadden>

Thijssen, J., 1972. *Een Halve Eeuw Zuiderzeewerken 1920 - 1970*, Groningen: Tjeenk Willink.

van der Vegt, H. & Cleveringa, J., 2022. *Dynamisch vaargeulbeheer Waddenzee*, Delft: Deltares & Arcadis rapport, 11209267-004-ZKS-0004.

van Geer, P., 2007. *Long-term morphological evolution of the Western Dutch Wadden Sea*, Delft: WL | Delft Hydraulics rapport Z4169.00.

van Straaten, L., 1964. De bodem der Waddenzee. In: *Het Waddenboek*. Zutphen: Thieme, pp. 75 - 151.

van Til, S. & Cleveringa, J., 2018. *Morfologische dynamiek Schuitengat; analyse tbv de scheepvaartfunctie*, Zwolle: Arcadis.

van Veen, J., 1950. Ebb and flood channel systems in the Netherlands tidal waters. *Tijdschrift Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap*, 67(303).

van Veen, J. & Dallmeijer, H., 2016. *Griend; Eiland voor vogels.*, sl: sn

Vroom, J., 2011. *Tidal divide; a study on a simplified case and the Dutch Wadden Sea*, Delft: MSc Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geo Sciences.

Vroom, J., Cleveringa, J., Oost, A. & Taal, M., 2023. *Kombergingsrapportage Marsdiep*, Delft: Deltares rapport 11209268-001-ZKS-0005.

Vroom, J., Elias, E., Lescinski, J. & Wang, Z., 2012. *Assessment of the effects of the Zuider Sea closure on the hydrodynamics of the Wadden inlets*. sl, ICCE proceedings 2012.

- Vroom, J., van Maren, B., Marsh, J. & van der Lelij, A. C., 2017. *Effectiveness of the mud motor near Koehool; results and interpretation of a tracer study*, Delft: Deltares rapport 1209751-004-ZKS-0001.
- Wagenaar, M., 2024. *Derivation morphological tidal divides of the Wadden Sea*, Delft: Memo - Stageverslag (Deltares).
- Wang, Z., Elias, E., van der Spek, A. & Lodder, Q., 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*, Issue October 2018.
- Wang, Z., Elias, E., van der Spek, A. & Lodder, Q., 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, pp. 183-214.
- Wang, Z. et al., 2013. Movement of tidal watersheds in the Wadden Sea and its consequences on the morphological development. *International J. of Sed. Res.*, 28(2), pp. 162 - 171.
- Werkgroep 1, 1981. *Zandwinning in de Waddenzee; resultaten van een hydrografisch-sedimentologisch en biologisch-ecologisch onderzoek*, sl: Stuurgroep hydrografisch-sedimentologisch en biologisch ecologisch onderzoek met betrekking tot de winning van zand in de Waddenzee.
- Willemsen, P. W. et al., 2020. Field-based decadal wave attenuating capacity of combined tidal flats and salt marshes. *Coastal Engineering*.
- Witteveen + Bos, 2022. *Versterking Afsluitdijk: Passende Beoordeling aanleg en gebruik*, sl: Levvel EPC V.O.F..
- Zijl, F., van Weerdenburg, R. & Laan, S., 2023. *DWSF: a sixth-generation 3D model of the Dutch Wadden Sea. 2022 release*, Delft: Deltares rapport 11208054-006-ZKS-0001.

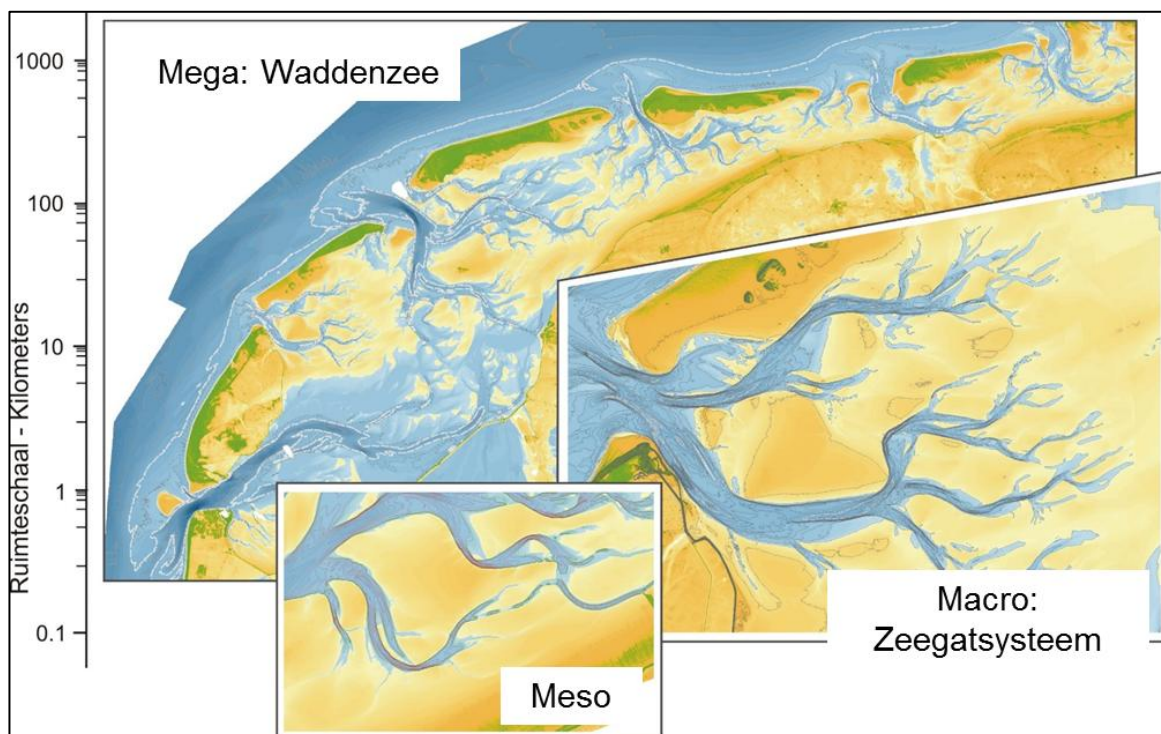
A Morfologische schaalniveaus en eenheden

A.1 Morfologische schaalniveaus

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

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

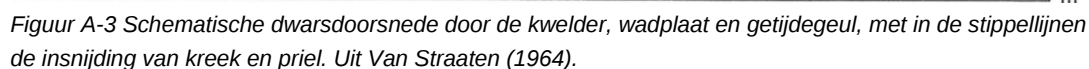
De *macroschaal* is het schaalniveau van de Waddenzee dat meestal wordt gehanteerd. Het is het schaalniveau van het zeegatsysteem, dat bestaat uit buitendelta, eilanden en bekken of kombergingsgebied (Figuur A-2). Het zeegat zelf (de geul) voorziet een bekken van getijdewater. Een kombergingsgebied wordt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



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

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.

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



B Historische ontwikkeling westelijke Waddenzee

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

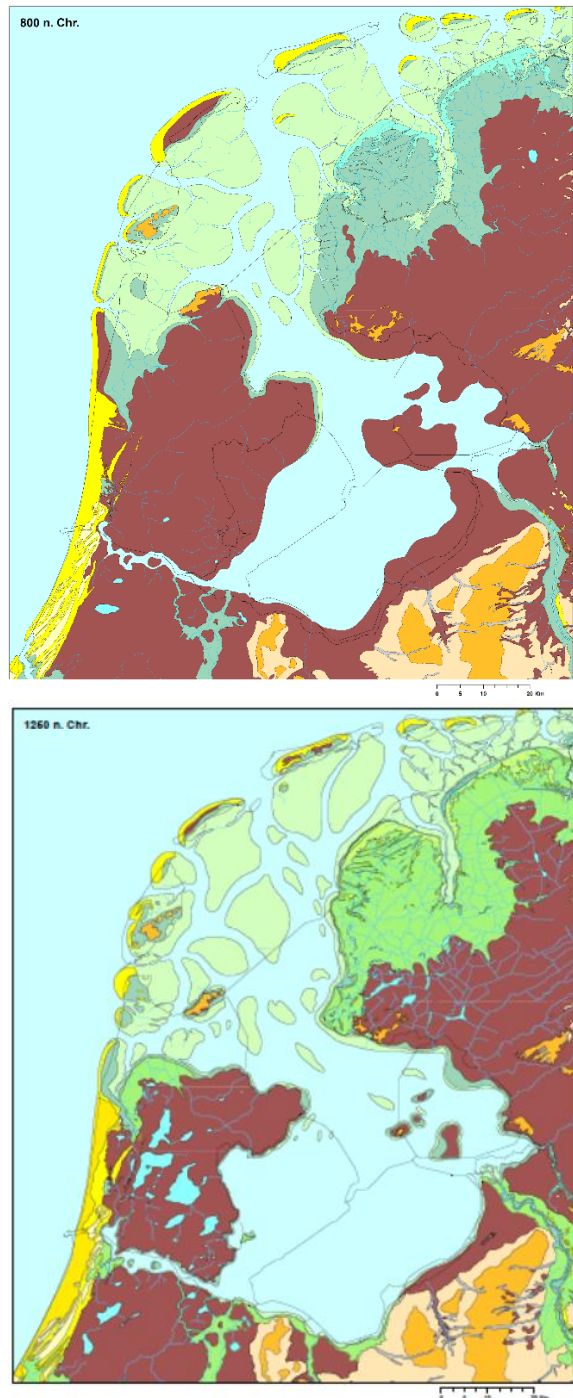
B.1 De Romeinse periode: het Flevomeer (400BC – 100AD)

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

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

Al met al is het goed denkbaar dat het huidige kombergingsgebied Marsdiep toen nog grotendeels zoet was. Dit wordt ook ondersteund door waarnemingen. Getijinvloed reikte waarschijnlijk tot ongeveer Den Helder, waar onder een 12^e-eeuwse terp geulafzettingen waargenomen zijn (Woltering, 1997). Viereneenhalf kilometer naar het oosten op het huidige Balgzand was het gebied nog bewoond in de 8^e, 9^e en 11^e-12^e eeuw (Woltering, 1997).



Figuur B-2: Reconstructies van de westelijke Waddenzee en het IJsselmeergebied rond 800 A.D. en 1250 A.D. (Vos, 2018). Merk op dat nieuwere waarnemingen het aannemelijk maken dat voor de 800 AD reconstructie de trechtervorm van de IJsselmonding bij Kampen meer richting Genemuiden lag, dat de rand van de Noordoostpolder nog niet zo sterk geërodeerd was en dat het grote eiland verbonden was met Kampen/Oldenbroek.

B.2.3 Vlie: een estuarium?

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

B.2.4 Aelmeer

Het meer Aelmeer (= 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 getijdemping vermoedelijk zeer groot zijn geweest. Mogelijk kon al wel in de zuidwest hoek rond Amsterdam zout doordringen in de 8^e-9^e eeuw getuige de kwelderafzettingen bij Poppendam, en Ilperveld (Bakker & Van Smeerdijk 1982; Borger & Kluiving 2017). De precieze route hiervan is niet duidelijk. Waarschijnlijk toont de Sawley map van 1110 (Henry van Mainz) deze situatie nog. Zij geeft een inham te zien tussen Friesland en Holland (Figuur B-3). Ubbo Emmius claimt dat de opening nog klein was rond 1222 en dat deze groter was geworden in 1250⁷ (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. Ermee 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 en Oosterdijk;
3. Een barrière tussen Enkhuizen en Urk. Argumenten deels als bij 2) en Urk was groter dan tegenwoordig.

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



Figuur B-3 Aftekening van de Sawley map 1110 met herkenbaar Holland en Friesland met een opening ertussenin, wat als het Aelmere/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 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 Aelmere in combinatie met het landverlies ten gevolge van bodemdaling door veenontginning.

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

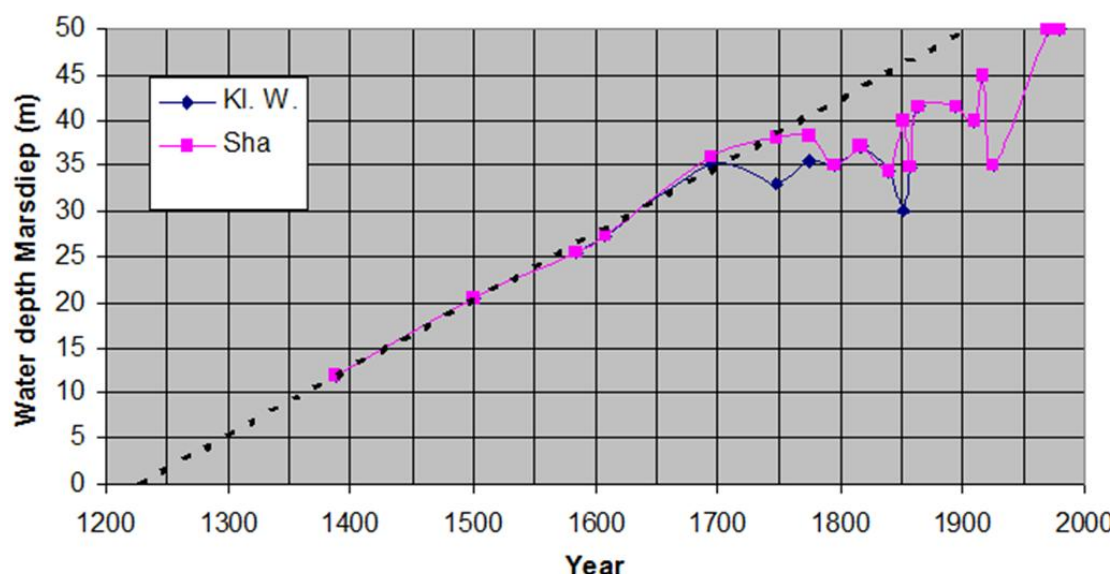
B.3.1 Algemeen

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

B.3.2 Marsdiep: ontwikkeling van het 'zeegatsysteem'

De ver zeewaarts uitstekende kust van Texel-Den Helder werd geleidelijk geërodeerd, waardoor het Marsdiep zelf ook landwaarts verschoof (Schoorl, 1973). Hierdoor werd ook het achterliggende veengebied kwetsbaarder voor overstromingen. Deze processen zullen hebben geleid tot een toename van de invloed van getijwater (Oost et al. 2003). Terug-extrapolerend op grond van maximale diepte-waarnemingen, zoals getoond in Figuur B-4 en berekende getijdevolumes, die zijn getoond in Figuur B-5 zou het Marsdiep als zeegat

aanwezig kunnen zijn geweest rond 1220 of zelfs eerder (Oost et al. 2003). Het is waarschijnlijk dat zout getijwater via het Marsdiep al vanaf ca. 1100 het huidige kombergingsgebied van het Marsdiep begon in te dringen, rond 1200 het Balgzand had bereikt⁸. Ergens tussen ca. 1150 en 1300 werd waarschijnlijk contact gemaakt met het Vlie getijdesysteem, dat oorspronkelijk mogelijk zo ver reikte als de oostzijde van Wieringen. Het getijvolume van het Marsdiep was waarschijnlijk nog zeer bescheiden (Figuur B-5).

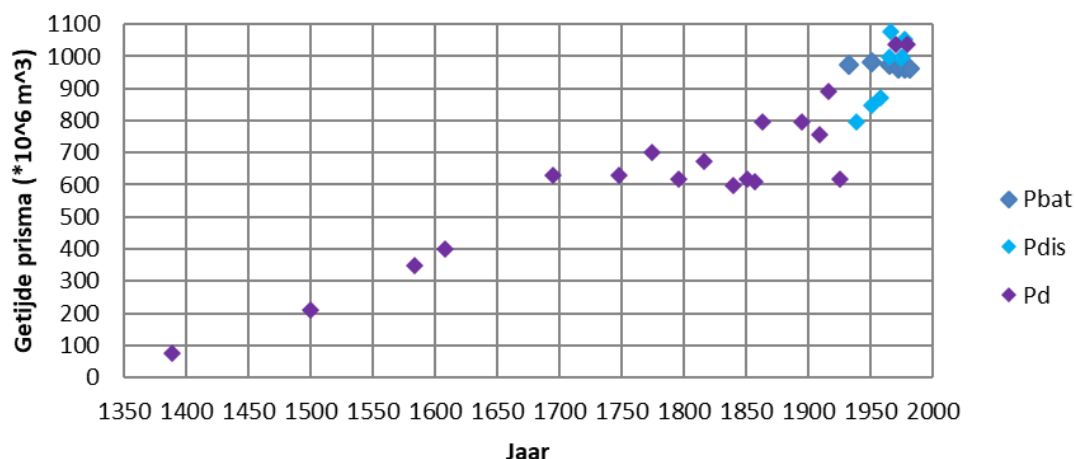


Figuur B-4 Ontwikkeling maximale diepte van het Marsdiep sinds 1388 (deze laatste meting is vrij onzeker), (data: Sha 1990; Klein Wassink 1991; Schoorl 1999a in Oost et al. 2003).

De uitbreiding in oostelijke richting van de getijinvloed van het Marsdiep leidde tot een sterke verandering in de westelijke Waddenzee en het huidige IJsselmeergebied (Edelman, 1964; Schoorl, 1973, 1999a; Eisma & Wolff 1980). Het zoute, zuurstofrijke en dynamische getijwater dat via het Marsdiep binnen kwam, brak het veen af, terwijl de drainage van inbraakgeulen het veen liet compacteren. De sedimentbedekking zal de overgebleven veenresten verder hebben laten compacteren. Het Marsdiep nam naar het oosten de drainage over van delen van het Vlie-estuarium (Paap et al., 2012). Het wantij tussen kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie was zeker al rond 1300 doorbroken door deze oostwaartse uitbreiding⁹. 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 Viladestras 1413; Petrus Roselli 1462; Lang 1955, 1958; Koeman 1985; Oost 1995).

⁸ 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).

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



Figuur B-5 Ontwikkeling berekening getijdevolume 1388-1982 gebaseerd op maximale diepte (Pd), afvoermetingen (Pdis) en diepte kombergings*0,9 (Pbat) (gebaseerd op: Oost et al. 2017).

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

B.3.3 Vlie: van estuarium naar kombergingsgebied

Het Vlie-estuarium veranderde door de overname van het Marsdiep van de Zuiderzee voor zover na te gaan van een estuarium met aparte eb- en vloedgeulen, zoals zichtbaar in de kaart van Sgrooten, (Figuur 4.1) in een kombergingsgebied met vertakkende geulen zonder duidelijke eb of vloed voorkeur. Daarbij raakten waarschijnlijk grote delen van de oorspronkelijke geulen verlaten. Inderdaad is er op een kaart van 1584 nog een “Oude Vlie” aangegeven die de richting laat zien van de verlaten geul. Ook is een verlaten geul afzetting aangetroffen onder ruwweg het knippunt in de Afsluitdijk westelijk van de Kornwerderzandsluizen (Paap et al. 2012) en een verondieping van de resterende overblijvende Vliegeul ten westen van de Kornwerderzand-plaat (Koerselman et al. 2002; Paap et al. 2012). De sedimentaire afzettingen laten zien dat deze geul haar estuariene karakter verloor (er was niet langer sprake van een dominant getij) en een gewone waddengetijdegeul werd (Koerselman et al. 2002). De exacte timing van deze veranderingen is niet bekend.

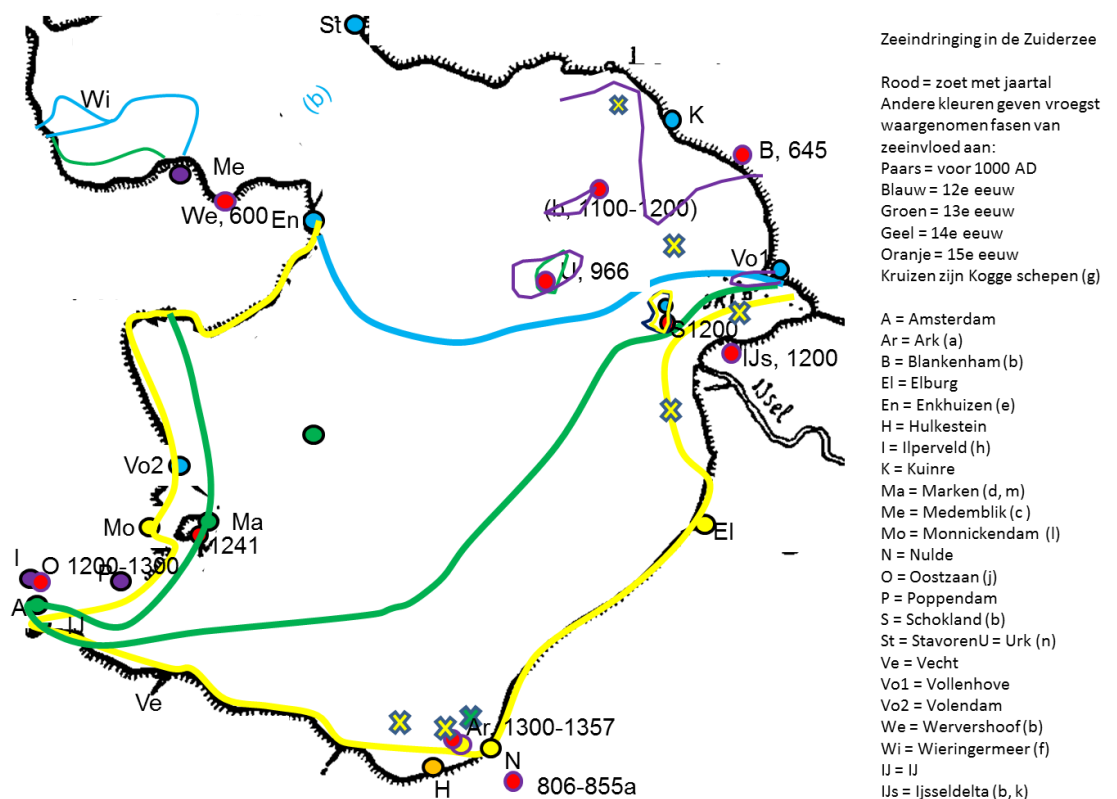
Ook bij het Vlie heeft het opruimen van de veenpakketten geleid tot vergroting van het kombergingsgebied en daarmee waarschijnlijk tot vergroting van het getijvolume. De afname van de grootte van Griend wijst in die richting. Daarnaast zijn er tenminste 8 historische bronnen, legenden en namen die wijzen op veendoorgraving en/of landverlies in het gebied tussen Vlie en Texel¹⁰. Hoewel de betrouwbaarheid van deze verhalen wordt betwijfeld sluiten ze qua timing en locaties goed aan op de bovenbeschreven veranderingen.

¹⁰ 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

B.3.4 Van Aelmeer naar Zuiderzee

Tot deels in de 14e eeuw was er sprake van afnemende oppervlakken land in grote delen van: het Wieringermeer gebied; het Hoornse Hop; nabij Amsterdam; de Noordoostpolder (bewoond rond Nagele en Emmeloord; van Popta, 2020.); en zuidelijk van de IJsseldelta. Het (schier)eiland Schokland was al bewoond in de 8e eeuw en oorspronkelijk tenminste 24 km² groot (Wiggers, 1955; Hogestijn, 1992; Koopstra et al. 1993; van Popta, 2020.). Ook Urk moet groter zijn geweest dan tegenwoordig: aan de westkant strekte het rond 900 AD waarschijnlijk zeker nog 2 km verder uit. Steilranden bij Utrecht en de kliffen van Gaasterland suggereren dat ook daar erosie moet zijn opgetreden. Dit kan deels ook al tijdens de meer-fase van het Aelmeer zijn gebeurd.

Als de beschikbare informatie voor het voormalige Zuiderzeegebied wordt samengebracht dan lijkt het erop dat zee-invloeden zich zuidwaarts uitbreidden vanaf de 12e tot en met de 15e eeuw (Figuur B-6). Lokaal op plaatsen met veel rivierafvoer (IJssel, Overijsselse Vecht) was het water nog lange tijd zoet.



Figuur B-6 Oudste waarnemingen van zee-inval en verzilting. Lijnen zijn vloeiende verbinding tussen de waarnemingspunten mede gebaseerd op topografie en saliniteit van 1913. Gebruikte literatuur: a = Vlierman,

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).

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 = Dirks et al., 1996; n = Wiggers, 1955; o = Borger & Kluiving, 2017. & Hogestijn, 1991.

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

Daarbij zal zich vermoedelijk in de 12^e-14^e eeuw een fase hebben voorgedaan waarbij de getijweg vanaf het Marsdiep ongeveer een kwart getijgolf besloeg en eindigde tegen de boven beschreven barrière(s) (situatie 2 in Figuur B-7). Net als tijdens de latere barrière van de Afsluitdijk zal dit hebben geleid tot opslingering van het getijverschil naar ongeveer het dubbele (ca. 2 m ter hoogte van Harlingen). De opslingering 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 geweest¹¹. 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 overstrooming en erosie.

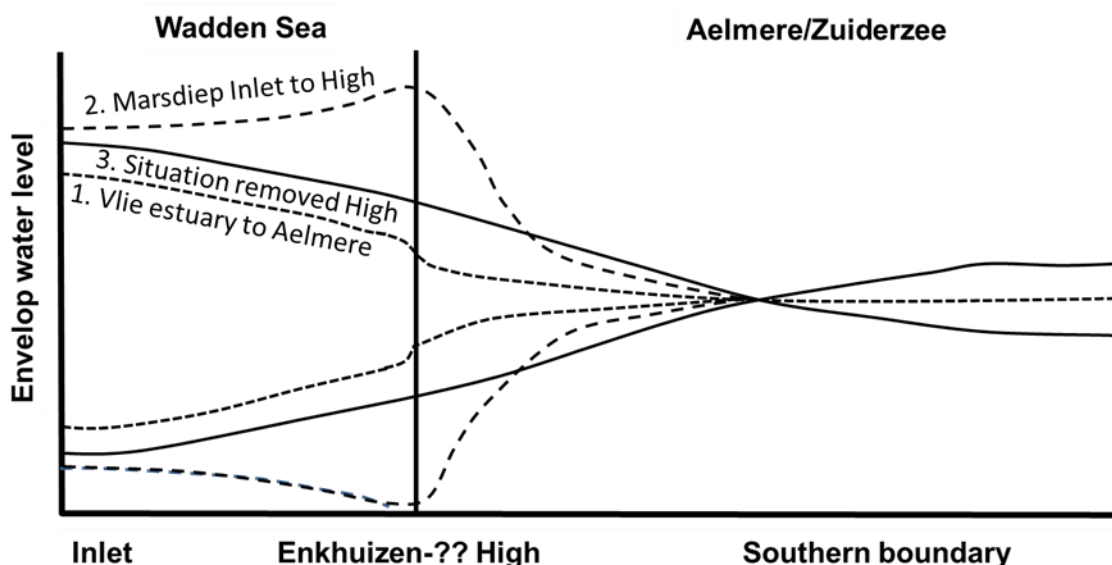
In de 12^e eeuw lijkt de uitbreiding van de invloed van de zee vooral de noordzijde betreffen tot ruwweg de lijn Enkhuizen tot Vollenhove. Tijdens stormvloed lijkt dan al erosie te zijn opgetreden o.a. west van Stavoren en in het Wieringermeergebied. In het uiterste zuidwesten (Vecht, Utrecht en Volendam) wordt in dezelfde tijd ook zee-invloed 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 zuidoosten van de Zuiderzee. Gedurende deze uitruiming werd de getijdeweg vanaf het Marsdiep verlengd tot een halve

¹¹ Inundatie en erosie van eilanden, het Zuiderzeegebied en het vasteland trad volgens diverse, soms betwiste, bronnen (Gotschalk, 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: Gotschalk, 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 (Gotschalk, 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; Gotschalk, 1971; Koopstra et al., 1993).

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



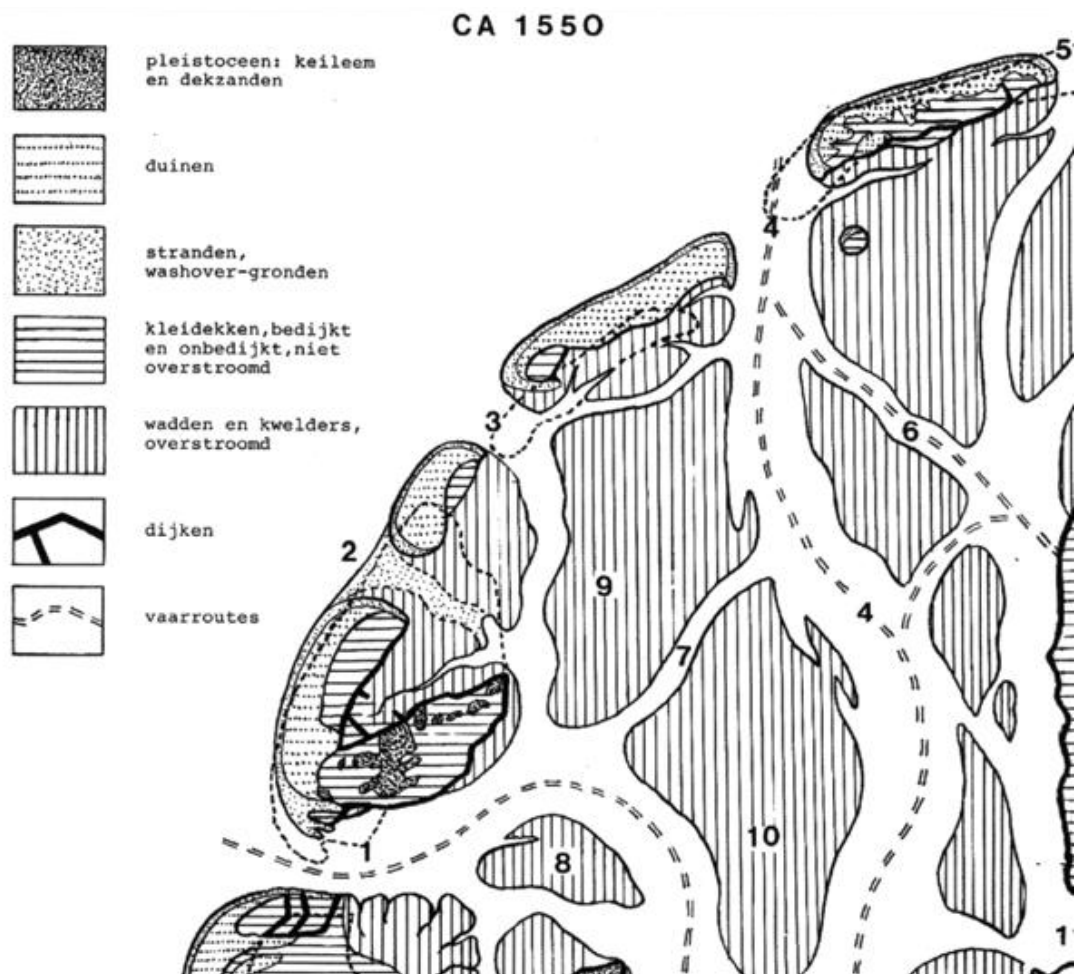
Figuur B-7 Schematische dwarsdoorsnede door de Zuiderzee vanaf de zeegaten ("Inlet", links) naar de zuidelijke oevers (rechts), met de veronderstelde niveaus van hoog- en laagwater. 1 = Aelmere met Vlie-estuarium; 2 = Situatie met verbinding Marsdiep tides tot Enkhuizen-Stavoren/ Urk Hoog; 3 = Marsdiep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

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

B.4 De moderne tijd: 1500-1900

B.4.1 Algemeen

Opvallend is dat behoudens het natuurlijke verleggen van geulen er weinig veranderde in het gebied tussen 1500 en 1900. De belangrijkste ontwikkeling is dat de configuratie van de diverse hoofdgeulen vrij stabiel wordt in deze periode. Dit zal pas sterk gaan veranderen na de afsluiting van de Zuiderzee. Het hoofdpatroon van drie zich vertakkende geulen (Marsdiep, Vlie en daartussenin geklemd het kleinere Eierlandse Gat) wordt nu min of meer definitief (Figuur B-). 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-8 Het westelijk waddengebied rond 1550 A.D. Reconstructie van Schoorl (1999).

B.4.2 Marsdiep: toename getijdeprisma

De maximale diepte van het zeegat van het Marsdiep nam verder toe tot ca. 1700 en daarmee waarschijnlijk ook het getijvolume (Sha 1990; Figuur B-5). Daarna is in de periode 1700-1850 geen sprake meer van een toename. De oorzaak kan gelegen zijn in:

- het beëindigen van belangrijke afname van veenafzettingen, waardoor het getijvolume niet verder vergrootte;
- het bereiken van een toestand waarin de aanzanding in het kombergingsgebied Marsdiep de zeespiegelstijging compenseerde;

- een (tijdelijke) stop in de stijging van de zeespiegel, zoals ook te zien in de metingen van de getijhoogte te Amsterdam vanaf 1700 (Oost, 1995) of zelfs een daling in de HW-curve (van Jensen et al. 1993); een mogelijk gevolg van de koudere klimaats-condities in de Kleine IJstijd (Oost, 1995);
- een “tegenreactie” vanuit het Vlie, wat door de oostwaartse uitbreiding van het Marsdiep systeem naar het oosten was teruggedrongen (dit verschijnsel is vaker te zien, bijvoorbeeld: Zoutkamperlaag/Eilanderbalg; Oost, 1995);
- een combinatie van bovenstaande.

Daarna gaat de toename weer verder (Figuur B-5). De oorzaak daarvoor is onbekend. Ridderinkhof (2016) concludeerde op basis van theoretische modellen dat het kombergingsgebied Marsdiep sedimentexporterend was voorafgaand aan de afsluiting van de Zuiderzee door de grote lengte die het bekken had en de invloed daarvan op de getijdegolf.

B.4.3 Het geulenpatroon

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

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

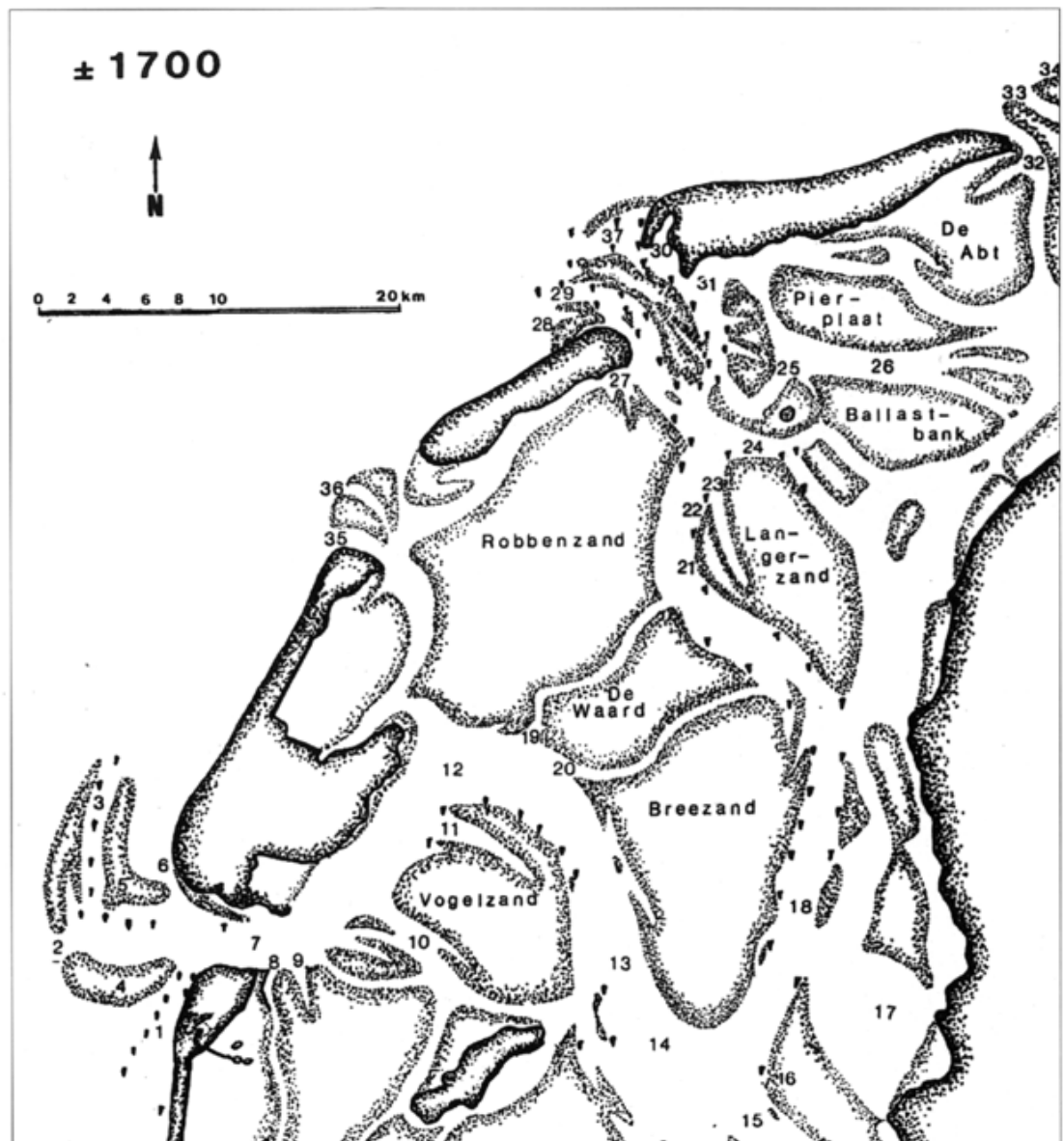
- het Amsteldiep dat tot in 1863 nog tussen Noord-Holland en het eiland Wieringen doorliep en
- het Zwin (bestaande uit de Wierbalg en het Visjagersgaatje) aan de oostzijde van het eiland Wieringen.

Het Zwin is een geulencomplex dat al vanaf tenminste het eind van de 16^e eeuw continu aanwezig was. Eén van de geulen, de Wierbalg, was in de 16^e eeuw al aanwezig. In de periode van 1816 tot 1838 ontstonden het Visjagersgaatje 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 18^e eeuw een vloedschaar van de Texelstroom. Rond 1816 begon de geul zich te verdiepen tot 12 à 13 m. De geul had toen een west-oost oriëntatie. Tot 1863 breidde dit diepe deel zich verder uit en draaide door uitschuring van de buitenbocht in oostzuidoostelijke richting. Tegelijkertijd ontstond vrij snel na 1816 een nieuwe vloedschaar zuidelijk van de Balg. Deze nieuwe vloedschaar zou steeds belangrijker worden. Dit proces zette zich voort totdat in 1873 de nieuwe vloedschaar zo belangrijk was geworden dat ze de naam Malzwin kreeg. Omstreeks die tijd stond het diepe deel van de Balg niet meer in directe verbinding met de Texelstroom. De stroomrichting van dit Malzwin was, in tegenstelling tot de richting van de Balg, veel meer naar het oosten tot noordoosten gericht. Hierdoor werd de stroming meer op de buitenbocht gericht waardoor de aanstroming op het 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 -7,5 m NAP. De Balg breidde zich verder uit in zuidelijke richting.

In 1921 begon de Balg zich langzaam terug te trekken als gevolg van het begin van de afsluiting van het Amsteldiep. In de periode 1921-1925 trad een sterke afname van de breedte van het Malzwin op bij de aansluiting op de Texelstroom. Ook trok de Wierbalg zich terug in deze periode.

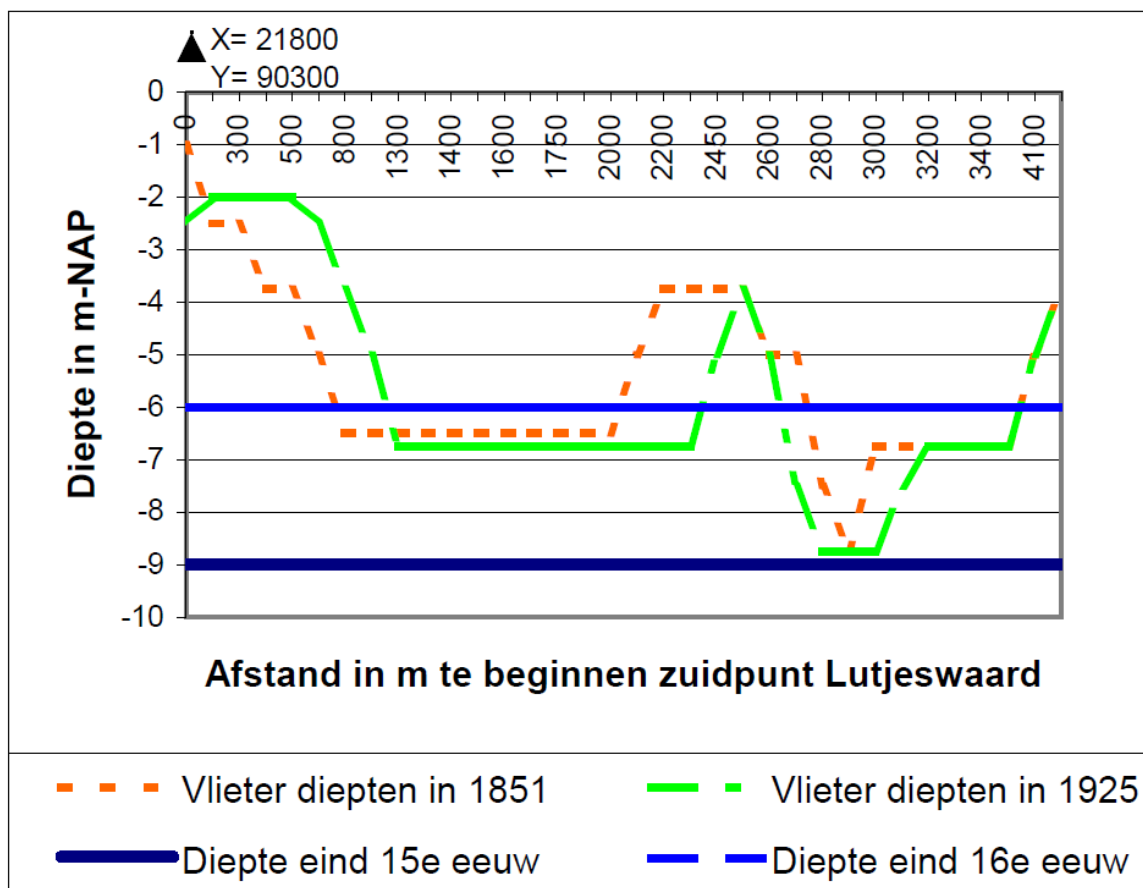


Figuur B-9 Het westelijk waddengebied rond 1700 A.D. Reconstructie van Schoorl (1999).

Uit een kaart van Albert Haeyen uit 1585 blijkt dat in die tijd de Vlieter al een belangrijke geul was. De diepte van de Vlieter ten westen van de Javaruggen bedroeg in die tijd 4 vadem (circa 7 m; vermoedelijk ten opzichte van laagwater). Het laagwater is voor die tijd geschat op ca. -0,6 m NAP zodat voor de diepte van de Vlieter rond het eind van de 16^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 m op een diepte van -10 m NAP. Deze oostwaartse verplaatsing werd veroorzaakt doordat de Vlieter daar onderdeel uitmaakte van de uitschurende

buitenbocht van de Texelstroom. Behoudens deze oostwaartse verplaatsing lijken de diepten nauwelijks te veranderen vanaf de 15^e eeuw (Figuur B-10).

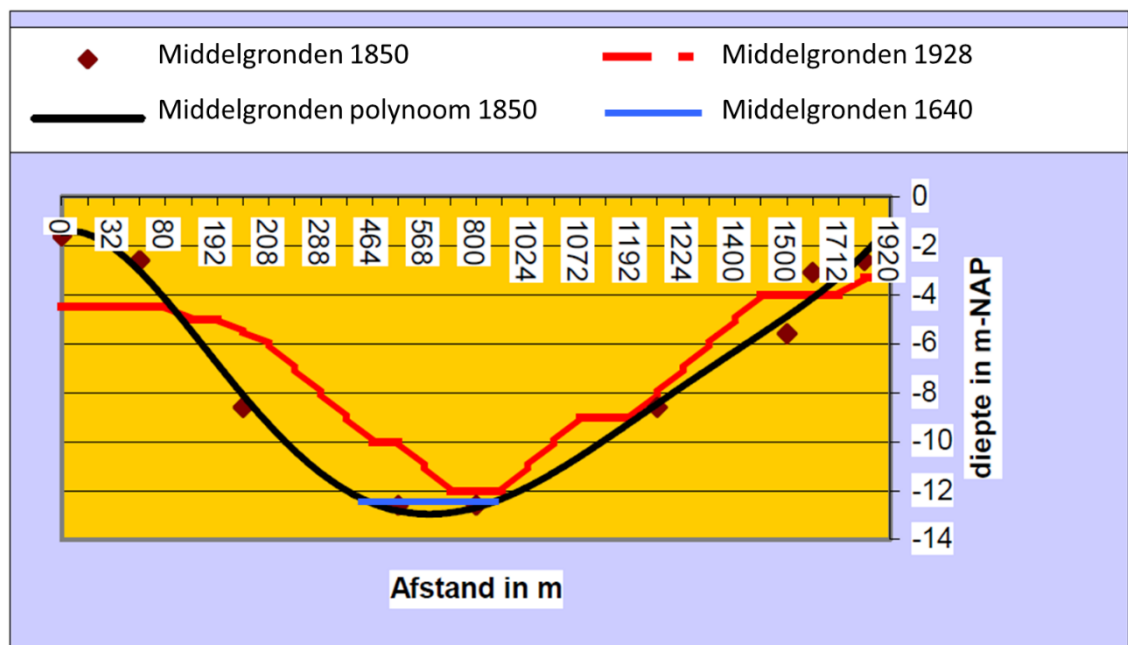


Figuur B-10 Overzicht van de diepteprofielen vanaf de zuidpunt van het Lutjeswaard naar het oosten. Diepten eind 15e eeuw ('sGrooten-kaart) en diepten eind 16e eeuw (Waghenaer) lijken niet te zijn veranderd t.o.v. 1851 en 1925 (Oost & Kleine Punte, 2003).

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

B.4.4 Het Zeegat van het Vlie

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



Figuur B-11 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.

B.4.5 Zuiderzee

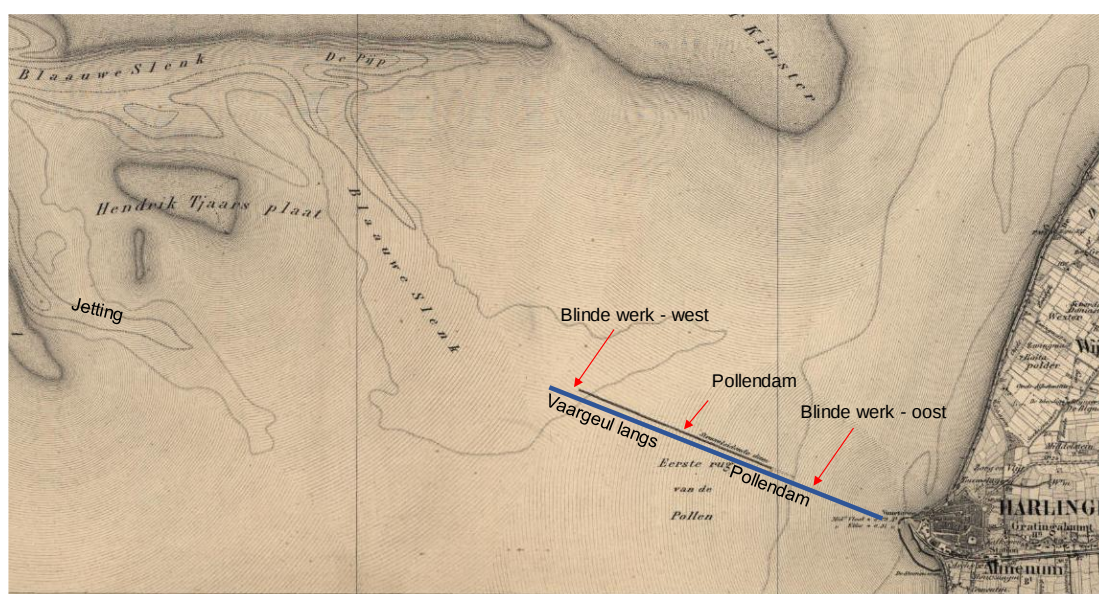
Het grootste deel van de Zuiderzeekusten kon door middel van dijken worden gehandhaafd en landverlies langs de randen werd grotendeels tot staan gebracht. De afname van de eilanden van de Zuiderzee ging echter door. Urk, Marken en Schokland namen geleidelijk af in grootte. Voor Schokland betekende het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

B.5 De aanleg van de Pollendam

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

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

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



Figuur B-12 Topografische kaart 1875 van de omgeving van Harlingen, met daarin de Pollendam.

B.6 Referenties

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

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

Bartels, M.H. (Ed.), 2016. Dwars door de dijk; archeologie en geschiedenis van de Westfriese Omringdijk tussen Hoorn en Enkhuizen; Archeologie West-Friesland, m.m.v. D. Aten, M. Bartels, J. de Bruin, D. Duijn, B. van Geel, S. Gerritsen, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, G. Kazimier, C. van der Linde, C. Schrickx. Stichting Archeologie West-Friesland, Hoorn, 4 delen, 576 pp.

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

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

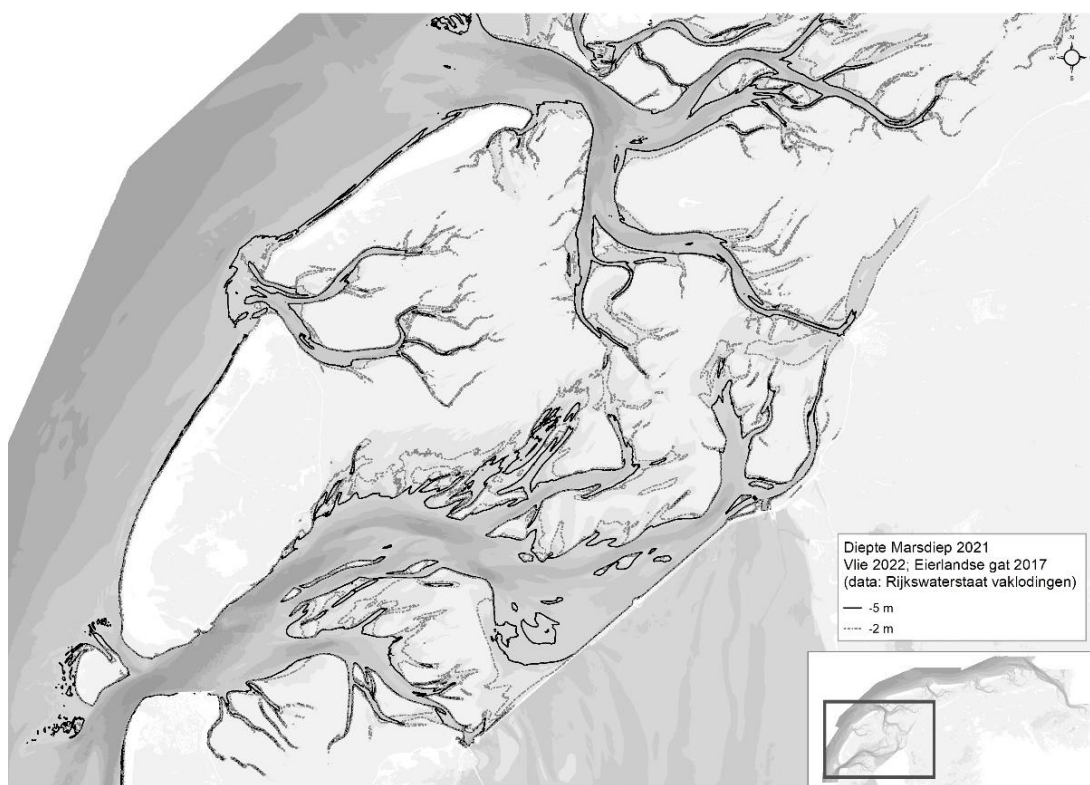
- Bos, J.M., 1988. Landinrichting en archeologie: het bodemarchief van Waterland. Nederlandse Archeologische Rapporten 6, Amersfoort.
- Buisman, J., 1995. Duizend jaar weer, wind en water in de Lage Landen 1, tot 1300. Uitgeverij van Wijnen, 656 pp.
- Casparie W.A. & J.G. Streefkerk, 1992. Climatological, stratigraphic and palaeo-ecological aspects of mire development. In J.T.A. Verhoeven: Fens and Bogs in the Netherlands: Vegetation, History, Nutrient Dynamics and Conservation. P. 81-130.
- Hogestein, J.W.H., 1989. Palaeobotanical analysis of Monnickendam and the salination of the Zuiderzee. *Cingula* 11, P. 115-124.
- Hogestijn, J.W.H., 1991. "Archeologische kroniek van Flevoland." in: En het land was niet langer woest en ledig. Cultuur Historisch Jaarboek voor Flevoland. Zutphen. 110-129.
- Hogestijn, J.W.H., 1992. Schokland in de late middeleeuwen. Verschenen in: Schokland revisited. Cultureel Historisch Jaarboek voor Flevoland, blz. 95-112. Lelystad.
- Lang, A.W., 1955. Traces of lost North European sea charts of the 15th century. *Imago Mundi*, 12, 31-44.
- Lang, A.W., 1958. Gestaltungswandel des 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.
- Niemeijer, J.A, 1975. Land van terpen en dijken. Boekencentrum bY, the Hague, 2nd print, 118 pp.
- Oost, A.P., 1995. Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet. A study of barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins, *Geologica Ultraiectina*, Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen no. 126, Utrecht University.
- Oost, A.P., S. van Heteren, J. Wallinga & M. Ballarini, 2003: De Kalender van Texel op basis van luminescentie en historische gegevens, excursiegids, RIKZ/AB/2003.603x
- Paap, B.F., C.W. Dubelaar, J.L. Gunnink, A.P. Oost, 2012. Unraveling the shallow geology of the western Wadden Sea using high resolution seismics. *Neth. Journ. Of Geosc.*, 91,3, 341-355.
- Platner, C., 1867. Die grossen kolnischen Jahrbücher, nach der Ausgabe der Monumenta Germaniae übersetzt (p. 82: 1170 A.D. contemporaneous perhaps by Burchard). Die Geschichtschreiber der deutschen Vorzeit, 13th Cent., 1. Band, Verlag von Franz Duncker, Berlin, 272 pp.
- Pons, L.J. & J.A. Wiggers, 1960. De holocene wordingsgeschiedenis van Noordholland en het Zuiderzeegebied, deel II. *Tijdschrift KNAG*, XX, 3-57.
- Reinders, R., 1994: Cog finds from the IJsselmeerpolders. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, RIJP, Flevovericht 248, 35 pp.
- Schmeidler, B. & J.M. Lappenberg, 1910. Helmolds Chronik der Slaven, nach der Ausgabe der Monumenta Germaniae übersetzt 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 Deutschen Buchhandlung, Leipzig, 3rd Ed. 271 pp.
- Schoorl, H., 1973. Zeshonderd jaar water en land. Bijdrage tot de historische Geo- en Hydrografie van de Kop van Noord-Holland in de periode 1150-1750. Verhandeling van het Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap, Nr.2, Wolters-Noordhoff, Groningen, 534 pp.
- Schoorl, H., 1999a. De Convexe Kustboog, deel 1, het westelijk waddengebied en het eiland Texel tot circa 1550. pp. 1- 187.
- Schoorl, H., 1999b. De Convexe Kustboog, deel 2, het westelijk waddengebied en het eiland Texel vanaf circa 1550. pp. 188-521.
- Stoob, H., 1963. Helmold von Bosau, Slawenchronik, neu iibertragen und erlautert (p. 339: Chronica Slavorum, 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.
- Van der Aa, A.J., 1837-1854: Aardrijkskundig Woordenboek der Nederlanden deel 1-14.
- Van Giffen, A.E., 1964. De ouderdom onzer dijken. Tijdschrift K.N.A.G., tweede reeks, deel LXXXI, No.3, 273-286.
- Van Popta, Y. 2020. When the Shore becomes the Sea'. Proefschrift Univesrsiteit Groningen.
- Veldhuizen, E., 1980. Vruchten en zaden van Marken - Intern rapport Instituut voor Pre- en Protohistorie Univ. van Amsterdam.
- Vlierman, K., 1985. Neolithische en middeleeuwse vondsten op de kavels OZ 35 en OZ 36 in Zuidelijk Flevoland Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders. - Lelystad : R.I.J.P.-rapport, 1985. – 51 39p.
- Vos, P.C., 2015. Origin of the Dutch coastal landscape. Long-term landscape evolution of the Netherlands during the Holocene, described and visualized in national, regional and local palaeogeographical map series. PhD thesis Utrecht Univ. Barkhuis Publishing, Eelde.
- Vos, P.C., 2018: Holocene reconstructie kaarten Nederland, versie 2018.
- Wiggers, A.J., 1955: De wording van het Noordoostpoldergebied. Een onderzoek naar de fysisch-geografische ontwikkeling van een sedimentair gebied. W.E.J. Tjeenk-Willink, Zwolle, 216 pp.
- Willemsen, J. van't Veer, R. & van Geel, B. 1996: Environmental change during the medieval reclamation of the, raised-bog area Waterland (The Netherlands): a palaeophytosociological approach. Review of Palaeobotany and Palynology , 94, 75-100
- Woltering, P.J., 1998 (1996–1997). Occupation History of Texel, III: The Archaeological Survey, Paleodemography and Settlement Patterns, BROB 42, 209–363.
- Zuidema, W. & J. Douma, 1972. Kronieken van de abdij Bloemhof te Wittewierum, loopende over de dertiende eeuw, door de Abten Emo, Menko en een 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.

C Morfologische principes van getijgeulen

C.1 Getij stuurt geulvolume

Waar zeer veel getijdewater heen en weer stroomt en de stroming hoge snelheden bereikt, schuurt de bodem uit en vormen zich geulen. Deze getijdegeulen voeren niet alleen water aan, maar ook sediment en nutriënten. De geulen vertakken zich op vrij regelmatige wijze, zoals zichtbaar is voor drie kombergingsgebieden in Figuur C-. 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 als er van bovenaf op wordt gekeken: het geulenstelsel (van Veen, 1950). Dit geldt overigens voor het kombergingsgebied van het Vlie veel duidelijker dan voor het Marsdiep, waar de grote arealen sublitoraal het vertakkende geulenpatroon deels verhullen (Figuur C-1).



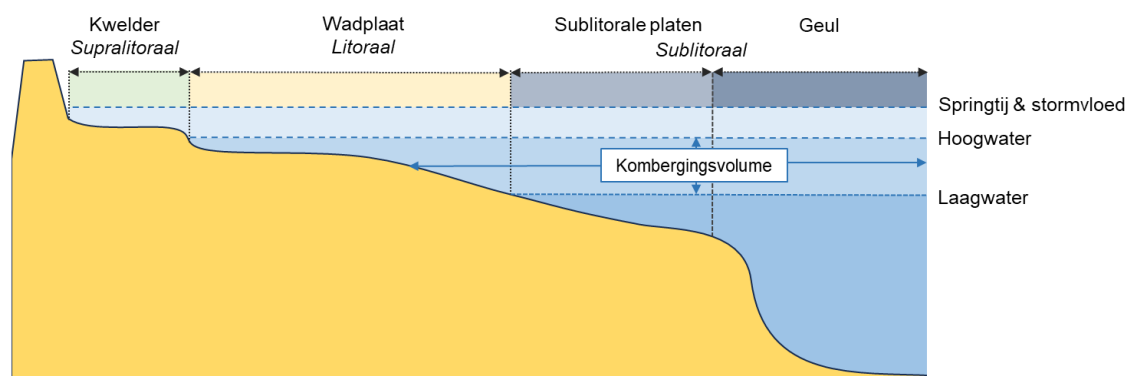
Figuur C-1 Dieptecontouren van de NAP -5 en -2 m diepte in de Westelijke Waddenzee (kombergingsgebieden Marsdiep, Eierlandse gat en een groot deel van het Vlie).

De hoeveelheid water die per getij door een geul stroomt wordt ruwweg¹² bepaald door de oppervlakte van het kombergingsgebied vermenigvuldigd met het getijverschil, minus de oppervlakte van de droogvallende platen, vermenigvuldigd met de hoogteligging van de platen (Figuur C-2). Minder getijvolume betekent dat de natte doorsnede van de geul ook minder groot hoeft te zijn. De geuldoorsneden vanaf de keel van het zeegat tot achterin het kombergingsgebied laten een steeds kleinere geulomvang zien. Door het zeegat gaat het volledige kombergingsvolume van het bekken, terwijl de kleine geul achterin het bekken alleen

¹² 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).

het lokale kombergingsgebied bedient, waar het watervolume dat wordt geborgen veel kleiner is. 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.

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



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

C.1.1 Andere stromingspatronen

Stroming heeft ook andere oorzaken, waaronder de verhoging van de waterstand door stormvloed en golfgedreven stromingen. Die invloed kan belangrijk zijn. Wanneer 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 er een stroming van het kombergingsgebied Marsdiep naar het kombergingsgebied Vlie op gang.

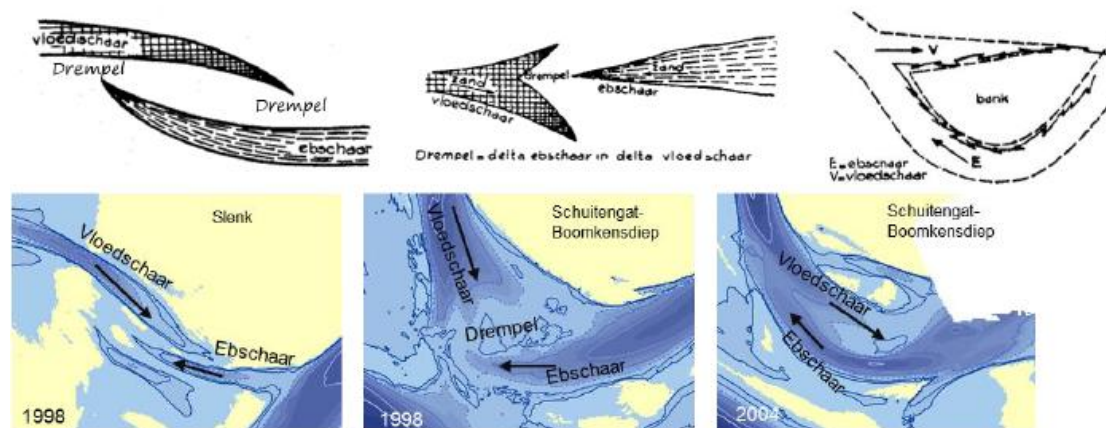
Ook de uitstroom van zoet water brengt stromingen op gang, in het bijzonder de estuariene circulatie. Het zoete water is lichter en stroomt over het zoute water van de Waddenzee heen. Dit wordt aan de bodem gecompenseerd door een stroming de andere kant op. Dit is een fenomeen dat bij de spuisluizen in de Afsluitdijk regelmatig kan ontstaan en invloed heeft op de stroming tot in het Marsdiep (Buijsman & Ridderinkhof, 2007) en bij Harlingen (Schultz & Gerkema, 2018).

C.2 Kenmerkende geulvormen en -dynamiek

C.2.1 Eb- en vloedscharen

Van Veen (1950) heeft deze kenmerkende geulpatronen in getijdegebieden beschreven. Eb- en vloedscharen zijn geulen die eruit zien alsof ze 'uit de bocht' geschoten zijn en die eindigen in een ondiepte of drempel (Figuur C-3). Een vloedschaar is georiënteerd in de richting van de vloedstroom, van het zeegat naar het kombergingsgebied. Een ebschaar heeft de omgekeerde oriëntatie. De aanwezigheid van de drempel aan het einde van de schaar betekent dat er geen directe aansluiting op de rest van de geul mogelijk is. Het resultaat daarvan is dat geulen opsplitsen.

Dit resulteert in het door van Veen beschreven systeem van elkaar vermijdende eb- en vloedscharen. Eb- en vloedscharen komen voor in verschillende karakteristieke vormen die zijn getoond in Figuur C-3. Deze patronen kunnen worden herkend in de opeenvolgende kaarten met bodemligging uit het aandachtsgebied.



Figuur C-3 Boven: eb- en vloedchaar configuraties volgens van Veen (1950). Links: 'flankaanval'; midden: 'vorkvorming'; rechts: 'zandneren', met zandbeweging in de vloedchaar stroomopwaarts, stroomafwaarts in de ebschaar. Onder: vergelijking met de schematische configuraties van van Veen. Links: Slenk in 1988 met 'flankaanval'; midden: 'vorkvorming' op de drempel van Boomkensdiep en Schuitengat in 1998; rechts: de structuur van 'zandneren' op dezelfde drempel in 2004.

D Overzicht kwelders

Tabel D-1 Overzicht van de kwelders van kombergingsgebied 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
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, vegetatie vooroever, CO ₂ vastlegging, recreatieve benutting	It Fryske Gea
Griend					
Griend	22,5	Spontane ontwikkeling in de luwte van Griend	Diverse beheeringrepen om Griend te behouden; betredings-regulering	Hoogwatervluchtplaats en deels broedgebied: geleidelijke overgang naar duinen	Natuur-monumenten
Terschelling					
Kwelders Noords-vaarder	10 – 20	Spontane ontwikkeling op strandvlakte	Regulering recreatie en gemotoriseerd verkeer	Vegetatie, landschap, hoogwatervluchtplaats; foerageer- en broedgebied vogels	Staatsbos-beheer
West Terschelling haven de Kom	0,1		Spontane ontwikkeling/ erosie	Landschap, vegetatie	Gemeente Terschelling
Kwelder NO zijde haven Terschelling (Dellewal)	Ca 1	Oude vastelandskwelde r, geërodeerd	Spontane ontwikkeling kwelderrand en deels kleidepot	Landschap, vegetatie	Gemeente Terschelling
Kwelders nabij Seerijp	10 – 15	Oude landaanwinning	Spontane ontwikkeling	Hoogwatervluchtplaats; foerageer- en broedgebied vogels, vegetatie, landschap	Rijkswater-staat
Kwelder landerum 't Sehaal	Ca 1?	Oude kwelder met bescherming van strekdam, erosie	Spontane ontwikkeling/ erosie	Hoogwatervluchtplaats, landschap	Rijkswater-staat?
Kwelder zuid van Formerum; de Kaeg	1 – 2?	Oude kwelder met strekdam; erosie	Beweiding	Hoogwatervluchtplaats, landschap	Rijkswater-staat
Kwelder zuid van Lies; de Ans	0,5?	Oude kwelder met stenen dammen; erosie	Spontane ontwikkeling, deels afgegraven	Foerageergebied, landschap	Rijkswater-staat?

Kwelders zuid van Oosterend	2 – 3?	Oude kwelder, erosie	Beweiding	Vegetatie, landschap	Rijkswater- staat
Kwelders oost van Oosterend: de Grie	Ca. 40	Oude kwelder, beschermd door stenen dam	Beweiding, maaien	Landschap, vegetatie, hoogwatervluchtplaats, foerageer- en broedgebied vogels.	Staatsbos- beheer ca. 60%, particulier ca. 40%
De Groede kwelders Oost van Oosterend	420 – 430	Spontane ontwikkeling	Beweiding 380 ha, spontane ontwikkeling ca 40 – 50 ha	Hoogwatervluchtplaats, foerageer- en broedgebied vogels. Vegetatie en landschap	Staatsbos- beheer
Totaal Vlie	553				

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

Deltares

www.deltares.nl