

Morfologische ontwikkeling van het Eierlandse Gat



Morfologische ontwikkeling van het Eierlandse Gat

Auteur(s)
Edwin Elias

Morfologische ontwikkeling van het Eierlandse Gat

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Dr. L.B. Brakenhoff
Referenties	-
Trefwoorden	Morfodynamiek, Waddenzee, Eierlandse Gat, sedimentbalans

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	7-3-2023
Projectnummer	11208035-004
Document ID	11208035-004-ZKS-0004
Pagina's	77
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Edwin Elias	

Samenvatting

Het onderzoeksprogramma Kennis Primaire Processen Beheer & Onderhoud Kust (KPP B&O Kust) ondersteunt Rijkswaterstaat bij het onderhoud en beheer van de kust. Om de eilandkusten langs zeegatsystemen zowel op de korte termijn te kunnen handhaven als op de lange termijn te laten meegroeien met zeespiegelstijging, is begrip van het morfologische systeem en de sedimentuitwisselingen tussen kust, zeegat en bekken belangrijk. In deze studie is de grootschalige morfodynamiek van het Eierlandse Gat bestudeerd.

Het Eierlandse Gat is gelegen in de Westelijke Waddenzee en ligt ingeklemd tussen de eilanden Texel en Vlieland. Menselijk ingrepen speelt al een lange tijd een grote rol in het Eierlandse Gat. Door aanleg van bolwerken (1948 en 1958) is de noordwestpunt van Texel, en daarmee ook de ligging van het Eierlandse Gat, vastgelegd en heeft het huidige zeegat zich gevormd. De meest recente ingreep betreft de aanleg van de Eierlandse dam in 1995. Naast de vorming van een breed strand om de dam heen, heeft de dam ook de morfodynamiek van de buitendelta (tijdelijk) verstoord.

Ondanks dat het Eierlandse Gat het kleinste zeegat van de Westelijke Waddenzee is, is het morfologische gedrag complex. Door de aanwezigheid van twee uitstroomgeulen is er een verschil in gedrag tussen het zuidelijke en het noordelijke deel van de buitendelta te onderscheiden. Het Robbengat domineert de ontwikkeling van het zuidelijke deel. Er zijn hier perioden aanwezig waarin het Robbengat een enkele hoofduitstroming heeft, perioden met meerdere kleine uitstroomgeulen en perioden waarin juist ebschaar- en ebschildsystemen voorkomen. Een duidelijke periodiciteit of voorspelbaarheid is hierin niet te onderscheiden. Een periodieke ontwikkeling treedt wel op in het noordelijke deel van de buitendelta dat onder invloed staat van het Engelsmangat. Het Engelsmangat en de bijbehorende banken vertonen een periodieke ontwikkeling, waarbij de geul roteert van een westelijke naar een noordwestelijke uitstroomrichting en er een grote aanlandingsbank wordt gevormd die verheelt met de Vliehors. Deze ontwikkeling herhaalt zich om de 15 tot 25 jaar. De aanleg van de Eierlandse dam heeft het aanlandingsproces tijdelijk verstoord. Gedurende een periode van 20 jaar vormde zich geen nieuwe aanlandingsbank meer. Zo'n aanlandingsbank is in de meest recente bodemdata echter weer terug te zien, dit laat zien dat de natuurlijke dynamiek zich heeft hersteld.

Het aanlanden van banken speelt een belangrijke rol in de uitwisseling van zand tussen het zeegat en het eiland. Een sedimentbalans opgesteld over de periode 1987-2017 laat zien dat zowel de buitendelta als het bekken sediment verliezen. Het verlies van de buitendelta bedraagt 7 miljoen m³ en dat van het bekken 10 miljoen m³. Dit verlies is nagenoeg gelijk aan de toename in sedimentvolume van de aanliggende eilandenkop en - staart; Eierland neemt met 2 miljoen m³ in volume toe, de Vliehors met 12 miljoen m³. De totale volumebalans van zeegat en eilanden is hiermee vrijwel sluitend.

	Samenvatting	4
	Introductie 7	
1.1	Aanleiding tot onderzoek	7
1.2	Probleemstelling en doelstelling	7
1.3	Opbouw van het onderzoek	8
1.4	Opbouw van deze rapportage	9
2	Een overzicht van het Eierlandse Gat	10
2.1	De huidige ligging van de dominante geulen en platen	10
2.2	Debieten door het zeegat	12
2.3	Golven	14
2.4	Een overzicht van ingrepen	15
2.4.1	Afsluiting van de Zuiderzee	15
2.4.2	Kustverdediging	16
2.4.3	Baggeren, storten en zandsuppleties	20
3	Beschikbare bodemdata	21
3.1	Hydrografische kaarten	21
3.2	Vaklodingen	22
3.3	Kustmetingen (Jarkus en LiDAR)	26
4	Morfologische ontwikkelingen van het Eierlandse Gat	27
4.1	Morfologische ontwikkeling tot de afsluiting van de Zuiderzee (1796-1934)	27
4.2	Na afsluiting van de Zuiderzee	32
5	Volumeveranderingen	37
5.1	Grootschalige, lange-termijn sedimentvolumes	37
5.2	Volumeontwikkeling sinds 1987	39
5.2.1	Methode	39
5.2.2	Resultaten	43
5.2.2.1	Uitwisseling tussen bekken en buitendelta	43
5.2.2.2	Buitendelta	47
6	Samenvatting; Een conceptueel model voor het Eierlandse Gat	49
6.1	Een schaalcascade model van het Eierlandse Gat	49
6.2	Een weergave van het middellange termijn gedrag van de buitendelta	51
7	Conclusies	55
8	Referenties	56
A	Appendix H1	58

A.1	Debietmetingen	58
A.2	Kustverdediging Eyerland	60
B	Bodemdata	62
B.1	Historische kaarten	62
B.2	Vaklodingen	67
C	Sediment volumes	73
C.1	Actieve volumina	75

Introductie

1.1 Aanleiding tot onderzoek

Het onderzoek in het programma *Kennis Primaire Processen Beheer & Onderhoud Kust* (KPP B&O Kust) ondersteunt Rijkswaterstaat bij het onderhoud en beheer van de kust. Sinds 1990 is het kustbeheer gericht op dynamisch handhaven van de kustlijn (Rijkswaterstaat, 1990; Hillen & de Haan 1993; Hillen & Roelse, 1995; de Ruig, 1998). Met name bij de zeegaten treden structurele zandverliezen en erosieproblemen op. Het beter begrijpen van het morfologische systeem en de sedimentuitwisselingen tussen kust, zeegat en bekken is een belangrijk doel van het deelproject Zeegaten. Met de systeemkennis over de werking van zeegatsystemen wordt het beheer van en onderhoud aan eilandkoppen ondersteund.

In de afgelopen jaren is er veel inzicht verkregen in de werking en ontwikkeling van de Nederlandse zeegaten. Er is meer begrip van de veranderingen die opgetreden zijn in de zeegaten en hoe het systeem grootschalig functioneert (zie bijv. Elias et al. 2012, 2016; Elias, 2018) en er is kennis gegenereerd over het functioneren van de zeegaten in samenhang met het dynamisch kustbeheer (Elias en van der Spek, 2017). De analyses uitgevoerd bij Ameland en het Friesche Zeegat geven een uniek beeld van de vorming en ontwikkeling van “sediment bypassing banken” in buitendelta-systemen (Elias et al. 2019; Elias en Oost, 2021). De aanlanding van deze banken zorgt dan voor een sterke uitbouw van de kust terwijl er juist voor en na aanlanding langdurige erosie optreedt. Dergelijke inzichten maken het mogelijk steeds beter de samenhang tussen grootschalige processen en de, vaak lokale, kusterosie te begrijpen. Ook geeft deze kennis richting aan toekomstig onderzoek naar systeem- of buitendelta-suppleties.

1.2 Probleemstelling en doelstelling

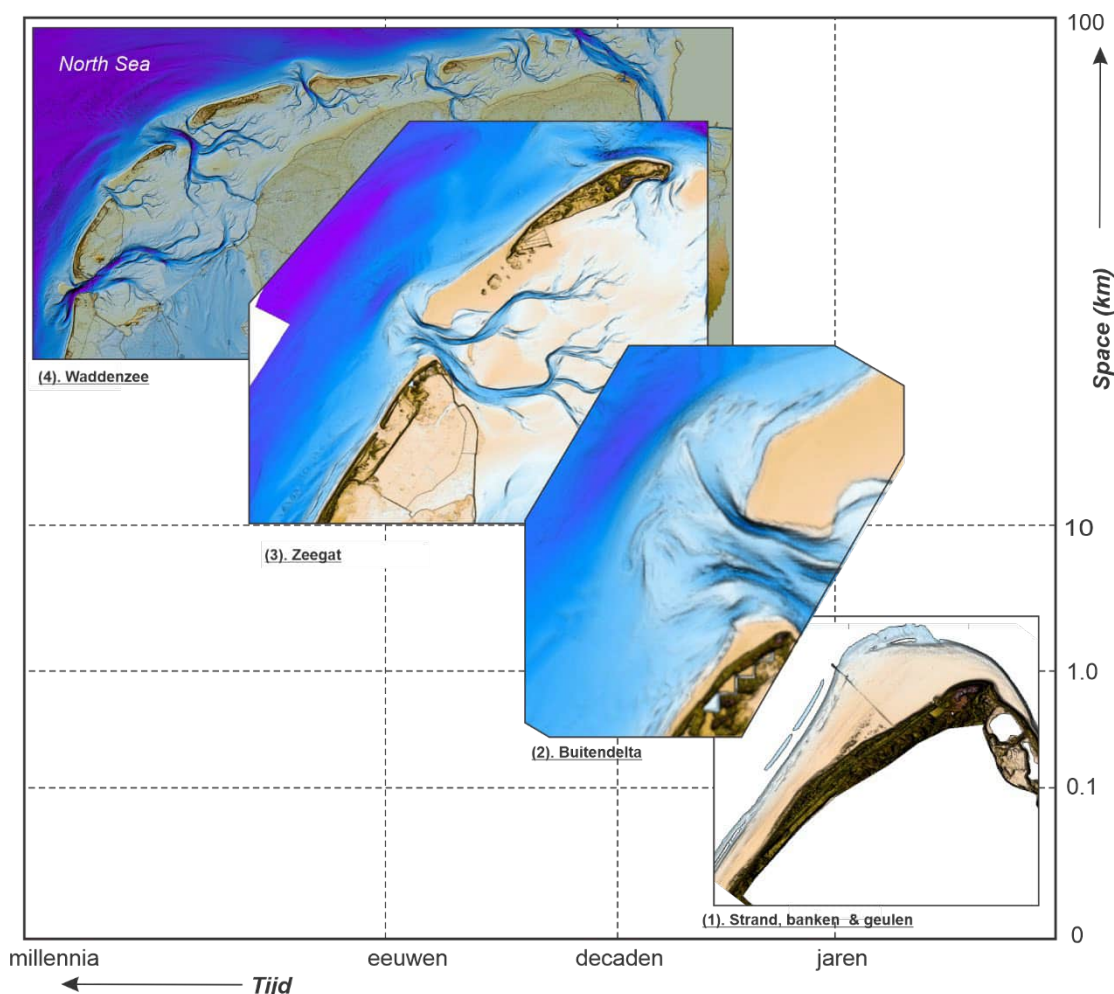
In het Zeegat van het Eierland spelen vraagstukken met betrekking tot de handhaving van de aanliggende kustlijn van Texel. De gehele eilandkop van Texel (Eierland) was aan kusterosie onderhevig. In het verleden leidde dit tot de aanleg van harde kustverdedigingsmaatregelen, zoals de aanleg van de Bolwerken en de Eierlandse dam. Deze maatregelen hebben ervoor gezorgd dat de noordzijde van het eiland stabiel ligt, maar aan de zuidzijde van de Eierlandse dam zijn nog frequent terugkerende zandsuppleties nodig om de kustlijn te handhaven.

Kusterosie speelt eigenlijk geen rol aan de zuidzijde van Vlieland. Hier heeft zich een grote strandvlakte, de Vliehors, gevormd. Met enige regelmaat landen hier banken aan vanaf de buitendelta van het Eierlandse gat. Een deel van dit sediment wordt langs het eiland in noordelijke richting afgevoerd en draagt daar bij aan de instandhouding van de kust van Vlieland en de ontwikkeling van het zeegat van het Vlie. Een goed inzicht in deze sedimentstromen is belangrijk voor het kustbeheer van het gehele eiland. Daarnaast is het belangrijk de ontwikkeling van de geulen van het Eierlandse Gat goed te begrijpen. De hoofdgeul in het zeegat grenst direct aan de bolwerken. Een verdieping of verplaatsing van deze geul zou de stabiliteit van de kustverdediging kunnen beïnvloeden.

Het uitgevoerde onderzoek is niet direct gekoppeld aan een directe behevraag of probleem in het interessegebied, maar heeft als doel de morfologische kennis van het Eierlandse Gat te vergroten zodat Rijkswaterstaat ook in de toekomst het kustbeheer hier efficiënt kan uitvoeren.

1.3 Opbouw van het onderzoek

Als kapstok voor het onderzoek wordt het schaalcascade concept toegepast (Figuur 2-1) om de morfologische veranderingen op verschillende tijd- en ruimteschalen gestructureerd te beschrijven (Cowell et al., 2003a,b). Afhankelijk van het morfologische systeem en het doel van de analyse kan de schaalcascade uit verschillende elementen of niveaus van aggregatie bestaan. Synoniem aan de schaalcascade modellen van het Amelander Zeegat (Elias et al., 2019), Friesche Zeegat (Elias en Oost, 2021) en het Zeegat van het Vlie (Elias, 2021), wordt het zeegat opgedeeld in 4 niveaus van aggregatie. Op het grootste schaalniveau **(4), de Waddenzee**, wordt de samenhang van het Eierlandse Gat met de omliggende zeegaten beschouwd. De vraag die hier beantwoord moet worden is of er grootschalige ontwikkelingen zijn opgetreden die de ontwikkeling van het zeegat hebben beïnvloed en of deze nog steeds een invloed hebben. Een voorbeeld hiervan is de verandering in getijbeweging in de westelijke Waddenzee door de aanleg van de Afsluitdijk. Dit deel van het onderzoek is gebaseerd op literatuur.



Figuur 2-1: Opbouw van het onderzoek door middel van een schaalcascade van het Eierlandse Gat.

Op het niveau van **het zeegat (3)** wordt gekeken naar de samenhang tussen bekken en zeegat. De eilandkusten, de buitendelta, de keel van het zeegat en het bekken vormen een zanddelend systeem. Ze bewegen gezamenlijk naar een morfodynamisch evenwicht dat correspondeert met de hydrodynamische condities. Een verstoring in één element veroorzaakt ook veranderingen in de andere elementen. Dat kan tijdelijk het morfologische gedrag dicteren. Ook op dit schaalniveau spelen effecten zoals de afsluiting van de Zuiderzee een belangrijke rol, maar ook de natuurlijke geuldynamiek van het bekken.

Het bekken kan de processen op het niveau van **de buitendelta (2)** beïnvloeden. De buitendelta vormt een transportband van het sediment van het bovenstroomse eiland (Texel) naar het benedenstroomse eiland (Vlieland). Dit proces wordt ook wel sediment bypassing genoemd. Veranderingen in de geulen of de verhouding tussen getij- en golfenergie op de buitendelta kan ervoor zorgen dat de sediment-bypassing processen veranderen. De ‘voltooiing’ van sediment bypassing over de buitendelta gaat vaak gepaard met de vorming en migratie van banken op de buitendelta die uiteindelijk verhelen met het benedenstroomse eiland en hierdoor voor een belangrijk deel de kustlijnontwikkeling van de aanliggende eilanden bepalen (uitwisseling met schaalniveau 1). De focus bij **schaalniveau 1, individuele banken, geulen en stranden**, ligt in deze studie op de ontwikkeling van de aangrenzende eilandkop en -staart. Voor Eierland is dit morfologische ontwikkeling van de kust na aanleg van de Eierlandse dam en voor Vlieland ligt de nadruk op de ontwikkeling van de Vliehors en de rol van de bankaanlandingen.

1.4 Opbouw van deze rapportage

Hierna volgen zes inhoudelijke hoofdstukken. Hoofdstuk 2 geeft een beknopte beschrijving van de kenmerken van het Eierlandse Gat. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de beschikbare bodemdata en een overzicht van de ingrepen die in het zeegat zijn uitgevoerd. De kern van deze studie (Hoofdstuk 4) bestaat uit een uitgebreide (her)analyse van de beschikbare bodemdata. De beschrijving van de morfologische ontwikkelingen voor afsluiting van de Zuiderzee is gebaseerd op de hydrografische kaarten. Analyses van het gedrag na afsluiting zijn gebaseerd op hydrografische kaarten (tot 1987), Vaklodingen (1926-2020) en Jarkusmetingen. Hoofdstuk 5 behandelt de volumeveranderingen van de buitendelta en het bekken met een focus op de periode 1987-2020. De verkregen inzichten vormen de basis voor de samenvatting in de vorm van conceptuele modellen van het morfologisch gedrag in Hoofdstuk 6. De conclusies worden weergegeven in Hoofdstuk 7.

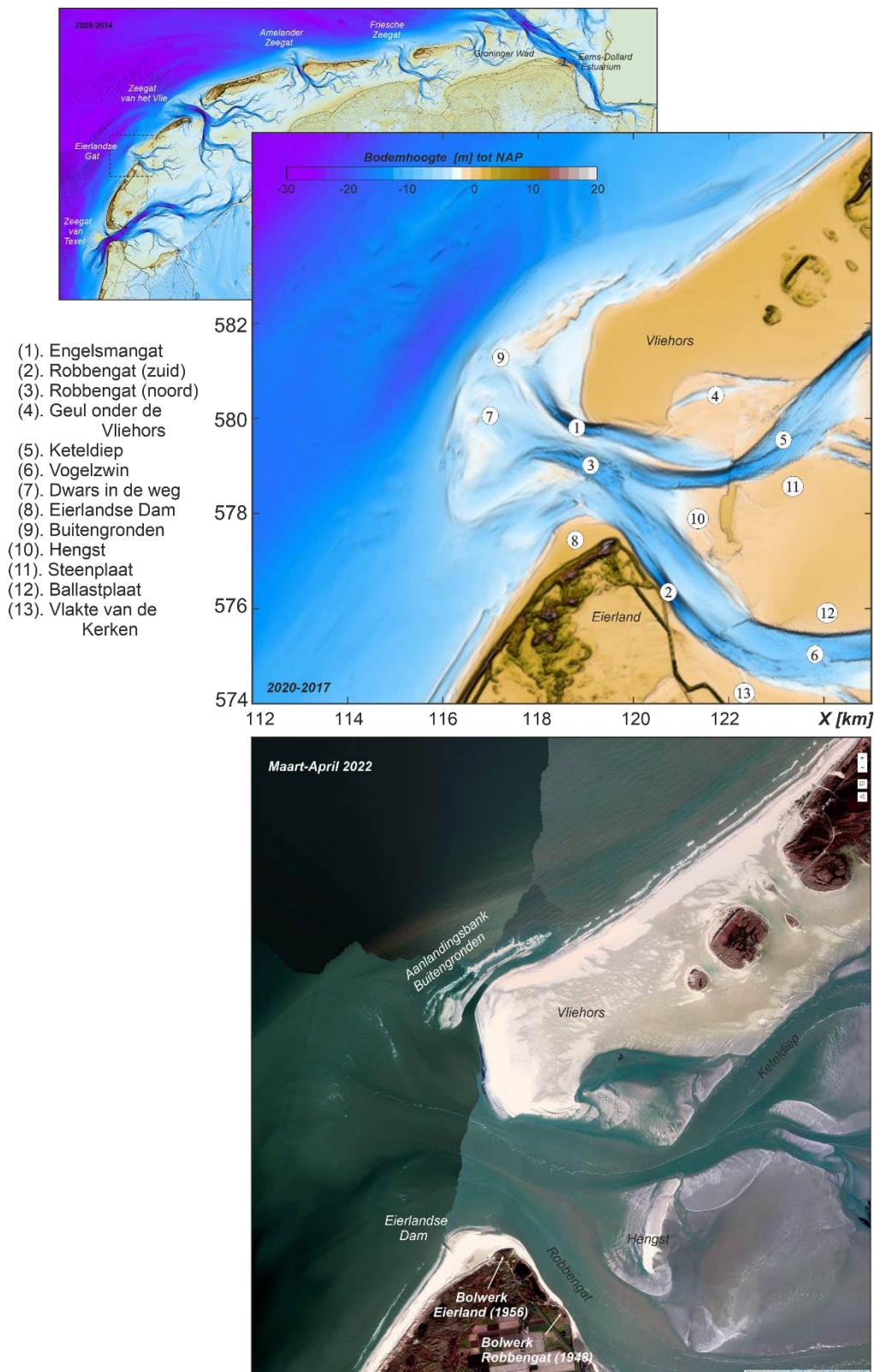
2 Een overzicht van het Eierlandse Gat

2.1 De huidige ligging van de dominante geulen en platen

Het Eierlandse Gat is vanuit het westen gerekend, het tweede zeegat in de Waddenzee. Het zeegat ligt ingeklemd tussen de eilanden Texel en Vlieland (Figuur 2-1). De buitendelta heeft een omvang van ongeveer 4,5 km in zeewaartse richting en 9 km in langs richting.

In het bekken is geen duidelijke, vaste begrenzing (zoals bijv. dijken of een duidelijk wantij) aanwezig. De begrenzing tussen het bekken van het Eierlandse Gat en de aangrenzende bekkens van het Zeegat van Texel en het Zeegat van het Vlie worden gevormd door ondiepere platen. Het bekken wordt verder gekenmerkt door twee hoofdgeulen met een zuidelijke tak (Vogelzwin) en een noordelijke tak (Keteldiep). In de keel van het Zeegat komen deze twee geulen samen en vormen verschillende uitstroomgeulen de buitendelta op. De uitstroom van het Vogelzwin heet Robbengat. Deze geul heeft zich diep (tot 17 m diepte) uitgeschuurd langs de eilandkop van Texel (Eierland). In het Robbengat bevindt zich een langgerekte drempel, waardoor er een tweedeling in de geul optreedt. Er is een dieper geulgedeelte dat zich direct langs de kust uitstrekt en een diepere geul langs de wadplaat Hengst-Ballastplaat. Het Robbengat grenst direct aan verschillende harde verdedigingswerken, de bolwerken, die hier in de jaren vijftig en zestig zijn aangelegd om de kust te beschermen. Op de buitendelta zijn twee uitstroomgeulen van het Robbengat te onderscheiden. Een ondiepe geul (max. diepte van 7,5 m t.o.v. NAP) die zich om de Eierlandse Dam heeft gevormd en een diepere uitstroomgeul centraal gelegen op de buitendelta. De 800m lange Eierlandse Dam is in 1995 aangelegd en heeft ervoor gezorgd dat er zich een breed strand aan de noordwestpunt van Texel heeft gevormd.

De diepere, centraal gelegen uitstroomgeul (in deze studie Robbengat Noord genoemd) bevindt zich centraal op de buitendelta met een maximale diepte van 12 m. Het bankencomplex Dwars in de Weg vormt een scheiding tussen het Robbengat Noord en het Engelsmangat. Een derde geul, het Keteldiep, bevindt zich ten oosten van deze bank. In de huidige bodem lijkt het Keteldiep een verbinding te vormen met het Robbengat en niet direct met het Engelsmangat. Het Engelsmangat heeft zich om de Vliehors heen gekromd en heeft een maximale diepte van 16 m t.o.v. NAP. Ten noorden van de geul bevindt zich een ondiep bankencomplex de Eierlandse Gronden, ook wel Buitengronden genoemd, waarop zich een grote aanlandingsbank heeft gevormd. De 2022 satellietopname laat zien dat deze aanlandingsbank de Vliehors dicht is genaderd. Aan de zuidzijde van de Vliehors zijn nog net de restanten van de Geul onder de Vliehors te zien. Deze geul is in de 2020 opname bijna verdwenen.

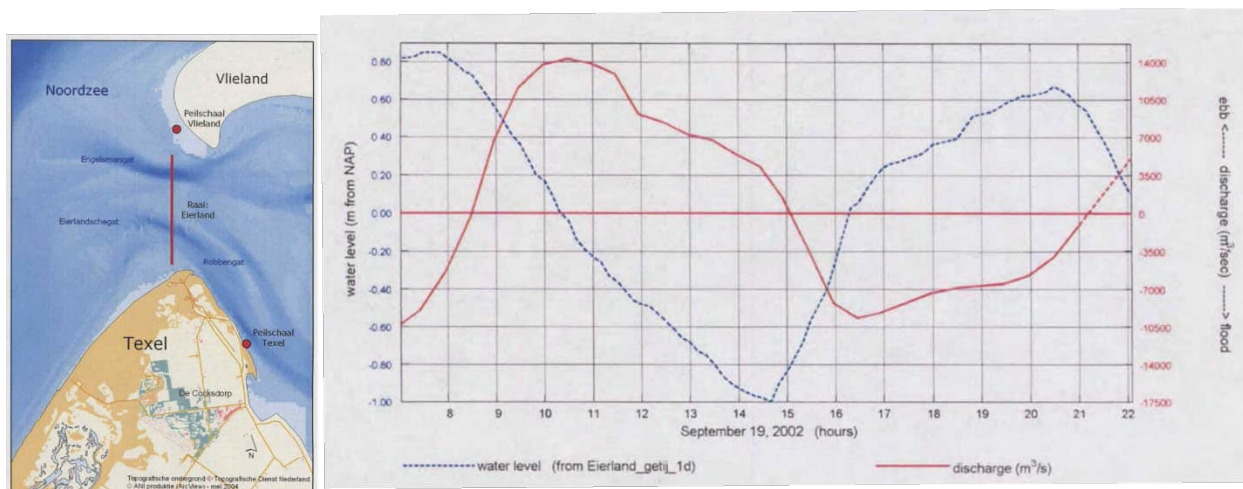


Figuur 2-1 (boven): Een overzicht van de Nederlandse Waddenzee met, van links naar rechts, de vijf grote zeegaten (Zeegat van Texel, Eierlandse Gat, Zeegat van het Vlie, Amelander Zeegat en Friesche Zeegat), de kleinere zeegaten van het Groninger Wad en het Eems-Dollard estuarium. Midden: een uitsnede van het Eierlandse Gat met ligging van de geulen en platen op basis van de gecombineerde 2020 (buitenzijde) en 2017 (bekken) bodemopname van het bekken. Onder: een recente satellietopname van het Eierlandse gat uit maart-april 2022 (Bron: <https://www.satellietdataportaal.nl>).

2.2 Debieten door het zeegat

Recentelijk, sinds 2002, zijn er geen debietmetingen meer uitgevoerd, maar in het verleden hebben wel meerdere metingen plaatsgevonden. Een overzicht van de oudere metingen (1948-1980) wordt gegeven in Rakhorst (1981) en samengevat in Appendix A, Figuur A- 2. In deze periode zijn 8 metingen van het gehele Eierlandse Gat uitgevoerd. Rakhorst concludeert dat onder normale omstandigheden bij gemiddeld getij het vloeddebiet 175 miljoen m³ en het ebdebiet 145 miljoen m³ bedraagt. Door springtij en tijdens stormen kunnen de debieten echter sterk toenemen. Een maximaal vloeddebiet van 235 - 260 miljoen m³ werd gemeten tijdens een sterke noordenwind en springtij.

De twee meest recente metingen uitgevoerd in 1996 en 2002 worden beschreven in Straatman (1997) en Rab et al. (2004). De 1996 meting is uitgevoerd naar aanleiding van de bouw van de Eierlandse Dam. De meting werd uitgevoerd op 21 en 22 mei. De windsnelheid lag bij aanvang rond de 3-6 m/s uit het westen, maar nam toe tot 4-9 m/s uit het zuidwesten. Het gemeten residueel debiet is vloeddominant: het ebdebiet bedraagt 227 miljoen m³ en het vloeddebiet 242 miljoen m³.



Figuur 2-2: Gemeten debiet en waterstand in het Eierlandse Gat op basis van de 2002 meting (bron: Rab et al. 2004).

De meest recente debietmeting werd in 2002 uitgevoerd door Rijkswaterstaat (Rab et al., 2004). Deze meting werd gedaan in een periode van zwakke, veranderlijke wind en geen deining of golven, waardoor deze representatief is voor het getij. Het gemeten residueel debiet is ebdominant: het ebdebiet bedraagt 205,5 miljoen m³ en het vloeddebiet 137,8 miljoen m³ (Figuur 2-2). De maximale vloeddebieten bedragen respectievelijk 10.261 en 9689 m³/s. Het maximale ebdebiet bedraagt 14.273 m³/s. In werkelijkheid zijn beide debieten nog iets hoger. Het meetschip benadert de kusten van Eierland en de Vliehors wel zo dicht mogelijk, maar er blijft altijd een klein deel ongemeten. De bijdrage van dit ongemeten deel is waarschijnlijk beperkt en hiervoor zijn dan ook geen correcties uitgevoerd. Het doorstroomoppervlakte varieert van de 9812 m² bij een waterstand van -1 m NAP tot 15.494 m² bij een waterstand van +0,82 m NAP.

De gemeten maximale stroomsnelheden van 1,5 m/s in het Robbengat zijn hoger dan de 1,0 m/s geobserveerd in het Engelsmangat (Appendix A, Figuur A- 2). De gemeten stroomsnelheden lijken hoger dan in de 1996 meting. Tijdens eb wordt in het Robbengat een maximale uitstroming van 1,79 m/s geobserveerd, in het Eierlandse gat bedraagt dit 1,84 m/s. Tijdens vloed liggen de maximale instroomsnelheden in respectievelijk het Robbengat en Eierlandse gat op 1,33 m/s en 1,15 m/s.

In de rapportage van Rab et al. (2004) zijn de gemeten debieten omgerekend naar een gemiddeld getij en vergeleken met eerdere studies (samengevat in Tabel 2-1). Deze omrekening naar gemiddeld debiet gebeurt door de gemeten debieten te vermenigvuldigen met een correctiefactor gebaseerd op het gemiddelde getijverschil/getijverschil tijdens de meting. De residuele debieten vertonen een grote variatie in grootte en richting. Zelfs na berekening van de gemiddelde debieten blijft een directe vergelijking tussen deze metingen lastig (Rakhorst, 1981). De verschillende metingen zijn niet over identieke raaien uitgevoerd en de meteorologische condities tijdens uitvoering van de meting spelen ook een grote rol. Het merendeel van de metingen is vloeddominant met waarden tussen 5 - 52 miljoen m³. Rakhorst (1984) concludeert dat er gemiddeld een netto vloeddominant debiet van 30 miljoen m³ aanwezig is.

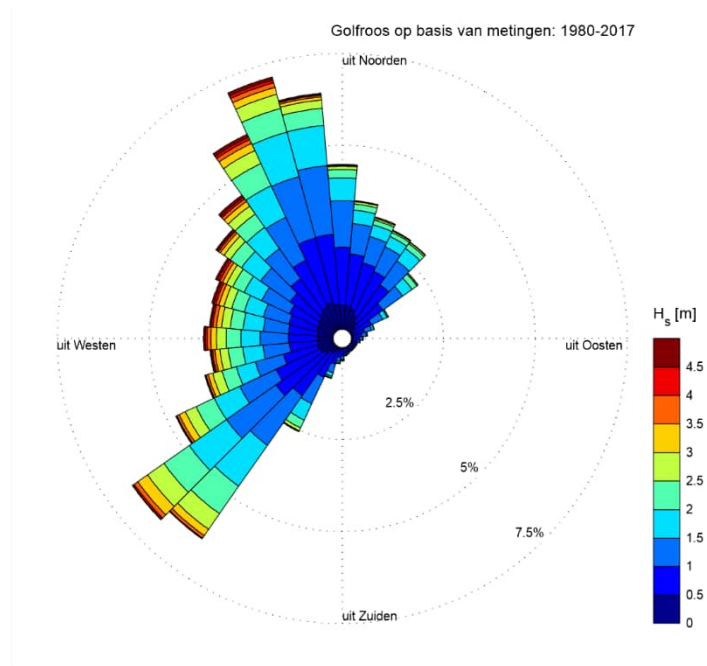
De 2002 meting is juist sterk ebdominant (-52 miljoen m³). Aangezien er in deze meting vrijwel geen invloed van de meteorologische omstandigheden aanwezig zou moeten zijn, zou deze meting in theorie het meest representatief voor getijstroming moeten zijn. Het verschil tussen de 1996 en 2002 meting zou mogelijk door wind verklaart kunnen worden. Tijdens de 1996 meting was er een west of zuidwestelijk wind tot 9 m/s aanwezig.

Tabel 2-1: Overzicht van historische en 2002 debietmetingen. Q_{meting} representeert de debieten direct berekend uit de meting en $Q_{gemiddeld}$ zijn omgerekend naar het gemiddelde getij. Een negatief residueel debiet is richting de Noordzee en een positief residueel debiet is richting de Waddenzee (vloeddominant).

Jaren		$Q_{meting} (10^6 m^3)$			$Q_{gemiddeld} (10^6 m^3)$	$Q_{residueel} (10^6 m^3)$
		Robbengat	Engelsmangat	Totaal		
1948 17-21 Juni	eb	72	35	107	-	-
	vloed	88	45	133	-	-
1953 24-26 Juni	eb	65,4	26,0	91,4	-	-
	vloed	52,1	47,7	99,8	-	-
1971 24-25 Maart	eb	88,2	62,5	150,7	-	-
	vloed	103,3	83,4	186,7	-	-
1971 8-9 Juni	eb	92,5/97,5	64,5/65,7	157,0/163,2	155,9	47,7
	vloed	97,0/100,0	69,0/70,0	166,0/170,0	203,6	-
1979 29-30 Maart	eb	144,6	106,0	250,6	207,1	-4,4
	vloed	130,8	110,0	240,8	202,7	-
1980 9 Sept.	eb	121,2	87,0	208,2	199,2	52,1
	vloed	147,6	113,1	260,7	251,3	-
1980 10 Sept	eb	110,4	95,4	205,8	198,6	14,2
	vloed	118,5	90,0	208,5	212,9	-
1996	eb	132	95	227,0	230,2	5,3
	vloed	135	107	242,0	235,5	-
2002	eb	-	-	205,5	201,2	-51,7
	vloed	-	-	137,8	149,4	-

2.3 Golven

Voor het zeegat, op een diepte van zo'n 26 m, is de Eierlandse Gat golfboei gelegen (x-km: 106514, y-km: 587985). Een analyse van de metingen over de periode 1980-2017 laat zien dat het golfklimaat gedomineerd wordt door 2 richtingen noord-noordwest en zuidwest (Figuur 2-3). Deze twee richtingen komen 81% van de tijd voor. Het golfklimaat is mild. Het merendeel van de golven (95%) heeft een significante golfhoogte van minder dan 3 m. De gemiddelde significante golfhoogte is 1.45 m. Tijdens (zware) stormen kunnen wel hogere golven (tot 8 m) worden geobserveerd. Significante golfperioden liggen tussen de 3 en 5 s (95% van de metingen). Tijdens gemiddelde storm condities ($H_{sig} = 2-3$ m) neemt de golfperiode toe tot ongeveer 5.5 s. Voor golven hoger dan 3 m neemt de periode toe tot 6.5 s. Deze golfperioden zijn representatief voor wind golven. Deiningsgolven met golfperioden hoger dan 9 s komen sporadisch voor (minder dan 1% van de metingen).

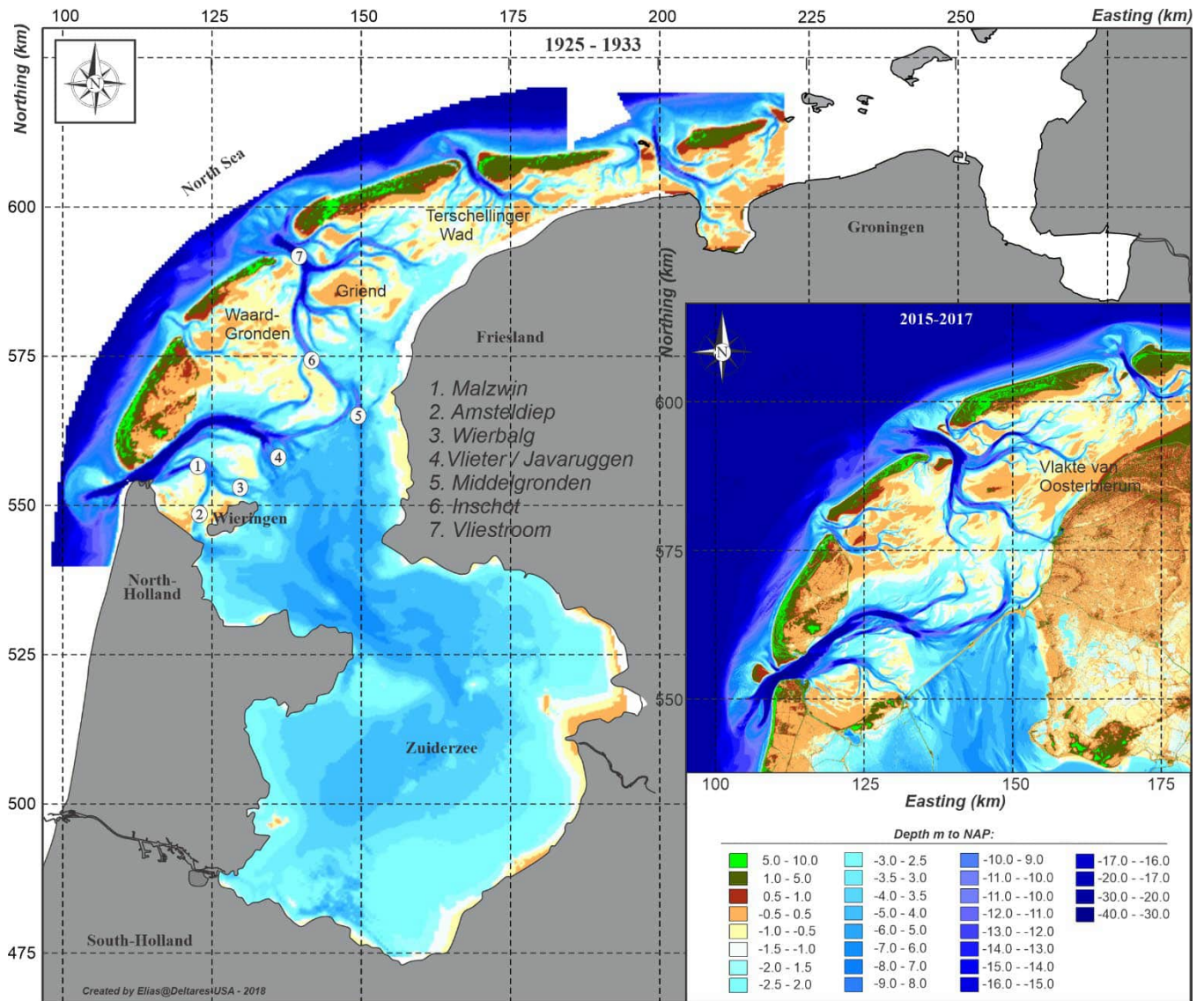


Figuur 2-3: Golfroos gebaseerd op data van meetstation Eierlandse Gat.

2.4 Een overzicht van ingrepen

2.4.1 Afsluiting van de Zuiderzee

Naast de directe ingrepen op de kop van Eierland moet ook de afsluiting van de Zuiderzee een effect op het Eierlandse Gat gehad hebben. De afsluiting van de Zuiderzee werd voltooid in 1932 (Thijssse, 1972). De afsluiting had een direct, zichtbaar effect op de geulen van het Zeegat van het Vlie en van het Zeegat van Texel. Deze zeegaten waren voor aanleg nog rechtstreeks verbonden met de Zuiderzee. Het Eierlandse Gat had niet zo'n directe verbinding. Ook voor afsluiting vormden de Waardgronden een duidelijke scheiding tussen het bekken van het Eierlandse Gat en de Westelijke Waddenzee.



Figuur 2-4: Representatieve bodems voor de Westelijke Waddenzee net voor de afsluiting van de Zuiderzee (1926, met data van 1925-1933) en voor de huidige situatie (bodemdata 2015-2017).

Vóór de afsluiting besloeg het gecombineerde bekken, Westelijke Waddenzee en de Zuiderzee, een oppervlak van rond de 4000 km² en een lengte van 130 km. De afsluiting reduceerde het bekkenoppervlak tot zo'n 1400 km². Het bekken van het Marsdiep is met 710 km² iets groter dan het bekken van het Vlie (660 km²). De ingrijpende reductie in bekkengrootte had tot gevolg dat de getijcharacteristieken in het overgebleven bekken (de Westelijke Waddenzee) sterk veranderden; van een lopende golf naar een meer stand

karakter, waardoor grote morfologische veranderingen optraden (Elias et al. 2003). Uitgebreide studies naar de effecten van de afsluiting op het Eierlandse Gat zijn niet uitgevoerd. Endema (1978) observeert dat omstreeks 1932 een verbreding van het zeegat optreedt van gemiddeld 2000 m vóór tot gemiddeld 3000 m ná 1932. Mogelijk is dit het gevolg van vergroting van het getijprisma door afsluiting van de Zuiderzee. Een vergelijking tussen de 1925-1933 en 2015-2017 bodemkaarten laat zien dat vooral het zuidelijke deel van de Waardgronden wat in omvang is afgenomen en in hoogte lijkt te zijn toegenomen (Figuur 2-4).

2.4.2 Kustverdediging

Verbinding Eierland en Texel

Rond Eierland vinden al eeuwen menselijke ingrepen plaats. Eierland is ontstaan in de 13^{de} eeuw. Voor die tijd vormde het nog onderdeel van Vlieland en lag er ongeveer ter hoogte van de huidige slufteer een geul (het Anegat) die Eierland en Texel van elkaar scheidde. Het ontstaan van het Eierlandse Gat aan het einde van de 13^{de} eeuw zorgde ervoor dat Eierland zich afsplitste van Vlieland en een eiland vormde. In 1625 werd het besluit genomen om een zanddijk tussen Texel en Eierland te creëren. In 1930 werd er een dichte zanddijk gevormd, nadat er in 1929 instuivingswerken waren aangebracht. Sindsdien vormt Eierland een onderdeel van Texel. Aan de oostzijde van Eierland hebben inpolderingen in (1835, 1846 en 1877) het huidige eiland gevormd.

Bolwerken Robbegat

Sinds 1809 heeft het Eierlandse Gat zich bijna 1 kilometer zuidwaarts verplaatst (Schoorl, 1999). Verdedigingswerken om de kustlijn van Eierland te behouden werden door het zuidwaarts verplaatsen van het Eierlandse Gat noodzakelijk. Een uitgebreide analyse van de erosieproblematiek van de kustlijn van Eierland en een uitwerking van mogelijk verdedigingswerken werd al in 1930 uitgevoerd (Rijkswaterstaat, 1930). Het interessante van deze studie is dat een gedetailleerde morfologische analyse werd uitgevoerd in combinatie met het ontwerpen van verschillende kustverdedigingsvarianten. Deze varianten waren o.a.:

1. Zanddijk met vaste punten (zie Appendix A, Figuur A- 3). De vaste punten zijn als strandhoofden ontworpen en zorgen ervoor dat de inscharing in de tussenliggende gebieden beperkt blijft. De kosten voor dit plan waren begroot op f. 645.000.
2. Zanddijk met strandhoofden (zie Appendix A, Figuur A- 4). Dit plan lijkt op de eerste variant maar met meer strandhoofden. De inscharing van de kust is hier veel kleiner. Het kostenplaatje werd geschat op f. 1.100.000.
3. Zanddijk met doorgaande bezinking (zie Appendix A, Figuur A- 5). In deze uitwerking wordt de gehele kustlijn voorzien van een bestorting. De kosten van deze variant werden begroot op f. 1.300.000.
4. Beteugelingsdam (zie Appendix A, Figuur A- 6). In deze uitwerking wordt een langere dam dwars op de kust aangelegd. Deze dam moet de stroming direct langs de kust verkleinen. Deze variant heeft een kostenschatting van f. 935.000.

De kosten van een natuurlijke afname van de kust worden geschat op f. 420.000. Uit economisch oogpunt werd hierbij geconcludeerd dat niet verdedigen de beste optie is. Doorgaande inscharing kan in de toekomst echter wel de achterliggende dijken bedreigen en grote investeringen zouden dan nodig zijn. De aanbeveling van de studie luidt dan ook te verdedigen met behulp van de zanddijk met vaste punten (variant 1).

In 1948 werd het bolwerk Robbengat geconstrueerd om de zuidwaartse verplaatsing van de geul Robbengat tegen te houden. Bolwerk Robbengat werd gevolgd door de aanleg van bolwerk Eierland in combinatie met enkele strekdammen in 1956. Deze verdedigingswerken houden de staart van het eiland vast en verhinderen een verdere zuidelijke verplaatsing van de geul Robbengat. Ook na aanleg van de Bolwerken gaat de kusterosie nog steeds door en

zijn er nog steeds aanvullende maatregelen nodig om de kust te behouden. Zo is in het oosten de geuldoorsnede van het Robbengat in 1984 en 1985 breder gemaakt om de erosieve druk van het Robbengat op de kust te verminderen. Ook zijn grote zandsuppleties van elk 2,5 à 3 miljoen m³ in 1979, 1985 en 1990 aangebracht. Rakhorst (1993) geeft aan dat er een aantal oorzaken voor de erosie van Eierland aan te wijzen zijn. Ten eerste speelt de geul Robbengat een belangrijke rol. Deze geul ligt direct langs de kust en neemt tijdens vloed veel sediment mee het bekken in. Tijdens eb stroomt dit sediment wel terug zeewaarts maar belandt dan op de buitendelta en niet terug op de kust. Een tweede oorzaak is de kromming van de kust van het eiland Texel. Deze kromming, bolle kust, zorgt voor gradiënten in de brandingstransporten. Een derde oorzaak is zandhonger van de Waddenzee door bijv. de inpolderingen (de Eierlandse Polder, 1835; polder Eendracht, 1846 en polder Het Noorden, 1876) en afsluiting van de Zuiderzee. Rakhorst (1993) geeft aan dat het getij en debiet door deze afsluiting zijn toegenomen. Hierdoor treedt erosie van de binnendelta en sedimentatie aan de buitenzijde op.

Eierlandse dam

In 1995 is de Eierlandse dam aangelegd (Figuur 2-5). De noordwestzijde van Eierland kende voor aanleg een structureel zandverlies van ruim 0,5 miljoen m³/jaar. Deze erosie moest gecompenseerd worden door periodiek uitgevoerde zandsuppleties, waaraan grote kosten (toen zo'n 5 miljoen gulden op jaarbasis) verbonden zijn. Een onderzoek naar een alternatieve kustverdediging zoals de aanleg van lange dammen, strandhoofden, golfbrekers, bodembescherming of door beïnvloeding van de morfologie (zoals geulverlegging), werd daarom uitgevoerd door Rijkswaterstaat (Rijkswaterstaat, 1993). Uit een drietal gelijkwaardige oplossingen is eind 1993 gekozen voor de aanleg van een dam met een lengte van ca. 800 m, welke aansluit op de duinvoetverdediging ten zuiden van het Bolwerk. Met aanleg van de dam werd een besparing in de kosten verwacht van 30 à 40% over een looptijd van 50 jaar ten opzichte van het normale suppleren.

Een eerste evaluatie van het effect van de Eierlandse Dam werd gerapporteerd in Rakhorst (1999). In deze studie wordt geconcludeerd, dat:

- De dam voldoet aan de verwachtingen. De zandverliezen zijn met 35% afgenomen van ruim 600.000 m³/jaar naar 400.000 m³/jaar.
- De kustboog ten zuiden van de dam ontwikkelt zich volgens de theoretische voorspelling.
- De sterke aanzanding van het gebied ten noorden van de dam tot de kop van Texel was niet voorzien.
- Het Robbengat is verdiept. Dit kan op termijn problemen geven bij de Bolwerken Robbengat en Eierland.
- De invloed van de dam op de morfologische ontwikkeling van het noordelijke gedeelte van de Buitendelta van het Eierlandse Gat en de kust van Vlieland is nog onbekend.

Naast de effecten van de dam op de morfologie wordt ook geconcludeerd dat er ook positieve effecten op de ecologie, recreatie en beleving zijn opgetreden. De nieuwe strandvlakte ten noorden van de dam lijkt een populaire locatie voor vogels en er vindt (beperkte) primaire duinvorming plaats op de strandvlakte ten zuiden van de dam. Deze duinvorming heeft zich ook recentelijk doorgezet. In 2021 is een nieuwe duinenrij ten zuiden van de dam te observeren (Figuur 2-6).

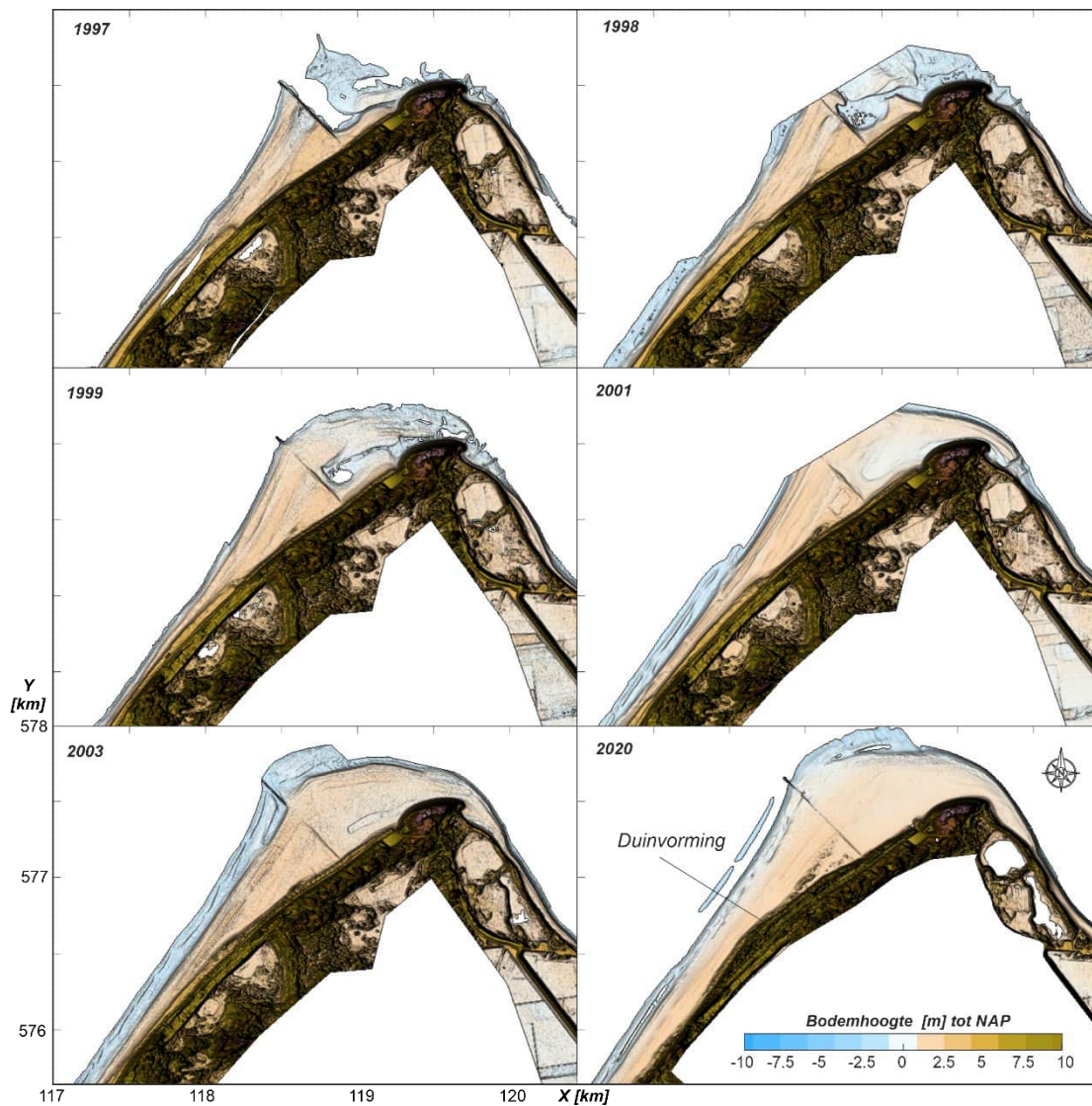
Een aanvullende evaluatie uitgevoerd door Kok (2005) geeft als conclusie:

“De effecten op de kustlijn en andere morfologische gevolgen van de aanleg van de Eierlandse dam zijn geëvalueerd, tien jaar na de aanleg in 1995. De dam heeft ruimschoots aan de doelstellingen voldaan: het te suppleren volume, noodzakelijk voor de handhaving van de basiskustlijn van de noordwestkust van Texel, is sterk afgenomen. Vermoedelijke negatieve effecten op de kust zijn beperkt gebleven tot het lokaal opschuiven van een

getijgeul richting kust ter hoogte van het Bolwerk "Robbengat" aan de noordoostzijde van Texel. Alhoewel de Eierlandse dam een goede en kostenefficiënte oplossing is gebleken voor de frequente kusterosie van de noordkust van Texel, kan hier niet uit geconcludeerd worden dat dwarsdammen in het algemeen een goede oplossing zijn voor eroderende kustgebieden. Lokale factoren als kustboog, kustprofiel, golfinvloed en getijsnelheden bepalen de werking, aanlegkosten en kosteneffectiviteit."



Figuur 2-5: overzicht ontwikkeling kop van Texel en Eierlandse dam. Foto's: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat.



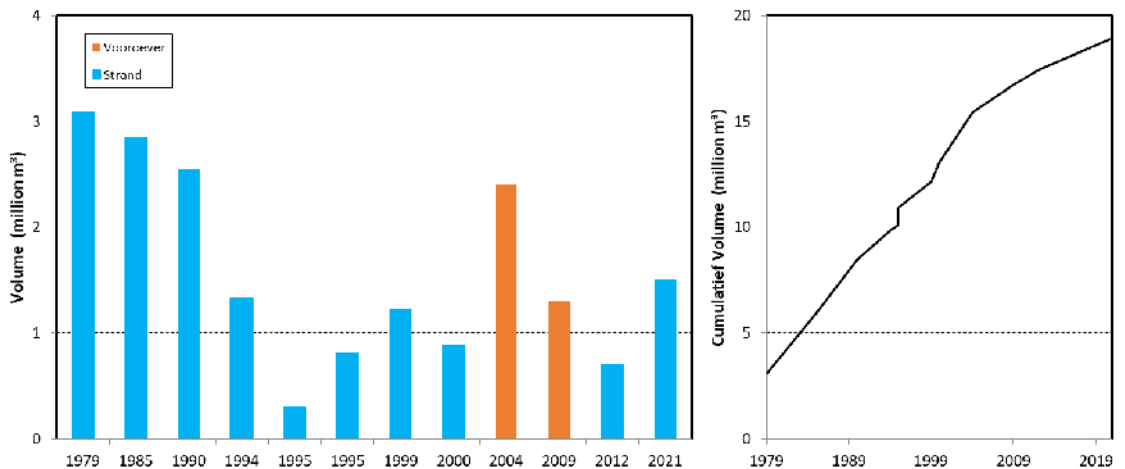
Figuur 2-6 Aanzanding bij de Eierlandse dam aan de hand van de LiDAR data voor de jaren 1997, 1998, 1999, 2001, 2003 en 2020.

2.4.3 Baggeren, storten en zandsuppleties

In totaal zijn er 11 suppleties uitgevoerd en is er 1 gepland voor de eilandkop van Texel ten noorden van de Slufter (Tabel 2-2 en Figuur 2-7). Het totale volume bedraagt hiervan 18,9 miljoen m³. Het gemiddelde suppletievolume voor aanleg van de Eierlandse Dam in 1995 bedraagt bijna 0,57 miljoen m³/jaar. Het suppletievolume sinds 1994 bedraagt 0,39 miljoen m³/jaar.

Tabel 2-2: Een overzicht van de uitgevoerde suppleties op Texel ten noorden van Slufter.

Locatie	Type	Begin jaar	Startraai [km]	Eindraai [km]	Lengte [m]	Suppleties [m ³]
Eierland	strandsuppletie	1979	25.60	31.20	5600	3.089.668
Eierland	strandsuppletie	1985	25.40	30.40	5000	2.849.721
Eierland	strandsuppletie	1990	25.60	30.61	5010	2.543.022
Eierland	strandsuppletie	1994	25.40	28.20	2800	1.331.225
Eierland	strandsuppletie	1995	30.00	30.60	600	300.000
Eierlandse dam	strandsuppletie	1995	28.20	29.60	1400	810.000
Eierland	strandsuppletie	1999	26.00	28.60	2600	1.219.174
Westkust (Eierland)	strandsuppletie	2000	25.50	27.80	2300	883.683
Eierland	voeroeversuppletie	2004	25.20	27.80	2600	2.401.361
Eierlandse dam (progr. 2008)	voeroeversuppletie	2009	26.00	28.80	2800	1.304.348
Texel Eijerlandse Dam	strandsuppletie	2012	27.80	30.01	2210	700.477
Texel noord	strandsuppletie	2021	25.60	28.20	2800	1.500.000
Totaal.						18.932.679

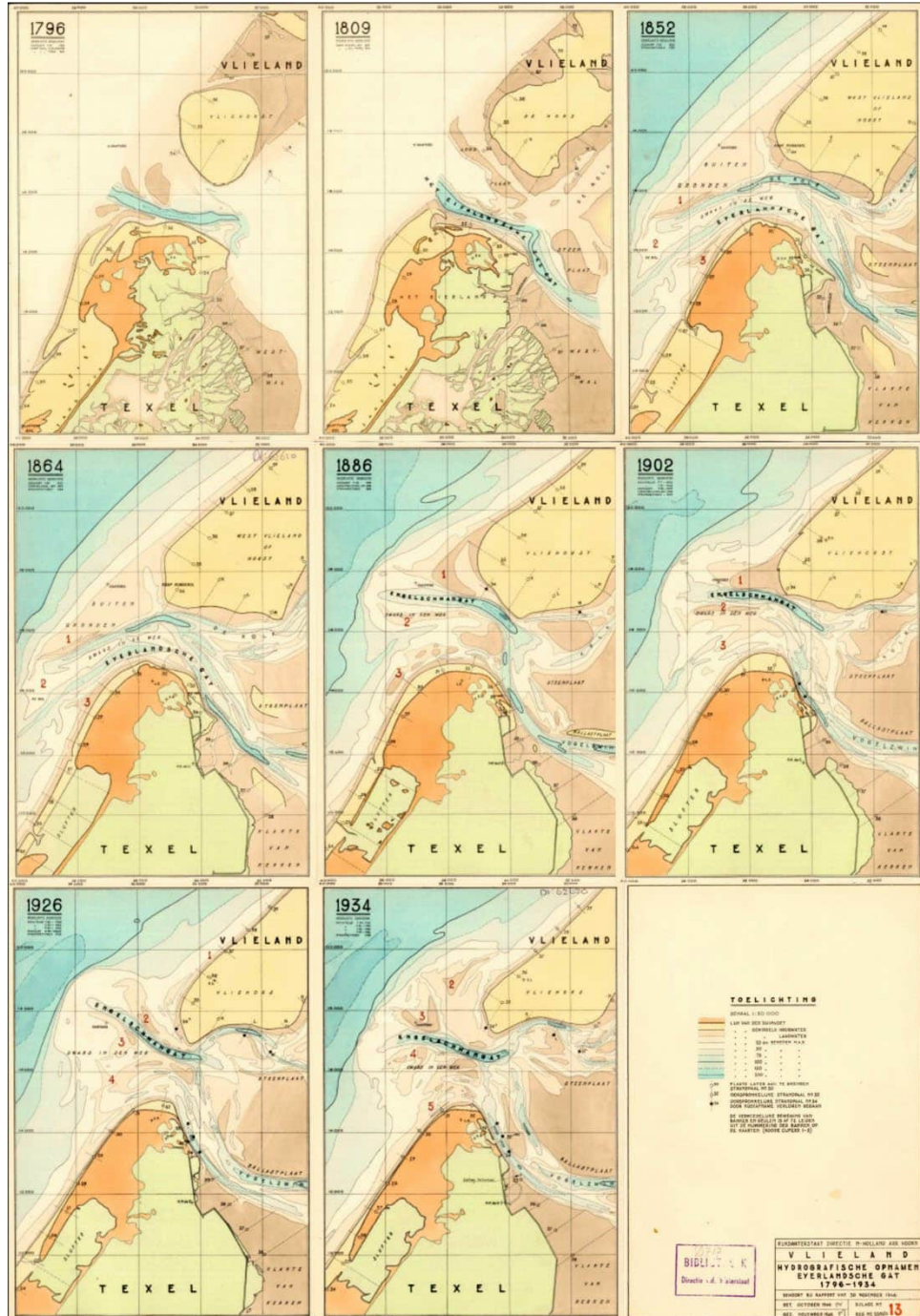


Figuur 2-7: Een weergave van de uitgevoerde suppleties op Texel ten noorden van de Slufter (Bron: suppletie database).

3 Beschikbare bodemdata

3.1 Hydrografische kaarten

Uit verschillende rapporten kunnen een aantal historische kaarten van het Eierlandse Gat worden gevonden. De meest gedetailleerde kaarten zijn de ingekleurde hydrografische kaarten die beschikbaar zijn sinds 1796 (Figuur 3-1). De 1796 en 1809 opnames zijn nog beperkt in detail. Vanaf 1852 zijn de geulen en platen zichtbaar.



Figuur 3-1: Hydrografische kaarten van het Eierlandse Gat over de periode 1796 – 1934. De volledige kaarten inclusief bekken worden getoond in Appendix B.1.

Naast deze kaartserie zijn nog oudere opnamen aanwezig in de nota Eierlandse Gat uit 1938 (Rijkswaterstaat, 1938). In deze nota zijn aanvullende kaarten voor de periode 1722-1796 aanwezig (Appendix B.1). Alleen de kaarten van 1780 en 1796 geven een (ruw) beeld van de geul- en plaatliggingen.

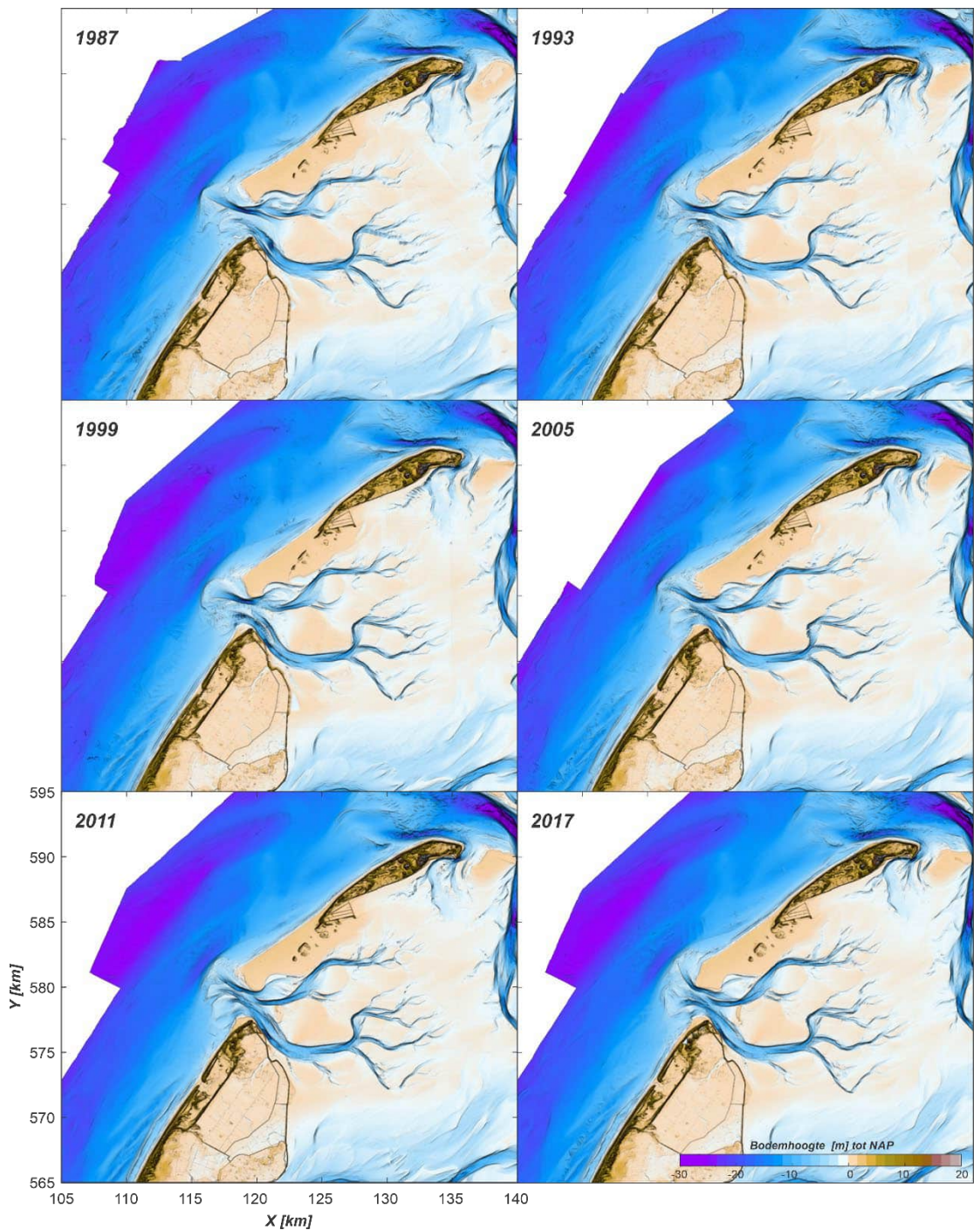
3.2 Vaklodingen

Naast de hydrografische kaarten wordt gebruik gemaakt van bodemdata die digitaal beschikbaar zijn bij Rijkswaterstaat. Een uitgebreide inventarisatie van de bij RWS centraal gearchiveerde meetdata is gemaakt door De Kruif (2001). Dit bevat een overzicht van alle bodemdata aanwezig bij Rijkswaterstaat in de periode 1925-2000 met een accent op de periode 1965-2000.

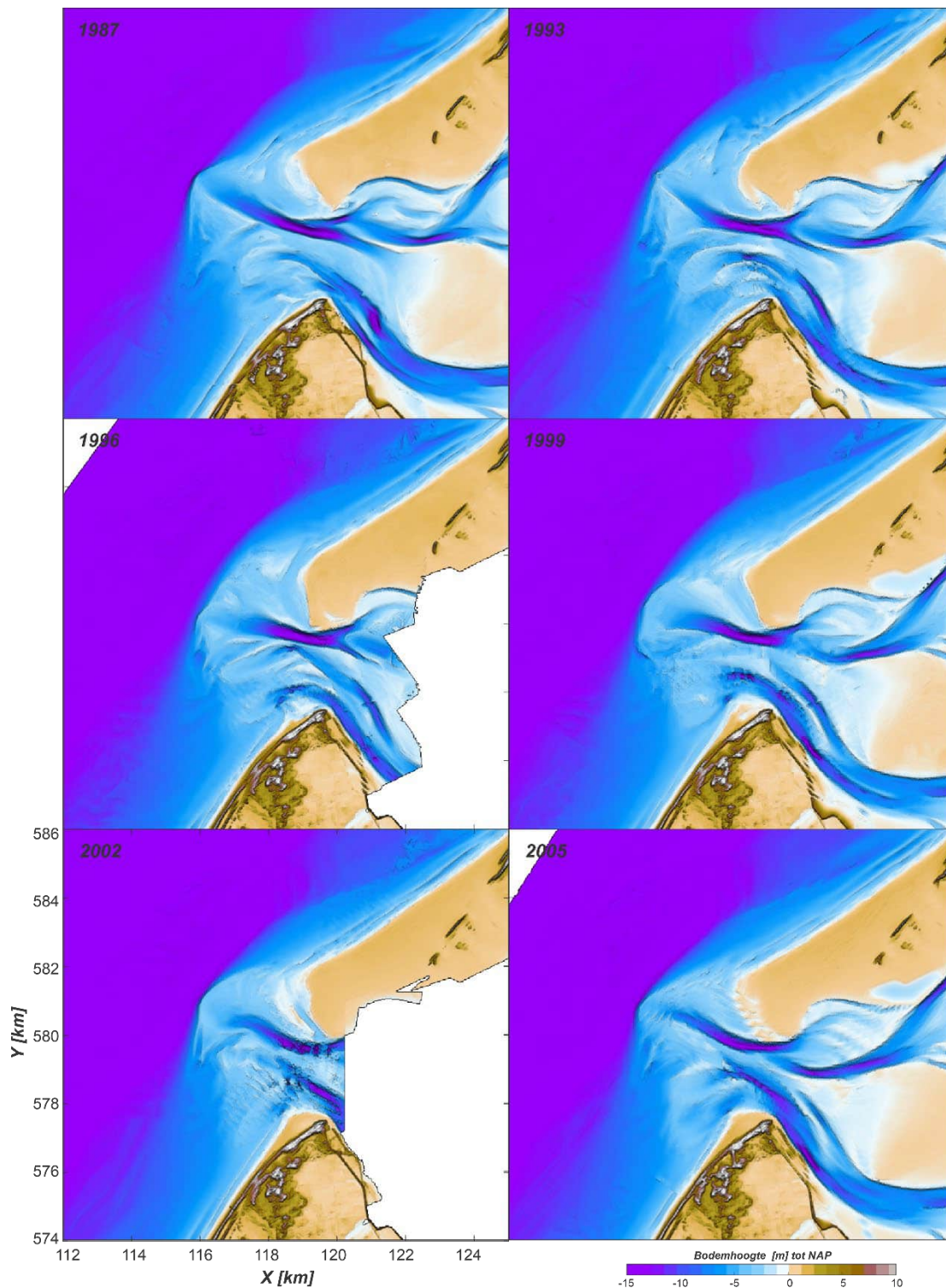
In het algemeen geldt dat Rijkswaterstaat vanaf 1985 de bodemdata digitaal heeft ingewonnen en opgeslagen. Deze metingen worden uitgevoerd met een single-beam echosounder. Er wordt in een vast raster van raaien gevaren. De raaien liggen op ongeveer 200 m afstand en in iedere raai wordt in een bemonsteringsafstand van 5 meter geregistreerd. Na inwinning van de dieptelodingen worden complete kaarten opgebouwd. Vroeger werd dit gedaan door de lodingen aan te vullen met de waterpassingen. Sinds 1996 worden de lodingen aangevuld met LiDAR metingen van de droogvallende platen in de Waddenzee en Jarkus-metingen van het droge strand en de duinen langs de Noordzeekust. Meer over de Jarkus-metingen volgt in H3.3. De opgevulde datasets worden met behulp van het programma Digipol (Digipol, 1997) geïnterpoleerd naar de hoekpunten van een 20x20 m rooster en vervolgens opgeslagen als vaklodingen kaartbladen. Vaklodingen worden niet jaarlijks ingewonnen, maar worden gefaseerd uitgevoerd. In de Waddenzee wordt, van west naar oost, jaarlijks één bekken ingemeten. Elke zes jaar is er dan een volledige opname van de Waddenzee. In de kustzone is de dynamiek van de geulen en platen groter en daarom wordt deze in 3-jaarlijks interval opgenomen. De data zijn op te vragen bij de Helpdesk Water van Rijkswaterstaat (<https://www.helpdeskwater.nl>). Deltares maakt via het *Open-Earth* initiatief de data vrij en makkelijk toegankelijk: <http://opendap.deltares.nl/thredds/catalog/opendap/rijkswaterstaat/catalog.html>.

De data voor 1985 zijn alleen beschikbaar als analoge kaartbladen van de voormalige Adviesdienst Hoorn. In het kader van een grootschalig onderzoek naar de sedimentatie en erosie van de Waddenzee zijn een aantal van de analoge kaartbladen gedigitaliseerd en zijn min-of-meer dekkende kaarten voor de periode 1925-1985 gemaakt. De onderliggende data zijn daarbij zorgvuldig terug berekend naar een 250x250 m rooster. In de roostercellen met voldoende resolutie (meetpunten) is hiervoor het meest representatieve punt gekozen. In gebieden met lage resolutie is daarvoor een interpolatie vanuit de omliggende punten uitgevoerd. De gemaakte fout in verticale hoogte door omrekening naar het 250x250 m rooster wordt hierbij geschat op ongeveer 20 tot 30 cm. Zie de rapporten van Glim et al. (1986, 1988) voor details.

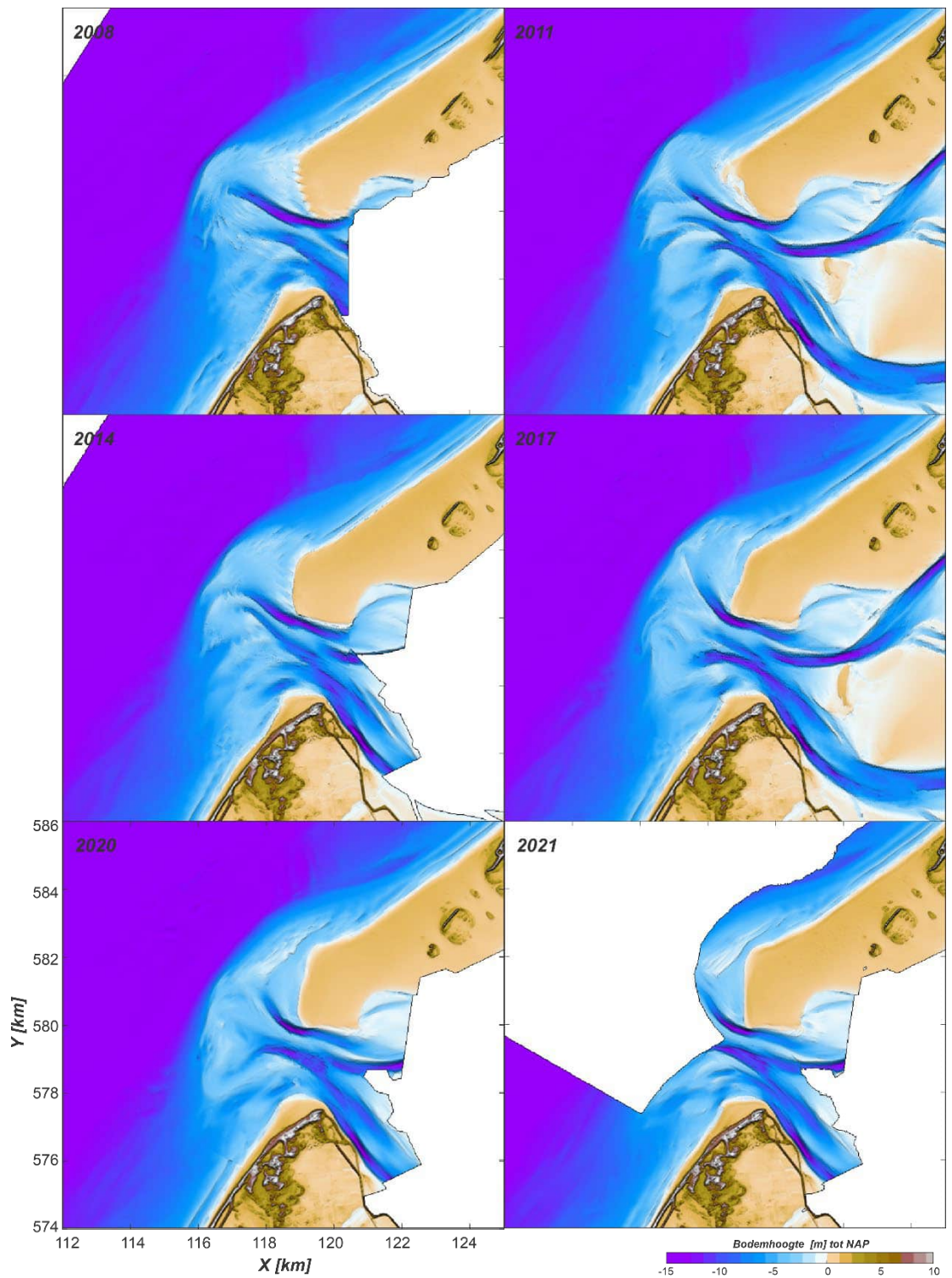
In totaal zijn er 12 bodemkaarten te maken over de periode 1987-2021, hiervan zijn er zes kaarten met volledige dekking van het gehele zeegat (Figuur 3-2). Een grotere weergave van de bodems is te vinden in Appendix B.2.



Figuur 3-2: Een overzicht van de gebiedsdekkende Vaklodingen van het gehele zeegat over de periode 1987-2017. Zie Appendix B-2 voor grote afbeeldingen en de overige bodemkaarten van de kust en buitendelta. Alle bodemdata zijn weergegeven in het Rijksdriehoeks (RD) coördinaten systemen met een hoogte relatief t.o.v. NAP.



Figuur 3-3: Een overzicht van de Vaklodgingen over de periode 1987-2005. Zie Appendix B-2 voor grote afbeeldingen.

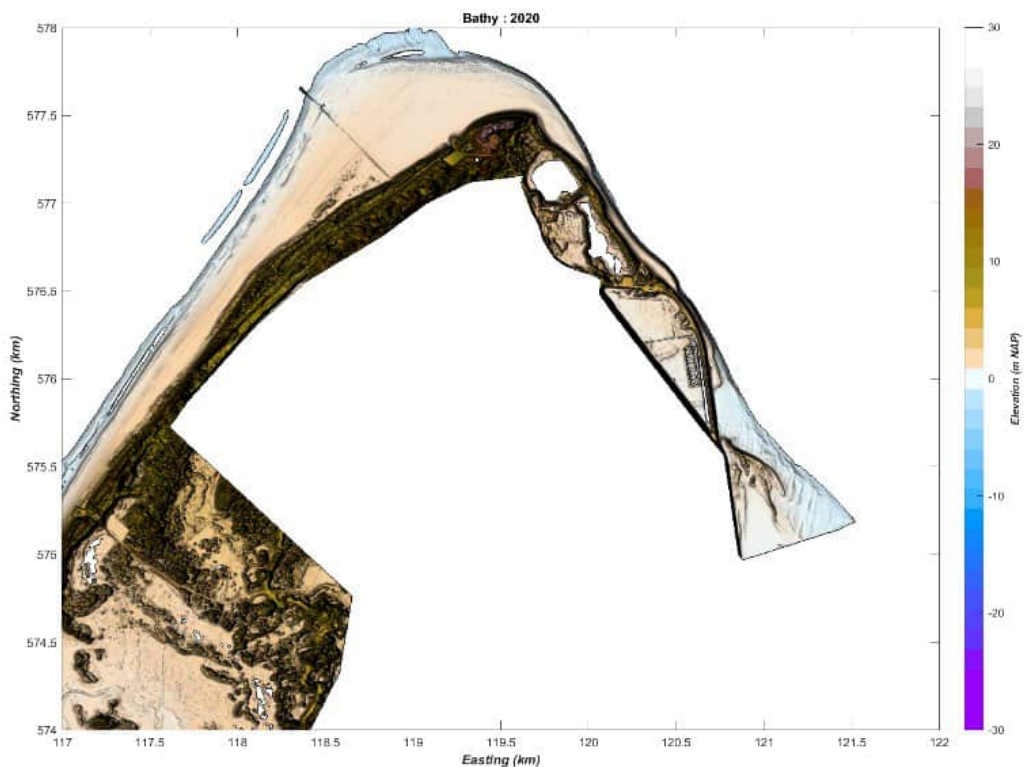


Figuur 3-4: Een overzicht van de Vaklodingen over de periode 2008-2021. Zie Appendix B-2 voor grote afbeeldingen.

3.3 Kustmetingen (Jarkus en LiDAR)

Er worden gedetailleerde metingen van de eilandkusten gemaakt. De kustmetingen beslaan zowel het natte deel (dieptemetingen) als het droge strand en de duinen (hoogtemetingen). De lodingen worden uitgevoerd op specifieke raaien die loodrecht op de kust staan. Deze raaien hebben een tussenafstand van ongeveer 200-250 m en een lengte van 800-1200 m vanaf de RijksStrandPalen (RSP-lijn). In totaal kent de Nederlandse kust 2000 raaien. Ze worden sinds 1964 jaarlijks ingemeten, vandaar de naam JarKus (Jaarlijkse Kust). Sinds 2017 worden de Jarkusraaien bij de zeegaten zo ingemeten, dat de hele keel van het zeegat is opgenomen. De data opgenomen vóór 2017 bevatten alleen de kustzone van de eilanden (inclusief eilandkoppen). De Jarkusmetingen worden opgeslagen als raaien, maar ook als rooster met 20 m rasterresolutie.

Het natte deel van de Jarkusraai wordt met een single-beam echo-sounder (zelfregistrerend echolood) opgenomen. Het droge deel van het strand en de droge delen van de Waddenzee worden sinds 1996 vanuit een vliegtuig met laseraltimetrie (LiDAR) ingewonnen. Na analyse van de resultaten wordt een Digitaal Terrein Model (DTM) verkregen. De DTM wordt verwerkt in de Jarkusmetingen maar wordt ook in 5 m rasterresolutie gearchiveerd. Iedere DTM bevat het droogvallende strand tot een diepte van ongeveer -1,0 m NAP en de eerste duinenrijen (Figuur 3-5).



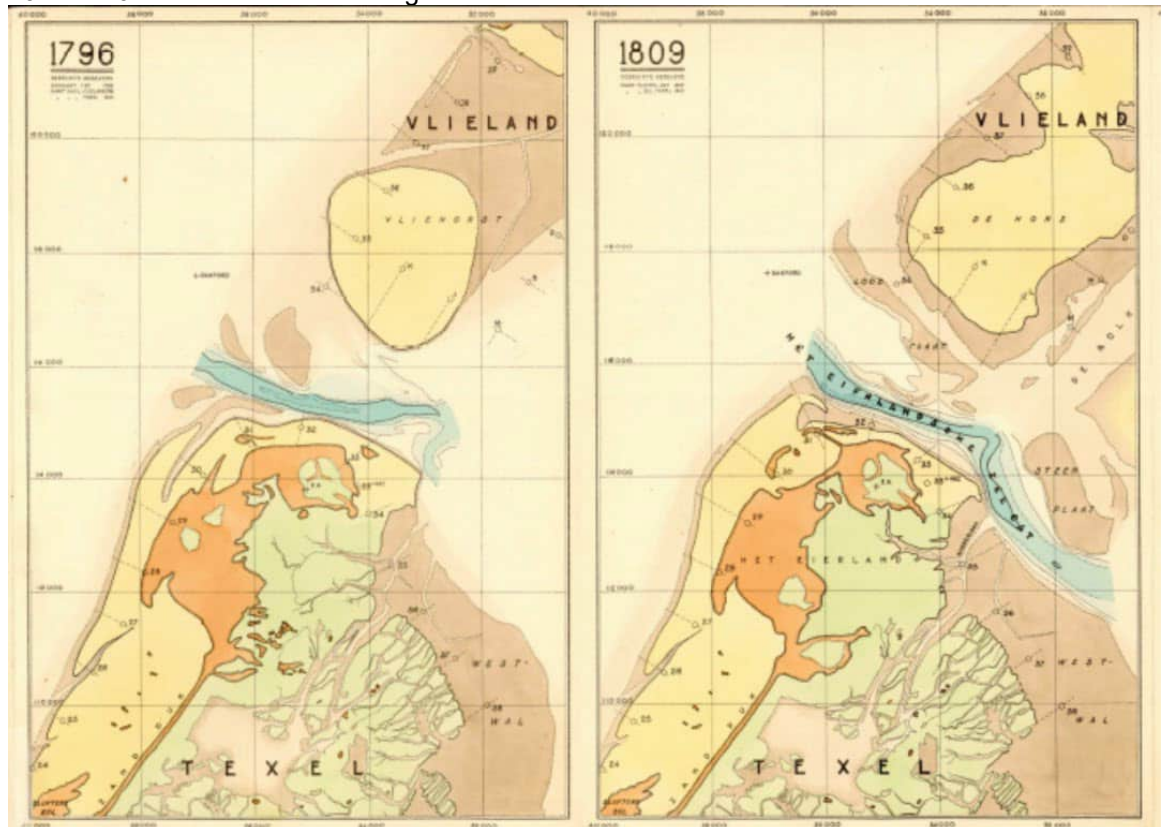
Figuur 3-5: Een voorbeeld van een Kusthoogtemeting van Eierland voor het jaar 2020.

4 Morfologische ontwikkelingen van het Eierlandse Gat

4.1 Morfologische ontwikkeling tot de afsluiting van de Zuiderzee (1796-1934)

Een uitgebreide beschrijving van de historische ontwikkeling van het Eierlandse Gat wordt gegeven door Pomes (1938) en Rakhorst (1993). Hieronder worden deze studies samengevat.

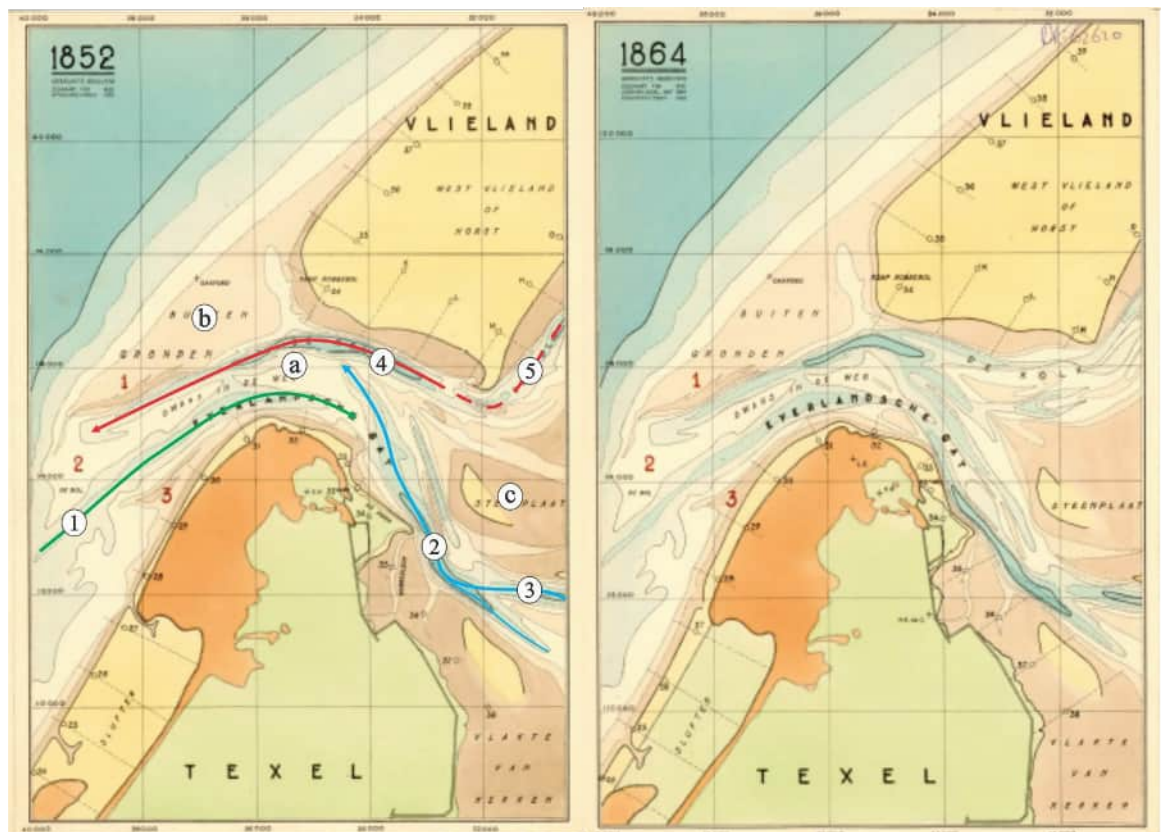
Oorspronkelijk was er een aaneengesloten zandige kustlijn aanwezig. Door stormen (in 1164 en 1170) ontstaat een geultje (het Anegat), waardoor er een scheiding van de eilanden Texel en Vlieland ontstaat. Dit geultje is verder in omvang toegenomen in de 12^{de} en 13^{de} eeuw. In de tweede helft van de 17^{de} eeuw vond er een sterke kustachteruitgang plaats van West-Vlieland en de kop van Eierland. In deze periode lag er nog een eiland (Eierland) tussen Texel en Vlieland in. Dit eiland bestond uit een aantal losse duintjes en een oud duincomplex en werd in 1630 verbonden met Texel door aanleg van een stuifdijk (de Zanddijk). In de 17^{de} eeuw vond ten noordwesten van de Zanddijk duinvorming plaats. In de 19^{de} eeuw is dan een uitgestrekt landschap van duinen, stuifdijken en valleien ontstaan. Aan de zeezijde van deze stuifdijk ontstond het huidige sluftergebied. De ontwikkeling van het zeegat gedurende de 19^{de} en 20^{ste} eeuw wordt in de volgende hoofdstukken beschreven.



Figuur 4-1 Ontwikkeling van het Eierlandse Gat over de periode 1796 – 1809. Uit Rapport Vlieland. Rijkswaterstaat Directie N-Holland, Arr. Hoorn (1946). Geulen: (1). Eierlandse Gat, (2). Robbengat, (3). Vogelzwin, (4). Engelsmangat, (5). Kolk, (6). Geul onder de Vliehors en platen: (a). Dwars in de Weg, (b). Buitengronden, (c). Steenplaat, (d). Ballastplaat.

De twee oudste bodemkaarten opgenomen in 1796 en 1809 tonen nog niet de geulen en platen van de volledige buitendelta (Figuur 4-1). Alleen de keel van het zeegat is hier met enig detail weergegeven. Het Eierlandse gat ligt tegen de noordzijde van Eierland aan. De geul is op het diepste punt meer dan 15 m diep. Aan de zuidzijde bevindt zich een uitgebreide strandduinvlakte en is de Zanddijk duidelijk zichtbaar. Zeewaarts van de Zanddijk en de duinen is de kust nog ver uitgebouwd.

De kaarten van 1852 en 1864 tonen al veel meer detail en zijn qua geul-plaat configuratie vrijwel identiek (Figuur 4-2). In 1852 bevinden zich 2 hoofdgeulen in de keel van het zeegat (Robbengat (2) en De Kolk (4) en een derde geul op de buitendelta (Eierlandse Gat (1)). Tussen De Kolk (4), waarvan het westelijk gelegen gedeelte later Engelsmangat genoemd wordt en het in Eierlandse Gat bevindt zich de bank Dwars in de Weg. Het Robbengat strekt zich ver noordelijk uit en maakt bijna verbinding met De Kolk. In het bekken maakt het Robbengat verbinding met het Vogelzwin (3). Het merendeel van het buitendeltaplatform, de Buitengronden of Eilandergronden (b), bevindt zich ten noorden van De Kolk. Aan de zeezijde is de kust van Eierland (ter hoogte van km 29-30) tijdelijk veel minder ver zeewaarts uitgebouwd dan in de eerdere opnamen (Figuur 4-1). Tussen 1850 en 1880 vond er weer herstel van de kustlijn plaatst (Figuur 4-2 en Figuur 4-3). Het is mogelijk dat de voorliggende banken hier met de kust verheeld zijn (Figuur 4-2).

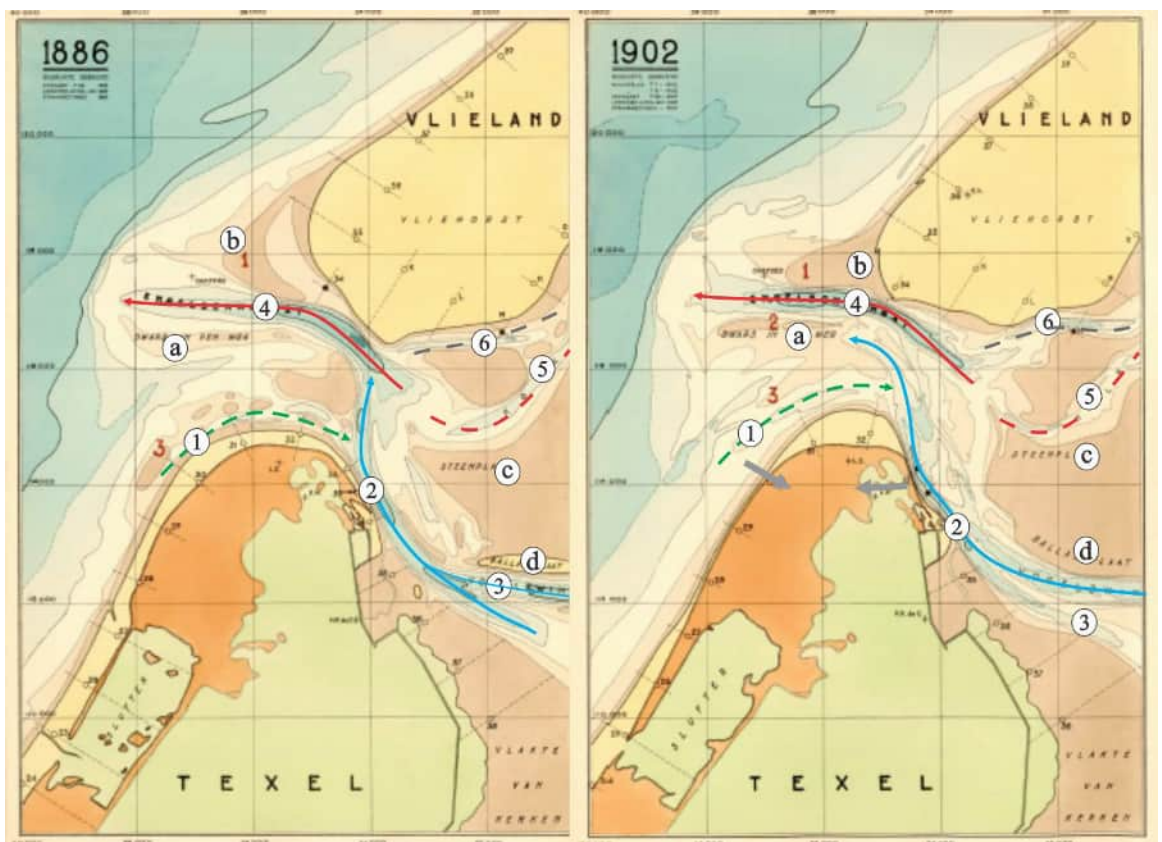


Figuur 4-2 Ontwikkeling van het Eierlandse Gat over de periode 1852 – 1864. Uit Rapport Vlieland. Rijkswaterstaat Directie N-Holland, Arr. Hoorn (1946). Geulen: (1). Eierlandse Gat, (2). Robbengat, (3). Vogelzwin, (4). Engelsmangat, (5). Kolk, (6). Geul onder de Vliehors en platen: (a). Dwars in de Weg, (b). Buitengronden, (c). Steenplaat, (d). Ballastplaat.

Tussen 1864 en 1886 treden grotere morfologische veranderingen op (Figuur 4-3). De geul Eierlandse Gat is vrijwel geheel verzand en in de 1886 opname al vrijwel niet meer te onderscheiden. Er hebben zich diverse kleinere banken gevormd. Een groot zandaanbod vanaf de eilandkust van Texel moet dit veroorzaakt hebben. In de keel van het zeegat is een

grote plaat gevormd waardoor het Robbengat (2) noordelijk is geroteerd en nu verbinding maakt met het Engelsmangat (4). De uitstroming van het Engelsmangat was zuidwestelijk gericht maar is nu westelijk geroteerd. De Buitengronden (b) zijn dan in omvang afgenomen en in hoogte toegenomen. Er ontstaat een grote aanlandingbank voor de kust en deze bank is in 1902 verheeld met de Vliehors. In het bekken is De Kolk (5) zuidelijk verplaatst en er heeft zich direct onder de Vliehors een wat dieper geultje gevormd (Geul onder de Vliehors, (6)).

De opname van 1902 lijkt qua geulen op de situatie in 1886. Wel begint het Eierlandse Gat zich terug te vormen. De banken die hier in 1886 aanwezig waren zijn noordelijk verplaatst en opgegaan in de bank Dwars in de Weg (a). De hervorming van het Eierlandse Gat resulteert in een sterke afname van het strand net ten noorden van de Slufter. De ontwikkeling van dit stukje kust laat perioden zien met een uitgebouwde kust (1864 en 1886) en perioden waarin de kust is teruggetrokken (1852 en 1902). Aan de Waddenzijde heeft het Robbengat (2) de eilandkop geërodeerd. Alhoewel zowel de Wadden- als de Noordzeekustzijde van Eierland eroderen, bouwt de kop wel uit. De uitstroom van het Robbengat was in 1886 noordelijk, richting het Engelsmangat (4) gericht, maar heeft in 1902 een westelijke uitstroom de buitendelta op.

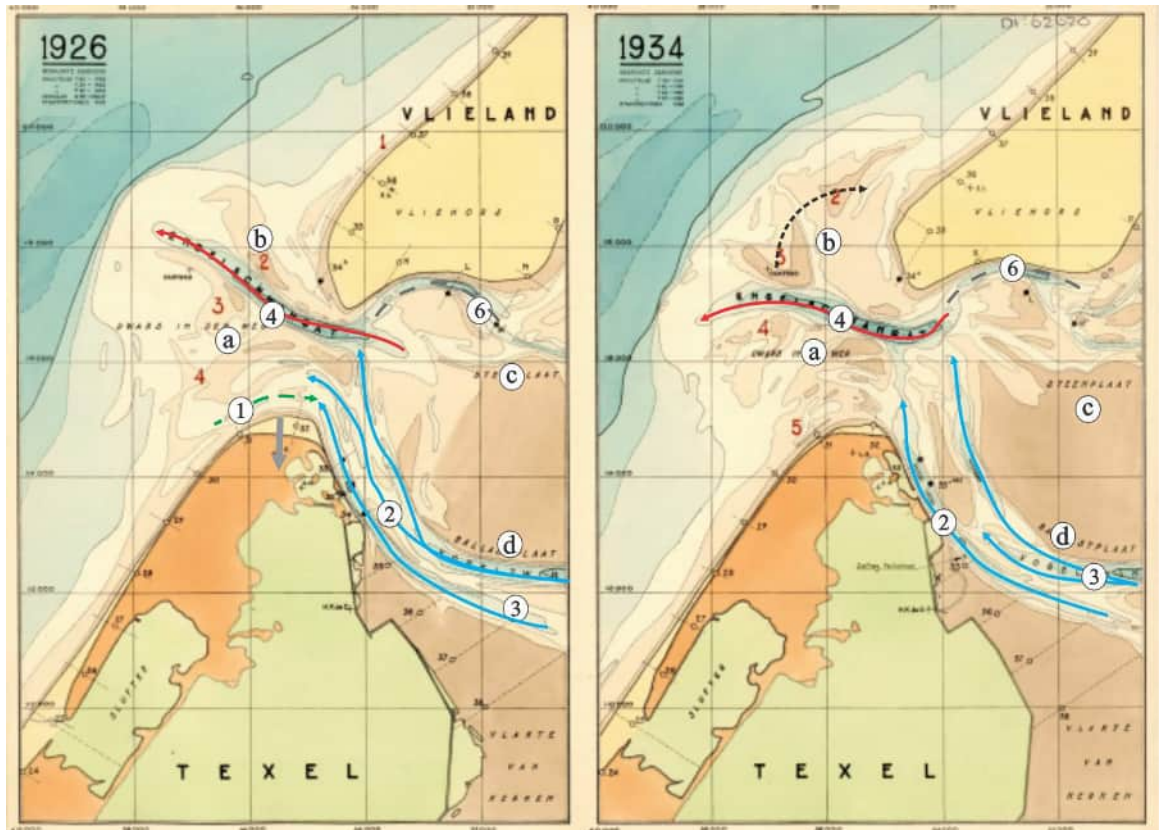


Figuur 4-3 Ontwikkeling van het Eierlandse Gat over de periode 1886 – 1902. Uit Rapport Vlieland. Rijkswaterstaat Directie N-Holland, Arr. Hoorn (1946). Geulen: (1). Eierlandse Gat, (2). Robbengat, (3). Vogelzwin, (4). Engelsmangat, (5). Kolk, (6). Geul onder de Vliehors en platen: (a). Dwars in de Weg, (b). Buitengronden, (c). Steenplaat, (d). Ballastplaat.

Het draaien van de uitstroming van het Engelsmangat (4) is met name in de opname van 1902 – 1934 duidelijk zichtbaar (Figuur 4-3 en Figuur 4-4). Tussen 1902 en 1926 draait de uitstroming met de klok mee van een westelijke naar een noordwestelijke richting. In 1934 heeft de uitstroming dan weer een westelijke oriëntatie. Op de naastliggende buitengronden vormen zich dan banken die richting de Vliehors migreren. Deze ontwikkeling illustreert een typische vorm van sediment-bypassing waarbij banken en geulen zich periodiek over de buitendelta bewegen. Op basis van de geuligging kan de bypassing-cyclus ruwweg geschat worden op 25 jaar.

Aan de zuidzijde van het zeegat doen zich ook grote veranderingen voor. Hier is het Eierlandse Gat in 1934 weer vrijwel verdwenen en hebben zich allerlei kleine banken gevormd. De bank Dwars in de Weg (a) beslaat nu vrijwel de gehele zuidelijke buitendelta. Eierland was in 1902 nog ver noordelijk uitgebouwd, maar deze uitbouw is in 1934 weer vrijwel geheel verdwenen. Naast het verdwijnen van het Eierlandse Gat vertoont ook het Robbengat grote veranderingen. Er vormen zich twee parallelle geulen oostelijk van Eierland die het Vogelzwin verbinden met het Engelsmangat. Het opsplitsen van Robbengat in twee diepere delen gescheiden door een drempel vindt periodiek plaats, ook in de bodemkaarten van 1864 en 1886 is dit zichtbaar, maar ook in de meer recente data is dit nog terug te zien. Endema (1978) concludeert dat de meest oostelijk gelegen geul zich oostelijk verplaatst, terwijl de westelijke geul de kust van Eierland erodeert. Het proces van geulafplitsing tot verzanding op de Steenplaat (c) speelt zich af op een tijdschaal van ongeveer 40 jaar.

Langs de Vliehors gaat het geultje, Geul onder de Vliehors, een grotere rol spelen. Door uitbochting erodeert de zuid(oost) zijde van de Vliehors. Een vergelijking tussen de 1934 en 1926 bodem laat ook zien dat de breedte van het zeegat toeneemt. Zowel de zuidzijde van de Vliehors en de noordzijde van Eierland trekken zich terug. De studie van Endema (1978) geeft aan dat de breedte van het zeegat, gemeten over de kortste afstand tussen de H.W.-lijnen, ongeveer 2 km was vóór 1932 en 3 km erna. Mogelijk is dit het gevolg van vergroting van het getijprisma door afsluiting van de Zuiderzee.

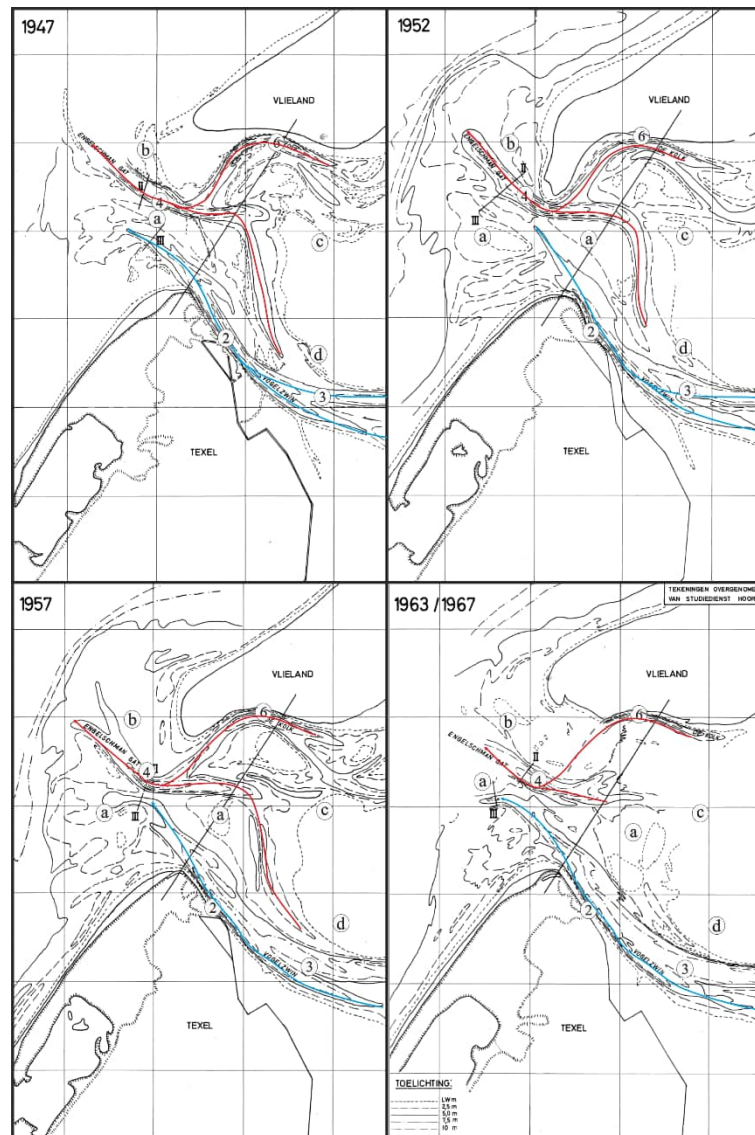


Figuur 4-4 Ontwikkeling van het Eierlandse Gat over de periode 1926 – 1934. Uit Rapport Vlieland. Rijkswaterstaat Directie N-Holland, Arr. Hoorn (1946). Geulen: (1). Eierlandse Gat, (2). Robbengat, (3). Vogelzwin, (4). Engelsmangat, (5). Kolk, (6). Geul onder de Vliehors en platen: (a). Dwars in de Weg, (b). Buitengronden, (c). Steenplaat, (d). Ballastplaat.

4.2 Na afsluiting van de Zuiderzee

1947-1967

De studie van Joustra (1974) presenteert een viertal hydrografische kaarten voor de periode 1947-1967 (Figuur 4-5). In de 1947 opname bevinden zich twee uitstroomgeulen de buitendelta op. Het Robbengat strekt zich ver uit richting de bank Dwars in de Weg. Ten noorden hiervan is de uitstroom van het Engelsmangat weer met de klok mee geroteerd en heeft nu een noordwestelijke uitstroom richting. Engelsmangat maakt zowel verbinding met een zuidelijke uitstroomgeul richting het Robbengat en een noordelijke uitstroom via de Geul onder de Vliehors (hier De Kolk genoemd). Dwars in de Weg vormt in 1947 nog een grote bank tussen de twee geulenstelsels, maar rotatie van de uitstroom van het Robbengat zorgt ervoor dat de bank in 2 delen opbreekt (1952). Landwaartse verplaatsing van het waddendeel van deze bank drukt dan de zuidelijke uitstroom van het Engelsmangat steeds verder dicht.



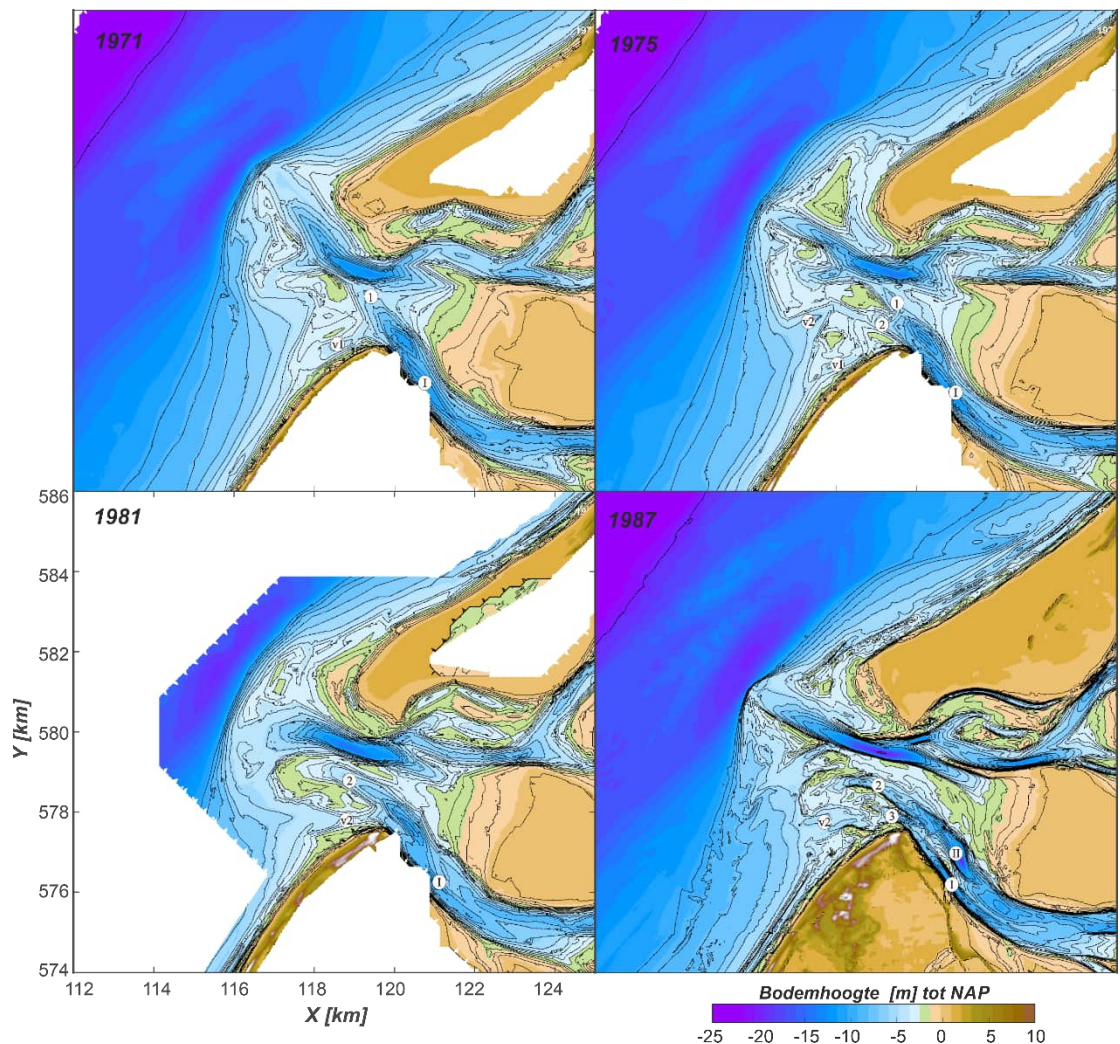
Figuur 4-5 Ontwikkeling van het Eierlandse Gat na afsluiting van de Zuiderzee (1947-1967). Bron: Joustra, 1974. Geulen: (1). Eierlandse Gat, (2). Robbengat, (3). Vogelzwin, (4). Engelsmangat, (5). Kolk, (6). Geul onder de Vliehors en platen: (a). Dwars in de Weg, (b). Buitengronden, (c). Steenplaat, (d). Ballastplaat.

1971-1987

In de periode 1971-1987 ontstaat tijdelijk een minder complex geul-plaatpatroon. Het Robbengat is in 1971 een enkele geul (weergegeven als (I) in Figuur 4-7). Deze geul strekt zich eerst noordwestelijk uit (1), waardoor er slechts een kleine drempel tussen Robbengat en Engelsmangat aanwezig is. De uitstroom van het Robbengat heroriënteert naar een westelijke richting in 1981 (zie (2) in Figuur 4-7). Er vormt zich nu een ondiepte (ebschild) op het zuidelijke deel van de buitendelta en er ontstaat een hogere drempel tussen het Robbengat en het Engelsmangat. Deze drempel (Dwars in de Weg) neemt in omvang toe. Over deze bank migreren kleinere banken vanaf de buitendelta richting Hengst. Deze drempel lijkt daarmee een rol te spelen in de westelijke aangroei van de Hengst.

In het Robbengat vormt een nieuwe langgerekte bank, waardoor deze weer uit twee diepere geuldelen bestaat. Deze drempel wordt steeds duidelijker zichtbaar in de daaropvolgende jaren (Figuur 4-7, I en II).

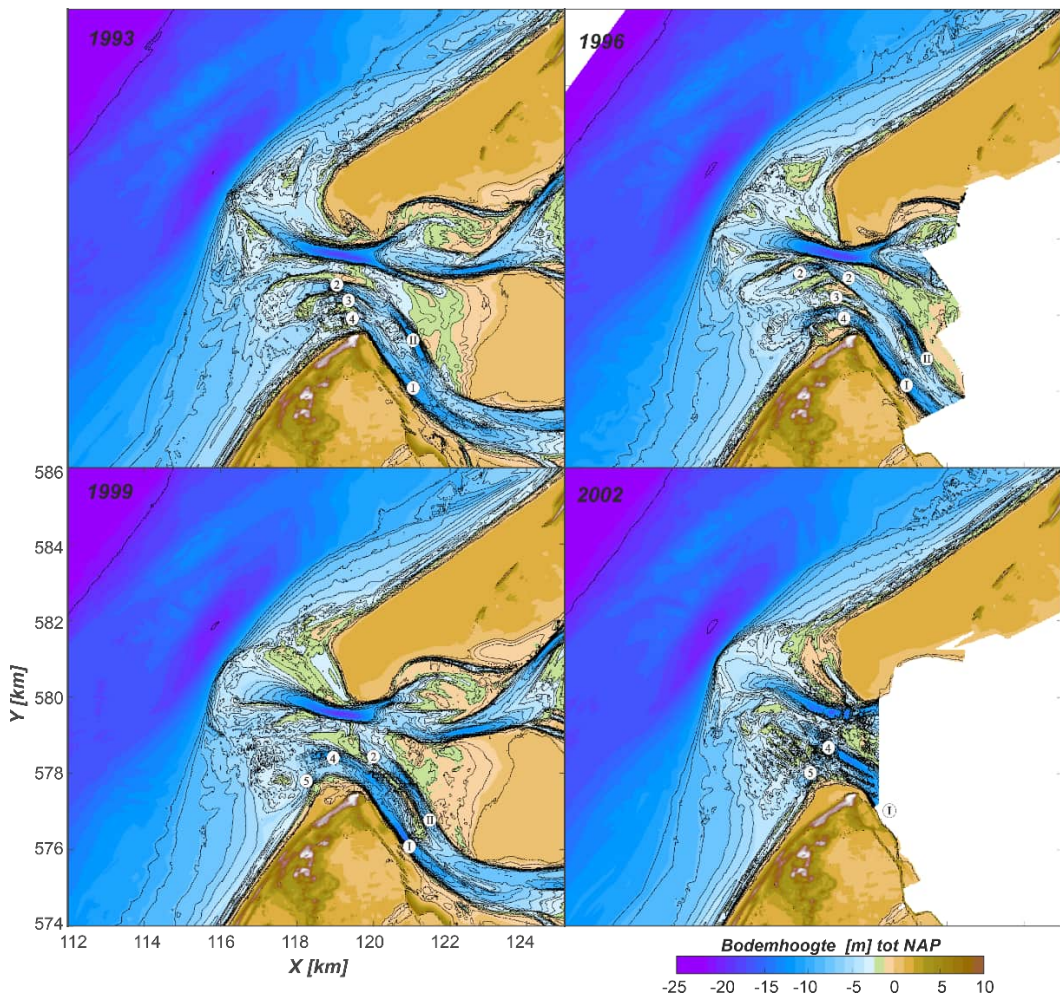
Het Engelsmangat heeft een noordwestelijke uitstroming in 1971, maar is westelijk gericht in 1975. Er is dan ook een grote ondiepte aan de noordzijde gevormd. Deze ondiepte landt in 1981 aan op de Vliehors. In deze periode heeft er zich een wat duidelijkere drempel in het Robbengat gevormd.



Figuur 4-6 Ontwikkeling van het Eierlandse Gat over de periode 1971-1987. In deze figuur geeft: (I) en (II) de ligging van het Robbengat (1 of 2 geulen), 1 t/m 7 geeft de ligging van de verschillende uitstroomgeulen weer, v1-3 geeft de ligging van de vloedgeulen.

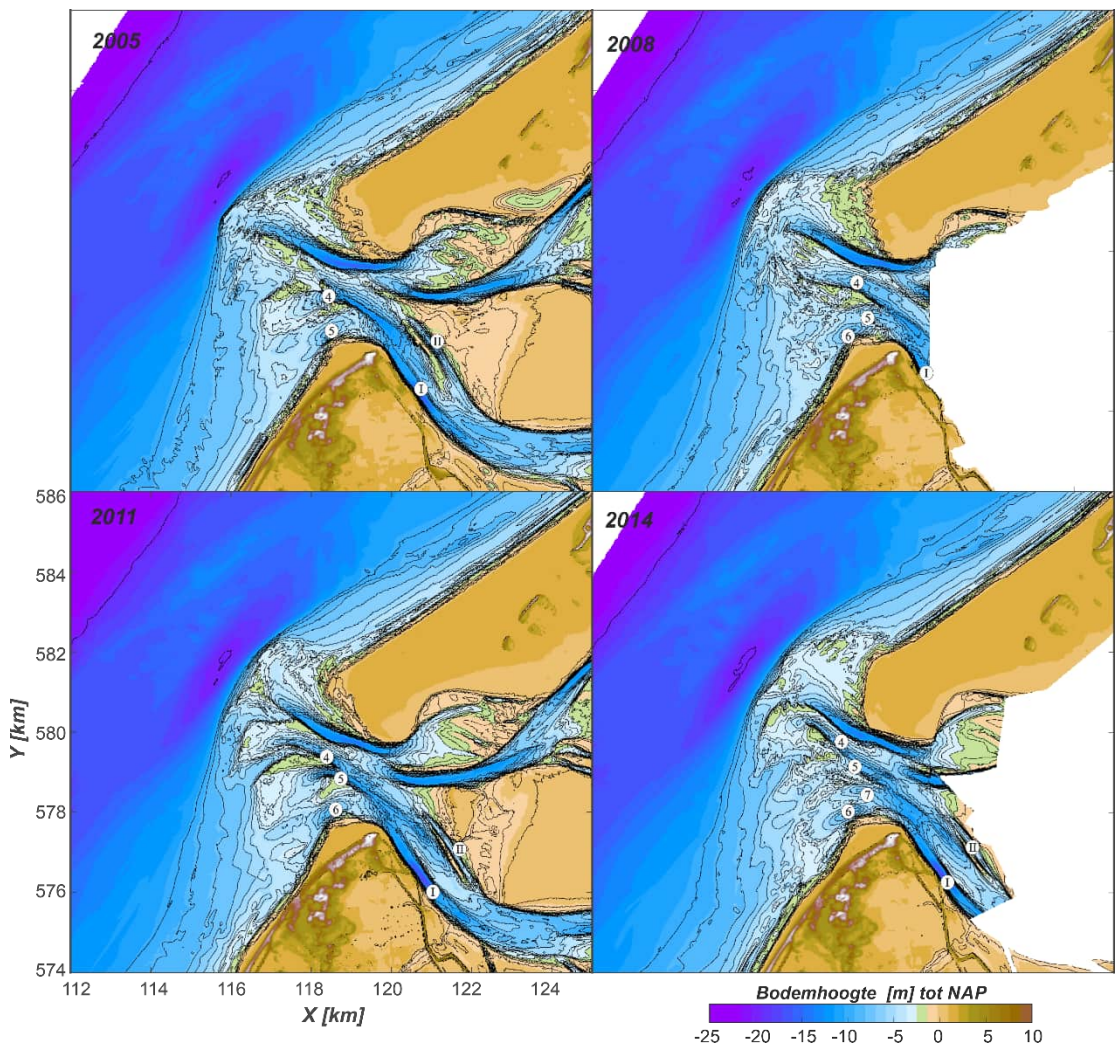
De bodemkaarten over de periode 1993-2002 illustreren de invloed van de Eierlandse dam op de morfologische ontwikkelingen van het zeegat en de buitendelta (Figuur 4-7 en Figuur 4-8). Wat opvalt in deze serie opnames is de vaste ligging van het Engelsmangat. Deze geul vertoont voor aanleg van de Eierlandse dam een periodieke migratie van een westelijke naar een noordwestelijke uitstroomrichting. Deze cyclus duurt zo'n 15-25 jaar en als onderdeel hiervan ontstaan aanlandingsbanken ten noorden van de geul. De vorming, verplaatsing en aanlanding van zo'n bank op de Vliehors is tussen 1993 en 1999 goed te volgen. In de periode 1996-2014 blijft de uitstroming van het Engelsmangat vrijwel stabiel liggen met een west-noordwestelijke uitstroomrichting. Er vormt nu geen nieuwe aanlandingsbank, maar tussen 2002 en 2014 landen vooral kleinere banken aan op de Vliehors.

De zuidzijde van de buitendelta is juist zeer dynamisch. Hier ontstaan kleinere ebscharen en ebschilden (2, 3, 4). Deze verplaatsen zich noordwestelijk over de buitendelta heen. De splitsing van het Robbengat lijkt hier een rol te spelen. Het zeewaartse deel van het Robbengat (I) maakt verbinding met de uitstroomgeulen de buitendelta op. Ook het landwaartse deel (II) heeft in 1993 een westelijke uitstroomrichting, maar deze uitstroming roteert naar een noordwestelijke richting. Er ontstaat zo een langgerekte geul (zie 1996-2002). Deze geul strekt zich ver uit het zeegat in waardoor de bank Dwars in de Weg tijdelijk opgesplitst wordt in een zeewaarts en landwaarts deel. Het landwaartse deel migreert richting de Hengst en draagt hier bij aan de bankvorming, waardoor zich op de Hengst uiteindelijk een hoge maanvormige bank heeft gevormd (Figuur 4-9, 2017).



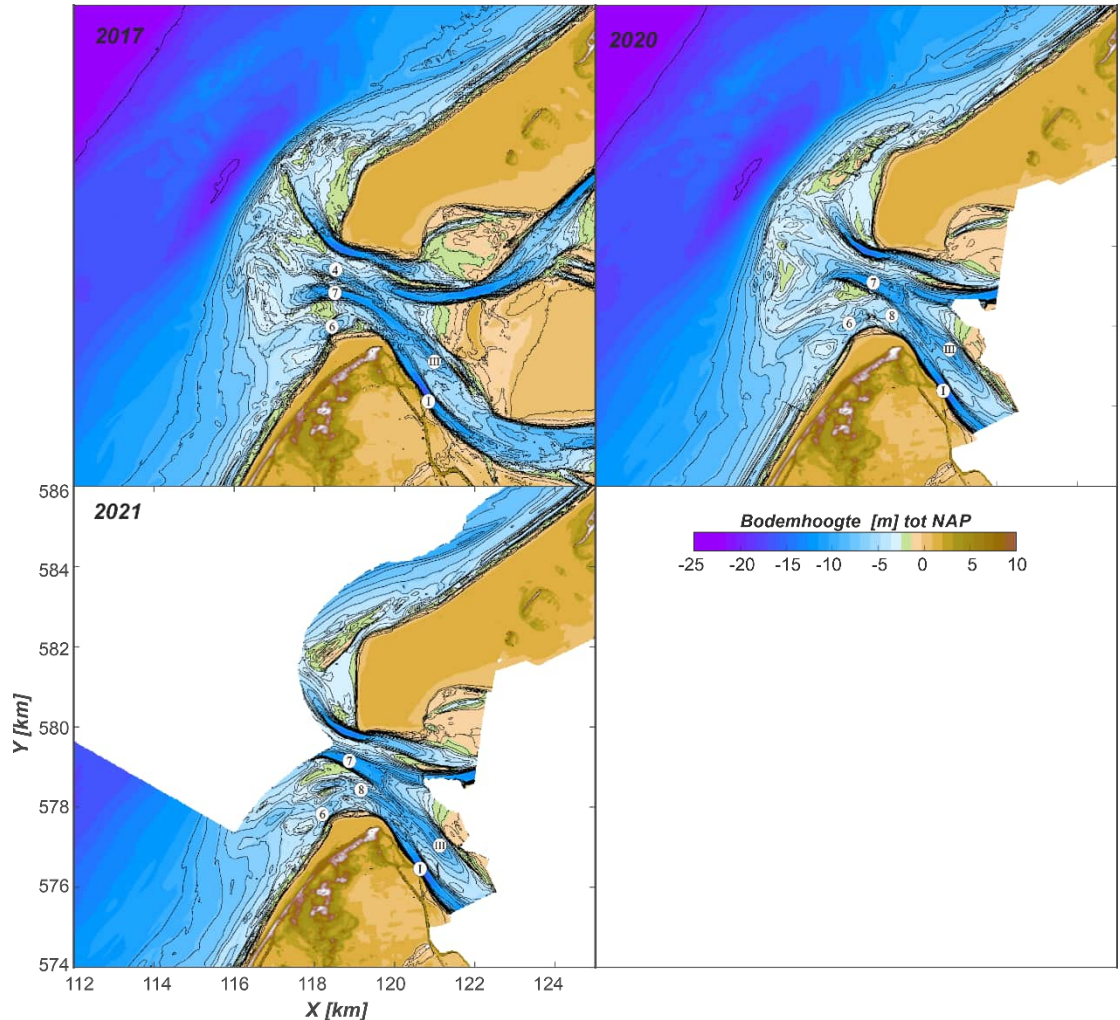
Figuur 4-7 Ontwikkeling van het Eierlandse Gat over de periode 1993-2002. In deze figuur geeft: (I) en (II) de ligging van het Robbengat (1 of 2 geulen), 1 t/m 7 geeft de ligging van de verschillende uitstroomgeulen weer, v1-3 geeft de ligging van de vloedgeulen.

De dynamiek van migrerende ebgeulen was al voor de aanleg van de Eierlandse dam zichtbaar. Na aanleg vormt zo'n geul zich direct om de dam heen (zie 4 in Figuur 4-8). De vorm van de banken en de geul rond de Eierlandse dam duiden erop dat er tijdelijk een ebdominante uitstroming vanaf het Robbengat optrad. Deze geul migreert echter snel noordelijk, waarna weer nieuwe geulen om de Eierlandse dam heen ontstaan (5, 6, 7 in Figuur 4-7). Deze nieuwe geulen verschillen wel van de vorige geul. Geul 4 was eigenlijk de uitstroming van het Robbengat en duidelijk ebgedomineerd (er vormt zich een groot ebschild om de geul heen). Geul 5 heeft eigenlijk geen duidelijke verbinding met het Robbengat en is waarschijnlijk vloed gedomineerd. Geul 4 vormt nog steeds de uitstroming van het Robbengat (Figuur 4-8, 2005). Met doorgaande noordelijke verplaatsing van geul 4 ontstaat landwaarts ruimte voor de vorming van een nieuwe geul (Figuur 4-9, 2008 - 6). Deze geul is ebgedomineerd en maakt wel verbinding met het Robbengat. Deze geul groeit snel uit, migreert noordelijk en neemt de rol als uitstroomegeul van het Robbengat over. Dit proces van snel ontwikkelende geulen die noordelijk verplaatsen treedt nog een aantal keer op tussen 2011 en 2017 (Figuur 4-8, 6,7). Dit gedrag lijkt op het ebschild en -schaar gedrag dat ook in het Zeegat van Ameland is geconstateerd (Elias et al., 2019).



Figuur 4-8 Ontwikkeling van het Eierlandse Gat over de periode 2005-2014. In deze figuur geeft: (I) en (II) de ligging van het Robbengat (1 of 2 geulen), 1 t/m 7 geeft de ligging van de verschillende uitstroomegeulen weer, v1-3 geeft de ligging van de vloedgeulen.

De ebschild vorming op het zuidelijke deel van de buitendelta zorgt ervoor dat dit deel van de buitendelta ondieper wordt. De aanvoer richting het noordelijke deel van de buitendelta neemt dan tijdelijk af, dit verklaart mogelijk de stabilisatie van Engelsmangat en de afwezigheid van aanlandingsbanken over deze periode. Met de noordelijke verplaatsing van de ebschilden ontstaat er een grote zanddruk op het Engelsmangat. Rond 2011 is zichtbaar dat het Engelsmangat onder deze zanddruk gaat vervormen. De geul wordt smaller en noordelijk gedrukt. In de 2017 opname is vervolgens de vorming van een aanlandingsbank zichtbaar. Deze bank migreert in de volgende jaren steeds verder richting de Vliehors. Het lijkt erop dat het oude bypassing mechanisme weer hersteld is.

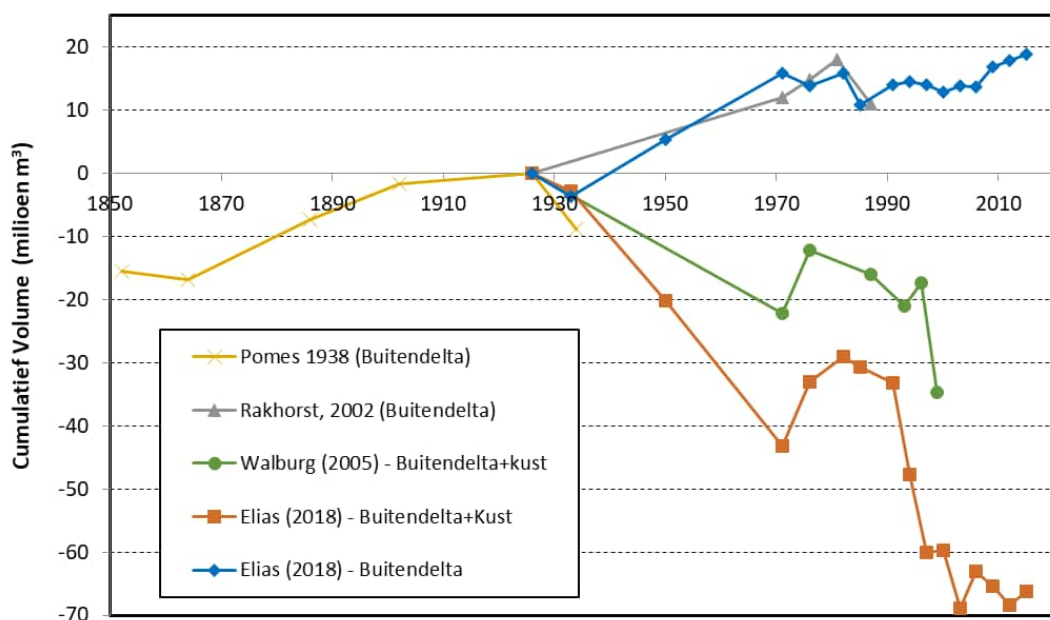


Figuur 4-9 Ontwikkeling van het Eierlandse Gat over de periode 2017-2021. De 2021 bodemopname van het Eierlandse Gat is gebaseerd op de Jarkus meting. In deze figuur geeft: (I) en (II) de ligging van het Robbengat (1 of 2 geulen), 1 t/m 7 geeft de ligging van de verschillende uitstroomeulen weer, v1-3 geeft de ligging van de vloedgeulen.

5 Volumeveranderingen

5.1 Grootschalige, lange-termijn sedimentvolumes

Rakhorst (2002) geeft een overzicht van verschillende studies waarin sedimentvolumes van het Eierlandse Gat zijn bepaald. De oudste studie die hierin gebruikt wordt, is die van Pomes (1938). Pomes laat zien dat sinds 1850 het volume van de buitendelta tot afsluiting van de Zuiderzee is toegenomen met een kleine 15 miljoen m³. De volumeontwikkeling na afsluiting vertoont een tweedeling in gedrag. De buitendelta blijft in volume toenemen. Rakhorst (2002) en Elias (2018) bereken hier een toename van 11 miljoen m³ in de periode 1926-1987. Het buitendelta volume blijft in de periode 1970-2010 vrijwel gelijk. Sinds 2010 neemt het volume dan weer iets toe (zo'n 5 miljoen m³). Het volume is dan in totaal 20 miljoen m³ sinds de Afsluiting. Het beeld verandert aanzienlijk als ook de aangrenzende kustzone wordt meegenomen in de analyse. Zoals Walburg (2005) en Elias (2018) berekenen hier een volumeverlies van 0,5 tot 0,75 miljoen m³/jaar sinds 1926. Het verschil in grootte wordt veroorzaakt door een iets andere keuze van de balansgebieden. In Elias (2018) wordt een groter deel van de kustlijn van Texel meegenomen waarin grote volumeverliezen optreden (zie ook Figuur 5-2).



Figuur 5-1: Een overzicht van verschillende volumebepalingen van de buitendelta en kustzone van het Eierlandse gat over de periode 1852-2015.

Elias (2018) geeft een gedetailleerd beeld van de sedimentatie-erosie patronen in het Eierlandse Gat over de periode 1932-2015. De resultaten van deze studie worden hieronder en in Figuur 5-2 samengevat.

Kustzone

(a). Kust van Texel (noord)

Het grote verschil in sedimentvolumeontwikkeling met en zonder kustzone wordt met name veroorzaakt door de volumeontwikkeling van de kustzone bij Texel (polygonen 10, 11 en 12 in Figuur 5-2). In deze polygonen vindt in totaal een volumeverlies van meer dan 60 miljoen m³ plaats. De helft van deze erosie treedt op in polygonen 11 en 12 in de periode 1933-1971.

Het is bekend dat de kust van Texel al lange tijd erosief is, maar het is ook mogelijk dat deze volumes samenhangen met meetonnauwkeurigheden. De verliezen in de periode 1971-2015 zijn met 16 miljoen m³ in ieder geval een stuk kleiner. Opvallend in deze periode is het grote volumeverlies van 10 miljoen m³ tussen 1991 en 1997 in de diepe vooroever (polygoon 10). Elias (2018) concludeert dat op basis van de geobserveerde veranderingen er een verlies zou optreden van -0,76 miljoen m³/jaar, maar dat de huidige verliezen waarschijnlijk rond de -0,2 miljoen m³/jaar liggen (let op dat hier geen correctie is gemaakt voor de uitgevoerde zandsuppleties).

(b) Buitendelta Zuid.

De polygonen 13, 14 en 15 geven het volumeverloop van het zuidelijke deel van de buitendelta weer inclusief de geul Robbengat. Al deze polygonen vertonen grote variaties in de tijdseries. Deze variaties kunnen gerelateerd zijn aan meetfouten, maar ook de dynamiek van de buitendelta speelt hierbij een rol. De zuidzijde van de buitendelta neemt over de gehele periode 13 miljoen m³ in volume af. Dit verlies wordt vooral veroorzaakt door de geulvorming in polygoon 14. Het sediment volume nam tussen 1933 en 1975 met 10 miljoen m³ af. Dit volume bleef dan een lange periode (1975-2000) vrijwel constant om vervolgens weer sterk af te nemen (- 8 miljoen m³). In de kustzone (polygoon 13) treedt een iets andere trend op. Het volume neemt hier tussen 1933 en 1994 met 7 miljoen m³ af, maar vertoont sindsdien een toenemende trend (+ 4 miljoen m³ tussen 1994 en 2015). Deze omslag werd geïnitieerd door de aanleg van de Eierlandse Gat dam, waardoor er zand in de kustzone werd ingevangen en de kust in ligging stabiliseert. Ook de sindsdien uitgevoerde suppleties zullen hier een rol spelen. Op het zuidwestelijke en westelijke deel van de buitendelta (polygoon 15) vond initieel een netto aanzanding plaats (+ 8 miljoen m³, 1933-1975). Sinds 1975 is de netto verandering beperkt, maar treden wel grote slingeringen in volume op.

(c) Buitendelta Noord

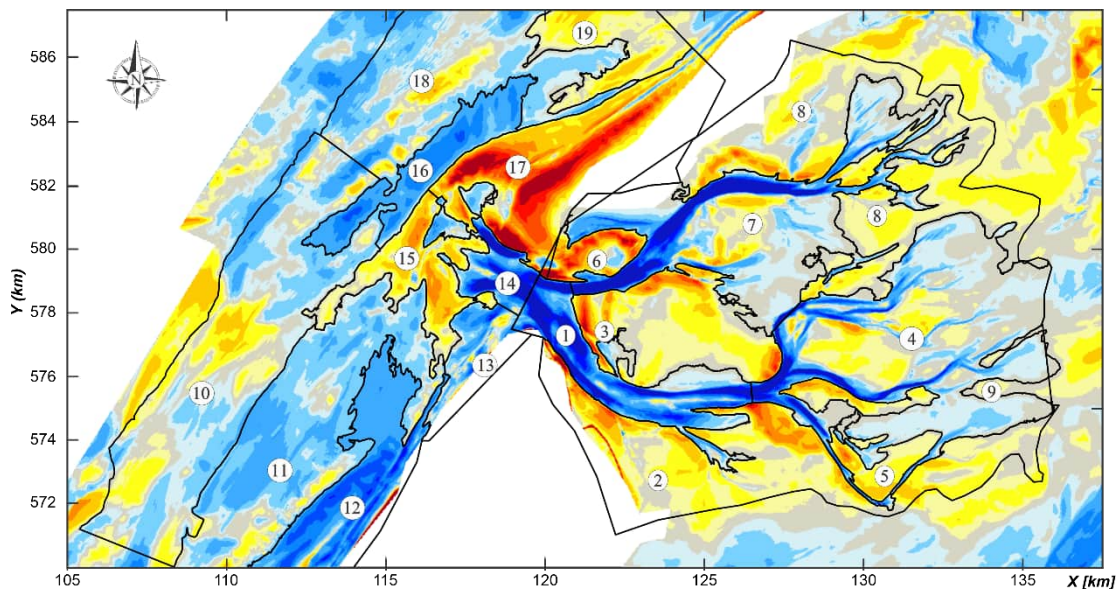
De toename in volume van het noordelijke deel van de buitendelta (polygoon 17) vertoont een doorgaande trend. Over de gehele periode ligt de toename op +0,4 miljoen m³/jaar. Deze waarde komt goed overeen met de huidige aanzanding van +0,5 miljoen m³/jaar. De aanzanding lijkt sinds 2006 sterk te versnellen ten opzichte van de voorgaande periode. Over de periode 1971 -2015 lag het gemiddelde met +0,3 miljoen m³/jaar lager.

(d) Buitendelta front en aangrenzende vooroever.

Het front van de buitendelta (16) vertoont eveneens een verdieping. Over de gehele periode ligt de trendwaarde op -0,2 miljoen m³/jaar . Kijken we naar de meest recente metingen (1990-2015) dan reduceert deze erosie tot een waarde van -0,1 miljoen m³/jaar. Een iets groter verlies (-0.2 miljoen m³/jaar) treedt op in de diepe vooroever (18). De volumetijdseries worden hier echter gedomineerd door grote uitschieters. Kijken we alleen naar de recente ontwikkelingen (1997-2015) dan verkrijgen we een schatting van -0,3 miljoen m³/jaar verdieping.

Bekken

Voor de volledigheid worden hier ook de resultaten voor het bekken beknopt samengevat. In totaal neemt het bekken met 38 miljoen m³ in sedimentvolume af. Dit is een gemiddeld verlies van 0,37 miljoen m³/jaar. Het merendeel van dit verlies treedt op in het Robbengat en het oostelijke deel van de Waardgronden (respectievelijk 31 en 24 miljoen m³ erosie). De volumes van de overige gebieden (voornamelijk platen) nemen toe in volume.



Gebied - Kust en buitendelta	Polygonen	Volume [miljoen m ³]
(a). Texel kust (Noord)	[10,11,12]	-60.53
(b). Buitendelta Zuid	[13,14,15]	-12.72
(c). Buitendelta West	[16]	-16.02
(d). Buitendelta Noord	[17]	38.51
(e). Vlieland kust (zuid)	[18,19]	-12.71
(f). Kust	[10-12,18-19]	-73.27
(g). Buitendelta	[13-17]	9.78
		Totaal kust+buitendelta = -63.46

Sedimentatie Erosie [m]:		
10.0 - 20.0	0.5 - 1.0	-3.0 - 2.0
5.0 - 10.0	0.2 - 0.5	-4.0 - 3.0
4.0 - 5.0	-0.2 - 0.2	-5.0 - 4.0
3.0 - 4.0	-0.5 - 0.2	-10.0 - 5.0
2.0 - 3.0	-1.0 - 0.5	-20.0 - 10.0
1.0 - 2.0	-2.0 - 1.0	

Gebied -bekken	Polygonen	Volume [miljoen m ³]
(a). Robbengat	[1]	-30.85
(b). Waarden	[2,5]	22.25
(c). Hengst	[3]	11.83
(d). Waardgronden oost	[4,9]	-23.56
(e). Vlieland zuid	[6]	7.00
(f). Keteldiep	[7]	-37.01
(g). Waardgronden noord	[8]	12.62
		Totaal bekken = -37.72

Figuur 5-2: Samenvatting van de volumes van de verschillende sedimentatie-erosie gebieden van het Eierlandse Gat over de periode 1932-2015 (bron: Elias et al. 2018). De tijdseries van volumeverandering voor de verschillende deelgebieden worden weergegeven in Appendix C, .

5.2 Volumeontwikkeling sinds 1987

5.2.1 Methode

Om de huidige morfologische veranderingen beter te begrijpen is de nieuwe methode, zoals toegepast in de studies naar de aanlandingsbanken van Schiermonnikoog (Elias, 2022) en Ameland (Elias et al. 2022), gebruikt. Deze methode gebruikt het begrip actieve bodemlaag als basis. De actieve bodemlaag wordt bepaald aan de hand van de minimum bodemligging, die gedefinieerd is als de onderkant van de morfologische enveloppe voor een bepaalde tijdsperiode (Pearson et al., 2022). Het sediment dat zich onder deze minimum bodem bevindt is over de beschouwde periode niet veranderd en heeft dus niet deelgenomen aan de morfologische veranderingen (de passieve bodemlaag). Alleen het deel van de bodem dat zich boven de minimum bodemligging bevindt neemt deel aan de morfologische verandering (de actieve bodemlaag).

Het verschil tussen de gemeten bodemligging en de minimum bodemligging geeft dan een schatting van de hoeveelheid sediment, de dikte van het sedimentpakket, die zich in de morfologisch actieve laag bevindt over de bekeken tijdsperiode. Let hierbij op dat de sedimenthoeveelheid in de actieve zone dus niet de toekomstige sedimentvoorraad weergeeft. Bij een structureel eroderend gebied (bijvoorbeeld een terugtrekkende eilandkop)

is de minimumbodem vrijwel gelijk aan de huidige bodem. Dit betekent dat het sedimentvolume van de huidige bodem dan nihil is.

De uitwerking van de methode bestaat uit 5 stappen.

Stap 1 – Optimalisatie van de bodemdata (Figuur 5-3A en Figuur 5-4A).

De Vaklodingen zijn gebruikt als basis voor de bodemkaarten. Missende datapunten zijn daarbij zo veel mogelijk ingevuld door het gebruik van aanvullende datasets (bijvoorbeeld Jarkus of LiDAR) of door interpolatie. De eilanden zijn ingevuld met het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN). Zie H3 voor een overzicht van deze data.

Stap 2 – Bepaling van de referentiebodem (Figuur 5-3B en Figuur 5-4B).

Bij de bepaling van de minimum bodem wordt per rasterpunt van het bodembestand gekeken of er in alle jaren een bodemwaarde aanwezig is. Als een waarde ontbreekt in één van de jaren wordt het punt niet meegenomen in de analyse. Het is daarom belangrijk om de gebruikte bodemdata daarom zo volledig mogelijk te maken voor aanvang van de analyse. In deze stap worden 2 referentiebodems aangemaakt. De eerste bevat het gehele zeevat (bekken + buitendelta). Deze bodem gebruikt alleen de volledig gevulde kaarten (Figuur 5-3B).

Een tweede referentiebodem gebruikt alle beschikbare bodem data. (Figuur 5-4B). Deze referentiebodem bevat dus alleen de kustzone (buitendelta, kust en eilanden). Omdat het bekken niet in alle jaren volledig gevuld is, wordt dit niet meegenomen in de bepaling van de referentiebodem. In de kustzone en op de buitendelta zijn de twee referentiebodems niet volledig identiek. Vanwege consistentie in de analyse wordt daarom in het overlappende deel de data van de totale dataset gebruikt (zoals weergegeven in Figuur 5-3B).

Stap 3 - Afbakening van het studiegebied (Figuur 5-3 en Figuur 5-4)

Afbakening van het Eierlandse Gat is gebaseerd op een grootschalige polygoon die begrensd wordt op de -10 m contour aan de zeezijde. Deze -10 m contour wordt per bodemopname opnieuw bepaald. De laterale begrenzing op de eilandkusten is gekozen op een vaste ligging. Bij Texel ligt deze loodrecht op de kust net ten noorden van de Slufter. Bij Vlieland is deze lijn gekozen ten noorden van de Vliehors. Aan de landzijde is een begrenzing gekozen die is gebaseerd op de plaatliggingen. Hiervoor is gekozen voor de meest ondiepe contouren die te onderscheiden zijn (deze liggen tussen de -0,50 en -1,0 m). Deze begrenzing wordt elk jaar opnieuw uitgevoerd. De totaal polygoon worden in Appendix C.1 in detail weergegeven. Alleen de bodemdata binnen de totaalpolygoon wordt in de analyse verder gebruikt.

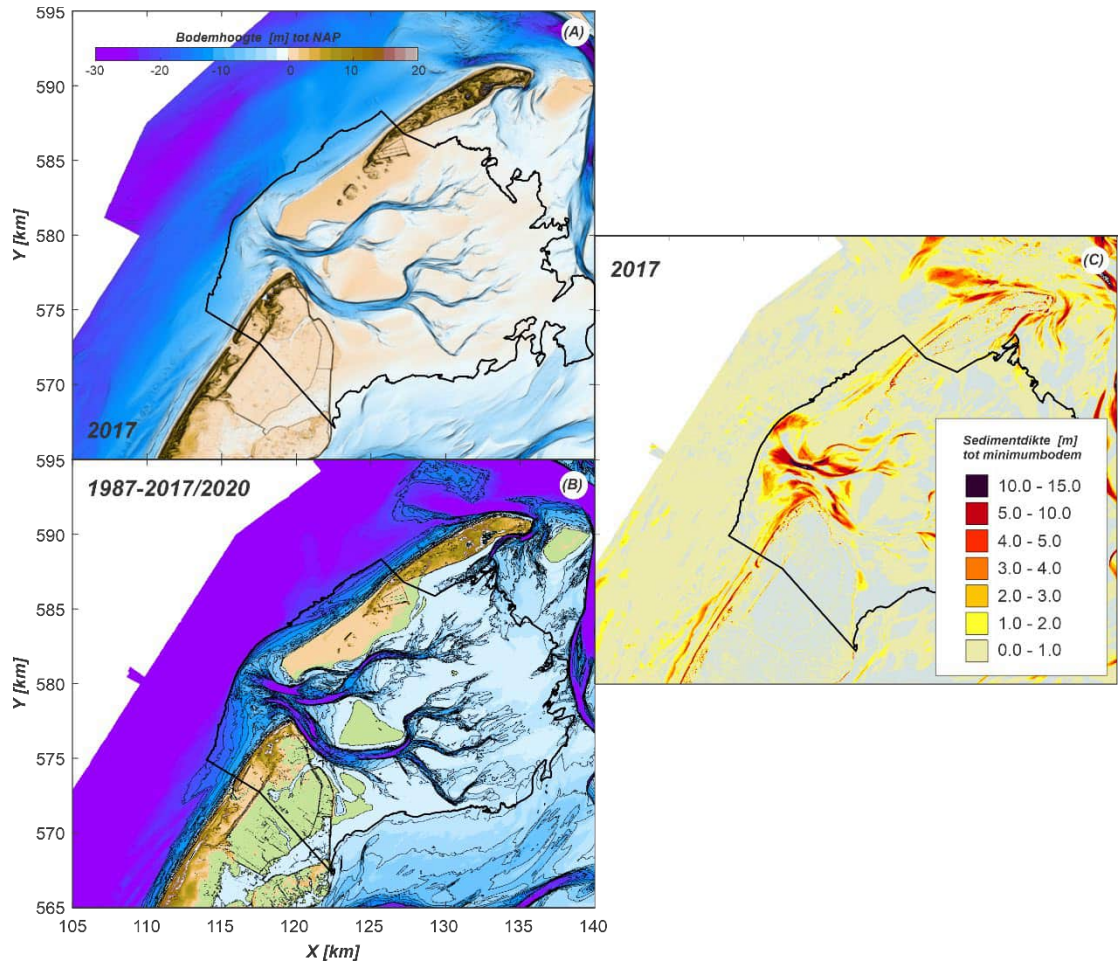
Stap 4 – Berekening dikte sedimentpakket (Figuur 5-3C en Figuur 5-4C)

Voor iedere gemeten bodem wordt het verschil in ligging met de minimum bodem uitgerekend. Dit verschil geeft de dikte van de actieve sedimentlaag voor de beschouwde meting. Door deze analyse uit te voeren op zowel de totale datasets (Figuur 5-3C) als op die van de kustzone (Figuur 5-4C) kunnen de totale volumes, die van de kustzone en die van het bekken (totaal-kustzone) worden bepaald.

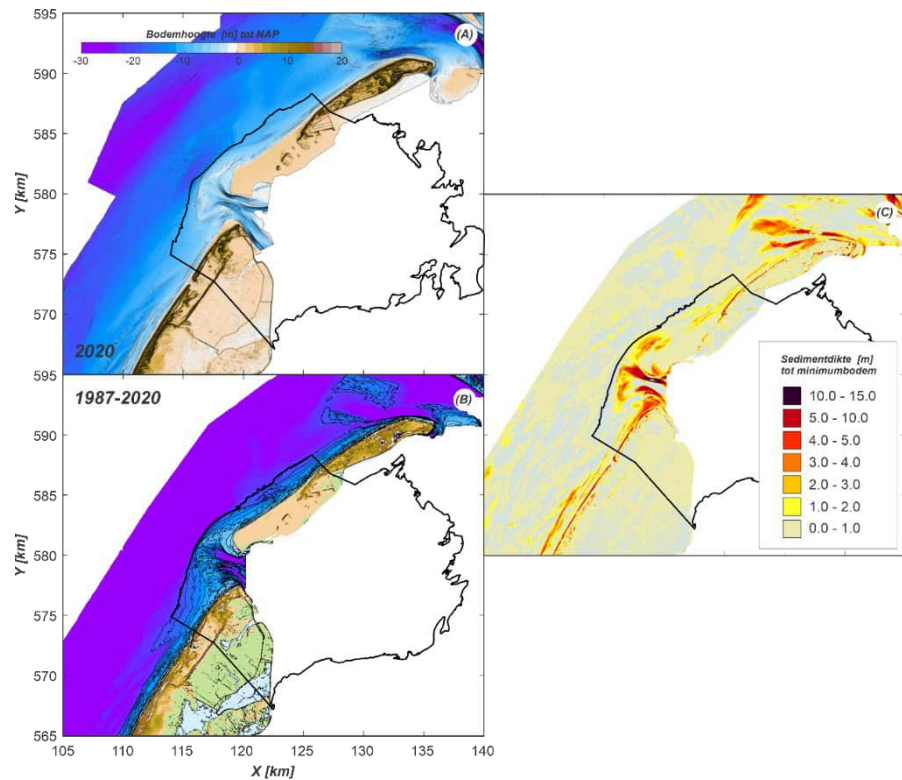
Stap 5 – Kwantificering van de volumes (Figuur 5-4)

Kwantificering van de volumes wordt dan uitgevoerd op verschillende representatieve polygoon. De grootschalige volumeverandering is bepaald voor de diepteklassen -6 m, -3 m en -1 m (Figuur 5-4A). Een gedetailleerde volumebepaling van de platen is gebaseerd op de -0,75, -0,50 en -0,25 m contouren. De volumes van de eilanden zijn bepaald op basis van de 0 m, +1 m en +2 m contouren. Voor de eilandstaart van Texel maakt het niet heel veel uit welke contour beschouwd wordt. Voor Vlieland is er een duidelijk verschil. De 0 m en +1 m contouren geven een goed beeld van de Vliehors. De +1 m contour is daarbij het meest

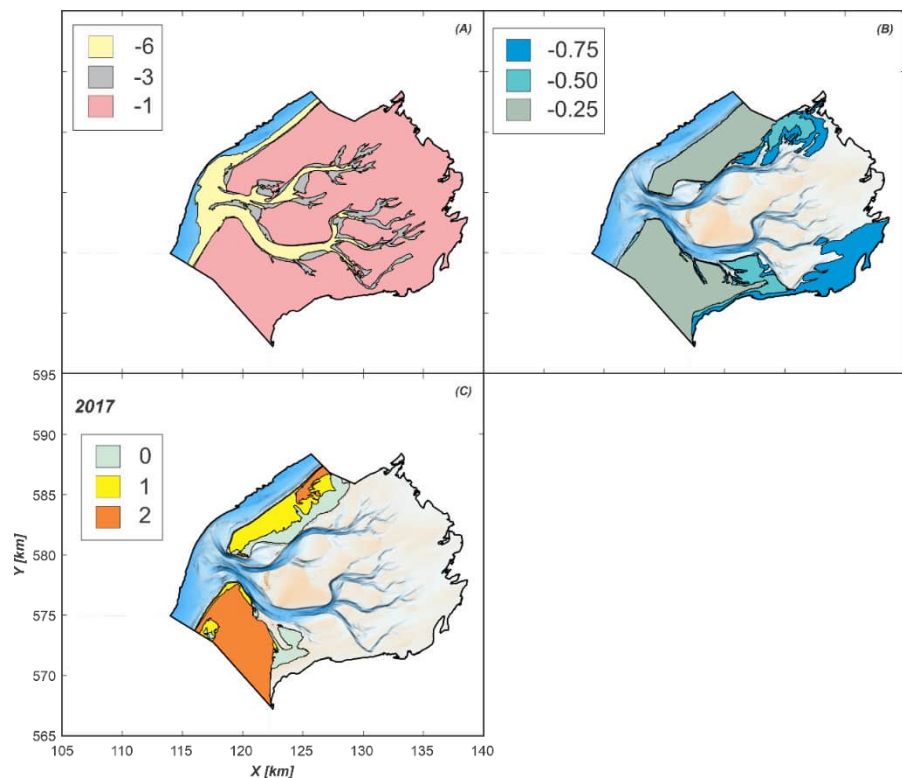
representatief voor de strandvlakte. In de 0 m contour zit een groot ondiep plaatareal aan de Waddenzijde. De +2 m contour geeft een goede afbakening van de duinen.



Figuur 5-3: Een overzicht van de methode ter berekening van de sedimentvolumes van het gehele zeegat. (A) gemeten bodemligging in 2017. (B) de minimum bodemligging tussen 1987 en 2017 in het bekken en 1987-2020 in de kustzone, (C) dikte van de sedimentlaag in 2017.



Figuur 5-4: Een overzicht van de methode ter berekening van de sedimentvolumes van de kustzone. (A) Gemeten bodemligging in 2017. (B) De minimum bodemligging tussen 1987 en 2020 en (C) dikte van de sedimentlaag in 2020.



Figuur 5-5: Overzicht van de verschillende dieptecontouren waar de volumes voor zijn bepaald. (A) Grootschalige volumes aan de hand van de -6m, -3m en -1m contourlijnen. (B) Bekken volumes aan de hand van de -0,75, -0,50 e -0,25 m contouren en (C) Eilandvolumes door middel van de 0 m, +1 m en +2m contouren. In dit voorbeeld zijn het de contouren op basis van de 2017 bodemkaart. Voor iedere bodem worden deze contouren opnieuw aangemaakt.

5.2.2 Resultaten

5.2.2.1 Uitwisseling tussen bekken en buitendelta

De volumeontwikkeling van het gehele zeegat wordt weergegeven in Tabel 5-1 en Figuur 5-6. Het gehele zeegat, begrensd door de -10 m contour aan de Noordzeezijde en de begrenzing in de Waddenzee (zie vorige hoofdstuk), vertoont geen verandering in volume. Wel zijn er grote uitschieters in de volumetijdseries zichtbaar (bijv. in 1993 en 2011). De verandering van de gehele volume balans is nihil, omdat sedimentatie van de eilanden (+ 16,6 miljoen m³) de erosie van zowel bekken (-10,3 miljoen m³) als buitendelta (-7,1 miljoen m³) compenseert. Op basis van de trendlijn neemt het volume van het bekken met -0,47 miljoen m³/jaar af. Deze waarde ligt iets hoger dan de -0,37 miljoen m³/jaar zoals geobserveerd in Elias (2018), maar dit komt vooral door de grote erosie tussen 2011 en 2017.

De buitendelta, afgebakend tussen -10 m en 0 m neemt met 7 miljoen m³ in volume af tussen 1987 en 2017. Deze afname is vrijwel continu door de tijd en heeft een trendwaarde van -0,25 miljoen m³/jaar. De eilanden nemen in volume toe. Het gebied tussen de 0 en +2 m contour, representatief voor strand en wadplaten die onderdeel van het eiland vormen, nemen met 16,6 miljoen m³ in volume toe. Het merendeel van deze toename is gerelateerd aan groei van de Vliehors.

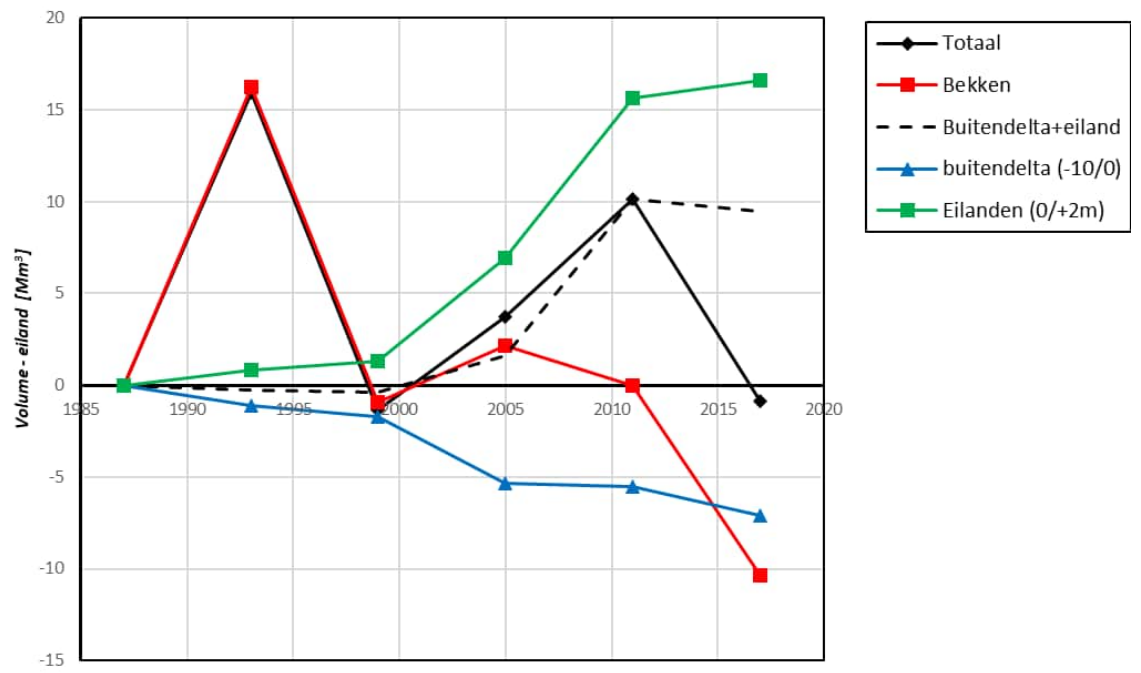
Tabel 5-1: Overzicht van de volumeontwikkeling van de buitendelta. Volumes bepaald t.o.v. de minimumbodembodem over de periode 1987-2017. De ontwikkeling van de volumes t.o.v. de 1987 bodem wordt weergegeven in Figuur 5-6.

Jaren	Volume [miljoen m ³]				Oppervlakte [miljoen m ²]			
	Buitendelta ⁽¹⁾	Eilanden ⁽²⁾	Bekken ⁽³⁾	Totaal	Buitendelta	Eilanden	Bekken	Totaal
	-10 - 0m	> 0 en < +2m	Tot wantij	-10 - +2 m	-10 - 0m	> 0 en < +2m	Tot wantij	-10 - +2 m
1987	68,28	9,82	96,74	174,84	103,04	36,43	219,59	359,06
1993	67,19	10,62	113	190,81	102,83	36,62	231,01	370,46
1999	66,57	11,12	95,82	173,51	101,98	36,03	214,04	352,05
2005	62,95	16,76	98,88	178,59	101,44	38,62	211,81	351,87
2011	62,73	25,49	96,74	184,96	101,45	39,77	216,31	357,53
2017	61,16	26,4	86,4	173,96	100,98	38,89	213,11	352,98
Gemiddeld	64,81	16,70	97,93	179,45	101,95	37,73	217,65	357,33

(1). Het volume dat zich tussen de -10 en 0 m contour bevindt. Dit volume wordt representatief geacht voor de buitendelta.

(2). Eilanden zijn hier gedefinieerd als het volume tussen de 0 en +2m contourlijnen.

(3). Het bekken is afgebakend d.m.v. de -0,75 / -1m contouren (zie methode).



Figuur 5-6: Volumeontwikkeling van het gehele zeevat, de buitendelta, bekken en eilanden over de periode 1987-2017.

Eilanden

De volumeontwikkeling van de eilandkop (> 0m) van Texel en de eilandstaart van Vlieland wordt weergegeven in Figuur 5-7. Zowel de eilandkop van Texel als de zuidzijde van Vlieland zijn sinds 1987 in volume toegenomen. De volumetoename van Texel is beperkt tot 2 miljoen m³. Het strandvolume, tussen de 0 en 2 m contourlijn, is wel duidelijk in volume toegenomen (+ 4,8 miljoen m²), maar het volume omsloten door de 2 m contourlijn is juist met 2,8 miljoen m² afgenomen. De totale verandering is daardoor beperkt. Het grootste deel van de volumetoename treedt op in de zone tussen de 1 en 2 m. De aanzanding rond de Eierlandse dam speelt hierin een belangrijke rol.

De volumeontwikkeling van de +2m contour bevat wel een grote mate van onzekerheid. Deze contour omsluit een groot oppervlakte dat voornamelijk met het AHN is opgevuld. Binnen de contour bevinden zich de duinen, waardoor een kleine onnauwkeurigheid in hoogte of positie tussen de verschillende AHN opnamen hier tot relatief grote netto veranderingen kan leiden.

De zuidzijde van Vlieland neemt met bijna 12 miljoen m³ in volume toe. De duinen (> 2 m) vertonen een continue toenemende trend. In totaal nemen deze met 2,4 miljoen m³ toe (hier geldt een gelijke observatie als bovenstaand). De Vliehors, gedefinieerd door de 0 tot 2 m contour, neemt met 9,4 miljoen m³ toe. Deze toename vindt plaats tussen 2005 en 2011. De toename tussen 2011 en 2017 is beperkt (< 0,5 miljoen m³). Een mogelijke verklaring voor de volumetoename tussen 2005 en 2011 is het ontbreken van aanlandingsbanken op de buitendelta. In deze periode landden er continu kleine banken aan op de Vliehors. Na 2014 is juist te zien dat er weer een grote aanlandingsbank vormt op de buitendelta. Het is dan waarschijnlijk dat het sediment hier eerst accumuleert en niet op de Vliehors. Na aanlanding zal de Vliehors dan juist weer sterk uitbreiden.

Tabel 5-2: Overzicht van de volumes van de eilandkoppen. Volumes bepaald t.o.v. de minimumbodemp over de periode 1987-2020. De ontwikkeling van de volumes t.o.v. de 1987 bodem word weergegeven in Figuur 5-7.

Jaren	Eierland				Vlieland (Vliehors)			
	>0 m ⁽¹⁾	0-1 m ⁽²⁾	1-2 m ⁽²⁾	> 2m ⁽³⁾	>0 m ⁽¹⁾	0-1 m ⁽²⁾	1-2 m ⁽²⁾	> 2m ⁽³⁾
1987	13.73	1.66	0.54	11.53	7.62	4.22	1.71	1.69
1993	14.41	2.27	0.89	11.25	7.46	2.98	2.34	2.14
1999	15	1.87	1.47	11.66	7.78	2.86	2.73	2.19
2005	17.13	2.94	3.3	10.89	10.52	5.13	2.39	3
2011	14.94	2.41	4.1	8.43	18.98	8.76	6.51	3.71
2017	15.74	2.82	4.21	8.71	19.37	8.57	6.71	4.09

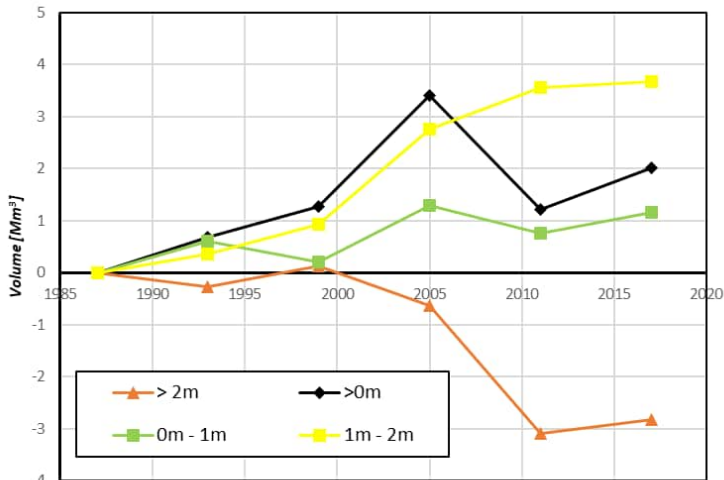
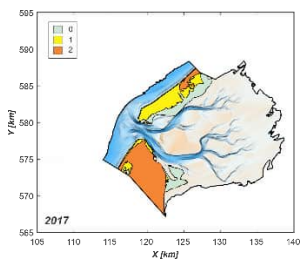
(1). Dit volume betreft het totale actieve volume dat zich landwaarts van de 0 m contourlijn bevindt.

(2). Het volume dat zich tussen de 0 en +1m contourlijnen bevindt. Dit volume is representatief voor de platen aan de waddenzijde.

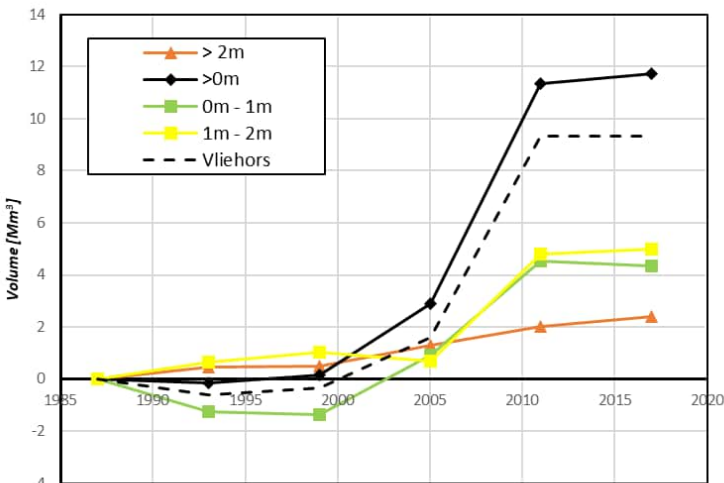
(3). Het volume dat zich tussen de +1m en +2m bevindt. Dit volume is met name de strandzone van Texel en de Vliehors.

(4). De +2m contourlijn is gebruikt als landwaartse begrenzing. Deze polygoon omsluit dus alle landwaarts gelegen punten.

(a). Eierland



(b). Vlieland - Vliehors



Figuur 5-7: Volumeontwikkeling van Eierland en Vlieland (Vliehors)

5.2.2.2 Buitendelta

De volumeontwikkeling van de buitendelta wordt weergegeven in Tabel 5-3 en Figuur 5-8. In deze volumebalans zijn ook de 3-jaarlijkse metingen meegenomen in de analyse. Deze metingen bevatten niet de volledige eilanden. Hierdoor is het niet mogelijk om voor alle jaren de volumes boven de 0 m lijn nauwkeurig te bepalen. In deze analyse is de buitendelta dan ook afgebakend tussen de -10 m en 0 m. Het volume in deze zone neemt tussen 1987 en 2020 met bijna 7 miljoen m³ in volume af. Nemen we de groei van de eilanden mee, dan zou het totaal juist in volume toenemen (+5,5 miljoen m³).

Het oppervlakte van de buitendelta neemt gedurende de periode af van 48,8 m² naar 44 m². Deze afname vindt vooral plaats tussen 1993 en 2014, sindsdien lijkt de omvang te stabiliseren. Het is mogelijk dat ook hier de (tijdelijke) verstoring van de sediment-bypassing op de buitendelta een rol speelt.

Duidelijk zichtbaar in de volumetijdseries (Figuur 5-8) is dat erosie van de buitendelta zich concentreert in de diepere contourklasse (tussen de -6 en -10 m). Dit is overeenkomstig met het sedimentatie-erosiepatroon zoals getoond in Figuur 5-2. De klasse -3 tot -6 m neemt vooral sinds 2005 toe. Dit lijkt gerelateerd te zijn aan de bankvorming op de noordzijde van de buitendelta.

Tabel 5-3: Overzicht van de volumeontwikkeling van de buitendelta. Volumes bepaald t.o.v. de minimumbodem over de periode 1987-2020. De ontwikkeling van de volumes t.o.v. de 1987 bodem wordt weergegeven in Figuur 5-7.

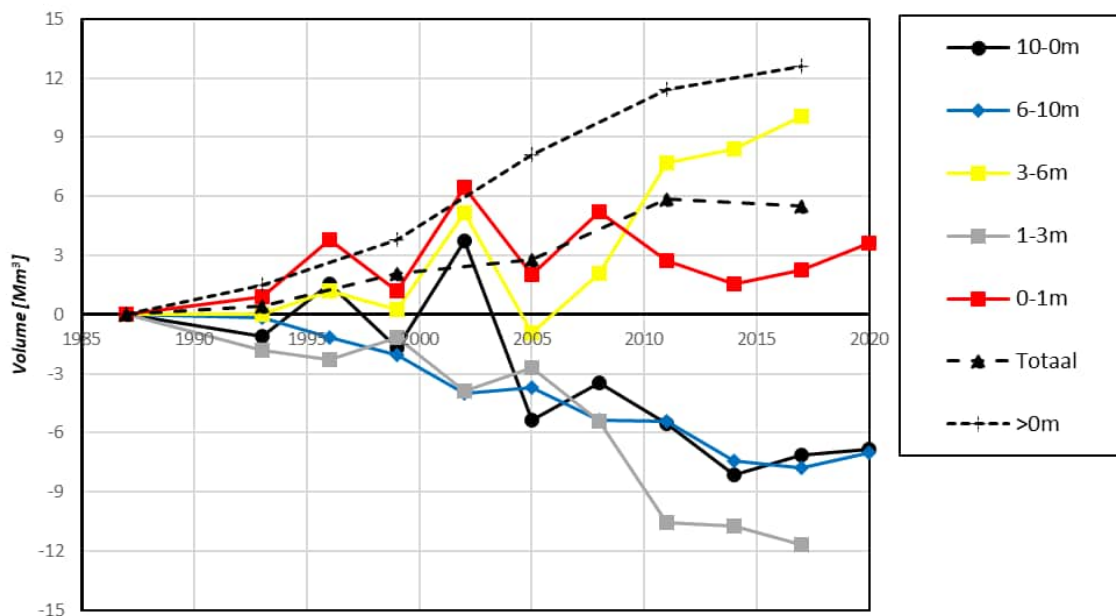
Jaren	Volumes [miljoen m ³]						Oppervlakte [Km ²] ⁽⁴⁾
	>-10 m ⁽¹⁾	10-0m ⁽²⁾	10-6 m ⁽³⁾	6-3 m ⁽²⁾	3-1 m ⁽³⁾	0-1 m ⁽³⁾	
1987	84.2	68.28	14.37	40.37	52.9	53.91	48.61
1993	84.62	67.19	14.19	40.4	51.1	53	48.12
1996	85.46	69.85	13.21	41.57	51.83	56.64	-
1999	86.31	66.57	12.35	40.62	51.99	54.22	46.56
2002	89.27	72.01	10.35	45.55	54.2	61.66	-
2005	86.99	62.95	10.67	39.45	49.26	52.28	45.03
2008	85.65	64.8	9.04	42.46	49.55	55.76	-
2011	90.07	62.73	8.94	48.09	50.06	53.79	44.68
2014	88.78	60.13	6.95	48.79	50.61	53.18	44.01
2017	89.7	61.16	6.59	50.44	51.28	54.57	43.97
2020	90.5	61.42	7.39	40.87	49.4	54.03	-

(1). Dit volume betreft het totale actieve volume dat zich landwaarts van de -10 m contourlijn bevindt (inclusief de eilanden).

(2). Het volume dat zich tussen de -10 en 0 m contour bevindt. Dit volume wordt representatief geacht voor de buitendelta.

(3). Het volume dat zich tussen de verschillende contourklassen bevindt.

(4) Oppervlakte van de buitendelta tussen de -10m en 0 m contour. De oppervlakten zijn alleen gegeven voor de volledig gevulde kaarten.



Figuur 5-8: Volumeontwikkeling van geselecteerde contourklassen op de buitendelta van het Eierlandse Gat.

6 Samenvatting; Een conceptueel model voor het Eierlandse Gat

In de vorige hoofdstukken is de detailontwikkeling van het Eierlandse Gat beschreven. In dit afsluitende hoofdstuk wordt de kennis samengevat in een serie conceptuele modellen. Deze conceptuele modellen vormen ook de conclusies van dit onderzoek. Het schaal-cascade model wordt daarbij gebruikt als kapstok om de morfologische ontwikkeling van het Eierlandse Gat op de verschillende tijd- en ruimteschalen te beschrijven en beter te begrijpen. Naast het schaal-cascade model wordt de ontwikkeling van de buitendelta in een conceptueel model samengevat en uitgezet op een tijdlijn.

6.1 Een schaalcascade model van het Eierlandse Gat

Aan de hand van het uitgevoerde onderzoek kunnen verschillende elementen en verbanden van het schaalcascade model worden ingevuld (Figuur 6-2). Op de langetermijnschaal (schaal 1) spelen met name menselijke ingrepen een rol. De effecten van zeespiegelstijging zijn vanuit de meetdata niet direct te observeren. De belangrijkste menselijke ingreep is het samenvoegen de eilanden Eierland en Texel door aanleg van een stuifdijk (1930). De aanleg van een stuifdijk en de daarop volgende inpolderingen aan de Waddenzijde vormt de basis van de huidige eilandstaart van Texel. Het lijkt waarschijnlijk dat ook de afsluiting van de Zuiderzee (1932) en de daarop volgende aanpassing van de hydrodynamica het zeegat heeft beïnvloed. Endema (1978) observeert dat omstreeks 1932 een verbreding van het zeegat optreedt van gemiddeld 2000 m vóór tot gemiddeld 3000 m ná 1932. Vanuit het morfologische gedrag van de buitendelta, maar ook de configuratie van de geulen in het bekken, lijken de morfologische processen op de buitendelta echter niet sterk beïnvloed te worden.

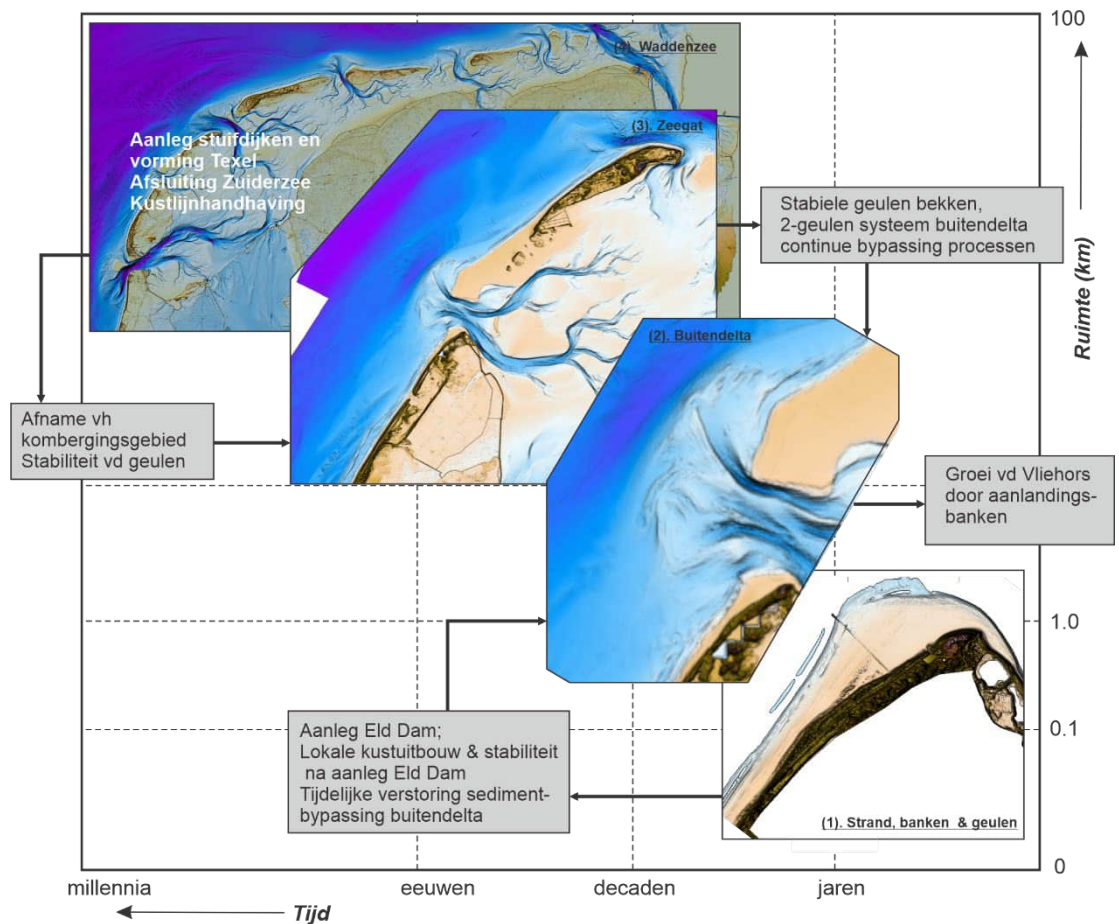
Kustlijnhandhaving speelt een belangrijke rol voor de toekomstige langetermijnontwikkeling van de eilandkusten. Door het sinds 1990 gehanteerde principe van dynamisch handhaven wordt de kustlijn immers door zandsuppleties gehandhaafd. Door zeespiegelstijging of andere langetermijninvoeden kan het volume of de frequentie van deze suppleties veranderen, maar niet de ligging van de kustlijn. Dit betekent in essentie dat de positie van de eilanden vast ligt en de zeegaten een evenwicht moeten vinden met deze vaste ligging en het kombergingsvolume van het achterliggende bekken. Grootschalige migraties van de eilanden en zeegaten zoals die in het verleden hebben plaatsgevonden zijn nu slechts beperkt mogelijk. In principe zou de Vliehors nog wel een dynamiek kunnen vertonen omdat hier niet direct gehandhaafd wordt.

Op de schaal van het gehele zeegat (schaal 3) zijn de veranderingen beperkt. Het zeegat vertoont een 2-geulen configuratie in de keel. Deze twee geulen, Robbengat en Engelsmangat, worden gevoed door de twee vertakkingen (Vogelzwin en Keteldiep) in het bekken. Deze geulen vertonen al decennia lang een stabiele ligging. Al in de eerste gedetailleerde bodemkaart van 1850 is deze geulconfiguratie zichtbaar. Hierdoor is ook de aansturing van de buitendelta op grote schaal stabiel. Op de buitendelta treden wel grote morfologische veranderingen in de liggingen van de geulen en platen op. Deze variaties zijn onderdeel van het “sediment-bypassing” proces. Sediment bypassing beschrijft de verplaatsing van zand van het bovenstroomse (Texel) naar het benedenstroomse eiland (Vlieland). Deze bypassing gaat vaak gepaard met de vorming en migratie van banken op de buitendelta die uiteindelijk verhelen met het benedenstroomse eiland en met het verplaatsen, verdwijnen en periodiek hervormen van geulen. Met name het Engelsmangat vertoont een

duidelijk periodiek gedrag. Elke 15 tot 25 jaar vormt een aanlandingsbank en heroriënteert het Engelsmangat van een noordwestelijke naar westelijke uitstroomgeul (zie H.6.2 voor details).

Het vormen, verplaatsen en verhelen van aanlandingsbanken is een belangrijk proces voor de natuurlijke kustontwikkeling van Vlieland (schaal 1). Deze banken dragen bij aan de grootschalige volumetoename van de Vliehors. De Vliehors is tussen 1987 en 2017 met bijna 10 miljoen m³ in volume toegenomen. De zuidzijde van het zeegat wordt vooral beïnvloed door menselijke ingrepen. Door aanleg van de bolwerken in 1948 en 1958 is de eilandkop vastgelegd en blijft het Robbengat dicht langs deze bolwerken liggen. Ondanks de harde kustverdediging zijn uitgebreide zandsuppleties benodigd om de kustlijn te behouden. Door aanleg van de Eierlandse dam in 1995 ontstaat een breed strand direct om de eilandkop heen. Zandsuppleties aan de zuidzijde van de dam zijn echter nog steeds nodig. Deze zandsuppleties zorgen er wel voor dat de zandtoevoer vanaf de kust van Texel naar het Eierlandse gat en sediment bypassing over de buitendelta behouden blijft.

De Eierlandse dam zorgt lokaal voor een verstoring van de kustlijn. Na aanleg is deze ver zeewaarts verplaatst en vormen zich aan de zuidzijde nieuwe duinen. Op de schaal van de buitendelta heeft de Eierlandse dam waarschijnlijk wel voor een tijdelijke verstoring van de morfologische processen gezorgd. Zo worden er tijdelijk geen aanlandingsbanken gevormd richting de Vliehors. De vorming van aanlandingsbanken lijkt zich in de meest recente opname weer te hebben hersteld. Het lijkt er dus niet op dat deze dam de processen voor een wat langere tijd significant beïnvloedt. Er lijkt ook geen verstoring van de processen in de geulen van het bekken op te treden. Een invloed van veranderingen op de buitendelta op de schaal van het zeegat kan niet direct worden geïdentificeerd.



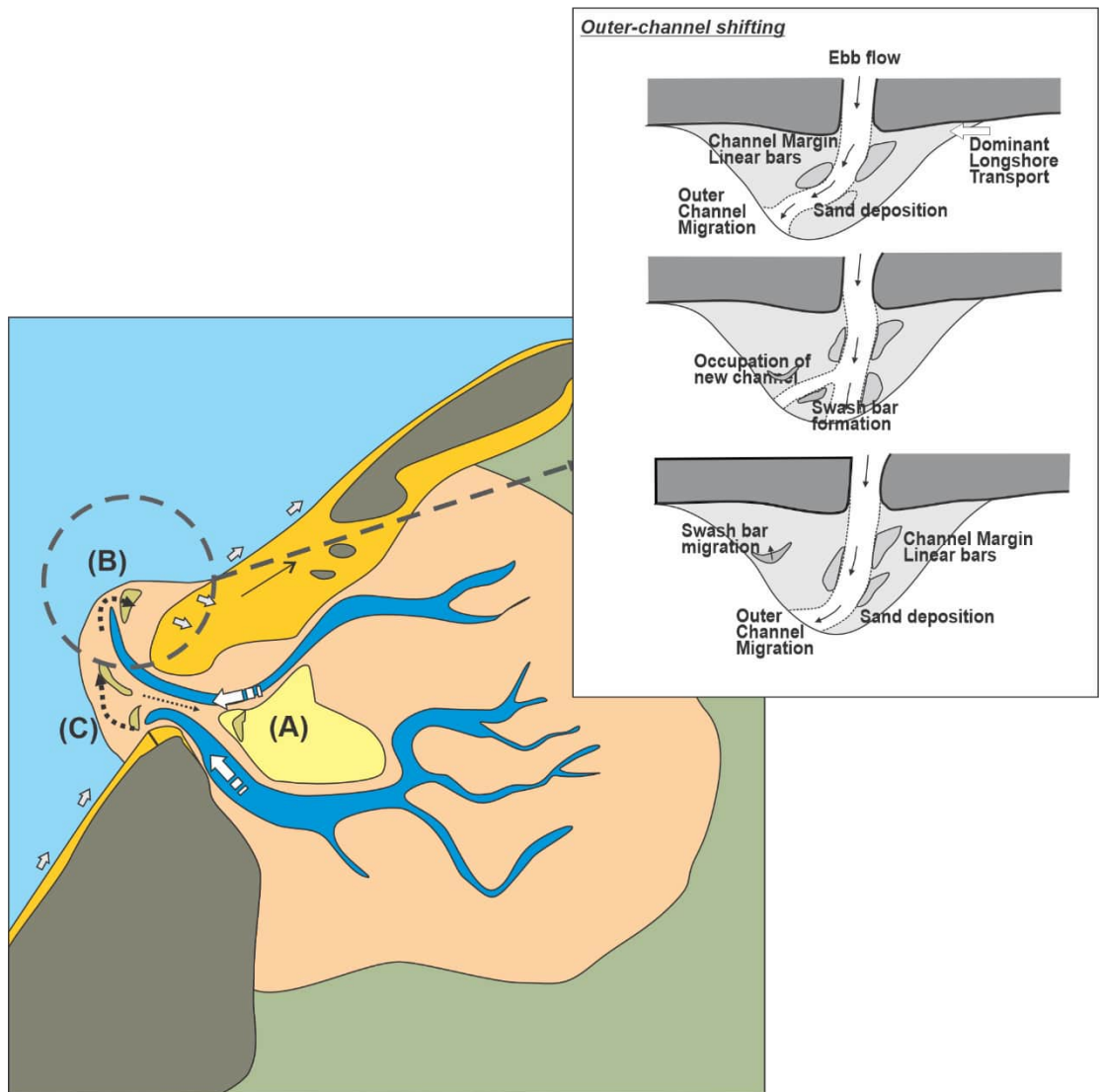
Figuur 6-1: Een schaalcascade voor de dominante processen op de buitendelta van het Friesche Zeegat. Per schaalniveau zijn ook de relevante processen en uitwisselingen weergegeven.

6.2 Een weergave van het middellange termijn gedrag van de buitendelta

De middellange termijn processen hebben een grote invloed op de naastgelegen eilandkop en -staart. Door verplaatsingen van geulen en banken kunnen hier (periodiek) grote veranderingen optreden. Een conceptueel model dat de morfologische ontwikkeling van het Eierlandse Gat beschrijft op deze middellange termijn (schaal 2 en 3 van de schaal cascade) wordt weergegeven in Figuur 6-2. Dit conceptuele model bestaat uit 3 elementen

- vaste ligging van de geulen en banken in het bekken,
- periodieke sedimentuitwisseling Vliehors (outer-channel shifting; zie ook uitsnede in Fig 6-2) ofwel de morfodynamiek van het Engelsmangot (Noordelijke buitendelta),
- morfodynamiek van Robbengat (Zuidelijke buitendelta).

Deze morfologische ontwikkelingen zijn conceptueel uitgezet op een tijdlijn in Figuur 6-3.



Figuur 6-2: Een conceptuele weergave van de morfologische veranderingen op de buitendelta van het Zeegat van Eierland. Rechtsboven, conceptuele sediment-bypassing model van outer-channel shifting (Fitzgerald et al., 2000).

(A). Vaste ligging van de geulen en banken in het bekken

Het bekken van Eierland wordt gekenmerkt door 2 geulensystemen gescheiden door een groot bankoppervlak. Dit bankoppervlak zorgt ervoor dat deze twee geulen gescheiden blijven en dat er geen enkele hoofdgeul in de keel van het zeegat ontstaat. De twee geulen, het Robbengat in het zuiden en het Keteldiep in het noorden, stromen uit op de buitendelta of maken verbinding met een uitstroomegul de buitendelta op.

(B). Morfodynamiek van Engelsmangat (Noordelijke buitendelta)

Het noordelijke geulensysteem vertoont een consistent, periodiek gedrag door de gehele tijdserie. Het Keteldiep stroomt via het Engelsmangat uit over de buitendelta. Het Engelsmangat migreert daarbij periodiek van west naar noordwest en hervormt dan weer met een westelijke oriëntatie. Deze cyclus is al zichtbaar sinds de 19^{de} eeuw en heeft een herhalingsperiode van zo'n 15 tot 25 jaar (Figuur 6-3). De cyclus kan worden beschreven door het conceptuele model van "outer channel shifting" (FitzGerald et al. 2000). Deze vorm van sediment bypassing wordt gekenmerkt door beperkte aanpassingen van de buitendelta. De aanvoer van sediment vanaf de bovenstroomse zijde wordt vooral door de hoofdgeul zeevaarts verplaatst waardoor een groot ebschild ontstaat. Golfbreking op het ebschild zorgt

voor een oostwaartse verplaatsing van het ebschild en drukt daarbij de achterliggende geul ook oostwaarts; het landwaartse deel van de geul blijft hierbij stabiel liggen. Met de oostwaartse verplaatsing van de uitstroomgeul wordt de geul steeds minder efficiënt. Op een gegeven moment vormt er een nieuwe uitstroomopening aan de westelijke (bovenstroomse) zijde van de bank, waarna het proces herstart. Het westelijk hervormen is niet alleen een gevolg van de rotatie van de geul, maar hier speelt ook de westelijke uitstroom van het Keteldiep en het getijverhang tussen het zeegat en de Noordzee een rol (Sha, 1989). Met iedere cyclus wordt een deel van het ebschild opgenomen in het benedenstrooms gelegen platform en ontstaan er aanlandingsbanken die onder invloed van golven landwaarts migreren en uiteindelijk verhelen met de kust (Vliehors).

Een belangrijk verschil tussen de conceptuele weergave van FitzGerald et al. (2000) en de situatie van het Eierlandse Gat is de kustlangse aanvoer van het sediment. Het Eierlandse Gat wordt niet rechtstreeks door de langstransporten van Texel gevoed, maar deze uitwisseling vindt plaats via het zuidelijke deel van de buitendelta. Hier speelt de dynamiek van het Robbengat een belangrijke rol.

(C). Morfodynamiek van Robbengat (Zuidelijke buitendelta)

De morfodynamiek van het zuidelijke deel van de buitendelta is complexer dan die van het noordelijke deel. Deze complexiteit uit zich in:

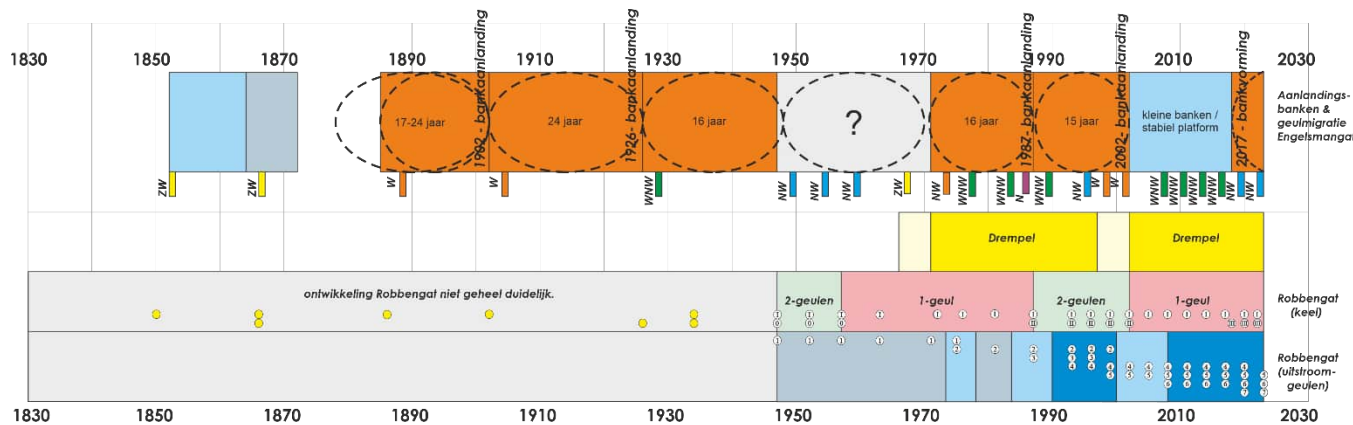
- Het Robbengat bestaat soms uit een enkele hoofdgeul en soms uit 2-geulen gescheiden door een langgerekte drempel.
- Er vormen er zich zowel eb- als vloedgeulen om de kop van Eierland heen.
- De ebgeul is soms ontwikkeld als enkele geul met een duidelijk ebschild en soms bestaat het uit meerdere kleine ebschaar en -schildsystemen
- De morfologische ontwikkelingen worden (tijdelijk) beïnvloedt door de aanleg van de Eierlandse dam.

Het zuidelijke deel wordt aangestuurd vanuit het Vogelzwin/Robbengat. Periodiek vormt zich een drempel in het Robbengat die het diepe deel van de geul scheidt in twee delen. De landwaarts gelegen geul migreert hierbij oostelijk waarna deze verzandt. Het zeewaartse deel van het Robbengat stroomt uit over het zuidelijke deel van de buitendelta. Een westelijk gerichte uitstroom vormt langs de kust van Texel, waarna deze geul zich noordwestelijk heroriënteert. Met een noordwestelijke richting ligt de geul in het verlengde van het Robbengat en strekt zich dan ver uit het zeegat in. Tijdens de westelijke oriëntatie ontstaat een drempelgebied, een ondiepe bank (Dwars in de Weg) tussen het Robbengat en Engelsmangat. Over deze banken verplaatsen kleinere banken zich van west naar oost. Deze drempel lijkt dan ook een belangrijke aanvoerroute voor de achterliggende bank (Hengst).

De periodieke migratie van de uitstroomgeul van een westelijke naar een noordwestelijke richting heeft een aantal redenen. Vanuit het bekken is de meest efficiënte uitstroming een geul die noordwestelijk gericht is, in het verlengde van het Robbengat. Deze noordwestelijke richting is in competitie met de voorkeursrichting opgelegd vanuit de kustzone. In principe ontwikkelt bij een zeegat altijd een vloedgeul om de eilandkoppen heen. Dit komt door de inertia van de stroming (ebb-tidal jet). Kentering op zee is eerder dan kentering van de ebuitstroming vanuit het bekken. Deze interactie bepaalt de richting van uitstroom (Sha, 1989). Daarnaast bestaan er grote stromingen in het midden van het zeegat, waardoor de vloedstroming zich langs de eilandkoppen concentreert. Verder resulteert het verschil in verhang tussen het getij in zee en het getij in het bekken in een voorkeursrichting in benedenstroomse geulvorming. Dit werd in het verleden ook wel het motorisch vermogen genoemd. Ook golfbreking op de gevormde banken speelt een rol. De processen die hier spelen zijn vergelijkbaar met die van het Engelsmangat (outer-channel shifting).

In het Engelsmangat is een duidelijke periodiciteit van de morfologische ontwikkeling zichtbaar. Dit is niet het geval in het zuidelijke deel van de buitendelta. De uitstroomegeul is hier veel minder sterk ontwikkeld. Er zijn perioden met een grotere uitstroomegeul, maar ook perioden waarin vele kleinere ebscharen vormen. Zo zijn sinds 1990 veelal drie kleinere uitstroomegeulen zichtbaar. Deze kleinere ebscharen zijn dynamisch en migreren snel. De ontwikkelingen lijken op die zoals geobserveerd bij de ebschild en -schaar vorming bij Ameland (Elias et al. 2019).

De aanleg van de Eierlandse dam zorgde er waarschijnlijk voor dat de dynamiek tijdelijk verstoord werd. Er vormde zich na aanleg tijdelijk een grotere geul direct om de dam heen gevolgd door een periode met meerdere uitstroomegeulen die alleen een relatief groot ebschild vormden. Het lijkt waarschijnlijk dat er zich dan tijdelijk meer zand afzet op het zuidelijke deel van de buitendelta, waardoor de toevoer richting het Engelsmangat afneemt. Het Engelsmangat bouwt dan geen nieuwe aanlandingsbank, maar een periode met stabiele geul en continue verplaatsing van kleinschalige banken richting de Vliehors volgt. De meest recente bodemdata laat wel zien dat de natuurlijke dynamiek zich heeft hersteld.



Figuur 6-3: Een samenvatting van de geobserveerde ontwikkelingen van het zeegat van het Vlie. De nummering verwijst naar Figuur 4-6 tot en met Figuur 4-9.

7 Conclusies

Het Eierlandse Gat is het kleinste zeegat van de Westelijke Waddenzee en ligt ingeklemd tussen de eilanden Texel en Vlieland. Ondanks de beperkte omvang van het zeegat zijn er wel 2 hoofdgeulen op de buitendelta aanwezig en kan de buitendelta verdeeld worden in een zuidelijk en een noordelijk deel met verschillend morfologisch gedrag. Het noordelijke deel (Engelsmanggat) vertoont een duidelijke periodieke ontwikkeling van geulen en banken. Als onderdeel van deze cyclus ontstaan grote aanlandingsbanken die elke 15-25 jaar op de Vliehors aanlanden. Het zuidelijke deel wordt gedreven door het Robbengat en is zeer dynamisch met een afwisseling tussen één en meer-geulen configuraties.

De morfologische ontwikkeling van het Eierlandse Gat is in het verleden sterk beïnvloed door menselijk ingrijpen. De effecten van natuurlijke processen zoals bijv. zeespiegelstijging zijn hierdoor niet direct zichtbaar. Het huidige zeegat ontstaat door het samenvoegen van de eilanden Eierland en Texel (in 1930) en diverse inpolderingen. De Eierlandse eilandkop wordt sindsdien in stand gehouden door kustverdedigingswerken. De “Bolwerken” (aangelegd in 1948 en 1958) stabiliseren de eilandkop en zorgen ervoor dat de keel van het zeegat (Robbengat) niet zuidwaarts kan verplaatsen. De zeezijde van de eilandkop wordt beschermd door de Eierlandse Dam en de kustlijn ten zuiden hiervan wordt in stand gehouden door (intensief) suppleren. Op basis van het geobserveerde morfologische gedrag van de buitendelta, maar ook de configuratie van de geulen in het bekken, lijken de morfologische processen op de buitendelta niet sterk beïnvloed te worden door afsluiting van de Zuiderzee (in 1932). Een directe invloed van menselijk ingrijpen is niet aanwezig op de Vliehors, de eilandstaart van Vlieland. Op de Vliehors overheerst de natuurlijke dynamiek. Een belangrijk proces is hierbij de periodieke aanlanding, met een cyclus van 15 – 25 jaar, van banken vanuit de buitendelta.

De Eierlandse dam heeft lokaal voor een breed en stabiel strand gezorgd en zijn er nieuwe duinen gevormd. De dam zorgt voor een stabiele noordwestelijke eilandkop, waar verder weinig aanvullende inspanning nodig is. Vanuit dit oogpunt kan deze dam dan ook als succesvol worden beschouwd. Dit effect is echter wel lokaal, ten zuiden van de dam blijven suppleties noodzakelijk om de kustlijn te handhaven. Een belangrijk nieuw inzicht is ook, dat na aanleg van de dam de morfologische processen op de buitendelta tijdelijk zijn verstoord. Gedurende een periode van ongeveer 20 jaar vinden er geen bankaanlandingen vanuit de buitendelta met de Vliehors meer plaats. De vorming van een nieuwe aanlandingsbank in de recente bodemdata (sinds 2017) laat zien dat de natuurlijke dynamiek zich weer heeft hersteld.

De volumeveranderingen van het Zeegat zijn geanalyseerd met behulp van de ‘actieve volume’ methode. Een belangrijk verschil met de eerdere studies is dat ook de eilanden volledig zijn meegenomen in de analyse door de missende data op te vullen met het AHN. Het gemiddelde actieve volume van de buitendelta (tussen de -10 m en 0 m NAP contourlijnen) over de periode 1987 en 2017 bedraagt 65 miljoen m³ en het gemiddelde oppervlakte is 102 km². De buitendelta neemt in deze periode met 7 miljoen m³ in sedimentvolume af. De netto volumeverandering bedraagt zo'n 10% van het totale actieve volume. Ook het bekken verliest tussen 1987 en 2017 sediment. Het totale verlies bedraagt 10 miljoen m³. De berekende verliezen zijn overeenkomstig met eerdere studies, maar een belangrijk nieuw inzicht is dat de naastliggende eilandkop en -staart juist in volume toenemen. De Vliehors neemt met 12 miljoen m³ in volume toe en Eierland met 2 miljoen m³., waardoor de totale volumebalans van zeegat inclusief eilanden vrijwel sluitend is.

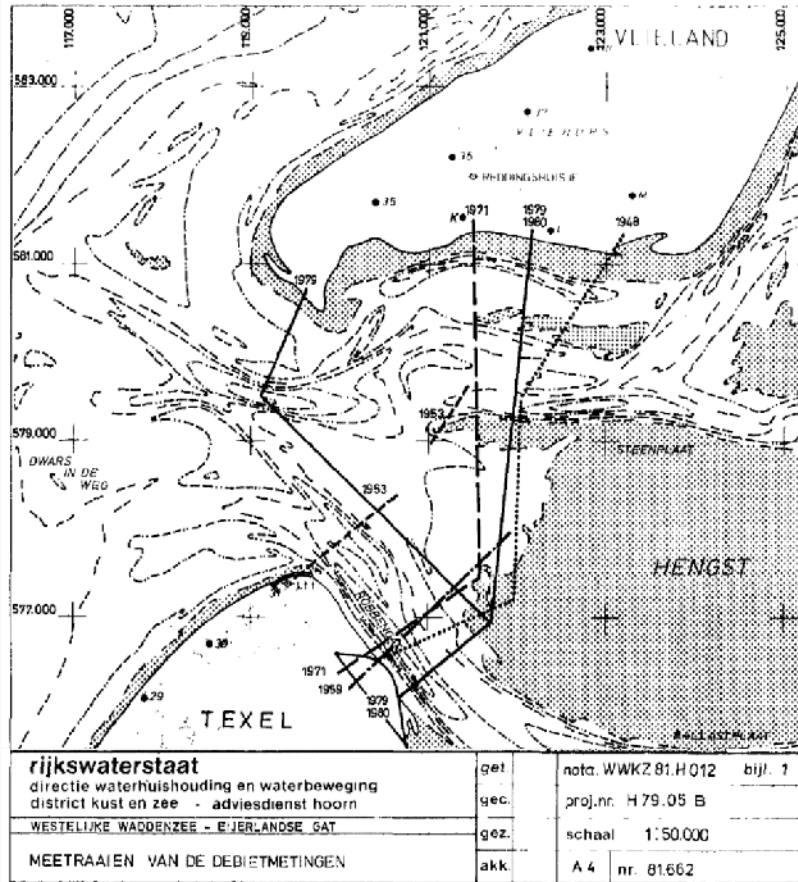
8 Referenties

- Digipol, 1997. Gebruikershandleiding Digipol, 1997. versie 1.0. beheerder RWS/RIKZ.
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., de Ronde, J., 2012. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences*, 91-X (in Press).
- Elias, E.P.L., 2018. Een actuele sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee (1933-2015). Rapport Deltares, 11202190-000-ZKS-0013, 85p.
- Endema, D., 1978. Morfologische ontwikkeling van het Eijerlandse Gat. WWKZ-78.H227. Rijkswaterstaat, 18 p.
- FitzGerald, D.M., Kraus, N.C., Hands, E.B., 2000. Natural Mechanisms of Sediment Bypassing at Tidal Inlets. Report ERDC/CHL CHETN-IV-30, US Army Corps of Engineers, Vicksburg.
- Joustra, D.S., 1971. Geulbeweging in de buitendelta's van de Waddenzee. Rapport W.W.K. 71-14, Rijkswaterstaat, 60 p.
- Glim, G.W., Kool, G., Lieshout, M.F., de Boer, M., 1986. Erosie en sedimentatie in de buitendelta van het Zeegat van het Vlie 1933-1982. Report ANWX-86.H210, deelonderzoek 7. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 52pp.
- Glim, G.W., Kool, G., Lieshout, M.F., de Boer, M., 1988. Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van het Vlie 1932-1983. Report ANWX-88.H204, deelonderzoek 3. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 56pp.
- de Kruif, A.C., 2001. Bodemdieptegegevens van het Nederlandse Kuststelsel; Beschikbare Digitale Data en een Overzicht van Aanvullende Analoge Data. Report RIKZ/2001.041 (in Dutch), Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ, The Hague.
- Kok, J.M., 2005. Morfologische effecten van de Eijerlandse Dam. Rapport RIKZ/2005.003. Rijkswaterstaat – RIKZ, den Haag.
- Pomes, K.E., 1938. Nota Eijerlandse Gat. Historisch geografisch onderzoek. Rijkswaterstaat, Hoorn.
- Rab. M., 2004. Debietmeting Eierlandsche Gat, 19 september 2002. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, rapport ANI-04.01. Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland (RWS, NH).
- Rakhorst; H.D., 1981. Debiets Eijerlandse Gat. Nota WWKZ-81 .H012, RWS-Adviesdienst Hoorn, 32 p.
- Rakhorst, H.D., 1999. Evaluatie Zeewaartse Kustverdediging. Texel-Dam Eijerland (in Dutch). Report (in Dutch). Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland (Haarlem): 33 pp.
- Rakhorst, H.D., 2002. Erosie/sedimentatie buitendelta Eierlandse Gat 1800-2000. Nota NHANV-2001-4, Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, 14 p.
- Rijkswaterstaat, 1930. Nota Eijerlandse Gat. Historisch geografisch onderzoek. Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, Arrondissement Hoorn, 131 p

- Rijkswaterstaat, 1938. Nota over de afname van de Eyerlandse kust op Texel. Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, Arrondissement Hoorn, 109 p
- Rijkswaterstaat, 1993. Kustverdediging Eijerland, Eindrapportage van de projectgroep. Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, Haarlem, 21 p
- Rijkswaterstaat, 2020. Bijlage 2: Onderbouwing suppletieprogramma 2020-2023. Memo Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 18 p.
- Sha, L. P., 1989. Variation in ebb-tidal delta morphologies along the west and East Frisian Islands, the Netherlands and Germany. *Marine Geology* 89: 11-28.
- Straatman, J.H.M., 1997. Debietmeting Eierlandse Gat 1996. Rapportage meting Vliehors en Robbegat. Rapport ANHM 97.03, 30 p.
- Walburg, L., 2005. Zandvolumes in het Nederlandse kuststelsel. Werkdocument RIKZ/KW/2005.133w, Rijkswaterstaat, RIKZ, 117 p.

A Appendix H1

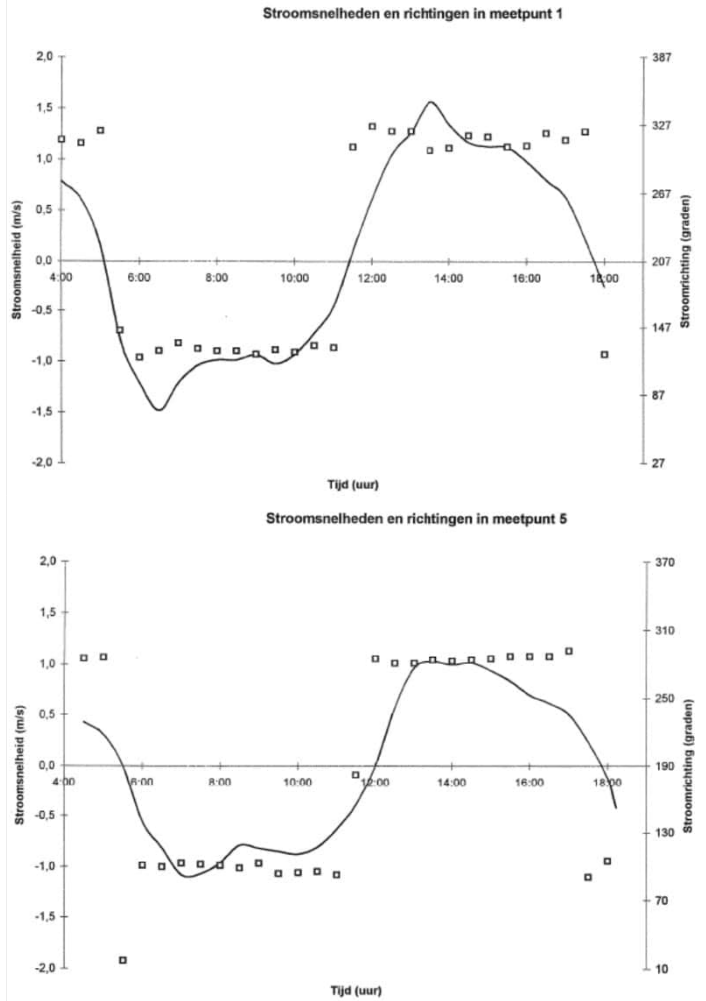
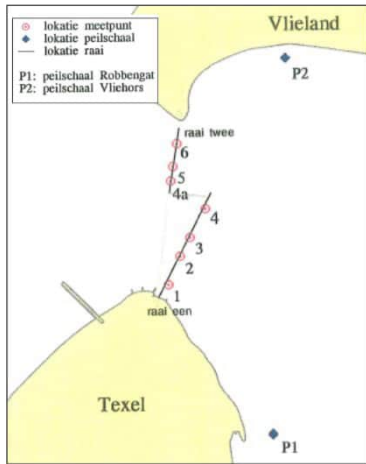
A.1 Debietmetingen



	WIND		GETIJ AMPLITUDE		MIDDENSTANDS-VLAK		DEBIETEN VLOED			DEBIETEN EB		
	v in m/s	richting	vloed	eb	vloed	eb	Robben-gat	Engels-mangot	totaal	Robben-gat	Engels-mangot	totaal
Juni 1948			3 dagen gem		142 Den Helder		88	45	133	72	35	107
24 JUNI 26 JUNI	1953	6-10 N	142	139	+0,10	-0,22	99,8			91,4		
			149	150			(93,6)			(112,0)		
24 en 25 SEPT.	1959	0-4 W	133 (119)	134 (119)	+0,00	-0,30	63,7			88,4		
24 en 25 MAART	1971	7-10 ZW	164	174	+0,27	-0,10	103,3 (103)	83,4 (85)	186,7 (188)	88,2 (94)	62,5 (65)	150,7 (159)
8 JUNI	1971	0-4 N	161	172	+0,10	-0,25	97	69	166	92,5	64,5	157
9 JUNI	1971	0-4 N	171	176	+0,05	-0,32	100	70	170	97,5	65,7	163
29 en 30 MAART	1979	8-12 N	215	219	+0,22	-0,25	131 (123,5)	110 (92)	241 (216)	145 (139,5)	106 (97)	250 (237)
10 en 11 APRIL	1979	7-10 Z.O.	177	191	-0,05	-0,43	106 (104)	76 (76,5)	182 (180,5)	112 (110,7)	74 (65,5)	186 (175,2)
9 SEPTEMBER	1980	8-12 NW	188	189	+0,50	+0,10	148 (126)	113 (108)	261 (236)	121 (116)	87 (99,0)	208 (215)
10 SEPTEMBER	1980	8-17 ZW	190	175	+0,35	+0,02	119 (119)	90 (108)	209 (227)	110 (108)	95 (102,0)	206 (210)

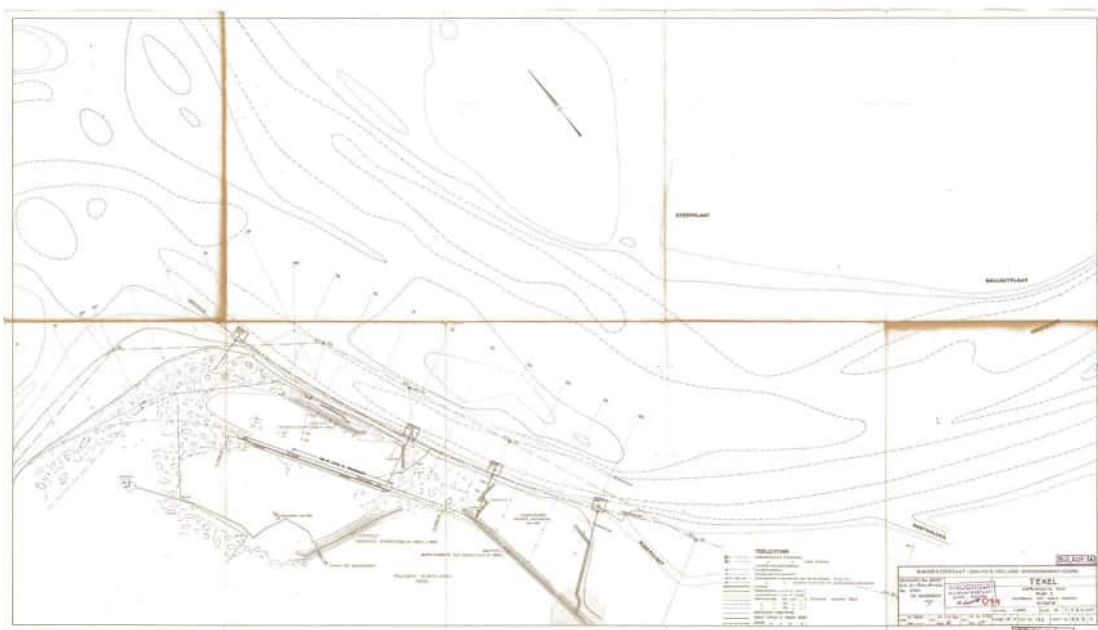
GETIJ GEGEVENS UIT PEILSCHALEN IN EIJERLANDSE GAT.
DEBIETEN TUSSEN HAAKJES ZIJN BEPAALD UIT PUNTDEBIETEN, DE ANDERE DEBIETEN ZIJN BEPAALD UIT RAAIDEBIETEN.

Figuur A- 1: Overzicht van de debietmetingen uitgevoerd tussen 1948 en 1980 (Bron. Rakhorst, 1981).

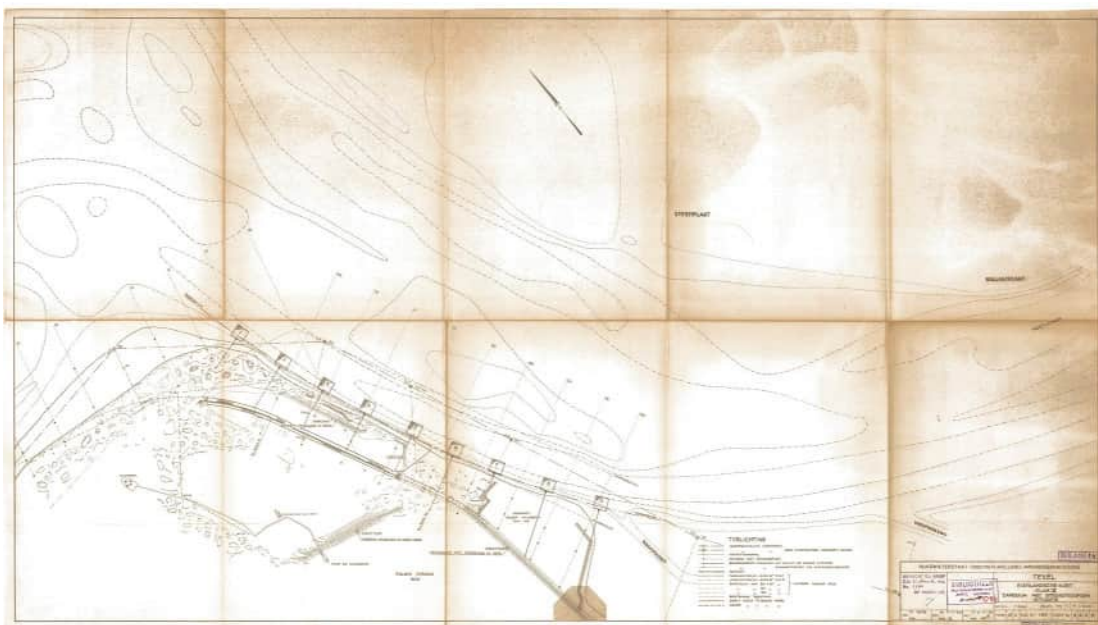


Figuur A- 2: Overzicht van snelheden in Robbengat (meetpunt1) en Eierlandsegat (meetpunt 5) op basis van de 1996 meting (Straatman, 1997).

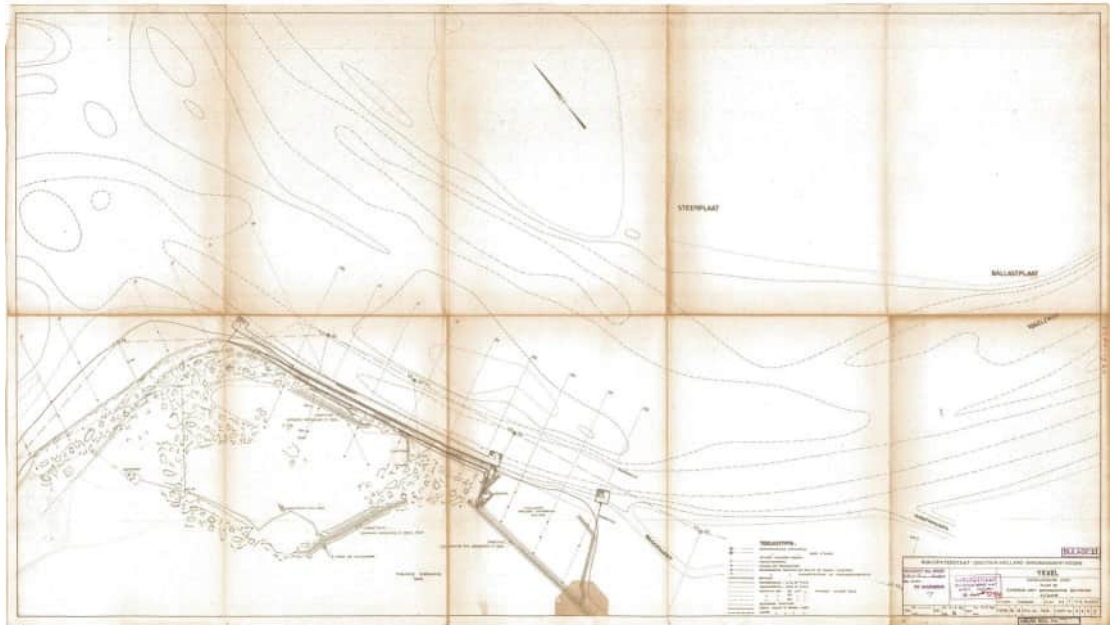
A.2 Kustverdediging Eierland



Figuur A- 3: Zanddijk met vaste punten (variant 1)



Figuur A- 4: Zanddijk met vaste punten (variant 2)



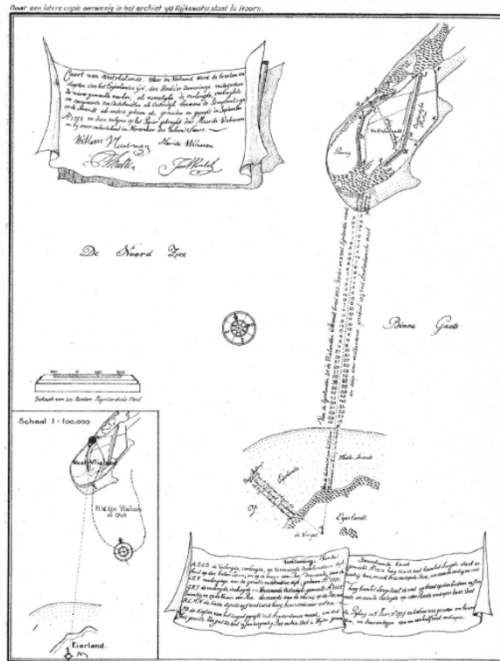
Figuur A- 5: Zanddijk met doorgaande bezinking.



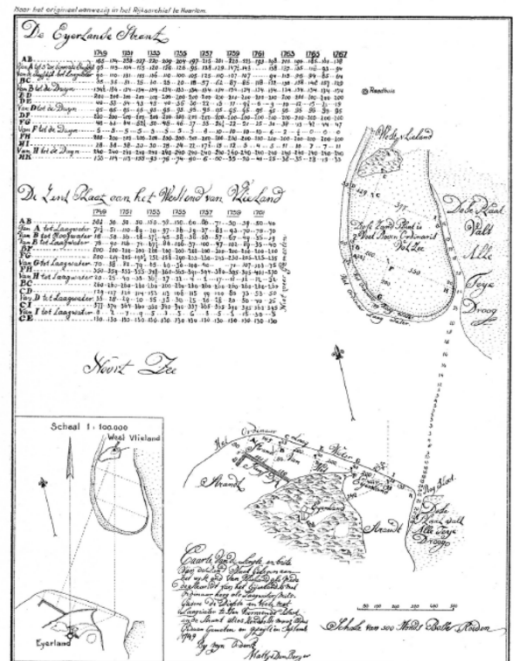
Figuur A- 6: Beteugelingsdam

B Bodemdata

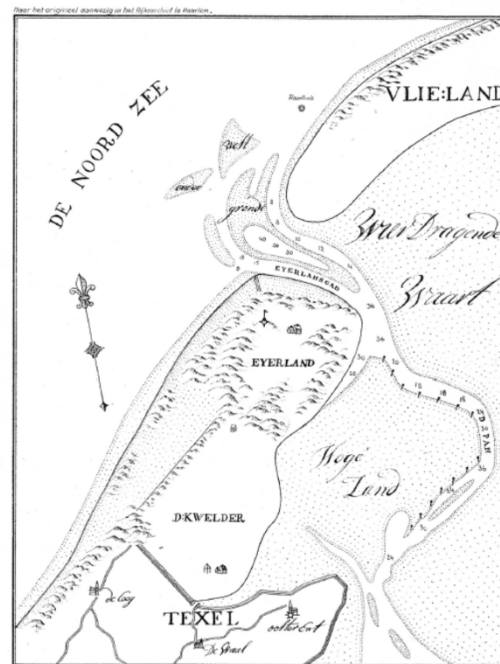
B.1 Historische kaarten



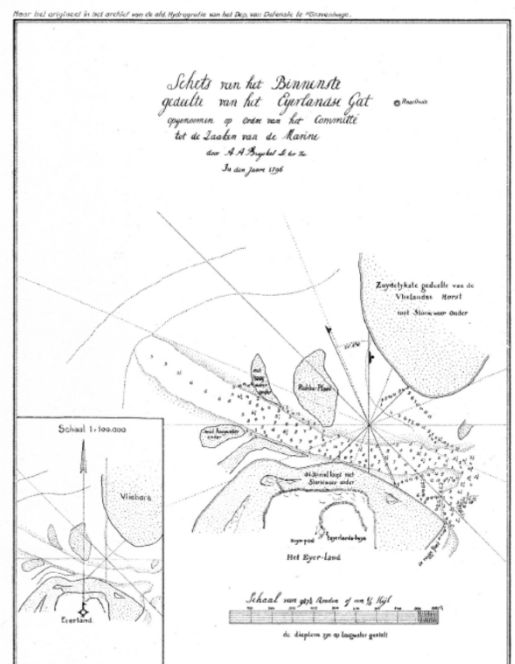
1722 Carte van WEST-VLIELANDT waar in vertoond werd de breedten en diepten van het EURLANTSE GAT, den Slaet der zeeeringe mitsgeders de nieuwgemaakte werken, gemeeten en gepeijlt in September A^o 1722 en bij ons ondertekent in November des zelven Jaars WILLEM VLEERTMAN, MAURITUS WALRAVEN, PIETER MULLER en JAN WENTEL.
Oriëntatiepunten ↕ ⚓ Schaal 1:50.000 - 1:100.000



1749 Carte van de lengte en breete van de Zand Plaas gelegen aan het westend van VLIELAND als mede de Strand van het EYERLAND so met Ordinaer hoog als Laagwater mitsgeders de Diepte in Voete met Laagwater tussen Voornoemde Plaas ende Strant alles Hondsbosse maal Aldus gedaen gemeeten en gepeijlt in Sept. 1749. Bij mijn Onderz. MATTIJS den BERGER.
Oriëntatiepunten ↕ ⚓ Schaal 1:50.000 - 1:100.000

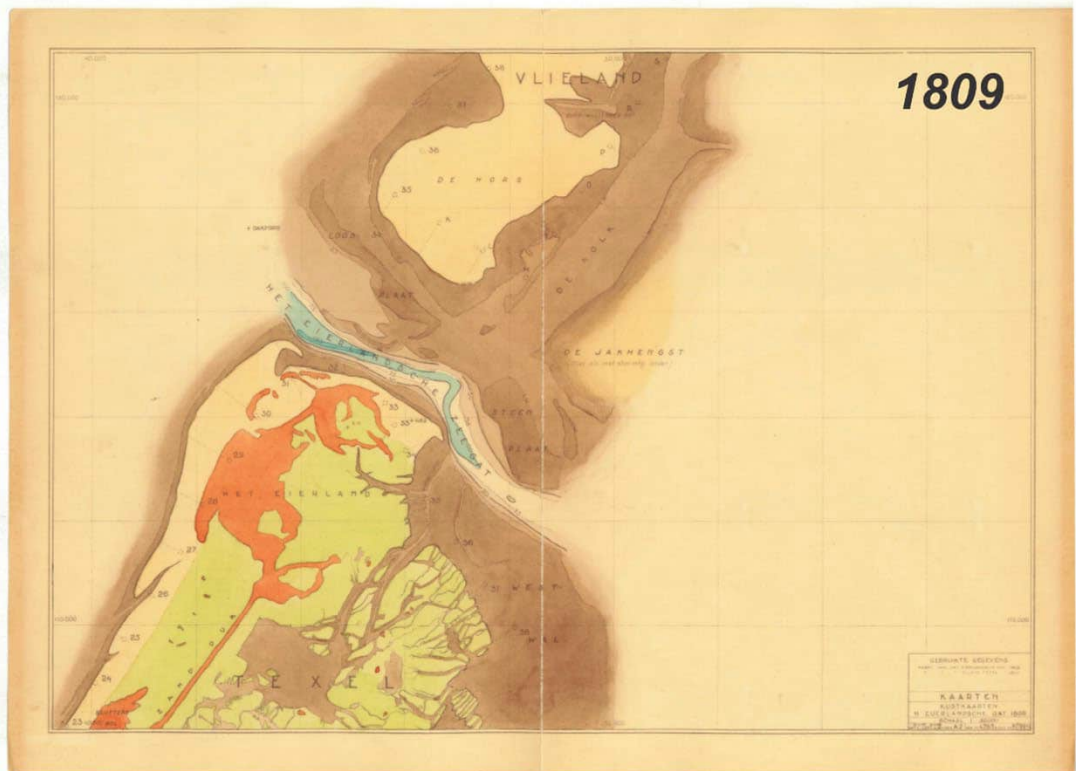
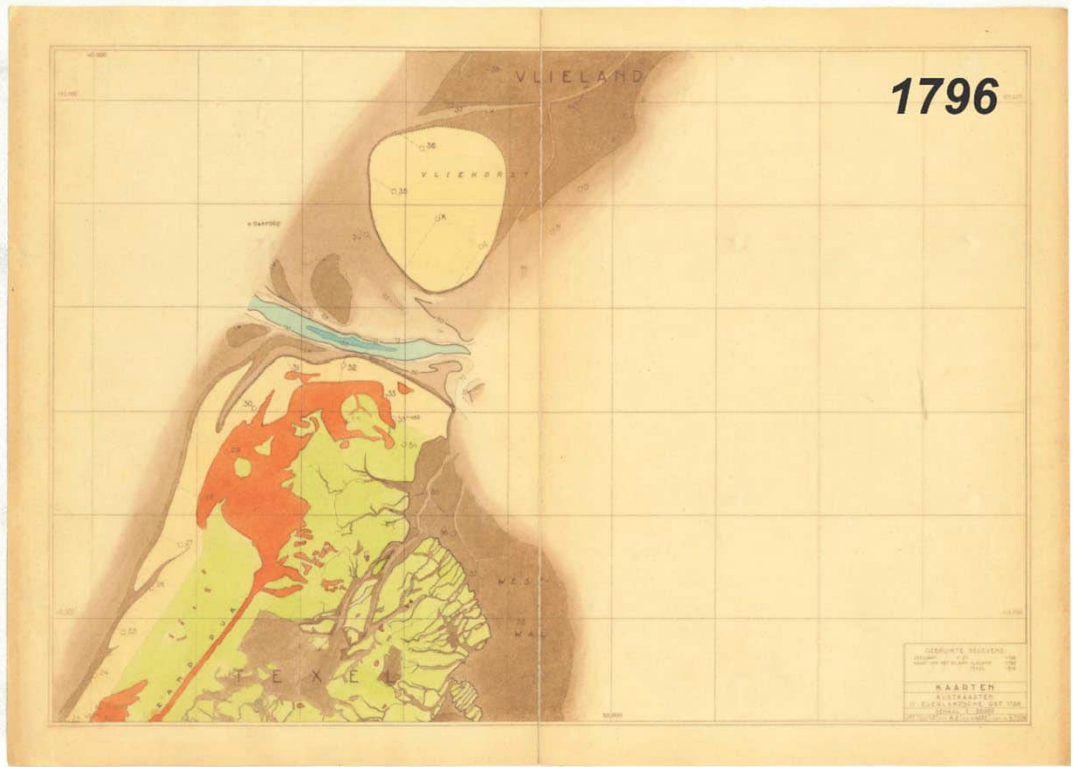


1780 Kaart van onbekende oorsprong (Verloont veel overeenkomst met ged. van de GENERAALE FIGURATIVE KAART van 1781).
Oriëntatiepunten ↕ ⚓ Schaal 1:100.000

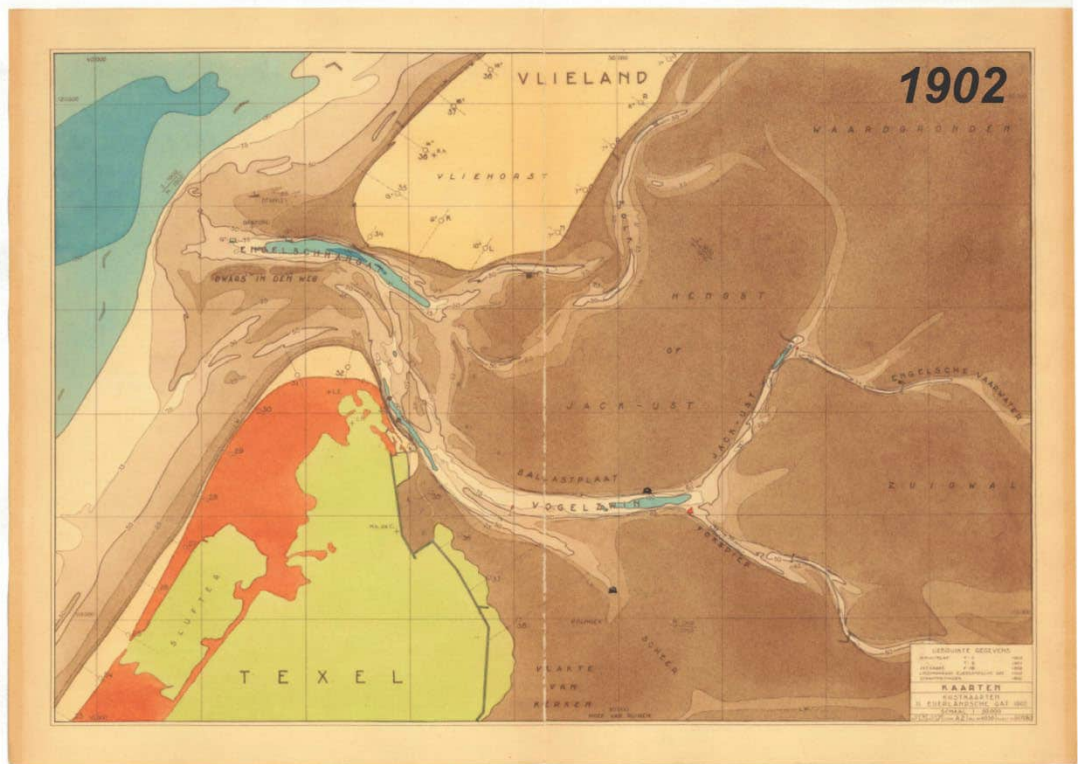
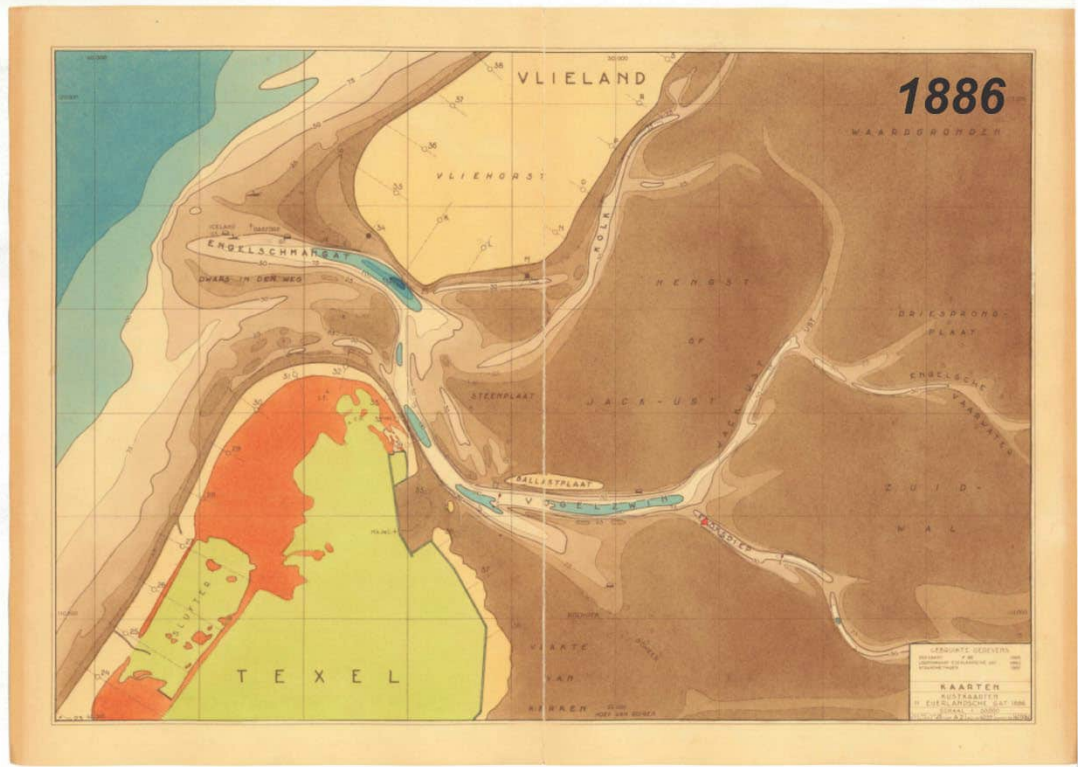


1796 Schets van het Binneste gedeelte van het EYERLANDSE GAT opgenomen op Ordre van het Comité tot de Zaken van de Marine door A.A. BUUSKES Lt. ter Zee In den Jaere 1796.
Oriëntatiepunten ↕ ⚓ Schaal 1:50.000 - 1:100.000

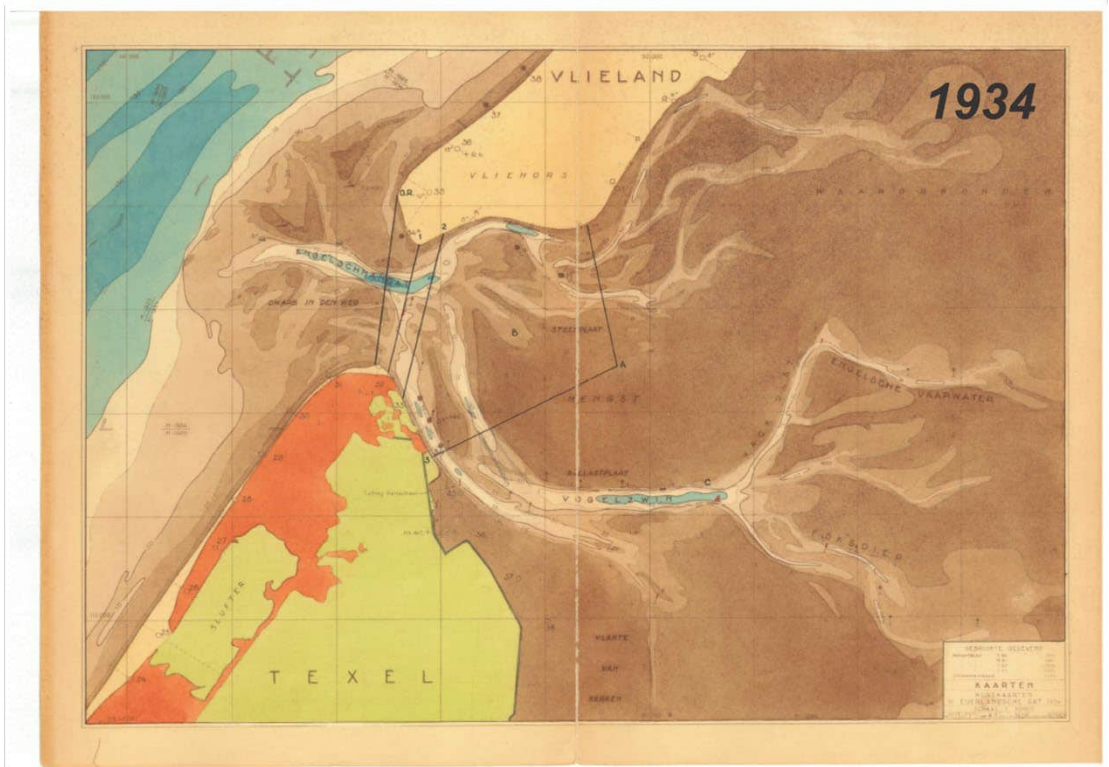
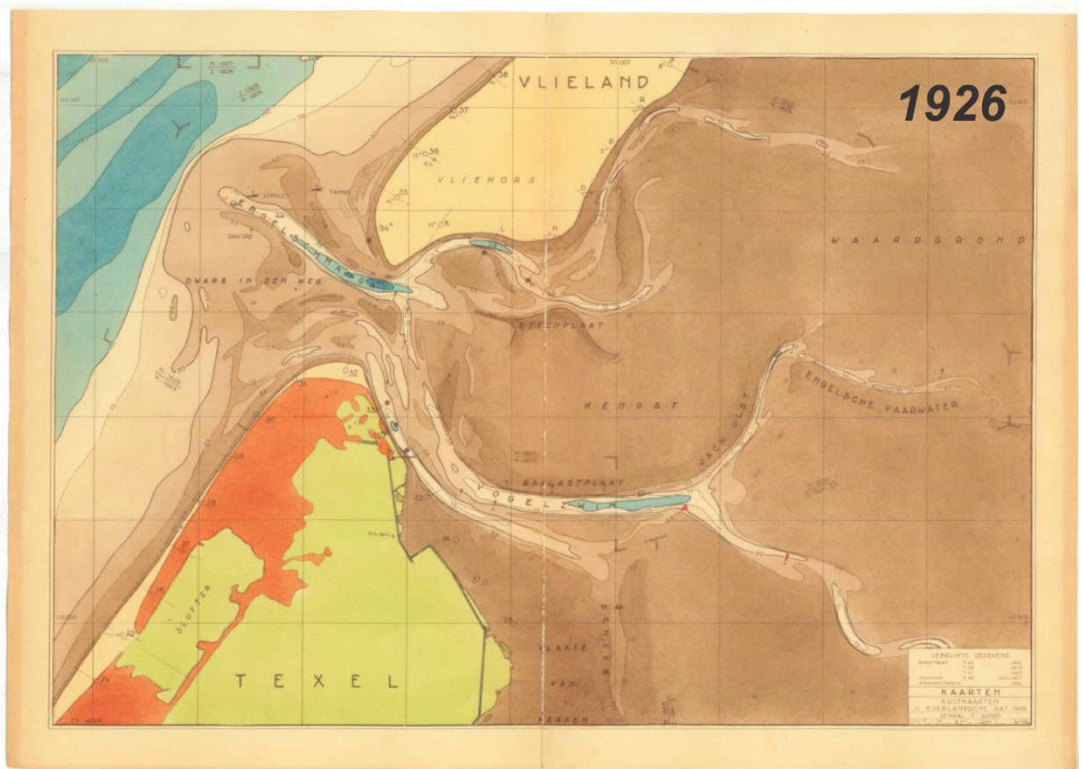
Figur B- 1: Historische kaarten opgenomen tussen 1722 en 1796 (Bron: Rijkswaterstaat, 1938).



Figuur B- 2: Hydrografische kaart voor de jaren 1796 en 1809.

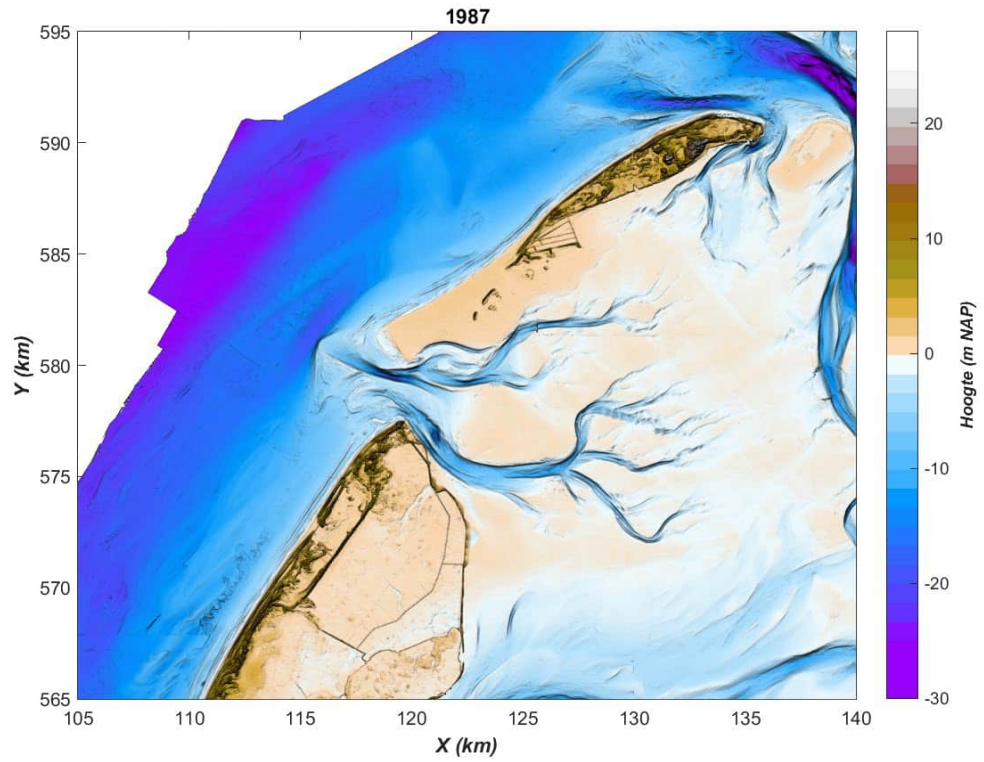


Figuur B- 4: Hydrografische kaart voor de jaren 1886 en 1902.

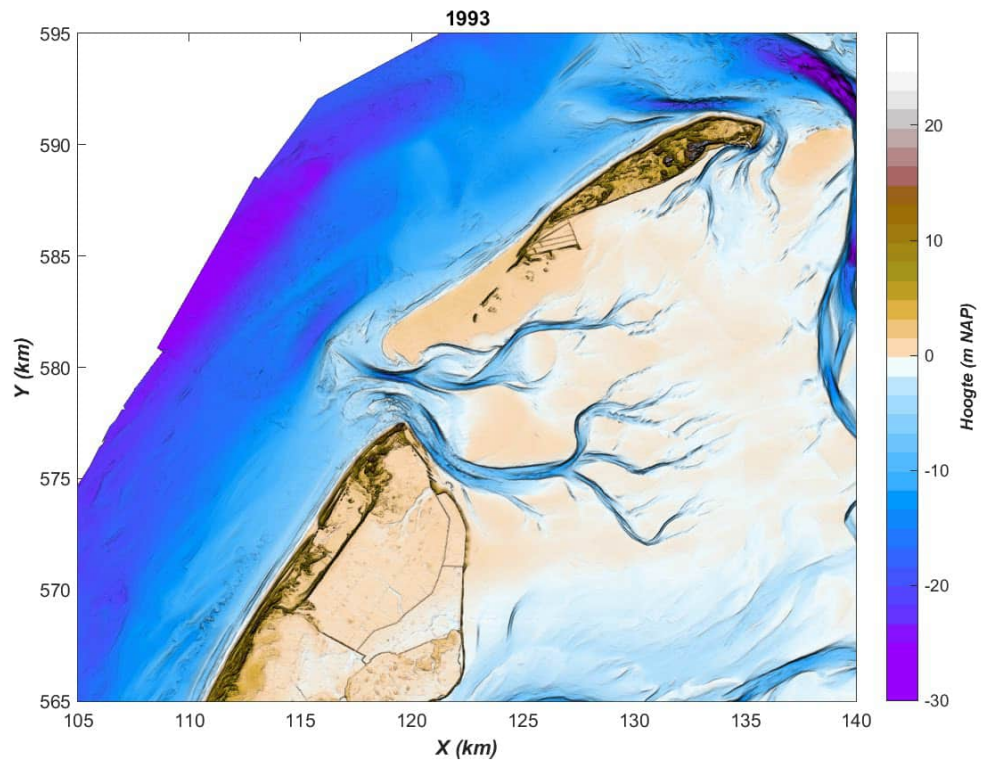


Figuur B- 5: Hydrografische kaart voor de jaren 1926 en 1934.

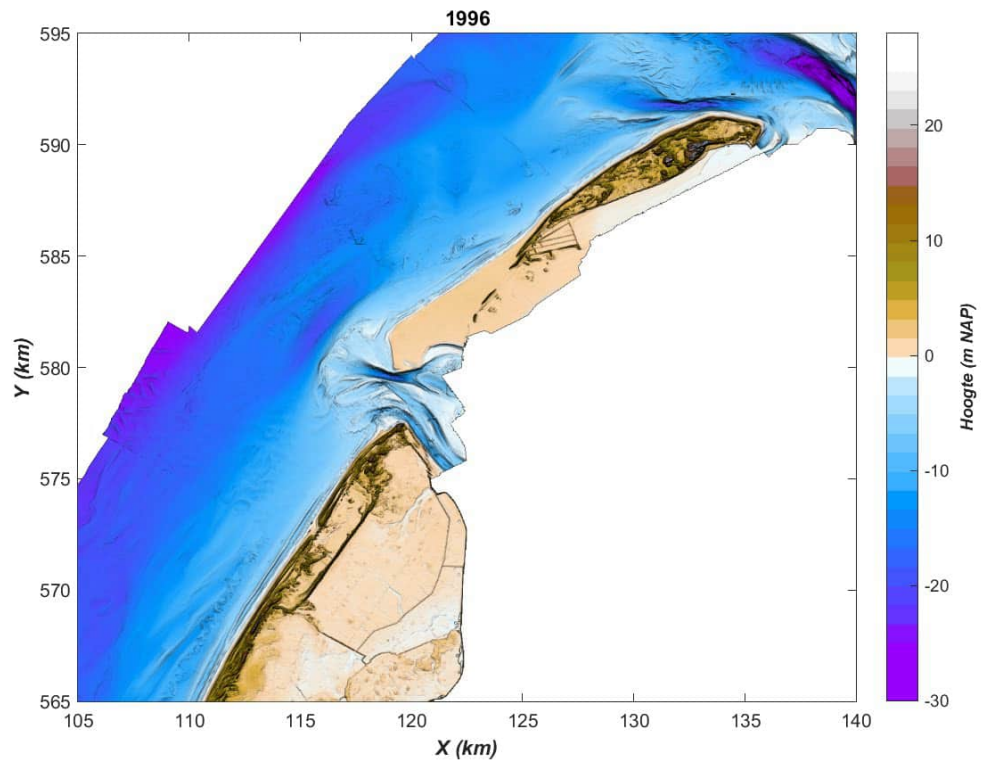
B.2 Vaklodingen



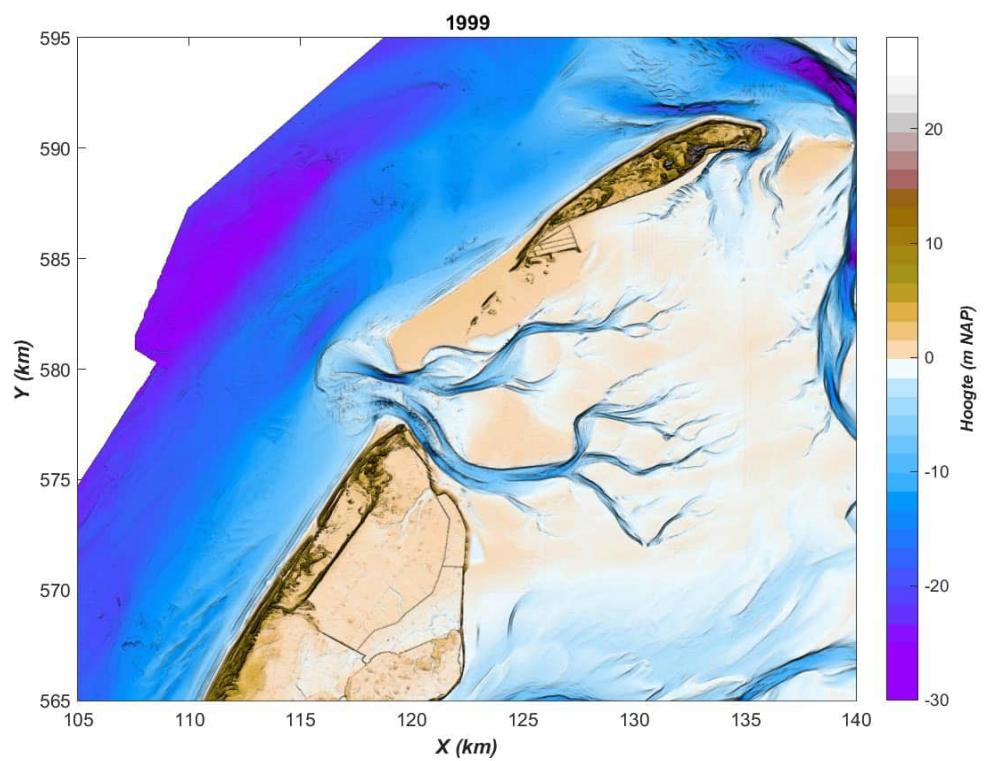
Figuur B- 6: Vaklodingen kaarten voor het jaar 1987.



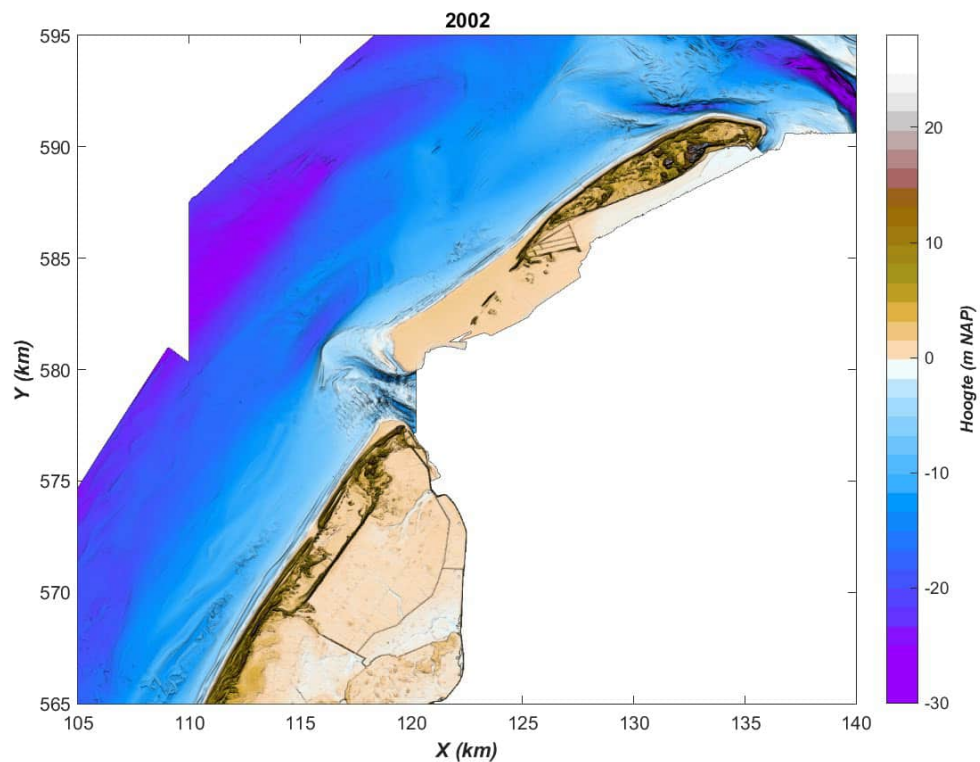
Figuur B- 7: Vaklodingen kaarten voor het jaar 1993.



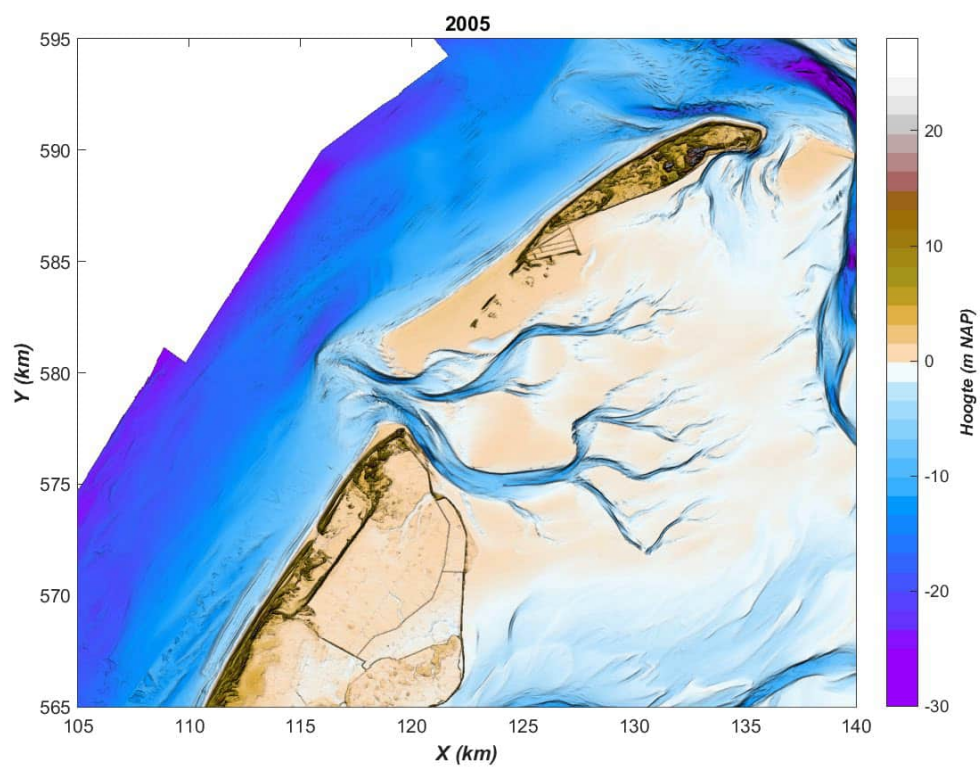
Figuur B- 8: Vaklodingen kaarten voor het jaar 1996.



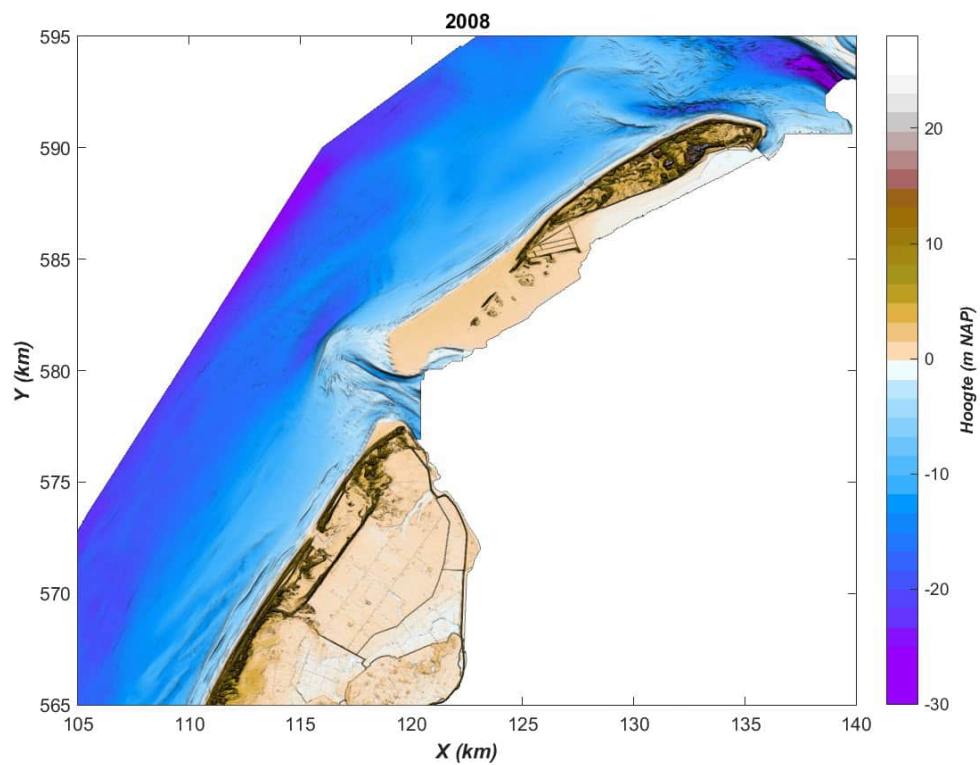
Figuur B- 9: Vaklodingen kaarten voor het jaar 1999.



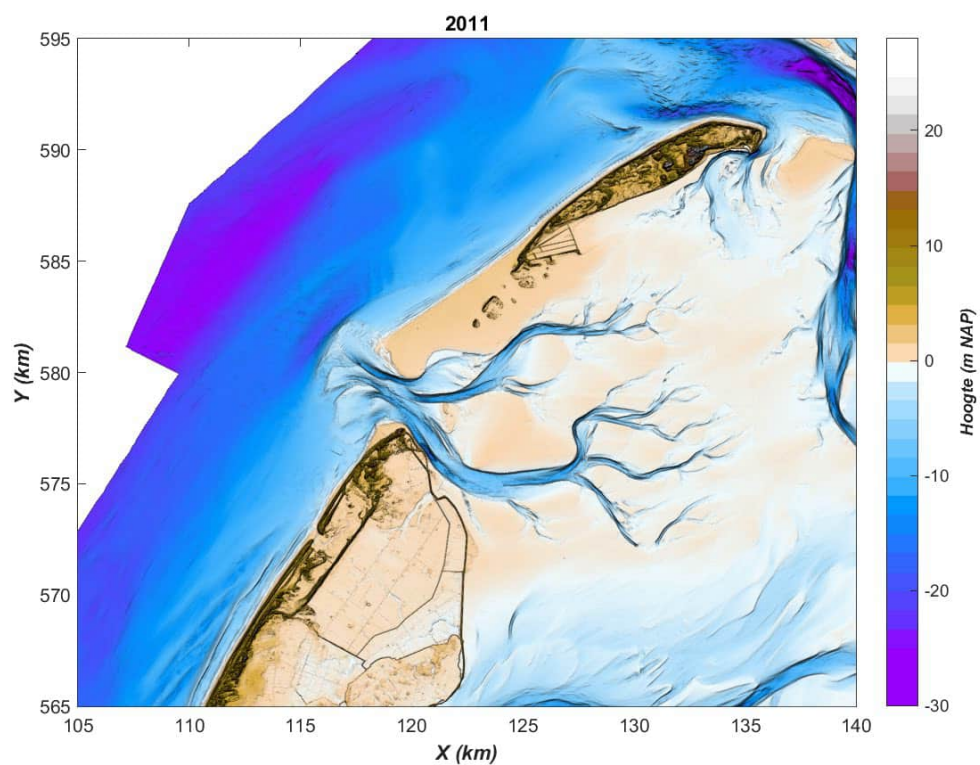
Figuur B- 10: Vaklodingen kaarten voor het jaar 2002.



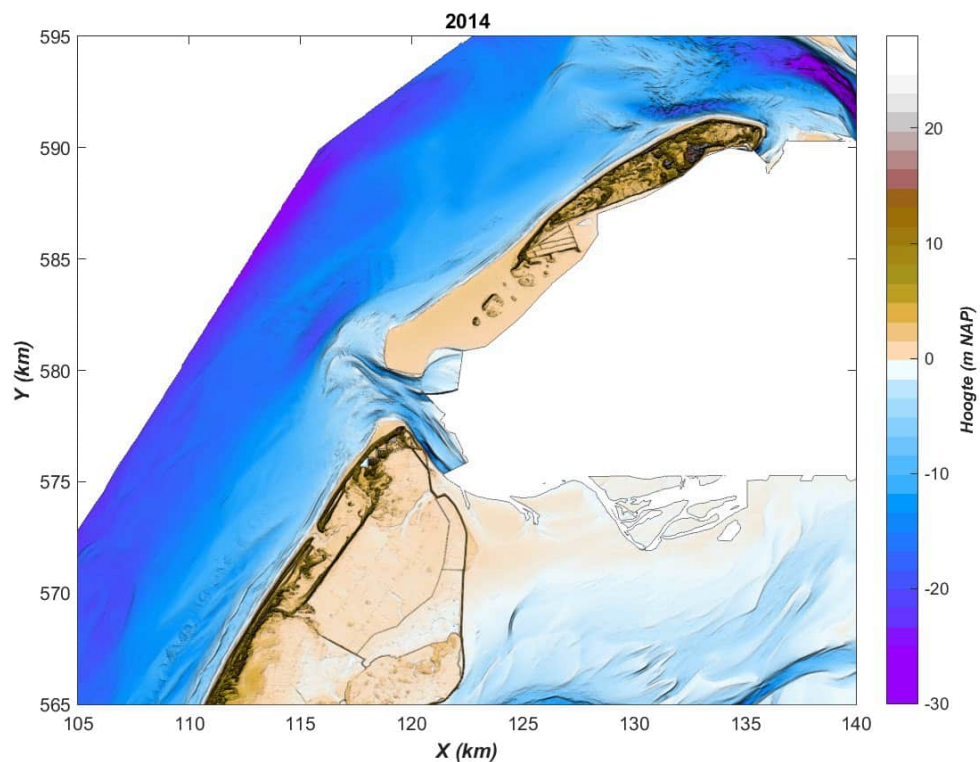
Figuur B- 11: Vaklodingen kaarten voor het jaar 2005.



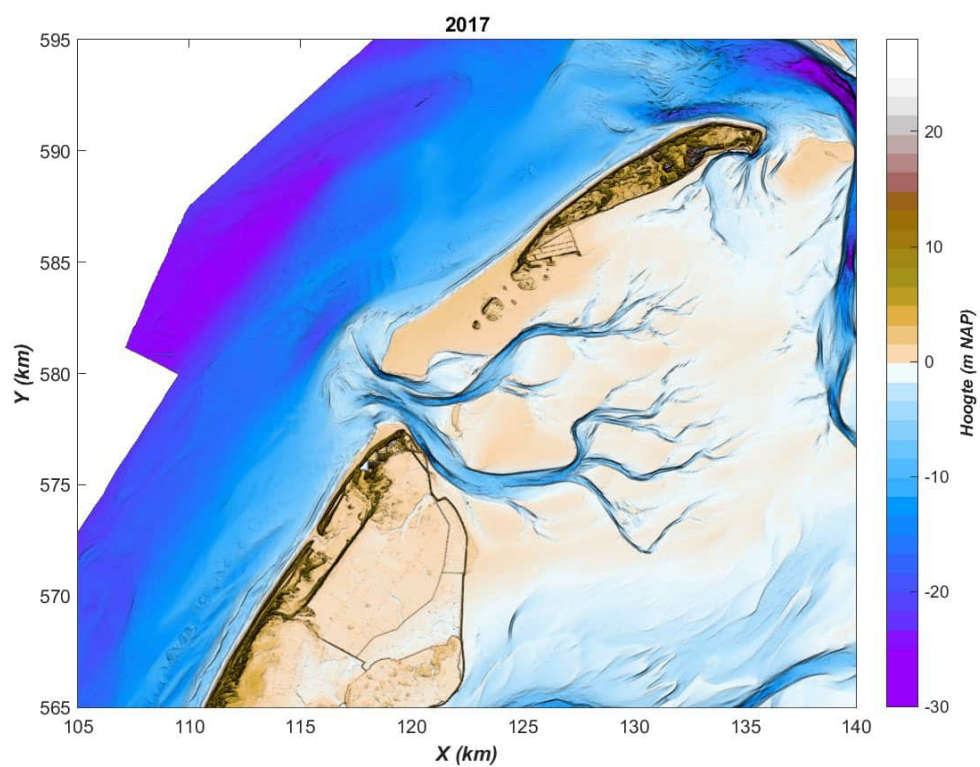
Figuur B- 12: Vaklodingen kaarten voor het jaar 2008.



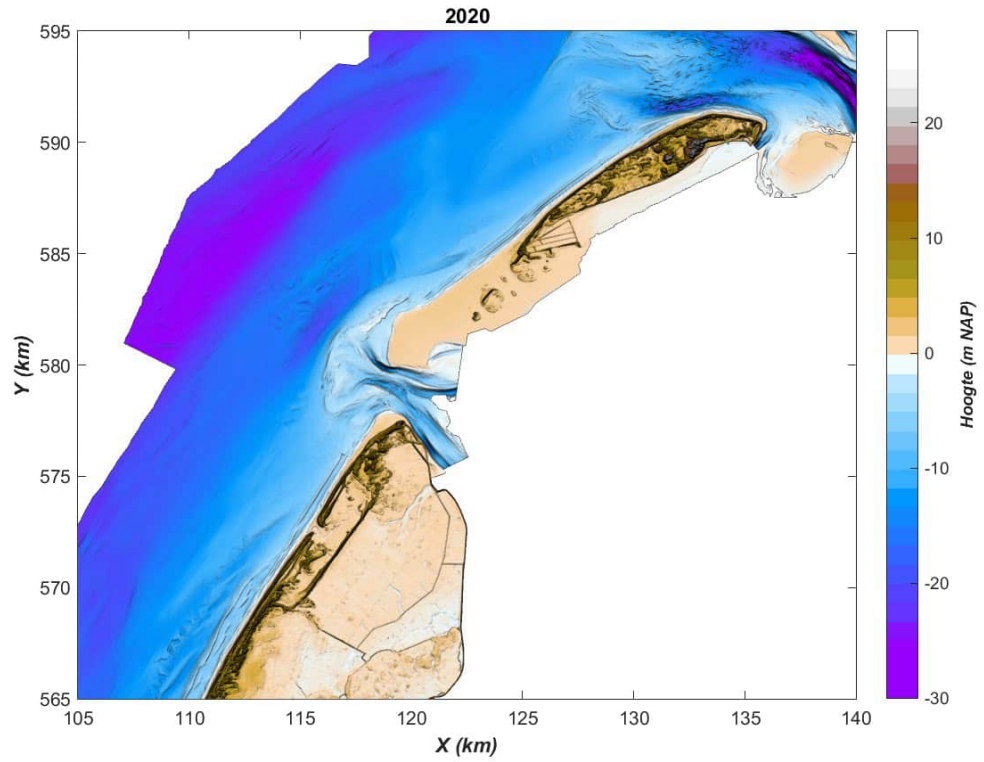
Figuur B- 13: Vaklodingen kaarten voor het jaar 2011.



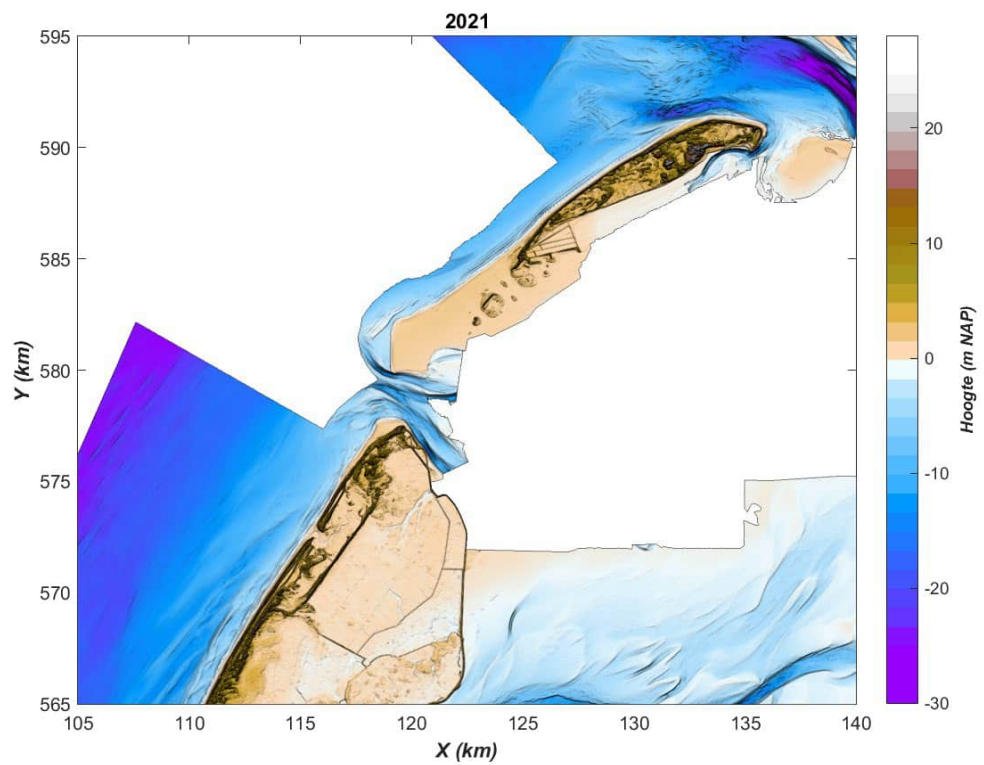
Figuur B- 14: Vaklodingen kaarten voor het jaar 2014.



Figuur B- 15: Vaklodingen kaarten voor het jaar 2017.

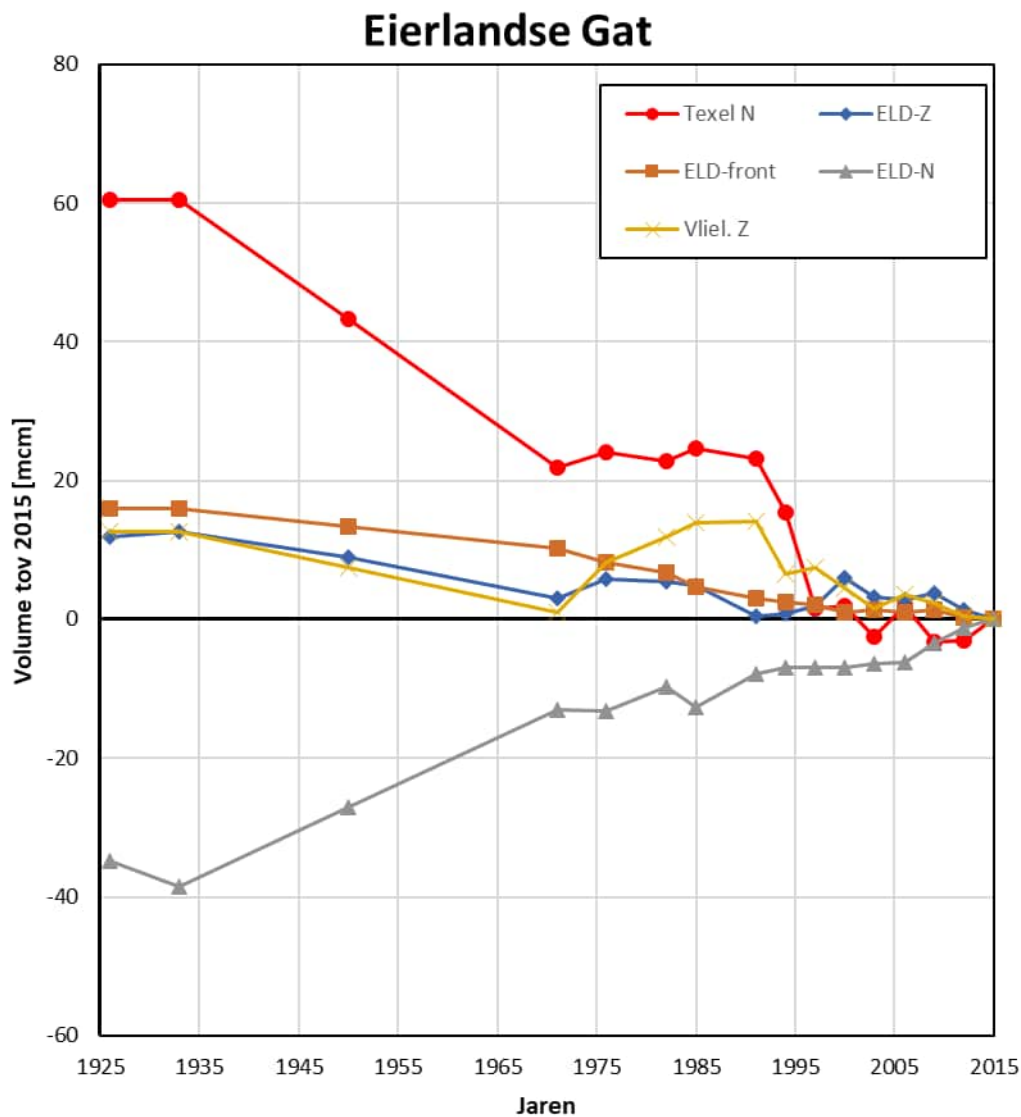


Figuur B- 16: Vaklodingen kaarten voor het jaar 2020.

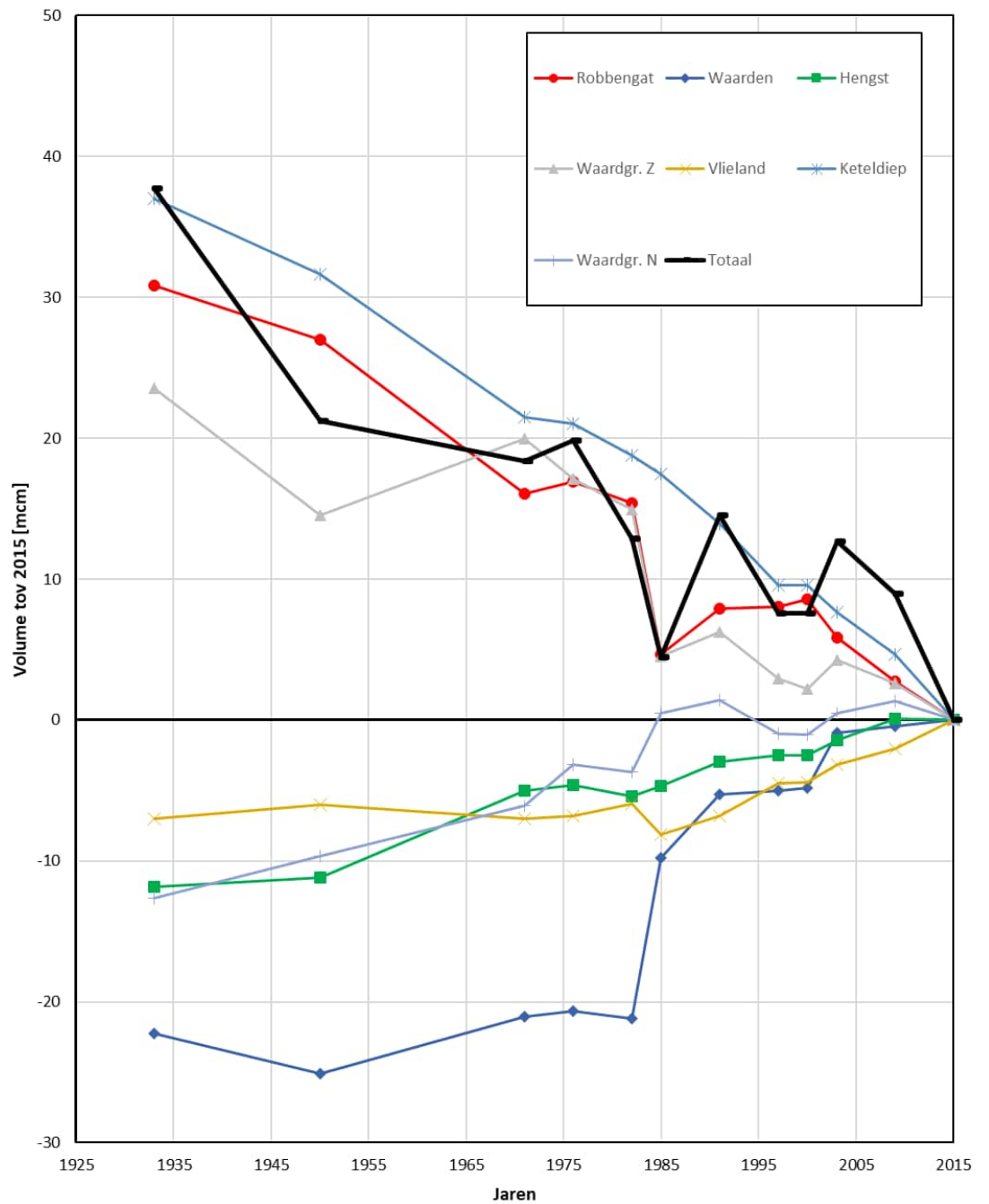


Figuur B- 17: Vaklodingen kaarten voor het jaar 2021

C Sediment volumes

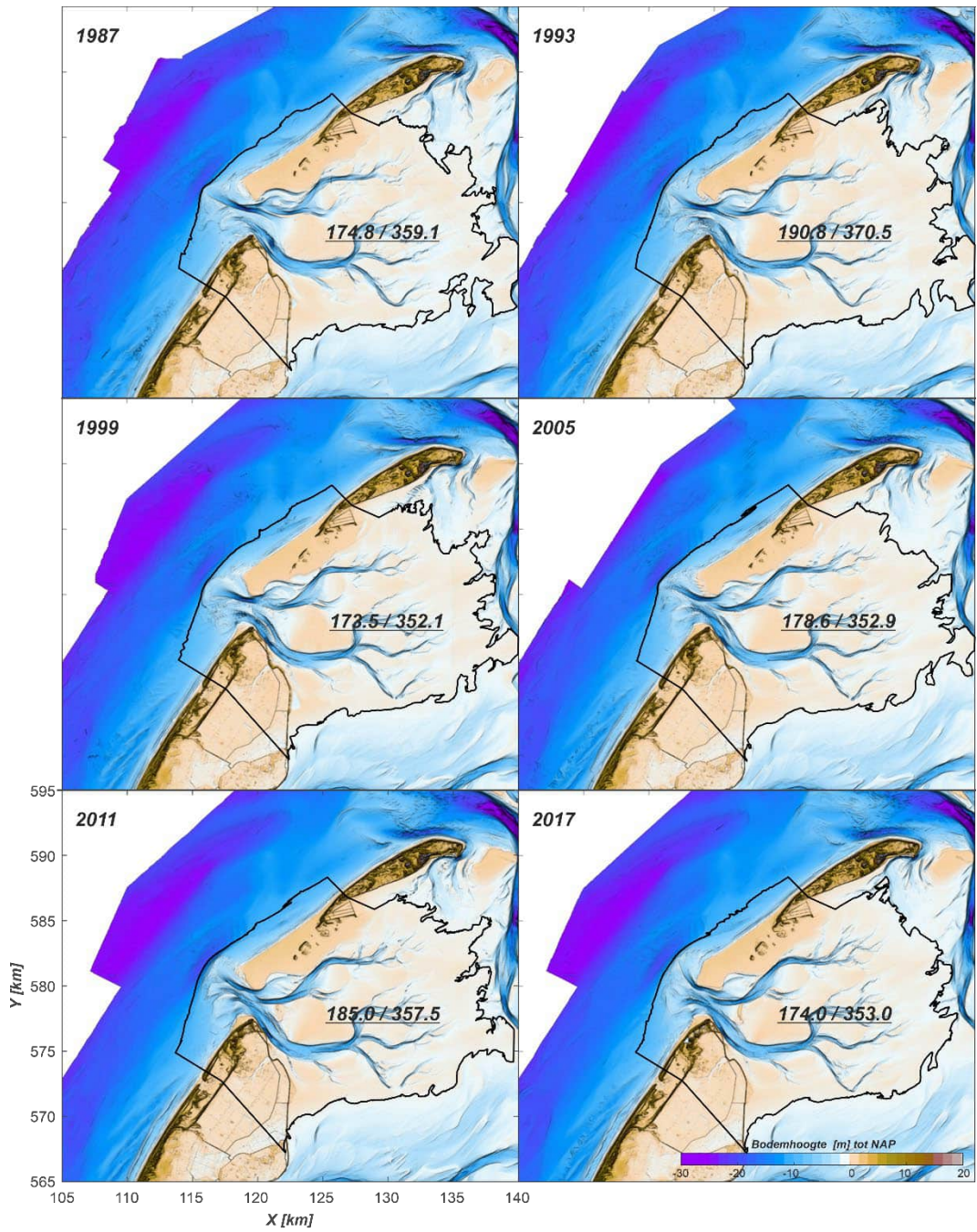


Figuur C- 1: Volumeontwikkeling van de verschillende sedimentatie-erosie gebieden in de buitendelta van het Eierlandse Gat. Bron: Elias (2018).

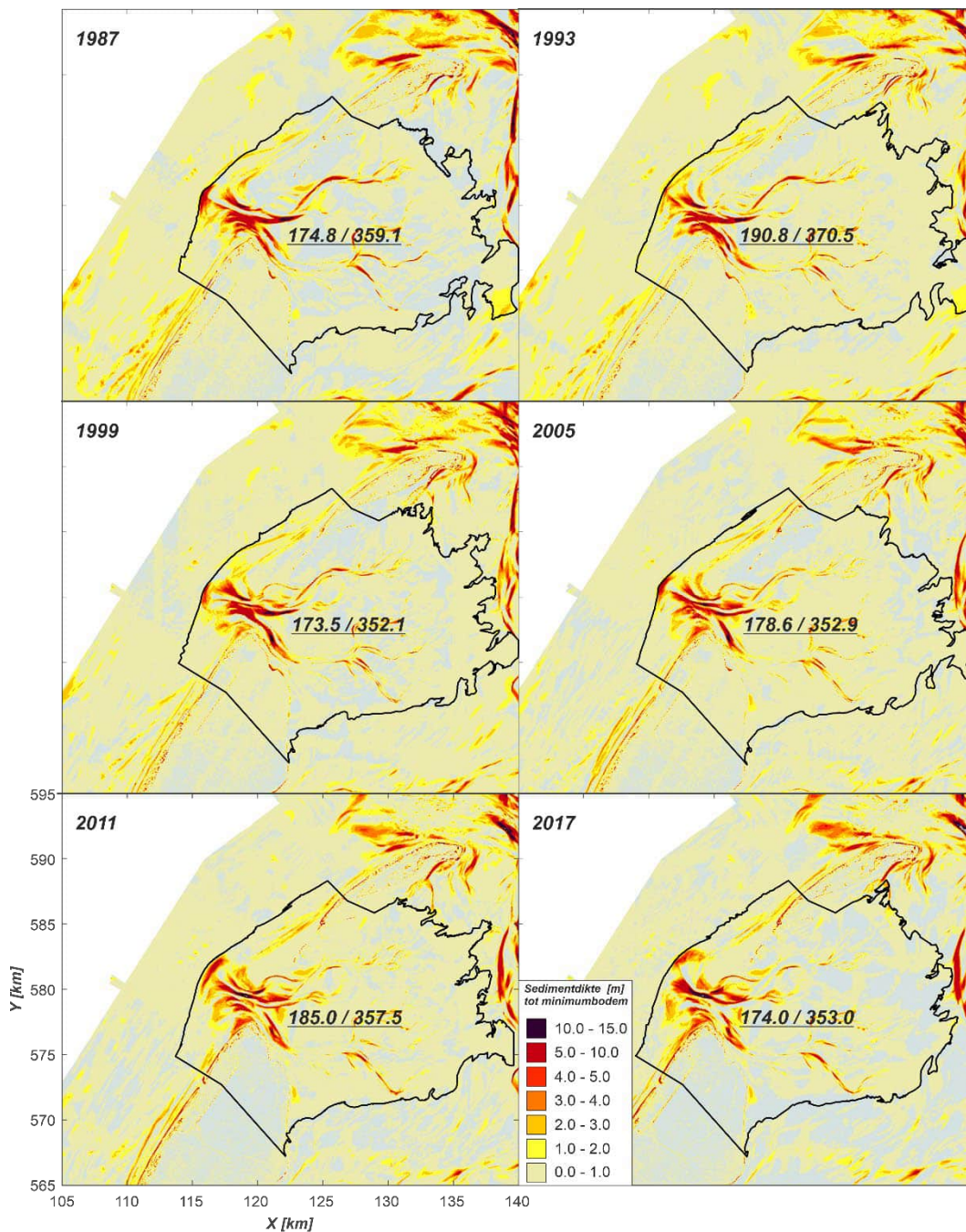


Figuur C- 2: Volumeontwikkeling van de verschillende sedimentatie-erosie gebieden in het bekken van het Eierlandse Gat. Bron: Elias (2018).

C.1 Actieve volumina



Figuur C- 3: Overzicht van de polygonen gebruikt als afbakening van het balansgebied van het gehele zeegeat. Getallen geven per balansgebied de berekende volumes / oppervlakte weer.



Figuur C- 4: Overzicht van de sedimentdikte van de actieve laag. De polygonen geven de afbakening van het balansgebied (gehele zeegat). Getallen geven per balansgebied de berekende volumes / oppervlakte weer. .

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