

Morfologische Analyse Centrale Waddenzee

Een studie van de kombergingsgebieden van het Amelanders en Friesche Zeegat



Morfologische Analyse Centrale Waddenzee

Een studie van de kombergingsgebieden van het Ameland en Friesche Zeegat

Auteur(s)

Edwin Elias

Morfologische Analyse Centrale Waddenzee
Een studie van de kombergingsgebieden van het Ameland en Friesche Zeegat

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Referenties	-
Trefwoorden	Waddenzee, morfologie, Friesche Zeegat, Zeegat van Ameland.

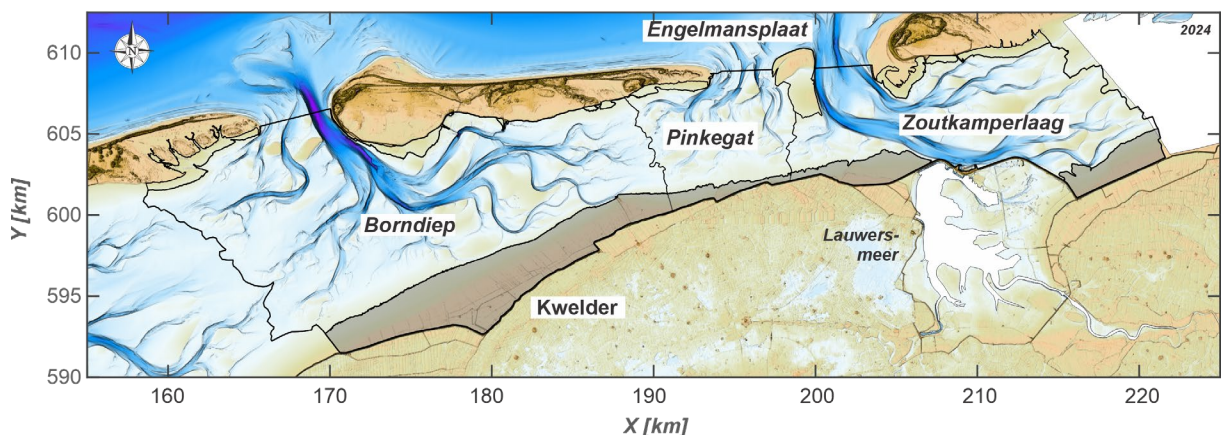
Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	17-07-2025
Projectnummer	11210370-003
Document ID	11210370-003-ZKS-0001
Pagina's	145
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)		
	Edwin Elias	

Samenvatting

Het programma Kennis voor Beheer en Onderhoud Waddenzee heeft als doel een solide kennis- en informatiebasis te creëren voor diverse vragen die verband houden met morfologie en sediment in de Waddenzee. Door middel van een uitgebreide morfologische studie is de evolutie van de Centrale Waddenzee, de kombergingsgebieden van het Borndiep, Pinkegat en de Zoutkamperlaag, bestudeerd. De overkoepelende onderzoeksvraag is of de Centrale Waddenzee en de individuele kombergingsgebieden in een dynamisch evenwicht zijn, of dat er een trend van verlanding of verdrinking is in relatie tot zeespiegelstijging. Door het bestuderen van de historische ontwikkeling van de geulsystemen, de platen, het litoraal en het sublitoraal kan een onderbouwde prognose van de toekomstige ontwikkeling worden gemaakt. Dit onderzoek vormt een eerste stap richting een visie op de morfologische evolutie van de Centrale Waddenzee in de komende decennia en de mogelijke gevolgen van deze ontwikkeling voor de beheerstaken van Rijkswaterstaat.

Overzicht van de Centrale Waddenzee en kombergingsgebieden



In dit onderzoek is de schaalcascade als basis voor de analyses toegepast. Met een schaalcascade wordt gestructureerd de temporele en ruimtelijke variatie van de morfodynamiek geanalyseerd, en wat daarin de rol is van menselijke ingrepen en de processen zoals getij, de wind en golven. Aan de hand van literatuur en 'expert judgement' is onderzocht hoe de grootschalige veranderingen de ontwikkelingen van de Centrale Waddenzee beïnvloeden. Op de niveaus van de individuele kombergingsgebieden en de Centrale Waddenzee zijn zowel kwantitatieve als kwalitatieve studies uitgevoerd naar de morfologische veranderingen over de periode 1926-2024. Hiervoor zijn de morfologische veranderingen in volume en oppervlakte berekend en samengevat in bodemhoogteverschilkaarten en hypsometrische curven. Een beoordeling van de morfologische ontwikkeling van de Centrale Waddenzee in relatie tot zeespiegelstijging is gemaakt door de geobserveerde sedimentvolumes te vergelijken met de theoretisch benodigde sedimentvolumes om mee te groeien met de stijging van de zeespiegel. De in de Zeespiegelstijgingsmonitor berekende gemiddelde waarde van zeespiegelstijging voor Nederland is hiervoor gebruikt (een jaarlijkse stijging van 1.8 mm tot 1993 en 2.9 mm na 1993). Verlanding gebeurt wanneer de waargenomen stijging van het sedimentvolume groter is dan benodigd voor stijging van de zeespiegel, meegroeien wanneer deze twee gelijk zijn en verdrinking wanneer de geobserveerde sedimentvolumes lager zijn.

Aan de hand van een sedimentvolumebalans is vastgesteld dat het sedimentvolume in de Centrale Waddenzee sinds 1926 met 188 miljoen m³ is gestegen. De stijging van het volume

vertoont een vrijwel lineaire trend van +2.0 miljoen m³/jaar over de volledige periode (1926-2024). Met 43% van de netto-sedimentatie is de bijdrage van het kombergingsgebied Borndiep het hoogst, gevolgd door de Zoutkamperlaag (31%) en het Pinkegat (26%). Een gedeelte van deze sedimentatie gebeurt in de kwelders (33 miljoen m³, 18%). Binnen dit onderzoek zijn de kwelders afgebakend door de 0 m NAP-contourlijn aan de zijde van de Waddenzee. Volgens deze definitie steeg het oppervlakte van de kwelder aanzienlijk met 62 km². In 1926 en 2024 is het totale oppervlak van de Centrale Waddenzee (exclusief Lauwerszee) bijna gelijk, aangezien de wantijverplaatsing aan de westkant gelijk is aan die aan de oostkant. Er zijn echter wel variaties in de ontwikkeling waarneembaar. Na afsluiting van de Lauwerszee steeg het oppervlakte tijdelijk. Wanneer de waargenomen sedimentvolumes worden afgezet tegen de theoretisch nodige sedimentvolumes om mee te groeien met de stijging van de zeespiegel, is de conclusie dat de Centrale Waddenzee tot 1994 onderhevig was aan verlanding. De geobserveerde stijging in sedimentvolume sinds 1994 is bijna gelijk aan de theoretische behoefte aan sediment door zeespiegelstijging.

Alhoewel de Centrale Waddenzee als geheel een lineaire toename van het sedimentvolume vertoont, is deze trend niet representatief voor de individuele kombergingsgebieden. Het kombergingsgebied van het Borndiep heeft een netto-sedimentatie van 81 miljoen m³. De tijdreeks vertoont hierbij een duidelijke tweedeling in gedrag, met een geringe netto verandering (+0.20 miljoen m³/jaar) tussen 1926 en 1982 en een aanzienlijk hogere sedimentatiesnelheid sindsdien (+1.81 miljoen m³/jaar). Deze trendbreuk is niet rechtstreeks verbonden met een omvangrijke ingreep, maar wellicht zijn de lange-termijn effecten van ingrepen die eerder zijn uitgevoerd, zoals de afsluiting van de Middelsee en de daardoor ingezette oostelijke verplaatsing van de geulen in het bekken, nog steeds relevant. De sedimentatiesnelheid van de geulen is momenteel 0.7 miljoen m³/jaar. Dit houdt in dat het geulvolume over 10 jaar met ongeveer 5% zal afnemen als de huidige trends doorzetten.

Binnen het kombergingsgebied zijn er ook op kleine schaal maatregelen genomen, zoals de geulbestorting van de westkant van Ameland, het aanleggen van de vaargeul Holwerd-Ameland via twee doorsteken en het sindsdien uitgevoerde baggeronderhoud. Deze interventies zijn op zichzelf kleinschalig en zullen de grote waterbeweging en het morfologische gedrag op de schaal van het bekken niet rechtstreeks beïnvloeden, maar cumulatief en over een langere periode kan het wel een impact hebben. Het is mogelijk dat de aanleg en het onderhoud van de vaargeul Holwerd – Ameland een belangrijkere rol vervullen dan tot nu toe is aangenomen. De onderhoudsinspanningen voor de vaargeul, zoals het baggeren en verspreiden van 1.6 miljoen m³/jaar over de periode 2019 tot 2023, vertegenwoordigen vrijwel de netto volumeverandering van het volledige bekken.

Gemiddeld over het volledige kombergingsgebied groeit het sedimentvolume sinds 1982 sneller dan nodig is voor zeespiegelstijging, dus vanuit dit oogpunt vertoont het bekken een trend van verlanding. De gemiddelde hoogte van de litorale platen blijft gedurende de gehele periode bijna constant, wat inhoudt dat de platen qua hoogte niet veranderen in overeenstemming met de stijging van de zeespiegel. De sedimentatie treedt voornamelijk op in de geulen.

Sinds 1926 is het sedimentvolume van het kombergingsgebied Pinkegat met 49 miljoen m³ gestegen. Deze stijging gebeurde volledig tussen 1926 en 1981 (+0.8 miljoen m³/jaar), en sindsdien is de verandering in volume beperkt.

Het Pinkegat kenmerkt zich door de variatie tussen een 1-geul- en meergeulensystemen in het zeegat, met een herhalingstijd van 40 tot 50 jaar. De geulen in het bekken lijken eveneens dieper en beter ontwikkeld te zijn in de 1-geulconfiguratie en minder diep in de meergeulenconfiguratie. Het kombergingsgebied reageert eveneens op de afsluiting van de Lauwerszee. Na de afsluiting verplaatst het wantij onder de Engelsmanplaat zich aanvankelijk naar het westen en vervolgens weer naar het oosten, wat leidt tot een afname en vervolgens toename van het bekkenoppervlakte. Deze wijziging is ook zichtbaar in de groei van het volume. Aan de hand van de volumeontwikkeling van het volledige bekken kan

ook vastgesteld worden dat er voor 1994 een verlandingtrend was en dat er sindsdien een verdrinkingstrend is.

Het kombergingsgebied van de *Zoutkamperlaag* vertoont door de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 diverse fasen in zijn morfologisch gedrag. De schatting is dat de periode van versterking door afsluiting de morfologische veranderingen overheerst tot 1994, terwijl vanaf 1994 een veel kleinere, geleidelijke verandering in de morfologie de overhand heeft.

Ook voor de afsluiting van de Lauwerszee was er al een zichtbare impact van menselijk ingrijpen op de morfologische ontwikkeling, onder andere door inpolderingen, bedijking en kwelderwerken. In het kombergingsgebied leidt dit tot een netto-sedimentatie van +0.4 miljoen m³/jaar. De afsluiting van de Lauwerszee heeft een aanzienlijke impact op het getijprisma en de voortplanting van het getij. Hierdoor zijn de hydrodynamica en de bodem uit evenwicht, waardoor er een aanzienlijke interne respons in de morfologie te zien is. Tussen 1971 en 1982 was de sedimentatiesnelheid tijdelijk +2 miljoen m³/jaar. De huidige sedimentatiesnelheid komt dan weer overeen met die van voor de afsluiting (+0.4 miljoen m³/jaar). Het geulvolume neemt onmiddellijk na de afsluiting af en daalt sindsdien met -0.2 miljoen m³/jaar, wat ook inhoudt dat de gemiddelde diepte van het bekken afneemt (- 2 cm per jaar). Deze trends lijken zich ook in de huidige bodems onverminderd voort te zetten. Het opvullen van de geulen verloopt hier dus aanzienlijk sneller dan de zeespiegelstijging. Door de grote sedimentatie na de afsluiting was er voor 1994 een gemiddelde verlandingtrend. Na 1994 groeit het sedimentvolume in lijn met de zeespiegel. Dit is echter niet van toepassing op de litorale platen en de kwelder; deze vertonen een tendens tot verdrinking.

Twee belangrijke aanbevelingen die uit deze studie voortkomen zijn: (1). Gebruik eenduidige definities bij beoordeling van de (morfologische) toestand van de Waddenzee. Zo kan een evaluatie van verlanding, verdrinking of meegroeien in de Centrale Waddenzee uitsluitend worden uitgevoerd wanneer er een duidelijke definitie van deze termen wordt gegeven. Deze definitie moet minimaal de schaal van aggregatie (bijv. bekken, plaat of geul) en het kental voor beoordeling (zoals oppervlakte, volume en hoogte) bevatten. Een bekken kan in sedimentvolume meegroeien met de stijging van de zeespiegel, maar de gemiddelde plaat hoogte in dat bekken kan tegelijkertijd afnemen. (2). Een analyse op kleine schaal (platen en geulen) is nog niet uitgevoerd. Een dergelijke detailanalyse stelt ons in staat om de mechanismen en processen van verlanding, verdrinking of meegroeien grondig te onderzoeken, en de uitkomsten passen direct bij de heersende RWS-vraagstukken.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	10
1.1	Probleem- en vraagstelling	10
1.2	Studiegebied, ingrepen en beschikbare data	12
1.2.1	De Centrale Waddenzee en de onderliggende kombergingsgebieden	12
1.2.2	Een overzicht van ingrepen	12
1.2.3	Beschikbare bodemkaarten	14
1.3	Aanpak, Onderzoeksvragen en Methode van analyse	16
1.3.1	De schaalcascade als kapstok	16
1.3.2	Een inventarisatie van onderzoeksvragen	17
1.3.3	Methode	20
1.3.4	Een vernieuwde aanpak; keuzes, aannames & implicaties	21
1.4	Leeswijzer	25
2	Oppervlakte en ligging van de verschillende kombergingsgebieden	26
2.1	Wantij als begrenzing	26
2.2	Wantijliggingen	27
2.2.1	Borndiep	27
2.2.2	Pinkegat	28
2.2.3	Zoutkamperlaag	29
2.3	Ontwikkeling in kombergingsoppervlakte	29
2.4	Samenvatting van de resultaten	32
3	Morfologie van het Borndiep	33
3.1	Historische ontwikkeling Borndiep	33
3.1.1	De Middellzee en het ontstaan van het huidige bekken	33
3.1.2	Morfologische ontwikkeling vanaf 1831 tot 1982	34
3.2	Bodemhoogte en veranderingen sinds 1926	38
3.3	Veranderingen in volume en oppervlakte	42
3.3.1	Sedimentvolume van het kombergingsgebied, bekken en kwelder	42
3.3.2	Analyse van de geulvolumes en -areaal	45
3.3.3	Litorale en sublitorale platen en kwelders	48
4	Morfologie van het Pinkegat	52
4.1	Historische ontwikkeling Pinkegat	52
4.2	Bodemhoogte en veranderingen sinds 1926	53
4.3	Verandering in volume en oppervlakte	56
4.3.1	Sedimentvolume van het kombergingsgebied, bekken en kwelder	56
4.3.2	Analyse van de geulvolumes en arealen	58
4.3.3	Litorale en sublitorale platen en kwelders	61

5	Morfologische analyse Zoutkamperlaag	65
5.1	Historische ontwikkeling Zoutkamperlaag	65
5.2	Bodemhoogte en veranderingen vóór en ná afsluiting van de Lauwerszee	67
5.3	Verandering in volume en oppervlakte	71
5.3.1	Sedimentvolume van het kombergingsgebied, bekken en kwelder	71
5.3.2	Analyse van de geulvolumes en arealen	74
5.3.3	Litorale en sublitorale platen en kwelders	77
6	Samenvatting, conclusies en aanbevelingen	80
6.1	Samenvatting van de morfologische ontwikkelingen	80
6.1.1	Inleiding	80
6.1.2	Grootschalig / Centrale Waddenzee	81
6.1.3	Borndiep	83
6.1.4	Pinkegat	85
6.1.5	Zoutkamperlaag	87
6.2	Synthese - verlanden, verdrinking of meegroeien?	89
6.3	Beantwoording van de onderzoeksvragen	92
6.3.1	Grootschalig	92
6.3.2	Kombergingsniveau generiek	92
6.4	Aanbevelingen	94
7	Referenties	96
A	Aanvullende data en kaarten	100
A.1	Platen en geulen van de Centrale Waddenzee	100
A.2	Een overzicht van ingrepen	101
A.2.1	Afsluitingen van de Lauwerszee	101
A.2.2	Dijken, dammen en kwelders	102
A.2.3	Gaswinning	104
A.2.4	Zandsuppleties en zand- en schelpwinning	105
A.3	Bodemdata en kaarten	106
A.3.1	Hydrografische kaarten	106
A.3.2	Digitale bodemkaarten (Vaklodingen)	119
A.4	Engelsmanplaat	126
A.5	Invloed Lauwerszee op wantijligging (Van Sijp, 1986)	128
B	Aanvullende kaarten morfologische verandering	129
C	Aanvullende figuren Borndiep	132
C.1	Hypsometrische curven	132
C.2	Borndiep	133
D	Aanvullende figuren Pinkegat	134
D.1	Hypsometrische curven	134
D.2	Pinkegat	135

E	Aanvullende figuren Zoutkamperlaag	136
E.1	Hypsometrische curven	136
E.2	Zoutkamperlaag	137
F	volumes en arealen	138
F.1	Geulvolumes en oppervlakte	138
F.2	Plaatvolumes en oppervlakte	140

1 Introductie

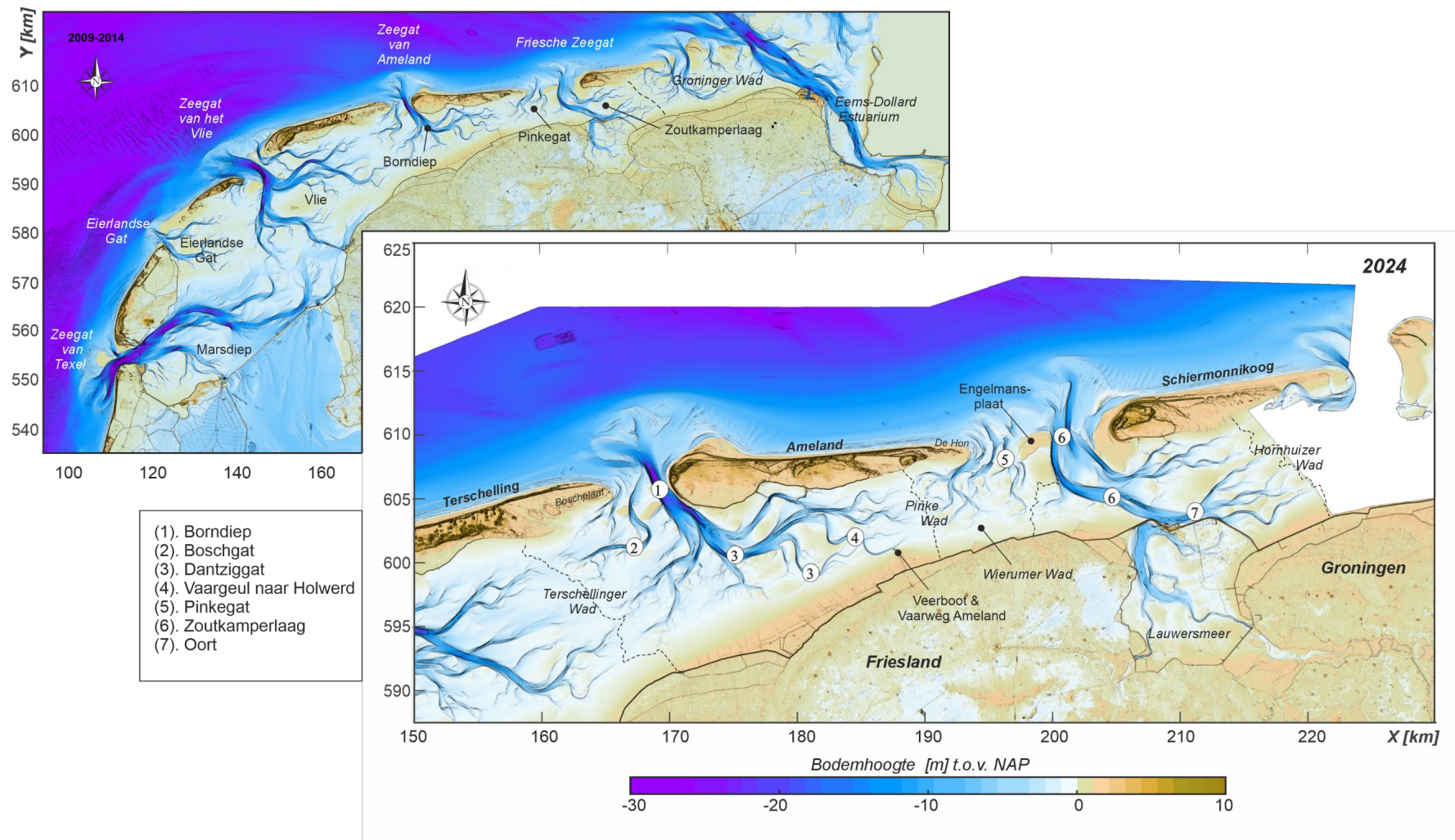
1.1 Probleem- en vraagstelling

Het doel van het programma Kennis voor Beheer en Onderhoud Waddenzee is te zorgen voor een goede kennis- en informatiebasis voor diverse morfologische en sediment-gerelateerde vraagstukken in de Waddenzee t.b.v. de RWS-taken rondom thema's Bereikbaarheid en Natuur en waterkwaliteit.

In de afgelopen jaren is er veel inzicht verkregen in de werking en morfologische ontwikkeling van de zeegaten en bekkens in de Waddenzee. Er is meer begrip van de veranderingen die opgetreden zijn in de zeegaten en hoe het Waddensysteem grootschalig functioneert. Ook is er kennis gegenereerd over het functioneren van de zeegaten in samenhang met het dynamisch kustbeheer. Een recente studie (Grasmeijer et al., 2022) heeft zich specifiek op de Westelijke Waddenzee gericht en geeft veel inzicht in de opgetreden en mogelijk toekomstige morfologische ontwikkeling. Het voorliggende onderzoek richt zich op de Centrale Waddenzee en specifiek op de kombergingsgebieden van het Amelanders Zeegat (Borndiep) en het Friese Zeegat (Pinkegat en Zoutkamperlaag). Het Groninger Wad is binnen deze studie niet beschouwd, omdat hier recentelijk al morfologische studies voor uitgevoerd zijn (Elias, 2021a; Elias et al.; 2022).

In zowel het Amelanders Zeegat als het Friese zeegat zijn er grootschalige morfologische ontwikkelingen zichtbaar en is het essentieel meer inzicht te krijgen in de gevolgen en verwachtingen van de (morfologische) trends, zodat de natuurfuncties en de bereikbaarheid van de havens en eilanden ook in de toekomst gegarandeerd kan worden. Kleinschalige studies naar knelpunten zijn recentelijk wel uitgevoerd (o.a. Villars et al. 2016; Witteveen & Bos, 2022; Meijers et al. 2024) en geaggregeerde sedimentbalansen zijn opgesteld (Elias et al. 2012; Wang et al. 2018), maar voor morfologische studies specifiek gericht op de ontwikkeling van de kombergingen moeten we eigenlijk terug naar de Kustgenese1-studies (zie bijvoorbeeld Oost en de Haas, 1992; 1993; Oost 1995). Binnen het Kustgenese2-programma zijn wel sedimentbalansen opgesteld, maar deze waren vooral gericht op het beter begrijpen van de uitwisseling tussen bekken en kust (Elias en Wang, 2020).

Het uiteindelijke doel van het onderzoek is om bestaande kennis en nieuwe analyses te gebruiken om tot een denkrichting te komen over de richting waarin de oostelijke bekkens zich morfologisch zullen ontwikkelen de komende decennia en wat de implicaties zijn voor de RWS-beheerstaken, specifiek vaargeul- en natuurbeheer. De studie is een eerste verkenning van mogelijke toekomstige ontwikkelingen van het gebied en bestaat uit een uitgebreide analyse van de literatuur en de beschikbare data.



Figuur 1-1 (boven): Een overzicht van de zeegaten en kombergingsgebieden van de Nederlandse Waddenzee op basis van de 2000-2014-bodemdata. Onder: een uitsnede van de Centrale Waddenzee en de kombergingsgebieden van het Borndiep, Pinkegat en de Zoutkamperlaag aan de hand van de 2024-bodemkaart. De centrale delen van de eilanden en vastelandkust zijn gebaseerd op het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN-4). Naamgeving volgt de kombergingsrapportages van Oost et al. (2017, 2019). Zie Appendix A.1 voor een volledig overzicht en beschrijving van de individuele geulen en platen.

1.2 Studiegebied, ingrepen en beschikbare data

1.2.1 De Centrale Waddenzee en de onderliggende kombergingsgebieden

De Nederlandse Waddenzee bestaat uit een vijftal grote zeegaten. Van west naar oost zijn dit het Zeegat van Texel, Eierlandse Gat, Zeegat van het Vlie, Amelanders Zeegat en Friese Zeegat. Ten oosten van het Friese Zeegat liggen nog de Rottums, met daartussen kleinere zeegaten die samen het Groninger Wad vormen en het Eems-Dollard estuarium (Figuur 1-1). De Waddenzee wordt vaak in twee delen onderverdeeld. De 3 westelijke bekkens, Marsdiep, Eierlandse Gat en Vlie, vormen de Westelijke Waddenzee en de bekkens van het Borndiep, Friese Zeegat en Groninger Wad vormen samen de Oostelijke Waddenzee.

In deze studie richten we ons op de kombergingsgebieden van het Amelanders Zeegat en het Friese Zeegat, waar we naar refereren als Centrale Waddenzee (Figuur 1-1). Het Groninger Wad en Eems-Dollard-estuarium zijn binnen deze studie niet verder geanalyseerd, aangezien hier recentelijk al uitgebreide morfologische analyses voor zijn uitgevoerd (Elias, 2021; Elias et al., 2022) en er op dit moment nog geen nieuwe bodemkaarten beschikbaar zijn.

Aan de zeezijde wordt de Centrale Waddenzee begrensd door de eilanden Terschelling, Ameland en Schiermonnikoog. Als afbakening tussen de verschillende kombergingsgebieden worden vaak de wantijen gebruikt. Voor het Zeegat van Ameland zijn dat het wantij gelegen op het Terschellinger Wad en het Pinke Wad. Het Friese Zeegat wordt aan de oostzijde begrensd door het Hornhuizer Wad. Langs de kust zijn uitgebreide kweldergebieden te observeren, zoals het Friese Wad, Wierumer Wad en Groninger Wad (Figuur 1-1, onder). De wantijen zijn hierbij afgeleid van de morfologische karakteristieken en representeren de ligging op basis van de meest recente bodem uit 2024 (zie Hoofdstuk 3 voor details). Ten zuiden van het Friese Zeegat is de voormalige Lauwerszee, nu Lauwersmeer, nog duidelijk zichtbaar. De afsluiting van de Lauwerszee werd voltooid in 1969. Naast de afsluiting van de Lauwerszee hebben ook de afsluiting van de Zuiderzee (1926-1932) en de afsluiting van de Middellzee invloed gehad op de morfologische ontwikkelingen.

1.2.2 Een overzicht van ingrepen

Naast de natuurlijke processen wordt de morfologische ontwikkeling van de Waddenzee ook sterk beïnvloed door menselijke ingrepen. De grote ingrepen zijn in het verleden uitgevoerd en hebben niet alleen bijgedragen aan de vorming van de huidige Waddenzee, maar hebben ook nog steeds invloed op de huidige en toekomstige ontwikkeling. Voor de Centrale Waddenzee omvatten de ingrepen: grootschalige afsluitingen (Middellzee, Zuiderzee en Lauwerszee), de aanleg van dijken, dammen en kwelders, bagger- en stortactiviteiten, en gaswinning. Voor de volledigheid worden in dit hoofdstuk de ingrepen kort benoemd. Voor een uitgebreide beschrijving van de ingrepen wordt verwezen naar de kombergingsrapportages (Oost et al. 2017 en 2020), de beheerbibliotheken voor de eilanden en zeegaten (Vermeer et al., 2022 en 2023) en Appendix A.2.

Dijken, afsluitdammen en kwelders.

In beide kombergingsgebieden hebben grootschalige inpolderingen en afsluitingen plaatsgevonden. Het Zeegat van Ameland was in de middeleeuwen nog verbonden met de toenmalige Middellzee, die zich ver landinwaarts uitstreekte tot ongeveer Bolsward en Sneek. De naam Borndiep stamt af van het riviertje Boorne, dat het Middellzee-estuarium vormde. Vanaf de 11^{de} eeuw is het estuarium deels natuurlijk opgeslibd en bedijkt. Rond 1600 is de vorm van het bekken dan al veranderd in het huidige 'korte' en brede bekken. Deze wijziging heeft ervoor gezorgd dat er in de Waddenzee ook morfologische veranderingen optreden,

zoals het oostelijk verplaatsen van het wantij en de geulen (Van der Spek, 1995 en hfdst. 3.2.1).

Langs de gehele huidige kustlijn van de Waddenzee zijn dijken aanwezig. De voorlopers van deze dijken werden al in de 9^{de} en 10^{de} eeuw aangelegd. Ze omringden kleinere gebieden om akkers tegen de meeste wintervloeden te beschermen. Rond 1000 A.D. waren lage lokale zomerdijken al wijdverspreid (Van der Spek, 1994; Oost, 1995) en rond 1400 A.D. ontstond zo al een doorlopend systeem van winterdijken langs de gehele Waddenkust van het vasteland. Rond de 19^{de} eeuw ontstond een kustlijn zoals we die nu kennen qua bedijking en in de 20^{ste} eeuw werden de grote estuaria, Zuiderzee en Lauwerszee, afgesloten en blijft alleen de Eems-Dollard nog als estuarium aanwezig.

Deze dijken en afsluitdammen zorgen voor een veilig achterland, maar hebben een grote invloed op de morfologie in het overgebleven deel van de Waddenzee. Het oppervlakte van de getijdenbekkens is drastisch afgenomen, waardoor getijprisma's, getijstromingen en waterstanden wijzigen en morfologische veranderingen optreden. De afsluitingen van zowel de Zuiderzee (1932) als de Lauwerszee (1969) hebben geresulteerd in een grote sedimentimport het bekken in, waardoor geulen zijn verzand en opgeslibd.

Door afsluiting van de Zuiderzee veranderde de grootschalige waterbeweging in de Westelijke Waddenzee (Elias, 2006; Grasmeyer et al. 2022), maar ook in het oostelijke deel was een invloed zichtbaar. Het huidige relatief ondiepe wantij van het Terschellinger Wad ontstond, waardoor de voormalige vaargeul Abt, die de verbinding tussen de bekkens van het Vlie en Ameland vormde, is opgevuld met sediment.

Het Friese Zeegat onderging een grote verandering met het afsluiten van de Lauwerszee in 1969. De Lauwerszee werd waarschijnlijk gevormd in de vroege middeleeuwen ($\approx$ 600-800 A.D.), waarna het estuarium steeds meer in omvang toenam. Landaanwinning kwam rond 1240 A.D. op gang en in de loop van de eeuwen werden grote delen van de Lauwerszee ingepolderd. Plannen om de Lauwerszee volledig af te dammen werden al in 1600 gemaakt, maar de watersnood van 1953 gaf de doorslag bij de besluitvorming tot definitieve afsluiting. De werkzaamheden begonnen in 1961 en werden in 1969 afgerond.

De landaanwinningen en bedijkingen hebben ervoor gezorgd dat een groot deel van het oorspronkelijke kwelderareaal is verdwenen. Wel zijn een aantal kunstmatige kwelders ontstaan langs de Groningse en Friese vastelandkust door landaanwinningswerken die niet bedijkt zijn, maar beheerd worden voor natuurlijke waarden. Deze kwelders zijn gecreëerd door rijshouten dammen aan te leggen, waarna aanslibbing kan optreden. In de komberging van het Pinkegat bevinden zich kleine kweldergebieden langs de Friese vastelandkust, links en rechts van de veerdam van Holwerd. Op de eilandstaart van Ameland zijn twee natuurlijke kweldergebieden aanwezig: de kleinschalige kwelder van De Hon en de grotere, beweidde kwelder in Neerlands Reid. In het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag is er een uitgebreid kweldergebied aanwezig langs de Groningse waddenzeedijk. Deze Groninger kwelders hebben zich vooral na de 2^{de} wereldoorlog ontwikkeld door aanleg van uitgebreide kwelderwerken. Tegenwoordig gaat de ophoging van de kwelders nog wel door, maar is de aanslibbingssnelheid minder dan 1 cm/jaar (Oost et al., 2020). Op Schiermonnikoog zijn uitgebreide kweldergebieden aanwezig. De kwelders bij Oostpunt hebben zich in de luwte van de stuifdijken, die hier sinds 1950 zijn aangelegd, ontwikkeld. In Appendix A.2.2 worden aanvullende kaarten gegeven.

Naast de bedijkingen is een drietal kleinschalige dammen aangelegd. De huidige veerdam bij Holwerd steekt zo'n 2 km de Waddenzee in (Figuur 1-2). Deze dam is op de restanten van de dam van Teding Berkhout gebouwd (zie Appendix A.2.2 voor details). Daarnaast zijn er twee dammen aangelegd bij Ameland in de Ballumerbocht (stroomleidend Ballum) en het aanlegghoofd van de veerhaven bij Nes. De oorsprong van deze dam ligt rond 1889 met de

aanleg van houten aanlegsteigers en werd in de jaren dertig uitgebreid. In 1959 werd een nieuwe, langere dam gebouwd op de huidige locatie.

Gaswinning en bodemdaling

In 1986 is gaswinning in het Waddengebied en de aangrenzende Noordzeekust van Ameland gestart. Deze gaswinning zorgt ervoor dat de diepe ondergrond lokaal daalt in de vorm van een dalingssschotel, waarbij het centrum van deze schotel onder de eilandstaart van Ameland ligt. Hier staat ook het boorplatform van de NAM. Sinds de start van de winning in 1986 is de totale daling in het midden van de kom bijna 40 centimeter. Op basis van de voorspelde schotel in 2021 bedraagt het totale volumeverlies -19 miljoen m³. Hiervan treedt -4.7 miljoen m³ op in de komberging van het Pinkegat en -3.3 miljoen m³ onder de eilandstaart. Daarnaast zijn er kleine verliezen in het Borndiep (-0.8 miljoen m³) en onder de Engelsmanplaat (-0.1 miljoen m³). Het bekken en de buitendelta van de Zoutkamperlaag verliezen respectievelijk -2.2 miljoen m³ en -2.9 miljoen m³ aan sediment (zie Appendix A.2.3 voor details).

Zandsuppleties, zand- en schelpenwinning

Zandsuppleties worden niet direct in de bekkens van de Centrale Waddenzee geplaatst. Wel kan er toevoer van sediment optreden vanaf de eilandkusten richting de zeegaten en buitendelta. Sinds 1979 is er ruim 26 miljoen m³ aan zand langs de centrale eilandkust van Ameland gesuppleerd in de vorm van strand-, vooroever- en duinsuppleties. Deze suppleties hebben een directe invloed op het eiland, maar voeden ook de langstransporten die richting het Pinkegat zeegat staan. Een overzicht van zand- en schelpenwinning in de gehele Waddenzee wordt gepresenteerd in de kombergingsrapportages van Oost et al. (2017, 2020), De Wit (2024) en Mestdagh (2024).

Vaargeulonderhoud, baggeren en storten

Een recente inventarisatie van de baggervolumes wordt gegeven door De Wit et al. (2024). Het baggeren gebeurt op verschillende locaties: rond de veerdammen Holwerd en Nes, de vaargeul Holwerd-Ameland, de Reegeul en Ballumerbocht. Uit deze rapportage volgt dat in het Borndiep de baggervolumes sterk zijn toegenomen sinds 1990. Het baggervolume bedroeg rond de 0.1 miljoen m³/jr. maar is toegenomen tot bijna 2 miljoen m³/jr. in de piekjaren 2015 en 2020. Een sprong in baggervolume, tot 1.7 miljoen m³/jr., trad op in 2010-2012 door aanpassing van de geulafmetingen op de verbinding Holwerd-Ameland (vaarwegbreedte van 55 m naar 60 m en diepte van -3.50 m NAP naar -3.80 m NAP). In de jaren 2019-2023 werd in totaal 8.1 miljoen m³ gebaggerd (1.6 miljoen m³/jr.). Het jaarlijkse volume varieerde tussen de 1.5 en 1.9 miljoen m³.

In het Friese Zeegat is het baggervolume toegenomen van minder dan 0.05 miljoen m³/jr. in de beginjaren '90 naar 0.08-0.30 miljoen m³/jr. sinds 1995. Over de meest recente periode (2006-2023) variëren de volumes tussen de 0.1 en 0.3 miljoen m³/jr. In de jaren 2019-2023 werd in totaal 1.2 miljoen m³ gebaggerd (0.24 miljoen m³/jr.). Het jaarlijkse volume varieerde hierbij tussen de 0.14 en 0.31 miljoen m³. Het baggeren is verspreid over meerdere locaties. Zo worden de veerhaven en haven van Lauwersoog en Schiermonnikoog gebaggerd en de vaargeulen Glinder en Groote Siege. De baggervolumes van Groote Siege liggen al sinds 1989 tussen de 0.01 en 0.11 miljoen m³/jr. In de Glinder zijn de volumes sinds 2005 toegenomen tot 0.1 – 0.16 miljoen m³/jr.

1.2.3 Beschikbare bodemkaarten

Rond 1800 A.D. komen de eerste gedetailleerde bodemkaarten beschikbaar die geschikt zijn voor morfologische analyses van de geulen en platen in de oostelijke Waddenzee (Appendix A.3 en Figuur 1-2). De oudere bodemkaarten zijn beschikbaar als analoge kaarten van de Dienst der Hydrografie van de Koninklijke Marine (tot 1960) en de voormalige Adviesdienst

Een deel van de analoge kaarten is gedigitaliseerd in het kader van grootschalige onderzoeken naar de sedimentatie en erosie van de Waddenzee. Voor de Westelijke Waddenzee en het Amelandse Zeegat zijn er min of meer dekkende kaarten voor de periode 1925-1985 gemaakt (zie de rapporten van Glim et al. 1986, 1987, 1988a,b, 1989 en 1990 voor details en Appendix A.3.2 voor een weergave van de kaarten). De onderliggende data is daarbij zorgvuldig omgerekend naar een rooster met 250x250 m resolutie. In de roostercellen met voldoende resolutie 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 de verticale hoogte door omrekening naar de 250 m resolutie wordt geschat op ongeveer 20 tot 30 cm. Zie de rapporten van Glim et al. (1986, 1988) voor details. In het kader van het eerste Kustgenese-onderzoek zijn de bodemkaarten van het Friese Zeegat voor 1991 gedigitaliseerd van minuutbladen en aangevuld met bijv. landaanwinningsgegevens, kustmetingen en detailkaarten waar nodig (Oost en de Haas, 1992). De uiteindelijke gegevensbestanden van de dieptemetingen zijn gerasterd in een rooster met een celgrootte van 90x90 meter. Dit rooster is voor ieder jaar identiek, zodat vergelijkingen tussen de verschillende jaren mogelijk zijn.

Sinds 1985 heeft Rijkswaterstaat de bodemdata digitaal ingewonnen en opgeslagen. Er zijn hierbij verschillende bronnen van digitale data beschikbaar, zoals de gebiedsdekkende Vaklodingen, de jaarlijkse metingen van de kustzone (Jarkus) en LiDAR-hoogtemetingen van de duinen en (droogvallende) wadplaten. Deze data is vrij opvraagbaar bij Rijkswaterstaat (RWS-CIV) en op te vragen bij de Helpdesk Water van Rijkswaterstaat (<https://www.helpdeskwater.nl>). Op basis van de digitale data zijn door Elias (2024) 12 bodemkaarten van de Oostelijke Waddenzee gemaakt over de periode 1926-2022, met volledige dekking van het gehele zeegat en bekken in 20x20 m resolutie (Appendix A.3.2). In deze bodemkaarten zijn missende hoogtes op de eilanden en vastelandkust ingevuld met het corresponderende AHN-hoogtebestand (zie Figuur 1-1 als voorbeeld). De bodembestanden vormen de basis voor de gedetailleerde morfologische analyses en volumeberekeningen uitgevoerd in Hoofdstuk 3. Het gebruik van volledig dekkende kaarten heeft een aantal voordelen voor visualisatie en interpretatie. Een nadeel is echter dat bodemveranderingen in met name de oude kaarten niet geheel representatief kunnen zijn en er daarom zorgvuldig geanalyseerd moet worden (zie volgend hoofdstuk voor uitleg).

1.3 Aanpak, Onderzoeksvragen en Methode van analyse

1.3.1 De schaalcascade als kapstok

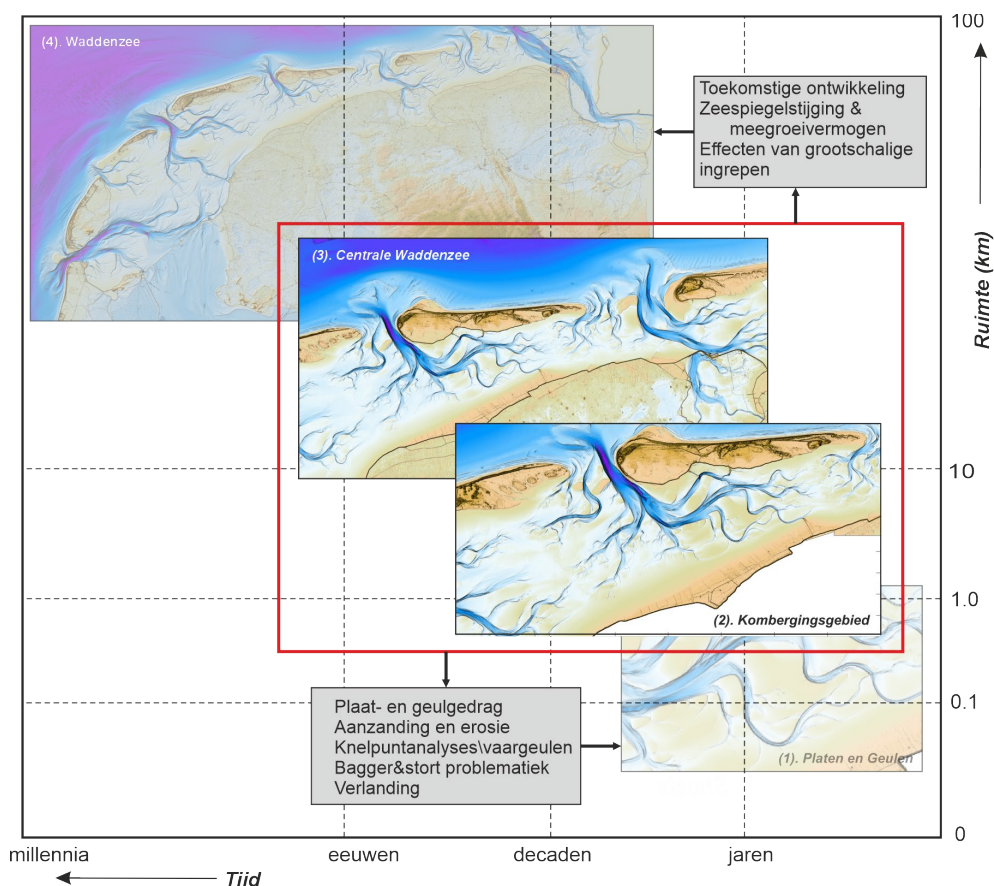
Het getij, de wind en golven zijn de drijvende processen achter de waterbeweging en de sedimenttransporten in de Waddenzee en daardoor ook voor de ligging van de geulen en platen. Deze processen en de morfologische respons kunnen een grote variatie in de tijd en ruimte vertonen. Om dit gestructureerd te beschrijven, wordt het schaalcascadeconcept (Cowell et al., 2003a,b) als kapstok voor het onderzoek toegepast. Afhankelijk van het morfologische systeem en het doel van de analyse kan de schaalcascade uit verschillende elementen of niveaus van aggregatie bestaan. Voor de Waddenzee wordt hierbij een schaalcascademodel met 4 niveaus van aggregatie gebruikt (Figuur 1-3).

Op het kleinste schaalniveau vinden we de ontwikkeling van de individuele **(1) geulen, platen en kwelders**. Dit schaalniveau wordt in deze studie niet expliciet behandeld, maar wordt geanalyseerd in bijv. de knelpuntanalyses, waar de resultaten van deze studie een belangrijke bouwsteen voor vormen.

Een aggregatieniveau hoger vinden we het schaalniveau van **(2) kombergingsgebieden**, hierin wordt de ontwikkeling van de kombergingsgebieden in volume, oppervlakte en hoogte beschouwd (Hoofdstuk 2, 3, 4 en 5). De kombergingsgebieden van het Ameland en Friese Zeegat vormen samen het aggregatieniveau **(3) Centrale Waddenzee**. De analyse van de Centrale Waddenzee wordt uitgevoerd door de individuele kombergingsgebieden in detail te bekijken en de resultaten te aggregeren. De analyses op dit schaalniveau zijn vooral gebaseerd op de digitaal beschikbare meetdata (Vaklodingen), die beschikbaar zijn sinds 1926. Daarnaast is het langetermijngedrag van de Centrale Waddenzee geanalyseerd middels een uitgebreide literatuurstudie en waar nodig zijn veranderingen geïllustreerd door de hydrografische kaarten.

Op het grootste schaalniveau, **(4) de Waddenzee**, worden de ontwikkelingen van de gehele Waddenzee beschouwd. De vragen die op deze schaal beantwoord worden, zijn bijvoorbeeld of en hoe de grootschalige veranderingen van de Waddenzee de ontwikkelingen in de Centrale Waddenzee op langere termijn blijven beïnvloeden. Op deze schaal zijn de bedijking van de vastelandkust en vasthouden van de kustlijn van de eilanden door suppleties, afsluitingen van de Middellzee, Zuiderzee en Lauwerszee van direct belang. Voor de toekomst speelt hier de eventuele verandering in grootschalige Waddenzeemorfologie door zeespiegelstijging. Deze processen hebben misschien niet altijd een directe, maatgevende invloed op de lokale ontwikkeling, maar kunnen wel door schaalinteracties op

langere termijn een rol gaan spelen. De analyses op dit schaalniveau zijn gebaseerd op de literatuur (effecten van de ingrepen) en expert judgement.



Figuur 1-3: Een schaalcascade van de Waddenzee met een focus op de Centrale Waddenzee.

1.3.2 Een inventarisatie van onderzoeksvragen

Het oorspronkelijke doel van de studie was vrij generiek gedefinieerd, als het beter begrijpen van de morfologische ontwikkeling van de Centrale Waddenzee ter ondersteuning van de RWS-beheerstaken binnen het vaargeul- en natuurbeheer. Als onderdeel van deze studie zijn specifieke onderzoeksvragen en hypothesen die bij Rijkswaterstaat spelen geïnventariseerd (Tabel 1-1). Deze onderzoeksvragen zijn uitgewerkt volgens de indeling van de schaalcascade en gegroepeerd als : (1) grootschalig en gehele Centrale Waddenzee (schaal 3), (2) generieke vragen voor de kombergingsgebieden (schaal 2) en (3) specifieke vragen per kombergingsgebied (schaal 1).

Grootschalig / Centrale Waddenzee

Wat betreft de ontwikkeling op de schaal van de Centrale Waddenzee worden de volgende twee vragen specifiek opgepakt:

1. Is er sprake van een dynamisch evenwicht of specifieke trend in de morfologische ontwikkeling?
2. Hoe ziet het grootschalige evenwicht of de trend eruit en is er sprake van verlanding, verdrinking of meegroeien met zeespiegelstijging van de Centrale Waddenzee?

Onderliggend aan de generieke vragen op kombergingsniveau zijn eigenlijk 2 vraagstukken te definiëren. Ten eerste is het benodigd de huidige en toekomstige ontwikkeling van de platen, het litoraal en sublitoraal, beter te begrijpen, zodat een gefundeerde uitspraak over de

toekomstige ontwikkeling (verlanding versus verdrinking) gemaakt kan worden. Ten tweede, het beter begrijpen van de ontwikkeling van de geulsystemen. Deze geulsystemen vormen niet alleen de essentiële vaargeulen tussen vasteland en eilanden, maar ook de basis, de ruggengraat, van het gehele bekken. Verandering in de verhouding tussen hoofd- en nevengeulen kan grootschalig het gehele bekken veranderen, maar er ook voor zorgen dat bestaande vaargeulen (of onderhoud hiervan) significant verandert. Op dit schaal niveau zijn specifiek de volgende vragen beantwoord.

- Wat zijn de verschillen in evenwicht en trends tussen de bekkens in ontwikkeling, volume en oppervlakte?
- Hoe voltrekt de verlanding zich in de verschillende kombergingsgebieden en zijn hier nog verschillen tussen de 3 systemen?
- Wat zijn de trends in verlanding en is het de verwachting dat deze zich voortzetten de komende 10/20 jaar, en wat betekent dit voor het oppervlakte intergetijdengebied in de nabije toekomst?
- Hoe ziet de ontwikkeling van het kombergingsoppervlak eruit en wat is de relatie met het natte oppervlak van de zeegaten?
- Wat is de ontwikkeling van de kwelder, wadplaten en sublitoraal en hoe verhouden deze verschillende zones zich tot elkaar?
- Hoe ziet de toekomstige ontwikkeling van de bekkens eruit, specifiek gericht op oppervlakte en volume van de verschillende arealen (geulen, litoraal, sublitoraal en kwelder)?

In de conclusies worden waar mogelijk deze vragen beantwoord. Voor de vragen die niet of niet volledig beantwoord kunnen worden, zijn aanbevelingen voor toekomstig onderzoek gegeven. Het onderzoek uitgevoerd in deze studie vormt een goede basis voor de specifieke vragen per kombergingsgebied. Deze vragen zijn echter binnen deze studie niet verder uitgewerkt maar vormen onderdeel van de vervolgstudie.

Tabel 1-1: Inventarisatie onderzoeksvragen ter ondersteuning van RWS-taken voor vaargeul- en natuurbeheer onderverdeelt over de verschillende schalen van de schaalcascade.

A. Grootschalig – Centrale Waddenzee	
1	Is er sprake van een dynamisch evenwicht of specifieke trend in de morfologische ontwikkeling?
2	Hoe ziet het grootschalige evenwicht of de trend eruit en is er sprake van verlanding, verdrinking of meegroeien met zeespiegelstijging van de Centrale Waddenzee?
4	Is er sprake van een dynamisch evenwicht/trend? (na ingrepen verleden) *
5	Hoe ziet dit evenwicht / trend uit? Verlanding/verdrinking of meegroeien met ZSS
6	Wat zijn de verschillen in evenwicht en trends tussen de bekkens?
Hypothese: Wadplaten groeien vooral in oppervlakte en niet in hoogte, dit wordt gedreven door groei van sublitorale oppervlakte. Gebaseerd op de bovenstaande hypothese: Wat is de rol van de geulen hierin? En van de kwelders? Wat is het mechanisme achterverlanding?	
B. Kombergingsniveau - generiek	
7	Wat zijn de verschillen in evenwicht en trends in morfologische ontwikkeling, sedimentvolume en oppervlak van de verschillende kombergingsgebieden?
8	Hoe voltrekt de verlanding zich in de verschillende kombergingsgebieden en zijn hier nog verschillen tussen de 3 systemen?
9	Wat is het mechanisme achter verlanding in relatie tot de ontwikkeling in volume en areaal van kwelder, litoraal en sublitoraal?
10	Wat zijn de trends in verlanding? Is het de verwachting dat deze trends zich voortzetten de komende 10/20 jaar en wat betekent dit voor het oppervlakte van het intergetijdengebied in de nabije toekomst?

11	Hoe ziet de ontwikkeling van het kombergingsoppervlak eruit en wat is de relatie met het natte oppervlak van de zeegaten?
12	Hoe ziet de toekomstige ontwikkeling van de bekkens eruit, specifiek gericht op oppervlakte en volume van de verschillende arealen (geulen, litoraal, sublitoraal en kwelder)?
13	Er kan in een aantal Waddenbekkens een verschuiving/aanpassing van het geulensysteem van het meest zuidelijke systeem naar de meest noordelijke geul worden waargenomen. Is deze trend ook zichtbaar in de Centrale Waddenzee en indien aanwezig, kan er dan een uitspraak gedaan worden over de toekomstige ontwikkeling van de geulensystemen?
14	Wat is de ontwikkeling van de kwelders, wadplaten en sublitoraal en hoe verhouden deze verschillende zones zich met elkaar?
15	Is het de verwachting dat alle bekkens een soortgelijke cycliciteit hebben als het Pinkegat, mogelijk met een eigen tijdschaal (afhankelijk van oppervlakte, getijkarakteristieken, historie, etc)?
16	Wat zijn oorzaken voor de trendbreuken (behalve afsluiten Zuiderzee en Lauwerszee) in sedimentatie in Bordiep/Pinkegat/Zoutkamperlaag?
	<i>Hypothese: Wadplaten groeien vooral in oppervlakte en niet in hoogte; dit wordt gedreven door groei van het sublitorale oppervlakte. Wat is de rol van de geulen hierin? En van de kwelders?</i>
C. Kombergingsniveau – specifiek	
Bordiep	
17	Er is een competitie tussen een aantal geulsystemen met flinke menselijke invloed. Hoe zal de interactie tussen deze 3 systemen zich verder ontwikkelen in de toekomst en wat is de rol van de baggerwerkzaamheden langs de vaargeul hierin?
18	Wat is de verhouding tot het Dantziggat en de huidige vaargeul en hoe beïnvloeden deze twee geulen elkaar?
19	Zijn er effecten van de afsluiting van de Zuiderzee te zien die mogelijk een invloed uitoefenen op het kombergingsgebied van het Bordiep en specifiek de eilandstaart erosie van de Boschplaat beïnvloeden?
20	Is er een verband tussen de erosie van zuidwest-Ameland en de ontwikkeling van de geulen in het kombergingsgebied en hoe ziet de toekomstige ontwikkeling eruit?
21	Is er een relatie tussen de suppleties op Ameland-West en de verlanding in het bordiep?
Pinkegat	
22	De geulen van het Pinkegat vertonen een grote cycliciteit. Wat zullen de ontwikkelingen zijn in de komende decennia en zijn er nog gevolgen voor de eilandstaart van Ameland?
23	Is er een verband tussen de volumeontwikkeling van het Pinkegat en de bodemdaling door gaswinning?
Zoutkamperlaag	
24	Zijn er nog effecten van de afsluiting van de Lauwerszee en indien aanwezig, hoe zullen die zich in de toekomst ontwikkelen en wat zijn de verwachte dominante toekomstige ontwikkelingen?
25	Wat is de verwachte ontwikkeling van de geulsystemen en specifiek hierin de ontwikkeling van Zoutkamperlaag versus Binnenplaatgat?
26	Wat is de aanzandingssnelheid van de Zoutkamperlaag en wat zijn de gevolgen hiervan voor de omringende geulen en platen?
27	Hoe ziet de ontwikkeling van het Strandgat eruit?

*evenwicht en trend van zowel volume als oppervlakte van verschillende areaal classificaties.

1.3.3 Methode

De recente morfologische ontwikkelingen zijn geanalyseerd door de morfologische veranderingen te berekenen (m.b.v. de digitaal beschikbare bodemkaarten) en samen te vatten in bodemhoogteverschilkaarten, hypsometrische curven en veranderingen in sedimentvolume.

Het berekenen van de veranderingen in sedimentvolume is in principe eenvoudig, want dit is gewoon de optelsom van het verschil in bodemhoogte per roosterpunt, vermenigvuldigd met het oppervlakte binnen een afgebakend balansgebied. Als het balansgebied groot genoeg wordt gekozen (bijv. de gehele Waddenzee), dan ontstaat over de lange termijn een coherent beeld, waarbij bijvoorbeeld meeton nauwkeurigheden of kleinschalige morfologische veranderingen geen dominante rol meer spelen. De eerdere studies van bijvoorbeeld Elias et al. (2012) en Wang et al. (2018) laten zien dat er over de periode 1935-2005 ongeveer 650 miljoen m³ sediment de Waddenzee in is getransporteerd. Het merendeel van dit sediment werd geleverd door de buitendelta's die sterk in volume afnamen. De grootste volumeveranderingen, ongeveer 75%, werden geobserveerd in het westelijke deel van de Waddenzee. Deze sedimentatie is vooral het gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee en niet primair een respons op bijv. de stijging van de zeespiegel. Een soortgelijke respons was ook zichtbaar in het oostelijke deel van de Waddenzee, waar netto aanzanding plaatsvond na afsluiting van de Lauwerszee.

Het wordt ingewikkelder als we de morfologische ontwikkeling en volumeveranderingen op kleinere schaal willen begrijpen om bijvoorbeeld de aanzanding in vaargeulen beter te begrijpen of een gefundeerde uitspraak over de toekomstige ontwikkeling van individuele platen en geulen willen doen. Op kleine schaal vertonen deze platen en geulen een grote dynamiek, waardoor een afbakening op lange termijn niet direct te maken is. Dit probleem speelt zelfs al op het niveau van de kombergingsgebieden. Het is bekend dat de kombergingsgebieden door de tijd in omvang veranderen, maar of en hoe dit de analyse beïnvloedt, is niet bekend. Het Marsdiep is hiervan het duidelijkste voorbeeld. Afhankelijk van de gekozen afbakening krijg je hier een systeem dat aanzandend is, stabiel of eroderend. De juiste keuze van afbakening is essentieel om een doorvertaling te maken naar de toekomstige ontwikkeling.

Naast afbakening van het balansgebied speelt ook de vraag of geobserveerde langetermijn en grootschalige ontwikkeling uit het verleden wel representatief is voor de toekomstige ontwikkeling. In de studie van Elias (2018) is voor de Westelijke Waddenzee daarom al een beter beeld van het toekomstige morfologische gedrag gemaakt door gebruik te maken van trendlijnanalyses van de sedimentatie-erosiegebieden. Deze methode maakt het o.a. mogelijk meeton nauwkeurigheden en veranderingen in morfologisch gedrag te identificeren. Deze methode kon niet direct toegepast worden in de Oostelijke Waddenzee, omdat hier de dynamiek van de geul-plaatpatronen groter is, waardoor het maken van representatieve sedimentatie-erosiepolygonen niet triviaal is. Een tweede knelpunt is dat een analyse op sedimentatie-erosiegebieden niet direct antwoorden geeft over het gedrag of de ontwikkeling van individuele geulen en platen. Daarnaast sluiten deze morfologische analyses niet direct aan op de zonering zoals die bijv. toegepast wordt in ecologische studies. In deze studies is het getij vaak bepalend in de zonering en ligt de scheiding vaak tussen verschillende zones die wel of niet meedoen bij het dagelijks getij.

1.3.4 Een vernieuwde aanpak; keuzes, aannames & implicaties

Keuzes & aannames

Bij elk onderzoek worden bewust en onbewust in zowel de vraagstelling, analyse als interpretatie keuzes en aannames gemaakt. In dit hoofdstuk wordt getracht de impact hiervan duidelijk te maken. Dit is essentieel voor een juiste interpretatie van met name de resultaten van de volume- en areaalberekeringen.

Keuze 1: kombergingsgebied & wantij.

Analyse van de Waddenbekkens is vrijwel altijd gebaseerd op een indeling in afzonderlijke bekkens ofwel kombergingsgebieden. De begrenzing van de kombergingsgebieden wordt vaak gelegd op het (morfologische) wantij. Dit wantij wordt in essentie bepaald door de twee getijgolven die vanuit aangrenzende zeegaten propageren en elkaar in de Waddenzee ontmoeten, waar dan een ondiepte (wantij) ontstaat. De propagatie van dit getij hangt af van de lokale morfologie en veranderingen hierin zorgen ervoor dat ook de locatie van het wantij verplaatst. Het wantij kan ook veranderen door ingrepen die de hydrodynamica beïnvloeden (zoals afsluitingen). De definitie van kombergingsgebied met een wantij als begrenzing resulteert dan per definitie in een in de tijd variërende omvang van het kombergingsgebied (zie Hoofdstuk 2 voor uitwerking).

Keuze 2: Netto volumeverandering, verandering van litoraal, sublitoraal, platen en geulen.

De gestelde onderzoeksvragen moeten leiden tot een gefundeerd antwoord over de toekomstige ontwikkeling van het kombergingsgebied, maar ook over de ontwikkeling van de (vaar)geulen en het plaatareaal (oppervlakte en volume). Door een morfologische analyse uit te voeren, kunnen deze vragen beantwoord worden. De basis van deze analyse wordt gevormd door de bodemkaarten en bodemhoogteverschilkaarten, maar de analyse moet dan wel specifiek gericht zijn op de beantwoording van de onderzoeksvraag. Hiervoor zijn dan drie analysedoelen/vragen geformuleerd:

1. Wat is de totale sedimentvolumeverandering en trend per kombergingsgebied?
2. Hoe veranderen de geulvolumes?
3. Wat zijn de sedimentvolumes en arealen van de platen?

Door een kwantificering van de morfologische veranderingen aan de hand van deze 3 deelvragen, in combinatie met een analyse van de hypsometrische curven en morfologische veranderingen (sedimentatie-erosiepatronen, contourverplaatsingen), kan een coherent beeld van het huidige morfologische systeem en de toekomstige ontwikkeling worden verkregen.

Keuze 3: Volledig dekkende bodemkaarten.

Binnen deze studie zijn de volledig dekkende bodemkaarten van Elias (2024) gebruikt als basis. Het voordeel van volledig dekkende bodemkaarten is dat deze een kwalitatief beter beeld geven van de morfologische veranderingen en fouten door missende datapunten worden voorkomen.

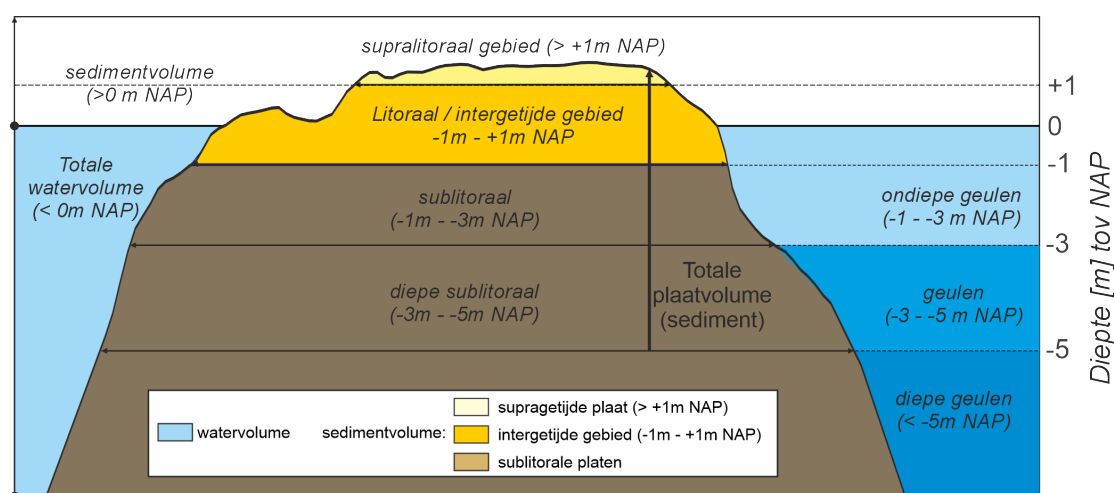
Referentievlakken

De bepaling van geul- versus plaatveranderingen vereist ook een definitie van deze twee gebieden. Hiervoor worden een aantal vaste referentievlakken gehanteerd (Figuur 1-4). De keuze van het juiste referentievlak is geen triviale zaak; hier kunnen verschillende afwegingen aan ten grondslag liggen. Vanuit een ecologisch perspectief geeft een onderverdeling op basis van de getijkarakteristieken een logische indeling. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden in gebieden die zich onder Gemiddeld Laag Water (GLW) bevinden (het sublitoraal), gebieden die zich boven Gemiddeld Hoog Water (GHW) bevinden (het supralitoraal) en het gebied tussen GLW en GHW (het litoraal of intergetijdengebied).

Daarnaast worden in de Waddenzee de geulen gedefinieerd als de delen die dieper liggen dan -5 m NAP. Een probleem met de definitie van getij-gebaseerde waarden is dat deze door de tijd en in de ruimte variëren, terwijl voor een morfologische analyse een vast referentievlak gebruikt moet worden. Als basis van deze studie zijn daarom 4 vaste referentieniveaus gehanteerd, zoals geïllustreerd in Figuur 1-4. Deze referentiehoogten zijn:

- +1 m NAP (als representatief gekozen voor GHW)
- 0 m NAP (basisreferentie)
- -1 m NAP (als representatief gekozen voor GLW)
- -3 m NAP (geulen)
- -5 m NAP (diepe geulen)

Op basis van deze referentievlakken kan het totale sedimentvolume, het deel boven het referentievlak, versus het totale watervolume (het deel onder het referentievlak) worden berekend. Omdat de verandering in watervolume gelijk is aan de inverse verandering in sedimentvolume, geeft de som van de verandering in water- en sedimentvolume tussen 2 bodemkaarten altijd de totale nettoverandering van het kombergingsgebied weer.



Figuur 1-4: Weergave van de verschillende referentieniveaus en indeling in dieptezones gehanteerd binnen deze studie. Zie Appendix A.4 voor voorbeelden van het 'plaat-' versus 'geulareaal' voor verschillende referentievlakken.

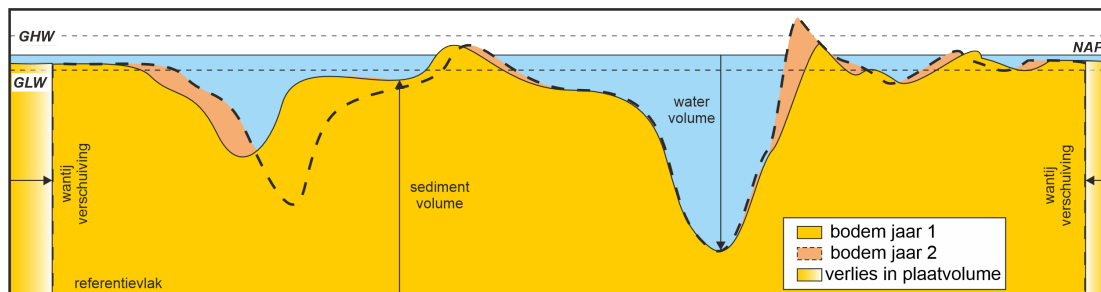
Het **0 m NAP-referentievlak** is gebruikt om de totale volumebalans per kombergingsgebied te maken. De volumeverandering wordt dan uitgedrukt t.o.v. het 1^{ste} jaar van meting, zodat een onderscheid tussen water- en sedimentvolume niet nodig is.

De waarde voor **GHW** en **GLW** varieert sterk over de Waddenzee. Bij Den Helder ligt het GLW rond de -0.80 m NAP en dit neemt toe tot -1.1 m NAP bij de meetstations Schiermonnikoog en Nes. De getijslag neemt richting de Eems verder toe en het GLW bedraagt rond de -1.4 m NAP bij de Eemshaven (bron: Digitale Systeem Rapportage - <https://www.systeembrapportage.nl/wadden/hydro.html#gemiddeld-laagwater-glw>). Het gemiddelde hoogwater neemt toe van +0.6 m NAP in Den Helder tot +1.04 m NAP in Nes en 1.21 m NAP in de Eemshaven. Als benadering van GHW en GLW over de gehele Waddenzee zijn waarden van +1 m NAP en -1 m NAP gebruikt.

De **NAP -3 m (geulen)** is gekozen als representatief voor de geulpatronen, omdat dit een consistente weergave van het dominante geulenpatroon in alle gemeten jaren geeft. Daarnaast is de **-5 m NAP (diepe geulen)** contour toegevoegd voor consistentie met andere

studies. Het nadeel van de -5 m NAP-contour is dat deze in ondiepe bekkens, zoals die van het Pinkegat, slechts een beperkte weergave van de geulen geeft.

Op basis van deze contouren kan ook aanvullend begrip van het sedimentvolume van de platen binnen het **sublitoraal (-1 - -3 m NAP)** en **litoraal** worden verkregen (Figuur 1-4). Doordat buiten de kwelders slechts weinig supragetijdeplaten voorkomen, heeft het weinig meerwaarde deze apart te beschouwen en bevat de analyse van het litoraal het gehele volume en oppervlak boven GLW.



Figuur 1-5: Conceptuele weergave van bodemverandering in een Waddenbekken en definitie van de verschillende afbakeningen.

Keuzes & implicaties

Kombergingsgebieden als afbakening

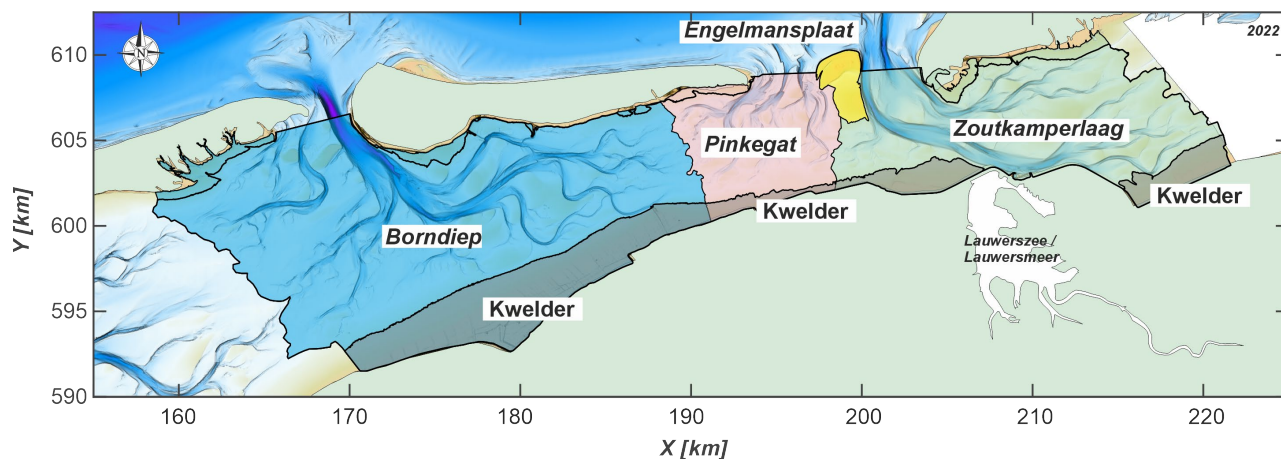
De keuze van het kombergingsgebied als afbakening heeft als gevolg dat de ruimtelijke begrenzing varieert over de tijdserie. Uit de in deze rapportage uitgevoerde analyse (Hoofdstuk 2) volgt dat de verandering in grootte van het kombergingsgebied, m.u.v. de afsluiting van de Lauwerszee, beperkt is ten opzichte van de omvang van het beschouwde gebied. Over de gehele tijdseries bedraagt de jaarlijkse verandering in grootte van het kombergingsgebied maximaal 1%. Op de totale (netto) verandering in sedimentvolume geeft het hanteren van een variërende kombergingsgrootte dan ook vrijwel geen verschillen in vergelijking met een vaste begrenzing. Gedeeltelijk komt dit door de beperkte ruimtelijke verandering. Een tweede aspect is dat de verandering in hoogte nabij de wantijen relatief klein is. De grote volumeveranderingen doen zich voor door het verplaatsen van geulen en platen en dat vindt per definitie niet plaats op de wantijen.

De variatie in kombergingsgrootte heeft ook een beperkt effect op de analyse van geulvolumes en veranderingen hierin. Ook hier geldt dat de geulen gedefinieerd door de diepteklasse -3 m of -5 m NAP zich niet bij de grenzen van de kombergingsgebieden bevinden, waardoor de verplaatsingen van deze grenzen hier geen effect hebben.

Het variërende kombergingsoppervlak heeft wel invloed op de plaatvolumes. De plaatvolumes worden berekend door het sedimentvolume te berekenen t.o.v. het referentievlak GLW. Aangezien bij het wantij relatief hoge platen voorkomen, heeft een verandering in grootte hier een relatief grote impact op de volumes. Als voorbeeld: bij een plaathoogte van 0 m NAP resulteert een wantijverplaatsing van 1 km² in een netto volumeverandering van 1 miljoen m³. Op de totale plaatvolumes in het gehele bekken is dit verschil klein, maar dit verschil is niet verwaarloosbaar t.o.v. de netto volumeverandering. In het bekken zijn grote veranderingen in bodemhoogte zichtbaar door het verplaatsen van geulen en platen. Dit resulteert dan in grote bruto volumeveranderingen, maar het merendeel van het sediment wordt herverdeeld in het bekken en geeft dan geen netto volumeverandering (zie Figuur 1-5 ter illustratie).

Volledig dekkende bodemkaarten.

Het grote voordeel van volledig dekkende bodemkaarten is dat deze een kwalitatief beter beeld geven van de morfologische veranderingen. Daarnaast zorgt het invullen van individuele missende datapunten of kleine gebieden met missende data ervoor dat onnauwkeurigheden in de areaal- of volumeberekening voorkomen worden. Het invullen van grotere gebieden met missende data kan echter leiden tot een kwantitatief verkeerde interpretatie. De kwelders en de overgang van kwelder naar Waddenzee zijn hiervan een voorbeeld. In de kaarten opgenomen vóór 1985-1987 zijn deze gebieden slechts beperkt ingemeten en de missende datapunten zijn ingevuld met de meest recent beschikbare data. Dit is dan vaak de bodemkaart uit 1985-1989 waarin het AHN-1 is verwerkt (Elias, 2024). Bij kwantificering van de veranderingen geeft dit geen accuraat beeld van het verloop in volume over de periode 1926-1985.



Figuur 1-6: Overzicht van de 3 kombergingsgebieden, geprojecteerd op de 2022-bodemkaart. Dit zijn van west naar oost: het Borndiep, Pinkegat en de Zoutkamperlaag. De Engelsmanplaat is als afzonderlijke plaat behandeld. Dit maakt het mogelijk een goede begrenzing met het bekken te verkrijgen. Als dit niet gedaan wordt, valt een consistente grens aan de zeezijde niet te trekken door de dynamiek, bankaanlandingen, van de buitendelta.

Begrenzing van kwelder en eilanden.

In de recente bodemdata (ongeveer vanaf 1989) is de kwelder meestal wel dekkend ingemeten, maar van deze metingen is bekend dat er onnauwkeurigheden aanwezig zijn in de hoogteligging. De volumeontwikkeling van kwelders op basis van Vaklodingen bevat dan ook veel onzekerheid. Binnen deze rapportage zijn de berekeningen daarom uitgevoerd voor het gehele kombergingsgebied, inclusief kwelders en exclusief kwelders (Figuur 1-6).

De kwelder is hierbij aan de landwaartse zijde begrensd door een vaste ligging, getrokken over de Waddenzeedijk. Aan de Waddenzijde is de 0 m NAP-contour gebruikt als afbakening. Deze contour heeft niet direct een fysische achtergrond, maar geeft een goede omsluiting van de onnauwkeurige data in alle kaarten en heeft een relatief consistente ligging. In de oudere kaarten (voor 1987) is de kwelderzone niet of slecht gemeten. Missende data in deze gebieden is dan ingevuld met het voorgaande jaar. Dit geeft voor de visualisatie een duidelijk beeld, maar geeft geen accuraat beeld van de volumeveranderingen. In de recente bodemdata (na pakweg 1985) is de kwelder wel dekkend ingemeten, maar hiervan is bekend dat de opnamen onnauwkeurig zijn vanwege de correctie van vegetatie uit de LiDAR-opnamen. In de volumeberekening is de Lauwerszee niet meegenomen. De bodemhoogtekaarten vóór 1971 zijn dan begrensd op de huidige, vaste ligging, getrokken langs de Lauwersmeerdijk.

1.4 Leeswijzer

Naast dit inleidende hoofdstuk bevat het rapport 6 inhoudelijke hoofdstukken, een hoofdstuk met conclusies en aanbevelingen en een uitgebreide appendix met aanvullende figuren en kaarten.

Hoofdstuk 2 bevat de resultaten van het afleiden van de juiste begrenzing van de kombergingsgebieden. Morfologische veranderingen in de kombergingsgebieden zorgen ervoor dat de ligging van het wantij, dat als representatief voor de scheiding van de kombergingsgebieden gehanteerd wordt, verandert door de tijd heen. In dit hoofdstuk wordt een generieke methode gebruikt om deze liggingen af te schatten voor iedere bodemkaart. Deze begrenzingen vormen de basis voor de uitgevoerde berekeningen van volumes en arealen.

Voor de uitvoering van de analyses zijn volledig dekkende bodemkaarten gemaakt met als basis de digitaal beschikbare Vaklodingen-datasets. In **Hoofdstuk 3, 4 en 5** worden de geobserveerde morfologische veranderingen per kombergingsgebied (Borndiep, Pinkegat en Zoutkamperlaag) beschreven en de verandering samengevat in een hypsometrische curve. In deze hoofdstukken worden ook de (veranderingen in) sedimentvolumes en arealen berekend en geanalyseerd.

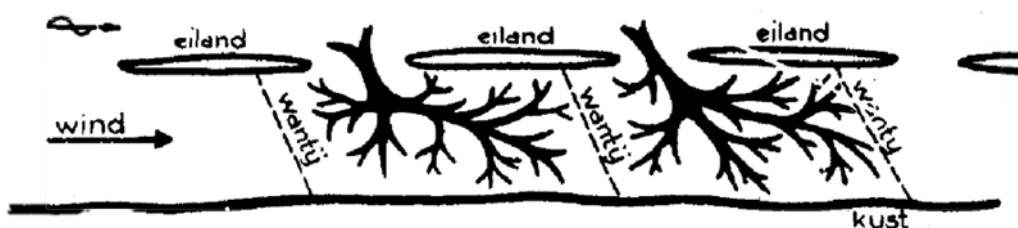
De berekening van volumes en oppervlakte is per kombergingsgebied uitgevoerd en daarna samengevat in een geaggregeerde beschouwing van de gehele Centrale Waddenzee in **Hoofdstuk 6**. Binnen dit hoofdstuk is ook een samenvatting/synthese van de ontwikkeling per kombergingsgebied gemaakt en een prognose van toekomstige ontwikkeling opgenomen. Tevens bevat dit hoofdstuk de conclusies en aanbevelingen in de vorm van een beantwoording van de onderzoeksvragen.

2 Oppervlakte en ligging van de verschillende kombergingsgebieden

De Waddenzee wordt vaak onderverdeeld in individuele bekkens of kombergingsgebieden met een begrenzing gebaseerd op de wantijligging. Hoe deze wantijliggingen exact bepaald zijn, is echter meestal niet beschreven of gedocumenteerd. In dit hoofdstuk is op basis van de morfologische karakteristieken voor iedere bodemkaart de (morfologische) wantijligging bepaald, zodat coherente wantijliggingen ontstaan. Op basis van deze liggingen kan dan het oppervlakte en volume van het kombergingsgebied voor iedere bodemkaart bepaald worden.

2.1 Wantij als begrenzing

De begrenzing van de verschillende bekkens in de Waddenzee wordt gevormd door het wantij. Een wantij is een ondiepte die vormt doordat hier de twee getijgolven van aangrenzende bekkens samenkomen. De snelheden nemen hier af en sediment bezinkt. Hierdoor ontstaat een ondiepte die de twee bekkens scheidt. De positie van het wantij wordt mede bepaald door het getijprisma in de bekkens, maar ook door bijv. de overheersende windrichting. Hierdoor liggen de wantijen in de Waddenzee niet in het midden van de eilanden, maar juist iets ten oosten ervan. Meer recente studies laten zien dat een strikte scheiding van de bekkens misschien niet mogelijk is. Metingen laten duidelijk zien dat er zowel water als sediment uitwisselt over het wantij (o.a. Van Weerdenburg et al., 2021).



Figuur 2-1: Schematisch overzicht van de wantijligging in de Waddenzee (bron: Van Veen, 1950).

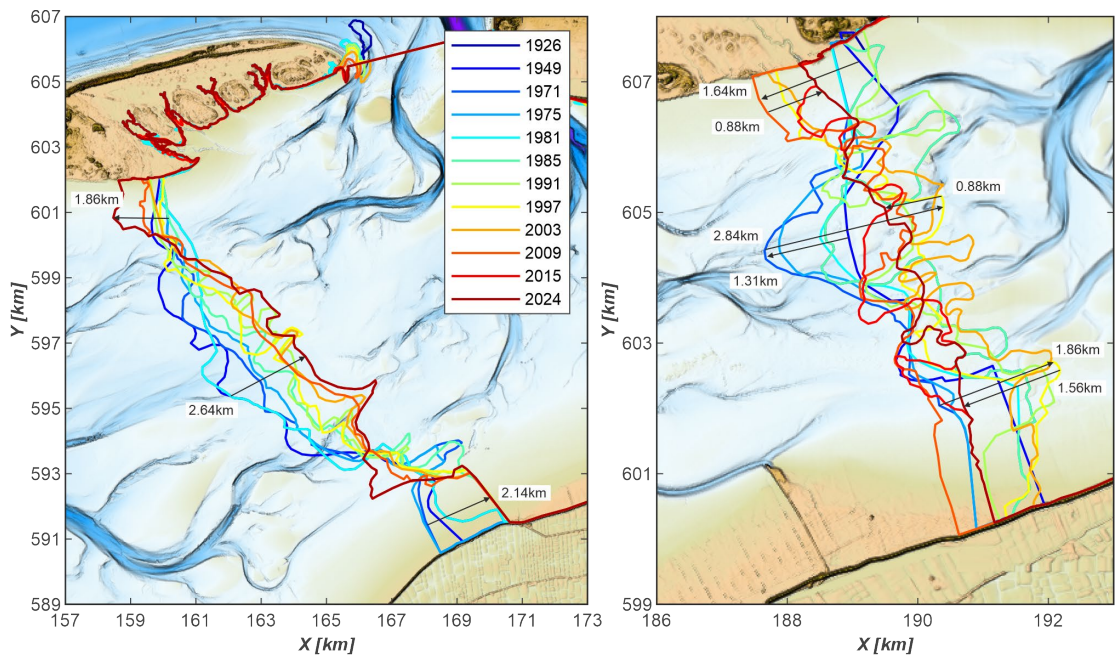
In het verleden werden de wantijen vaak gezien als een duidelijke afbakening, waardoor analyses per bekken konden worden uitgevoerd. De wantijligging werd daarbij constant gehouden ter bepaling van bijvoorbeeld de sedimentvolumes. Het is bekend dat de wantijen verplaatsen. Dit betekent ook dat bij het vasthouden van een vaste wantijligging sedimentatie en erosie nabij de wantijen aan het verkeerde zeegat toegekend kunnen worden. Of dit effect andere inzichten geeft, is niet bekend, omdat een volumeanalyse met meebewegende wantijpositie tot op heden niet is uitgevoerd.

Een wantij kan in principe op twee manieren gedefinieerd worden. Het hydrodynamische wantij is de locatie waar divergentie van de stroming optreedt (Vroom, 2011). Het morfologische wantij wordt gedefinieerd aan de hand van de morfologische karakteristieken, zoals een lijn door de hoogste (ondiepste) punten. In deze studie wordt altijd de morfologische definitie van wantij gebruikt. In Wagenaar (2024) is deze methode uitvoerig beschreven en worden resultaten voor de periode 1986-2024 getoond. Voor de oudere meetdata (1926-1986) zijn de wantijen afgeleid aan de hand van de morfologische kenmerken op basis van expert judgement, waarbij de platen en geulen zo consistent mogelijk aan de verschillende bekkens zijn toegekend. Door deze definitie te hanteren is het in ieder geval mogelijk de ligging consistent te bepalen voor de verschillende jaren voor de 3 kombergingsgebieden binnen de Centrale Waddenzee (Figuur 1-6).

2.2 Wantijliggingen

2.2.1 Borndiep

Met uitzondering van een klein deel grenzend aan het eiland, verplaatst het wantij van Terschelling oostelijk (Figuur 2-2, links). In het centrale deel bedraagt de wantijverplaatsing ruim 2.5 km over de periode 1926-2024. Deze verplaatsing vindt over de gehele periode plaats en lijkt zich ook in de recente metingen door te zetten. Deze consistente oostelijke verplaatsing is waarschijnlijk nog steeds het gevolg van aanpassingen aan de afsluiting van de Zuiderzee, waardoor de geulen in het aangrenzende zeegat van het Vlie niet meer zuidelijk, maar meer oostelijk gericht zijn. Het Vliebekken lijkt nog steeds geen volledig, nieuw evenwicht gevonden te hebben. Het zuidelijke deel van het bekken vult in en de geulen verplaatsen zich oostelijk richting het wantij (de Beer et al., 2024). Hierdoor vindt veel sedimentatie op het wantij plaats en verplaatst het wantij oostelijk.



Figuur 2-2: Overzicht van de ligging van het wantij onder Terschelling (links) en Ameland (rechts). Geprojecteerd op de 2024 bodemmeting.

Direct onder het eiland, over een afstand van ongeveer 1 km, vertoont het wantij een tegenovergestelde verplaatsing. Hier is het wantij bijna 1.9 km westelijk verplaatst. Het merendeel van deze verplaatsing vond in de recente jaren plaats. Een mogelijke verklaring voor dit gedrag wordt gegeven door Stein (2005), waarin een relatie gelegd wordt tussen wantijligging en uitbouw of terugtrekking van de eilandstaart. De oostelijke terugtrekking van het wantij is consistent met de geobserveerde terugtrekking van de Boschplaat.

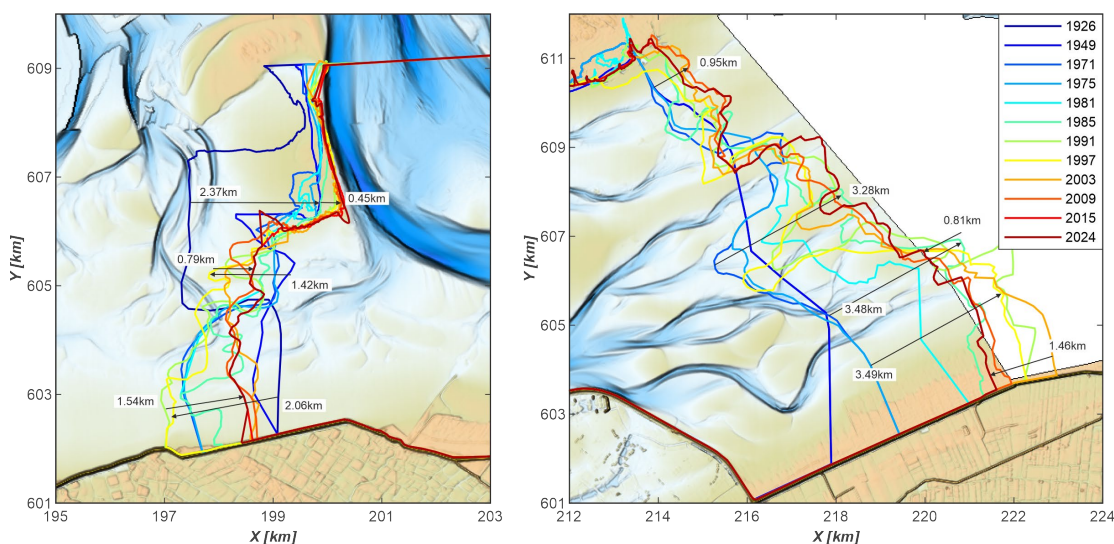
Het wantij onder Ameland (Pinke Wad) vertoont een variërend gedrag, met afwisselend oostelijke en westelijke verplaatsingen. De meest recente wantijligging ligt ruwweg in het midden van alle wantijliggingen (Figuur 2-2, rechts). Een deel van deze variatie is gerelateerd aan de dynamiek van de geulpatronen. In dit deelgebied zijn vele kleine uitstroombekken zichtbaar met relatief grote dynamiek, wat ook doorwerkt in de wantijligging. Direct onder het eiland, tot 1.5 km zuidelijk, blijft het wantij redelijk stabiel liggen tot 1991. Tussen 1991 en 2009 verplaatst het wantij zich zo 1.6 km westelijk. De recentere metingen (2009-2024) laten weer een oostelijke verplaatsing zien van 0.9 km. In het centrale deel vertoont het wantij een westelijke verplaatsing van 1.3 km tussen 1926 en 1949. In de periode 1949-2003 verplaatst het wantij zich bijna 3 km oostelijk. Tussen 2000 en 2015 vindt weer een westelijke verplaatsing plaats van 0.9 km. De 2024-ligging is weer overwegend oostelijk gelegen t.o.v.

de 2015-ligging. Het zuidelijke deel van het wantij (y-km. 599-602) vertoont een soortgelijke ontwikkeling met een oostelijke verplaatsing van 1.9 km (1926-2003) en een westelijke verplaatsing van 1.6 km tussen 2003-2024. De 2024-ligging komt hier eigenlijk goed overeen met de ligging in de oude bodemkaarten. Een duidelijke lange termijn, oostelijke verplaatsing van dit wantij is daarmee eigenlijk niet zichtbaar. De omslag van overwegend westelijke naar oostelijke verplaatsing is mogelijk gerelateerd aan de geobserveerde aanzanding in het Pinkegatbekken. Een ondiep bekken heeft een hogere bodemwrijving, waardoor het getij minder snel propageert. Het duurt dus langer voordat het wantij bereikt wordt vanuit het Pinkegat.

2.2.2 Pinkegat

Het verloop van het wantij onder Ameland is hierboven beschreven. Het wantij onder de Engelsmanplaat (Figuur 2-3, links) vertoont een grote dynamiek, waarbij de 1926-ligging sterk afwijkt van de overige jaren; het noordelijke deel ligt meer dan 2 km westelijk van de ligging in 1949. Dit verschil in wantijligging wordt goed verklaard door de bodemligging (Appendix A.2, Figuur A-14). Het Pinkegat en aangrenzende Engelsmanplaat hebben in 1926 een duidelijk afwijkende ligging t.o.v. 1949 en latere opnamen. De meetnauwkeurigheid van de oude bodemkaarten kan hierin wel een rol spelen.

Tussen 1949 en 2024 vertoont het wantij langs de Engelsmanplaat een consistente ligging en verplaatsing. De oostzijde van Engelsmanplaat bouwt uit, waardoor het wantij een kleine 0.5 km oostelijk verplaatst. Het deel ten zuiden van de Engelsmanplaat (y-km. 602-606) verplaatst juist ruim 2 km in westelijke richting in de periode 1949-1997 en 1.5 km terug oostelijk tussen 1997-2024. Het lijkt waarschijnlijk dat deze tegengestelde verplaatsingen samenhangen met de afsluiting van de Lauwerszee. Direct na afsluiting is het bekken nog ver uit evenwicht. De geulen in het bekken zijn nog relatief diep, waardoor het getij nog makkelijk richting de Lauwerszee propageert. Het getij stuit daar op de Lauwersmeerdijk en wordt dan kustlangs geleid in oostelijke, maar ook westelijke richting. Dit zorgt er waarschijnlijk voor dat het wantij onder de Engelsmanplaat tijdelijk oostelijk verplaatst. Naarmate de Zoutkamperlaag opvult en de bodemligging een nieuw evenwicht bereikt, verplaatst het wantij zich terug oostelijk.



Figuur 2-3: Overzicht van de ligging van het wantij onder de Engelsmanplaat (links) en Schiermonnikoog (rechts). Geprojecteerd op de 2021-bodemmeting.

2.2.3 Zoutkamperlaag

Het wantij onder Schiermonnikoog verplaatst zich tussen de 1 km (noordelijk deel) en 3.5 km (zuidelijk deel) oostelijk in de periode 1926-1991. Na 1991 is de verplaatsing veel kleiner en varieert deze over de doorsnede. Het noordelijke deel (y-km. 608-611) blijft redelijk stabiel in ligging tussen 2003 en 2024. Het middendeel (y-km. 606-208) vertoont een kleine doorgaande oostelijke verplaatsing; de 2024 ligging is hier het meest oostelijk t.o.v. de eerdere jaren. De verplaatsing in dit noordelijke deel kan goed worden verklaard door het langer worden van de eilandstaart. Hierdoor is het ook de verwachting dat het wantij opschuift. Het zuidelijke deel (y-km. 603-606) verplaatst oostelijk tot 2003 (3.5 km) om vervolgens weer 1.5 km westelijk te verplaatsen. In de meest recente opname is het aangrenzende deel Groninger Wad echter nog niet opgenomen, waardoor deze positie nog onzekerheid bevat. De initieel grote oostelijke verplaatsing kan direct worden gerelateerd aan de afsluiting van de Lauwerszee. Door afsluiting wordt de getijgolf langs de afsluitdam in oostelijke richting gestuurd, waardoor de geulen initieel in omvang toenemen en oostelijk uitbreiden. Deze uitbreiding is groter dan het uiteindelijke evenwicht. Naarmate het bekken zich aanpast en de geulen zich weer vullen met sediment, verplaatst het wantij zich dan ook terug westelijk. Een vergelijking van de ligging van de wantijen, bepaald binnen deze studie, met de liggingen zoals bepaald door Van Sijp (1986) toont een consistent beeld van de wantijverplaatsing (Appendix A.6).

2.3 Ontwikkeling in kombergingsoppervlakte

Met behulp van de bepaalde wantijliggingen kan een schatting gemaakt worden van de ontwikkeling van de omvang van het centrale deel van de Waddenzee en de afzonderlijke kombergingsgebieden. Hiervoor is het kombergingsgebied aan de landzijde afgebakend met een vaste begrenzing die is gekozen langs de teen van de Waddendijk. Deze positie ligt vast in alle jaren. Langs de eilanden is de begrenzing gekozen op basis van de +1 m NAP-contourlijn. Deze grens heeft geen directe morfologische betekenis, maar geeft een goede omsluiting van de meetdata. Met uitzondering van de kop van Schiermonnikoog en Engelsmanplaat is dit een vrijwel constante ligging. De +1 m-contour geeft niet in alle jaren een sluitende afbakening van de Engelsmanplaat, hier is gekozen om de 0 m-contour te hanteren als begrenzing. De zeegaten hebben een vaste ligging en in principe gebaseerd op de kortste afstand, namelijk een rechte lijn, tussen de eilanden (Figuur 2-4).

Tabel 2-1: Overzicht van het oppervlakte van de verschillende kombergingsgebieden tussen 1926 en 2024.

Jaren	Ameland [km ²]	Pinkegat [km ²]	Zoutkamperlaag [km ²]		Centrale Waddenzee ⁽¹⁾ [km ²]	Engelsmans plaat [km ²]
			Incl. Lauwersz	Excl. Lauwersz		
1926	331.07	58.20	227.33	133.16 ⁽¹⁾	522.43	4.15
1948	333.58	63.25	220.40	126.22 ⁽¹⁾	523.05	5.60
1971	323.80	65.71	-	133.53	523.04	4.45
1975	324.52	63.29	-	133.25	521.06	9.20
1981	327.92	59.95	-	141.38	529.25	8.05
1989	321.37	58.17	-	145.65	525.19	7.97
1993	319.82	57.37	-	150.66	527.85	9.34
1999	319.71	58.54	-	147.02	525.27	9.00
2005	317.77	60.42	-	147.46	525.65	8.71
2011	312.69	66.15	-	146.85	525.69	7.89
2017	313.42	64.79	-	146.16	524.37	7.63
2024	315.34	63.68	-	146.7	525.72	7.88
Gemiddeld	321.75	61.63	-	143.87⁽²⁾	525.31	7.49

(1) oppervlakte bekken met begrenzing Lauwerszee zoals in 1971. (2) gemiddelde 1971-2024.

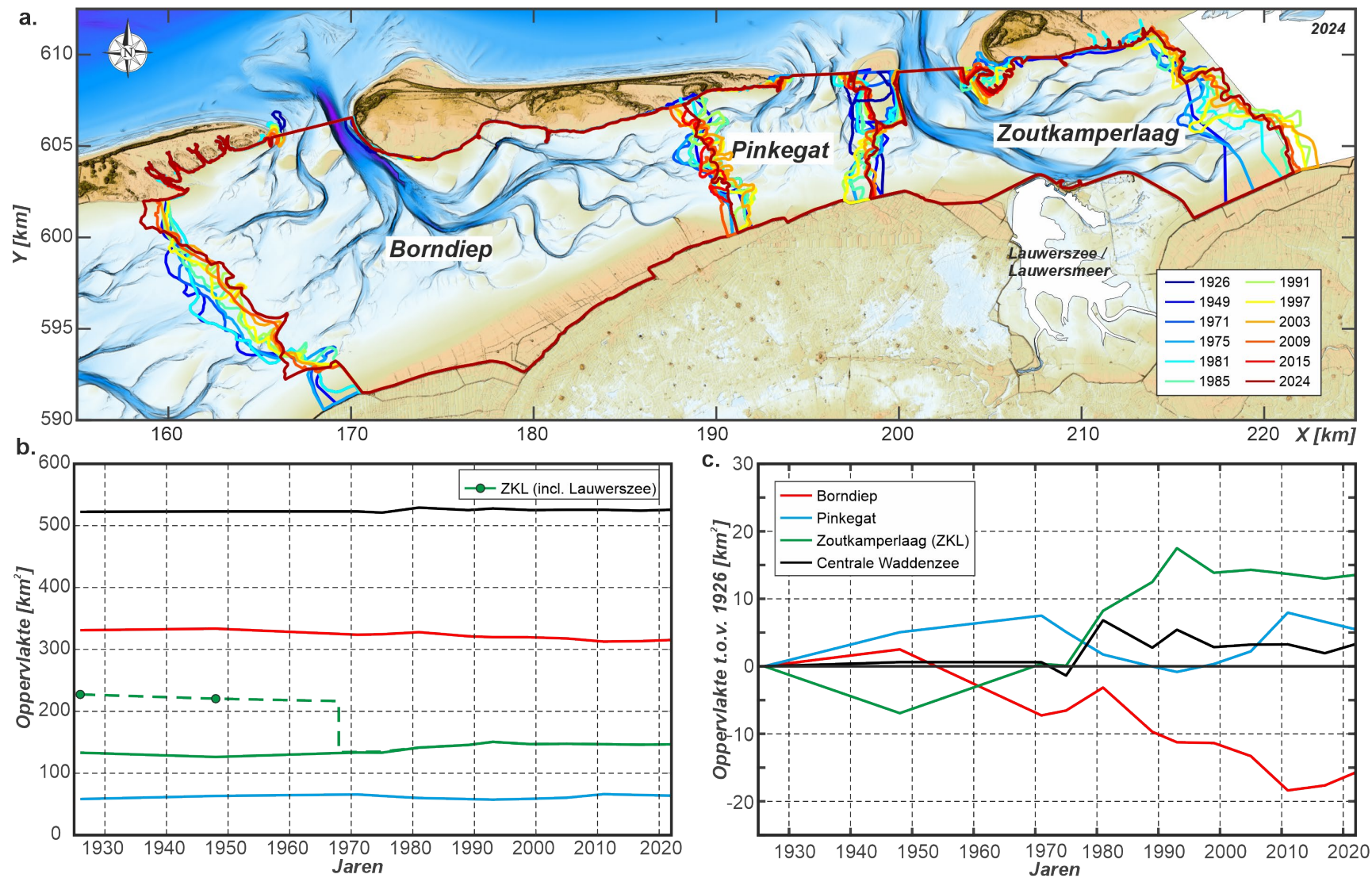
Gemiddeld bedraagt het oppervlakte van de Centrale Waddenzee (excl. Lauwerszee en Engelsmanplaat) 525 km² (Tabel 2-1). Dit oppervlak was 2.7 km² groter in 2024 dan in 1926. Een duidelijke trend in ontwikkeling is niet te maken; hiervoor zijn de variaties tussen de metingen te groot. De kleine toename is niet geheel representatief voor de veranderingen van de individuele kombergingsgebieden.

Het kombergingsgebied Borndiep neemt in totaal 15.7 km² in oppervlakte af van 331 km² naar 315 km². De afname was vrijwel continu tussen 1948 en 2011. In deze periode bedroeg de afname 21 km² (-0.29 km²/jr.). In de meest recente metingen (2011-2024) neemt het oppervlakte juist weer iets toe met +2.65 km² (+ 0.25 km²/jr.). Deze omslag van afnemende naar toenemend oppervlakte wordt veroorzaakt door een omslag in de verplaatsing van het wantij onder Ameland, dit migreert in de meest recente metingen oostelijk i.p.v. westelijk. Daarnaast neemt de oostelijke verplaatsing van het wantij onder Terschelling in deze periode af. Het netto-effect is dat het bekken iets groter wordt.

Het Pinkegat is het kleinste kombergingsgebied binnen de Centrale Waddenzee, met een gemiddelde oppervlakte van 62 km². Dit oppervlakte vertoont relatief grote variaties in de tijd. Het oppervlakte in 1926 is met 58 km² relatief klein. Dit komt vooral doordat de Engelsmanplaat een andere ligging en begrenzing heeft in vergelijking met de andere jaren. Het oppervlakte van het Pinkegat neemt toe tot een maximumoppervlakte van 66 km² in 1971. Het oppervlakte neemt daarna tussen 1971 en 2011 sterk af tot 57 km² in 1993, om vervolgens weer toe te nemen tot een maximumwaarde van 66 km² in 2011. Het oppervlakte neemt tussen 2011 en 2024 weer met 2 km² af. De relatief grote variatie van afname gevolgd door toename tussen 1971 en 2011 zou een respons op de afsluiting van de Lauwerszee kunnen zijn. De afsluiting van de Lauwerszee sluit een relatief ondiep deel van het estuarium af. De overgebleven geulen zijn eigenlijk te groot voor het oppervlakte van het bekken. Het getij kan nog wel makkelijk het bekken in propageren, maar wordt geblokkeerd door de afsluitdam, waardoor het in oostelijke en westelijke richting wordt geduwd. De initiële respons is dan ook dat het bekken in oost-westrichting groter wordt. Naarmate het bekken invult en weer een morfologisch evenwicht bereikt, neemt het getij terug af en verplaatsen de wantijen zich ook terug. De recente, stabiele ligging van het wantij onder de Engelsmanplaat geeft als indicatie dat in dit deel van het bekken het evenwicht rond 2011 wederom bereikt is.

Het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag neemt met de afsluiting van de Lauwerszee sterk af in oppervlakte, van 220 km² in 1948 naar 133.5 km² in 1971. Sinds 1971 bedraagt het gemiddelde oppervlakte van het bekken 144 km², maar er is wel een grote verandering in de tijd te observeren. Het oppervlakte neemt na afsluiting weer toe tot een maximum van 147.5 km² in 2005. Het oppervlakte tussen 2011 en 2024 blijft redelijk stabiel tussen de 146 en 147 km². Er treden in deze periode nog wel veranderingen op in de ligging van het wantij, maar de oostelijke verplaatsing in het centrale deel wordt gecompenseerd door een westelijke verplaatsing van het zuidelijke deel van het wantij, waardoor de verandering in oppervlakte beperkt lijkt te zijn.

Om een coherente afbakening van het bekken te kunnen maken, is de Engelsmanspaat afzonderlijk geanalyseerd. Het oppervlakte van het gebied is toegenomen van 4 km² naar 8 km² (Tabel 2-1 en zie Appendix A.5 voor weergave van het oppervlakte). De verdubbeling in oppervlakte van Engelsmanplaat komt vooral door de aanlanding van Richel. Deze plaat wordt sinds 1975 in de omhullende van de Engelsmanplaat-contour meegenomen. Deze contour omsluit dan ook de tussenliggende geul (Oude Smeriggat), waardoor het oppervlakte sterk toeneemt. Een maximumomvang wordt bereikt in 1993 (8.7 km²), maar met de landwaartse verplaatsing van Richel neemt ook het oppervlakte weer af tot 7.9 km² in 2024.



Figuur 2-4: (a) Overzicht van de begrenzing van de verschillende kombergingsgebieden en veranderingen door de jaren. (b) totale oppervlakte per kombergingsgebied en (c) verandering in oppervlakte t.o.v. 1926.

2.4 Samenvatting van de resultaten

De Centrale Waddenzee heeft na afsluiting van de Lauwerszee een gemiddelde oppervlakte van 525 km². Het kombergingsgebied van het Borndiep is in omvang afgenomen van 331 km² tot 315 km² (-0.22 km²/jr.) sinds 1926. Het Pinkegat is toegenomen met ruim 6 km², van 58 naar 64 km², maar grote variaties in oppervlakte domineren over een duidelijke trend. Het kombergingsgebied Zoutkamperlaag is eerst afgenomen van 220 km² in 1948 naar 134 km² in 1971 door de afsluiting van de Lauwerszee. Sinds 1971 is het oppervlakte toegenomen tot 147 km². Deze toename trad vooral op in de periode 1971-1993 en sindsdien blijft dit oppervlakte rond de 147 km² slingeren.

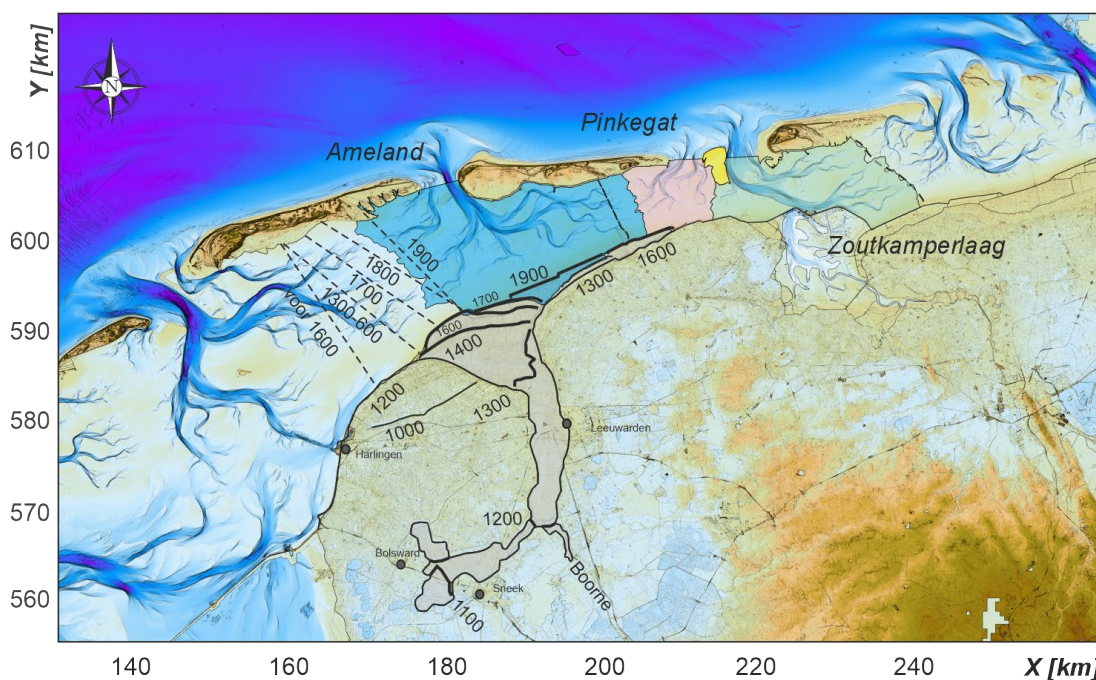
3 Morfologie van het Borndiep

In onderstaand hoofdstuk wordt de morfologie van het kombergingsgebied Borndiep geanalyseerd. Deze analyse bestaat uit 3 onderdelen. In hfdst. 3.1. wordt een beknopte beschrijving van de lange termijn en grootschalige ontwikkeling gegeven. Deze analyse is gebaseerd op literatuur en een analyse van de hydrografische kaarten. De Vaklodingen worden gebruikt voor een analyse van het morfologische gedrag sinds 1926, waarbij in hfdst. 3.2 de morfologische veranderingen kwantitatief worden beschouwd en in hfdst. 3.3. kwalitatieve analyses worden uitgevoerd. Deze kwalitatieve analyse bestaat uit 3 onderdelen: (1) de netto volumeverandering, (2) de volumeverandering van de geulen en (3) de veranderingen van de platen (het litoraal en sublitoraal).

3.1 Historische ontwikkeling Borndiep

3.1.1 De Middelsee en het ontstaan van het huidige bekken

De Middelsee was een langgerekt getidebekken dat zich ver landinwaarts uitstreckte tot ongeveer het huidige Bolsward en Sneek. De naam Borndiep stamt af van het riviertje Boorne, dat het Middelsee-estuarium vormde. De voorloper van het Amelandse zeegat (Borndiep) stond rechtstreeks in verbinding met de Middelsee. Het is niet exact bekend wanneer het Zeegat van Ameland is ontstaan. In de 16^{de} eeuw wordt het voor het eerst benoemd, maar er zijn aanwijzingen dat het zeegat al in de Romeinse tijd bestond (Beckering Vinckers, 1943; Oost, 1995).



Figuur 3-1: Een overzicht van de inpoldering van de Middelsee en verschuiving van het wantij onder Terschelling, gebaseerd op Van der Spek (1995) en geprojecteerd op de huidige Waddenzee.

In de 11^{de} eeuw bereikte het een maximale grootte, maar vanaf de 11e eeuw werd het bekken snel kleiner doordat delen opslibden en werden bedijkt. De vorm van het bekken veranderde van een langgerekte zeearm in het huidige 'korte' en brede bekken (Figuur 3-1). Met de verandering van het bekken van relatief lang en smal naar kort en breed werd verplaatsing van het wantij en zeegat mogelijk. Van der Spek (1995) laat zien dat het wantij

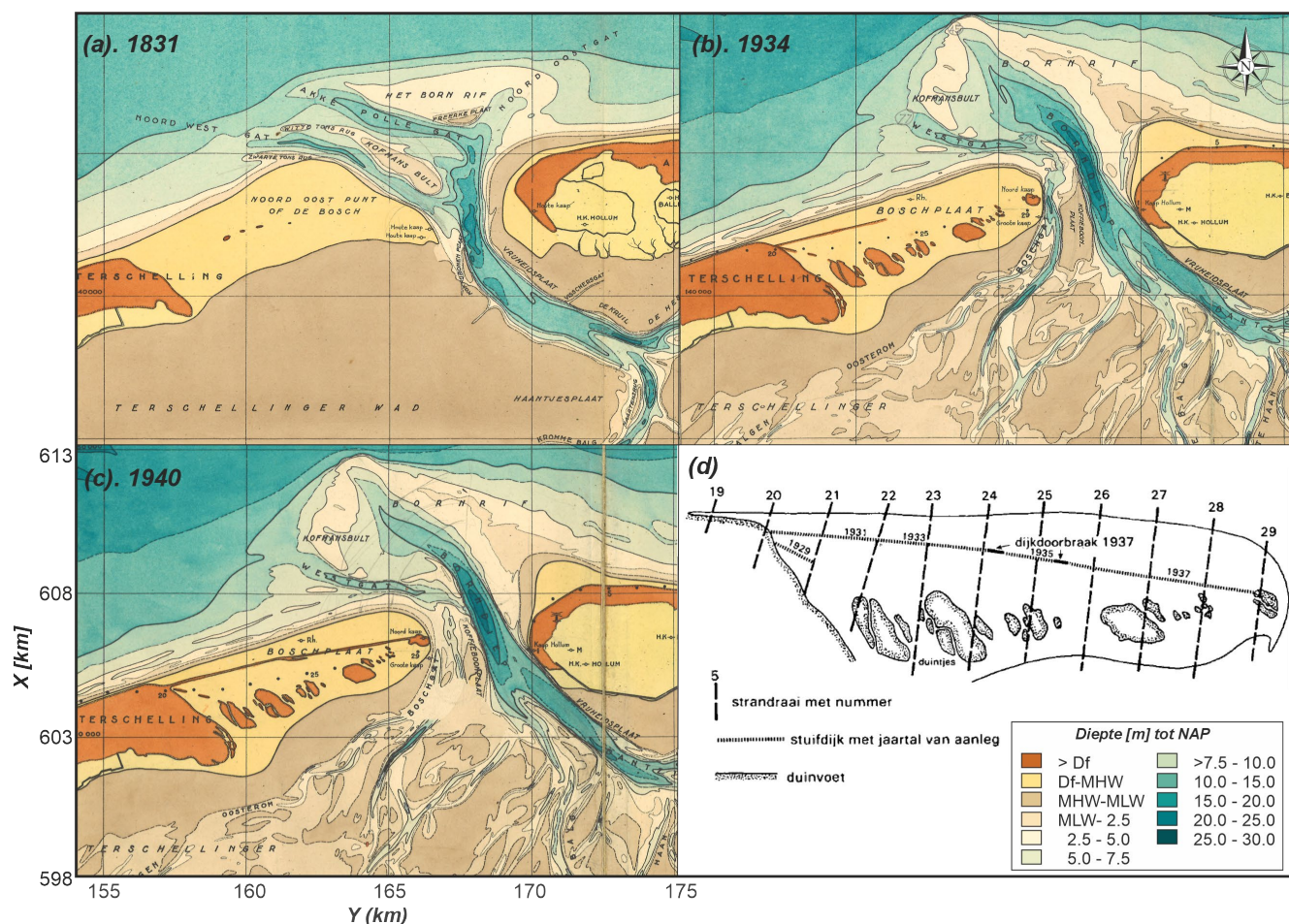
ten zuiden van Terschelling tegenwoordig vele kilometers meer naar het oosten ligt dan aan het eind van de middeleeuwen. De projectie van 1900 bevindt zich rond de huidige wantijligging, wat suggereert dat sinds 1900 de verplaatsingen relatief beperkt zijn t.o.v. de historische verplaatsingen (Figuur 3-1). Een detailanalyse van de recente digitale data laat zien dat er ook nu nog een doorgaande oostelijke verplaatsing gaande is, maar dit is waarschijnlijk een directe respons op afsluiting van de Zuiderzee (zie hfdst. 3.1). Ook het wantij ten zuiden van Ameland is sinds 1830 enkele kilometers naar het oosten verplaatst (De Boer, 1991, Oost en de Haas, 1993, Van der Spek, 1994; 1995). In de literatuur worden een aantal verschillende redenen gegeven voor deze verplaatsing. Stein (2005) wijst naar de aanleg van de Kooi-Oerd-stuifdijk rond 1890 op Ameland, waardoor de oostpunt met 4 km oostelijk verplaatste en daarmee ook de wantijligging. Daarnaast lijken de getij- en windgedreven (rest)stromingen en transporten over het wantij een rol te spelen (De Boer et al., 1991; Van Weerdenburg, 2021).

3.1.2 Morfologische ontwikkeling vanaf 1831 tot 1982

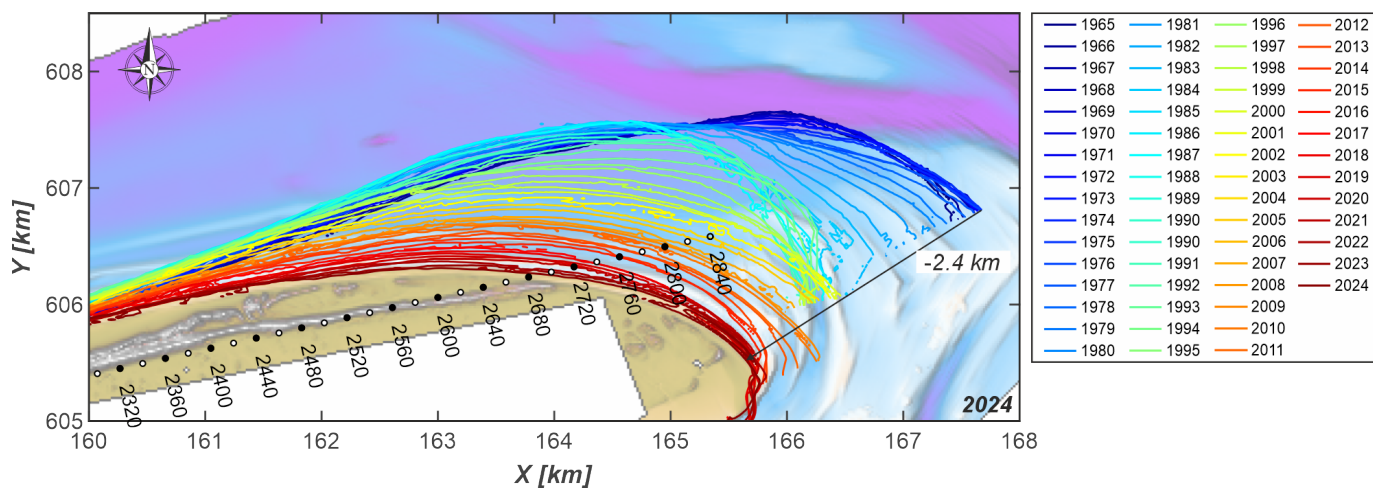
Verplaatsing van het Borndiep

Een uitgebreide analyse van de morfologische ontwikkelingen van de keel van het zeegat en de buitendelta op basis van de hydrografische kaarten is gegeven in Elias et al. (2019). Een belangrijke bevinding uit deze studie is dat het Borndiep tussen 1854 en 1920 een doorgaande oostelijke verplaatsing en rotatie in de keel van het zeegat vertoont (Figuur 3-4). Deze verplaatsing is waarschijnlijk nog een langetermijnaanpassing aan de afsluiting van de Middellzee, waarbij het gehele bekken steeds verder oostelijk verplaatst. De verplaatsing van het Borndiep veroorzaakt erosie van de eilandkop van Ameland, waardoor uitgebreide kustbescherming nodig werd. In 1947 werden de eerste harde versterkingen al aangebracht in de vorm van zinkwerken. Dit werd gevolgd door aanvullende maatregelen zoals strekdammen en een stenen bedekking van de geulwand. Een stortstenen onderwaterdam en aanvullende strekdammen werden in 1979 aangelegd en uitgebreid in 1994. Deze constructies zorgen ervoor dat de kustlijn behouden blijft, maar er is wel frequent onderhoud nodig en er moeten zandsuppleties aan de noordwestzijde aangebracht worden. De verplaatsing van de ligging van de hoofdgeul van de westzijde naar de oostzijde van het zeegat heeft een grote invloed gehad op de buitendelta, de geulen in het zeegat en de eilandstaart van Terschelling.

De historische ontwikkeling van de eilandstaart van Terschelling, de Boschplaat, vertoont perioden van groei en terugtrekking (zie hydrografische kaarten in Appendix A.3.1, samengevat in Figuur 3-2). Tussen 1854 en 1927 vervormde de oostzijde van de Boschplaat van een breed gebied naar een langere, smallere plaat. De punt verplaatste hierbij een kleine 2 km oostwaarts het zeegat in. Deze verandering vindt niet alleen plaats op de staart van het eiland, maar de gehele eilandkust van Terschelling lijkt zich terug te trekken. Vanaf 1903 blijft de eilandstaart stabiel in positie liggen. Aan de punt van de Boschplaat heeft zich tussen 1903 en 1927 een spit gevormd. De vorming van een geul door deze spit heen zorgt ervoor dat de Boschplaat zich tussen 1927 en 1934 weer meer dan 1 km terugtrekt. Vanaf 1940 vindt weer een sterke uitbouw plaats. De aanleg van de stuifdijk speelt hier een belangrijke rol. De stuifdijk vangt zand aan de zeezijde in, waardoor zich kleine duintjes kunnen vormen. Daarnaast zorgt de stuifdijk ervoor dat er tijdens stormen geen water meer over de Boschplaat stroomt. De stroming moet dan in zijn geheel door het zeegat heen. Naast de stuifdijk heeft ook de aanlanding van de Koffiebonenplaat, tussen 1962 en 1965, de zandvolumes van de Boschplaat vergroot. De Boschplaat bereikt dan een maximale westelijke positie rond 1974. Sindsdien vertoont de Boschplaat een continue terugtrekking (Figuur 3-3).



Figuur 3-2: Historische ontwikkeling van de eilandstaart van Terschelling in de jaren (a). 1831, (b). 1934 en (c). 1940. (d) Overzicht van de aanleg van de stuifdijk. Zie Appendix A.1 voor tussenliggende kaarten.



Figuur 3-3: Terugtrekking van de Boschplaat, geïllustreerd door de 0 m NAP-contourlijn afgeleid uit de Jarkusmetingen tussen 1965 en 2024. Onderliggende bodem is gebaseerd op de 2024-meting.

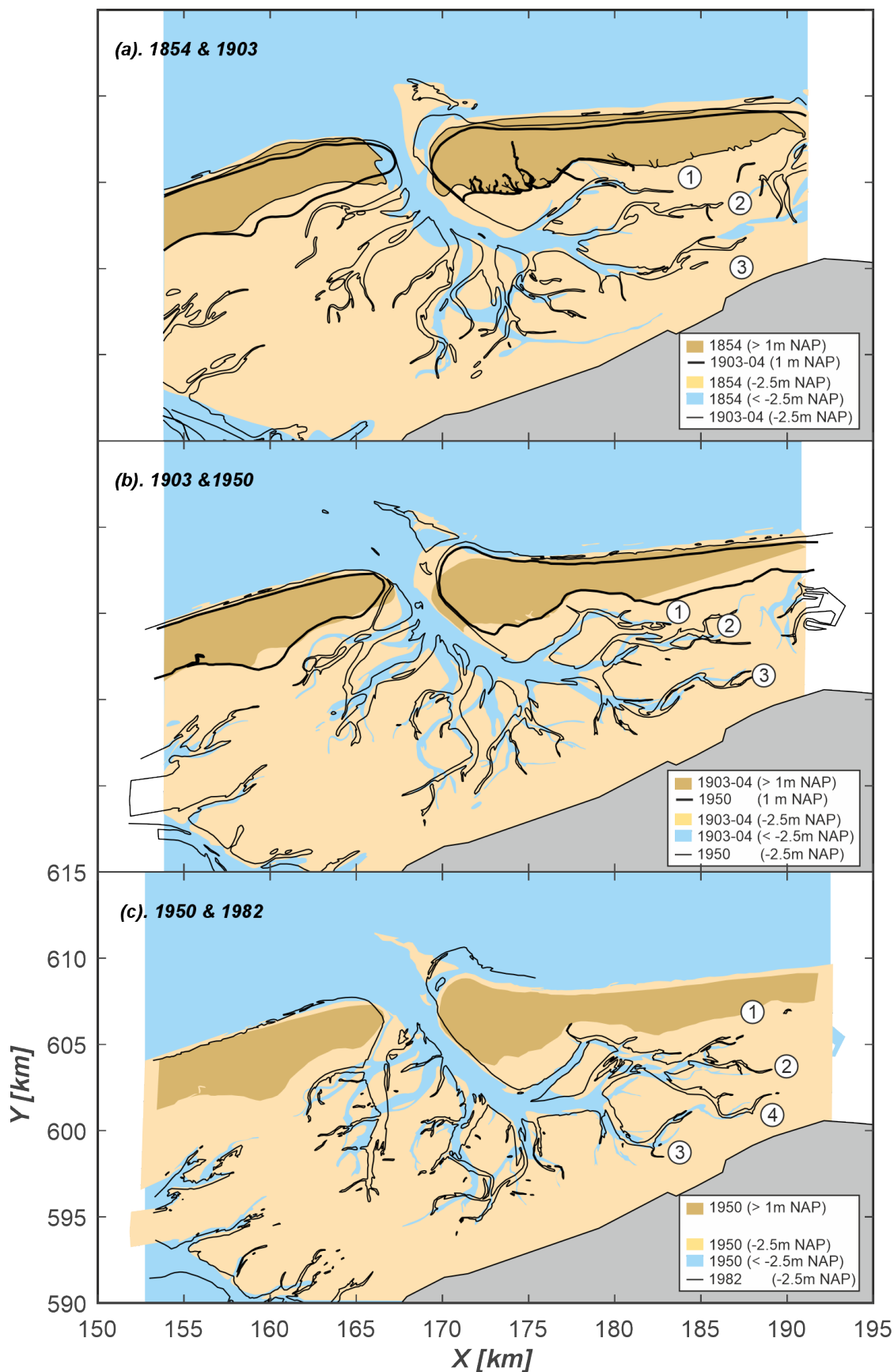
Rotatie en verplaatsing van de geulen

In alle oude kaarten is op grote lijnen een identieke karakteristiek van het geulenstelsel in het bekken te onderscheiden (Figuur 3-4). Het Borndiep heeft een overwegend noord-zuid-oriëntatie in de keel van het zeegat en buigt dan oostelijk af om de Vrijheidsplaat heen. Hier vertakt het Borndiep zich dan in 2 oostelijk gerichte geulenstelsels. Aan de westzijde van het Borndiep zijn verschillende (kleinere) geulvertakkingen zichtbaar die zich westelijk richting het wantij van Terschelling uitstrekken. Deze vertakkingen lijken zich van noord naar zuid langs de geulwand te verplaatsen. Bij de Boschplaat wisselen perioden met oostelijke uitstroming richting het Borndiep en perioden met noordelijke uitstroming direct de buitendelta op elkaar af.

Het centrale deel van het Borndiep, in de keel van het zeegat en langs de Vrijheidsplaat, vertoont een duidelijke oostelijke verplaatsing in de oudere metingen (Figuur 3-4, 1854-1903 en 1903-1950). De meest recente periode (1950-1982) laat zien dat de ligging nu stabiliseert. Deze stabiliteit hangt natuurlijk ook samen met de vele verdedigingswerken die aangelegd zijn aan de westzijde van Ameland.

Het oostelijk gerichte geulenstelsel vertoont een duidelijke tweedeling in tijd en ruimte. De meest noordelijk gelegen geulen boven de Piet Scheveplaat, het Molengat en Kikkertgat, blijven eigenlijk relatief stabiel in ligging gedurende de metingen (aangegeven met 1 en 2 in Figuur 3-4). Op zich is dat logisch, omdat ze niet veel verder noordelijk richting het eiland kunnen migreren door de aanleg van de stroomgeleidedam en de zeedijk. Deze twee geulen strekken zich ver oostelijk uit en draineren het noordelijke deel van het wantijgebied. Ten zuiden van de Piet Scheveplaat bevindt zich het Dantziggat (3 in Figuur 3-4). Deze geul strekt zich tot 1950 ver oostelijk uit en maakt in de oudere kaarten (tot 1903) zelfs verbinding met het Pinkegat.

In de 1950-opname beginnen de eerste veranderingen in deze geulenstelsels al zichtbaar te worden. Het Molengat wordt een stuk groter en dieper en krijgt een zuidoostelijke oriëntatie, waardoor de geul verbinding maakt met het Kikkertgat. Door twee doorsteken in de jaren 50 ontstaat uiteindelijk de doorgaande vaargeul naar Holwerd (Villars et al., 2016; Witteveen & Bos, 2022). Deze vaargeul is veel korter dan de oorspronkelijke route via het Dantziggat. In 1982 is deze vaargeul duidelijk zichtbaar (4 in Figuur 3-4). Deze geul neemt waarschijnlijk een deel van de drainage van het oostelijke deel van het kombergingsgebied over. Het Dantziggat trekt zich terug en verliest dan de rechtstreekse verbinding met dit deel van het kombergingsgebied. Dit geulenstelsel blijft tot op heden behouden, maar daar zijn wel significante baggerinspanningen voor benodigd (zie ook hfdst. 1.3).



Figuur 3-4: Ontwikkeling van de geulen voor de periode (a). 1854-1903, (b) 1903-1950 en (c) 1950-1982 aan de hand van de -2.5 m contourlijnen in het bekken. In Appendix A.3.1 wordt de volledige tijdserie van hydrografische kaarten getoond.

3.2 Bodemhoogte en veranderingen sinds 1926

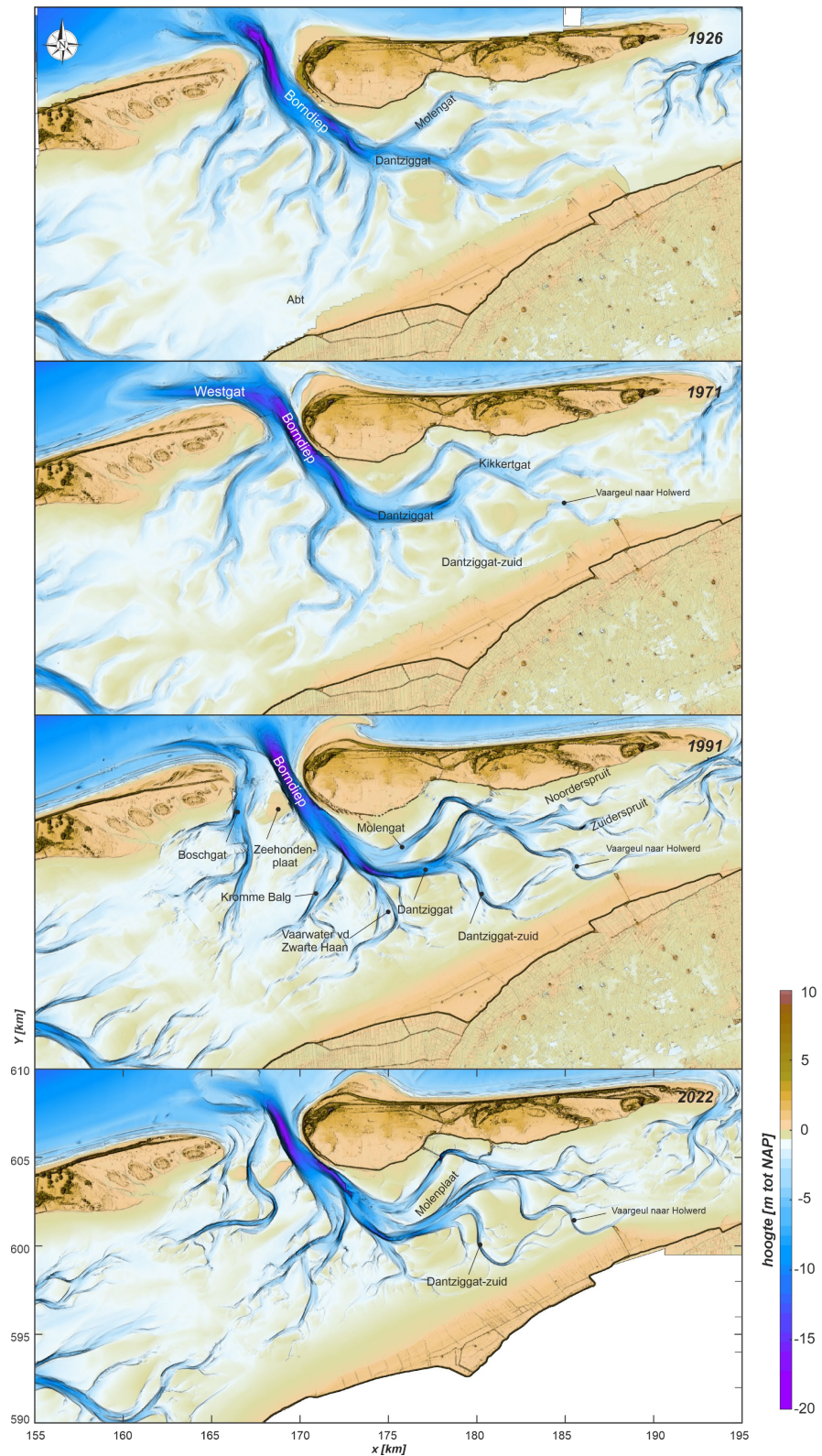
De bodemkaarten opgenomen tussen 1926 en 2022 laten een overeenkomstige karakteristiek zien (Figuur 3-5). Op grote schaal zijn overeenkomstige geulen en platen zichtbaar in beide bodemkaarten. Het grootste verschil tussen de oude (1926, 1971) en de recente bodemkaarten (1991, 2022) is dat in de recente kaarten meer detail zichtbaar is door de hogere resolutie van de data. Toch zijn er wel degelijk morfologische veranderingen opgetreden; deze worden duidelijk in de verschilkaarten en geulligging (Figuur 3-6 en Figuur 3-7). De morfologische veranderingen tussen 1926 en 1971 zijn in het vorige hoofdstuk al behandeld. In deze periode ontstaat de huidige vaargeul naar Holwerd, waardoor het oorspronkelijke ver oostelijk gerichte Dantziggat gedeeltelijk wordt ingevuld met sediment. Grote veranderingen zijn ook zichtbaar op de buitendelta, waar een grote, westelijk gerichte geul Westgat de buitendelta domineert. Deze geul is in de meer recente jaren (1991, 2022) veel kleiner en het Borndiep heeft dan een veel meer noordelijk gerichte uitstroom.

Over de gehele periode (1926-2022) domineert het afwisselende patroon van sedimentatie en erosie. In de keel van het zeegat is de grootste verandering zichtbaar, met aan de westzijde sedimentatie en erosie aan de oostzijde (Figuur 3-6). Dit patroon ontstaat door een oostelijke verplaatsing van de hoofdgeul en de groei van het plaatcomplex direct westelijk van de geul, waarop zich ook de Zeehondenplaat bevindt. Het merendeel van deze geulverplaatsing vindt plaats tussen 1926 en 1991. Een groot gebied van erosie is zichtbaar aan de oost- en noordoostzijde van de eilandstaart van Terschelling. Deze erosie representeert het terugtrekken van de Boschplaat. Naast het terugtrekken van de Boschplaat is ook de invulling en gedeeltelijke verplaatsing van het Boschgat duidelijk zichtbaar als sedimentatie- en erosiegebied. In de periode 1991-2022 overheerst sedimentatie in het Borndiep. Wat hier vooral opvalt, is de sedimentatie ten noorden van de Kromme Balg. Bij de overgang van Kromme Balg naar Borndiep ontstaat hierdoor een ondiep platform en neemt de diepte noordelijk ervan sterk toe. Het Borndiep splitst hier bijna in twee deelgeulen. Het westelijke deel stroomt uit over dit ondieptegebied en takt aan op de Kromme Balg. Het oostelijke deel wordt tegen de kust aangedrukt en verdiept. Dit is duidelijk zichtbaar als een erosiegebied direct ten zuiden van de eilandkop, grenzend aan de Feugelpolle. Dit deel van de geul maakt verbinding met het Molengat en het Dantziggat. Het Dantziggat lijkt hierbij iets dichtgedrukt te worden en zuidelijk te verplaatsen door een zuidelijke uitbouw van de Molenplaat.

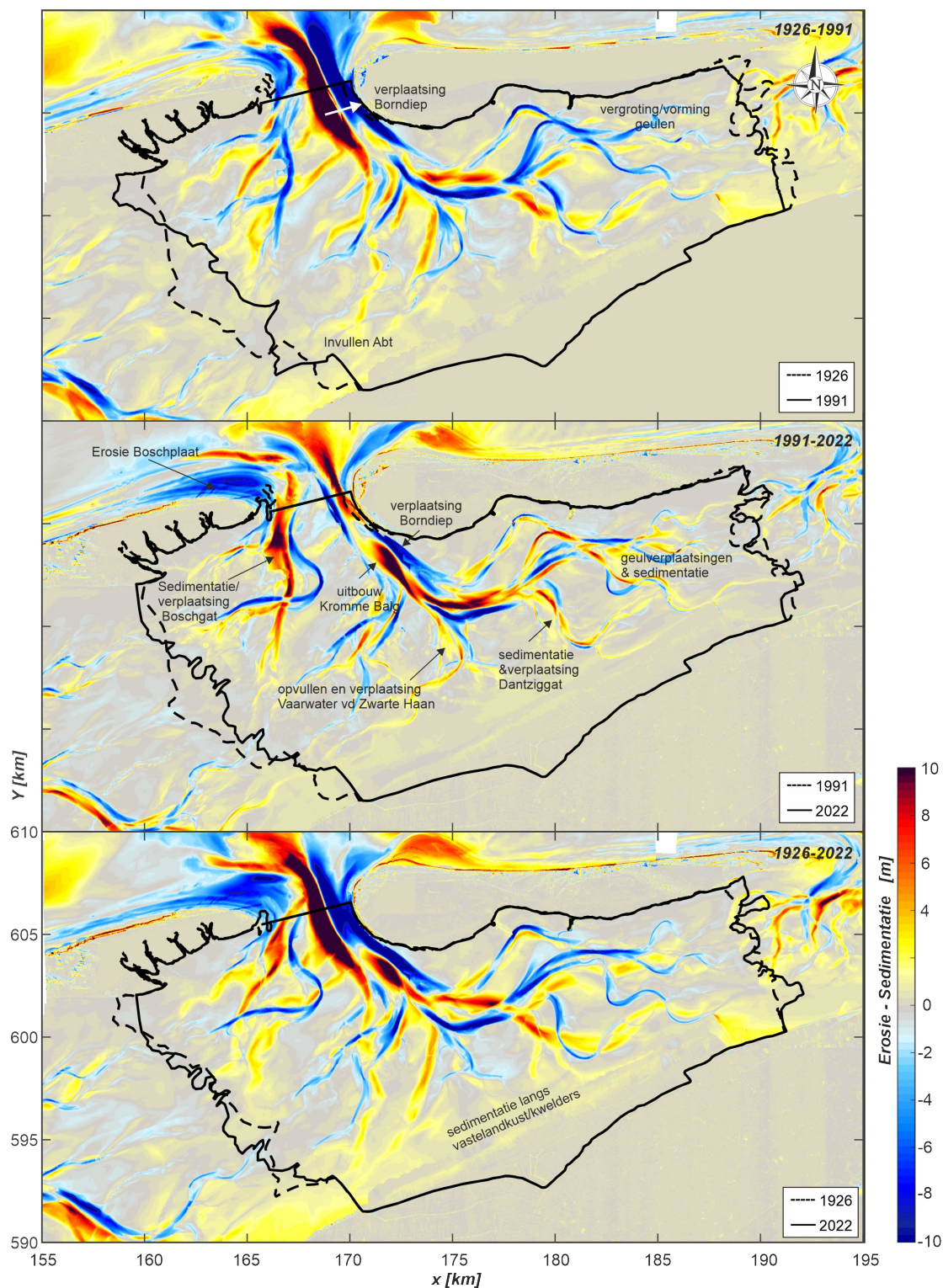
Ook in de oudere bodemkaarten waren er al grote veranderingen in het Dantziggat te observeren (Figuur 3-5 en Figuur 2-4). In de 1926-bodemkaart vormt het Borndiep-Dantziggat nog een doorgaande hoofdgeul. Net onder de Molenplaat splitst het Dantziggat zich in een noordelijke tak richting Kikkertgat-Noorderspruit-Zuiderspruit en een zuidelijke tak die in de bodemkaarten ook de benaming Dantziggat heeft. Om verwarring te voorkomen verwijzen we naar dit deel van de geul als Dantziggat-zuid. Deze zuidelijke tak neemt steeds meer in omvang af en roteert kloksgewijs, zodat Dantziggat-zuid vrijwel loodrecht op het Dantziggat komt te staan en dan eigenlijk niet meer de hoofdgeul, maar een nevengeul vormt. Deze verandering in geulligging en de netto-sedimentatie is ook duidelijk zichtbaar in de sedimentatie-erosiekaarten (Figuur 3-6). De zuidelijke geulvertakkingen vertonen aanzanding en een blauwe band van geulerosie strekt zich van west naar oost uit. Het merendeel van deze verandering treedt voor 1991 op.

In de verschilkaart van 1926-1991 is ook de verandering van het zuidelijke deel van het Dantziggat en de vorming van een nieuwe geul oostelijk ervan, de huidige vaargeul naar Holwerd, zichtbaar. Sinds 1991 zijn de veranderingen kleiner, maar er zijn nog wel afwisselende gebieden van lokaal grote erosie en sedimentatie zichtbaar. Met name bij het huidige knelpunt Dantziggat treedt dit op. Dit patroon laat zien dat de geul zich in zuidelijke richting aan het verplaatsen is. Richting het wantij zijn de veranderingen veel kleiner. Er zijn

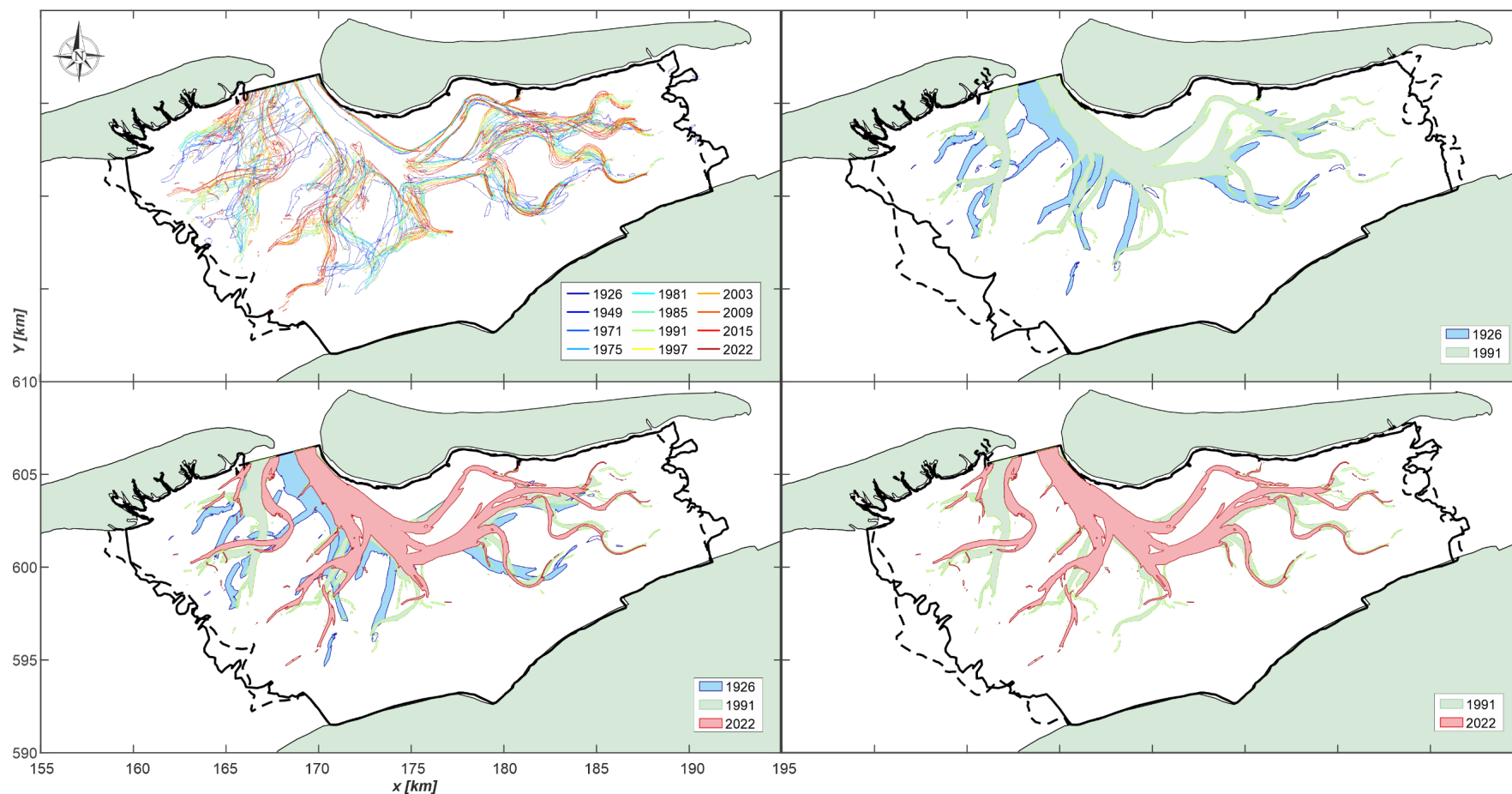
hier gebieden met kleinschalige afwisselingen van sedimentatie en erosie zichtbaar die duiden op geuldynamiek. Daarnaast overheerst een trend van netto aanzanding in het gebied waar de geulen uitstromen richting het wantij en de kwelders. De hoogteverandering van de platen is relatief klein. In Appendix C.1 worden de morfologische veranderingen geaggregeerd samengevat door middel van een hypsometrische curve.



Figuur 3-5: Representatieve bodemkaarten voor het Borndiep voor de jaren 1926, 1971, 1991 en 2022.



Figuur 3-6: Overzicht van de sedimentatie- en erosiepatronen voor de periode 1926-1991 (boven), 1991-2022 (midden) en de totale periode 1926-2022 (onder). Polygonen geven de omhullende van de kormbergingsgebieden weer voor beide jaren.

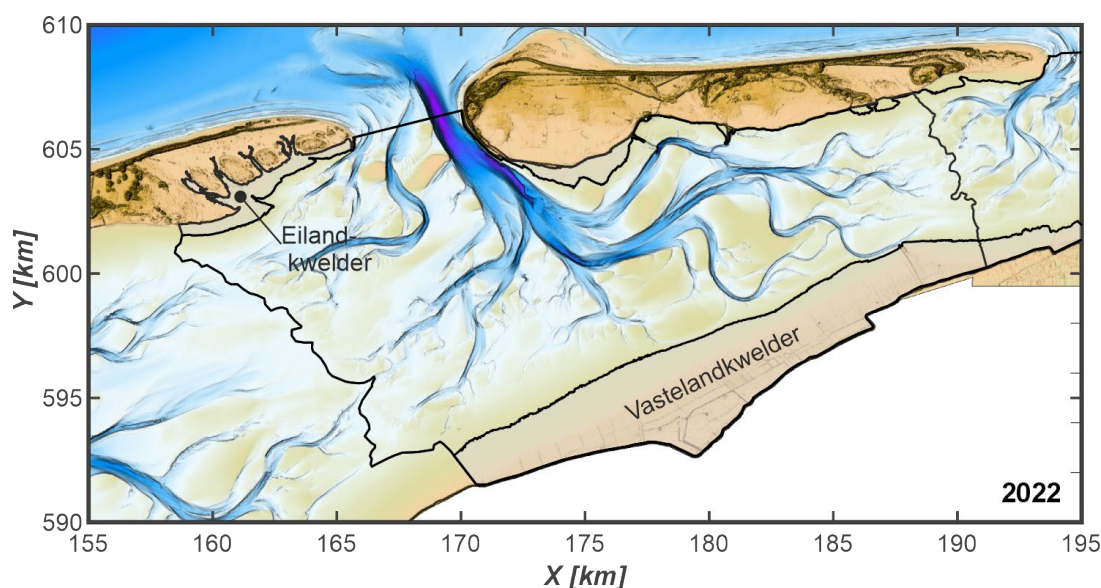


Figuur 3-7: Representatie van de veranderingen in geulligging aan de hand van de -3 m NAP-contourlijn voor alle metingen (links boven) en geselecteerde perioden: 1926-1991, 1926-1991-2022 en 1991-2022.

3.3 Veranderingen in volume en oppervlakte

3.3.1 Sedimentvolume van het kombergingsgebied, bekken en kwelder

De grootschalige volumebalans van het gehele kombergingsgebied wordt berekend t.o.v. het referentievlak 0 m-NAP. De afbakening van het kombergingsgebied Borndiep is gebaseerd op de wantijligging en begrenzing zoals beschreven in hfdst. 2 en gevisualiseerd in Figuur 3-8. De berekeningen zijn gemaakt voor het gehele kombergingsgebied inclusief en exclusief de kwelders. In onderstaande analyses wordt het kombergingsgebied exclusief kwelder betiteld als bekken. De kwelders zijn onderverdeeld in de eiland- en de vastelandkwelders. De eilandkwelder wordt aan de landzijde begrensd door de +1 m NAP-contourlijn. De vastelandkwelder is aan de landwaartse zijde begrensd door een vaste ligging, getrokken over de Waddenzeedijk. Aan de Waddenzijde is de 0 m NAP-contour gebruikt als afbakening van beide kwelders. Deze afbakening heeft geen fysische reden, maar is puur gebaseerd op de dekking van de meetdata. In de oudere kaarten (voor 1987) is de kwelderzone niet of slecht ingemeten. Missende data in deze gebieden is ingevuld met het voorgaande jaar. Dit geeft voor de visualisatie een duidelijk beeld, maar geeft geen accuraat beeld van de volumeveranderingen. In de recente bodemdata (na pakweg 1985) is de kwelder wel dekkend ingemeten, maar hiervan is bekend dat de opnamen onnauwkeurig zijn vanwege de correctie van vegetatie uit de LiDAR-opnamen. De 0 m NAP-contourligging geeft voor alle jaren een goede omsluiting van de onnauwkeurige of ingevulde data. Daarnaast heeft deze contour een relatief consistente ligging. In Figuur 3-8 is een voorbeeld van de afbakening van het kombergingsgebied en de kweldergebieden getoond voor de 2022-bodemligging. Gezien de onzekerheid in hoogtemeting van de kwelders mag het duidelijk zijn dat de berekende arealen en volumes met de nodige voorzichtigheid moeten worden beschouwd.



Figuur 3-8: Overzicht van de afbakening en referentievlakken voor de volume- en areaalberekening van het kombergingsgebied Borndiep op basis van de 2022-bodem. De afbakening en begrenzing van de kwelders zijn weergegeven met de getrokken lijnen en witte vlakken.

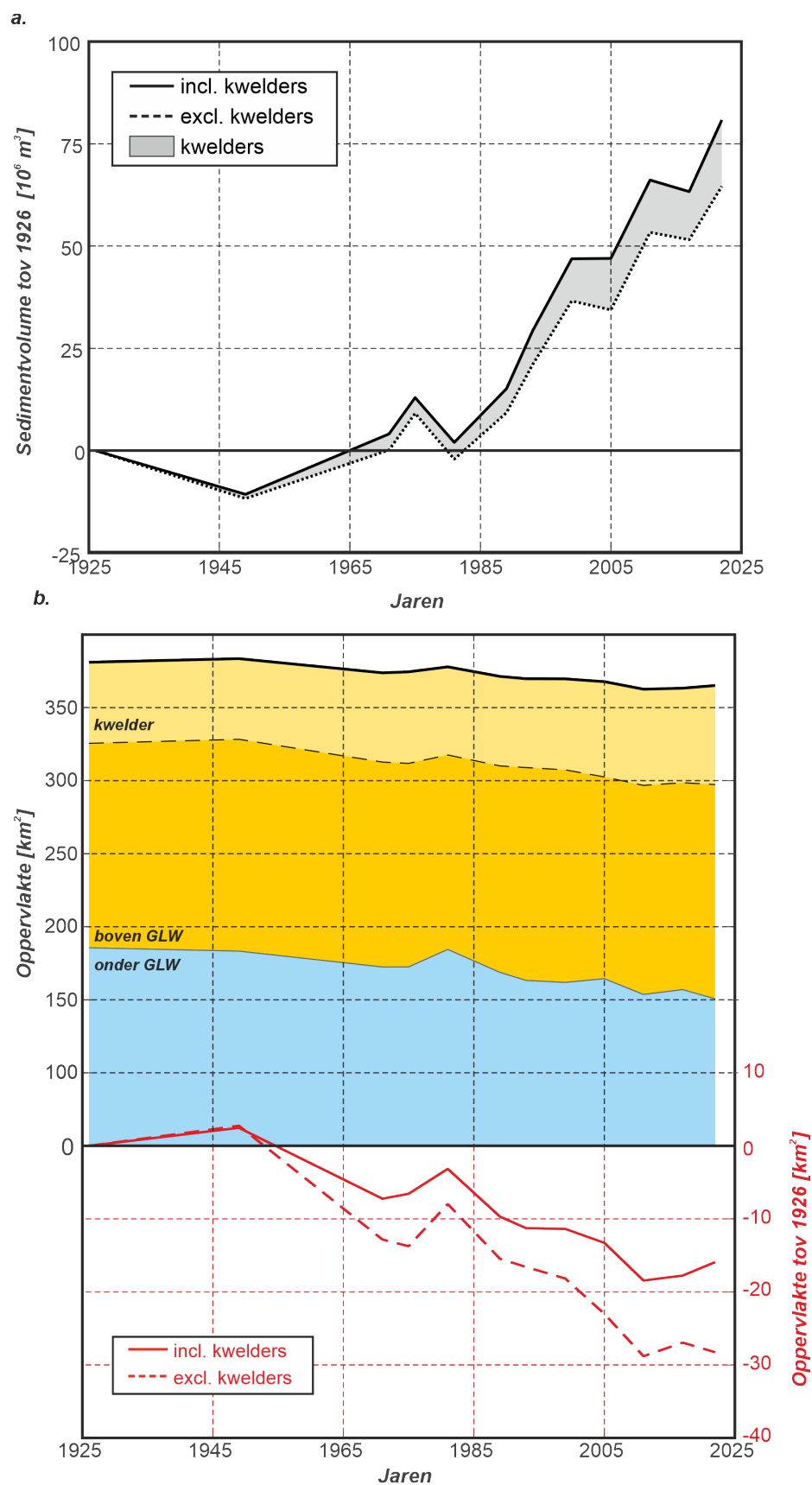
Een overzicht van de ontwikkeling in volume en oppervlakte is samengevat in Figuur 3-9 en Tabel 3-1. Het kombergingsgebied van het Borndiep heeft een gemiddelde grootte van 325 km², waarvan gemiddeld 38% van het oppervlakte onder GLW en 62% erboven ligt (Figuur 3-9b). De kwelders (60 km²) vormen 18% van het kombergingsgebied. Het oppervlakte onder GLW is sinds 1926 met 35 km² afgenomen, omdat enerzijds de totale omvang van het kombergingsgebied met 16 km² afneemt en anderzijds door een toename, uitbouw van de

kwelders (+12 km²). De uitbouw van de vastelandkwelder bedroeg +17 km², maar door erosie van de eilandstaart is het aangrenzende kweldergebied van het eiland met -4 km² afgenomen. Naast deze verliezen is er wel een kleine toename van de litorale platen in het bekken zichtbaar (+7 km²).

De netto volumeverandering van het gehele kombergingsgebied (incl. kwelders) laat een sedimentatie zien van +81 miljoen m³ in de periode 1926-2022 (Tabel 3-1 en Figuur 3-9a). Dit is een gemiddelde sedimentatie van bijna +0.82 miljoen m³/jr. Deze trend is echter niet geheel representatief voor het huidige gedrag. Er is een duidelijk verschil in trend te onderscheiden tussen de periode 1926-1981 (+0.20 miljoen m³/jr.) en de periode 1981-2022 (+1.81 miljoen m³/jr.). Alhoewel er in de tijdserie wel fluctuaties te zien zijn, lijkt de 1981-2022-trend ook representatief voor de huidige volumeontwikkeling. Een deel van de sedimentatie, +16 miljoen m³, vindt plaats in de kwelder. De sedimentatiesnelheid van het bekken, dus exclusief de kwelders, heeft een trendwaarde van +1.62 miljoen m³ netto per jaar over de periode 1981-2022. Deze sedimentatiesnelheid is vrijwel gelijk aan de gemiddelde baggerinspanning tussen 2019 en 2023, die 1.6 miljoen m³/jr. bedraagt. Dit wil niet zeggen dat het baggeren hier direct een effect op heeft, maar het is wel duidelijk dat de baggerinspanning van vrijwel gelijke orde is als de netto volumeverandering van het bekken.

Tabel 3-1: Overzicht van het oppervlakte en de volumeverandering van het kombergingsgebied (incl. kwelder), het bekken (exclusief kwelder) en de kwelders van het Borndiep. Zie ook Figuur 3-9.

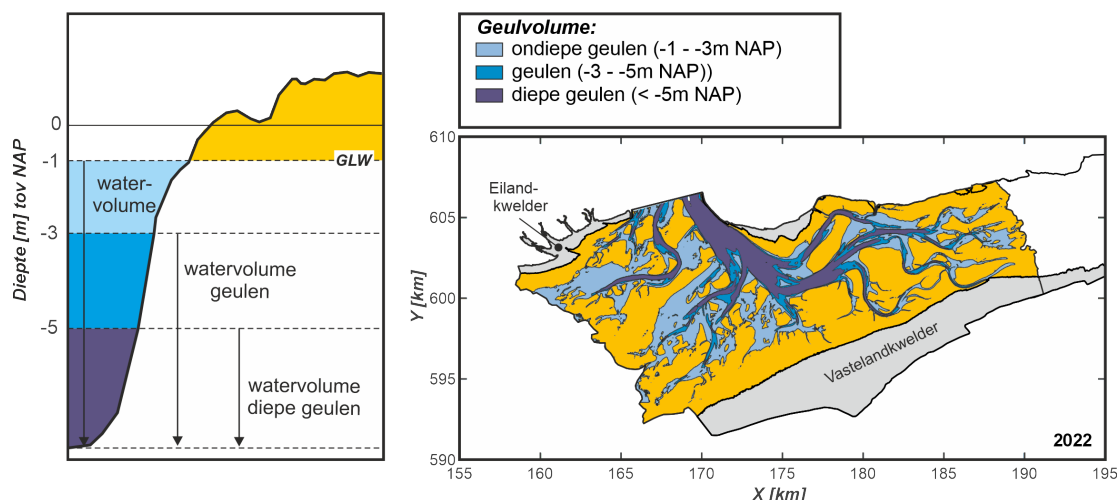
Jaren	Oppervlakte [km ²] incl. kwelder			Opp. [km ²] kwelder	Verandering in volume [10 ⁶ m ³]		
	Totaal	< GLW	> GLW		Incl. kwelder	Excl. kwelder	kwelder
1926	331.09	135.58	195.51	55.53	0.00	0.00	0.00
1948	333.56	133.29	200.27	55.25	-10.69	-11.74	1.05
1971	323.85	122.44	201.41	61.12	4.08	0.12	3.96
1975	324.53	122.49	202.04	62.71	12.96	9.10	3.86
1981	327.94	134.44	193.51	60.35	2.01	-2.12	4.13
1989	321.4	118.74	202.66	61.30	15.14	9.24	5.90
1993	319.82	113.24	206.58	60.84	29.28	20.98	8.30
1999	319.72	111.87	207.85	62.32	46.90	36.56	10.34
2005	317.81	114.42	203.39	65.25	47.00	34.38	12.62
2011	312.65	103.64	209.01	65.89	66.15	53.34	12.81
2017	313.33	106.95	206.38	64.71	63.32	51.53	11.79
2022	315.18	100.63	214.54	67.88	80.83	64.6	16.23
Gemiddeld	324.78	121.90	201.90	60.33	-		-



Figuur 3-9: Verandering in sedimentvolume (a) en oppervlakte (b) van het Borndiep. (a). De verandering in sedimentvolume is berekend t.o.v. 1926 voor het totale kombergingsgebied incl. en excl. kwelder. (b). Oppervlakte en verandering in oppervlakte t.o.v. 1926 voor het totale kombergingsgebied en de kwelders.

3.3.2 Analyse van de geulvolumes en -areaal

In de berekening van de geulvolumes zijn verschillende referentievlakken gebruikt om een volledig beeld te verkrijgen (Figuur 3-10, links). De totale watervolumes van het kombergingsgebied zijn gebaseerd op het watervolume onder GLW (gedefinieerd als NAP -1 m). De geulen en diepe geulen zijn gebaseerd op de NAP -3 m en -5 m contouren. De 2022 bodem (Figuur 3-10, rechts) illustreert duidelijk waarom een analyse van alleen de (diepe) geulen een vertekend beeld geeft van de watervolumes in het kombergingsgebied. Een groot deel van het bekken (32% in 2022) bevindt zich wel onder GLW, maar kan niet direct als geul geassocieerd worden. Dit deel bevat zowel ondiepe geulen als diepgelegen bank- en drempelgebieden. De geulen (< -3 m NAP) vormen slechts 12% en de diepe geulen 7% van het gehele kombergingsgebied.



Figuur 3-10: Overzicht van de afbakening en referentievlakken gebruikt voor de bepaling van de geulvolumes en arealen van het Borndiep, geprojecteerd op de 2022-bodemligging.

Het totale watervolume onder GLW bedraagt 302 miljoen m³ in 1926 en neemt af tot 271 miljoen m³ in de meest recente meting (Figuur 3-11a). Dit betekent dat er +30 miljoen m³ aan sedimentatie is opgetreden (Figuur 3-11b). Over de gehele periode is het watervolume in alleen de geulen en diepe geulen toegenomen met respectievelijk +5 en +6 miljoen m³.

Over de gehele tijdserie genomen is er dus een tegenovergestelde ontwikkeling van de geulen in vergelijking met de ontwikkeling van het totale watervolume onder GLW. Echter, de toename in watervolume van de (diepe) geulen fluctueert sterk door de tijdserie heen en op basis van de recente metingen, sinds 1989, kan geconcludeerd worden dat het gehele bekken onder GLW een trend van sedimentatie vertoont. Het totale watervolume onder GLW neemt over de periode 1989-2022 met 40.5 miljoen m³ toe (+1.13 miljoen m³/jr.).

De geulen bereiken een maximum geulvolume (-188 miljoen m³) in 1989, maar nemen sindsdien weer af tot -162 miljoen m³ in 2022. De afname in geulvolume, oftewel sedimentatie, vertoont een lineaire trend over de periode 1989-2022 van 0.71 miljoen m³/jr. De diepe geulen sedimenteren met 0.57 miljoen m³/jr. Van de totale sedimentatie onder GLW treedt dus ongeveer de helft op in de diepe geulen. Ter vergelijking: de netto geulopvulling is ongeveer 35% van de recente baggeractiviteiten (1.6 miljoen m³/jr.).

Naast een afname in geulvolume is ook het geulareaal of oppervlakte afgenomen (Figuur 3-11c, d). Het totale oppervlakte onder GLW neemt af van 136 km² in 1926 tot 101 km² in 2022. Dit is een afname van ruim 25%. De afname vertoont wel fluctuaties, maar zet zich over de gehele periode door met een lineaire trendwaarde van -0.36 km²/jr. De grootste fluctuatie is in 1982 zichtbaar, met een nat oppervlakte dat zo'n 12 km² groter is dan in de omliggende jaren. Dit verschil komt niet door de gehanteerde begrenzing, maar lijkt vooral

gerelateerd te zijn aan een iets diepere ligging van de bodem in de komberging van het Boschgat. Deze grote uitschieter lijkt niet realistisch en is verwijderd voor een nauwkeurige berekening van de gemiddelde diepte. Deze correctie is weergegeven met de getrokken lijn (ongecorrigeerd) en het blauwe vlak (gecorrigeerd) in Figuur 3-11c. De ontwikkeling van de oppervlakte van de geulen en diepe geulen vertoont een tegenovergestelde trend. Het oppervlakte van de geulen neemt iets af (-5 km^2). Deze afname vertoont een vrijwel lineair verloop sinds 1971 met een trendwaarde van $-0.1 \text{ km}^2/\text{jr}$. De diepe geulen vertonen juist een kleine toename van $+1.5 \text{ km}^2$. Deze toename is klein en lijkt niet representatief voor de huidige ontwikkeling. Een trendlijn sinds 1989 geeft ook voor het diepe areaal een kleine afnemende trend ($-0.06 \text{ km}^2/\text{jr}$).

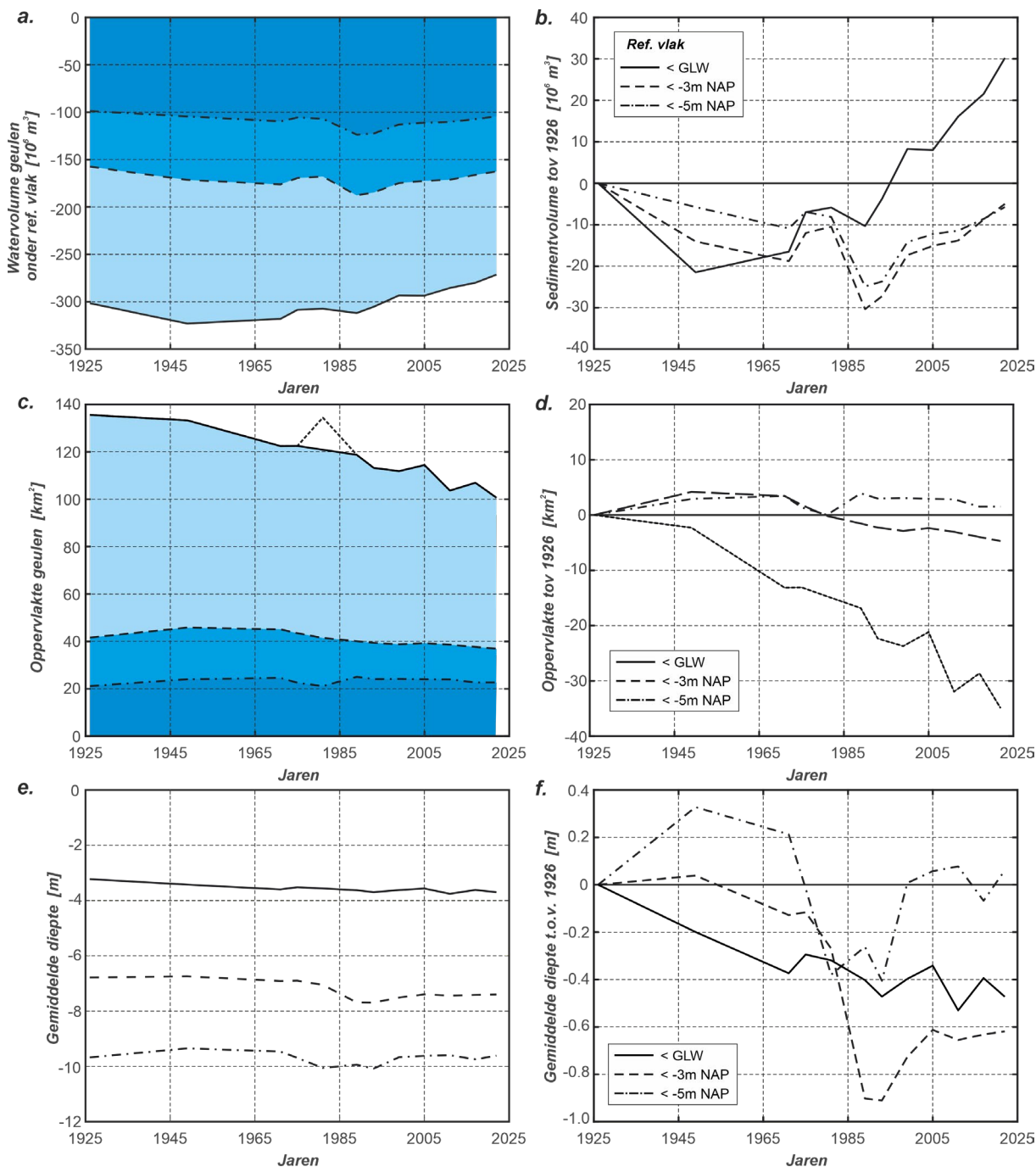
Op basis van de berekende volumes en oppervlakte kan ook een schatting van de gemiddelde diepte gemaakt worden (Figuur 3-11e,f). Ondanks een netto trend van sedimentatie, neemt de diepte onder GLW toe van -3.22 m NAP in 1926 naar -3.70 m NAP in 1926 ($-4.3 \text{ mm}/\text{jr}$). Een trendlijn over de periode 1989-2022 geeft een meer representatieve schatting van de huidige ontwikkeling van $-2.3 \text{ mm}/\text{jr}$. De tegenstrijdigheid tussen verdieping en netto-sedimentatie kan verklaard worden door de afname in oppervlakte. De verandering in oppervlakte is relatief groter dan de opgetreden sedimentatie en bevat vooral de ondiepe gebieden, waardoor een relatief groter deel diep areaal overblijft en de gemiddelde diepte toeneemt.

Het verloop van de diepte voor de geulen en diepe geulen vertoont grote variaties, waardoor een betrouwbare trendlijn over de gehele periode eigenlijk niet getrokken kan worden. De geulen onder -3 m NAP nemen eerst met 30 cm in diepte af om vervolgens weer toe te nemen. Sinds 2000 ligt de diepte rond de -7.4 m NAP (zo'n 60 cm lager dan in 1926). De diepe geulen bereiken een maximumdiepte in 1994 (-10.1 m NAP) om vervolgens weer af te nemen tot de huidige diepte, die sinds 1999 varieert tussen de -9.6 en -9.7 m NAP en daarmee vrijwel gelijk is aan de 1926-waarde. Een duidelijke trend van verandering in diepte is niet waarneembaar.

Op basis van deze ontwikkelingen kan geconcludeerd worden dat de geulen in het Bordiep langzaam opvullen. De sedimentatiesnelheid bedraagt $+0.55$ miljoen m^3/jaar en dit gaat gepaard met een verkleining van het geulareaal ($\approx 0.10 \text{ km}^2/\text{jaar}$). De gemiddelde diepte van de overgebleven geulen blijft ongeveer gelijk.

Tabel 3-2: Overzicht van het oppervlakte (A in km^2) en watervolume (V in miljoen m^3) en gemiddelde diepte (V/A in m) van het kombergingsgebied van het Bordiep.

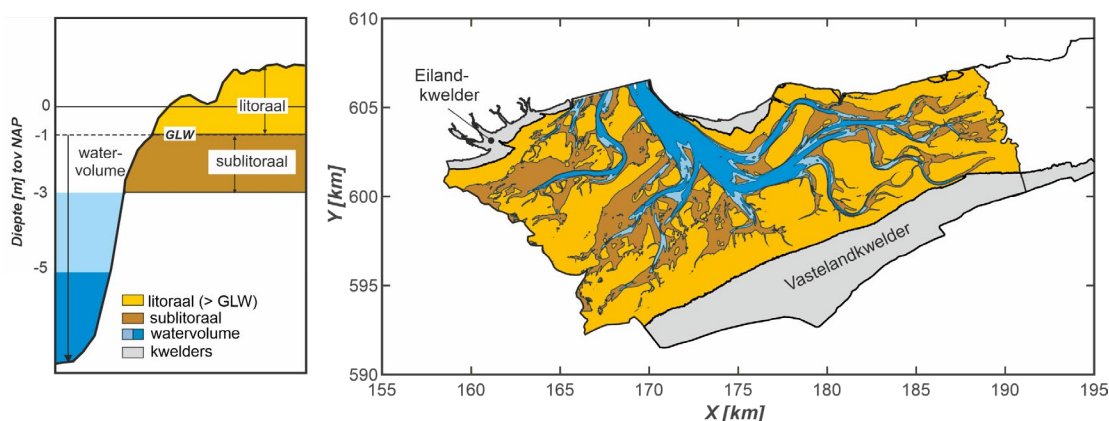
Jaren	Oppervlakte water [km^2]			Volume in [10^6 m^3]			Gem. diepte [m]		
	< -1 m	< -3 m	< -5 m	< -1 m	< -3 m	< -5 m	< -1m	< -3m	< -5m
1926	135.58	41.64	21.13	-301.56	-157.45	-98.78	-3.22	-6.78	-9.67
1948	133.29	45.82	24.04	-323.04	-171.49	-104.51	-3.42	-6.74	-9.35
1971	122.44	45.08	24.58	-318.05	-176.23	-109.68	-3.60	-6.91	-9.46
1975	122.49	43.48	22.53	-308.52	-169.45	-105.67	-3.52	-6.90	-9.69
1981	134.44*	41.46	21.15	-307.41	-167.91	-106.91	-3.29	-7.05	-10.1
1989	118.74	40.10	25.05	-311.89	-187.81	-123.66	-3.63	-7.68	-9.94
1993	113.24	39.37	24.11	-305.31	-184.7	-122.48	-3.70	-7.69	-10.1
1999	111.87	38.77	24.2	-293.27	-174.77	-112.95	-3.62	-7.51	-9.67
2005	114.42	39.27	24.05	-293.55	-172.55	-111.05	-3.57	-7.39	-9.62
2011	103.64	38.60	23.97	-285.45	-171.24	-110.2	-3.75	-7.44	-9.60
2017	106.95	37.66	22.64	-280.00	-166.2	-107.37	-3.62	-7.41	-9.74
2022	100.63	36.92	22.65	-271.35	-162.44	-104.51	-3.70	-7.40	-9.61
Gemiddeld	121.90	42.06	23.42	-306.20	-171.39	-108.28	-3.52	-7.10	-9.63



Figuur 3-11: Overzicht van de ontwikkeling van de watervolumes t.o.v. de referentievlakken GLW (-1m NAP), -3m NAP (geulen) en -5m NAP (diepe geulen). (a) Totale watervolume t.o.v. referentievlak en (b) verandering in sedimentvolume t.o.v. 1926*, (c) Totale oppervlakte en (d) verandering in oppervlakte t.o.v. 1926, (e) Gemiddelde diepte en (f) verandering in gemiddelde diepte t.o.v. 1926. * De uitschieter in oppervlakte t.o.v. GLW in 1982 is gecorrigeerd met de gemiddelde waarde van de omliggende jaren.

3.3.3 Litorale en sublitorale platen en kwelders

De sedimentvolumes van de platen zijn bepaald voor een diep (-3 m NAP) en een ondiep referentievlak (-1 m NAP, Figuur 3-12). Het litoraal wordt meestal gedefinieerd als het gebied tussen GLW en GHW, maar omdat de supragetijdegebieden in het kombergingsgebied vrijwel beperkt zijn tot de gebieden afgebakend als kwelder, worden deze niet apart meegenomen in de analyse. Het litoraal is hier dus gedefinieerd als het totale sedimentvolume van het bekken boven GLW, waarbij het bekken het deel zonder kwelders weergeeft. Het diepe referentievlak (>-3 m) omvat zowel het sublitoraal als het litoraal, maar hieruit kan het volume van het sublitoraal wel berekend worden. Let op dat de berekende waarden voor de kwelders grote onzekerheid bevatten door de tekortkomingen in de bodemliggingen.



Figuur 3-12: Afbakening van de litorale en sublitorale platen (links) en overzicht van de ligging op basis van de 2022-opname van het Borndiep. Grijze vlakken geven de afbakening van de kweldergebieden weer, met de -1 m contour als afbakening tussen kwelder en bekken

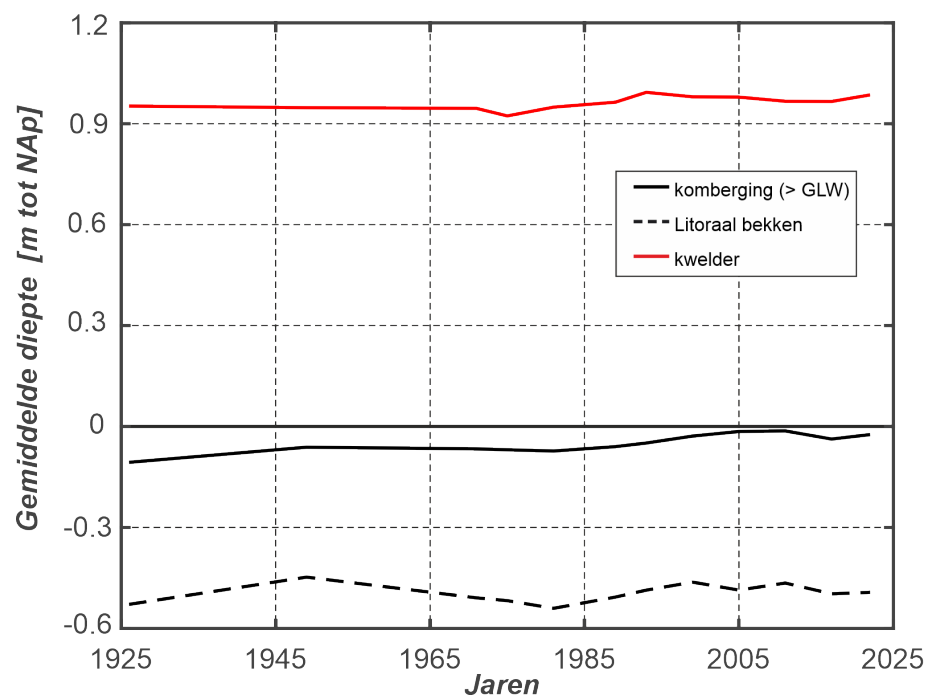
Van het totale kombergingsoppervlakte bestaat gemiddeld 63% uit litorale platen en kwelder. Ongeveer 30% van het plaatoppervlakte wordt gevormd door de kwelder, maar het merendeel (70%) bevindt zich in het bekken. Het plaat-kwelderoppervlak is iets toegenomen van 195.5 km² in 1926 tot 214.5 km² in 2022, een toename van 19 km² (Figuur 3-14a). De kweldergebieden nemen met 12 km² toe en de platen in het bekken met 7 km². De relatief grote toename van de kwelder hangt samen met de gehanteerde definitie van de kwelderrand op 0 m NAP. Omdat de vastelandkwelder zich over de gehele lengte van het kombergingsgebied uitstrekt, geeft een kleine verplaatsing van deze contour al een relatief grote verandering in oppervlakte. De toename bedraagt + 0.19 km²/jr. over de periode 1989-2022. Het litoraal in het bekken vertoont grote variaties in oppervlakte, maar geen duidelijke trend.

Het totale sedimentvolume van het litoraal binnen het kombergingsgebied is met 35 miljoen m³ toegenomen (Figuur 3-14b). Het merendeel van deze toename vindt plaats in de vastelandkwelder (+33 miljoen m³), omdat deze in omvang toeneemt. Doordat de sedimentvolumes berekend worden t.o.v. GLW, betekent de 16 km² toename in oppervlakte van de kwelder ook een toename in sedimentvolume van 16 miljoen m³. Ongeveer de helft van deze sedimentatie is dus door areaalgroei en de andere helft is door een toename van de hoogte van de kwelder. De eilandkwelder is juist iets in volume afgenomen (-7 miljoen m³). Op de litorale platen van het bekken is t.o.v. 1926 sedimentatie opgetreden (+8 miljoen m³), maar deze sedimentatie lijkt geen representatief beeld van het huidige gedrag te geven. Door de relatief grote variaties in de tijdserie is een betrouwbare trendlijn voor het recente gedrag eigenlijk niet te maken. Een trendlijn over de periode 1989-2022 geeft een kleine sedimenterende trend van +0.02 miljoen m³/jr., maar representatiever lijkt hier de trendlijn over de periode 1993-2022, welke een eroderende trend van -0.10 miljoen m³/jr. zou geven.

De litorale platen in het bekken (exclusief kwelder) hebben gemiddeld een oppervlakte van 141.5 km². Dit oppervlakte blijft vrijwel stabiel over de gehele periode (Figuur 3-14c). Het gemiddelde oppervlakte van het sublitoraal is met 77.5 km² bijna de helft kleiner. Dit oppervlakte was maximaal in 1926 (94 km²) en is dan afgenomen tot een minimum van 64 km² in 2022. Dit geeft een gemiddelde afname van -0.30 km²/jr. De afname sinds 1989 is met -0.39 km²/jr. nog iets groter (Figuur 3-14e).

Het sedimentvolume in de litorale platen bedraagt gemiddeld 71.5 miljoen m³. Dit volume is veel kleiner dan het gemiddelde volume in het sublitoraal van 391 miljoen m³ (Figuur 3-14d). Dit grote verschil ontstaat doordat niet alleen het oppervlakte van het sublitoraal groter is, maar ook is de rekenschijf dikker. Het volume in het litoraal neemt wel iets toe (+8 miljoen m³) over de gehele tijdserie, maar een duidelijke trend is hier eigenlijk niet te bepalen. Het sublitoraal vertoont een afname in volume van 21 miljoen m³ tussen 1926-2022, wat resulteert in een trendwaarde van -0.23 miljoen m³/jr. (Figuur 3-14f). De volumeverandering van het sublitoraal bestaat uit 2 delen. Ten eerste een verandering omdat het oppervlakte verandert door o.a. wantijverplaatsing en ten tweede een verandering doordat de geulen in het bekken veranderen. Deze laatste volumeverandering is aangegeven als 'sublitoraal 2' in Figuur 3-14f en deze afname bedraagt bijna -35 miljoen m³ (-0.30 miljoen m³/jr.). De huidige trendwaarde ligt met -0.54 miljoen m³/jr. (1989-2022) nog iets hoger dan de langetermijntrend.

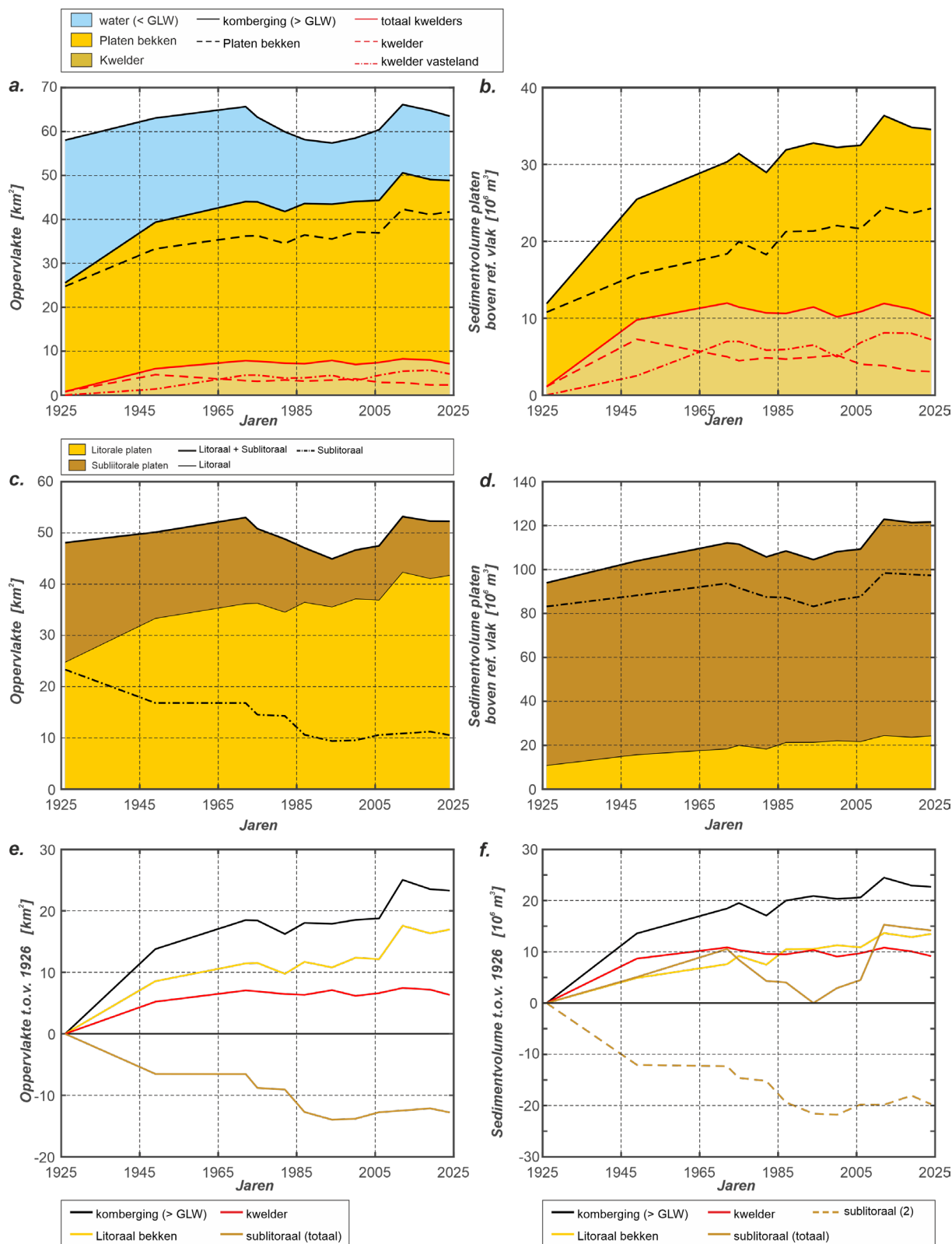
Met behulp van het volume en oppervlakte kan de gemiddelde dikte van het litorale sedimentpakket worden uitgerekend. In Figuur 3-13 is dit weergegeven als een hoogte (ofwel diepte) ten opzichte van NAP. De gemiddelde diepte van het litoraal van het gehele kombergingsgebied bedraagt -0.05 m tot NAP. Deze diepte is afgenomen van -0.11 m in 1926 tot -0.02 m in 2022. Dit geeft een gemiddelde hoogteverandering van +1 mm/jr. Deze geringe diepte komt deels doordat de kwelders relatief hoog zijn, met een gemiddelde hoogte van +0.96 m NAP. De kwelderhoogte is in 2022 4 cm hoger in vergelijking tot de 1926-waarde, maar een betrouwbare trend is hier eigenlijk niet te bepalen. Als beste schatting wordt 0 cm/jr. gehanteerd. De litorale platen in het bekken (exclusief kwelders) hebben een gemiddelde hoogte van -0.5 m tot NAP. De hoogte in 2022 is 4 cm hoger dan in 1925, maar de variaties in hoogteligging (± 10 cm) zijn veel groter dan deze nettoverandering dus ook hier is een trend niet te bepalen. Aangezien de plaathoogte vrijwel gelijk blijft, wordt als beste schatting hier dan ook een waarde 0 cm/jr. aangehouden.



Figuur 3-13: Overzicht van de gemiddelde diepte van het litoraal van het gehele kombergingsgebied (zwarte lijn) en onderverdeeld in kwelders (rood) en platen (streepjeslijn) binnen het bekken.

Tabel 3-3: Overzicht van het oppervlakte (A in km^2), sedimentvolume (V in miljoen m^3) en gemiddelde plaathoogte (V/A in m t.o.v. NAP) van het litoraal binnen het kombergingsgebied van het Borndiep.

Jaren	Oppervlakte platen [km^2]			Volume in [10^6 m^3]			Gem. hoogte [m tot NAP]		
	Komb.	Bekken	Kwelder	Komb.	Bekken	Kwelder	Komb.	Bekken	Kwelder
1926	195.51	139.78	55.73	174.69	65.87	108.82	-0.11	-0.53	0.95
1948	200.27	144.84	55.43	187.96	79.99	107.97	-0.06	-0.45	0.95
1971	201.41	140.11	61.30	188.03	68.75	119.28	-0.07	-0.51	0.95
1975	202.04	139.16	62.88	188.06	67.12	120.94	-0.07	-0.52	0.92
1981	193.51	132.78	60.73	179.41	61.02	118.39	-0.07	-0.54	0.95
1989	202.66	141.05	61.61	190.54	69.53	121.01	-0.06	-0.51	0.96
1993	206.58	145.53	61.05	196.44	74.74	121.7	-0.05	-0.49	0.99
1999	207.85	145.30	62.55	201.94	78.08	123.86	-0.03	-0.46	0.98
2005	203.39	137.95	65.44	200.39	70.87	129.52	-0.01	-0.49	0.98
2011	209.01	143.01	66.00	206.28	76.46	129.82	-0.01	-0.47	0.97
2017	206.38	141.51	64.87	198.69	71.14	127.55	-0.04	-0.50	0.97
2022	214.54	146.50	68.04	209.40	74.28	135.12	-0.02	-0.49	0.99
Gemiddeld	201.90	141.57	62.14	190.35	72.21	118.14	-0.05	-0.49	0.96



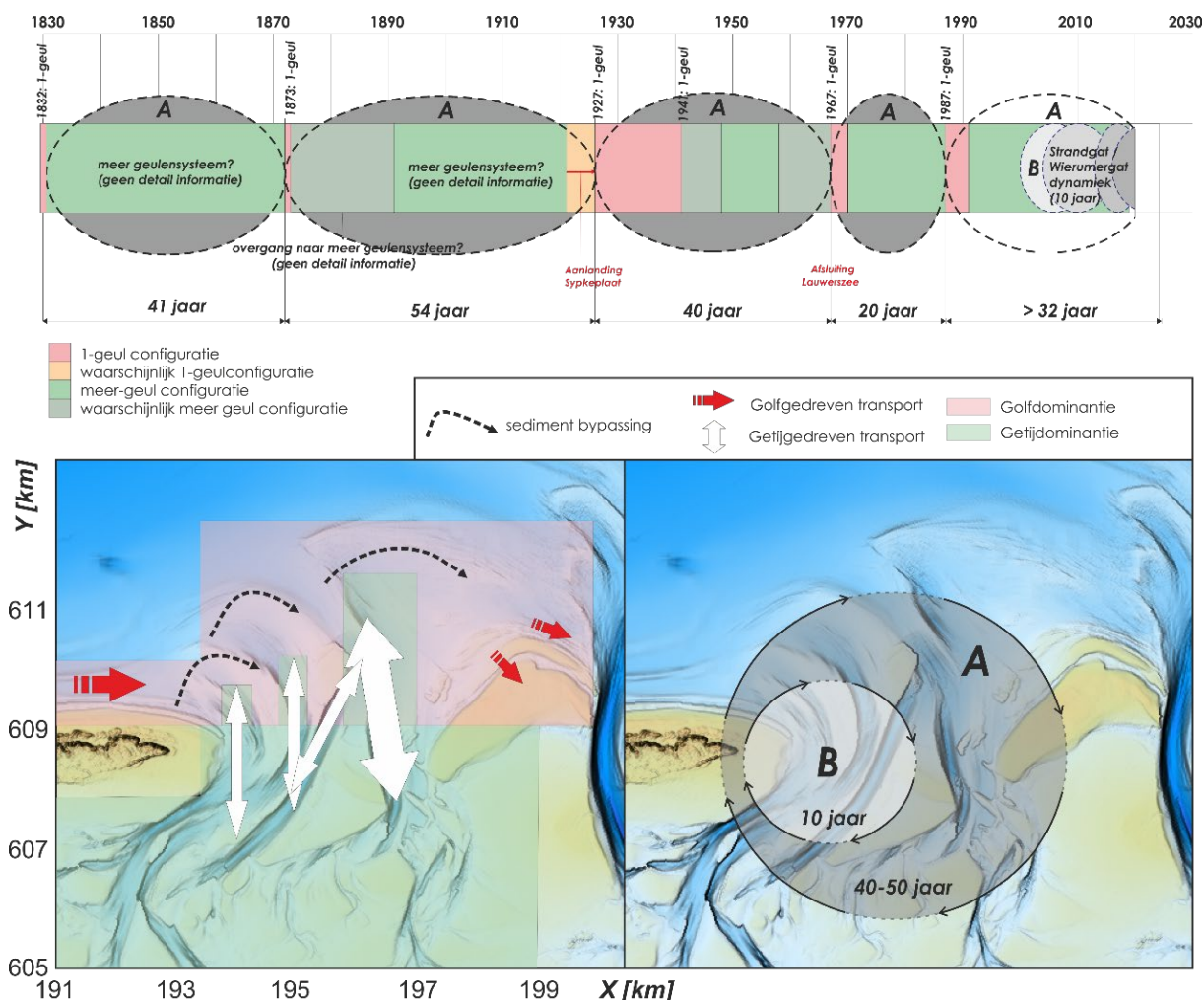
Figuur 3-14: Overzicht van (a) het oppervlakte van het kombergingsgebied Borndiep onderverdeeld in water (< GLW) en platen en kwelders (> GLW). (b) Sedimentvolumes van platen en kwelders boven GLW gedefinieerd als > -1m NAP. (c en d) Oppervlakte en sedimentvolume van de litorale en sublitorale platen. (e,f) Verschil in oppervlakte en sedimentvolume voor de verschillende deelgebieden. De volumeverandering van het sublitoraal (totaal), dit bestaat voor een deel uit een verandering in oppervlakte en voor een deel uit een verandering in bodemhoogte (dit deel is aanvullend weergegeven als sublitoraal (2)).

4 Morfologie van het Pinkegat

In onderstaand hoofdstuk wordt de morfologie van het kombergingsgebied Pinkegat geanalyseerd. Deze analyse bestaat uit 3 onderdelen. In hfdst. 4.1. wordt een beknopte beschrijving van de langetermijn, grootschalige ontwikkeling gegeven d.m.v. een conceptueel model van cycliciteit. De Vaklodingen worden gebruikt voor een analyse van het morfologische gedrag sinds 1926, waarbij in hfdst. 4.2 een kwantitatieve analyse en in hfdst. 4.3. een kwalitatieve morfologische analyse uitgevoerd wordt. De kwalitatieve analyse bestaat uit 3 onderdelen: (1) de netto volumeverandering, (2). de volumeverandering van de geulen en (3). de veranderingen van de platen (het litoraal en sublitoraal).

4.1 Historische ontwikkeling Pinkegat

In de rapportage van Elias en Oost (2021) wordt de dynamiek van het Pinkegat in detail beschreven. Hieronder volgt een samenvatting van deze bevindingen aan de hand van het opgestelde conceptueel model (Figuur 4-1), dat toepasbaar is zowel vóór als ná afsluiting van de Lauwerszee.



Figuur 4-1: Een conceptuele weergave van het morfologische gedrag van het Pinkegat. Door een schematische tijdlijn van (A) het ontstaan van een 1-geulstelsel met een herhalingsperiode van 40-50 jaar en (B) de kleinschalige (ebgeul) dynamiek van Strandgat en Wierumergat met een herhalingsperiode rond de 10 jaar (bron: Elias en Oost, 2021).

Kenmerkend voor het morfologisch gedrag van het Pinkegat-zeegat is een variatie tussen een 1-geul- en meergeulensysteem. In de 1-geulconfiguratie is de hoofdgeul Pinkegat groot en diep en verzorgt de gehele drainage van het achterliggende kombergingsgebied. De herhalingsjijd van de configuraties ligt meestal tussen de 40 en 54 jaar. Uitzondering daarop is een iets kortere herhalingsjijd na afsluiting van de Lauwerszee (20 jaar). Het mechanisme dat de overgang tussen een 1-geul- en meergeulensysteem veroorzaakt, is niet altijd gelijk. De 1927-overgang is veroorzaakt door verlanding van de Sykeplaat en daarna blijft de 1-geulconfiguratie lang behouden. In 1967 en 1987 ontstaat de enkele geul door het samengaan van verschillende ebgeulen.

De groei en terugtrekking van De Hon lijkt samen te vallen met de afwisseling tussen de 1-geul- en meergeulenconfiguratie. In de 1-geulconfiguratie is De Hon sterk uitgebouwd. De grootste uitbouw vindt plaats als het 1-geulsysteem is gevormd door bankaanlanding. Daarnaast lijken ook de geulen in het bekken te reageren op deze cyclus. Bij een enkele geul in het zeegat lijken de geulen in het bekken dieper dan in een meergeulenconfiguratie.

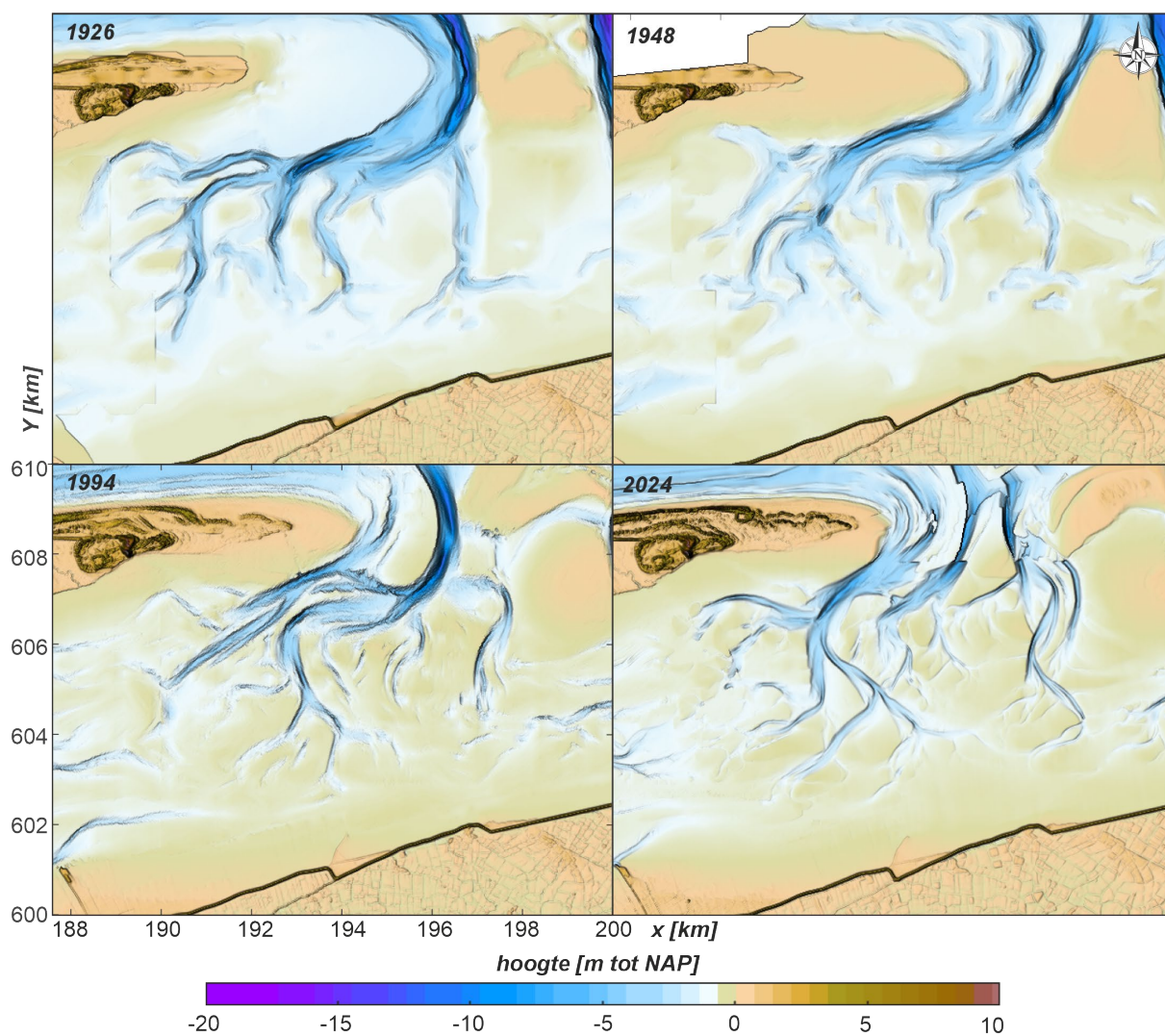
4.2 Bodemhoogte en veranderingen sinds 1926

De grote dynamiek van het Pinkegat maakt het lastig representatieve bodemkaarten te selecteren. De bodemkaart van 1926 geeft wel duidelijk de 1-geulconfiguratie weer, de overige kaarten zijn representatief voor het meergeulensysteem (Figuur 4-2). Geulverplaatsingen en -opvullingen domineren de sedimentatie-erosiepatronen (Figuur 4-3). Wat ook opvalt, is de sterke groei/sedimentatie van De Hon tussen 1926 en 1994. In deze periode neemt De Hon als plaat in hoogte en omvang toe, terwijl tussen 1994 en 2022 de duinen nog in hoogte toenemen en er direct langs de eilandstaart erosie door geulvorming optreedt.

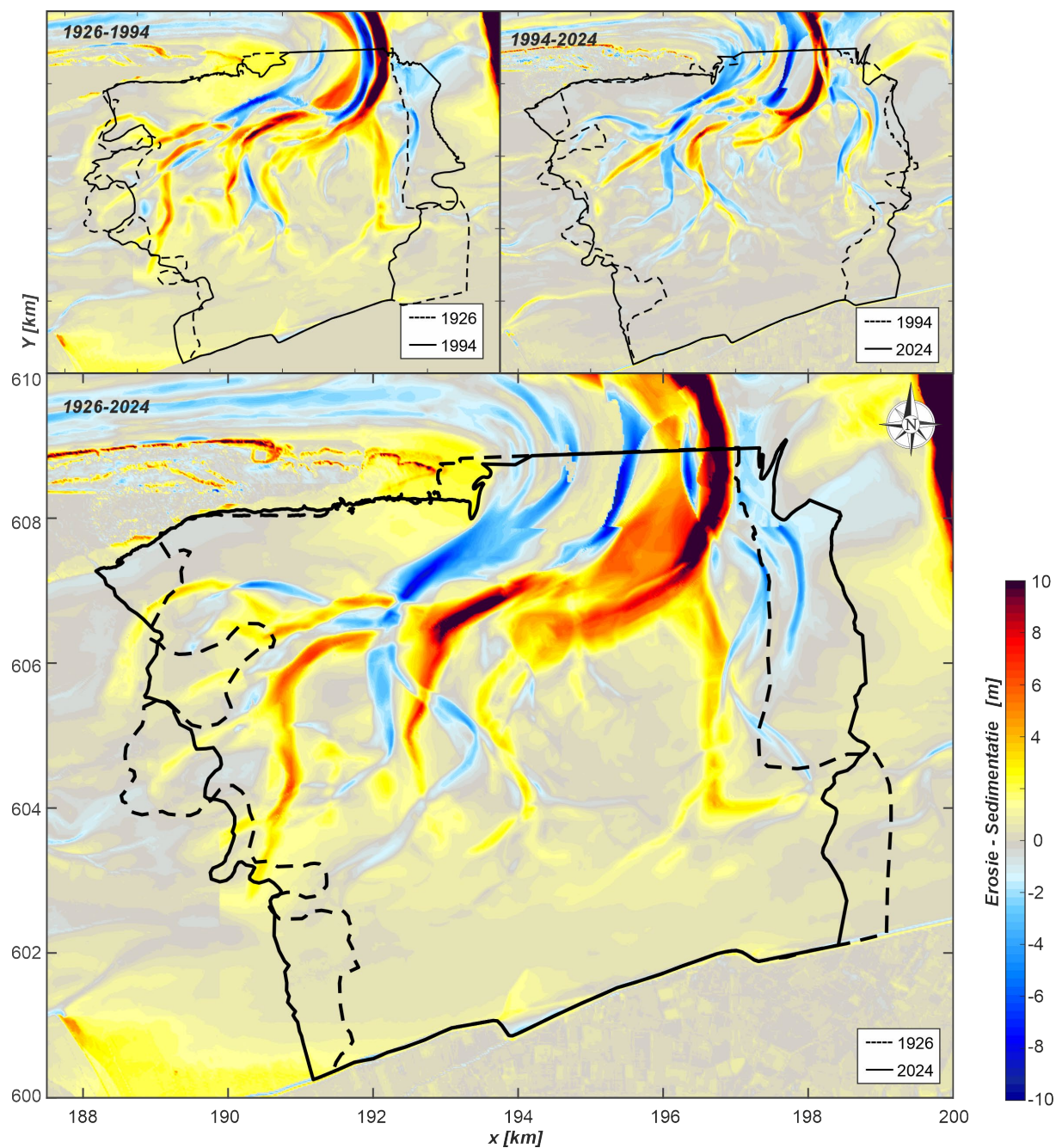
In het bekken domineert aanzanding de ontwikkeling tussen 1926-1994; vrijwel alle geulen en platen die in het bekken liggen lijken te sedimenteren (Figuur 4-3). Richting de keel van het zeegat is wel erosie te zien door geulverplaatsing, zoals bij de Holwerderbalg. Geulsedimentatie is met name zichtbaar richting het wantij en de kwelder, waarbij ook de tussenliggende platen overwegend sedimenteren. Direct onder de Engelmansplaat is juist erosie en geuldynamiek zichtbaar.

In de meer recente periode (1994-2024) zijn er zowel patronen van sedimentatie als erosie aanwezig. Het geulensysteem van de Holwerderbalg lijkt zich verder te verdiepen en uit te breiden. Het Pinkegat vertoont een grote invulling in de keel van het zeegat. In het bekken verplaatsen de geulen zich iets oostelijk, waardoor er aangrenzende langgerekte banden van sedimentatie en erosie zichtbaar zijn. De tussen de geulen gelegen platen vertonen zowel gebieden van kleine erosie als sedimentatie.

De sedimentatie-erosiekaart over de gehele periode (1926-2024) geeft ook duidelijk een aanzandende trend van de geulen. Dit wijst erop dat in de 1-geulconfiguratie (1926) de hoofdgeul en de geulen in het bekken relatief diep zijn t.o.v. de meergeulenconfiguratie. Elias en Oost (2021) geven als schatting voor de cyclusduur een periode van 40 tot 50 jaar. Dit zou betekenen dat er rond 2030 een overgang naar het 1-geulensysteem plaatsvindt en er in de toekomst dus ook een afname in sedimentvolume zou kunnen optreden als het 1-geulensysteem vormt. De morfologische veranderingen zijn samengevat in hypsometrische curven, getoond in Appendix D.1.



Figuur 4-2: Representatieve bodemkaarten van het Pinkegat voor de jaren 1926, 1949, 1991 en 2022 op basis van de Vaklodingen en aangevuld met AHN.

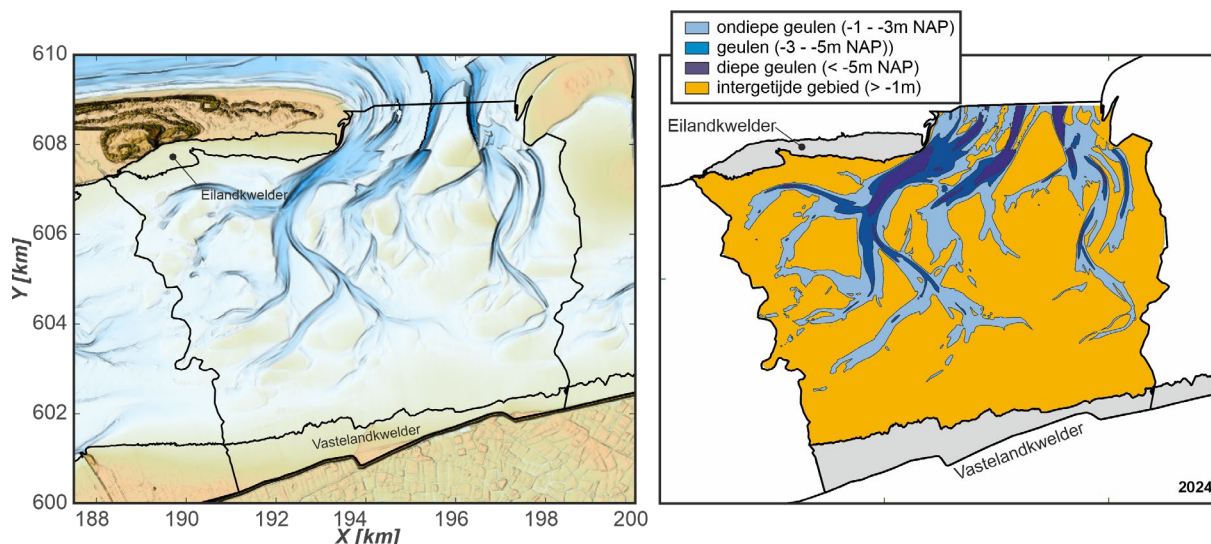


Figuur 4-3: Sedimentatie – erosiepatronen voor de periode 1926-1994, 1994-2024 en het totaal (1926-2024).

4.3 Verandering in volume en oppervlakte

4.3.1 Sedimentvolume van het kombergingsgebied, bekken en kwelder

De afbakening van het kombergingsgebied Pinkegat is gebaseerd op de wantijligging en begrenzing zoals beschreven in hfdst.2. Ook hier is in de sedimentvolume- en oppervlakteberekening een onderscheid gemaakt tussen de kwelders en het bekken (Figuur 4-4 links). Het gemiddelde oppervlakte inclusief kwelder bedraagt 62 km², waarvan 8% uit kwelder bestaat en 92% uit bekken. Het oppervlakte van het bekken ligt voor het merendeel, 70%, boven GLW en een kleiner deel onder GLW (30%).

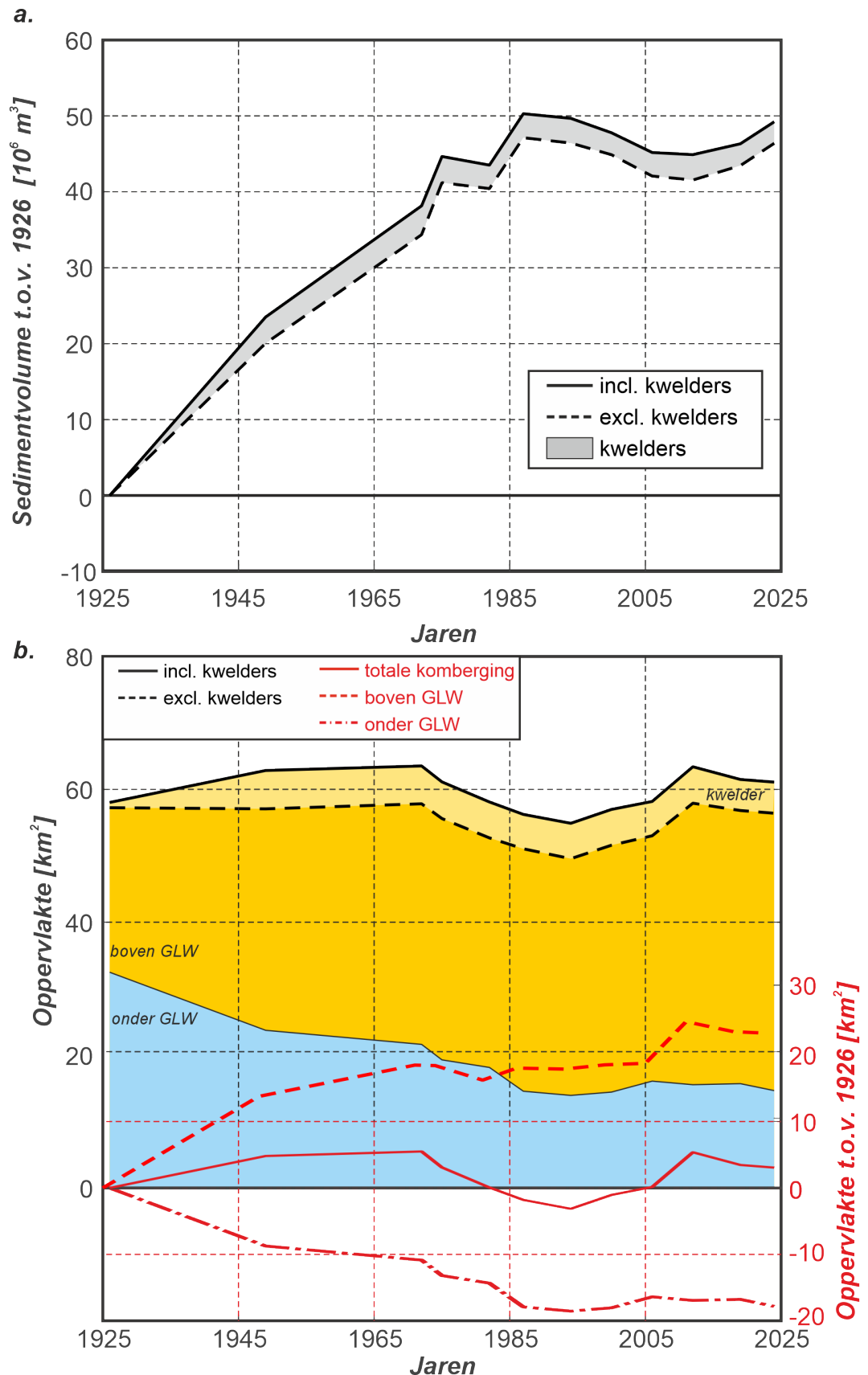


Figuur 4-4: Overzicht van de afbakening en referentievlakken voor de volume- en areaalberekening van het kombergingsgebied Pinkegat op basis van de 2024-bodem. De afbakening en begrenzing van de kwelders zijn weergegeven met de getrokken lijnen.

Een overzicht van de ontwikkeling in volume en oppervlakte is samengevat in Figuur 4-5 en Tabel 4-1. In totaal is er 49 miljoen m³ aan sedimentatie opgetreden in het kombergingsgebied van het Pinkegat. Een klein deel van deze sedimentatie vond plaats in de kwelder (+3 miljoen m³), maar het merendeel, 46 miljoen m³, in het bekken (Figuur 4-5a). De sedimentatie vindt voornamelijk plaats tussen 1926 en 1982 (+0.81 miljoen m³/jr.), terwijl de volumeverandering over de recente metingen beperkt is en varieert tussen de ± 0.01 miljoen m³/jr. (Figuur 4-5a).

Het oppervlakte van het kombergingsgebied vertoont relatief grote variaties, maar het huidige oppervlakte is vrijwel gelijk aan het oppervlakte rond 1949 (Figuur 4-5c). Ten opzichte van de 1926-waarde is het kombergingsgebied wel +5.5 km² in omvang toegenomen, maar de ligging van het wantij onder de Engelsmanplaat was in de 1926-meting meer westelijk dan in de andere metingen. Hierdoor lijkt 1926 niet geheel representatief (zie hfdst. 2.2).

Een deel van de variatie in omvang lijkt gerelateerd te zijn aan de afsluiting van de Lauwerszee. Na afsluiting migreerde het wantij onder de Engelsmanplaat eerst oostelijk om vervolgens weer geleidelijk terug westelijk te verplaatsen. Dit resulteert in een tijdelijke verkleining van de omvang van het Pinkegat, wat duidelijk terug te zien is in de periode 1971-2012. Sinds 2012 neemt het oppervlakte dan weer iets af. Het totale kombergingsoppervlakte vertoont weinig verandering, maar het deel onder GLW is duidelijk afgenomen, van 24 km² in 1949 tot 15 km² in 2024.



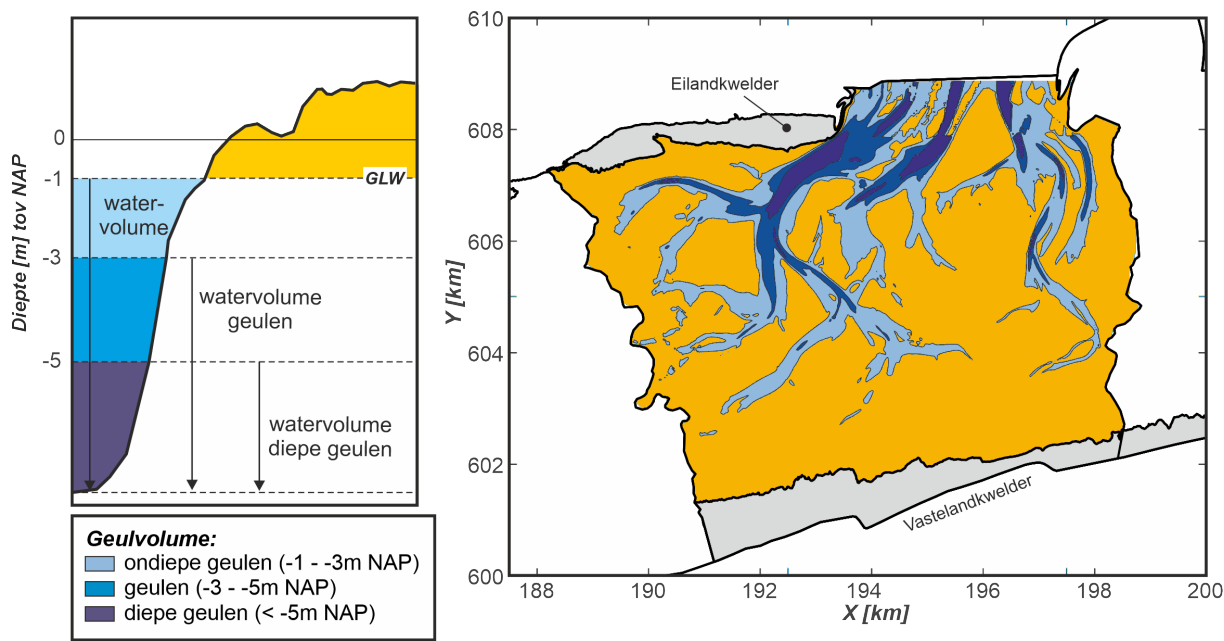
Figuur 4-5: Verandering in sedimentvolume (a) en oppervlakte (b) van het Pinkegat. (a). De verandering in sedimentvolume is berekend t.o.v. 1926 voor het totale kombergingsgebied incl. en excl. kwelder. (b). Oppervlakte (zwart) en verandering in oppervlakte (rood) t.o.v. 1926 voor het totale kombergingsgebied en de kwelders.

Tabel 4-1: Overzicht van het oppervlakte (in km²) en de volumeverandering (dV in miljoen m³) van het kombergingsgebied van het Pinkegat. Zie ook Figuur 4-5.

Jaren	Oppervlakte [km²] incl. kwelder			Opp. [km²] kwelder	dV in [10⁶ m³]		
	Totaal	< GLW	> GLW		Incl. kwelder	Excl. kwelder	kwelder
1926	58.03	24.76	32.47	0.80	0.00	0.00	0.00
1949	63.07	33.32	23.73	6.02	23.51	20.05	3.46
1972	65.66	36.20	21.61	7.85	38.16	34.35	3.81
1975	63.26	36.28	19.28	7.70	44.66	41.20	3.46
1982	59.93	34.52	18.14	7.27	43.52	40.42	3.10
1987	58.16	36.46	14.56	7.14	50.29	47.12	3.17
1994	57.38	35.55	13.93	7.90	49.68	46.42	3.26
2000	58.52	37.12	14.43	6.97	47.78	44.88	2.90
2006	60.40	36.90	16.08	7.42	45.18	42.07	3.11
2012	66.13	42.33	15.54	8.26	44.90	41.55	3.35
2019	64.78	41.09	15.7	7.99	46.33	43.45	2.88
2024	63.50	41.72	14.65	7.13	49.23	46.39	2.84
Gemiddeld	61.83	41.41	20.42	6.42	-	-	-

4.3.2 Analyse van de geulvolumes en arealen

In de berekening van de geulvolumes zijn verschillende referentievlakken gebruikt om een volledig beeld te verkrijgen (Figuur 4-6, links). De totale watervolumes van het kombergingsgebied zijn gebaseerd op GLW (NAP -1 m). De geulen en diepe geulen zijn gebaseerd op de NAP -3 m en -5 m contouren. Duidelijk zichtbaar in deze figuur is dat het Pinkegatbekken relatief ondiep is. Gemiddeld ligt 30% van het bekken onder GLW, maar hiervan is slechts 5% geclassificeerd als geul (-3 m NAP) en 3% als diepe geul (< -5 m NAP). Het merendeel van het natte oppervlakte bevindt zich in de sublitorale zone (-1 – -3 m NAP).



Figuur 4-6: Overzicht van de afbakening en referentievlakken gebruikt voor de bepaling van de geulvolumes en arealen van het Pinkegat, geprojecteerd op de 2024-bodemligging.

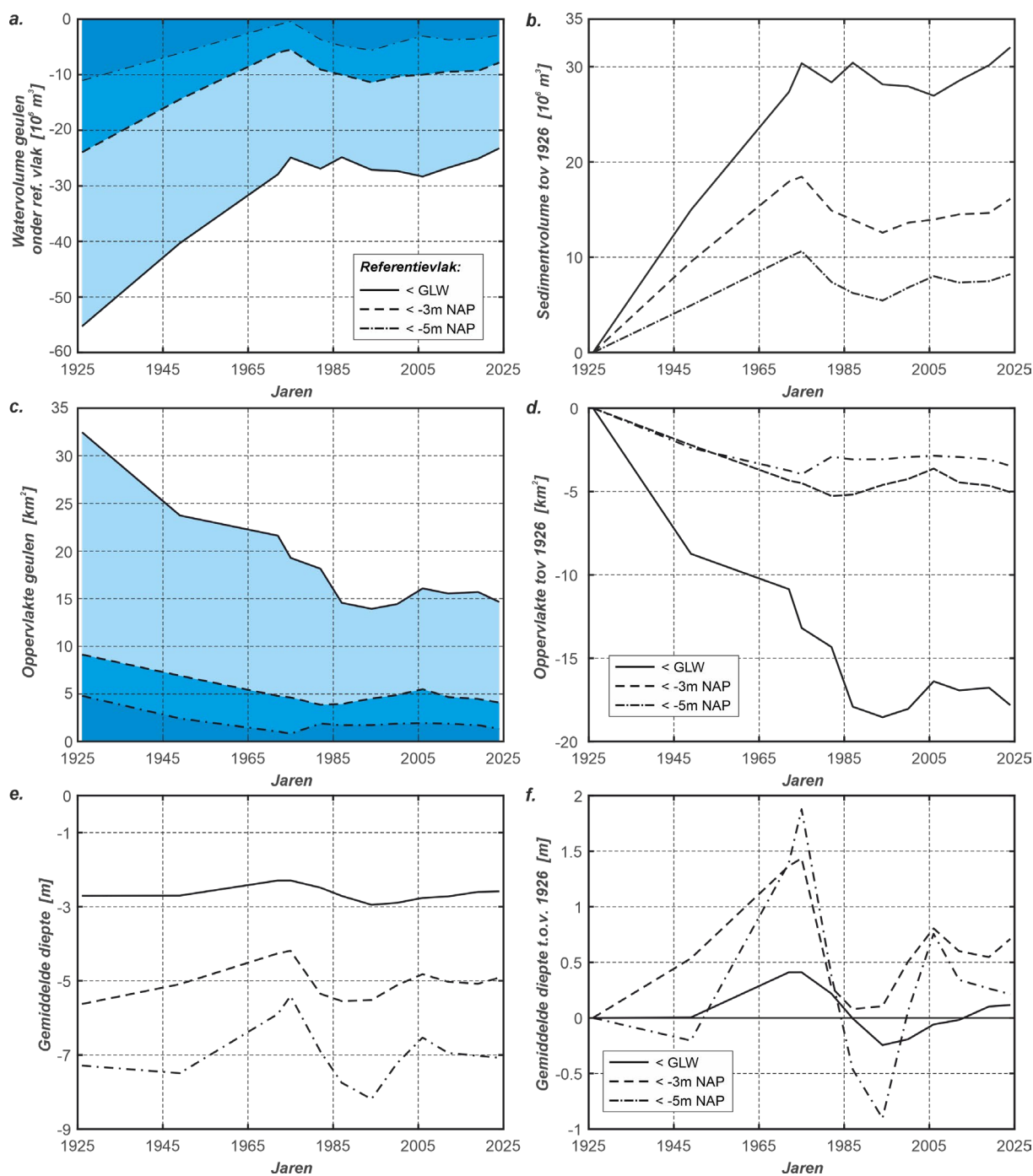
Het totale watervolume onder GLW bedraagt 55 miljoen m³ in 1926 en neemt af tot 23 miljoen m³ in de meest recente meting (Figuur 4-7a,b en Tabel 4-2). Dit betekent dat er +32 miljoen m³ aan sedimentatie is opgetreden. Deze sedimentatie is voor de helft in de geulen en diepe geulen opgetreden en voor de helft in het sublitoraal (ondiepe geulen). Het volume van de geulen neemt hierdoor af met 16 miljoen m³ en daarvan bestond dan weer de helft uit opvulling van het diepe deel (+8 miljoen m³). Het volumeverloop vertoont een duidelijke driedeling in gedrag. Een sterke afname in watervolume (sedimentatie) treedt op in de periode 1926-1975. Dit wordt gevolgd door een periode van erosie en weer sedimentatie. De erosie van de geulen stopt al rond 1994, maar in het sublitoraal zet de erosie zich wat langer door (tot 2006). De opvulling van de geulen sinds 1994 heeft een sedimentatiesnelheid van +0.10 miljoen m³/jr.

Naast een afname in geulvolume vertoont ook het oppervlakte een sterke afname. Het totale oppervlakte onder GLW neemt af van 32.5 km² in 1926 tot 15 km² in 2024. Dit is een afname van 55% met een gemiddelde van -0.17 km²/jr. Ook in deze tijdserie is een duidelijke trendbreuk in ontwikkeling te observeren (Figuur 4-7c,d). Het oppervlakte neemt sterk af tot een minimum rond 1989 en vertoont sindsdien wel een variatie in oppervlakte, maar weinig netto verandering. Ook het oppervlakte van de geulen en diepe geulen vertoont zo'n tweedeling in gedrag. De diepe geulen nemen met -5 km in oppervlakte af tot een minimumoppervlakte rond 1987. Sindsdien blijft het geuloppervlakte vrijwel gelijk.

Op basis van de geobserveerde verandering in volume en oppervlakte kan de gemiddelde diepte en verandering hierin inzichtelijk gemaakt worden (Figuur 4-7e,f). Alle zones vertonen grote variaties in diepte, waardoor representatieve trends eigenlijk niet gemaakt kunnen worden. Het overwegend natte deel van het bekken, onder GLW, heeft een gemiddelde diepte van -2.6 m NAP. De tijdserie vertoont variaties rond dit gemiddelde, maar geen duidelijke trend (Figuur 4-7e). Een maximumdiepte werd bereikt rond 1994 (-3.0 m NAP) en een minimum in 1972 (-2.3 m NAP). De geobserveerde diepte in 2024 is vrijwel gelijk aan het gemiddelde. De geulen en diepe geulen vertonen soortgelijke variaties in diepte, alleen zijn de uitschieters hierin veel groter (Figuur 4-7f). De diepe geulen zijn gemiddeld -7m diep, maar de minimumdiepte bedraagt in 1975 -5.4 m en de maximumdiepte -8.2 m in 1994. De diepte van -7.1 m in 2024 is 10 cm dieper dan het gemiddelde, maar een duidelijke trend is in de tijdserie niet zichtbaar.

Tabel 4-2: Overzicht van het oppervlakte (A in km²) en watervolume (V in miljoen m³) en gemiddelde diepte (V/A) van het kombergingsgebied van het Pinkegat. Zie ook Figuur 4-5.

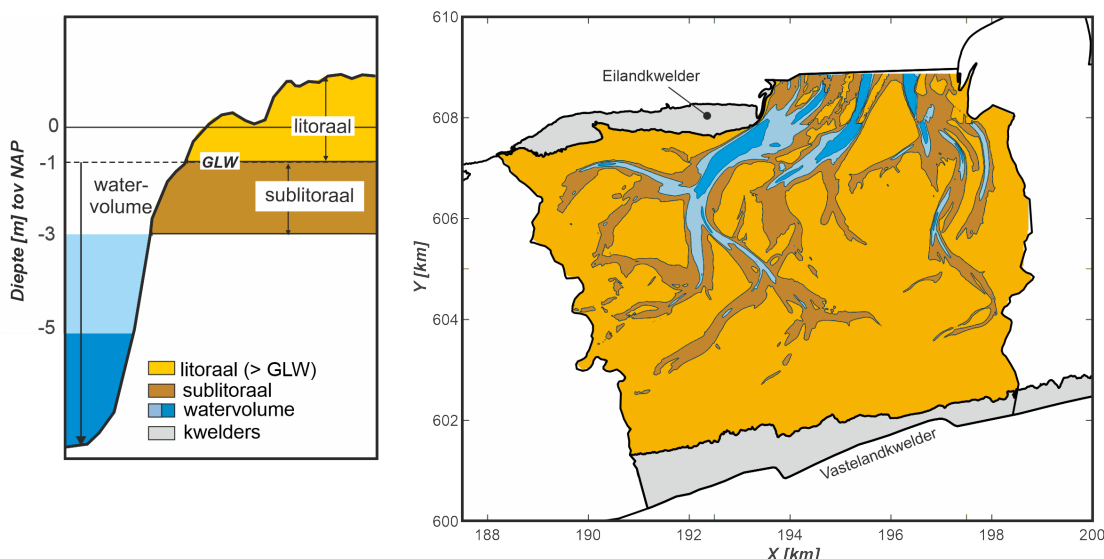
Jaren	Oppervlakte water [km ²]			Volume in [10 ⁶ m ³]			Diepte [m]		
	< -1m	< -3m	< -5m	< -1m	< -3m	< -5m	< -1m	< -3m	< -5m
1926	32.47	9.13	4.8	-55.28	-23.97	-10.98	-2.70	-5.63	-7.29
1949	23.73	6.91	2.42	-40.31	-14.44	-6.03	-2.70	-5.09	-7.49
1972	21.61	4.79	1.05	-27.93	-6.03	-0.94	-2.29	-4.26	-5.90
1975	19.28	4.63	0.83	-24.91	-5.51	-0.34	-2.29	-4.19	-5.41
1982	18.14	3.86	1.88	-26.92	-9.07	-3.58	-2.48	-5.35	-6.90
1987	14.56	3.94	1.72	-24.86	-10.03	-4.73	-2.71	-5.55	-7.75
1994	13.93	4.52	1.73	-27.13	-11.39	-5.52	-2.95	-5.52	-8.19
2000	14.43	4.88	1.87	-27.34	-10.34	-4.16	-2.89	-5.12	-7.22
2006	16.08	5.50	1.94	-28.32	-10.01	-2.97	-2.76	-4.82	-6.53
2012	15.54	4.67	1.87	-26.74	-9.46	-3.64	-2.72	-5.03	-6.95
2019	15.70	4.48	1.72	-25.12	-9.31	-3.48	-2.60	-5.08	-7.02
2024	14.65	4.09	1.33	-23.24	-7.83	-2.76	-2.59	-4.91	-7.08
Gemiddeld	20.42	5.68	2.15	-33.26	-11.89	-4.70	-2.64	-5.05	-7.03



Figuur 4-7: Overzicht van de ontwikkeling van de watervolumes t.o.v. de referentievlakken GLW (-1m NAP), -3m NAP (geulen) en -5m NAP (diepe geulen). (a) Totale watervolume t.o.v. referentievlak en (b) verandering in watervolume t.o.v. 1926, (c) Totale oppervlakte en (d) verandering in oppervlakte t.o.v. 1926, (e) Gemiddelde diepte en (f) verandering in gemiddelde diepte t.o.v. 1926.

4.3.3 Litorale en sublitorale platen en kwelders

Sedimentvolumes van de platen en kwelders zijn bepaald voor een diep (-3 m NAP) en een ondiep referentievlak -1 m NAP (Figuur 4-8). Het diepe referentievlak omvat zowel het sublitoraal en het litoraal. Het litoraal wordt meestal gedefinieerd als het gebied tussen GLW en GHW, maar omdat de supragetijdegebieden in het kombergingsgebied vrijwel beperkt zijn tot de gebieden afgebakend als kwelder, worden deze ook hier niet apart meegenomen in de analyse. Het litoraal is hier dus gedefinieerd als het totale volume boven GLW van het bekken, waarbij het bekken het deel zonder kwelders weergeeft. Let op dat de berekende waarden voor de kwelders grote onzekerheid bevatten door de tekortkomingen in de bodemliggingen.



Figuur 4-8: Definitie van het plaatareaal en sedimentvolumes boven GLW (links) en overzicht van de litorale en sublitorale platen op basis van de 2024 bodemligging (rechts). Grijze vlakken geven de kweldergebieden weer met de -1m contour als afbakening tussen kwelder en bekken.

Van het totale kombergingsoppervlakte van gemiddeld 62 km² bestaat 66% (gemiddeld 41 km²) uit platen hoger dan GLW en dus 34% uit diepe en ondiepe geulen (de blauwe kleuren in Figuur 4-8). Het oppervlakte van de kwelder beslaat 10% van het kombergingsgebied. Het overgrote deel van het litoraal bevindt zich dus in het bekken.

Het totale plaat-kwelderoppervlakte neemt met 23 km² toe in de periode 1926-2024 en bereikt een maximum van 50.5 km² in 2012 (Figuur 4-10a). In de tijdseries zijn 2 duidelijke sprongen in oppervlakte zichtbaar tussen 1926-1949 (+14 km²) en in de periode 2006-2012 (+ 6 km²). Toch geven trendlijnen over de gehele periode (1926-2024) en over de periode 1987-2024 een gelijke toenemende waarde van +0.20 km²/jr. De meest recente bodemkaarten (2012-2024) laten echter wel een kleine afname in plaatareaal zien, maar het is nog niet te zeggen of dit representatief is voor de huidige trend gezien de korte periode en omdat er ook in voorgaande perioden variaties van gelijkwaardige grootte zichtbaar waren.

Alhoewel de metingen van de kwelders voor 1987 incompleet zijn, laten ze wel zien dat de omvang is toegenomen (Figuur 4-10a), maar het tijdsverloop hierin is niet correct. De vastelandkwelder is over de gehele periode met 5 km² toegenomen (gemiddeld 0.05 km²/jr.), over de periode 1987-2024 is dit iets lager (+0.04 km²/jr.). De eilandkwelder vertoont wel een toename van 1.5 km² over de gehele periode, maar deze waarde wordt gedicteerd door de sprong in volume tussen 1926-1949. Een representatieve trendlijn getrokken over de periode 1987-2024 geeft hier juist een afnemend areaal van -0.03 km²/jr.

Het sedimentvolume van het litoraal neemt toe van 12 miljoen m³ in 1926 tot 34.5 miljoen m³ in 2024 (+22.7 miljoen m³). Gemiddeld over de gehele periode bedraagt de sedimentatie +0.20 miljoen m³/jr., maar dit lijkt de huidige sedimentatiesnelheid te overschatten. Een meer representatieve waarde voor de huidige sedimentatie is +0.1 miljoen m³/jr. over de periode 1987-2024 (Figuur 4-10a,b). Een deel van deze toename treedt op in het bekken en een deel in de kwelder. De kwelders nemen in totaal met 9 miljoen m³ in volume toe. Net als het oppervlakte, vindt de volumetoename van de kwelder voornamelijk plaats in de periode 1926-1972. Sinds 1972 is de netto volumeverandering klein omdat de sedimentatie in de vastelandkwelder vrijwel gelijk is aan de erosie van de eilandkwelder. De litorale platen in het bekken (exclusief kwelder) vertonen een continue trend van sedimentatie over de gehele periode met een waarde van +0.13 miljoen m³/jr. In totaal is hier 13.5 miljoen m³ aan sedimentatie opgetreden en deze sedimentatie lijkt zich onverminderd door te zetten.

Het kombergingsgebied Pinkegat bevat een relatief groot sublitoraal areaal (Figuur 4-10c). Gemiddeld bevat het bekken (exclusief kwelders) 36 km² aan litorale platen en 13.2 km² aan sublitoraal areaal. Het sublitoraal is wel sterk in omvang afgenomen. In 1926 was er nog 23 km² aanwezig, maar dit is afgenomen tot 11 km² in 2024. Door sedimentatie is waarschijnlijk een deel van het sublitoraal in hoogte toegenomen en overgegaan in het litoraal areaal. De afname van het sublitoraal vond vooral plaats tussen 1926-1994 (-0.18 km²/jr.), sindsdien blijft het areaal vrijwel gelijk (Figuur 4-10e). Op basis van een trendlijn over de periode 1994-2024 zou een kleine toename in areaal (+0.05 km²/jr.) zichtbaar zijn.

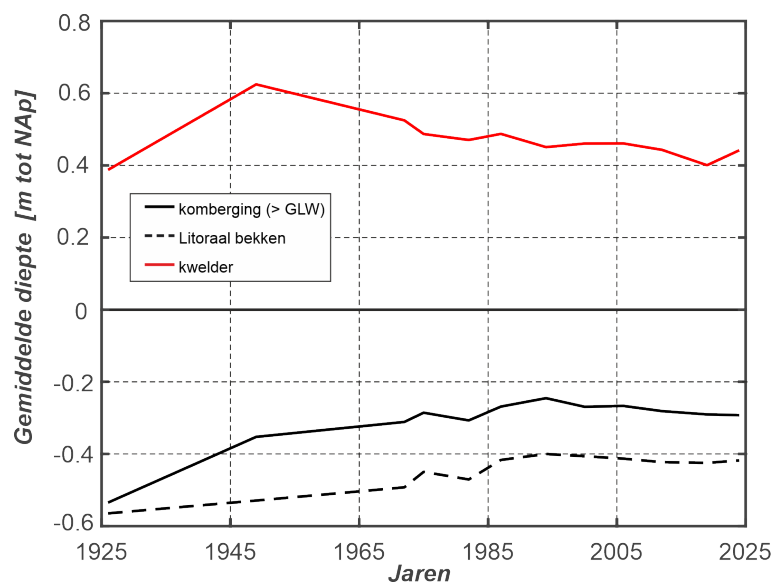
Doordat het sedimentvolume van het litoraal bepaald wordt t.o.v. -3 m NAP en het litoraal t.o.v. -1 m NAP is het totale sedimentvolume van het sublitoraal veel groter dan het sedimentvolume van het litoraal (Figuur 4-10d). Gemiddeld bevindt er zich 131 miljoen m³ sediment in het litoraal + sublitoraal, waarvan een 20% zich in de litorale zone bevindt en 80% in het sublitoraal. De tijdserie van verandering in sublitoraal sedimentvolume vertoont grote variaties door de verandering in omvang van het kombergingsgebied (Figuur 4-10f). Het huidige volume is 14 miljoen m³ groter dan in 1926.

De sublitorale zone van de geulen (aangegeven als sublitoraal 2 in Figuur 4-10f) laat zien dat het volume in deze zone juist afneemt tot 1994, maar sinds 1994 nemen de volumes weer iets toe (+0.09 miljoen m³/jr.). Dit geeft een gemiddelde stijging in hoogte van 2.5 mm/jr.

Met behulp van het volume en oppervlakte kan de gemiddelde dikte van het sedimentpakket t.o.v. het referentievlak worden uitgerekend (Figuur 4-9). Over het gehele kombergingsgebied gemiddeld bedraagt de hoogte van het litoraal (dus inclusief kwelders) -0.33 m NAP. De plaathoogte in 1926 lijkt niet geheel representatief. Tussen 1949 en 2024 is de plaathoogte toegenomen van -0.35 m NAP tot -0.29 m NAP. Dit is een gemiddelde toename van minder dan 1 mm/jr. De ontwikkeling vertoont eigenlijk een tweedeling in gedrag met sedimentatie (+2 mm/jr.) tussen 1949-1994 en erosie sinds 1994 (-1.5 mm/jr.).

De litorale platen in het bekken (exclusief kwelder) hebben een hoogte van gemiddeld -0.47 m. De plaathoogte is hier geleidelijk toegenomen van -0.56 m in NAP in 1926 tot -0.40 m in 1994 en sindsdien blijft de hoogte vrijwel stabiel.

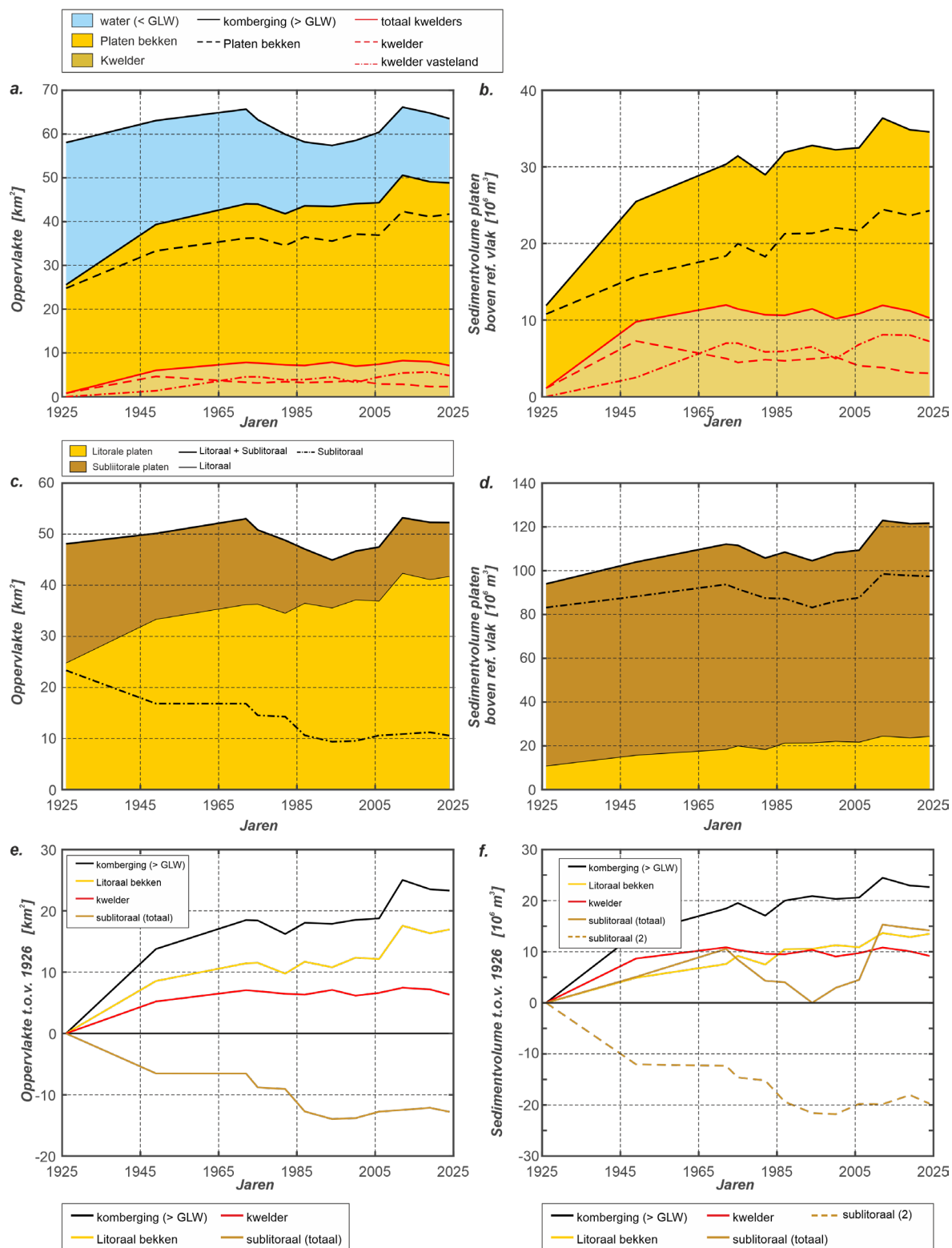
De analyse van de kwelders richt zich alleen op de periode na 1987, omdat de bodemkaarten ervoor ingevuld zijn met nieuwere data en geen representatief beeld geven. De gemiddelde hoogte van de kwelder tussen 1987 en 2024 bedraagt +0.45 m en is daarmee dan ook veel hoger dan de litorale platen in het bekken. Omdat volume en oppervlakte weinig verandering vertonen, blijft ook de kwelderhoogte relatief constant. Op basis van een trendlijn zou een kleine afname in hoogte geconstateerd kunnen worden van -1.6 mm/jr. Deze hoogteverandering ligt echter binnen de foutenmarge van de metingen.



Figuur 4-9: Overzicht van de gemiddelde diepte van het litoraal van het gehele kombergingsgebied (zwarte lijn) en onderverdeeld in kwelders (rood) en platen (streepjes lijn) binnen het bekken.

Tabel 4-3: Overzicht van het oppervlakte (A in km^2) en sedimentvolume (V in miljoen m^3) onder GLW (-1 m NAP) en gemiddelde plaathoogte (V/A in m t.o.v. NAP) van het kombergingsgebied van het Pinkegat.

Jaren	Oppervlakte platen [km^2]			Volume in [10^6 m^3]			Gem. hoogte [m tot NAP]		
	Komb.	Bekken	Kwelder	Komb.	Bekken	Kwelder	Komb.	Bekken	Kwelder
1926	25.56	24.76	0.80	11.89	10.78	1.11	-0.53	-0.56	0.39
1949	39.34	33.32	6.02	25.47	15.69	9.78	-0.35	-0.53	0.62
1972	44.05	36.20	7.85	30.34	18.37	11.97	-0.31	-0.49	0.52
1975	43.98	36.28	7.7	31.42	19.97	11.45	-0.29	-0.45	0.49
1982	41.79	34.52	7.27	28.96	18.27	10.69	-0.31	-0.47	0.47
1987	43.60	36.46	7.14	31.89	21.27	10.62	-0.27	-0.42	0.49
1994	43.45	35.55	7.9	32.79	21.33	11.46	-0.25	-0.40	0.45
2000	44.09	37.12	6.97	32.22	22.04	10.18	-0.27	-0.41	0.46
2006	44.32	36.90	7.42	32.50	21.66	10.84	-0.27	-0.41	0.46
2012	50.59	42.33	8.26	36.36	24.44	11.92	-0.28	-0.42	0.44
2019	49.08	41.09	7.99	34.83	23.64	11.19	-0.29	-0.42	0.40
2024	48.85	41.72	7.13	34.56	24.28	10.28	-0.29	-0.42	0.44
Gemiddeld	41.41	34.98	6.42	28.24	18.59	9.65	-0.33	-0.47	0.50



Figuur 4-10: Overzicht van (a) het oppervlakte van het kombergingsgebied Pinkegat onderverdeeld in water (< GLW) en platen en kwelders (> GLW). (b) Sedimentvolumes van platen en kwelders boven GLW (> -1m NAP). (c en d) Oppervlakte en sedimentvolume van de litorale en sublitorale platen in het bekken (exclusief kwelders). (e, f). Verschil in oppervlakte en sedimentvolume voor de verschillende gebieden. De volumeverandering van het totale sublitoraal bestaat voor een deel uit een verandering in oppervlakte en voor een deel uit een verandering in bodemhoogte. Het deel door bodemhoogteverandering is weergegeven als sublitoraal (2).

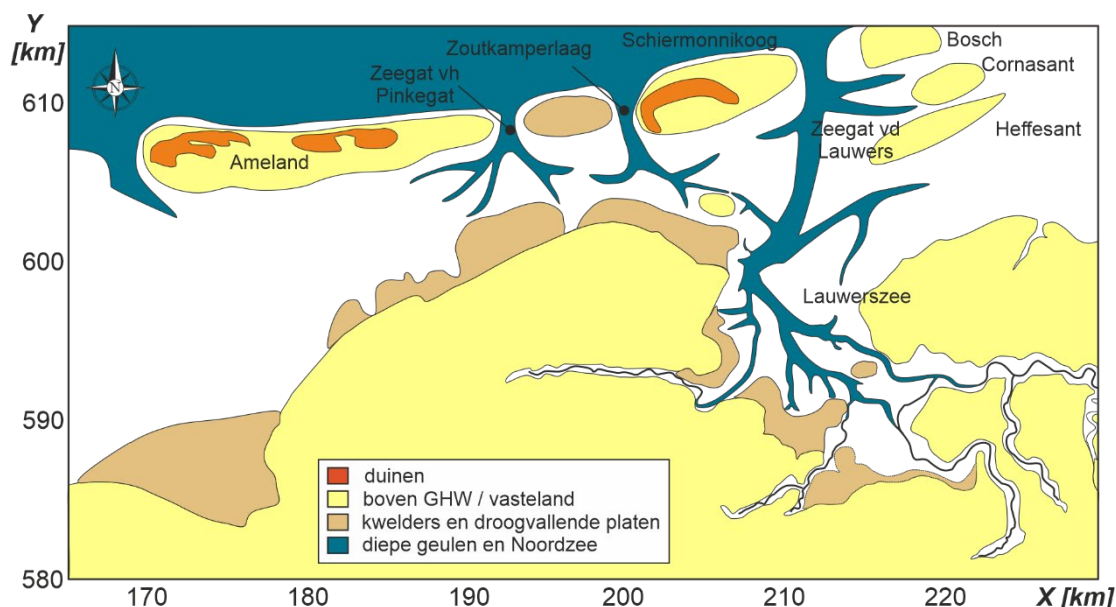
5 Morfologische analyse Zoutkamperlaag

In onderstaand hoofdstuk wordt de morfologie van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag geanalyseerd. Deze analyse bestaat uit 3 onderdelen. In hfdst. 5.1. wordt een beknopte beschrijving van de langetermijn en grootschalige ontwikkeling gegeven, gebaseerd op literatuur en hydrografische kaarten. De Vaklodingen worden gebruikt voor een analyse van het morfologische gedrag sinds 1927, waarbij de ontwikkeling voor en na afsluiting van de Lauwerszee wordt geanalyseerd. In hfdst. 5.2 worden de morfologische veranderingen kwantitatief beschouwd en in hfdst. 5.3 worden kwalitatieve analyses uitgevoerd, met een onderverdeling in: (1) de netto volumeverandering, (2). de volumeverandering van de geulen en (3). de veranderingen van de platen (het litoraal en sublitoraal).

5.1 Historische ontwikkeling Zoutkamperlaag

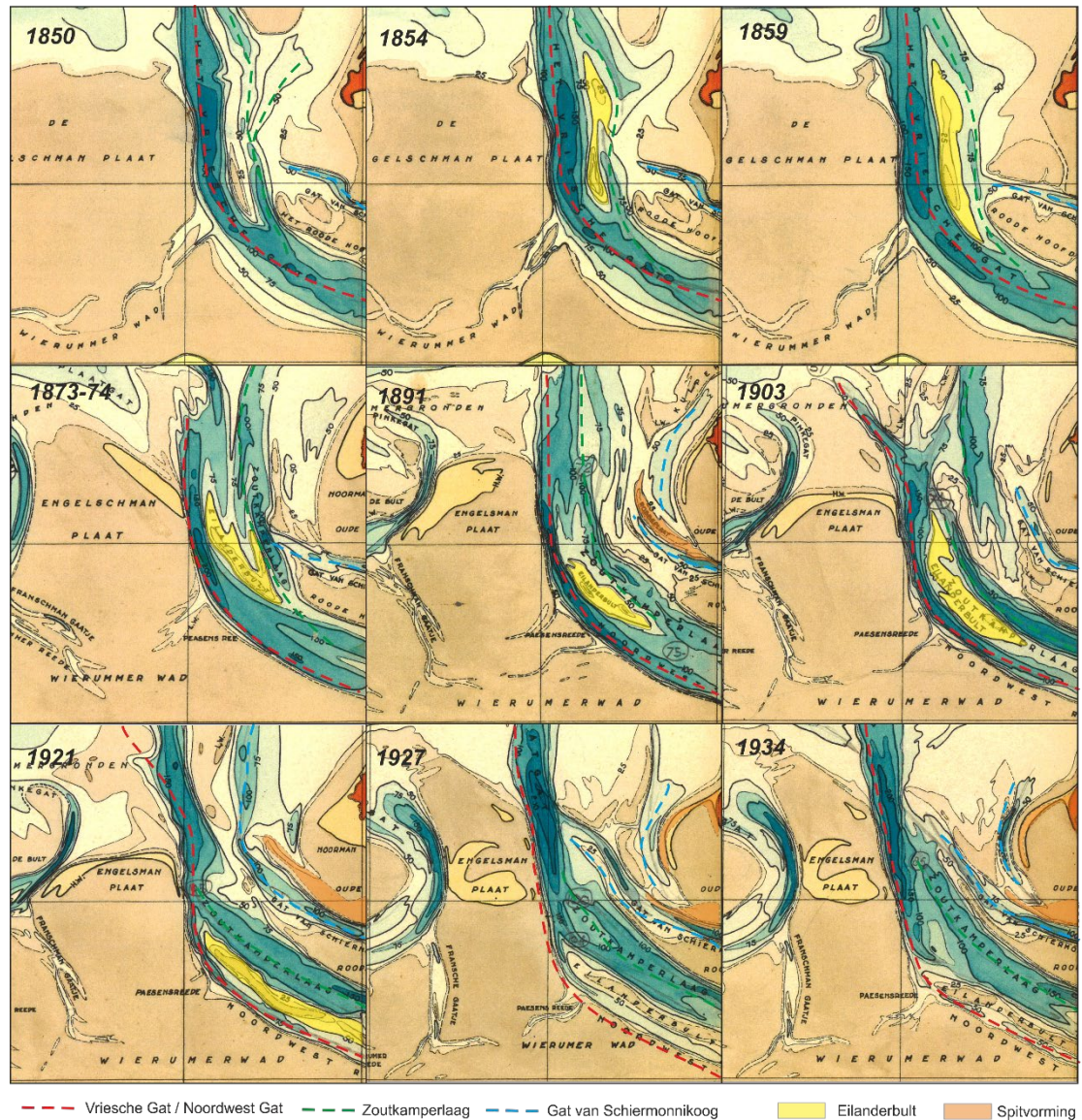
Een uitgebreide analyse van de historische kaarten van het Friese Zeegat is gegeven door Oost (1995) en Elias en Oost (2021). Dit hoofdstuk vat de belangrijkste inzichten uit deze 2 studies samen.

In de studie van Oost (1995) wordt geconcludeerd dat de karakteristieke Waddenzeekust met zeegaten en eilanden al rond 0 B.C. aanwezig was. Wel was de configuratie en vorm van de geulen, platen en eilanden anders dan in de huidige Waddenzee. Zo had de Lauwerszee rond 1300 A.D. nog een directe verbinding met het zeegat van de Lauwers en was de uitwisseling met de Zoutkamperlaag nog beperkt (Figuur 5-1). Een verbinding tussen de Lauwerszee en de Zoutkamperlaag is waarschijnlijk tussen 1350 - 1450 A.D. ontstaan. Rond 1556 verliest de Lauwers dan de verbinding met de Lauwerszee en vindt de afwatering nog uitsluitend plaats via de geulen van de Zoutkamperlaag, waardoor deze in omvang toenemen.



Figuur 5-1: Reconstructie van het Friese Zeegat en de Lauwerszee representatief voor ongeveer 1300 A.D. In deze kaart zijn het Pinkegat en de Zoutkamperlaag al zichtbaar als gescheiden zeegaten. Een belangrijk verschil met de huidige situatie is dat de Lauwerszee nog onderdeel vormt van het Lauwers-estuarium. Figuur is gebaseerd op de kaarten van Oost (1995).

Een eerste gedetailleerde kaart van een deel van het Friese Zeegat, waarop de dominante platen en geulen zichtbaar zijn, werd al in 1806 opgenomen (Appendix A.3.1). Ten opzichte van de situatie in 1300 A.D. was de Lauwerszee toen al flink ingepolderd. De hydrografische kaarten laten zien dat de huidige geul Zoutkamperlaag pas rond 1900 de hoofdgeul in het zeegat werd. Voor die tijd was de hoofdgeul het Vriesche Gat (zie samenvatting van de ontwikkeling in Figuur 5-2). Deze ontwikkeling is hier opgenomen, omdat het ontstaan van 2 parallelle geulen in de keel van het zeegat ook in de huidige bodem zichtbaar is. Hoe dit zich in de toekomst gaat doorzetten, is nog niet direct duidelijk. In de studie van Meijers et al. (2024) wordt de mogelijkheid geschetst dat het Binnenplaatgat een deel van het getijvolume van de Zoutkamperlaag overneemt en de komberging dan draineert door 2 grotere geulen i.p.v. alleen de Zoutkamperlaag.



— — — Vriesche Gat / Noordwest Gat — — — Zoutkamperlaag — — — Gat van Schiermonnikoog Eilanderbult Spitvorming

Figuur 5-2: Ontwikkeling van de keel van de Zoutkamperlaag in de periode 1850-1934 op basis van de hydrografische kaarten (Bron: Elias en Oost, 2021). De stippellijnen geven de geulliggingen van Vriesche Gat (rood), Zoutkamperlaag (groen) en Gat van Schiermonnikoog (blauw) weer. De gele polygonen geven het bankengebied Eilanderbult weer. In 1850 vormde Het Vriesche Gat nog de hoofdgeul. Daarnaast zijn er nog 2 kleinere geulen zichtbaar. De Zoutkamperlaaggeul is een ondiepe geul die voornamelijk zichtbaar is op de buitendelta en gescheiden is van Het Vriesche Gat door een ondiepe rug. Direct langs de eilandkop van Schiermonnikoog is nog een 3de kleine geul (Gat van Schiermonnikoog zichtbaar). In de volgende bodemkaarten neemt de Zoutkamperlaag in omvang toe en groeit deze in zuidelijke richting. De tussenliggende

rug (de Eilanderbult) vormt een scheiding met Het Vriesche Gat, maar verplaatst ook in zuidwestelijke richting. Hierdoor wordt Het Vriesche Gat verdrukt en verkleint de geuldoorsnede. Het Vriesche Gat kan nauwelijks westelijk bewegen, omdat het vastligt tegen de Engelsmansplaat, die beneden de -5 m NAP uit massieve mariene klei bestaat, waardoor deze geul nauwelijks westwaarts kan migreren. Het Vriesche Gat wordt sinds 1891 Noordwestgat genoemd en blijft nog langere tijd zichtbaar (1891-1927), maar blijft wel sterk verkleinen. In de 1934-bodem is het Noordwestgat al bijna niet meer terug te zien. De Zoutkamperlaag is dan nog de enige hoofdgeul in de keel van het zeegat. Het diepe deel van de Zoutkamperlaaggeul ligt hierbij wel verder oostwaarts dan het Vriesche Gat.

5.2 Bodemhoogte en veranderingen vóór en ná afsluiting van de Lauwerszee

Ook voor afsluiting van de Lauwerszee zien we dat het bekken van de Lauwerszee al verkleint. De Lauwerszee slibde in de periode 1927 – 1966/67 geleidelijk op, waarbij van tijd tot tijd inpoldering volgde. In deze periode werd ongeveer 17 miljoen m³ sediment afgezet. De sedimentatie-erosiekaarten worden echter gedomineerd door geulverplaatsingen (Figuur 5-3 en Figuur 5-4). Het opvullen van het Noordwestgat is duidelijk te zien als een langgerekte band van sedimentatie en er zijn bij de eilandkop van Schiermonnikoog grote geulverplaatsingen zichtbaar. In het ondiepere deel van het bekken zijn de verschillen kleiner. De platen vertonen over het algemeen weinig hoogteverandering. Kleinere aangrenzende gebieden van sedimentatie en erosie geven ook hier geuldynamiek weer.

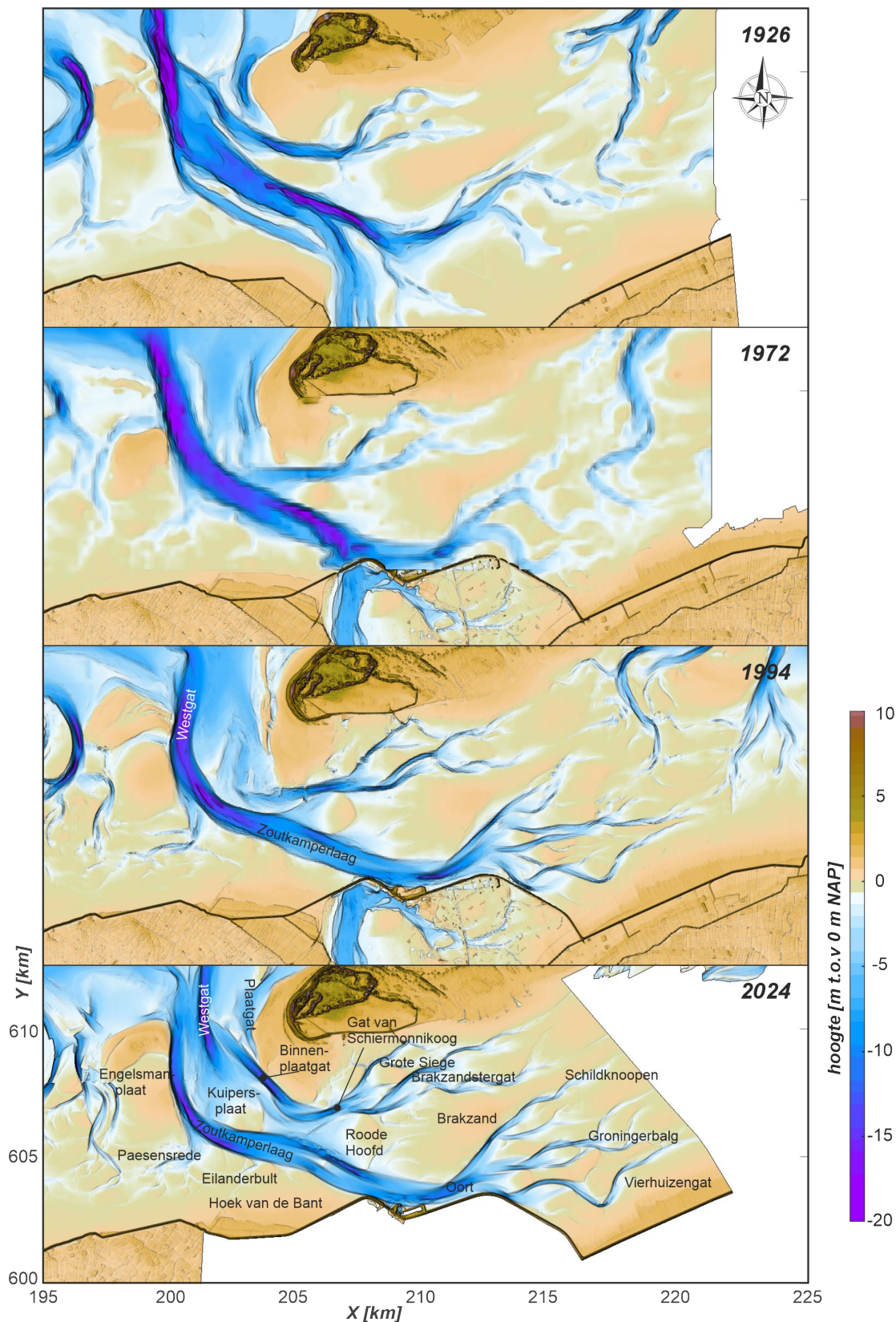
De grote invloed van de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 is wel bekend (zie o.a. Biegel en Hoekstra, 1995; Oost en de Haas, 1992; Oost, 1995). Na afsluiting vonden er grote veranderingen in zowel het kombergingsgebied als het zeegat plaats. De afsluiting verkleinde het bekkenoppervlak met ongeveer 30%, waardoor het getijprisma sterk afnam. De schattingen van de grootte van de afname van getijprima variëren in de verschillende studies. Van Sijp (1989a) geeft een afname van 28%, van 305 miljoen m³ naar 200 miljoen m³, terwijl Postma en Reenders (1986) aangeven dat het prisma afneemt van 350 miljoen m³ naar 200 miljoen m³ (- 43%). Deze grote afname in getijprisma was mede verantwoordelijk voor de geobserveerde morfologische veranderingen; het zeegat tracht een nieuw morfologisch evenwicht te vormen met het verkleinde prisma. De invloed van de afsluiting van de Lauwerszee is duidelijk zichtbaar in de bodemkaarten sinds 1972 (Figuur 5-3). De veranderingen in het kombergingsgebied ten oosten van de Zoutkamperlaag zijn groter dan ten westen ervan, maar wel veel kleiner dan in het zeegat en op de buitendelta. Er is een sterke sedimentatie zichtbaar in en langs de westzijde van de Zoutkamperlaag. Hier sedimenteren de Eilanderbult en Hoek van de Bant. In het oostelijk deel van de komberging valt de erosie van de geulen op. De geul Oort en de vertakkingen Schildknoopen, Groningerbalg en Vierhuizengat nemen in lengte en diepte toe (Figuur 5-4, 1972-1994). Dit zorgt er ook voor dat het wantij oostelijk verplaatst.

Na deze initiële eerste aanpassing zijn de veranderingen weer kleiner en het wantij trekt zich weer iets terug (Figuur 5-4, 1994-2024). De grootste veranderingen in bodemhoogte vinden plaats in de keel van het zeegat. Dit komt door een verandering en uitschuren van de geulen. De Zoutkamperlaag zelf vertoont met name gebieden met aanzanding in het centrale deel en de Zoutkamperlaag lijkt hierbij iets uit te bochten. De geul verplaatst iets westelijk, wat een erosie van de aanliggende bank en Engelsmanplaat geeft. Door de steile geulwand geeft een kleine verplaatsing direct een grote verandering in bodemhoogte. Daarnaast splitst de voorheen enkele geul in het zeegat eigenlijk in een westelijk en oostelijk deel, gescheiden door een langgerekte bank die zichtbaar is als het sedimentatiegebied. Geulontwikkeling treedt ook op langs de zuidwestzijde van de eilandkop van Schiermonnikoog, waar het Binnenplaatgat in omvang en diepte toeneemt (zie Meijers et al. 2024 voor details).

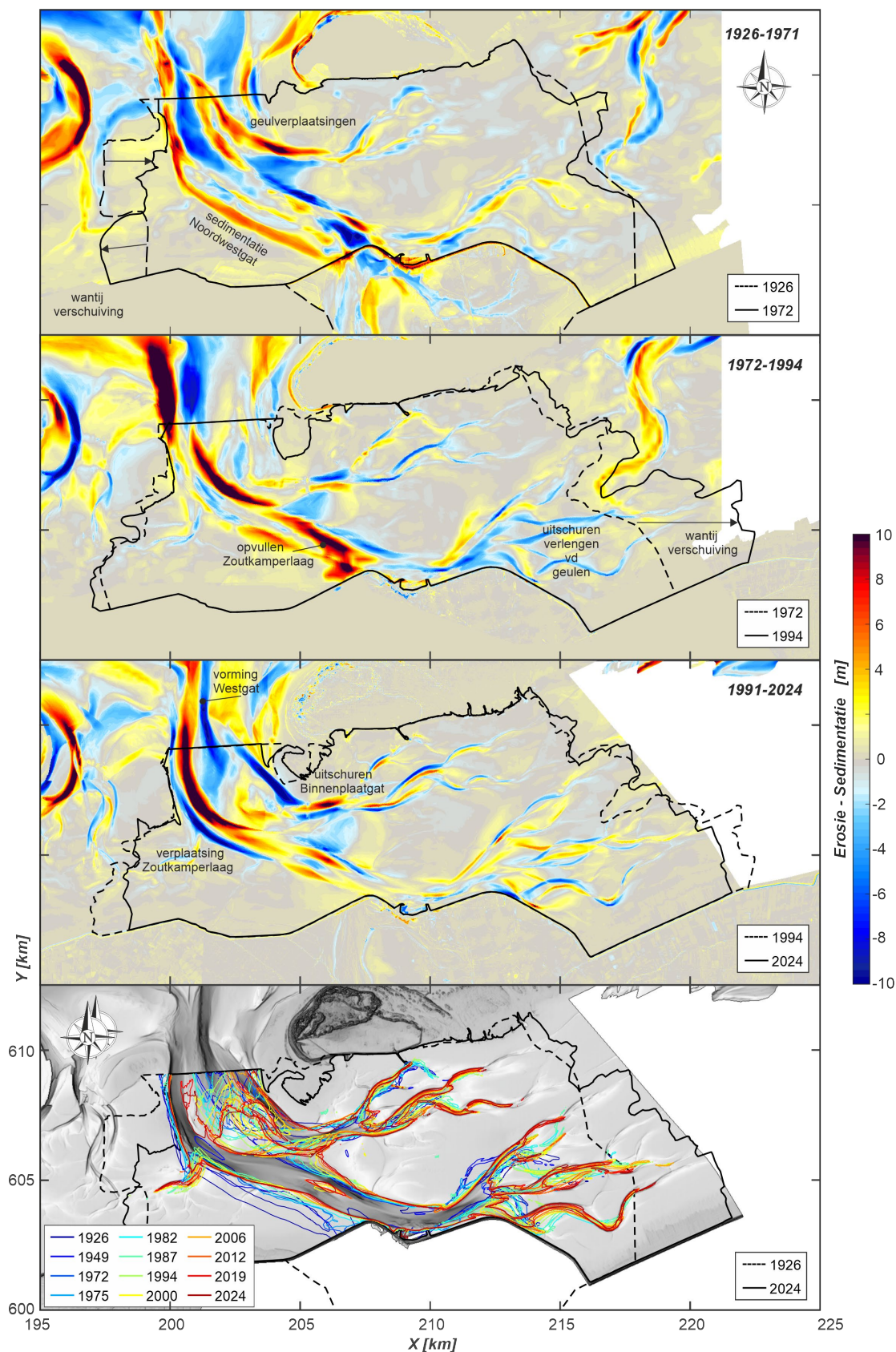
Ook de Kuipersplaat neemt duidelijk in hoogte toe. Het Roode Hoofd heeft een duidelijke trend van erosie, waarbij de plaat ook iets oostelijk verplaatst richting het Brakzand. Het platengebied van Brakzand vertoont vrijwel geen verandering in hoogte. De geulen ten noorden ervan (Gat van Schiermonnikoog, Groote Siege, Brakzandsergat) laten vooral afwisselende patronen van sedimentatie en erosie zien, wat duidt op geulverplaatsing. In de periode ervoor was er juist nog een overheersende erosieve trend door geulverruiming en verlenging. Ook de geulen ten zuiden van het Brakzand (Oort, Schildknoopen, Groningerbalg) vertonen trends van verplaatsing. Wel lijken hier de gebieden van sedimentatie groter te zijn dan de gebieden van erosie. Met name de oostelijke uitlopers van de geulen richting het wantij lijken op te vullen. Het Vierhuizengat lijkt hier een uitzondering te vormen. Deze geul heeft zich juist ontwikkeld en is verdiept.

Het platengebied onder de Engelsmansplaat vertoont slechts kleine veranderingen. Kleinschalige geuldynamiek is zichtbaar, waarbij sedimentatie van de geulen (Paessensrede) lijkt te overheersen. De grote aanzanding langs de oostzijde van de Eilanderbult, dat het beeld tot 1994 overheerste, is nu veel kleiner. Alleen de oostzijde van de Eilanderbut/Hoek van de Bant lijkt zich nog iets oostelijk uit te bouwen, de Zoutkamperlaag in. Een duidelijk verschil tussen de periode 1971-1994 en 1994-2024 is de tegenovergestelde wantijverplaatsing.

De hypsometrische curven (Appendix E.1) illustreren duidelijk de opvulling van de diepe geulen. Het areaal tussen NAP -2 m en -15 m was voor afsluiting tot 5 km² groter dan na afsluiting. Vanaf 2000 zijn de veranderingen al veel kleiner dan ervoor. De bulk van de aanpassing naar een nieuw evenwicht lijkt dan al gebeurd. Het areaal boven de 0 m NAP is toegenomen. Een maximum werd hier bereikt in 1994 en sindsdien is het areaal juist weer iets afgenomen tot de huidige waarde. Waarschijnlijk speelt hier het gebruik van AHN voor invulling van missende kwelderdata wel een rol.



Figuur 5-3: Representatieve bodemkaarten van de Zoutkamperlaag voor de jaren 1926, 1972, 1994 en 2024.



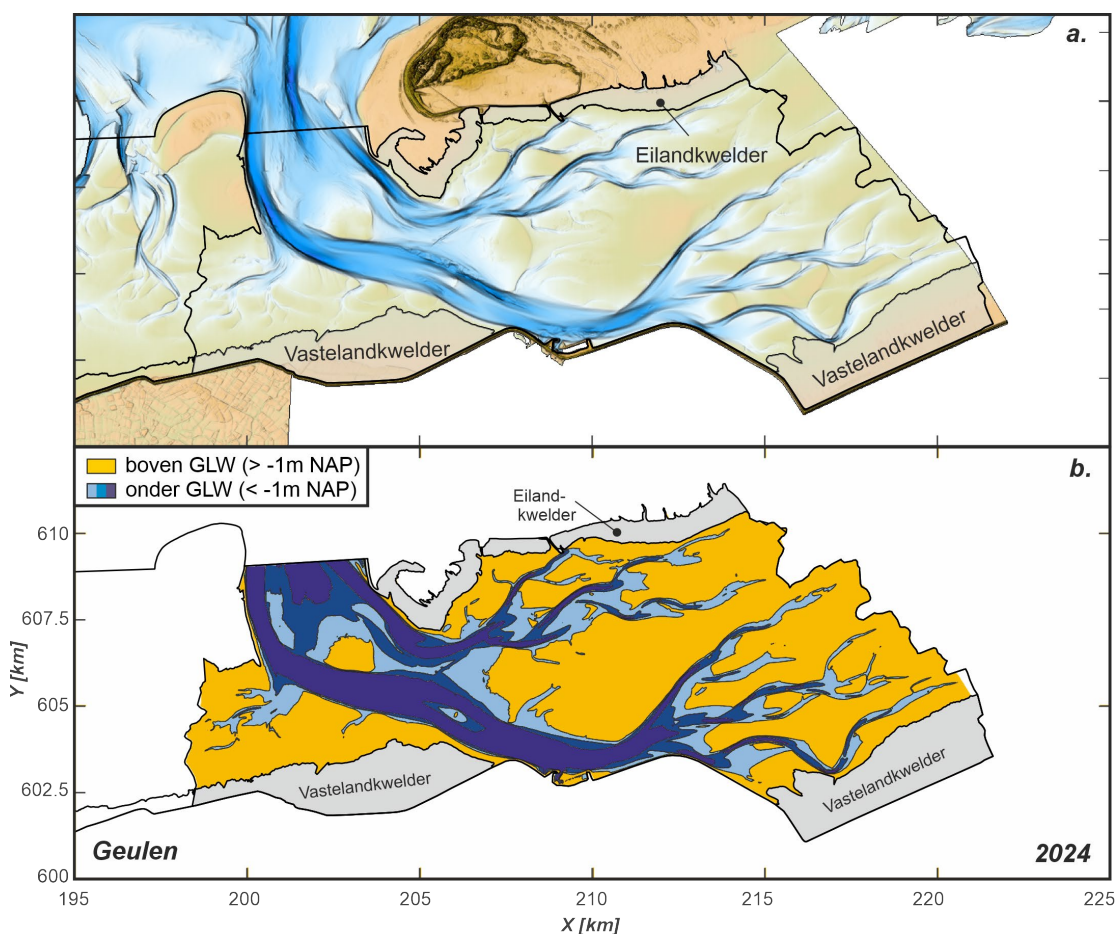
Figuur 5-4: Sedimentatie – erosiepatronen voor de periode 1926-1972, 1972-1994 en 1994-2024. Onderste deelfiguur geeft de ligging van de hoofdgeul weer tussen 1926 en 2024 op basis van de NAP – 3 m contour.

5.3 Verandering in volume en oppervlakte

5.3.1 Sedimentvolume van het kombergingsgebied, bekken en kwelder

De afbakening van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag is gebaseerd op de wantijligging en begrenzing zoals beschreven in hfdst. 2. Ook hier is in de berekening van sedimentvolume en oppervlakte een onderscheid gemaakt tussen de kwelders en het bekken (Figuur 5-5a,b). Het gemiddelde oppervlakte inclusief kwelder bedraagt 141 km², waarvan 17% uit kwelder bestaat en 83% uit bekken. Het oppervlakte van het bekken ligt voor het merendeel, 65%, hoger dan het gemiddeld laag water en een kleiner deel onder GLW (35%).

Bij de bepaling van volumes en oppervlakte is de Lauwerszee niet meegenomen in de analyse. De bodemkaarten van 1926 en 1949 zijn begrensd op de huidige ligging van de waddendijk en de afsluitdijk van het Lauwersmeer. Deze landwaartse grens ligt dus vast voor alle bodemkaarten.



Figuur 5-5a,b: Overzicht van de afbakening en referentievlakken voor de volume- en areaalberekening van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag op basis van de 2024-bodem. De afbakening en begrenzing van de kwelders zijn weergegeven met de getrokken lijnen.

Volume en oppervlakte

Een overzicht van de ontwikkeling in volume en oppervlakte is samengevat in Figuur 5-6 en Tabel 5-1. De sedimentvolumes vertonen een grote toename van 58 miljoen m³ sinds 1926, waarvan 14 miljoen m³ in de kwelders.

Voor afsluiting van de Lauwerszee is er al een netto sedimentatie zichtbaar (+ 17 miljoen m³), dit is een gemiddelde sedimentatie van +0.38 miljoen m³/jr. De sedimentatie neemt direct na afsluiting sterk toe. Tussen 1972-1982 treedt er 24 miljoen m³ (+2.15 miljoen m³/jr.) aan sedimentatie op. Ook na 1982 blijven de volumes toenemen, maar wel met een lagere sedimentatiesnelheid (+0.41 miljoen m³/jr.), wat resulteert in een volumetoename van 17 miljoen m³. Alhoewel de laatste meting een afname in volume geeft, lijkt de trend van +0.4 miljoen m³/jr. representatief voor het huidige gedrag.

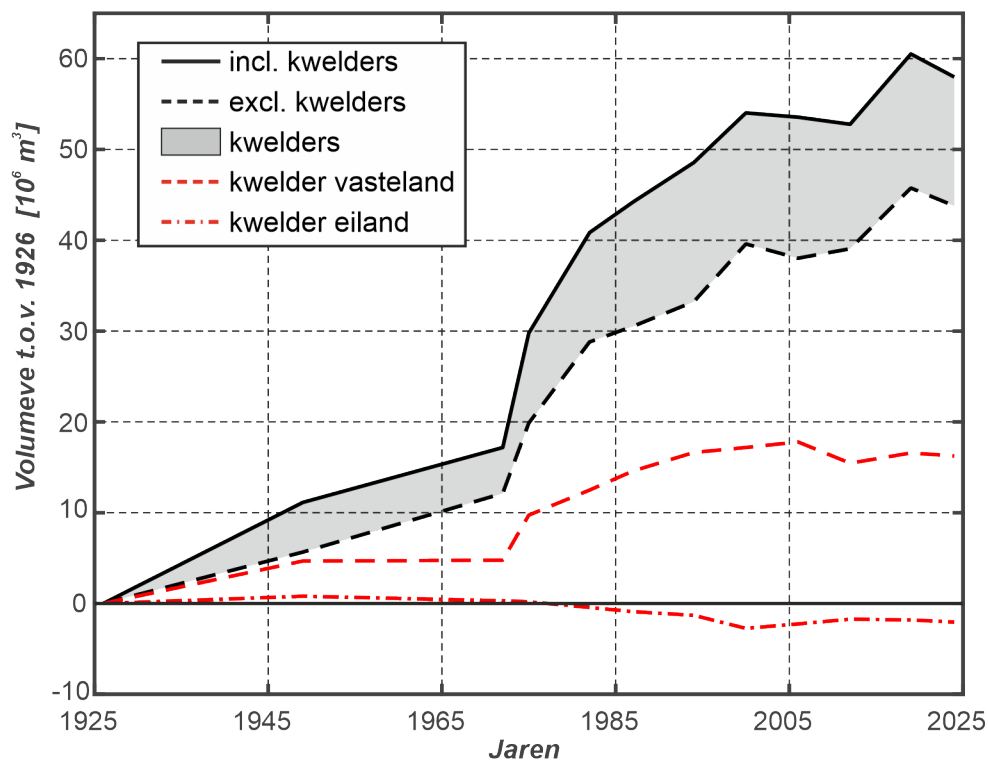
Het oppervlakte van het kombergingsgebied blijft in de periode 1926-1972 vrijwel stabiel en beslaat dan ongeveer 130 km² exclusief Lauwerszee en rond de 225 km² inclusief Lauwerszee. Na afsluiting van de Lauwerszee neemt het oppervlakte toe met 17.5 km² in de periode 1972-1994. In 1994 wordt een maximale omvang bereikt van 150.5 km². Het oppervlakte neemt eerst met 4.5 km² af naar 147 km² in 2000. Sinds 2000 vindt dan een kleine afname in oppervlakte plaats met een trendwaarde van -0.04 km²/jr. Deze waarde is ook representatief voor de huidige ontwikkeling.

Het oppervlakte en volume van de kwelders zijn initieel ook toegenomen, maar blijven sinds 1989 vrijwel stabiel. In totaal is er dan 16 miljoen m³ aan sedimentatie in de kwelder opgetreden. De schatting voor de huidige trend is 0 miljoen m³/jr. Het oppervlakte van de kwelder is toegenomen van 13 km² in 1926 tot een maximum omvang van 31 km² in 2006. Sinds 2006 neemt het oppervlakte weer met 6 km² af (-0.1 km²). Deze recente afname is vooral in de vastelandkwelder zichtbaar. De eilandkwelder nam tot 2000 juist in omvang af (-6 km²) en blijft dan relatief stabiel.

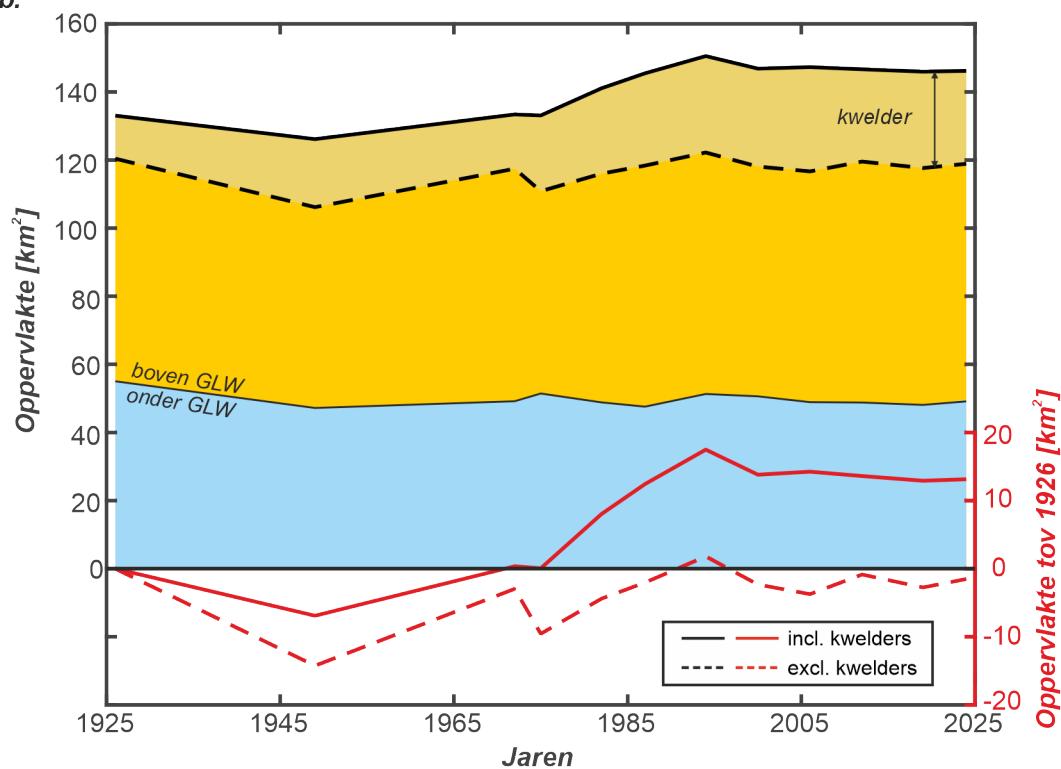
Tabel 5-1: Overzicht van het oppervlakte en de volumeverandering van het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag. Zie ook Figuur 5-6.

Jaren	Oppervlakte [km ²] incl. kwelder			Opp. [km ²] kwelder	Volume t.o.v. 1926 [10 ⁶ m ³]		
	Totaal	< GLW	> GLW		Incl. kwelder	Excl. kwelder	kwelder
1926	133.07	55.03	78.04	12.7	0	0	0
1949	126.16	47.19	78.97	20.06	11.14	5.66	5.48
1972	133.41	49.17	84.24	16.01	17.18	12.12	5.06
1975	133.12	51.44	81.68	22.32	29.78	19.86	9.92
1982	141.09	48.83	92.26	25.16	40.85	28.8	12.05
1987	145.51	47.58	97.93	27.31	44.21	30.52	13.69
1994	150.54	51.3	99.24	28.47	48.56	33.23	15.33
2000	146.86	50.61	96.25	28.92	54.03	39.59	14.44
2006	147.50	48.9	98.60	30.72	53.56	38.02	15.54
2012	146.67	48.79	97.88	27.22	52.78	39.06	13.72
2019	145.97	48.09	97.88	28.36	60.52	45.75	14.77
2024	146.18	49.13	97.05	27.43	57.98	43.78	14.2
Gemiddeld	141.34	49.67	91.67	24.56	-		-

a.



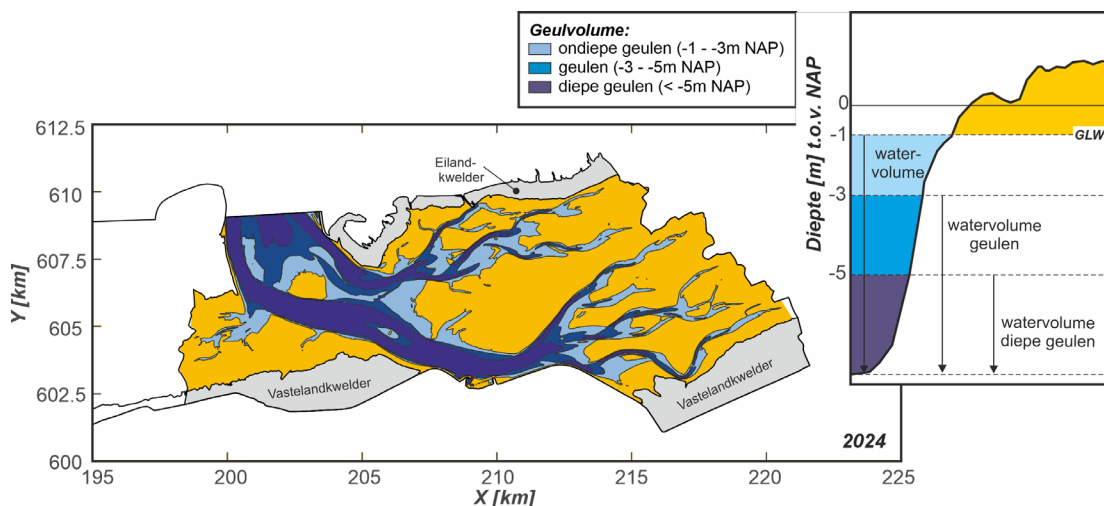
b.



Figuur 5-6: Overzicht van de verandering in (a) volume en (b) oppervlakte en verandering in oppervlakte t.o.v. 1926 voor het totale bekken incl. en excl. kwelder.

5.3.2 Analyse van de geulvolumes en arealen

In de berekening van de geulvolumes zijn verschillende referentievlakken gebruikt om een volledig beeld te verkrijgen (Figuur 5-7). De totale watervolumes van het kombergingsgebied zijn gebaseerd op GLW (NAP -1 m). De geulen en diepe geulen zijn gebaseerd op de NAP -3 m en -5 m contouren. Duidelijk zichtbaar in de 2024-bodemligging is dat het centrale deel van Zoutkamerplaag relatief diep is en dat de ondiepe gebieden zich ten westen en oosten ervan bevinden (Figuur 5-7). Gemiddeld over het gehele kombergingsgebied bevindt 35% van het bekken zich onder GLW, waarvan 19% als geul (<-3 m NAP) geclassificeerd is en 12% als diepe geul (< -5 m NAP).



Figuur 5-7: Overzicht van de afbakening en referentievlakken voor de geulvolume- en oppervlakteberekening van de Zoutkamerplaag.

Het totale watervolume onder GLW bedraagt 205 miljoen m³ in 1926 en neemt af tot 163 miljoen m³ in de meest recente meting (-41 miljoen m³). Dit betekent dat er 41 miljoen m³ aan sedimentatie is opgetreden (Figuur 5-8a,b). Direct na afsluiting zijn de grootste sedimentatiesnelheden zichtbaar (+1.75 miljoen m³/jr.) en de sedimentatie neemt af tot +0.36 miljoen m³/jr. over de periode 1982-2024. Het merendeel van deze sedimentatie heeft in de diepe geulen plaatsgevonden (+ 40 miljoen m³); die zijn dan ook sterk in omvang afgenomen (- 19 km²).

Het oppervlakte onder GLW vertoont sinds 1949 weinig verandering over de tijdseries (Figuur 5-8c, d). Met uitzondering van de 1926 waarde ligt het gemiddelde areaal onder GLW op 50 km². Er zijn wel variaties zichtbaar in de tijdserie, maar een respons in areaal door afsluiting van de Lauwerszee is hierin niet direct zichtbaar.

De geulen op basis van de -3 m NAP vertonen initieel een kleine afname tussen 1926-1949, maar sinds 1949 zijn de geulen met 1.7 km² in oppervlakte toegenomen. Een trend over de periode 1975-2024 lijkt representatief voor het huidige gedrag en geeft een toename in geulareaal van +0.04 km²/jr.

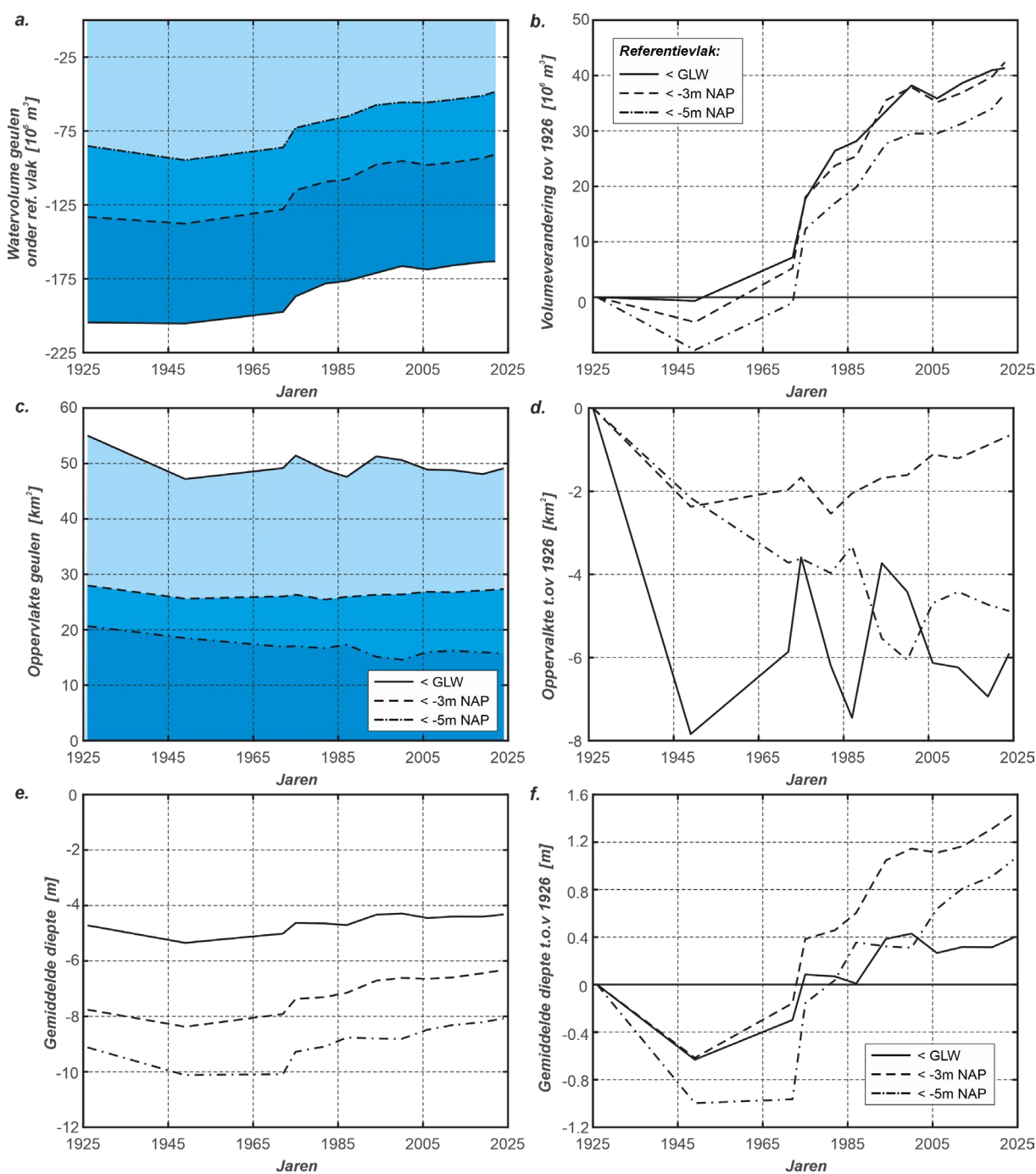
De diepe geulen vertonen een continue trend van afname. Over de gehele periode is het areaal met bijna -5 km² afgenomen (-0.05 km²/jr.). Ook in deze tijdserie is een directe respons op afsluiting van de Lauwerszee niet te observeren. De afname sinds afsluiting (1971-2024) is met een trendwaarde van -0.025 km²/jr. ongeveer de helft kleiner dan de langetermijntrend. Waarschijnlijk spelen de nauwkeurigheid van de oude metingen en de grote fluctuaties die zichtbaar zijn in de tijdserie na afsluiting een rol in deze afwijkende trendwaarden.

Op basis van de geobserveerde verandering in volume en oppervlakte kan ook de gemiddelde diepte en verandering hierin berekend worden (Figuur 5-8e,f). Deze tijdseries vertonen een overeenkomstige afnemende diepte voor alle referentievlakken na afsluiting. Het totale bekken onder GLW neemt in totaal met 0.31 m in diepte af. Een trendwaarde sinds 1949 geeft een gemiddelde afname van 13 mm/jr. Deze langetermijntrend lijkt niet geheel representatief voor het huidige gedrag. Een trendlijn over de periode 1975-2024 lijkt hier meer representatief en heeft een waarde van 7 mm/jr.

De afname van de geulen en diepe geulen is met -1.1 tot -1.2 m nog veel groter. Een trendlijn sinds 1975 geeft hier een opvulsnelheid van 22-24 mm/jr., waarbij het opvullen van de geulen zich ook in de recente jaren nog onverminderd door lijkt te zetten.

Tabel 5-2: Overzicht van het oppervlakte (*A* in km²) en watervolume (*V* in miljoen m³) en gemiddelde diepte (*V/A*) van het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag. Zie ook Figuur 5-8.

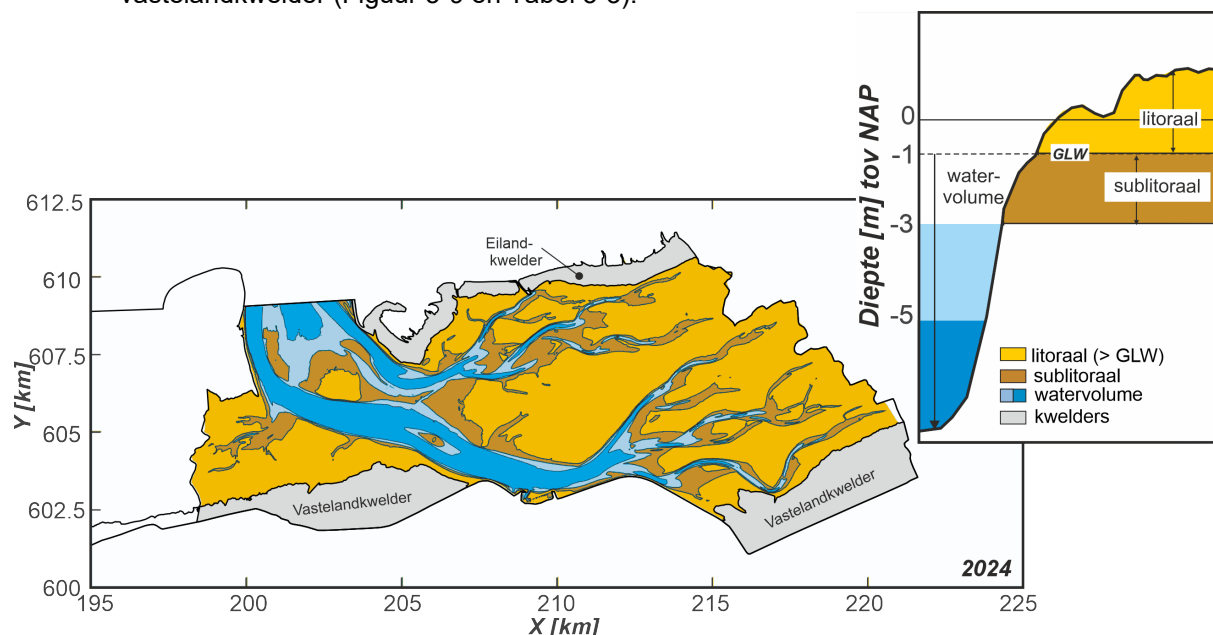
Jaren	Oppervlakte water [km²]			Volume in [10⁶ m³]			Diepte [m]		
	< -1m	< -3m	< -5m	< -1m	< -3m	< -5m	< -1m	< -3m	< -5m
1926	55.03	27.99	20.66	-281.64	-204.64	-133.23	-4.72	-7.76	-9.12
1949	47.19	25.62	18.50	-272.52	-205.29	-137.74	-5.35	-8.38	-10.12
1972	49.17	26.03	16.94	-271.41	-197.46	-127.98	-5.02	-7.92	-10.09
1975	51.44	26.32	17.04	-259.5	-186.90	-115.17	-4.63	-7.38	-9.28
1982	48.83	25.45	16.69	-251.12	-178.21	-109.47	-4.65	-7.30	-9.09
1987	47.58	25.94	17.34	-248.16	-176.50	-107.79	-4.71	-7.16	-8.77
1994	51.30	26.31	15.12	-246.21	-171.05	-97.69	-4.33	-6.71	-8.80
2000	50.61	26.38	14.60	-240.04	-166.43	-95.36	-4.29	-6.61	-8.81
2006	48.90	26.87	15.97	-241.17	-168.79	-98.05	-4.45	-6.65	-8.49
2012	48.79	26.78	16.24	-239.76	-165.98	-96.3	-4.40	-6.60	-8.31
2019	48.09	27.10	15.93	-233.98	-163.68	-93.42	-4.40	-6.45	-8.21
2024	49.13	27.33	15.78	-235.51	-163.32	-90.83	-4.32	-6.32	-8.07
Gemiddeld	49.67	26.51	16.73	-251.75	-179.02	-108.59	-4.61	-7.10	-8.93



Figuur 5-8: Overzicht van de ontwikkeling van de watervolumes t.o.v. de referentievlakken GLW (-1 m NAP), -3 m NAP (geulen) en -5 m NAP (diepe geulen). (a) Totale watervolume t.o.v. referentievlak en (b) verandering in sedimentvolume t.o.v. 1926, (c) Totale oppervlakte en (d) verandering in oppervlakte t.o.v. 1926, (e) Gemiddelde diepte en (f) verandering in gemiddelde diepte t.o.v. 1926.

5.3.3 Litorale en sublitorale platen en kwelders

De sedimentvolumes van de platen zijn bepaald voor een diep (-3 m NAP) en een ondiep referentievlak (-1 m NAP, Figuur 5-9), waarbij onderscheid gemaakt is tussen de totale volumeverandering van het gehele kombergingsgebied (inclusief kwelders) en van het bekken (exclusief kwelders). Van het totale kombergingsoppervlakte bestaat gemiddeld 65% uit litorale platen en kwelder hoger dan GLW en 35% ligt lager dan GLW. De kwelders vormen 37% van het litoraal en bestaan voor 13% uit de eilandkwelder en 23% uit de vastelandkwelder (Figuur 5-9 en Tabel 5-3).



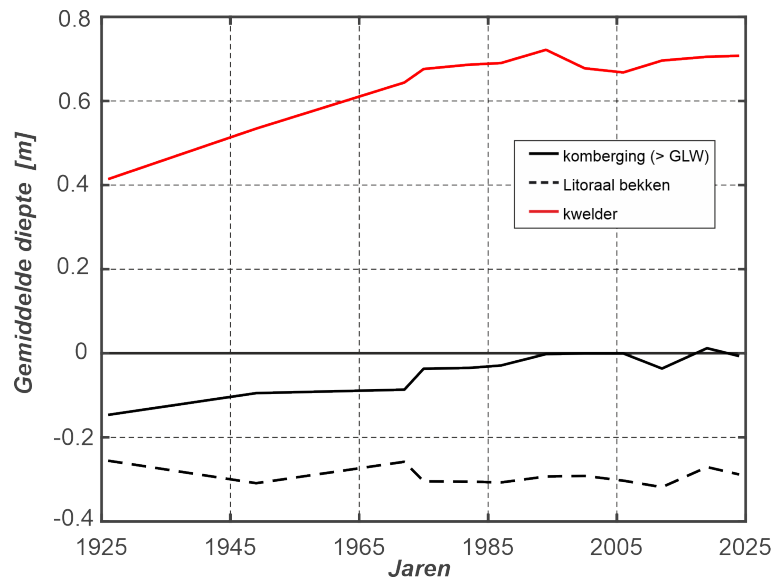
Figuur 5-9: Afbakening van de litorale en sublitorale platen (links) en overzicht van de ligging op basis van de 2024-opname van de Zoutkamperlaag. Grijs vlakken geven de afbakening van de kweldergebieden weer, met de -1 m contour als afbakening tussen kwelder en bekken.

Het plaat-kwelderoppervlak is sterk toegenomen van 78 km² in 1926 tot 97 km² in 2024, dit is een toename van 19 km² (Figuur 5-11c,d). De tijdserie van oppervlakteontwikkeling laat een duidelijke driedeling in gedrag zien. Vóór afsluiting van de Lauwerszee blijft het oppervlakte relatief stabiel rond de 80 km². Ná afsluiting volgt een periode van groei (1972-1994), waarna het oppervlakte stabiliseert rond de 98 km². Een klein deel van deze toename vindt plaats in het bekken zelf, maar het merendeel vindt plaats in de vastelandkwelder (Figuur 5-11e). Dit hangt wel samen met de gehanteerde definitie van de kwelderrand op 0 m NAP. Omdat de vastelandkwelder zich over de gehele lengte van het kombergingsgebied uitstrekt, geeft een kleine verplaatsing van deze rand al relatief grote veranderingen in oppervlakte.

Het sedimentvolume van het litoraal van het gehele kombergingsgebied neemt toe met 30 miljoen m³ (Figuur 5-11f). Gemiddeld nemen de volumes met +0.38 miljoen m³/jr. toe, maar dit is geen representatieve trend voor het huidige gedrag. Een kleine toename is al zichtbaar voor afsluiting (+ 7 miljoen m³), maar een grote sprong vindt plaats direct na afsluiting met een toename in volume van 18 miljoen m³ tussen 1971 en 1994. De volumeveranderingen sinds 1994 zijn veel kleiner. Op basis van een trendlijn zou het litoraal (incl. kwelders) dan een kleine negatieve trend (-0.04 miljoen m³/jr.) vertonen. Er kan ook geconcludeerd worden dat het merendeel van de netto volumeverandering van het litoraal plaatsvindt in de (vasteland)kwelder (Figuur 5-11f). De veranderingen in volume van het litoraal en sublitoraal in het bekken, buiten de kwelder, zijn beperkt. Het sublitoraal vertoont een grote variatie in de tijd, maar weinig nettoverandering. De variaties hangen samen met de wintjeverplaatsingen. De volumeverandering van het subtidale geuldeel is klein (zie litoraal 2 in Figuur 5-11f).

Met behulp van het volume en oppervlakte kan de gemiddelde dikte van het sedimentpakket t.o.v. het referentievlak uitgerekend worden of een gemiddelde hoogte t.o.v. NAP (Figuur 5-10). Gemiddeld neemt de hoogte van het litoraal van het gehele kombergingsgebied toe met 14 cm. Dit is een gemiddelde toename van 1.5 mm/jr. In 1971 is een kleine sprong in hoogte te zien (+ 5 cm) na afsluiting. Een trendlijn na deze sprong geeft een toename in hoogte van 0.7 mm/jr. De kwelders nemen sterk in hoogte toe van 0.41 m in 1926 tot 0.70 m direct na afsluiting. Deze gemiddelde hoogte blijft daarna dan vrijwel stabiel. Op basis van de lineaire trendlijn zou een toename in hoogte van 0.4 mm/jr. optreden.

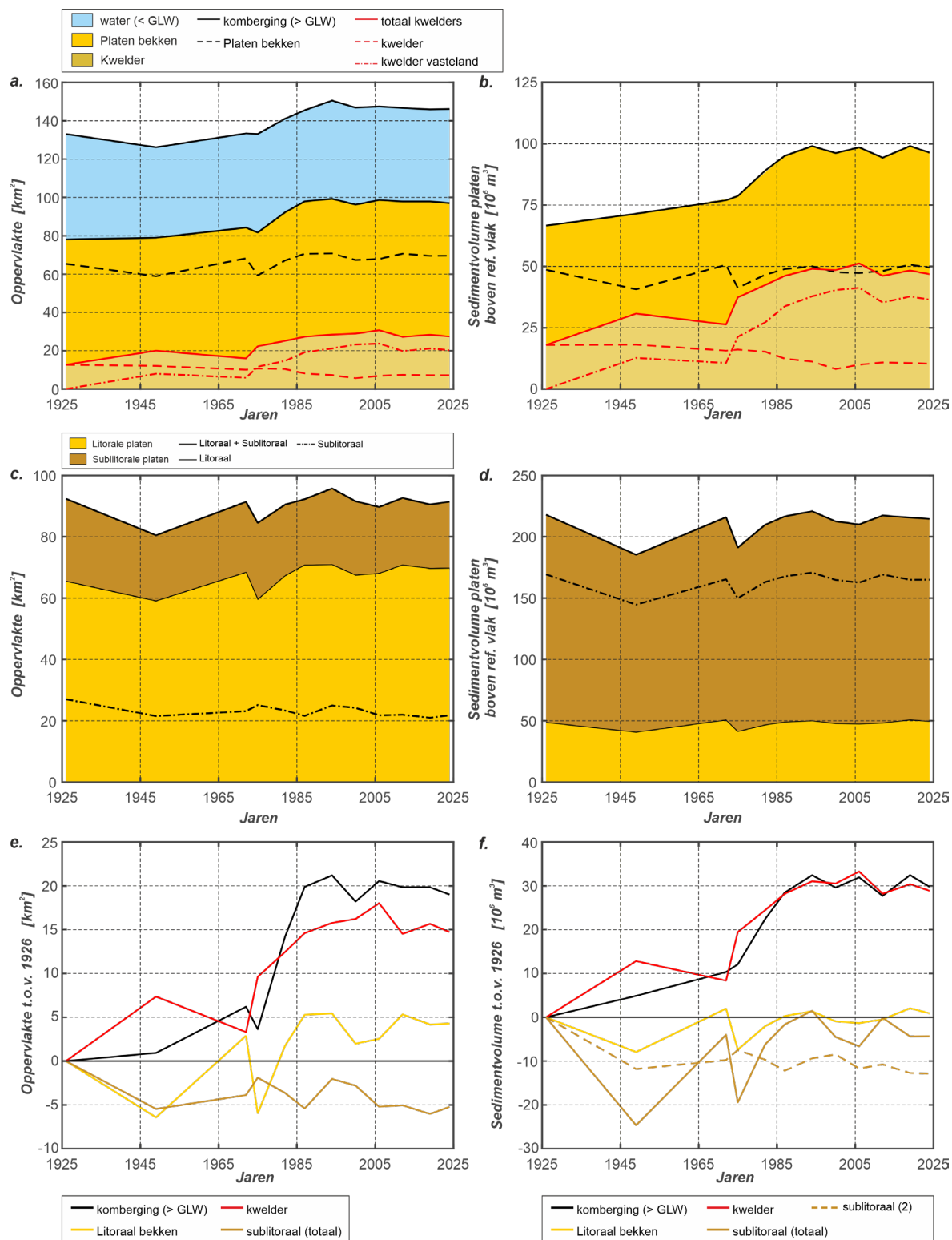
De gemiddelde hoogte van de litorale platen in het bekken (exclusief kwelder) blijft over de gehele periode vrijwel stabiel. De plaathoogte varieert rond de gemiddelde waarde van -0.29 m. Een duidelijke trend in ontwikkeling is hier niet te observeren (Figuur 5-10).



Figuur 5-10: Overzicht van de gemiddelde diepte van het litoraal van het gehele kombergingsgebied (zwarte lijn) en onderverdeeld in kwelders (rood) en platen (streepjeslijn) binnen het bekken.

Tabel 5-3: Overzicht van het oppervlakte (A in km^2), sedimentvolume (V in miljoen m^3) en gemiddelde plaathoogte (V/A in m t.o.v. NAP) van het litoraal binnen het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag.

Jaren	Oppervlakte platen [km^2]			Volume in [10^6 m^3]			Gem. hoogte [m tot NAP]		
	Komb.	Bekken	Kwelder	Komb.	Bekken	Kwelder	Komb.	Bekken	Kwelder
1926	78.04	65.34	12.7	66.61	48.65	17.96	-0.15	-0.26	0.41
1949	78.97	58.91	20.06	71.49	40.71	30.78	-0.09	-0.31	0.53
1972	84.24	68.23	16.01	76.95	50.63	26.32	-0.09	-0.26	0.64
1975	81.68	59.36	22.32	78.69	41.28	37.41	-0.04	-0.30	0.68
1982	92.26	67.10	25.16	89.05	46.62	42.43	-0.03	-0.31	0.69
1987	97.93	70.62	27.31	95.09	48.93	46.16	-0.03	-0.31	0.69
1994	99.24	70.77	28.47	99.05	50.03	49.02	0.00	-0.29	0.72
2000	96.25	67.33	28.92	96.22	47.70	48.52	0.00	-0.29	0.68
2006	98.60	67.88	30.72	98.56	47.32	51.24	0.00	-0.30	0.67
2012	97.88	70.66	27.22	94.33	48.16	46.17	-0.04	-0.32	0.70
2019	97.88	69.52	28.36	99.07	50.71	48.36	0.01	-0.27	0.71
2024	97.05	69.62	27.43	96.39	49.55	46.84	-0.01	-0.29	0.71
Gemiddeld	91.67	67.11	24.55	88.46	47.52	40.93	-0.04	-0.29	0.65



Figuur 5-11: Overzicht van (a) het oppervlakte van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag, onderverdeeld in water (< GLW) en platen en kwelders (> GLW). (b) Sedimentvolumes van platen en kwelders boven GLW (> -1 m NAP). (c en d) Oppervlakte en sedimentvolume van de litorale en sublitorale platen in het bekken (exclusief kwelder). (e,f). Verschil in oppervlakte en sedimentvolume voor de verschillende gebieden. De volumeverandering van het totale sublitoraal bestaat voor een deel uit een verandering in oppervlakte en voor een deel uit een verandering in bodemhoogte. Het deel door bodemhoogteverandering is weergegeven als sublitoraal (2).

6 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

De onderzoeksvragen gesteld in hoofdstuk 1 vormen de basis voor de samenvatting, conclusies en aanbevelingen zoals weergegeven in dit hoofdstuk. In voorgaande hoofdstukken zijn de morfologische ontwikkelingen van de kombergingsgebieden van de Centrale Waddenzee in veel detail kwantitatief en kwalitatief geanalyseerd. Hoofdstuk 6.1 geeft een beknopte samenvatting van de inzichten, specifiek gericht op de beantwoording van de onderzoeksvragen. Voor ieder kombergingsgebied worden de grootschalige veranderingen en de ontwikkeling in volume en areaal van de geulen, kwelders, litorale en sublitorale platen gepresenteerd. In dit hoofdstuk worden ook de huidige trends weergegeven. De huidige trends worden ook als representatief gezien voor de ontwikkeling in de nabije toekomst.

Een synthese van de inzichten, om antwoord te geven op de vraag of er verlanding, verdrinking of meegroeien optreedt, wordt weergegeven in Hoofdstuk 6.2. Hoofdstuk 6.3 geeft een beknopte beantwoording van de gestelde onderzoeksvragen.

6.1 Samenvatting van de morfologische ontwikkelingen

6.1.1 Inleiding

In deze studie zijn sedimentvolumes en arealen op verschillende manieren en ten opzichte van verschillende referentievlakken berekend. Dit geeft een volledig beeld van de ontwikkeling van de verschillende deelgebieden, maar de vele getallen, de berekende volume- en areaalveranderingen en trends maken de interpretatie complex en soms verwarrend. Als horizontale afbakening worden hier altijd de jaarlijkse kombergingsgrenzen gebruikt met een vaste afbakening langs de vastelandkust. Binnen deze grenzen zijn dan de kentallen van geulen (< -3 m NAP), platen (litoraal versus sublitoraal) en kwelders bepaald. Voor geulen is ervoor gekozen de -3 m NAP-contour te hanteren. Dit referentievlak sluit aan op de definitie van het sublitoraal, wat gedefinieerd is als het sedimentvolume in de zone tussen de -1 en -3 m NAP. De -1 m NAP-contour is in deze studie als representatief beschouwd voor gemiddeld laag water (GLW). Het litoraal is daarbij gedefinieerd als het plaatvolume boven GLW, waarbij onderscheid gemaakt wordt in het totale kombergingsgebied inclusief kwelders en de platen van het bekken (bekken is hier gedefinieerd als het kombergingsgebied exclusief kwelders). De kwelders zijn binnen deze studie afgebakend door de 0 m NAP-contour aan de waddenzeezijde. Het supralitoraal, het plaatvolume boven GHW, is in deze studie niet apart geanalyseerd. In het bekken heeft het supralitoraal slechts een beperkte omvang en is daarom als onderdeel van het litoraal meegenomen.

De analyse van de kwelders bevat een grote onzekerheid door twijfel in de nauwkeurigheid van de metingen. Vóór 1989 zijn deze slecht bemeten, waardoor het tijdsverloop tussen 1926-1986 geen representatieve weergave geeft. Ná 1989 is de dekking van de metingen beter, maar zijn er wel onzekerheden in de hoogteligging door de aanwezigheid van vegetatie. Zonder nadere analyse van de meetonnauwkeurigheden in de kwelderhoogte, lijkt een uitgebreide analyse van de kwelderarealen, zoals onderverdeling in litoraal en sublitoraal, niet gerechtvaardigd en dit is daarom niet uitgevoerd in deze studie.

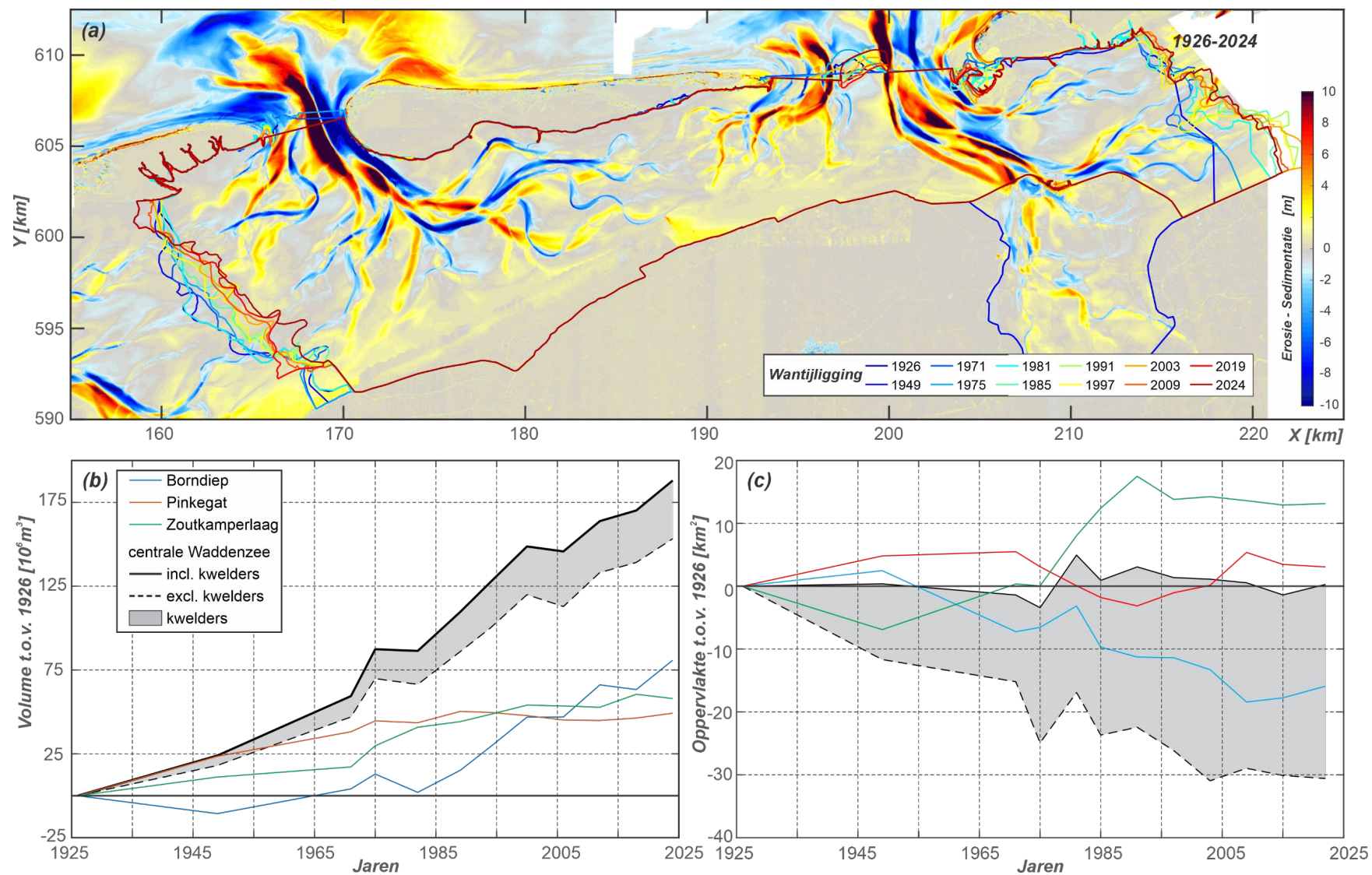
Morfologische verandering, volumes en areaal.

De Centrale Waddenzee vertoont grote morfologische veranderingen (Figuur 6-1). De grootste veranderingen in bodemhoogte treden op in de zeegaten en langs de geulen. Op de kwelders, platen en ondiepten richting de Waddenkust is een overwegende toename in hoogte te observeren (Figuur 6-1a). Het sedimentvolume van de Centrale Waddenzee is inclusief kwelders met 188 miljoen m³ toegenomen sinds 1926. Deze volumetoename treedt vrijwel lineair op (Figuur 6-1b), waarbij trendlijnen over de periode 1926-2024 en de periode 1989-2024 identieke trendwaarden van +2.0 miljoen m³/jr. toename in sedimentvolume geven. Met 43% van de netto-sedimentatie is de bijdrage van het kombergingsgebied Borndiep het grootst (+81 miljoen m³), terwijl des bekken van het Pinkegat met 49 miljoen m³ (26%) en de Zoutkamperlaag met 58 miljoen m³ (31%) zijn toegenomen. Een deel van deze sedimentatie vindt plaats in de kwelders (33 miljoen m³ ofwel 17% van het totaal). Het bekken, exclusief kwelder, is dus met 155 miljoen m³ in sedimentvolume toegenomen.

De geaggregeerde volumeverandering is echter niet representatief voor de individuele kombergingsgebieden. Ieder van de kombergingen laat duidelijke trendbreuken zien. Het Borndiep vertoont een tweedeling in gedrag, met een lage sedimentatiesnelheid in de periode 1926-1982 van +0.2 miljoen m³/jr. en daarna een hogere snelheid van +1.8 miljoen m³/jr. Het Pinkegat vertoont een tegenovergesteld gedrag met hoge sedimentatie (+0.81 miljoen m³/jr.) in de periode 1926-1982 en een beperkte volumeverandering sindsdien (± 0.01 miljoen m³/jr.) De Zoutkamperlaag laat juist een driedeling in gedrag zien. Een beperkte sedimentatie treedt op voor afsluiting van de Lauwerszee (+0.4 miljoen m³/jr.), maar de sedimentatie neemt sterk toe tot ruim +2 miljoen m³/jr. direct na afsluiting (1971-1982). Representatief voor het huidige gedrag is een sedimentatiesnelheid van +0.4 miljoen m³/jr.

Het totale oppervlak van de Centrale Waddenzee, exclusief Lauwerszee, is in 1926 en 2024 vrijwel identiek (Figuur 6-1a). Over de gehele periode is de wantijverplaatsing aan de westzijde vrijwel gelijk aan die van de oostzijde (Figuur 6-1c). Binnen de tijdserie zijn wel variaties te observeren. Zo nam het oppervlakte tijdelijk toe na afsluiting van de Lauwerszee. Het wantij onder Schiermonnikoog verplaatst zich dan snel oostelijk. In de recente jaren trekt dit wantij zich weer iets westelijk terug.

De kwelders zijn binnen deze studie afgebakend door de 0 m NAP-contourlijn aan de Waddenzeezijde. Op basis van deze definitie neemt het oppervlakte van de kwelder sterk toe met (+62 km²). De kwelders zijn tot 1989 slechts beperkt ingemeten, waardoor de ontwikkeling tussen 1926-1989 niet correct zal zijn, maar de verandering van het totale oppervlakte zou een redelijke schatting moeten geven van het kwelderareaal. Dit areaal neemt tussen 1926 en 2024 met 31 km² toe, een gemiddelde van +0.32 km²/jr. De veranderingen over de recente periode zijn met een trendwaarde van +0.16 km²/jr. veel kleiner. Dit verschil komt met name door de grote toename in kwelderareaal van de Zoutkamperlaag direct na afsluiting van de Lauwerszee.



Figuur 6-1: Samenvatting van de morfologische veranderingen van de Centrale Waddenzee aan de hand van (a) de verandering in bodemhoogte en kombergingsgebied in de periode 1926-2022 en de verandering in (b) sedimentvolume en (c) oppervlakte t.o.v. de 1926-bodemligging.

Borndiep*Morfologische veranderingen*

Sinds 1926 is er netto sedimentatie opgetreden in het kombergingsgebied Borndiep (+81 miljoen m³). De tijdserie vertoont hierbij een duidelijke tweedeling in gedrag, met vrijwel geen nettoverandering in volume in de periode 1926-1982 en een grote sedimentatie sindsdien (Figuur 6-1b). De langetermijntrends, geaggregeerd over de gehele periode 1926-2022, geven voor dit kombergingsgebied dan ook geen representatieve weergave van het huidige gedrag.

Een directe verklaring voor deze trendbreuk is niet direct voorhanden. Er zijn geen grote ingrepen uitgevoerd die zouden leiden tot deze omslag. Het is mogelijk dat de oudere bodemkaarten, met name 1926 en 1949, minder nauwkeurig zijn en een vertekend beeld geven van de morfologische veranderingen, waardoor de volumeverandering in deze periode onderschat wordt. Ondanks de kleine netto volumeverandering zijn er wel grootschalige morfologische veranderingen zichtbaar. Zo is het Borndiep oostelijk verplaatst, waardoor deze geul in de keel tegen de westzijde van Ameland ligt. Indirect heeft deze verplaatsing er ook voor gezorgd dat de processen rond de Boschplaat zijn veranderd, waardoor deze sinds 1975 een continue terugtrekking, of erosie, vertoont. De veranderingen in de geulen zetten zich ook in de huidige bodem door, waarbij in de recente bodemopnamen vooral een uitbouw van de Kromme Balg in het Borndiep te zien is. Hoe dit de hoofdgeul en de daaraan gerelateerde morfologische processen beïnvloedt, is nog niet geheel duidelijk.

Binnen het kombergingsgebied zijn kleinschalige ingrepen uitgevoerd, zoals het creëren van de vaargeul Holwerd-Ameland door middel van 2 doorsteken. Deze ingreep zal de grootschalige waterbeweging en het morfologische gedrag niet direct beïnvloed hebben, maar zorgt er wel voor dat het achterliggende kombergingsgebied nu draineert door de oorspronkelijke geul (Dantziggat) en deze vaargeul. De ingreep zelf was kleinschalig t.o.v. de schaal van het natuurlijke systeem, maar de huidige onderhoudsinspanning, het baggeren en verspreiden, is dit zeker niet. De huidige baggerinspanning van 1.6 miljoen m³/jr., over de periode 2019-2023, is vrijwel gelijk aan de netto volumeverandering van het gehele bekken en is ruim 2x zo hoog als de netto opvulling van alle geulen binnen het kombergingsgebied. Op de geaggregeerde volumebalans is hiervan nog geen duidelijk effect zichtbaar, maar het is waarschijnlijk dat dit lokaal een verandering in geul- en plaatmorfologie veroorzaakt.

Geulen

De geulvolumes nemen initieel toe (1926-1989) tot een maximumvolume van 188 miljoen m³ om vervolgens weer af te nemen tot de huidige omvang van 162 miljoen m³. De netto-sedimentatie over de periode 1989-2022 bedraagt +0.7 miljoen m³/jr. Aangezien de geulopvulling vrijwel lineair verloopt, lijkt deze trend ook representatief voor de toekomstige ontwikkeling. Dit betekent dat het geulvolume over 10 jaar met circa 5% zal zijn afgenomen. De afname van geulareaal vertoont een vrijwel lineair verloop sinds 1971 met een trendwaarde van een kleine -0.1 km²/jr. Deze trendwaarde is ook representatief voor het huidige gedrag en bij voortzetting van de trend neemt het huidige geulareaal van 37 km² (2022) in een periode van 10 jaar met 4% in omvang af. Alhoewel er netto sedimentatie optreedt in de geulen, neemt de gemiddelde diepte juist iets toe. Dit komt doordat de afname in oppervlakte relatief groter is dan de opgetreden sedimentatie. De gemiddelde geuldiepte ligt sinds 2000 rond de -7.4 m NAP (zo'n 60 cm lager dan in 1926). Een trend in de ontwikkeling van de gemiddelde geuldiepte kon niet rechtstreeks worden bepaald uit de tijdserie door de relatief grote fluctuaties. Een trendlijn over de periode 1989-2022 geeft een afname van de diepte met 9 mm/jr., maar in de meest recente metingen (2005-2022) blijft de gemiddelde diepte vrijwel constant (zie Figuur 3-11).

Kwelders

In de 2022-bodemopname bestaat 21% van het kombergingsgebied van het Borndiep uit kwelder, waarvan het merendeel zich langs het vasteland bevindt (57 km²). Deze

vastelandkwelder is sinds 1926 met 17 km² in oppervlakte en 16 miljoen m³ in volume toegenomen. Gemiddeld over de gehele tijdserie ligt de toename in areaal rond de +0.2 km²/jr., maar de recentere metingen laten een nog iets hogere trend van +0.3 km²/jr. zien. De hoogte van de kwelder is juist iets afgenomen (-2.5 mm/jr.). Deze afname komt vooral door de grote toename in oppervlakte, waarvan de hoogte relatief laag is t.o.v. de al bestaande kwelders.

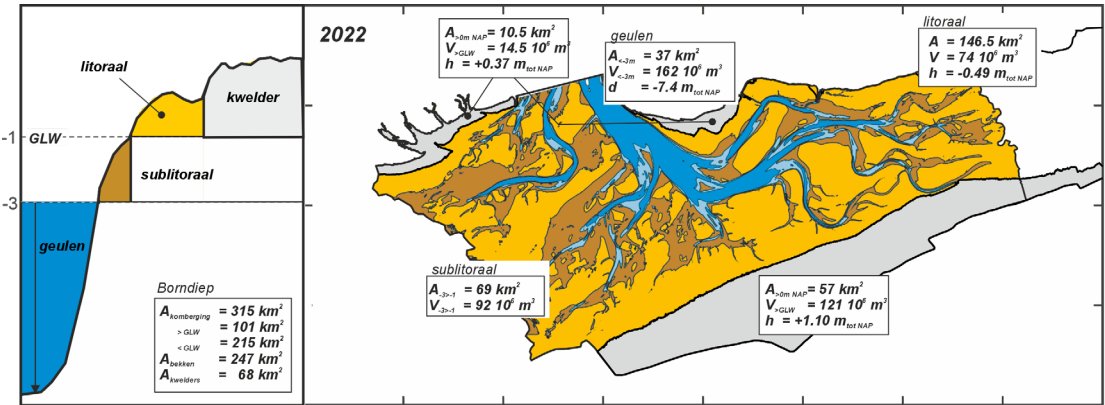
De eilandkwelders vertonen juist een afnemende trend. Sinds 1926 is het oppervlakte afgenomen met -4 km² en het volume met -5 miljoen m³. Deze afname kan deels verklaard worden door de terugtrekking van de eilandstaart van Terschelling sinds 1975. Over de periode 1989-2022 resulteert dit in een kleine afname van hoogte, maar een duidelijke trend is hier eigenlijk niet zichtbaar.

Litoraal

De litorale platen in het bekken hebben een gemiddelde hoogte van -0.50 m tot NAP en een oppervlakte van 146.5 km² in de huidige bodem. Dit oppervlakte en het sedimentvolume in de litorale platen blijven vrijwel stabiel over de gehele periode en vertonen weinig verandering. Een stabiele hoogte betekent dat deze platen dus niet meegroeien met zeespiegelstijging.

Sublitoraal

De omvang van het sublitoraal is sterk afgenomen. Een representatieve trend voor de huidige ontwikkeling is -0.4 km²/jr. In totaal is hier 35 miljoen m³ aan sediment verloren. Een voor de huidige situatie representatieve trend voor de opvulling is -0.5 miljoen m³/jr.



Gebied:	Geobserveerde verandering				Huidige trend		
	1926-2022		1989-2022				
	A [km ²]	V [10 ⁶ m ³]	A [km ²]	V [10 ⁶ m ³]	A [km ² /jr.]	V [10 ⁶ m ³ /jr.]	h [mm/jr.]
geulen:	-4.7	-5.0	-3.1	+25	-0.08	+0.71	+9
eilandkwelder*:	-4.3	-2.6	-3.8	-1.3	-0.12	-0.04	+0.2
vastelandkwelder*:	+16.6	+16.1	+10.3	+9.0	+0.31	+0.23	-2.5
Litoraal:	+6.7	+8.4	+5.5	+4.8	+0.03	+0.02	0
sublitoraal:	-30.2	-34.7	-14.9	-17.3	-0.39	-0.54	+0.3

* de volume verandering van de kwelders is t.o.v. 0m NAP.

Figuur 6-2 boven: Samenvatting van het oppervlakte, volume en gemiddelde hoogte of diepte van de verschillende zones (geulen, kwelders, litoraal en sublitoraal) binnen het kombergingsgebied Borndiep. Onder: Tabel met geobserveerde veranderingen in oppervlakte (A) en volume (V) van deze gebieden over de gehele periode (1926-2024) en de voor het huidige gedrag representatieve periode (1989-2022). De huidige trend is de beste schatting van het huidige gedrag en voor de toekomstige ontwikkeling.

6.1.4 Pinkegat

Morfologische veranderingen

Sinds 1926 is er netto sedimentatie opgetreden in het kombergingsgebied Pinkegat (Figuur 6-1b). De tijdserie vertoont hierbij een duidelijke tweedeling in gedrag: een grote netto-sedimentatie in de periode 1926-1982 en een beperkte verandering sindsdien. De langetermijntrends, geaggregeerd over de gehele periode 1926-2024, geven voor dit kombergingsgebied geen representatieve weergave van het huidige gedrag. Als representatief hiervoor worden de trendwaarden over de periode 1982-2024 gehanteerd (Figuur 6-3).

Kenmerkend voor het Pinkegat is de grote dynamiek van de geulen in het zeegat. Er is een afwisseling tussen een 1-geul- en meergeulensysteem met een herhalingstijd van rond de 40-50 jaar. Daarnaast is er een kleinere dynamiek binnen het meergeulensysteem met een herhalingstijd van 10 jaar. De geulen in het bekken lijken dieper, meer ontwikkeld te zijn in de 1-geulconfiguratie en ondieper in de meergeulenconfiguratie. Deze natuurlijke ontwikkeling zou een mogelijke verklaring kunnen zijn voor de grote sedimentatie die in de geulen is opgetreden. Naast de natuurlijke variatie speelt ook bodemdaling door gaswinning een rol. De diepe bodemdaling zou een sedimentverlies van bijna 5 miljoen m³ veroorzaken in de komberging van het Pinkegat en ruim 3 miljoen m³ onder de eilandstaart. Deze bodemdaling is niet direct zichtbaar in de geobserveerde veranderingen.

Het kombergingsgebied vertoont een respons op de afsluiting van de Lauwerszee. Na afsluiting verplaatst het wantij onder de Engelsmanplaat zich eerst westelijk en geleidelijk terug oostelijk, waardoor het oppervlakte van het bekken eerst kleiner en vervolgens weer groter wordt. Deze verandering is ook zichtbaar in de volumeontwikkeling.

Geulen

In 2024 beslaat slechts 6% van het totale kombergingsoppervlakte uit geulen dieper dan -3 m NAP. Dit geulareaal is zo'n 5 km² kleiner dan in 1926 en het geulvolume is met 16 miljoen m³ afgenomen. Het merendeel van de veranderingen treedt op tussen 1926 en 1975. Sindsdien zijn er wel variaties in areaal en volume, maar is de nettoverandering beperkt. De gemiddelde diepte van de geulen bedraagt -5 m NAP, maar vertoont relatief grote variaties over de tijdserie. De huidige geulopvulling heeft een trendwaarde van +0.10 miljoen m³/jr. (1989-2022). Het geulareaal neemt over deze periode met +0.01 km²/jr. toe, maar een meer representatieve trend over de periode 2006-2024 geeft een afname van -0.07 km²/jr. Een trend over de recente periode is eigenlijk niet te maken door de grote variaties in diepte, maar over de gehele periode bedraagt de afname in geuldiepte 1 mm/jr.

Kwelders

In de meest recente bodem bestaat 11% (7 km²) van het kombergingsgebied uit kwelder. De eilandkwelder vertoont sinds 2005 wel een duidelijke afnemende trend. Het oppervlakte lag in de periode 1975-2005 nog vrijwel stabiel rond de 3.3 km², maar is vervolgens met 1 km² afgenomen in omvang (-0.04 km²/jr.). Deze trend lijkt representatief voor het huidige gedrag. Naast een afname in oppervlakte is het volume sinds 2005 met 2 miljoen m³ afgenomen. Gemiddeld resulteert dit in een afname van de kwelderhoogte met -3 mm/jr.

In de oude bodemkaarten was de vastelandkwelder niet aanwezig, maar sinds 1972 varieert het oppervlakte rond de 4 km². In 2005 neemt het oppervlakte dan toe tot de huidige 5 km². De gemiddelde hoogte van de kwelder vertoont een kleine trend van afname met -1 mm/jaar.

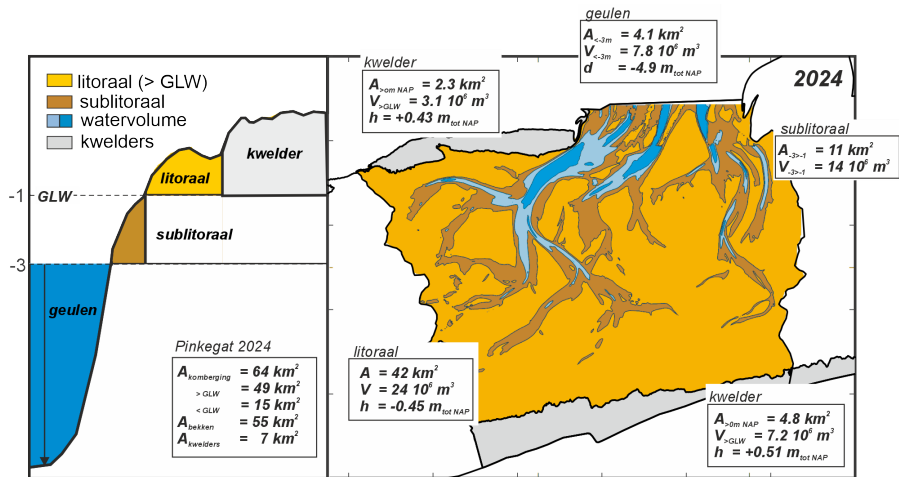
Litoraal

De litorale platen in het bekken vertonen een continue trend van sedimentatie (+13.5 miljoen m³) en toename in areaal (+17 km²). De langetermijntrends van +0.1 miljoen m³/jr. en +0.2 km²/jr. lijken hier ook representatief voor de huidige trends. De gemiddelde hoogte van het litoraal is ook toegenomen van -0.56 m in NAP tot -0.40 m in 1994. Sinds 1994 blijft de gemiddelde hoogte dan vrijwel gelijk. Tot 1994 was de toename in plaathoogte (2 mm/jr.)

hoger dan zeespiegelstijging, maar sinds 1994 groeien de platen qua hoogte dus niet mee met zeespiegelstijging.

Sublitoraal

Grote veranderingen doen zich voor in de omvang en het volume van het sublitoraal. Het sublitoraal neemt tussen 1926 en 1994 af met 14 km², maar sinds 1994 blijft het areaal rond de 13 km² liggen. Deze grote variatie is gerelateerd aan de verandering in kombergingsoppervlakte, waarbij het wantij onder de Engelsmanplaat eerst westelijk verplaatste na afsluiting en dan langzaam weer terug oostelijk. Een trendlijn over de periode 1994-2024 geeft een toename van +0.05 km²/jr., maar eigenlijk is een duidelijke trend in de ontwikkeling niet zichtbaar. De verandering in omvang domineert ook de totale volumeontwikkeling van het sublitoraal. Het volume van het sublitorale geuldeel vertoont over de gehele periode een trend van afname (-20 miljoen m³), maar in de recente bodems (1994-2024) neemt het volume juist iets toe (+0.09 miljoen m³/jr.) en zou de hoogte dan juist met 2.5 mm/jr. toenemen.



	Geobserveerde verandering				Huidige trend		
	1926-2024		1982-2024				
Gebied:	A [km ²]	V [10 ⁶ m ³]	A [km ²]	V [10 ⁶ m ³]	A [km ² /jr.]	V [10 ⁶ m ³ /jr.]	h [mm/jr.]
geulen:	-5.0	+16.0	+0.2	+1.2	+0.01	+0.10	+1
eilandkwelder*:	+2.4	+0.4	-1.1	-0.7	-0.03	-0.03	-3
vastelandkwelder*:	+4.8	+2.4	+1.0	+0.4	+0.01	+0.01	-1
Litoraal:	+17.0	+13.5	+7.2	+6.0	+0.19	+0.13	0
sublitoraal:	-12.8	-19.7	-3.7	-4.6	+0.05	+0.09	+2.5

* de volume verandering van de kwelders is t.o.v. 0m NAP.

Figuur 6-3 boven: Samenvatting van de oppervlakten, het volume en de gemiddelde hoogte of diepte van de verschillende zones (geulen, kwelders, litoraal en sublitoraal) binnen het kombergingsgebied Pinkegat. Onder: Tabel met geobserveerde veranderingen in oppervlakte (A) en volume (V) van deze gebieden over de gehele periode (1926-2024) en de voor het huidige gedrag representatieve periode (1989-2024). De huidige trend is de beste schatting van het huidige gedrag en voor de toekomstige ontwikkeling.

6.1.5 Zoutkamperlaag

Morfologische veranderingen

Door afsluiting van de Lauwerszee vertoont het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag verschillende stadia in gedrag. In de bovenste deelfiguur van Figuur 6-4 is dit samengevat in een conceptueel model, dat bestaat uit 4 stages. De geobserveerde veranderingen voor en direct na afsluiting zijn dan ook niet representatief voor het huidige gedrag. In het conceptuele model wordt de morfologische ontwikkeling voor afsluiting beschreven als semi-natuurlijk (stage 1). Ook voor de afsluiting van de Lauwerszee was er al een invloed van menselijk ingrijpen (o.a. inpolderingen, bedijking en kwelderwerken) op de morfologische ontwikkeling zichtbaar, alleen zijn deze veranderingen klein t.o.v. het natuurlijke systeem. Dit geeft een geleidelijke aanpassing van de hydrodynamica, waarop ook de morfodynamiek van het systeem geleidelijk reageert. In deze periode is er al een netto-sedimentatie zichtbaar. De afsluiting van de Lauwerszee geeft een grote verstoring van het systeem (stage 2 - verstoord). De hydrodynamica reageert instantaan op de afsluiting en getijprisma en -voortplanting veranderen. Hierdoor zijn de hydrodynamica en bodem ver uit evenwicht en is er ook een grote respons in morfologie zichtbaar. Naast de grote veranderingen op de buitendelta treedt er sedimentatie op aan de westzijde van de Zoutkamperlaag en de aangrenzende platen. In het oostelijke deel van het bekken nemen de geulen juist iets in omvang toe, waardoor het wantij oostelijk verplaatst. Op basis van de geobserveerde verandering is de schatting dat de periode van verstoring de morfologische veranderingen domineert tot 1994 en vanaf 1994 domineert een veel kleinere, geleidelijke aanpassing van de morfologie (stage 3). Dit gedrag is ook nu nog zichtbaar (zie beschrijving hieronder). In theorie zou er in de toekomst terug een natuurlijk evenwicht moeten ontstaan tussen morfologie en hydrodynamica, maar het is de vraag of zo'n situatie ooit bereikt kan worden. Hiervoor is de invloed van alle ingrepen, zoals de bedijking van de Waddenkust en afdamming van de Lauwerszee, het vasthouden van de Waddeneilanden, het baggeren en onderhouden van de vaargeulen misschien wel te groot.

Geulen

In de huidige bodem bestaat 19% van het bekken uit geul. Het geulareaal is eigenlijk over de gehele tijdserie vrijwel stabiel en varieert zo tussen de 26-27 km². Op basis van de trendlijn over de periode 1975-2024 zou een kleine toename in areaal van 0.03 km²/jr optreden. Een duidelijke verandering in trend en oppervlakte door afsluiting is hier niet zichtbaar. Het geulvolume vertoont een sprong direct na afsluiting en neemt sindsdien met - 0.2 miljoen m³/jr. af. Deze trend lijkt zich onverminderd door te zetten. Dit betekent ook dat de gemiddelde diepte van het bekken afneemt. De gemiddelde diepte neemt hierbij met 20 mm/jr. af. Deze trends lijken zich ook in de huidige bodems onverminderd door te zetten. Het opvullen van de geulen gaat hier dus veel sneller dan de zeespiegelstijging.

Kwelders

In de huidige bodem bestaat 19% van het kombergingsgebied uit kwelder, waarbij het aandeel vastelandkwelder 14% is en de eilandkwelder 5%. De afsluiting van de Lauwerszee had een grote invloed op het areaal en sedimentvolume van de kwelders. De eilandkwelder is sterk afgenomen in omvang. Voor afsluiting bedroeg het oppervlakte zo'n 13 km² en dit nam af tot een minimum van 5.5 km² rond 2000. Het oppervlakte is daarna weer iets toegenomen en bedraagt nu rond de 7 km². Een duidelijke trend in ontwikkeling is door de grote variatie niet te trekken.

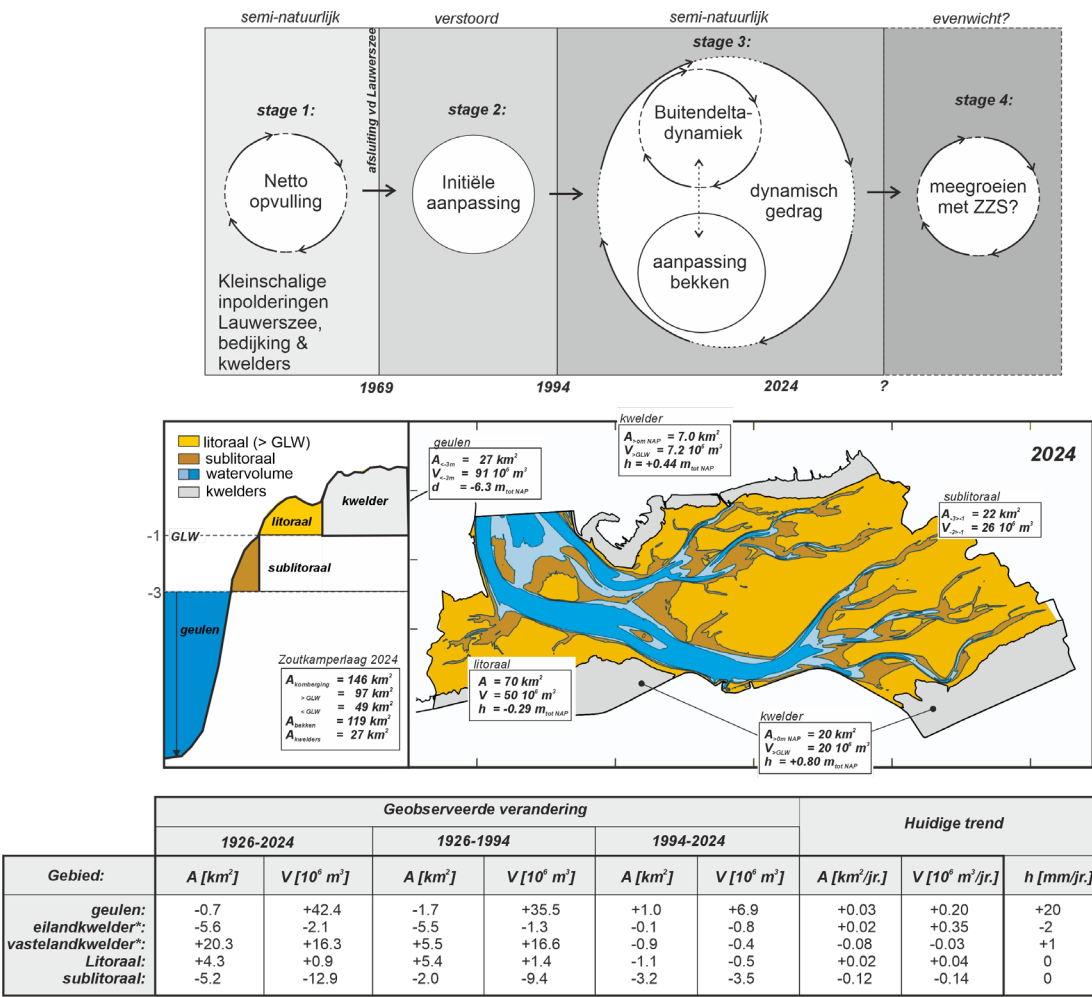
De vastelandkwelder neemt sterk in omvang (+20 km²) en sedimentvolume (+16 miljoen m³) toe na afsluiting. Een maximum wordt bereikt in 2005, waarna het areaal in de meest recente jaren stabiliseert rond 20 km². In de laatste metingen (2012-2024) blijft het sedimentvolume in de kwelder redelijk stabiel en is het dan zo'n 17 miljoen m³ hoger dan voor afsluiting. De kwelders namen sterk in hoogte toe van 0.41 m in 1926 tot 0.75 m na afsluiting. Deze gemiddelde hoogte blijft daarna dan vrijwel stabiel (gemiddeld +1 mm/jr.).

Litoraal

Een aanzienlijk deel van het bekken bestaat uit litorale platen (47%). Het huidige areaal is zo'n 4 km² groter dan in 1926. Deze toename vindt plaats tot ongeveer 1985. Sindsdien vertoont het areaal wel jaarlijkse veranderingen, maar geen nettotrend. Ook het sedimentvolume en de gemiddelde plaathoogte vertonen wel variaties, maar een duidelijke trend is niet zichtbaar. De beste schatting van het huidige gedrag is een trendwaarde van 0.

Sublitoraal

Het sublitoraal vertoont een grote variatie in de tijd, maar weinig nettoverandering. De variaties hangen samen met de wantijverplaatsingen. De volumeverandering van het sublitorale geuldeel is klein (-0.14 miljoen m³/jr.) en het areaal neemt af met -0.12 km²/jr. Omdat zowel volume als oppervlakte afnemen, vertoont de gemiddelde diepte wel variaties (± 10 cm), maar geen duidelijke trend.



* de volume verandering van de kwelders is t.o.v. 0m NAP.

Figuur 6-4 boven: Conceptuele weergave van de verschillende stadia van morfologisch gedrag van de Zoutkamperlaag. Midden: Samenvatting van de oppervlakten, het volume en de gemiddelde hoogte of diepte van de verschillende zones (geulen, kwelders, litoraal en sublitoraal) binnen het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. Onder: Tabel met geobserveerde veranderingen in oppervlakte (A) en volume (V) van deze gebieden over de gehele periode (1926-2024), de periode 1926-1994 en de voor het huidige gedrag representatieve periode (1994-2024). De huidige trend is de beste schatting van het huidige gedrag en voor de toekomstige ontwikkeling.

6.2 Synthese - verlanden, verdrinking of meegroeien?

Verlanden, verdrinken of meegroeien kan op verschillende manieren geïnterpreteerd worden, maar om dit te kwantificeren worden in dit hoofdstuk de sedimentvolumes gebruikt. Voor ieder kombergingsgebied en de deelgebieden (litoraal inclusief kwelders, litoraal exclusief kwelders (de platen in het bekken) en de kwelders) worden de theoretische sedimentvolumes berekend die nodig zijn om mee te groeien met zeespiegelstijging. Door te middelen over de kombergingsgebieden en de analyse uit te voeren over de langetermijn (sinds 1926) speelt korttermijndynamiek door natuurlijke processen hierin niet de dominante rol. Op kleinere tijden en ruimteschalen, bijv. voor een individuele plaat of geul, kan de natuurlijke dynamiek vele malen groter zijn dan de aanpassing aan zeespiegelstijging.

Als basis voor de schatting van zeespiegelstijging worden de resultaten van de Zeespiegelstijgingsmonitor (Stolte et al., 2022) gebruikt. In deze studie worden de hoofdstations langs de Nederlandse kust gebruikt. Gemiddeld over heel Nederland wordt geconcludeerd dat er een jaarlijkse stijging van 1.8 mm tot 1993 en 2.9 mm na 1993 optreedt. Er is wel een kleine variatie tussen de stations zichtbaar. In de Waddenzee ligt de trend voor 1993 tussen de 1.1 en 1.8 mm per jaar. Na 1993 varieert de trend tussen de 2.7 en 3.9 mm per jaar. De hoogste waarde van 3.9 mm jaarlijkse stijging wordt geobserveerd in Delfzijl, waar de bodemdaling door gaswinning het hoogst is.

Als zeespiegelstijgingswaarde zijn hierbij de voor Nederland gemiddelde waarden gehanteerd. Door deze waarde te vermenigvuldigen met het geobserveerde oppervlakte wordt een schatting van het totale benodigde sedimentvolume over de periode 1926-2024 verkregen. Door dit te vergelijken met de geobserveerde volumeverandering kan dan een schatting van verdrinking, verlanding of meegroeien worden verkregen, waarbij:

- Verlanding → geobserveerd sedimentvolume > het berekende volume voor ZSS.
- Verdrinking → geobserveerd sedimentvolume < het berekende volume voor ZSS.
- Meegroeien → geobserveerd sedimentvolume = het berekende volume voor ZSS.

De sedimentvolumes zijn uitgezet t.o.v. het jaar 1994, omdat dit het knippunt in de zeespiegelstijgingstrend weergeeft en omdat het gedrag van de Centrale Waddenzee sinds 1994 redelijk representatief is voor het huidige gedrag (Figuur 6-5). Vóór 1994 zijn er nog grote verstoringen zichtbaar en is de nauwkeurigheid van de meetdata kleiner. In Figuur 6-5 geven de rode stippellijnen de geobserveerde sedimentvolumes weer en de blauwe lijnen de theoretisch benodigde sedimentvolumes voor meegroeien met zeespiegelstijging. Als de rode lijn na 1994 boven de blauwe lijn ligt, dan betekent dit dat het huidige systeem aan het verlanden is. De geobserveerde toename in sedimentvolume is groter dan benodigd voor zeespiegelstijging. Vice versa, als de rode lijn onder de blauwe lijn ligt, dan is er sprake van verdrinking. Omdat de sedimentvolumes zijn uitgezet t.o.v. het 1994-volume betekent dit dat voor 1994 de lijnen omgedraaid liggen t.o.v. na 1994. Voor 1994 is er sprake van verlanding als de rode lijn onder de blauwe lijn ligt.

Kombergingsgebieden

Gemiddeld over de gehele Centrale Waddenzee is er sprake van verlanding. Voor 1994 is de toename in sedimentvolume 2x groter dan het benodigde volume voor zeespiegelstijging. Deze conclusie geldt niet alleen voor de gehele Centrale Waddenzee, maar met uitzondering van de 1926-meting van het Borndiep vertonen alle kombergingsgebieden een trend van verlanding. De sprong in de tijdserie van de Zoutkamperlaag illustreert dat deze toename in volume wel gedomineerd wordt door ingrepen en niet direct door de zeespiegelstijging.

Na 1994 ligt de geobserveerde toename in sedimentvolume nog steeds iets boven de blauwe lijn. Aangezien in deze periode de meetstations in de Waddenzee een iets hogere zeespiegelstijging laten zien dan het landelijke gemiddelde, zou hier de conclusie

gerechtvaardigd zijn dat het systeem meegroeit. Alhoewel de totale Centrale Waddenzee in volume meegroeit, is dit niet het geval voor de individuele kombergingsgebieden. Alleen het Borndiep vertoont een duidelijke trend van verlanding. Het geobserveerde volume is zo'n 50% hoger dan benodigd voor zeespiegelstijging.

Het Pinkegat vertoont juist een trend van verdrinking. Het geobserveerde volume blijft sinds 1994 vrijwel stabiel, terwijl er 5 miljoen m³ sediment benodigd zou zijn.

In de Zoutkamperlaag was de volumetoename groot direct na afsluiting van de Lauwerszee, maar deze neemt daarna snel af. Sinds 1994 neemt het sedimentvolume dan toe met een ongeveer gelijke hoeveelheid als benodigd voor zeespiegelstijging (= meegroeien).

Litoraal (exclusief kwelders)

Een aanzienlijk deel van de geobserveerde sedimentatie vindt plaats in de geulen. Een berekening van het litoraal, gedefinieerd als het areaal dat zich boven gemiddeld laagwater bevindt, laat een iets ander beeld zien na 1994. Voor 1994 blijven de conclusies vrijwel ongewijzigd. De gehele Centrale Waddenzee vertoont een veel grotere toename in sedimentvolume dan benodigd voor zeespiegelstijging (= verlanding). Verlanding blijft ook zichtbaar in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. Het Borndiep vertoont nu echter geen trend van verlanding, maar de geobserveerde verandering slingert rond het volume voor meegroeien (= meegroeien/verdrinking).

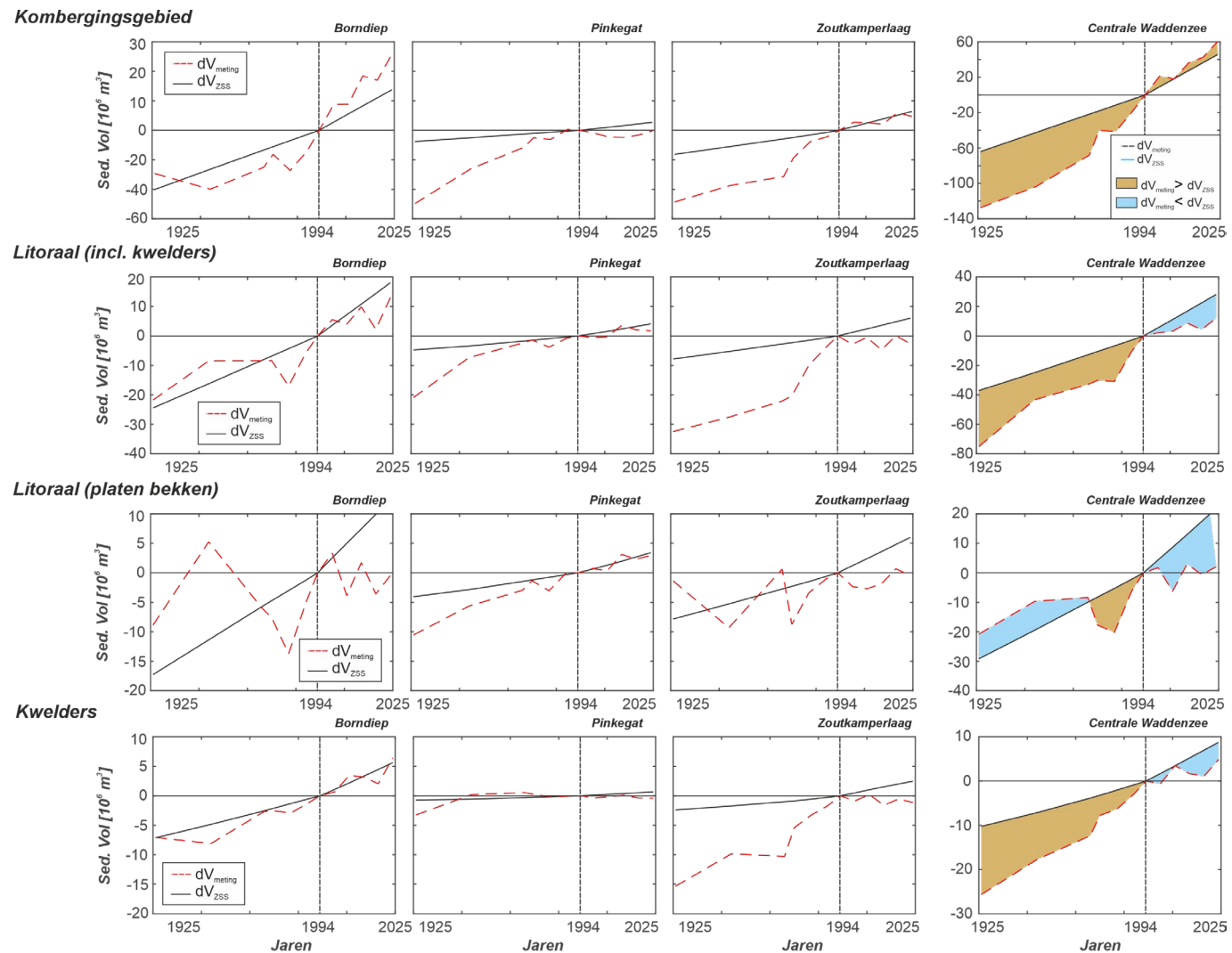
Na 1994 is er een duidelijke trend van verdrinking zichtbaar voor de Centrale Waddenzee en in de kombergingsgebieden Borndiep en Zoutkamperlaag. Het litoraal van het Pinkegat ligt over het algemeen net onder het volume benodigd voor meegroeien.

Platen in het bekken versus kwelders

Een onderverdeling van het litoraal in platen versus kwelders laat zien dat een aanzienlijk deel van de volumetoename voor 1994 plaatsvond in de kwelder. De verandering in sedimentvolume van de kwelders van Borndiep en Pinkegat slingert rond het volume benodigd voor meegroeien. Alleen in de Zoutkamperlaag is het sedimentvolume van de kwelder veel groter dan benodigd voor zeespiegelstijging. Deze toename van de kwelder zorgt ervoor dat de Centrale Waddenzee als geheel ook een trend van aanzanding vertoont. Na 1994 groeien de kwelders van het Borndiep mee met zeespiegelstijging. Het Pinkegat en de Zoutkamperlaag vertonen dan een trend van verdrinking.

De litorale platen in het bekken vertonen grote variaties. Voor 1994 lijkt alleen het Pinkegat een trend van verlanding te vertonen. Zoutkamperlaag en Borndiep laten vooral grote variaties zien, waardoor een gefundeerde uitspraak niet mogelijk is. Na 1994 vertonen de Centrale Waddenzee en de kombergingsgebieden een trend van verdrinking. Alleen het Pinkegat lijkt hier wel mee te groeien.

Deze analyse laat zien dat het totale kombergingsgebied Pinkegat niet meegroeit met zeespiegelstijging. Het volume dat benodigd zou zijn, 5 miljoen m³, is ongeveer gelijk aan het volumeverlies dat op zou treden door de diepe bodemdaling. Dit betekent echter niet dat de gaswinning hier direct verantwoordelijk voor is. Analyse van de verschillende deelgebieden laat zien dat de litorale platen wel degelijk meegroeien met zeespiegelstijging. In deze platen is dus niet direct de bodemdaling terug te zien. Het tekort ontstaat dus vooral in de geulen en deze geulontwikkeling vertoont waarschijnlijk een grootschalige, natuurlijke variatie in volume. De herhalingsstijd hiervan is 40 tot 50 jaar. De grootschalige geulopvulling vond plaats voor 1994. In deze periode is ook te zien dat er een groot sedimentoverschot in het Pinkegat optrad.



Figuur 6-5: Overzicht van het geschatte volume benodigd voor meegroeien met zeespiegelstijging en de geobserveerde volumeverandering van het gehele kombergingsgebied, het litoraal (inclusief kwelders), de litorale platen in het bekken en de kwelders (van boven naar onder). Alle volumes zijn uitgezet t.o.v. 1994.

6.3 Beantwoording van de onderzoeksvragen

Een deel van de beantwoording van de gestelde onderzoeksvragen is in voorgaande samenvatting uitgevoerd. Om herhaling te voorkomen, wordt waar nodig naar het betreffende hoofdstuk verwezen.

6.3.1 Grootschalig

- Is er sprake van een dynamisch evenwicht of trend?
- Hoe ziet het grootschalige evenwicht of de trend eruit en is er dan sprake van verlanding, verdrinking of meegroeien met zeespiegelstijging?

Deze vraag wordt behandeld in Hfdst 6.1.2 en 6.2.

De Centrale Waddenzee vertoont een vrijwel lineaire toename in sedimentvolume van 2 miljoen m³/jr. Deze toename is equivalent aan een hoogteverandering van +36 cm, wat ruwweg 50% hoger is dan benodigd voor zeespiegelstijging. In dit opzicht is er dus sprake van verlanding (Hfdst 6.1.2).

Een detailanalyse van de benodigde sedimentvolumes (Hfdst 6.2) geeft een iets genuanceerder beeld. De toename in sedimentvolume wordt vooral gedreven door de ingrepen die in het verleden zijn uitgevoerd. Sinds 1994 is de toename in sedimentvolume geaggregeerd over de Centrale Waddenzee nog voldoende om mee te groeien met zeespiegelstijging, maar deze conclusie geldt niet voor de individuele kombergingsgebieden en voor de deelgebieden hierin.

6.3.2 Kombergingsniveau generiek

- Wat zijn de verschillen in evenwicht en trends tussen de bekkens in ontwikkeling, volume en oppervlakte?
- Hoe voltrekt de verlanding zich in de verschillende kombergingsgebieden en zijn hier nog verschillen tussen de 3 systemen?
- Wat zijn de trends in verlanding en is het de verwachting dat deze zich voortzetten de komende 10/20 jaar en wat betekent dit voor het oppervlakte intergetijdengebied in de nabije toekomst?

Per kombergingsgebied zijn in Hfdst. 6.1.3 – 6.1.5 de morfologische ontwikkelingen van het gehele kombergingsgebied en de individuele deelgebieden (geulen, litoraal, sublitoraal en kwelders) behandeld. Voor ieder gebied is een schatting gemaakt van de representatieve trends voor de huidige ontwikkeling (Figuur 6-2, Figuur 6-3, Figuur 6-4).

De verschillende responses van de deelgebieden in relatie tot zeespiegelstijging geven een goed beeld van het verlandings- of verdrinkingsproces (Figuur 6-5). De drie kombergingsgebieden vertonen allen een trend van verzanding vóór 1994. Een significant deel van deze verzanding wordt veroorzaakt door geulopvulling, maar ook het litoraal neemt meer in sedimentvolume toe dan benodigd voor zeespiegelstijging. De toename in het litoraal gebeurt wel voornamelijk in de kwelders. Ná 1994 vertoont het gedrag tussen de verschillende kombergingsgebieden en deelgebieden meer variatie. Op kombergingsniveau vertoont het Borndiep een trend van verlanding, maar dit treedt alleen op door geulopvulling. Het litoraal vertoont een trend van verdrinking, omdat de platen in het bekken niet meegroeien. Het Pinkegat vertoont een trend van verdrinking, maar hier groeien de litorale platen juist wel mee. Gemiddeld over het gehele kombergingsgebied is de sedimentvolumeverandering van de Zoutkamperlaag in evenwicht met zeespiegelstijging, alleen groeit hier het litoraal (de platen en de kwelders) niet mee.

- Hoe ziet de ontwikkeling van het kombergingsoppervlak eruit en wat is de relatie met het natte oppervlak van de zeegaten?

Geaggregeerd over de Centrale Waddenzee blijft het oppervlakte vrijwel gelijk met een gemiddelde van 525 km² (excl. Lauwerszee en Engelsmanplaat). Het verschil in oppervlakte tussen 2024 en 1926 bedraagt 0.5% (2.7 km²). Een duidelijke trend in ontwikkeling is niet te maken; hiervoor zijn de variaties tussen de metingen te groot.

De kleine toename van de gehele Centrale Waddenzee is niet geheel representatief voor de veranderingen van de individuele kombergingsgebieden. Het kombergingsgebied Borndiep neemt met zo'n 5% af tot 315 km². In de meest recente metingen (2011-2024) neemt het oppervlakte wel iets toe +2.65 km² (+ 0.25 km²/jr.). Het is nog niet geheel duidelijk of dit een tijdelijke omslag is of een doorgaande ontwikkeling.

Het Pinkegat is het kleinste kombergingsgebied binnen de Centrale Waddenzee (62 km²), maar dit oppervlak vertoont relatief grote variaties in de tijd. De relatief grote variatie van afname gevolgd door toename tussen 1971 en 2011 lijkt een respons op afsluiting van de Lauwerszee te zijn. De recente, stabiele ligging van het wantij onder de Engelsmanplaat geeft als indicatie dat het wantij een nieuwe evenwichtsligging heeft bereikt.

De omvang van het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag is sterk beïnvloed door de afsluiting van de Lauwerszee. Het oppervlakte tussen 2011 en 2024 is redelijk stabiel tussen de 146-147 km². Er treden in deze periode nog wel veranderingen op in de ligging van het wantij, maar de oostelijke verplaatsing in het centrale deel wordt gecompenseerd door een westelijke verplaatsing van het zuidelijke deel van het wantij, waardoor de verandering in oppervlakte beperkt lijkt te zijn.

Binnen deze studie zijn de natte oppervlakten van de zeegaten niet bepaald, waardoor dit deel van de vraag niet direct beantwoord kan worden. Voor de verhouding oppervlakte – geuldoorsnede over de periode 1985-2024 wordt verwezen naar Wagenaar (2024).

- Wat is de ontwikkeling van de kwelder, wadplaten en sublitoraal en hoe verhouden deze verschillende zones zich tot elkaar?
- Hoe ziet de toekomstige ontwikkeling van de bekkens eruit, specifiek gericht op oppervlakte en volume van de verschillende arealen (geulen, litoraal, sublitoraal en kwelder)?

Deze deelvraag vormt de basis van de analyses gepresenteerd in Hfdst. 3, Hfdst. 4 en Hfdst. 5 voor beantwoording van deze vraag wordt dan ook naar de betreffende hoofdstukken verwezen. Een schatting van de ontwikkeling van de verschillende arealen per kombergingsgebied wordt getoond in Figuur 6-2, Figuur 6-3 en Figuur 6-4. De huidige trends zijn gebaseerd op lineaire trendlijnen en extrapolatie hiervan vormt ook de beste schattingen voor de toekomstige ontwikkeling. Deze extrapolatie geeft waarschijnlijk een redelijke schatting op een tijdschaal van 5-10 jaar.

- Er kan in een aantal Waddenbekkens een verschuiving/aanpassing van het geulensysteem van het meest zuidelijke systeem naar de meest noordelijke geul worden waargenomen. Is deze trend ook zichtbaar in de Centrale Waddenzee en indien aanwezig, kan er dan een uitspraak gedaan worden over de toekomstige ontwikkeling van de geulensystemen?

Een gedetailleerde studie van de recente geulpatronen en veranderingen is binnen dit onderzoek niet uitgevoerd. Voorspellingen over de toekomstige ontwikkeling van de geulensystemen worden hier dan ook niet gegeven. De analyses bevestigen wel het beeld dat de (hoofd)geulen aan verandering onderhevig zijn. Bij voortzetting van de huidige trends zou

dit de grootschalige geulen kunnen beïnvloeden, wat ook een grootschalige invloed op de morfologie binnen de kombergingsgebieden kan geven.

In alle drie de kombergingsgebieden van de Centrale Waddenzee zijn trends en verschuivingen in de (hoofd)geulensystemen zichtbaar. Het Borndiep is in het verleden oostelijk verplaatst en speelt een belangrijke rol in de erosieproblematiek van de aanliggende eilandkop. Een recente verandering in het geulsysteem is de uitbouw van de Kromme Balg, het Borndiep in. Bij doorzetting van deze uitbouw kan dit resulteren in een (grootschalige) verandering van het geulensysteem, met daardoor ook gevolgen voor de morfologische veranderingen.

Het Pinkegat vertoont een afwisseling tussen een 1-geul en een meergeulensysteem. In het verleden trad deze verandering om de 40-50 jaar op, wat zou betekenen dat een omslag op een termijn van 5-10 jaar mogelijk is. Bij vorming van een 1-geulsysteem zal het bekken waarschijnlijk dieper worden, waardoor geul- en plaatarealen beïnvloed worden.

In de Zoutkamperlaag zijn grote veranderingen van de geulen in de keel van het zeegat zichtbaar. Op de buitendelta zijn 2 parallelle uitstroomgeulen ontstaan en aan de zuidzijde van Schiermonnikoog is het Binnenplaatgaat gevormd. Op termijn is het mogelijk dat er zo (tijdelijk) twee hoofdgeulen zijn. Het verdringen van de originele hoofdgeul door zo'n nieuwe geul is ook in het verleden opgetreden.

6.4 Aanbevelingen

In dit onderzoek is een grondige studie uitgevoerd naar de Centrale Waddenzee. Voor dit doel zijn de volumeveranderingen van de kombergingsgebieden, geulen en platen op een geaggregeerd schaalniveau vastgesteld. Dit heeft geleid tot een vernieuwd inzicht in de werking van de morfologie van de Centrale Waddenzee. Het belang van de gebruikte definities en begrenzingen is hierbij belangrijk gebleken. Zonder duidelijk afwegingskader is het eigenlijk niet eenvoudig om te zeggen of er verlanding, verdrinking of meegroeien plaatsvindt; afhankelijk van de schaal van aggregatie en de gebruikte kentallen kan er een andere conclusie worden getrokken. Gemiddeld kan een bekken verzanden, maar de platen ervan kunnen nog steeds verdrinken. Ook kan een bekken qua sedimentvolume wel meegroeien, maar qua gemiddelde hoogte dan weer niet. Het is essentieel om een afwegingskader van referentievlakken en kentallen te creëren, zodat de juiste analyses kunnen worden uitgevoerd en kentallen kunnen worden geëvalueerd.

Een tekortkoming van deze studie is dat er op basis van de geaggregeerde volumeveranderingen een beoordeling kan worden gemaakt over verlanding, verdrinking of meegroeien, maar de onderliggende mechanismen zijn nog niet grondig behandeld. Een grondige analyse van elk kombergingsgebied op het niveau van de geulen en platen is hiervoor cruciaal. Na een dergelijke analyse kunnen de vragen van Rijkswaterstaat, zoals weergegeven in Tabel 1-1, onderdeel C worden opgepakt. Deze uitgebreide studie zou de volgende elementen moeten omvatten:

(1). Gedetailleerde sedimentbalansen. Een gedetailleerde sedimentbalans van de individuele platen en geulen, of van de gebieden van sedimentatie-erosie, geeft inzicht in de regionale ontwikkelingen. Dit is niet alleen cruciaal voor de doorvertaling naar lokale beheerproblemen, maar ook voor het begrijpen van de werking van het verlandingsproces en of er variaties tussen de kombergingsgebieden optreden.

(2) Hydrodynamische modellering en geulanalyse. De geulensystemen zijn de fundamenteën van de bekkens. Een beter begrip van de verbinding tussen de hoofd- en nevengeulen is cruciaal om te begrijpen hoe deze geulensystemen evolueren en toekomstige veranderingen te voorspellen. Dit kan worden bereikt door een analyse van de ontwikkeling van de geulen in combinatie met hydrodynamische modellering. Door hydrodynamische modellering kunnen de

voortplanting en getijvolumes worden vastgesteld. Dit biedt een overzicht van de spreiding van watervolumes over de diverse geulen en de veranderingen die deze in de loop der jaren hebben doorgemaakt. Deze kennis stelt ons in staat om toekomstige veranderingen in het geulensysteem beter te doorgronden en te voorspellen. Deze analyses zijn belangrijk voor alle drie de kombergingsgebieden. In het kombergingsgebied van het Borndiep zijn er op dit moment al veranderingen in de hoofdgeul zichtbaar. Een toename van de in- en uitstroming van de Blauwe Balg resulteert in erosie in het zuidwestelijke gedeelte van Ameland. Daarnaast is er de doorgaande vaargeulproblematiek in de geul van Holwerd naar Ameland. In het Pinkegat lijkt er een verband te bestaan tussen het sedimentvolume en de configuratie van de geulen in het zeegat. Deze tonen een variatie tussen een 1-geulconfiguratie en een meergeulconfiguratie op een tijdschaal van 40 tot 50 jaar. Het sedimentvolume in het bekken neemt toe bij een meergeulenconfiguratie en daalt bij een 1-geulconfiguratie. Aan de hand van deze cyclus lijkt het erop dat een overgang naar een 1-geulconfiguratie binnen 10 jaar haalbaar is. Dit zou kunnen resulteren in een vermindering van het sedimentvolume in het bekken. Omdat de bodemdaling door gaswinning in dit bekken ook een factor is, is het essentieel om inzicht te hebben in de effecten van de natuurlijke dynamiek versus de effecten van gaswinning. De geulen van de Zoutkamperlaag ondergaan ook aanzienlijke veranderingen. De geul Binnenplaatgat lijkt steeds omvangrijker te worden. Een beter begrip van de processen en mechanismen die deze ontwikkeling mogelijk maken, is essentieel voor het formuleren van een toekomstvoorspelling. Als het Binnenplaatgat een gedeelte van de functie van de hoofdgeul overneemt, kan dit leiden tot aanzienlijke veranderingen in het bekken.

Daarnaast is morfologische modellering een essentiële aanbeveling voor toekomstig onderzoek, naast de eerder genoemde aanvulling op het huidige onderzoek. Morfologische modellering omvat in wezen twee fasen. Eerst worden simulaties uitgevoerd om het systeem beter te doorgronden (morfostatische modellering) en daarna worden er simulaties uitgevoerd die zich richten op een voorspelling van de toekomst (morfodynamische modellering).

(1). *Morfomorfostatische modellering.* Bij morfostatische modellering worden naast de stromingen ook de sedimenttransporten opgelost, maar er vindt geen bodemverandering plaats. Door deze simulaties te implementeren op bijvoorbeeld diverse gemeten bodems (zoals gebruikt in de hydrodynamische simulaties) en de randvoorwaarden van de simulaties gelijk te houden, kan er onmiddellijk inzicht worden verkregen in de veranderingen in sedimenttransportpaden t.g.v. deze verschillende bodems. Door koppeling met SedTRAILS (Sediment Transport Visualization & Lagrangian Simulator) is het verder mogelijk om de verspreiding van sedimentdeeltjes te visualiseren en te analyseren. Dit inzicht kan ook gebruikt worden voor bijvoorbeeld het bepalen van de verspreiding vanuit stortlocaties.

(2). *Morfodynamische modellering.* Op dit moment is de voorspelling van de toekomstige ontwikkeling gebaseerd op data-analyse en expert-judgement. Het is momenteel nog niet direct haalbaar om deze ontwikkelingen te modelleren, op een periode van 5 tot 10 jaar, met behulp van morfodynamische modellering. De bestaande morfologische modellen, zoals Delft3D, bevatten in wezen de juiste morfologische processen om deze voorspellingen te kunnen uitvoeren. Deze modellen zijn echter nog beperkt en met wisselend succes ingezet voor de Waddenzee. Een deel van dit probleem komt door de complexiteit van de processen in de Waddenzee, maar een deel is ook te wijten aan het ontbreken van geschikte datasets voor morfologische afregeling. De grote veranderingen in de Zoutkamperlaag na de afsluiting en de beschikbare meetdata maken dit zeegat bijzonder geschikt voor het kalibreren, valideren en, indien nodig, verbeteren van de morfologische modellen. Een onderzoekstraject met behulp van een reeks afstudeerprojecten zou een efficiënte en geschikte methode zijn om de morfologische modellering verder te ontwikkelen.

- Beckerling Vinkers, 1943. De waterbeweging in het Borndiep. Report 73.3. Rijkswaterstaat, Studiedienst Hoorn. pp: 34.
- Biegel, E. & Hoekstra, P., 1995: Morphological response characteristics of the Zoutkamperlaag Inlet, Friesian Inlet, The Netherlands to a sudden basin area reduction. International Association of Sedimentologists. Special Publication 24: 85-99.
- Cowell, P.J., Stive, M.J.F., Niederoda, A.W., de Vriend, H.J., Swift, D.J.P., Kaminsky, G.M. and Capobianco, M., 2003a, 'The coastal-tract (part 1): a conceptual approach to aggregated modelling of low-order coastal change', Journal of Coastal Research, 19(4): 812 – 827.
- Cowell, P.J., Stive, M.J.F., Niederoda, A.W., Swift, D.J.P., de Vriend, H.J., Buijsman, M.C., Nicholls, R.J., Roy, P.S., Kaminsky, G.M., Cleveringa, J., Reed, C.W. and de Boer, P.L., 2003b, 'The coastal-tract (part 2): Applications of aggregated modelling of lower-order coastal change', Journal of Coastal Research, 19(4): 828 – 848.
- De Beer, A.F., Vermeer, N.P., Elias, E.P.L., Lohr, J. 2024. Morfologie van de eilandkoppen van het Zeegat van het Vlie. Rapport 11210366-004-ZKS-0001, Deltares, Delft, 126 p.
- de Boer, M., Kool, G., Lieshout, M.F., (1991). Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van Ameland, 1926-1984. Report ANCX-91.H202, Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland.
- De Kruif, A.C., 2001. Bodemdieptegegevens van het Nederlandse Kuststelsysteem; 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.
- de Wit, L., Grasmeijer, B., van Kessel, T., Dees, N., Meijers, C., Quataert, E. (2024). Abiotische effecten baggeren en verspreiden in de Waddenzee. Voorbereidende studie voor het opstellen van het tweede Natura2000 beheerplan Waddenzee. Rapport 11210370-014-ZKS-0001, Deltares, Delft, 138 p.
- Digipol, 1997. Gebruikershandleiding Digipol, 1997. versie 1.0. beheerder RWS/RIKZ.
- Ebbens, E., 2022. Eindrapportage pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat Beschouwing morfologische en ecologische resultaten na aanleg van een pilotsuppletie op de buitendelta van het Amelanders Zeegat. Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 66 p.
- Elias, E.P.L., 2006. Morphodynamics of Texel Inlet. PhD Thesis. Delft University of Technology. Delft University Press (Delft): 261 pp. (<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:92ad4ac0-9d54-4f5f-8536-80b7782a6aa6?collection=research>)
- 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, Geologie en Mijnbouw, 91–3: 293-310.
- Elias, E.P.L. (2018). Een actueel sedimentbalansmodel van de Waddenzee. Rapport 11202190-000-ZKS-013, Deltares, Delft, 62 p.
- Elias, E.P.L., Wang, Z.B., 2020. Sedimentbalans Waddenzee. Synthese ten behoeve van Technisch Advies Kustgenese 2.0. Rapport 1220339-007-ZKS-0010, Deltares, Delft, 29 p

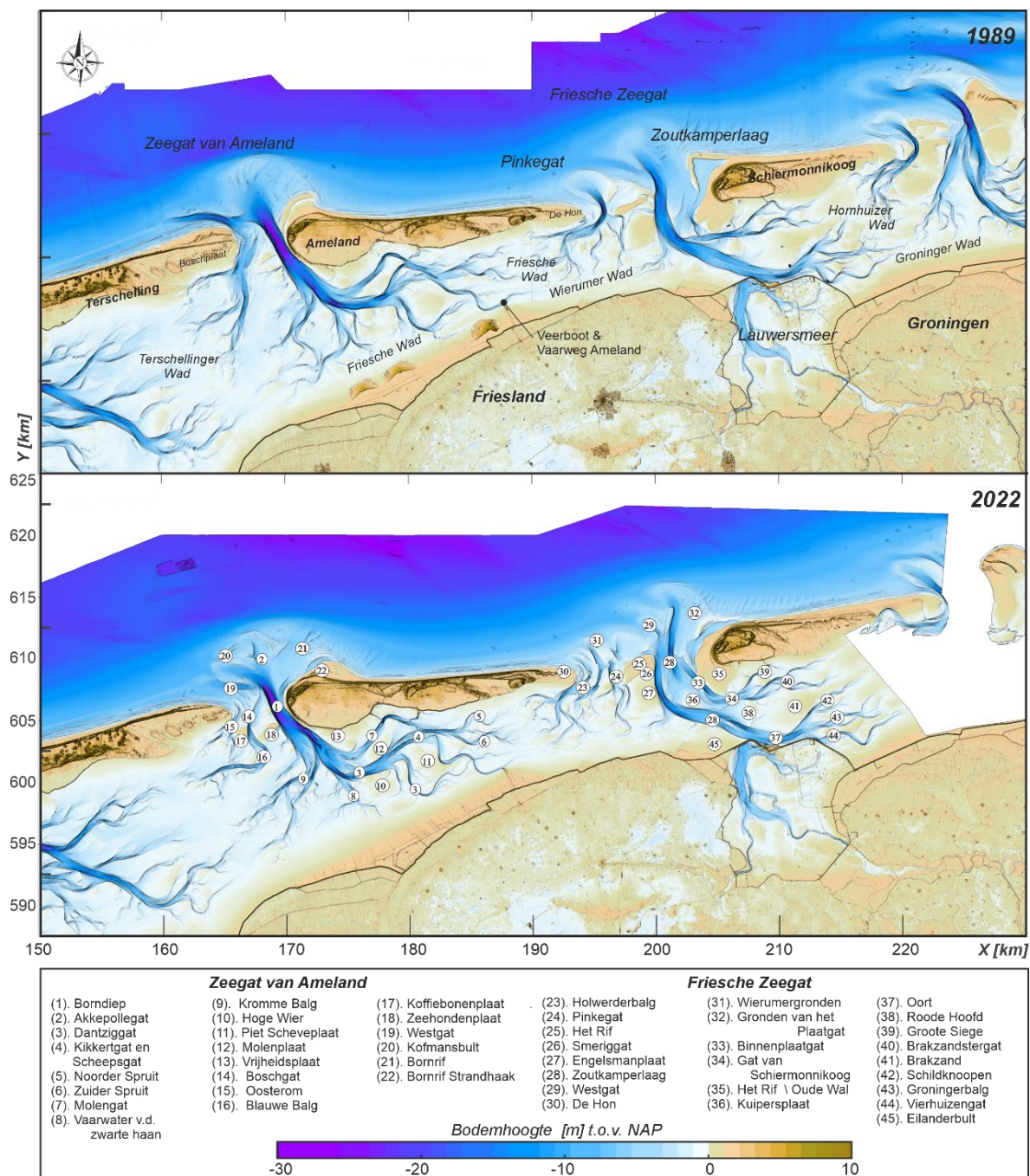
- Elias, E.P.L., 2021a. Morfologie van het Groninger Wad en de Rottums. Rapport 11207897-002, Deltares, Delft, 108 p.
- Elias, E.P.L., 2021b. De morfologische ontwikkeling van de Boschplaat – Terschelling. Rapport 11205236-003, Deltares, Delft, 49 p.
- Elias, E.P.L., 2021c. Morfologische analyse buitendelta Ameland en de rol van de pilotsuppletie. Rapport 11206794-004-ZKS-0006, Deltares, Delft, 84 p.
- Elias, E.P.L., en Oost, A.P. (2021). Morfologische processen van het Friese Zeegat Een conceptueel model. Rapport 11205236-003-ZKS-0005, Deltares, Delft, 130 p.
- Elias, E.P.L., Alonso, A. C., van Maren, B., 2022. Morfologische veranderingen Eems-Dollard en Groninger Wad. Rapport 11203742-000. Deltares, Delft, 148 p.
- Elias, E.P.L., 2024. Bodemkaarten van de Waddenzee. Een overzicht van data en bodemkaarten: werkdocument versie 1 - 2024, Rapport 11210266-015, Deltares, Delft, 112 p.
- Elias, E.P.L., Quataert, E., Taal, M., Vermeer, N., 2024. Sedimentbalans Nederlandse Kust, rapport 11207897-002-ZKS-0007, Deltares, Delft, 209 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. 52 pp.
- 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. 56 pp.
- 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. 52 pp.
- Glim, G.W., N., Kool, G., Lieshout, M.F., de Boer, M. (1987). Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van Texel 1932-1983. Report ANWX-88.H204, deelonderzoek 1. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 56 pp.
- Glim, G.W., Kool, G., Lieshout, M.F., de Boer, M. (1988a). Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van het Vlie 1932-1983. Report ANWX-88.H204, deelonderzoek 3. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 56 pp.
- Glim, N., Kool, de Graaff, N., G., Lieshout, M.F., de Boer, M. (1988b). Erosie en sedimentatie in de buitendelta van het Zeegat van Texel en aangrenzende kuststroken 1925-1981. Report ANWX-88.H201, deelonderzoeken 5 en 9. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 58 pp.
- Glim, G.W., Kool, G., Lieshout, M.F., de Boer, M. (1989). Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Eierlandse 1934-1982. Report ANWX-89.H202, deelonderzoek 2. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 56 pp.
- Glim, G.W., Kool, G., Lieshout, M.F., de Boer, M. (1990). Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Eierlandse Gat en de aangrenzende kuststroken 1926-1983. Report ANWX-90.H204, deelonderzoeken 6 en 10. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 56 pp.

- Grasmeijer B.T., Jaksic, L. Vroom, J., 2022. Verkenning morfologische ontwikkeling westelijke Waddenzee. Rapport 11208040-005-ZKS-0001, Deltares, Delft, 96 p
- Hoogervorst, R.D.N., 2005. Inventarisatie bagger-, stort- en zandwingegevens binnen de -20 m NAP. Ten behoeve van een zandbalans van het Nederlands kuststelsel. Werkdocument RIKZ/KW/2005.103W, Rijkswaterstaat, 59 p.
- Mestdag, S. (2024). Kennisoverzicht en aanbevelingen schelpenwinning Waddenzee. Memo 11210370-013-ZKS-001, Deltares, Delft, 12 p.
- Meijers, C., van Weerdenburg, R., Grasmeijer, B., Lenstra, K., Cleveringa, J., (2024). knelpuntanalyse Glinder en Groote Siege. Conceptueel model en handelingsperspectief voor knelpunten in de vaargeul Lauwersoog-Schiermonnikoog. Rapport 11209267-004-ZKS-0001, Deltares, Delft, 67 p.
- Rijkswaterstaat, 2021. Duurzame bescherming en ontwikkeling van dynamische Waddenzeenatuur. Morfologische Veranderingen. Brochure Rijkswaterstaat, 29 p.
- Rijzewijk, L. C. (1986). *Overzichtskarten zeegaten van de Waddenzee, 1976-1985 (in Dutch)*, Report 86.H208. Rijkswaterstaat RIKZ, The Hague.
- Oost, A.P., 1995. Dynamics and Sedimentary Development of the Dutch Wadden Sea with Emphasis on the Frisian Inlet. A Study of Barrier Islands, Ebb-Tidal Deltas, Inlets and Drainage Basins. Geologica Ultraiectiona, Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen 126, Utrecht University (Utrecht): 454 pp.
- Oost, A, Cleveringa, J., Taal, M., 2019. Kombergingsrapport Friese Zeegat. Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2020. Rapport 11205229-001-ZKS-0002, Deltares, Delft, 104 p.
- Oost, A, Cleveringa, J., Taal, M., 2017. Morfologie Kombergingsgebied Borndiep. KPP 2017 BO03 Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden. Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2020. Rapport 11200521-001-ZKS-0004, Deltares, Delft, 128 p
- Oost, A.P. & De Haas, H., 1992. Het Friese Zeegat, morfologisch-sedimentologische veranderingen in de periode 1970-1987, een getijde inlet systeem uit evenwicht. Deel 1 and 2, rapport Kustgenese, 68 pp. and 22 Figs.
- Oost, A.P. & De Haas, H., 1993. Het Friese Zeegat, morfologisch-sedimentologische veranderingen in de periode 1927-1970, cyclische veranderingen in een tidal-inlet systeem, 96 pp. and 15 Figs. Oost 1995,
- Postma, J.T., Reenders, 1986. Morfologische en hydraulische gevolgen van de afsluiting van de Lauwerszee voor het stroomgebied van het Friese Zeegat en de vaarweg naar Lauwersoog in het bijzonder. Nota 84.21. Rijkswaterstaat, dienst getijdewateren, Groningen, 64 p, + bijlagen.
- Steijn R.C., 2005. Huidige en toekomstige sedimentatie in het Kikkertgat. Rapport A1448, Alkyon, Emmeloord, 161 p.
- Studiedienst Hoorn, 1973. De waterbeweging in het Borndiep. Report 73.3 (in Dutch). Rijkswaterstaat, Studiedienst Hoorn.
- Stolte, W. Baart, F., Muis, S., Hijma, M., Taal, M. LeBars, D., Drijfhout, S. en anderen, 2022. Zeespiegelstijgingmonitor 2022, Rapport Deltares 11209266-000-ZKS-0001, Deltares, Delft, 151 p.
- Timmer, 2000. Stroomleidam Ballumerbocht Ameland. Advies notitie Ballumerbocht, Rijkswaterstaat, Directie Noord-Nederland, 13 p.

- Van Sijp, D. 1989a. Erosie vooroever Lauwersmeerdijk in relatie met de afsluiting van de Lauwerszee. Notitie ANW 89.19, Rijkswaterstaat, directie Friesland, 23 p.
- Van Sijp, D., 1989b. Correcties op Gemeten Eb- en Vloedvolume bij Omrekening naar Gemiddeld Getij in het Friese Zeegat. Report ANW 89-02 (in Dutch), Rijkswaterstaat, Directie Friesland, Leeuwarden.
- Van der Spek, A.J.F., 1994. Large-Scale Evolution of Holocene Tidal Basins in The Netherlands. Ph.D. Thesis, Utrecht University (Utrecht).
- Van der Spek, A.J.F., 1995. Reconstruction of tidal inlet and channel dimensions in the Frisian Middelzee, a former tidal basin in the Dutch Wadden Sea. In: Flemming, B.W., Bartholomä, A. (Eds.), Tidal Signatures in Modern and Ancient Sediments. International Association of Sedimentologists, Special Publication 24. Blackwell Science, Oxford, pp. 239-258.
- Van Weerdenburg, R., Pearson, S., van Prooijen, B., Laan, S., Elias, E., Tonnon, P.K., Wang, Z.B., (2021). Field measurements and numerical modelling of wind-driven exchange flows in a tidal inlet system in the Dutch Wadden Sea. Ocean and Coastal Management 215, 12 p.
- Vermeer, N., Quataert, E., Hijma, M., IJff, S., 2022. Beheerbibliotheek Kust Schiermonnikoog. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11208035-002-ZKS-0005, Deltares, Delft, 81 p.
- Vermeer, N., Hijma, M., Maarse, M., Quataert, E., 2023. Beheerbibliotheek Kust Ameland. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11209263-002-ZKS-0002, Deltares, Delft, 79 p.
- Verhoeff, S., 2018. Het zeegat van Ameland. Het digitaliseren van historische zeekaarten. Master Thesis (in Dutch), Maritiem Institute Willem Barentsz, Ocean Technology, Terschelling. Data.
- Vroom J., 2011. Tidal divide, a study on a simplified case and the Dutch Wadden Sea, Msc thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geo Sciences.
- Villars, N., van Kessel, T., Winterwerp, H., Wang, Z.B., Briere, C., de Lucas Pardo, M., Cleveringa, J., van Rijn, L., Herman, P.M.J., (2016). Analyse vaargeul Holwerd-Ameland. Verkennende studie naar maatregelen om vertragingen en baggerbezwaar op te lossen. Rapport 11208040-005-ZKS-0001, Deltares, Delft, 96 p.
- Wagenaar, M., 2024. Morphologic Characteristics of the present-day Wadden Sea 1985-2023. Internship report, Deltares – Utrecht University, 214 p.
- Wang, Z.B., Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Lodder, Q.L., 2018. Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw, 97-3, p. 183-214.
- Witteveen & Bos, 2022. Vervolgonderzoek bereikbaarheid Ameland 2030. Systeemanalyse morfologie inclusief verwachte ontwikkelingen tot 2100. Rapport 126248/22-007.365, 124 p..

A Aanvullende data en kaarten

A.1 Platen en geulen van de Centrale Waddenzee



Figuur A- 1: Een overzicht van de geulen en platen van de Centrale Waddenzee voor de representatieve jaren 1989 (boven) en 2022 (onder). De bodemdata zijn afkomstig uit de Vaklodingen datasets. Waar nodig zijn missende datapunten aangevuld met de omliggende jaren. De centrale delen van de eilanden zijn gebaseerd op het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN-4). Naamgeving volgt de kombereingsrapportages van Oost en Cleveringa (2018, 2020).

A.2 Een overzicht van ingrepen

A.2.1 Afsluitingen van de Lauwerszee

Het Friese Zeegat onderging een grote verandering met het afsluiten van de Lauwerszee in 1969. De Lauwerszee werd waarschijnlijk gevormd in de vroege Middeleeuwen (~600-800 A.D.) waarna het estuarium steeds meer in omvang toenam. Landaanwinning kwam rond 1240 A.D. op gang en in de loop der eeuwen werden grote delen van de Lauwerszee ingepolderd. Plannen om de Lauwerszee volledig af te dammen werden al in 1600 gemaakt, maar de watersnood van 1953 gaf de doorslag bij de besluitvorming tot definitieve afsluiting. De werkzaamheden begonnen in 1961 met de aanleg van een werkhaven bij Oostmahorn en in 1965 was de Lauwerszee dan vrijwel afgesloten, alleen een sluitgat van 900 m was nog open. Dit gat werd met 25 betonnen caissons gedicht in 1969. In de 13 kilometer lange afsluitdijk zijn spuisluizen en een schutsluis aangelegd. Door het indammen van de Lauwerszee ontstond een binnendijks gebied van ruim 9100 hectare, dat deels uit water en deels uit kwelderland bestond (Figuur A- 2). Het open water kreeg een constant waterpeil van -0,93 m NAP, waardoor het grootste deel van de kwelders en zandplaten permanent droogviel.



Figuur A- 2: Topografische kaart van natuurgebied Lauwersmeer
(<https://nl.m.wikipedia.org/wiki/Bestand:Natuur-Lauwersmeer-2014Q1.jpg>).

A.2.2 Dijken, dammen en kwelders

Langs de gehele huidige Waddenzeekustlijn zijn dijken aanwezig. De voorlopers van deze dijken werden al in de 9^{de} en 10^{de} eeuw aangelegd. Ze omringden kleinere gebieden om akkers tegen de meeste wintervloeden te beschermen. Rond 1000 A.D. waren lage lokale zomerdijken al wijdverspreid (Van der Spek, 1994; Oost 1995) en rond 1400 A.D. ontstond zo al een doorlopend systeem van winterdijken langs de gehele Waddenkust van het vasteland (Figuur A- 3). Rond de 19^{de} eeuw ontstond een kustlijn zoals we die nu kennen qua bedijking en in de 20^{ste} eeuw werden de grote estuaria (Zuiderzee en Lauwerszee) afgesloten en blijft alleen de Eems-Dollard nog als estuarium aanwezig.

Deze dijken en afsluitdammen zorgen voor een veilig achterland, maar hebben een grote invloed op de morfologie in het overgebleven deel van de Waddenzee. Het oppervlakte van de getijdenbekkens is drastisch afgenomen, waardoor getijprisma's, -stromingen en waterstanden wijzigen en morfologische veranderingen optreden. De afsluitingen van zowel de Zuiderzee en Lauwerszee hebben geresulteerd in een grote sedimentimport het bekken in, waardoor geulen zijn verzand en opgeslibd (Elias et al. 2012).



Figuur A- 3: Bedijkingsgeschiedenis van Noord-Nederland grenzend aan de Centrale Waddenzee. Uitsnede uit de kaart van Rijkswaterstaat (2021), p. 25.

In het kombergingsgebied van het Amelander Zeegat zijn een drietal (kleinschalige) dammen aangelegd. In het verleden is ook getracht het eiland met het vasteland te verbinden door het aanleggen van een dam over het wantij: 'dam van Teding Berkhout'. Deze dam is tussen 1871-1872 aangelegd als een eerste stap tot inpoldering van de Waddenzee. De dam had een hoogte van ongeveer een +0.5 m boven het hoogwaterpeil, maar werd door stormen in het najaar van 1981 en voorjaar van 1982 vernield. Herstelwerkzaamheden werden daarna niet meer uitgevoerd. Restanten van de dam zijn bij laagwater nog te zien op het wantij. De huidige veerdam bij Holwerd, die zo'n 2 km de Waddenzee insteekt, is over de restanten van de oude dam heen gebouwd. Dit begon als klein looppad met steiger (1882) en groeide uit tot de huidige dam door uitbreidingen in 1947 en 1959.

Een tweede dam ligt in het Molengat (in de Ballumerbocht) en is aangelegd rond 1900 (Timmer, 2000), maar staat wel al ingetekend op de 1892-hydrografische kaart. De dam is

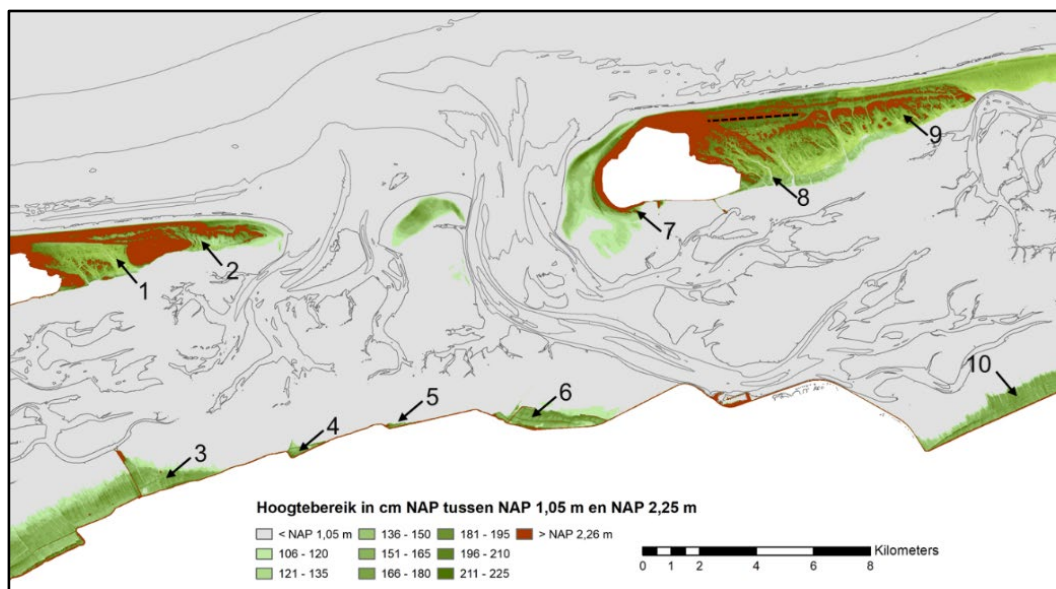
oorspronkelijk aangelegd om geul Molengat uit de kust te houden en bestaat uit de stroomleidam zelf en een aan de dam gekoppelde loskade. Aan de waddenzezijde ligt het Molengat tegen de kop van de dam, deze geul is hiermee op deze plek gefixeerd. Ten oosten hiervan ligt nog een derde dam, het aanleghoofd van de veerhaven. De oorsprong van deze dam ligt rond 1889 met de aanleg van houten aanlegsteigers, en deze werden in de jaren dertig uitgebreid. In 1959 werd dan een nieuwe, langere dam gebouwd op de huidige locatie.

Kwelders

De landaanwinningen en bedijkingen hebben ervoor gezorgd dat een groot deel van het kwelderareaal is verdwenen. Wel zijn een aantal kunstmatige kwelders ontstaan langs de Groningse en Friese vastelandkust door landaanwinningsswerken die niet bedijkt zijn, maar beheerd worden voor natuurlijke waarden. Deze kwelders zijn gecreëerd door rijshouten dammen aan te leggen, waarna aanslibbing kan optreden.

In de kombergings van het Pinkegat bevinden zich kleine kweldergebieden langs de Friese vastelandkust, links van de veerdam van Holwerd, en rechts daarvan de kwelders van Holwerd [3], It Skoar [4], De Kromme Horne [5], De Peazemerlannen [6]) (Figuur A- 4). Deze laatste kwelder is niet ontstaan door kwelderwerken, maar juist door een dijkbreuk in 1973, waardoor de achterliggende polder overstroomde en er een kweldergebied ontstaat. Op de eilandstaart van Ameland zijn twee natuurlijke kweldergebieden aanwezig. De kleinschalige kwelder van De Hon en de grotere, beweidde kwelder in Neerlands Reid (Figuur A- 4, 1 en 2). Deze laatste kwelder zijn deels ontstaan door de aanleg van een langgerekte stuifdijk, waardoor in de luwte de kwelder kon ontwikkelen.

In het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag is er een uitgebreid kweldergebied aanwezig langs de Groningse waddenzeedijk. Deze Groningerkwelders [10] hebben zich vooral in de 2^{de} wereldoorlog ontwikkeld door aanleg van uitgebreide kwelderwerken. Tegenwoordig gaat de ophoging van de kwelders nog wel door, maar is de aanslibingssnelheid minder dan 1 cm/jaar (Oost et al., 2020). Op Schiermonnikoog zijn de kweldergebieden Rif, Binnenkwelder-Oosterkwelder en de kwelder Oostpunt aanwezig (7, 8, 9). De kwelders Oostpunt hebben zich in de luwte van de stuifdijken die hier sinds 1950 zijn aangelegd ontwikkeld.

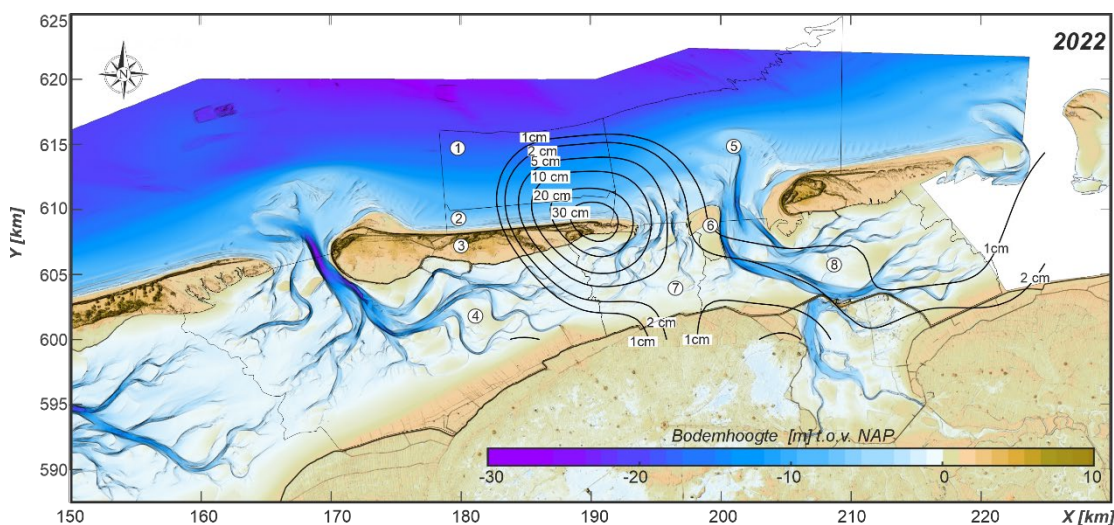


Figuur A- 4: Kaart met de kwelders rond de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag (Bron: Oost et al., 2020).

A.2.3 Gaswinning

In 1986 is gaswinning in het Waddengebied en de aangrenzende Noordzeekust van Ameland gestart. Deze gaswinning zorgt ervoor dat de diepe ondergrond lokaal daalt in de vorm van een dalingsschotel, waarbij het centrum van deze schotel onder de eilandstaart van Ameland ligt. Hier staat ook het boorplatform van de NAM. Sinds de start van de winning in 1986 is de totale daling in het midden van de kom bijna 40 centimeter (Figuur A- 5).

Op basis van de voorspelde schotel in 2021 zijn de oppervlaktes en volumes van de dalingsschotel afgeschat (Tabel A-1). In de geselecteerde gebieden (1-9 in Figuur A-5) bedraagt het totale verlies bijna 19 miljoen m³. De grootste verliezen treden op in de komberging van het Pinkegat (-4.7 miljoen m³) en onder de eilandstaart (-3.3 miljoen m³). Daarnaast zijn er kleine verliezen in het Borndiep (-0.8 miljoen m³) en onder de Engelsmanplaat (-0.1 miljoen m³). Het bekken en de buitendelta van de Zoutkamperlaag verliezen respectievelijk -2.2 miljoen m³ en -2.9 miljoen m³ aan sediment.



Figuur A- 5: Totale daling van de diepe bodem in cm door gaswinning sinds de start van de winning in 1987 tot 2021, volgens het gekalibreerde geomechanisch model van NAM en indeling in balansgebieden voor volumeberekening.

Tabel A-1: Overzicht van de invloed van bodemdaling op de Centrale Waddenzee op basis van de bodemdalingsschotel zoals weergegeven in Figuur A-5.

Gebied	Volume [10 ⁶ m ³]	Oppervlakte met daling > 0 cm [km ²]	Gemiddelde daling [cm]
1. Diepe Vooroever Ameland	2.95	54.03	5
2. Kustzone Ameland	3.34	18.86	18
3. Ameland Eiland	1.75	15.08	12
4. Bekken Amelanders Zeegat	0.80	51.68	2
5. Buitendelta Friese Zeegat	2.93	86.58	3
6. Engelsmanplaat	0.11	7.42	1
7. Pinkegat bekken	4.70	62.33	8
8. Zoutkamperlaag bekken	2.16	144.02	1
Totaal hele vak	18.74	440.00	4

A.2.4 Zandsuppleties en zand- en schelpwinning

Suppleties

Zandsuppleties worden niet direct in de Centrale Waddenzee geplaatst. Wel kan er toevoer optreden vanaf de eilandkusten. Sinds 1979 is er ruim 26 miljoen m³ aan zand langs de centrale eilandkust van Ameland gesuppleerd in de vorm van strand- en vooroever- en duinsuppleties. Deze suppleties hebben een directe invloed op het eiland, maar voeden ook de langtransporten die richting het Pinkegat-zeegat staan. Een deel van het suppletievolume zal ook bijgedragen hebben aan het invullen van de bodemdalingsschotel ten gevolge van de gaswinning. Naast de suppleties langs de centrale eilandkust van Ameland is er 8.6 miljoen m³ gesuppleerd om erosie van de noordwestzijde van de eilandkop tegen te gaan en is er in 2017-2018 een geulwandsuppletie van 2.5 miljoen m³ uitgevoerd in het Borndiep om de zuidwestelijke zijde van het eiland en daar aanwezige bestortingen te beschermen. In 2018-2019 is er een pilotsuppletie van 5 miljoen m³ aangebracht op de buitendelta van het Zeegat van Ameland (Elias, 2021c; Ebbens, 2022).

Op Terschelling is tot op heden slechts 1 vooroeversuppletie van 2 miljoen m³ aangebracht als pilot-experiment. Op Schiermonnikoog en op de buitendelta van de Zoutkamperlaag zijn tot op heden geen suppleties uitgevoerd.

Zand- en schelpenwinning.

Een overzicht van zand- en schelpwinning in de gehele Waddenzee wordt gepresenteerd in de kombergingsrapportages van Oost en Cleveringa (2017 en 2020). Uit deze rapportages volgt dat zandwinning gekoppeld aan het onderhoud van de vaargeulen, zoals is vastgelegd in de Beleidsregels ontgrondingen in Rijkswateren: "landwaarts van de doorgaande NAP -20 meter dieptelijn in de Noordzee kan alleen vergunning worden verleend voor: a. de zandwinning uit de vaargeulen...". Zandwinning uit putten, buiten en binnen de vaargeulen, zonder onderhoudsdoelstelling, is sinds 1998 niet meer toegestaan. Het volume zand dat mag worden gewonnen was maximaal 500.000 m³ per jaar (tot 2017), maar wordt afgebouwd met stappen van 100.000 m³ naar 0 in 2022. Over de periode 2012-2022 zou dit betekenen dat er 4 miljoen m³ aan zand gewonnen zou zijn. Uit deze rapportages volgt echter niet direct hoeveel zand- en schelpwinning er binnen de Centrale Waddenzee in totaal heeft plaatsgevonden.

Een inventarisatie van de bagger- en stortgegevens over de periode 1930-2002, met focus op de periode na 1955, is gemaakt door Hoogervorst (2005). Deze studie geeft aan dat er in het Amelandse Zeegat 10.1 miljoen m³ is gebaggerd en 9.4 miljoen m³ is teruggestort in de periode 1979-2002. Hoogervorst geeft aan dat het verschil te verklaren is door storting van 0.7 miljoen m³ in het Friese Zeegat. In totaal is er 5.2 miljoen m³ aan zand gewonnen tussen 1968 en 2002. In het Friese Zeegat zijn tussen 1982 en 2002 kleinschalige baggerwerken uitgevoerd met een totaalvolume van 6.3 miljoen m³. Het merendeel van het gebaggerde sediment is weer binnen het deelsysteem teruggestort. Daarnaast is er in het bekken 3.1 miljoen m³ aan zand onttrokken tussen 1963 en 1980. Na 1980 zijn er geen onttrekkingen meer aanwezig.

Een recente inventarisatie van de baggervolumes wordt gegeven door De Wit (2024). Uit deze rapportage volgt dat in het Borndiep de baggervolumes sterk zijn toegenomen sinds 1990 (de Wit, 2024). Het baggervolume bedroeg rond de 0.1 miljoen m³/jr. maar is toegenomen tot bijna 2 miljoen m³/jr in de piekjaren 2015 en 2020. In het Friese Zeegat is het baggervolume toegenomen van minder dan 0.05 miljoen m³/jr. in de beginjaren 90 naar 0.08-0.30 miljoen m³/jr. sinds 1995. Over de meest recente periode (2006-2023) variëren de volumes tussen de 0.1 en 0.3 miljoen m³/jr., waarbij het niet geheel duidelijk is wat deze significante jaarlijkse variaties veroorzaakt. In deze studie worden geen resultaten gepresenteert voor zandwinning.

Schelpenwinning is toegestaan in de diepe geuldelen (beneden de NAP -5 m diepte). Er mag dan jaarlijks maximaal 90.000 m³ gewonnen worden in de Waddenzee (Marsdiep, Vlie en Friese Zeegat). De notitie van Mestdag (2024) geeft aan dat het merendeel van de schepenwinning in het Zeegat van het Vlie plaatsvindt. In het Friese Zeegat is minder dan 6000 m³ gewonnen in de periode 2016 en 2022.

A.3 Bodemdata en kaarten

A.3.1 Hydrografische kaarten

Amelanders Zeegat en bekken

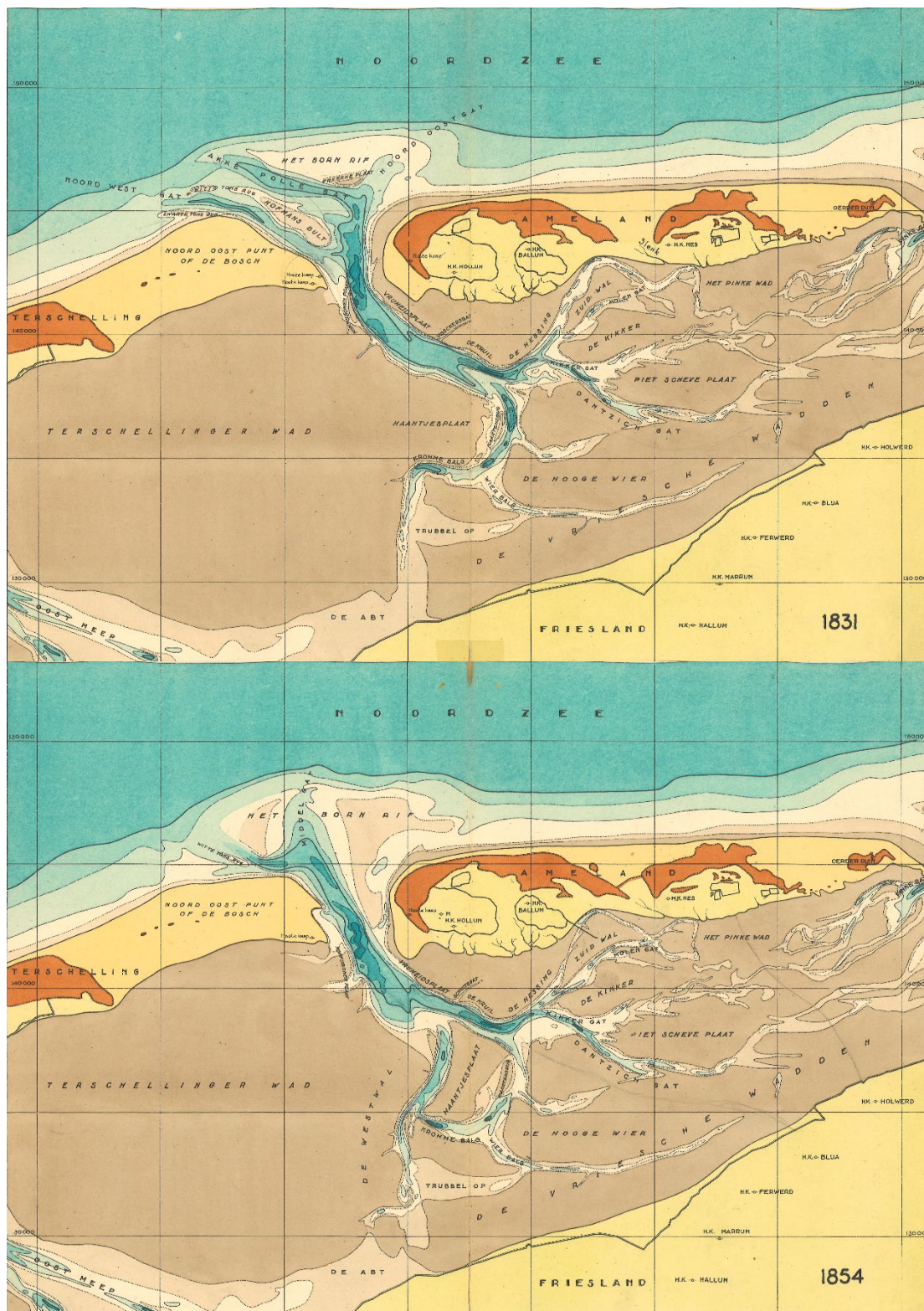
Hydrografische kaarten van het Amelanders Zeegat zijn beschikbaar sinds 1796 (Figuur 3 1). De 1796-opname is nog beperkt in detail, maar vanaf 1831 bevatten de kaarten meer details en zijn ze geschikt voor morfologische analyses van het bekken. Over de periode 1831 – 1985 zijn 19 kaarten voorhanden voor de jaren 1831, 1854, 1865, 1866, 1892, 1903-04, 1919-20, 1926-27, 1934, 1940, 1950, 1958-59, 1962, 1965-68, 1971, 1974 en 1982/85. Alle kaarten zijn beschikbaar als zwart-witdieptecontourenkaarten, maar een deel van deze kaarten is ook ingekleurd (de periode 1798-1940), waardoor plaat-geulontwikkelingen veel beter te volgen zijn (Figuur A- 6 - Figuur A- 10). Binnen het KPP-B&O-kustonderzoek zijn de kaarten georeferentieerd en omgezet naar ARC-GIS-dieptecontouren Verhoef (2018).

De oude kaarten bestaan niet altijd uit unieke data, maar soms zijn slechts delen opnieuw ingemeten, terwijl de rest van de kaart nog uit eerdere metingen bestaat. Dit geeft mede een verklaring voor perioden met stabiel gedrag die worden gevolgd door grote veranderingen. Deze bevindingen werden al gedocumenteerd door Beckering-Vickers (1943). Bijvoorbeeld, de kaart van 1854 en 1865 zijn voornamelijk gebaseerd op de 1831 kaart met alleen een nieuwe opname van de buitendelta. Tussen 1903 en 1919 hebben slechts gelimiteerde metingen van het bekken plaatsgevonden.

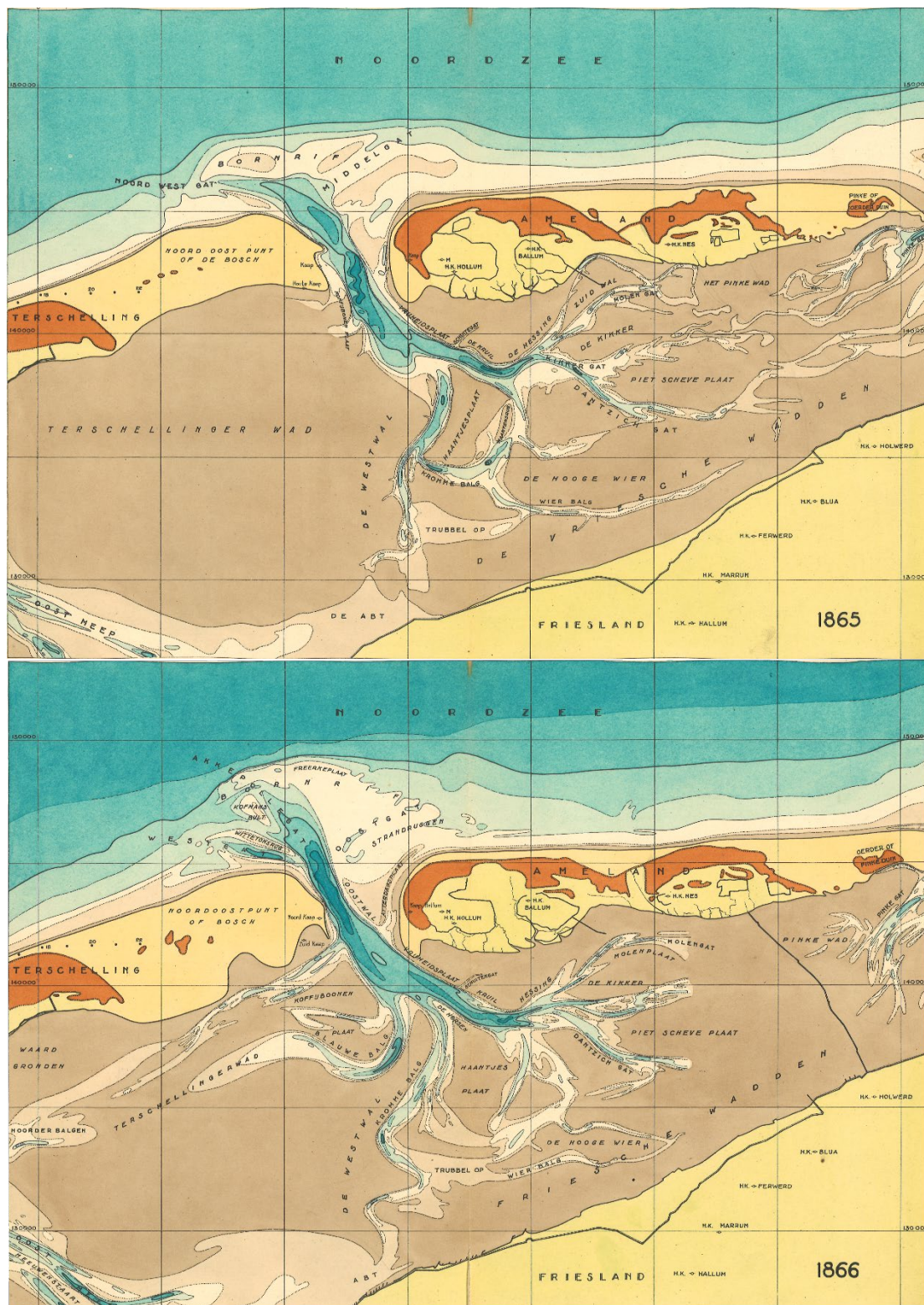
Friese Zeegat en bekken

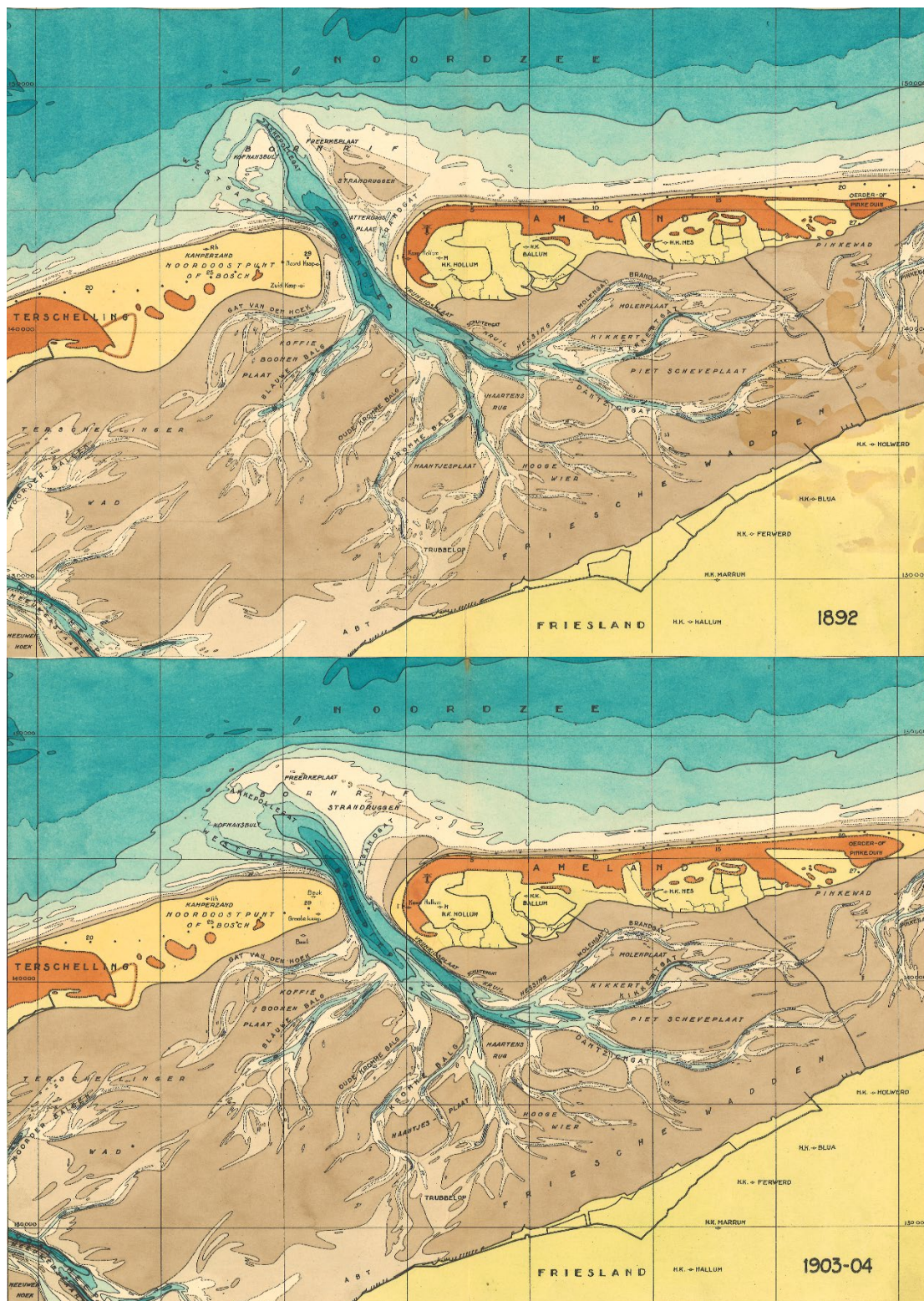
Hydrografische kaarten van het Friese Zeegat zijn beschikbaar vanaf 1806. De 1806-opname geeft echter enkel een beeld van het bekken en de Lauwerszee. De eerste gedetailleerde opname van de buitendelta is beschikbaar in 1832. Over de periode 1832 – 1958 zijn dan nog 11 kaarten voorhanden (1832, 1850, 1859, 1873, 1891, 1903, 1921, 1927, 1934, 1941, 1950 en 1960). Deze kaarten zijn opgenomen door de hydrografische dienst van de Koninklijke Marine. Tot 1941 zijn deze kaarten ingekleurd. De opname van 1950 en 1960 is niet beschikbaar als ingekleurde kaart, maar alleen als contourlijn. Deze bodems kunnen echter wel vanuit de Vaklodings-dataset worden gereconstrueerd.

Naast de complete kaarten is een serie detailkaarten over de periode 1970-1982 van het centrale deel van het bekken en de buitendelta beschikbaar als bijlage in de rapportage van Postma en Reenders (1986). Zie Figuur A- 11 - Figuur A- 18 voor weergave van de kaarten.

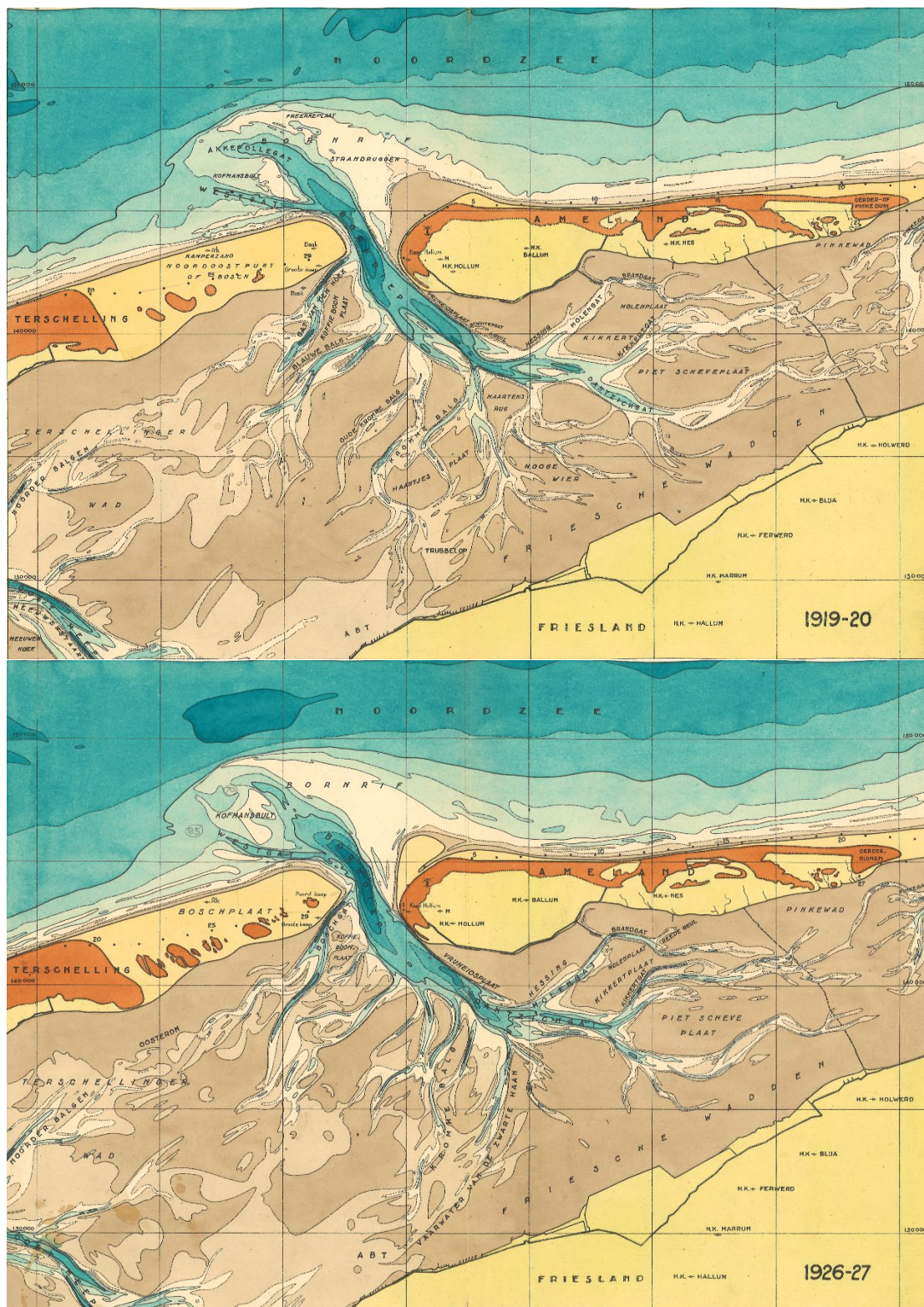


Figuur A- 6: Hydrografische kaart van het Amelander zeegat in 1831 en 1854.

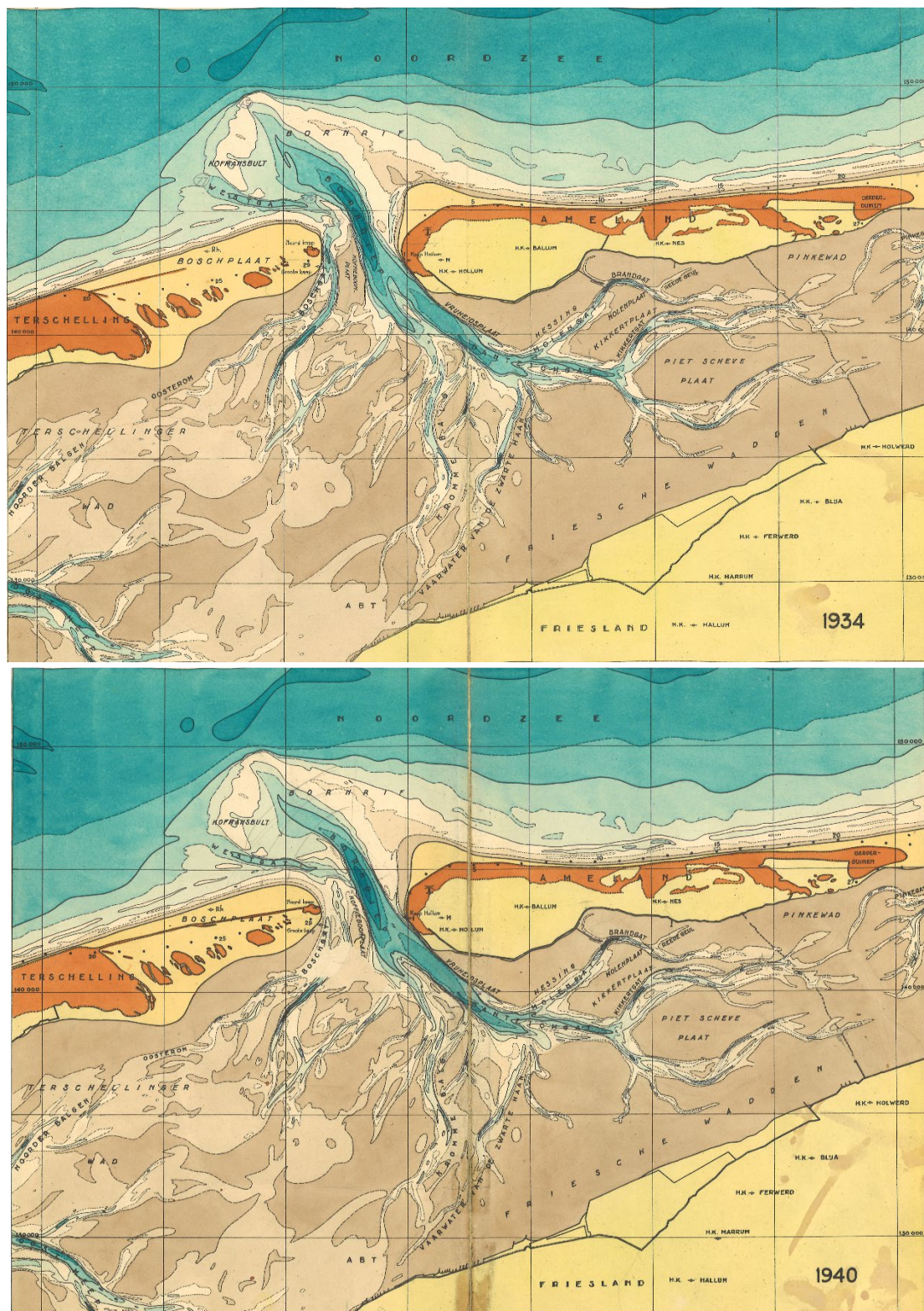




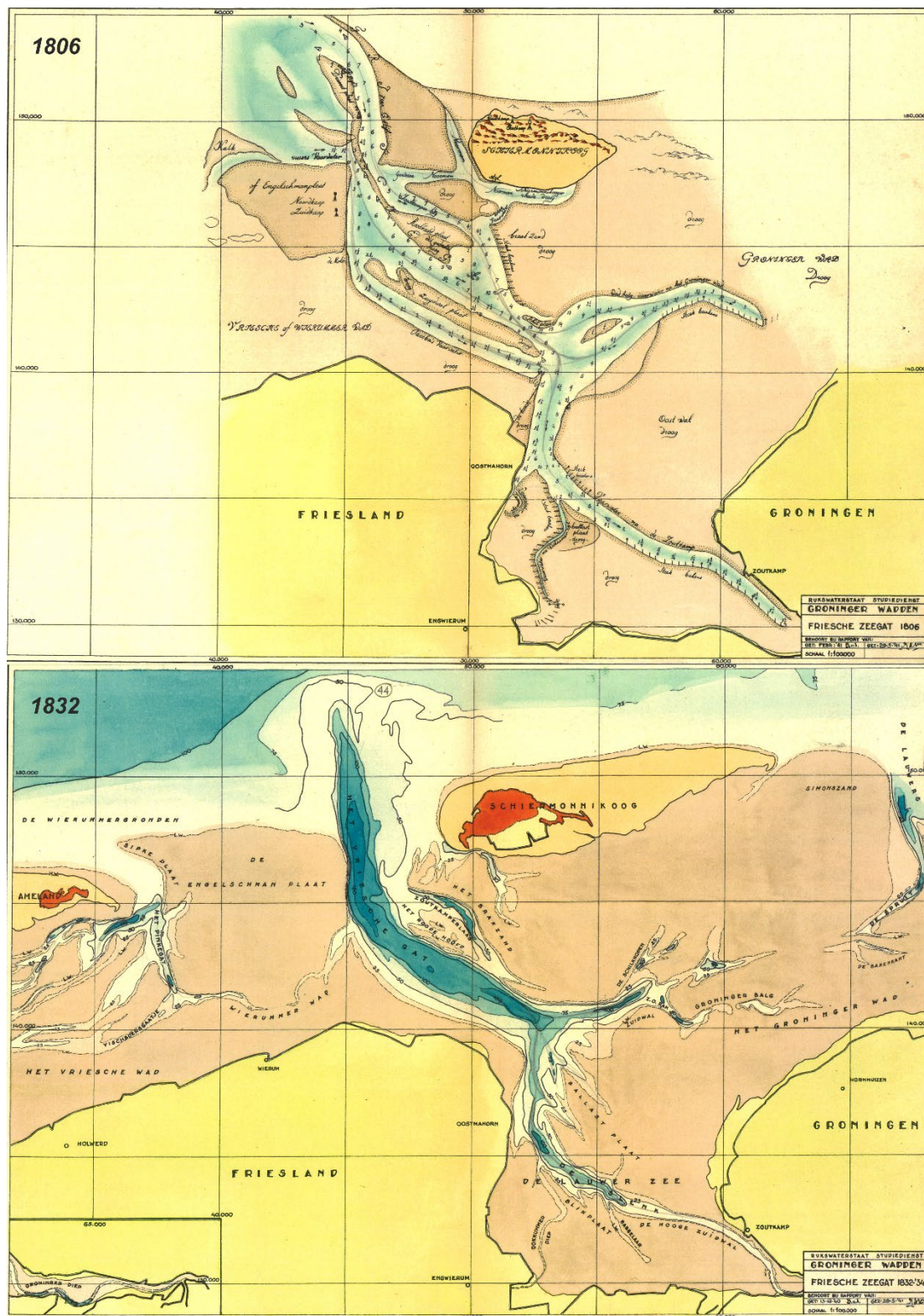
Figuur A- 8: Hydrografische kaart van het Amelanders zeegat in 1892 en 1903-04.



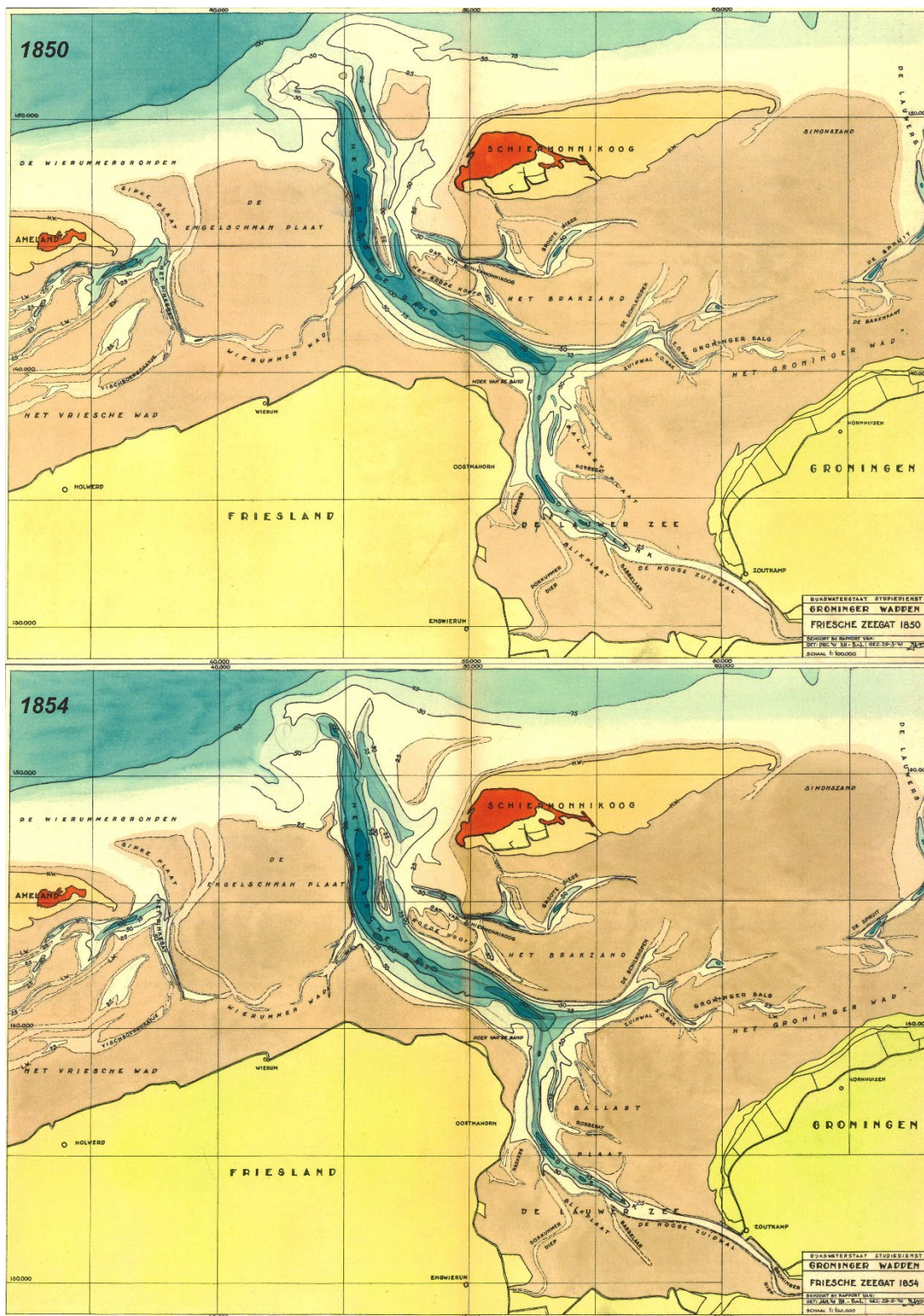
Figuur A- 9: Hydrografische kaart van het Amelanders zeeget in 1919-20 en 1926-27.



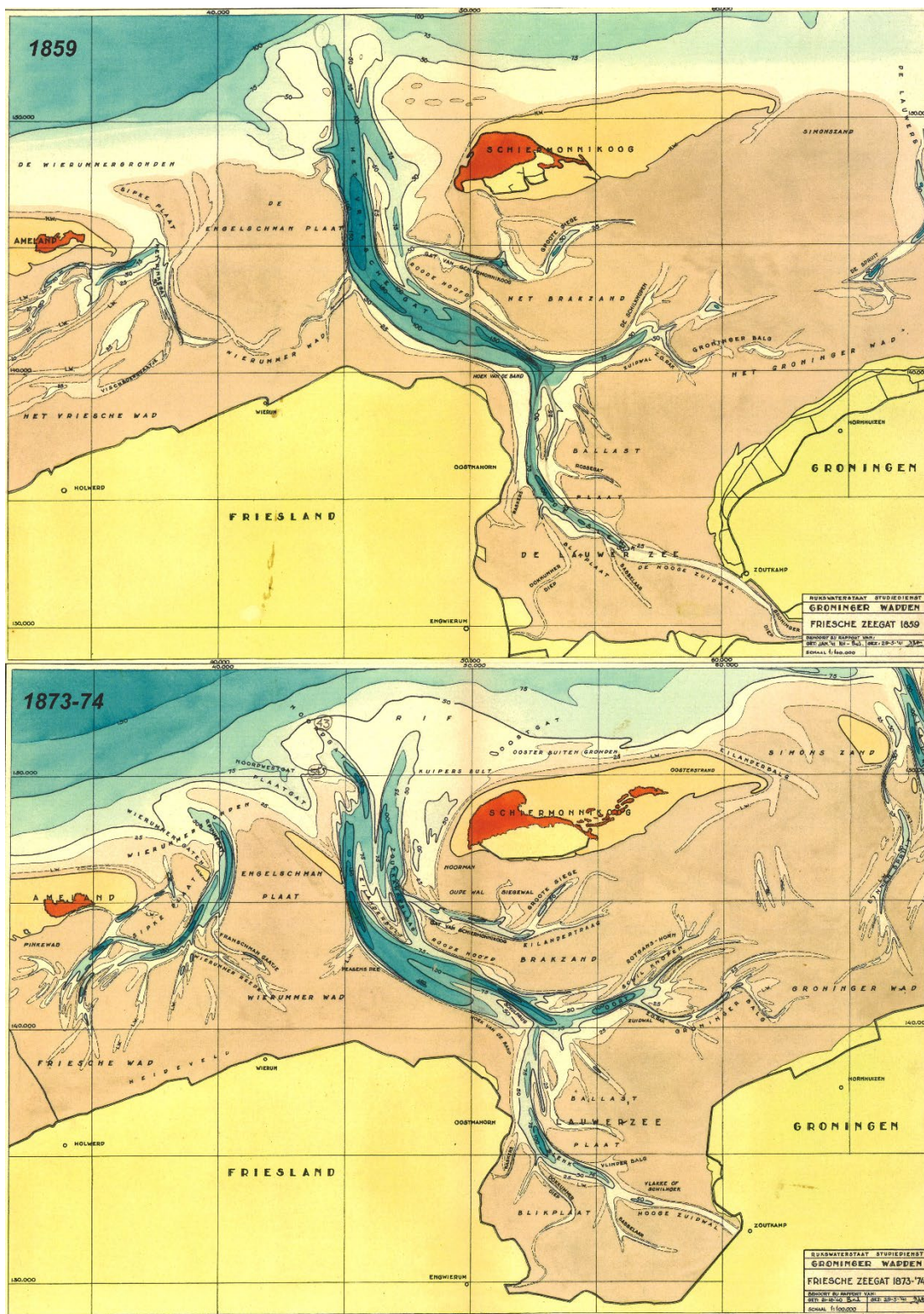
Figuur A- 10: Hydrografische kaart van het Ameland- en Friesche Zeegat in 1934 en 1940.



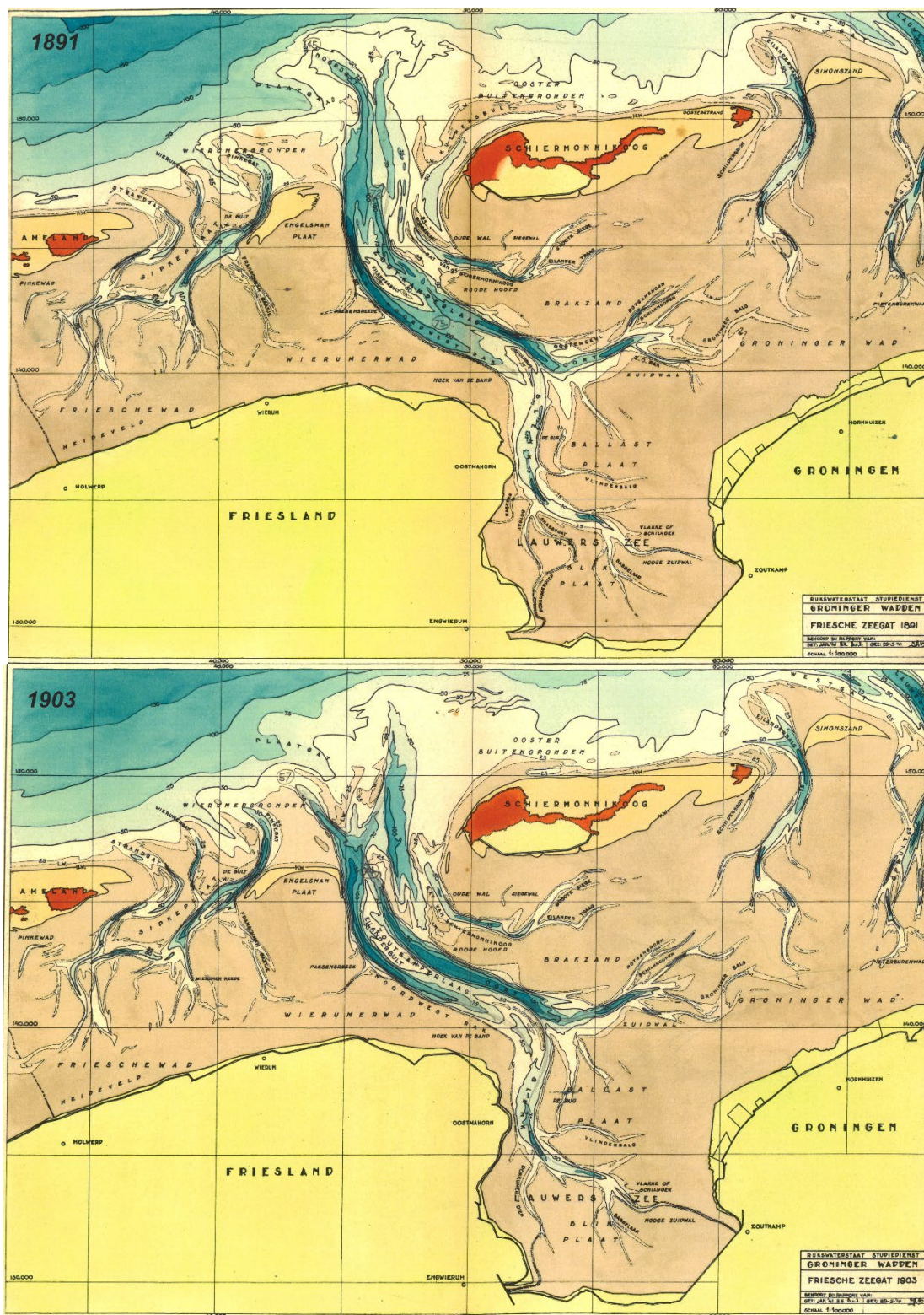
Figuur A- 11: Hydrografische kaart van het Friese Zeegat in 1806 en 1832.



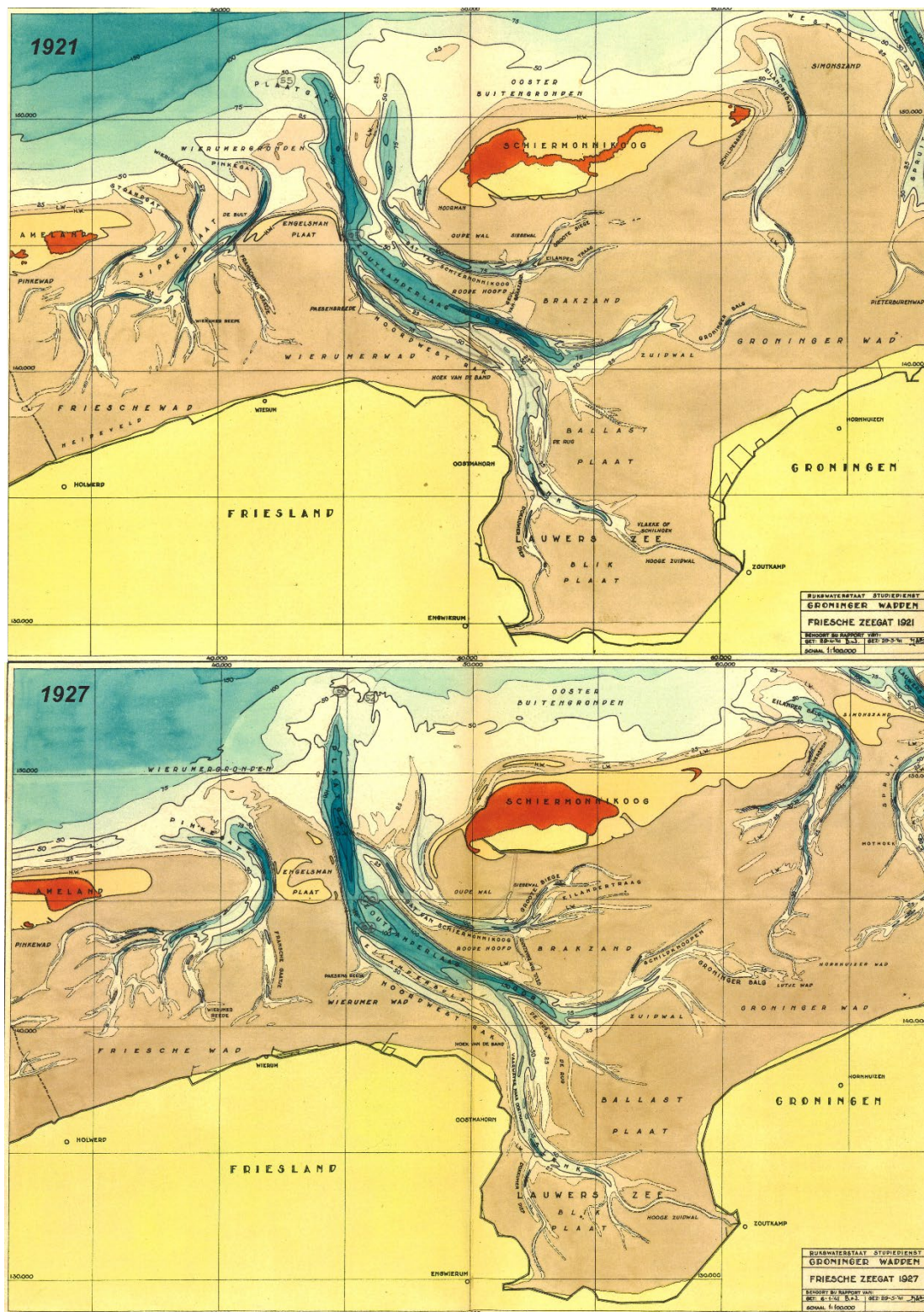
Figuur A- 12: Hydrografische kaart van het Friese Zeegat in 1850 en 1854.

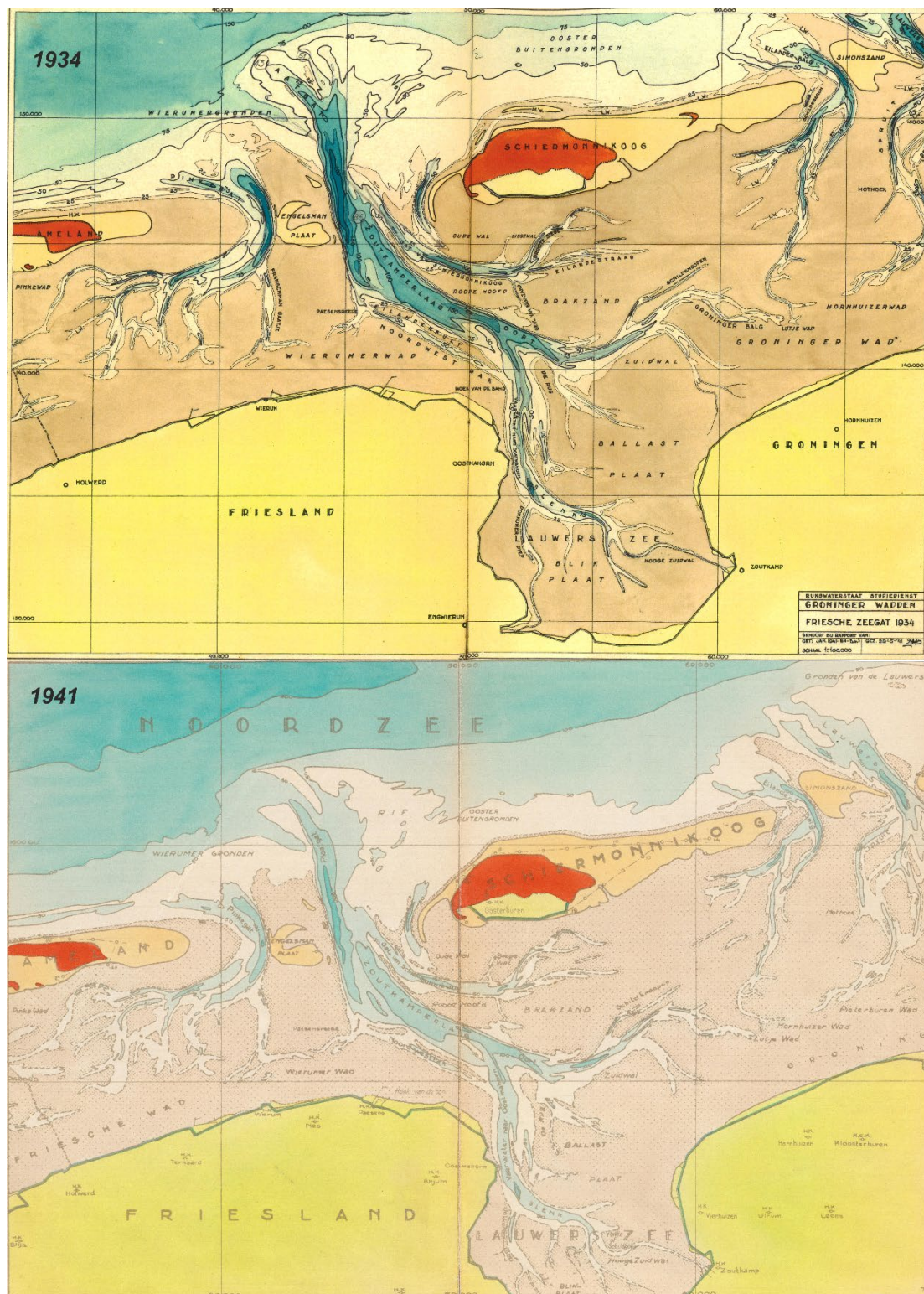


Figuur A- 13: Hydrografische kaart van het Friese Zeegat in 1859 en 1873-74.

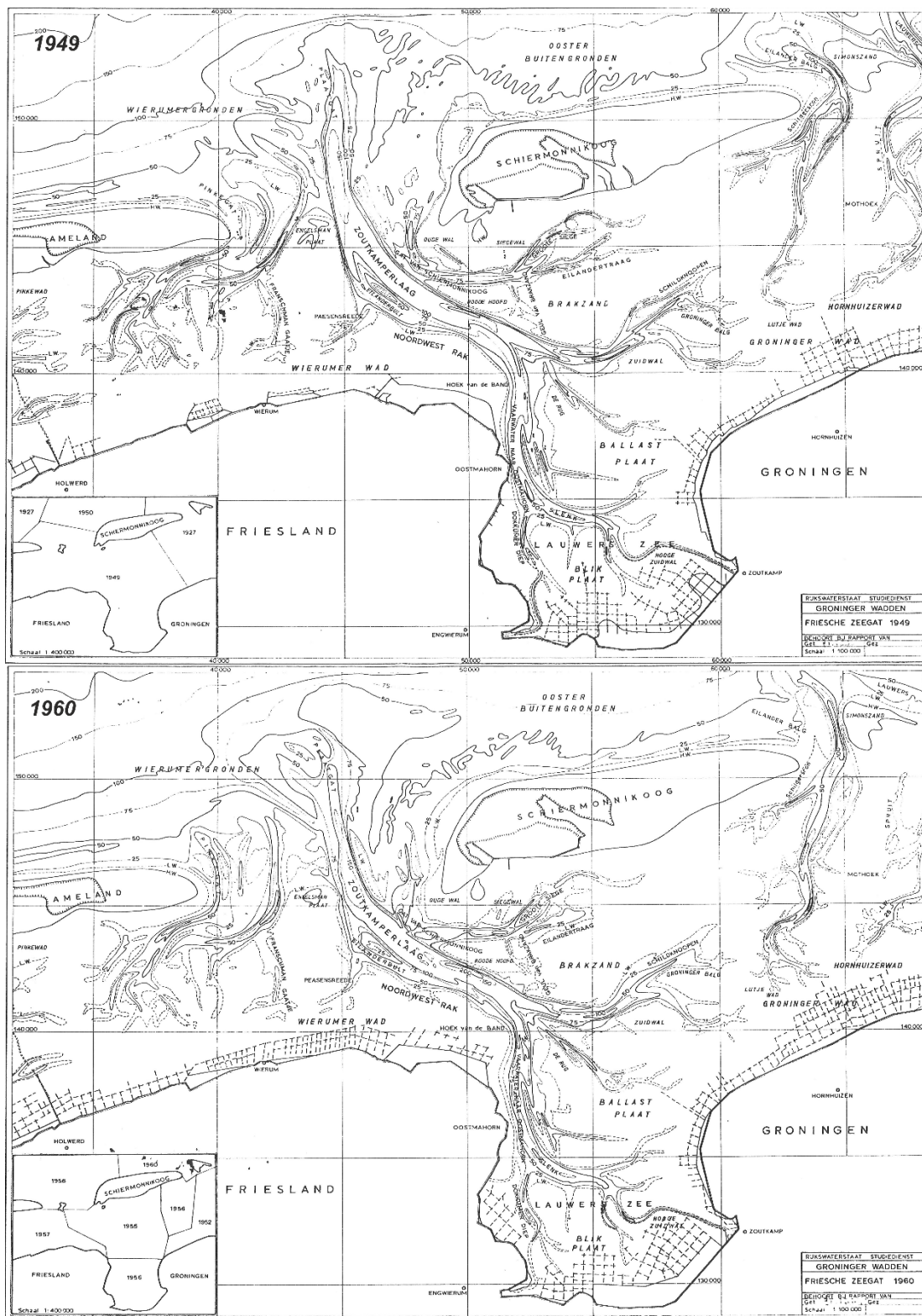


Figuur A- 14: Hydrografische kaart van het Friese Zeegat in 1891 en 1903.

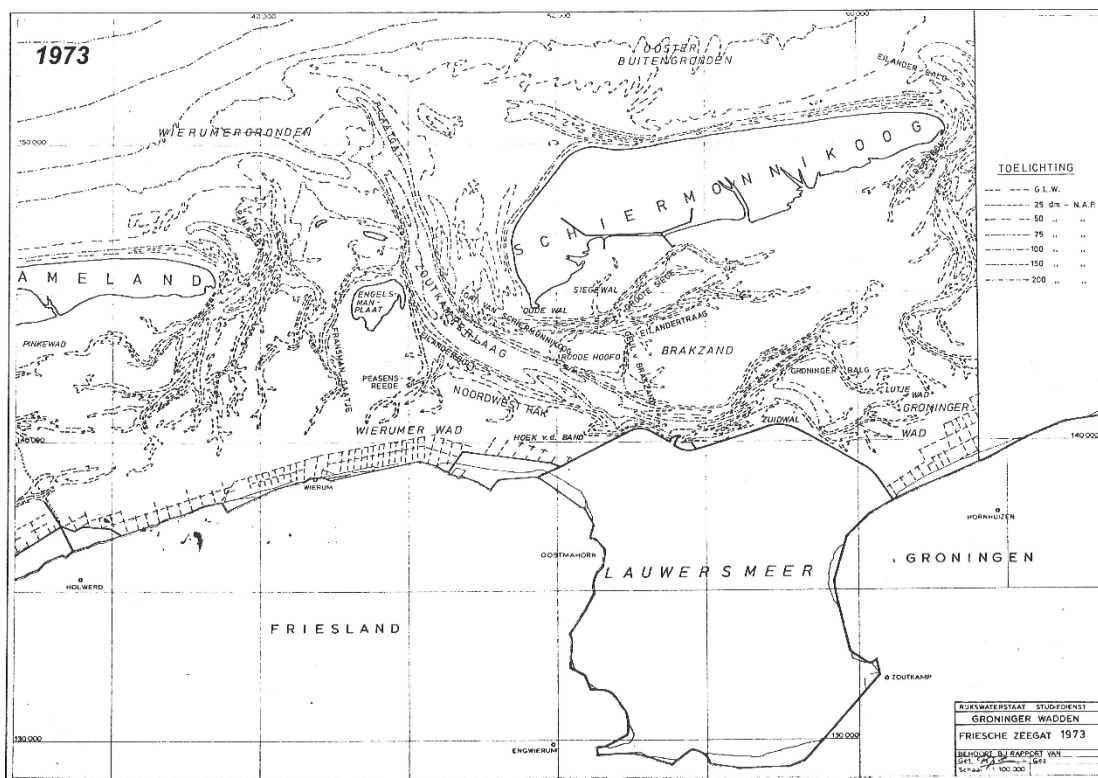




Figuur A- 16: Hydrografische kaart van het Friese Zeegat in 1934 en 1941.



Figuur A- 17: Bodemkaart van het Friese Zeevat in 1949 en 1960.



Figuur A- 18: Bodemkaart van het Friese Zeegat in 1973.

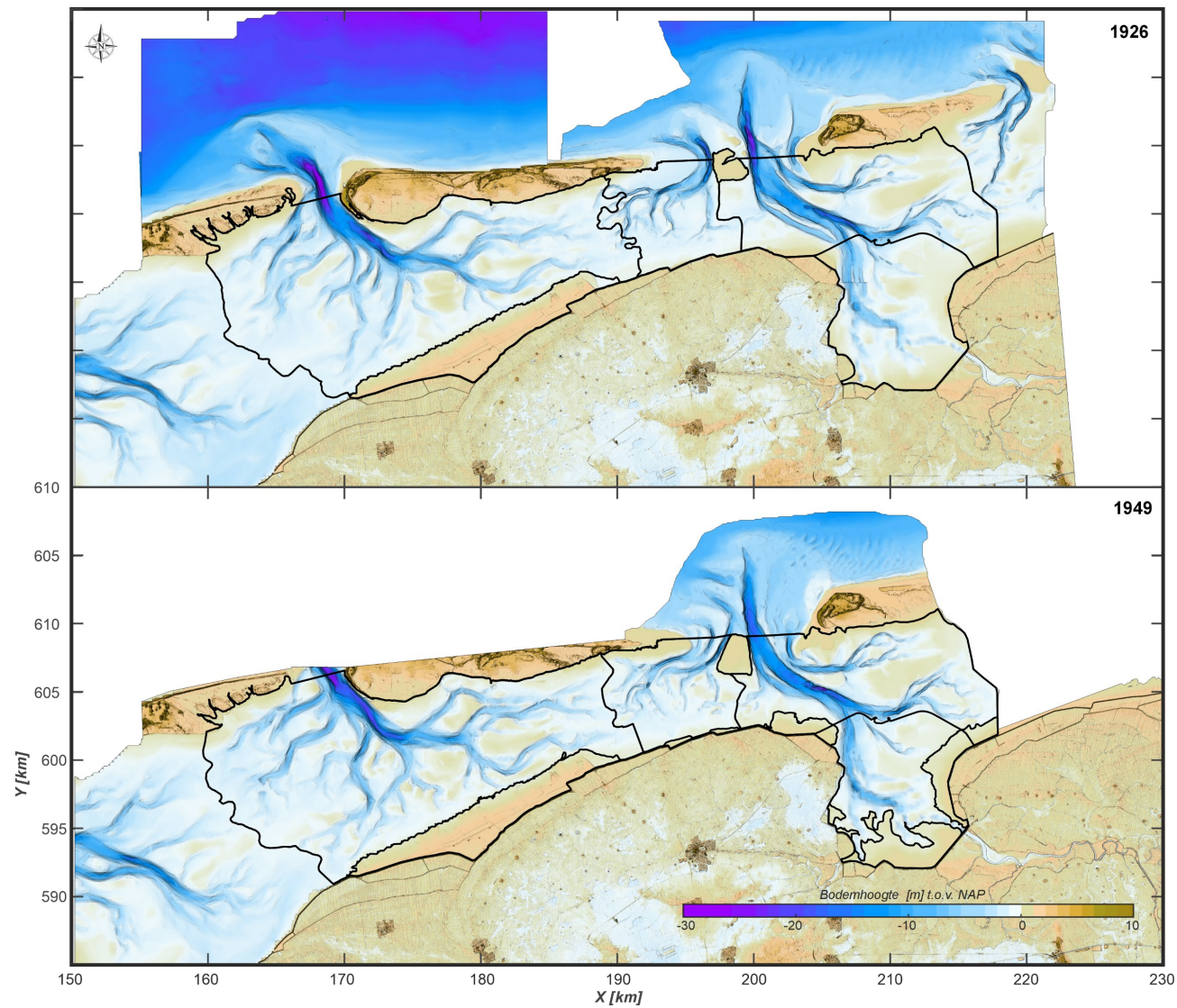
A.3.2

Digitale bodemkaarten (Vaklodingen)

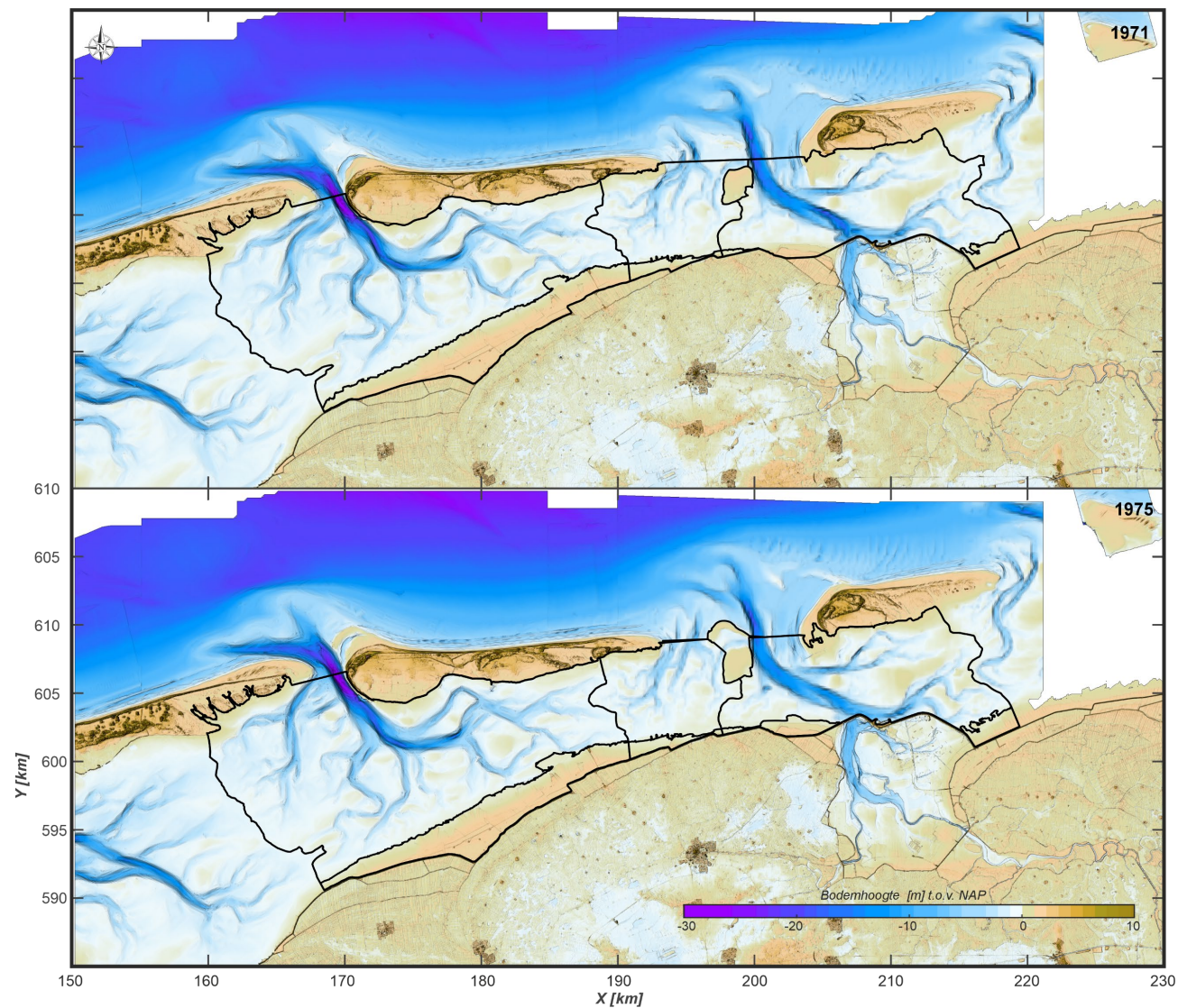
Binnen dit project worden de bij Rijkswaterstaat (RWS-CIV) beschikbare bodemdata gebruikt. Door combinatie van de Opendap-bestanden met AHN-metingen (Elias, 2024) zijn voor de Centrale Waddenzee in totaal 12 bodemkaarten te maken over de periode 1926-2022 met volledige dekking van het gehele zeegat en bekken (Tabel A-1 en Figuur A- 19 - Figuur A- 24).

Tabel A-1: Overzicht van de beschikbare ascii data van de Centrale Waddenzee tussen 1925 en 2022.

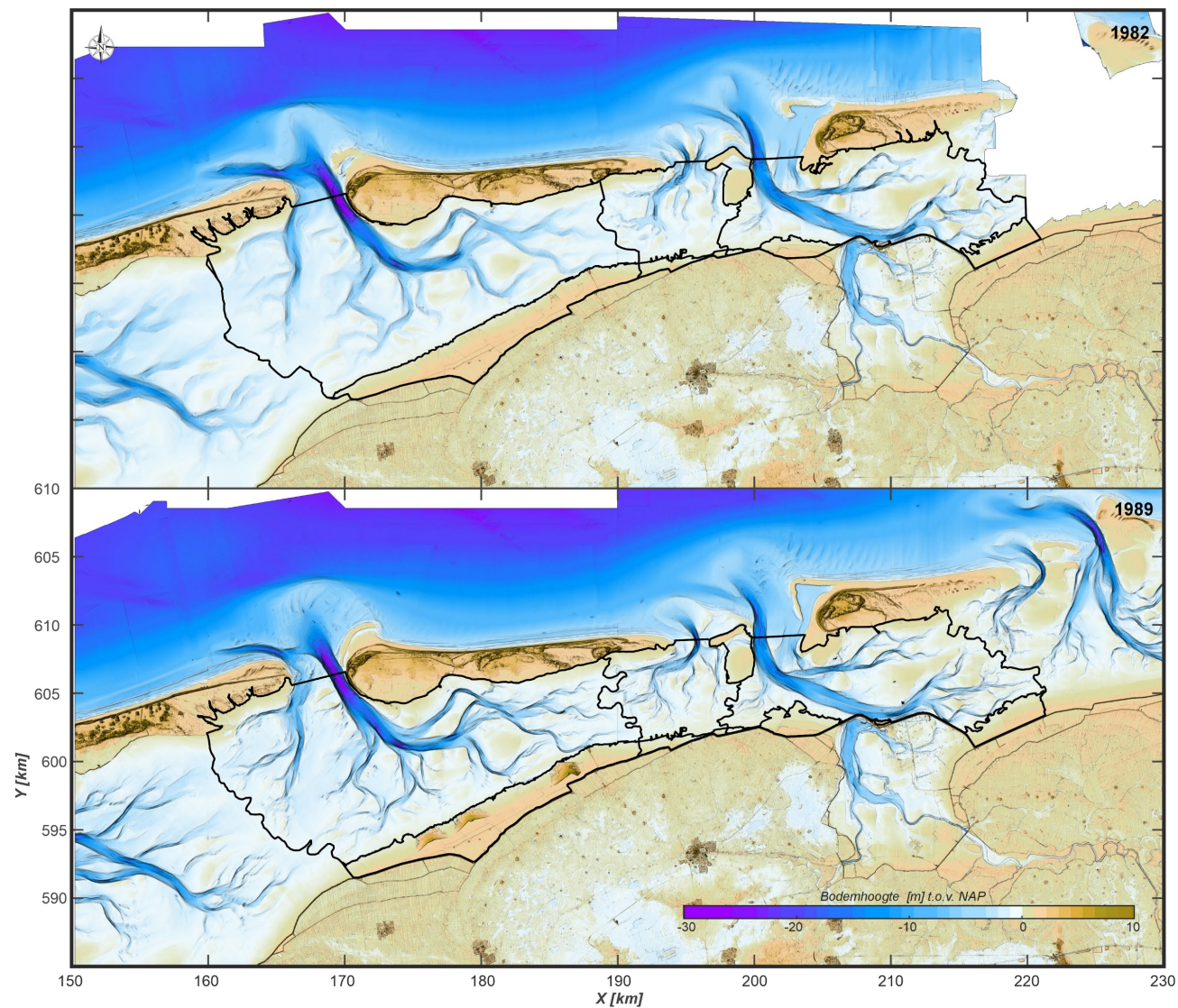
Waddenzee cyclus		Rep. jaar	Ameland	Friese Zeegat
		1926	1926	1926/1927
		1949	1948	1949
		1958	Nvt	1958
		1967	Nvt	1967
		1971	1971	1972
		1975	1975	1975
		1979	nvt	1979
		1982	1981	1982
1	1985-1990	1989	1989	1987
2	1991-1996	1994	1993	1994
3	1997-2002	2000	1999	2000
4	2003-2008	2006	2005	2006
5	2009-2014	2012	2011	2012
6	2015-2020	2018	2017	2019
7	2021-2026	2024	2022	2024



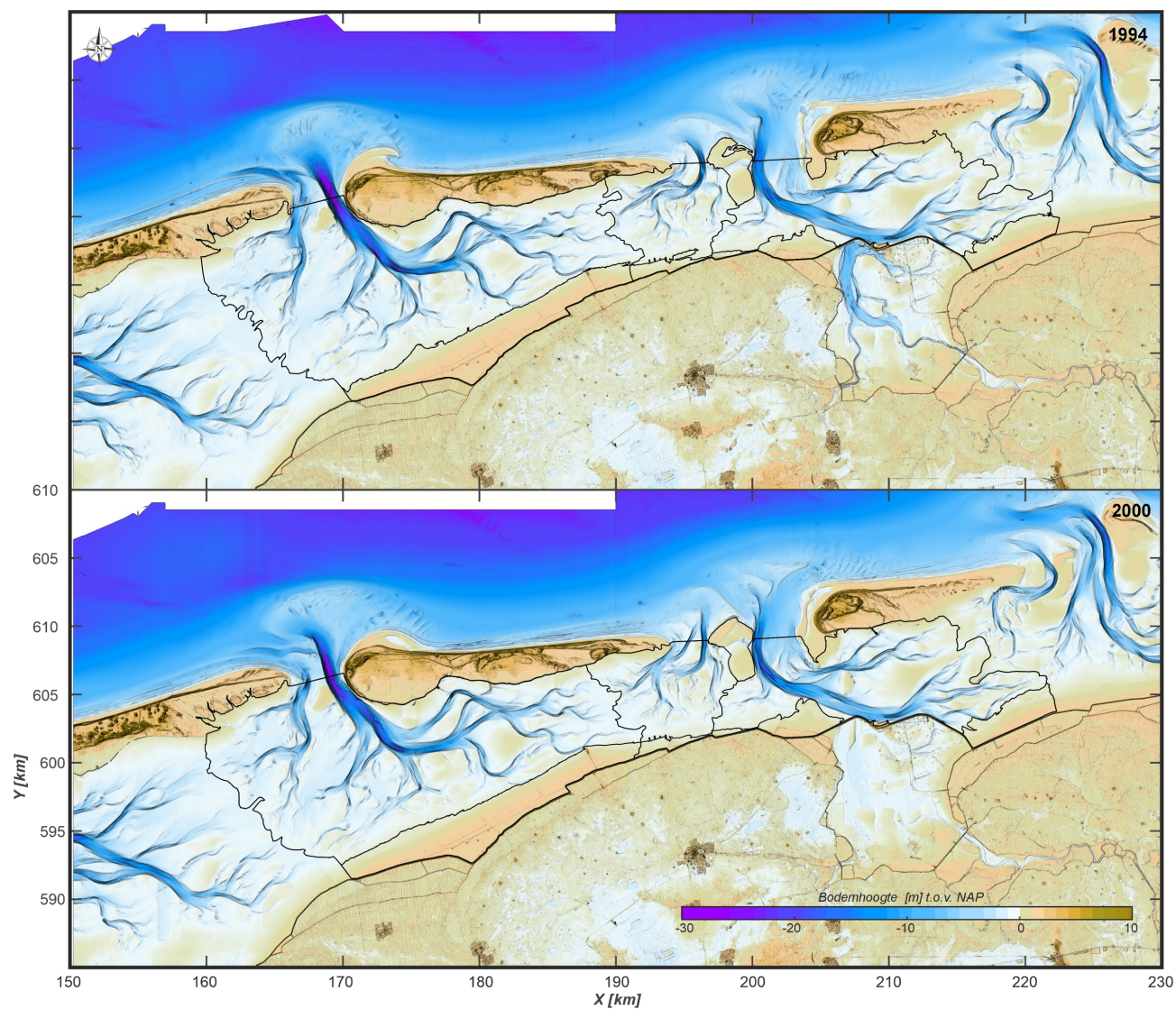
Figuur A- 19: Centrale Waddenzee voor het representatieve jaar 1926 (boven) en 1949 (onder). De zwarte contourlijnen geven de kombergingsgebieden en kwelder weer.



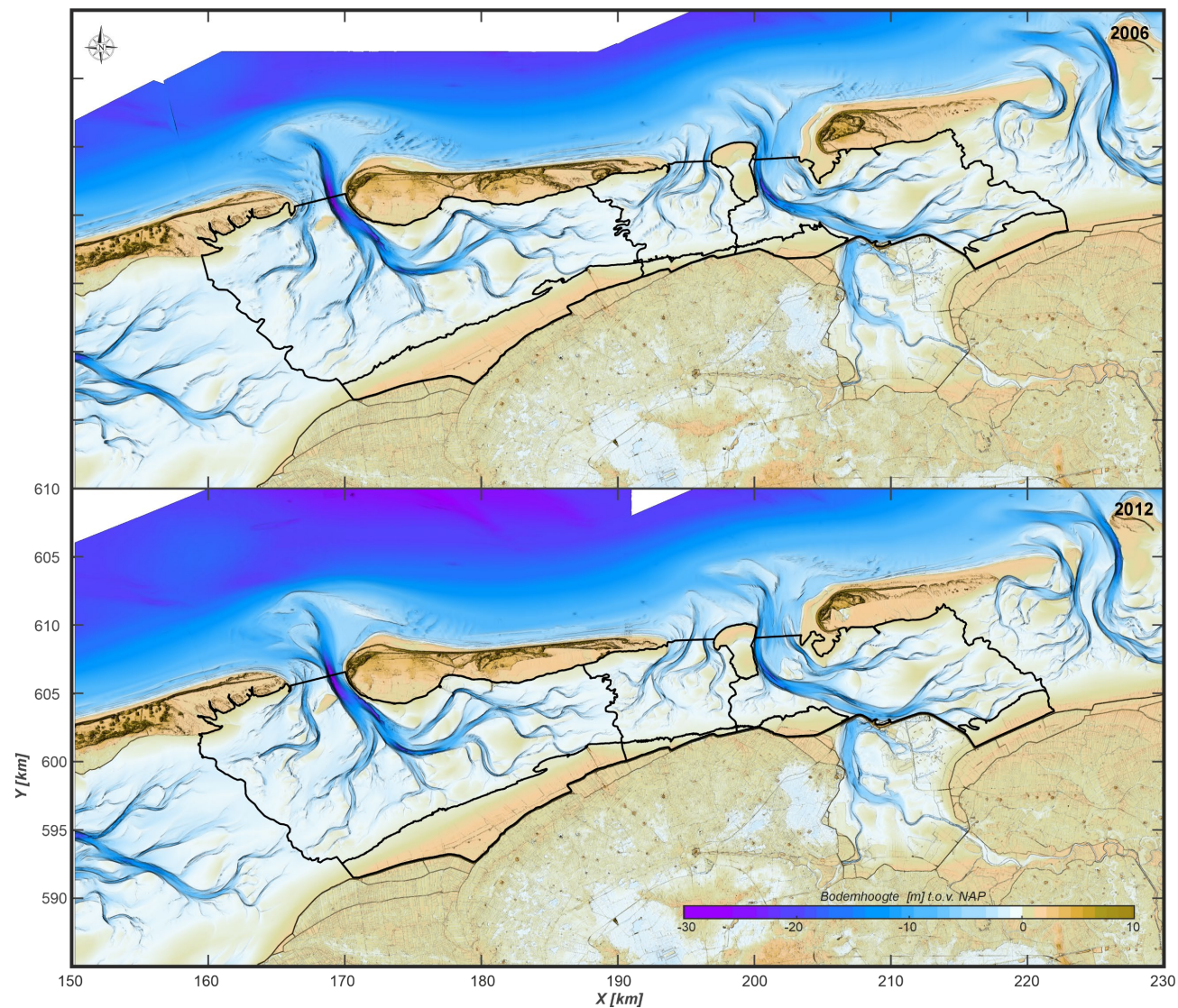
Figuur A- 20: Centrale Waddenzee voor het representatieve jaar 1971 (boven) en 1975 (onder). De zwarte contourlijnen geven de kombergingsgebieden en kwelder weer.



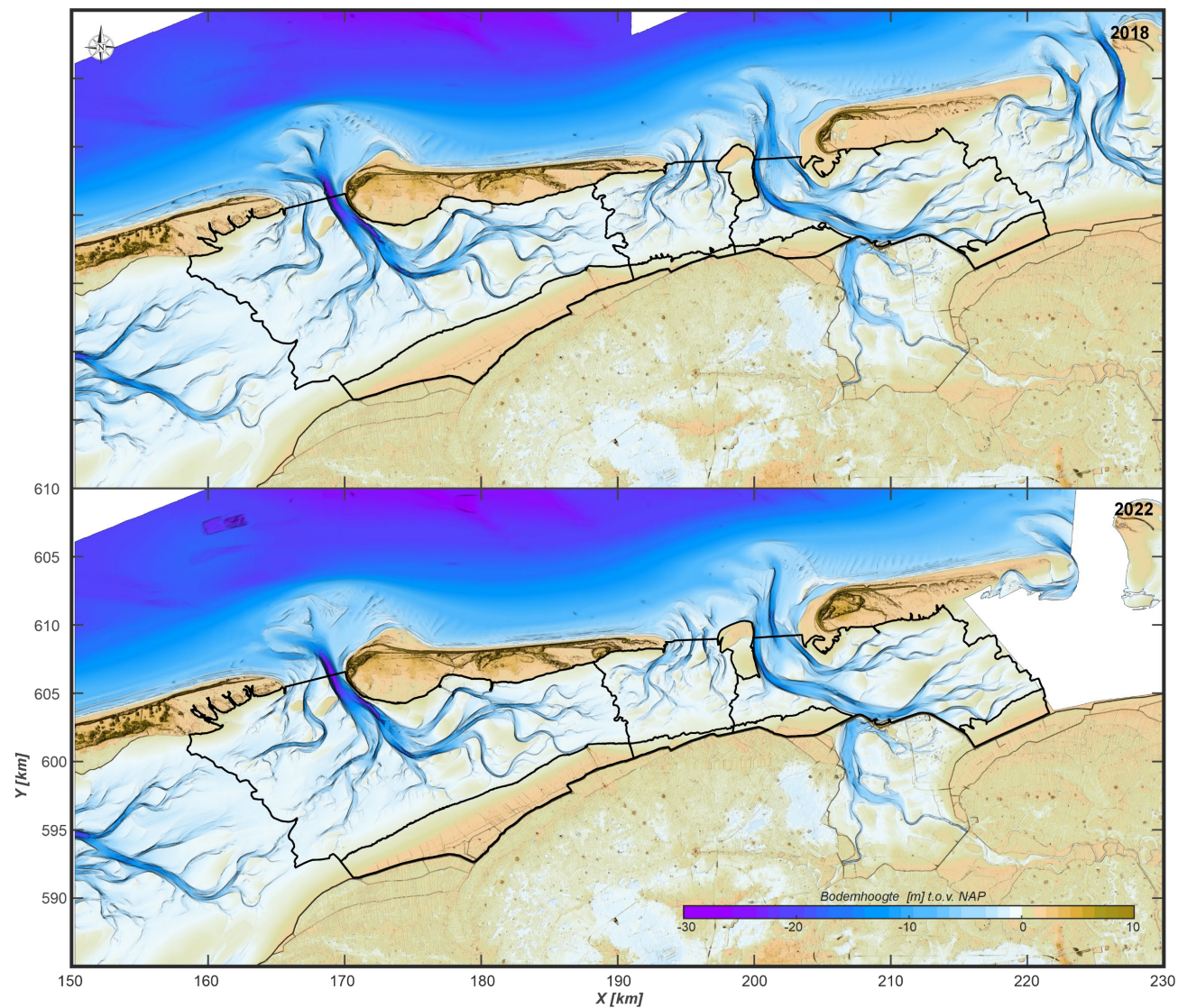
Figuur A- 21: Centrale Waddenzee voor het representatieve jaar 1982 (boven) en 1989 (onder). De zwarte contourlijnen geven de kombergingsgebieden en kwelder weer.



Figuur A- 22: Centrale Waddenzee voor het representatieve jaar 1994 (boven) en 2000 (onder). De zwarte contourlijnen geven de kombergingsgebieden en kwelder weer.

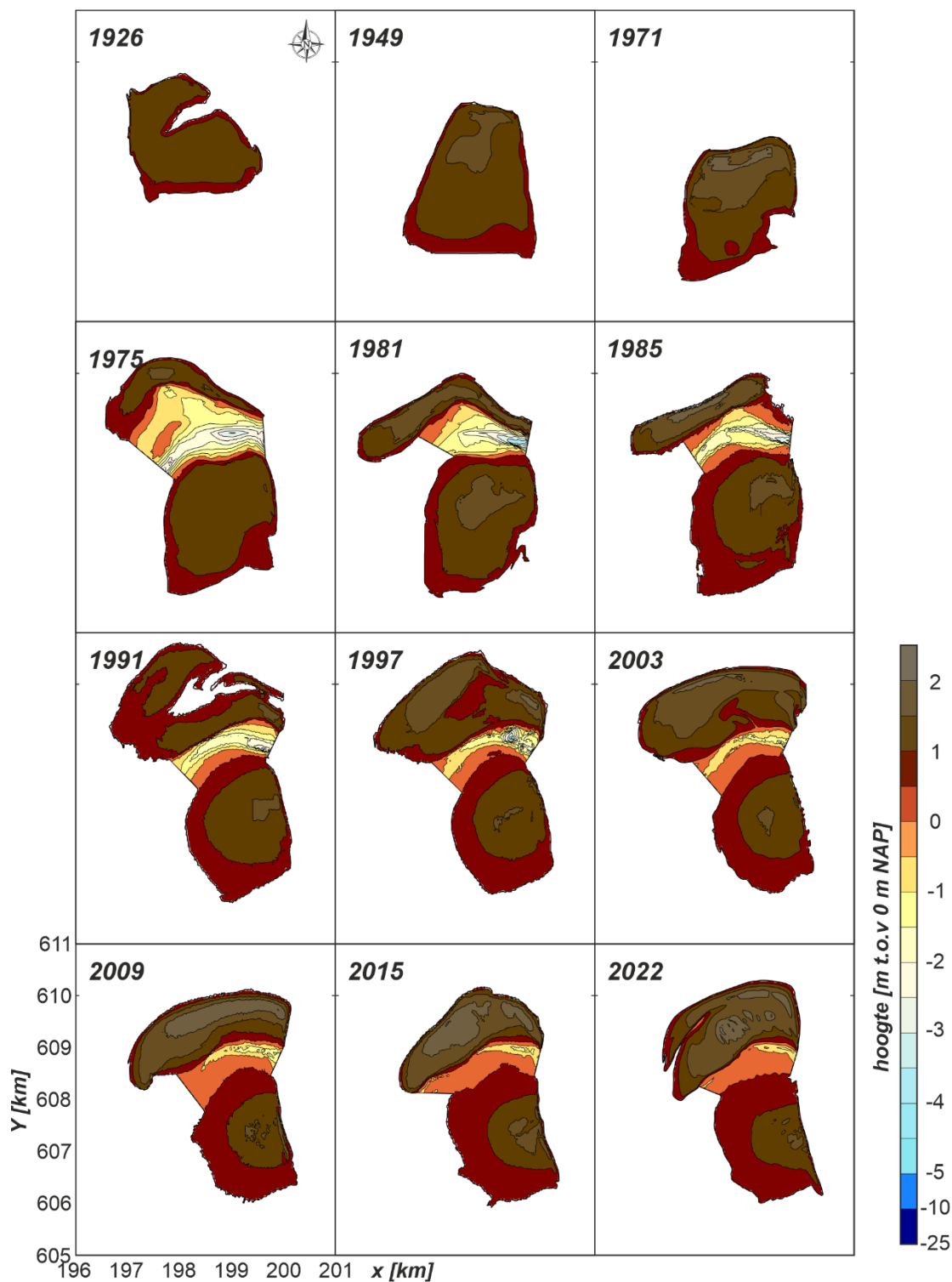


Figuur A- 23: Centrale Waddenzee voor het representatieve jaar 2006 (boven) en 2012 (onder). De zwarte contourlijnen geven de kombergingsgebieden en kwelder weer.

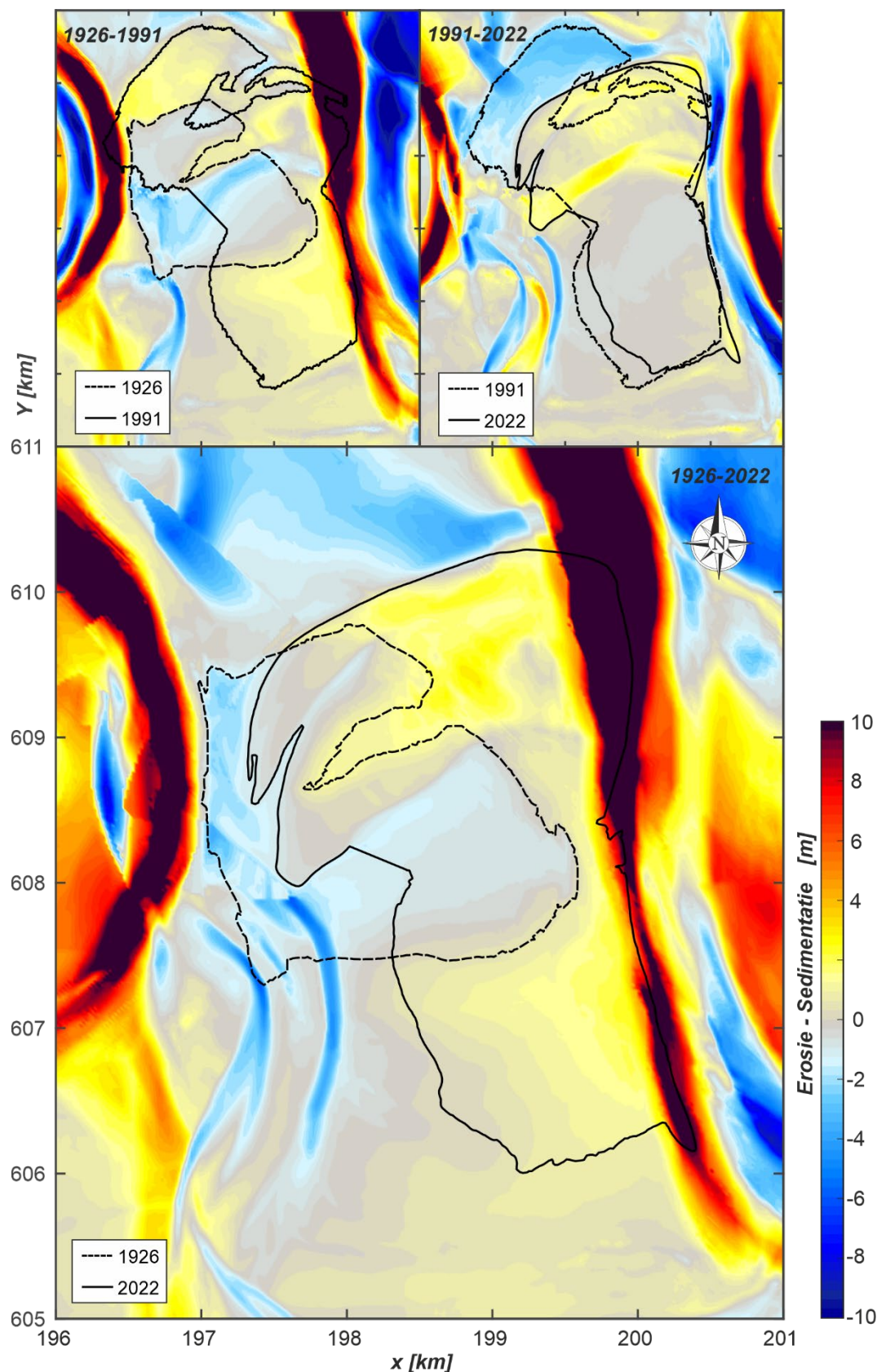


Figuur A- 24: Centrale Waddenzee voor het representatieve jaar 2018(boven) en 2022 (onder). De zwarte contourlijnen geven de kombergingsgebieden en kwelder weer.

A.4 Engelsmanplaat

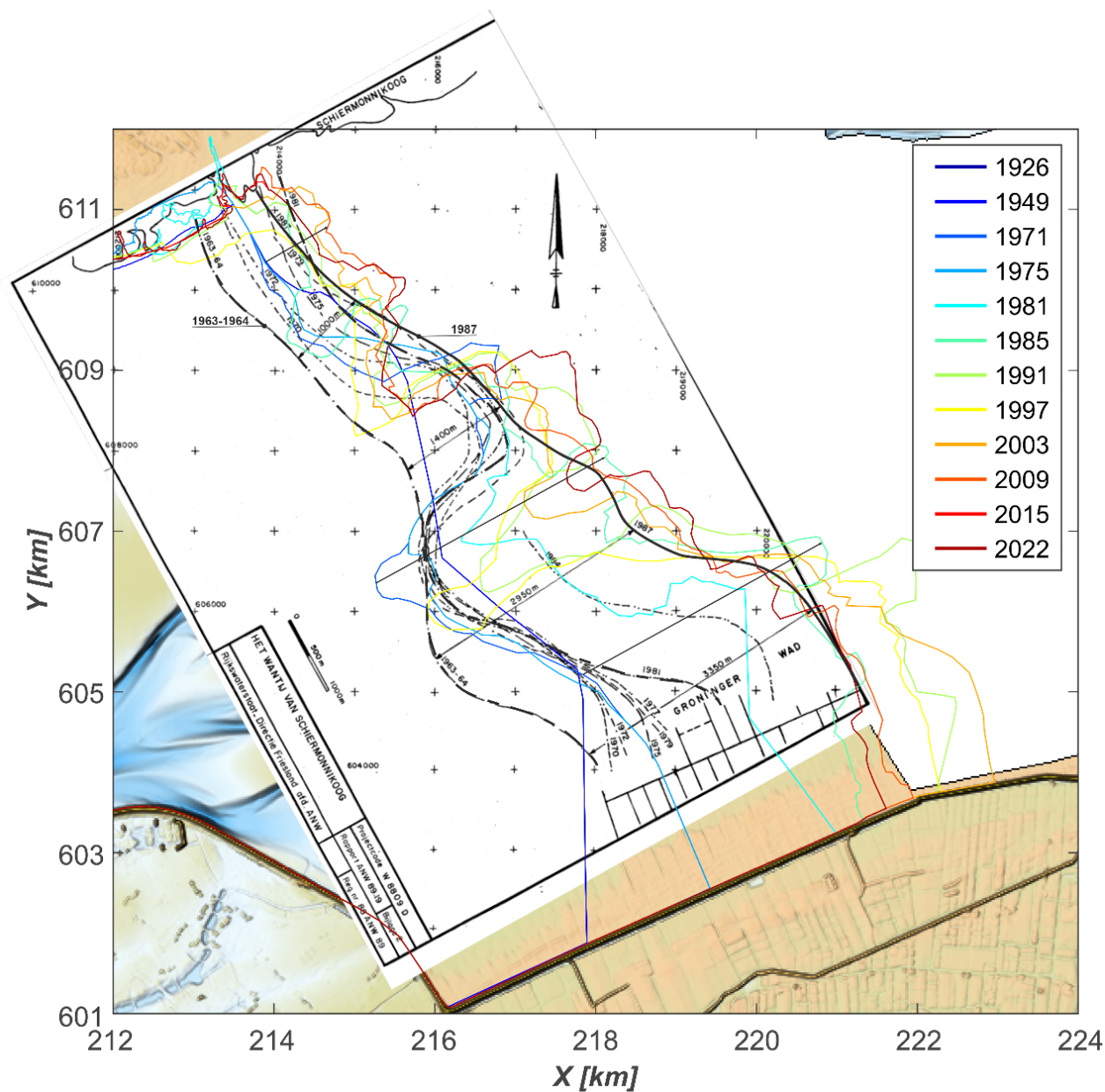


Figuur A- 25: Overzicht van de afbakening van Engelsmanplaat voor de verschillende jaren zoals gebruikt in de volumebalans.



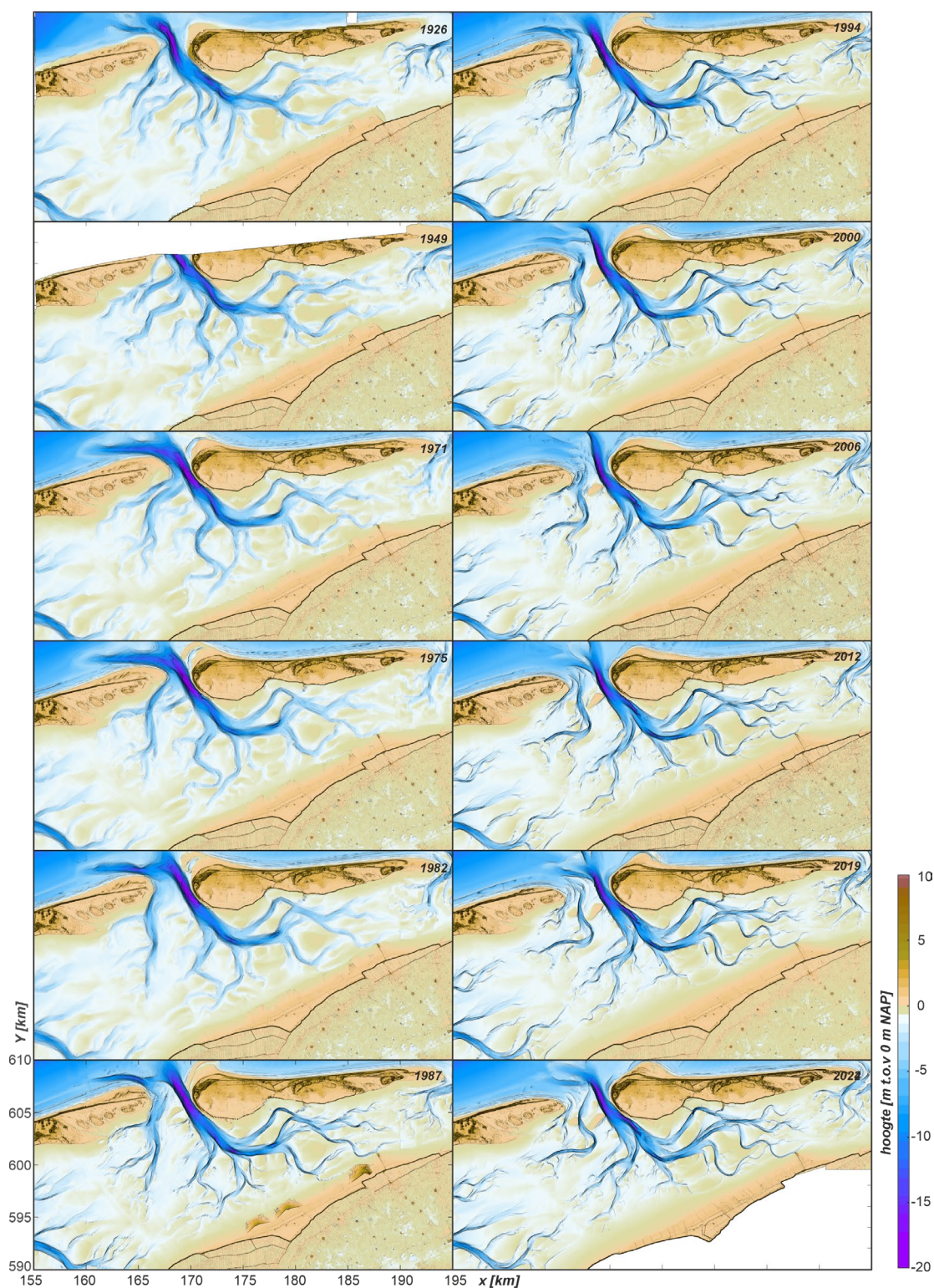
Figuur A- 26: Overzicht van de sedimentatie-erosiepatronen voor de periode 1926-1991, 1991-2022 (boven) en de totale periode 1926-2022 (onder). Polygonen geven de omhullende van de Kombergingsgebieden weer in 1926 en 2022.

A.5 Invloed Lauwerszee op wantijligging (Van Sijp, 1986)

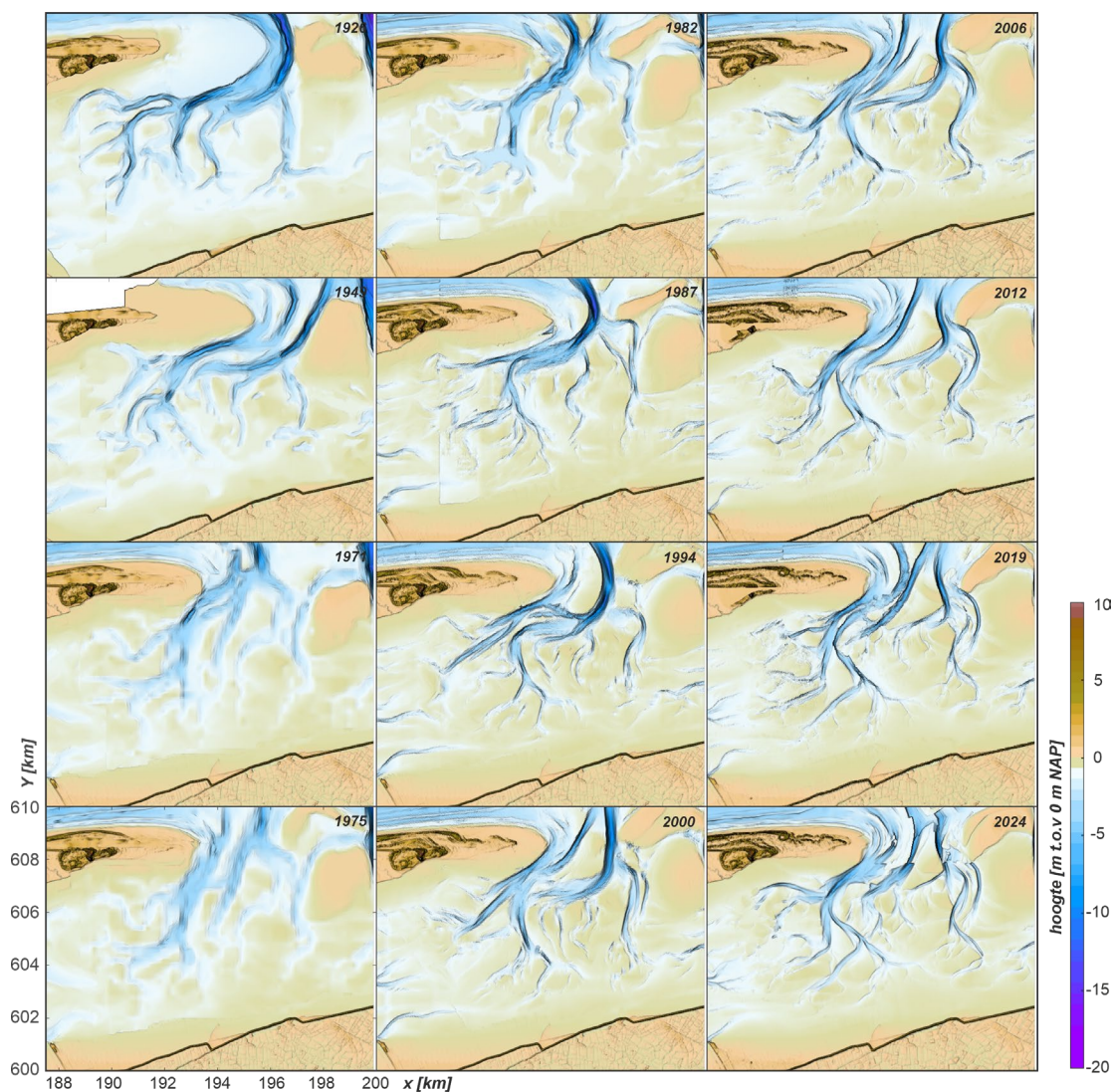


Figuur A- 27: Overzicht van de ligging van het wantij onder Schiermonnikoog op basis van de huidige studie en de resultaten van Van Sijp (1986).

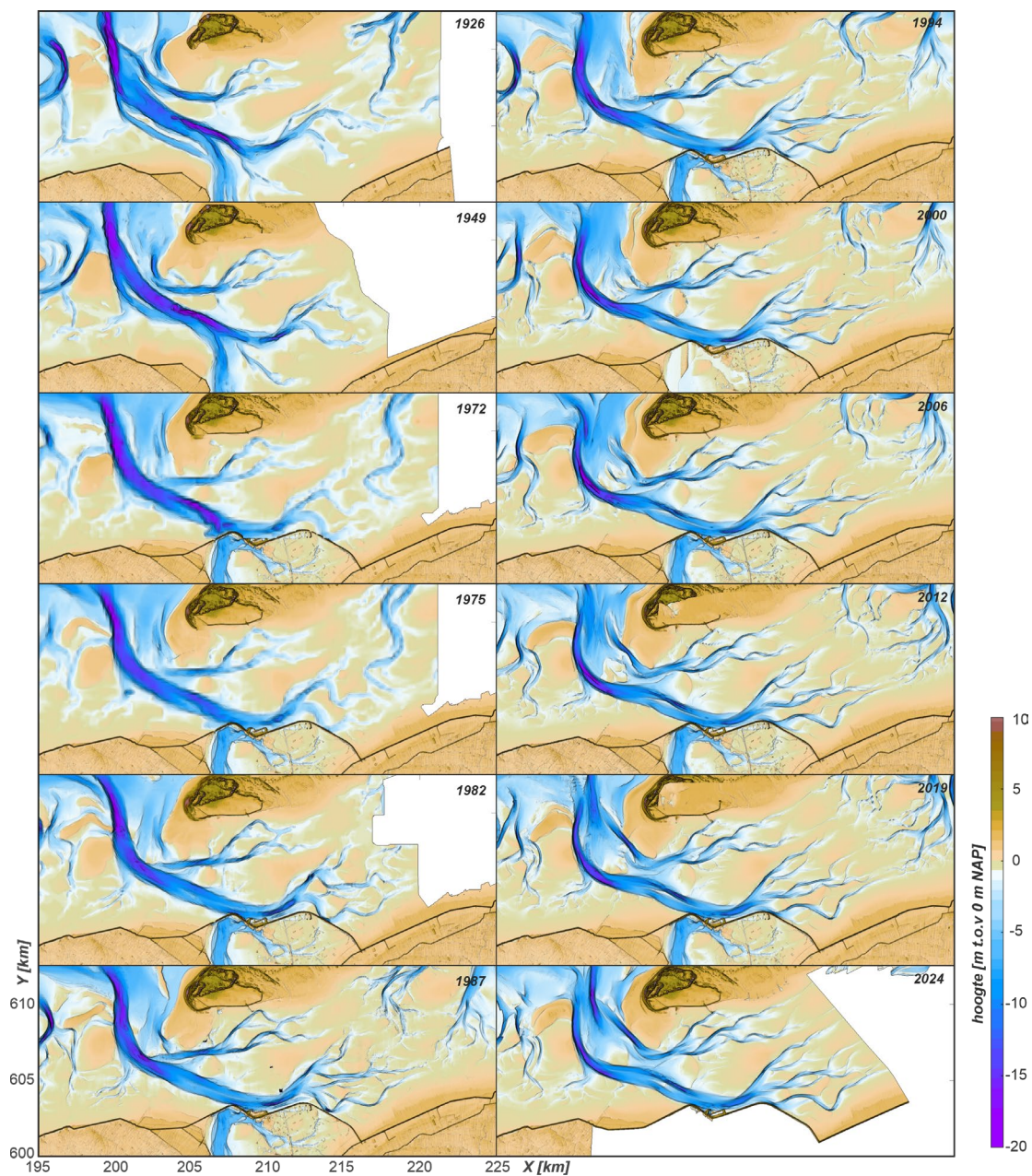
B Aanvullende kaarten morfologische verandering



Figuur B - 1: Overzicht bodemkaarten kombergingsgebied Borndiep 1926-2022.



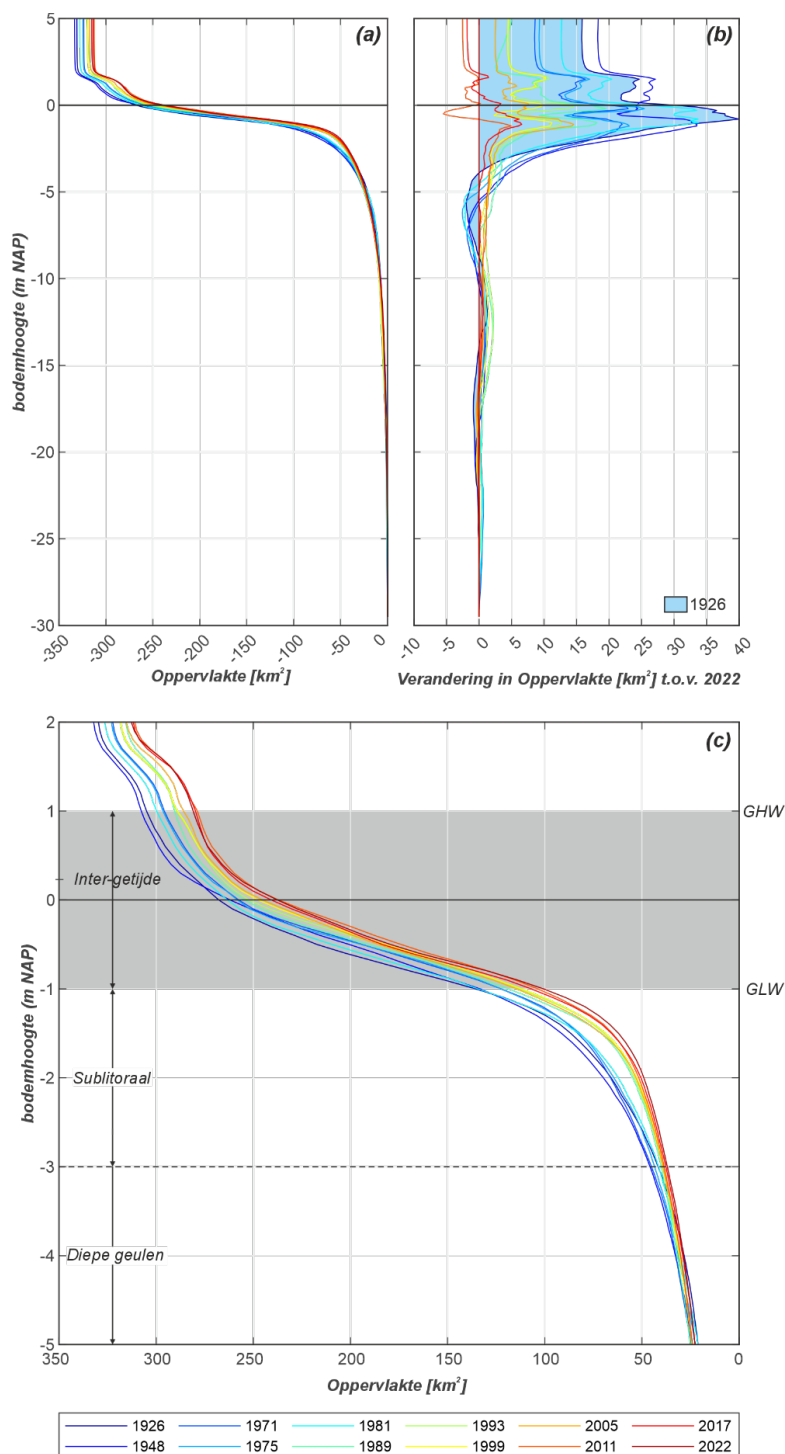
Figuur B - 2: Overzicht bodemkaarten kombergingsgebied Pinkegat 1926-2022.



Figuur B - 3: Overzicht bodemkaarten kombergingsgebied Zoutkamerlaag 1926-2022.

C Aanvullende figuren Borndiep

C.1 Hypsometrische curven



Figuur C- 1: Samenvatting van de hypsometrische curve van het Ameland bekken over de periode 1926-2022 door middel van: (a). Hypsometrische curve van het gehele bekken, (b) Verandering in hypsometrische curve t.o.v. 2022 en (c). Detail van de curve tussen -5 m en +2 m NAP.

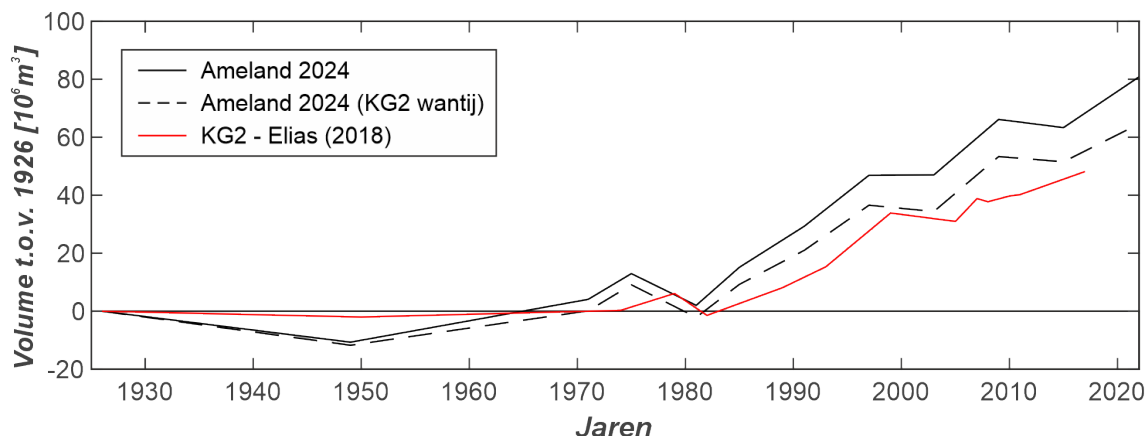
C.2 Borndiep

De in deze studie gehanteerde methode van volumebepaling, maar ook de onderliggende begrenzing van de wantijen (gebaseerd op een in de tijd variërend kombergingsgebied: hfst. 3) en de bodemkaarten (deze zijn altijd volledig gevuld door een consistente manier van invullen en combineren van data) wijken af van eerdere studies. Daarom wordt voor ieder kombergingsgebied een vergelijking gemaakt met de eerder uitgevoerde studies. Als referentie is een vergelijking gemaakt met de resultaten verkregen in Kustgenese 2 (Elias, 2018). Deze studie geeft de meest recente sedimentbalans van de Centrale Waddenzee. Evaluatie van de Kustgenese 2 en de resultaten lieten een goede overeenkomst zien met de oudere studies.

Een vergelijking van de huidige resultaten met die uit Kustgenese 2 geeft een relatief groot verschil (Figuur C- 2). Beide studies laten wel een duidelijke tweedeling in volumeontwikkeling zien (doorgetrokken rode en zwarte lijnen in Figuur C- 2). De veranderingen zijn beperkt in de periode 1926-1981 en het bekken neemt sindsdien sterk in sedimentvolume toe (netto aanzanding). De grootte van deze aanzanding vertoont echter wel een duidelijk en significant verschil. In de huidige studie is de volumeverandering van het gehele bekken veel hoger. Het verschil in 2015 bedraagt ~20 miljoen m^3 .

Een groot deel van deze discrepantie is te verklaren door de volumeverandering van de kwelders. In de Kustgenese2-studie waren de kwelders niet direct meegenomen in de berekening van de bekkenvolumes, maar als een verliesterm aan de sedimentbalans toegevoegd. Een nieuwe berekening van de volumeverandering exclusief kwelder (zwarte stippellijn in Figuur C- 2) ligt al veel dichter bij de eerdere resultaten. Het overige verschil kan worden verklaard door de iets andere invulling van missende datapunten en met name de verschillen in afbakening van het kombergingsgebied. Daarnaast is er een kleine verschuiving van de tijdserie. Dit komt door de keuze van het representatieve jaar.

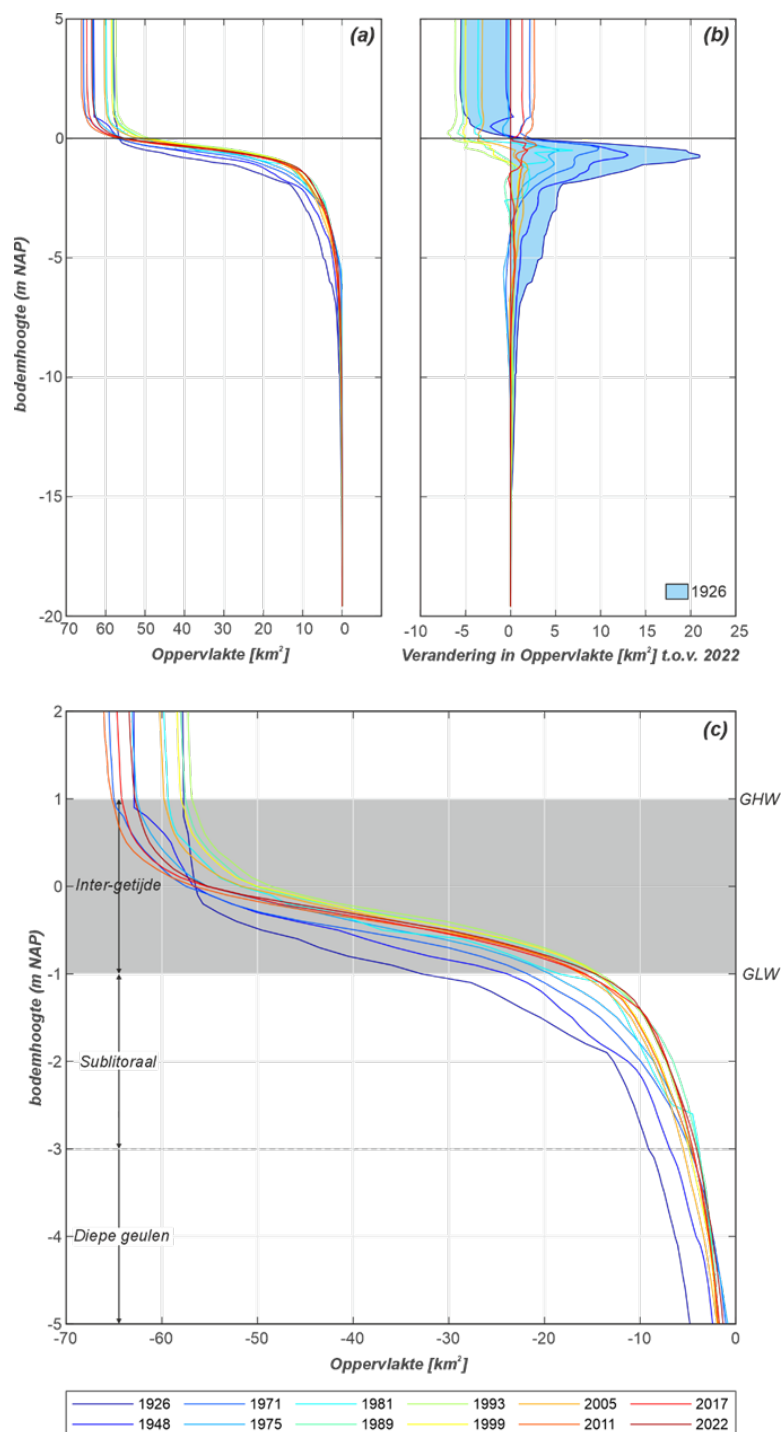
In het Kustgenese2-onderzoek is niet direct gerekend met de volumeverandering, maar met de trendlijnen. De trendwaarde van de huidige volumebalans sinds 1981 op basis van de huidige studie bedraagt +1.5 miljoen m^3 /jr. en op basis van de eerdere studie was dit +1.4 miljoen m^3 /jr. De resultaten tussen de studies zijn dan ook goed vergelijkbaar.



Figuur C- 2: Overzicht van de berekende volumeverandering in het bekken zoals uitgevoerd in Kustgenese2 (rood), en binnen deze studie aangegeven met 2024. De nieuwe resultaten worden met kwelder (zwarte doorgetrokken lijn) en zonder kwelder (zwarte stippellijn) weergegeven.

D Aanvullende figuren Pinkegat

D.1 Hypsometrische curven

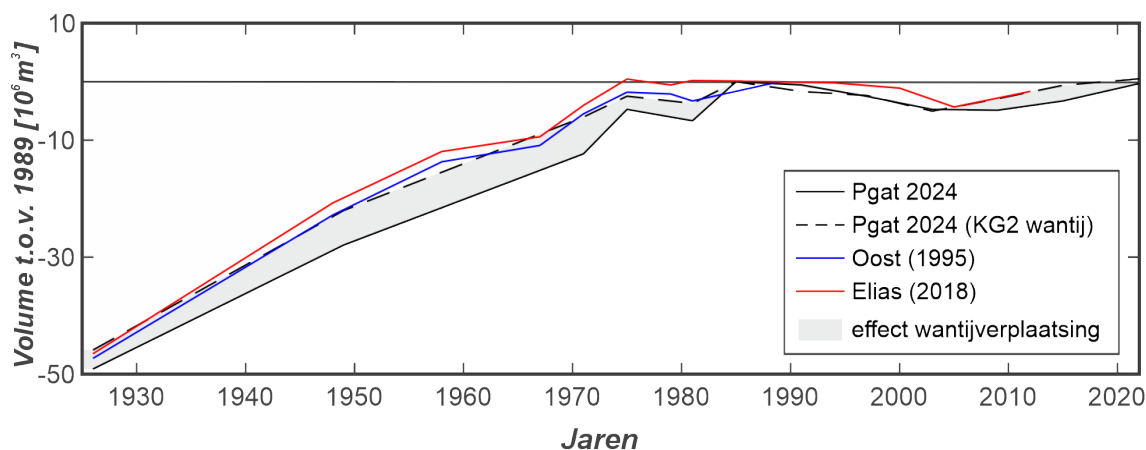


Figuur D- 1: Samenvatting van de hypsometrische curve van het Ameland bekken over de periode 1926-2022 door middel van: (a). Hypsometrische curve van het gehele bekken, (b) Verandering in hypsometrische curve t.o.v. 2022 en (c). Detail van de curve tussen -5 m en +2 m NAP.

D.2 Pinkegat

Een vergelijking tussen de resultaten van deze studie en eerder uitgevoerde studies laat een groot verschil zien in de periode 1950-1980 tussen de resultaten van de huidige studie (ZKL 2024 in Figuur D- 2) en de studies van Oost (1995) en Kustgenese2 (Elias, 2018) . Dit verschil ontstaat doordat de bodemkaarten van de jaren 1958, 1967 en 1979 niet meegenomen zijn in de huidige studie. Deze bodemkaarten zijn alleen in 90 m resolutie beschikbaar; de huidige studie is uitgevoerd met de Opendap-data in 20 m resolutie. Dit betekent wel dat de effecten van de afsluiting van de Lauwerszee op de volumebalans maar beperkt geanalyseerd kunnen worden.

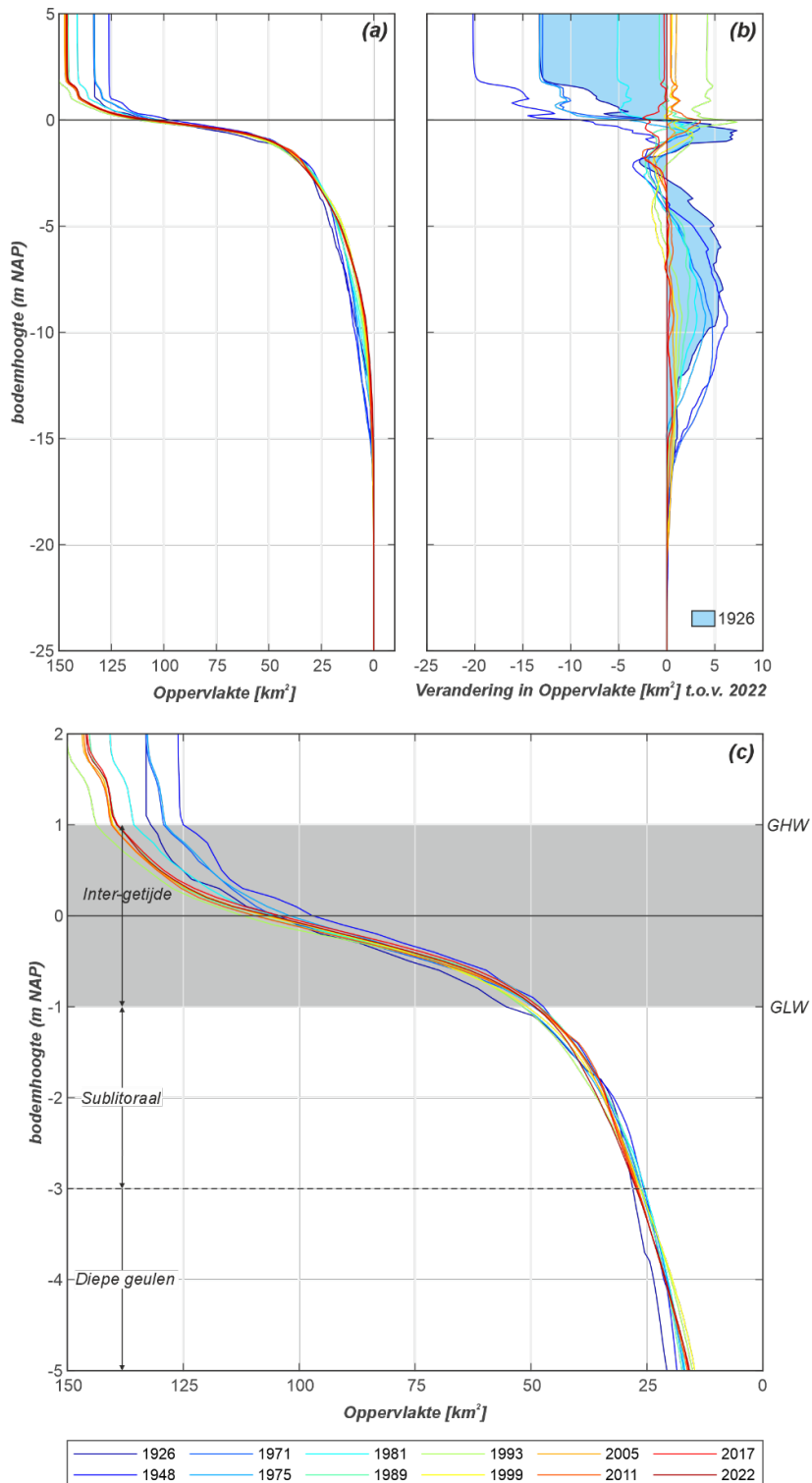
De resultaten vanaf 1972 vertonen wel overeenkomstige kenmerken. Kleine verschillen tussen de studies zijn zichtbaar, die voornamelijk gerelateerd zullen zijn aan de constructie van de dekkende bodemkaarten. De trends en het volumeverloop van de tijdseries zijn overeenkomstig. De variërende wantijligging heeft slechts een beperkt effect op de resultaten in de periode 1972-1990 en vanaf 1990 is geen verschil meer zichtbaar. In de oudere metingen (1926-1971) heeft de wantijligging een groter effect op de resultaten. Met de vaste ligging op basis van de KG2-bekkenafbakening is het volume hier bijna 10 miljoen m³ lager.



Figuur D- 2: Overzicht van de berekende volumeverandering in het bekken, zoals uitgevoerd in verschillende studies.

E Aanvullende figuren Zoutkamperlaag

E.1 Hypsometrische curven

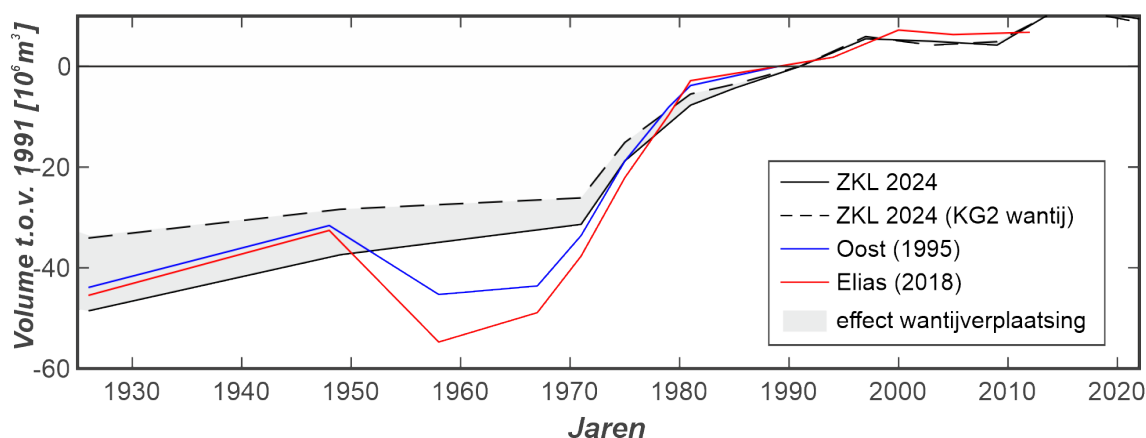


Figuur E- 1: Samenvatting van de hypsometrische curve van de Zoutkamperlaag over de periode 1926-2022 door middel van: (a). Hypsometrische curve van het gehele bekken, (b) Verandering in hypsometrische curve t.o.v. 2022 en (c). Detail van de curve tussen -5 m en +2 m NAP.

E.2 Zoutkamperlaag

Een vergelijking tussen de resultaten van deze studie en eerder uitgevoerde studies laat een groot verschil zien in de periode 1950-1980 tussen de resultaten van de huidige studie (ZKL 2024 in) en de studies van Oost (1995) en Kustgenese2 (Elias, 2018) . Dit verschil ontstaat doordat de bodemkaarten van de jaren 1958, 1967 en 1979 niet meegenomen zijn in de huidige studie. Deze bodemkaarten zijn alleen in 90 m resolutie beschikbaar; de huidige studie is uitgevoerd met de Opendap-data in 20 m resolutie. Dit betekent wel dat de effecten van de afsluiting van de Lauwerszee op de volumebalans maar beperkt geanalyseerd kunnen worden.

De resultaten vanaf 1972 vertonen wel overeenkomstige kenmerken (Figuur E- 2). Kleine verschillen tussen de studies zijn zichtbaar, die voornamelijk gerelateerd zullen zijn aan de constructie van de dekkende bodemkaarten. De trends en het volumeverloop van de tijdseries zijn overeenkomstig. De variërende wantijligging heeft slechts een beperkt effect op de resultaten in de periode 1972-1990 en vanaf 1990 is geen verschil meer zichtbaar. In de oudere metingen (1926-1971) heeft de wantijligging een groter effect op de resultaten. Met de vaste ligging op basis van de KG2-bekkenafbakening is het volume hier bijna 10 miljoen m³ lager.



Figuur E- 2: Overzicht van de berekende volumeverandering in het bekken, zoals uitgevoerd in verschillende studies.

F volumes en arealen

F.1 Geulvolumes en oppervlakte

Tabel F- 1: Overzicht van de watervolumes (V in miljoen m^3) en geuloppervlakte (A in km^2) voor de verschillende referentievlakken van het Borndiep in miljoen m^3 .

Jaren		Totaal < 0m NAP		< -1 m NAP		< -3 m NAP		< -5m NAP	
Centrale Waddenz.	Kom-berging	V	A	V	A	V	A	V	A
1926	1926	513.58	267.81	301.56	135.58	157.45	41.64	98.78	21.13
1949	1949	524.2	261.99	323.04	133.29	171.49	45.82	104.51	24.04
1971	1971	512.61	257.56	318.05	122.44	176.23	45.08	109.68	24.58
1975	1975	503.61	258.17	308.52	122.49	169.45	43.48	105.67	22.53
1982	1981	514.4	263.29	307.41	134.44	167.91	41.46	106.91	21.15
1989	1989	503.07	254.48	311.89	118.74	187.81	40.10	123.66	25.05
1994	1993	490.94	252.16	305.31	113.24	184.7	39.37	122.48	24.11
2000	1999	474.86	247.61	293.27	111.87	174.77	38.77	112.95	24.2
2006	2005	476.93	245.27	293.55	114.42	172.55	39.27	111.05	24.05
2012	2011	457.93	237.01	285.45	103.64	171.24	38.60	110.2	23.97
2018	2017	459.1	240.75	280	106.95	166.2	37.66	107.37	22.64
2024	2022	446.43	237.64	271.35	100.63	162.44	36.92	104.51	22.65

Tabel F- 2: Overzicht van de watervolumes (V in miljoen m^3) en geuloppervlakte (A in km^2) voor de verschillende referentievlakken van het Pinkegat in miljoen m^3 .

Jaren		Totaal < 0m NAP		< -1 m NAP		< -3 m NAP		< -5m NAP	
Centrale Waddenz.	Kom-berging	V	A	V	A	V	A	V	A
1926	1926	102.84	56.46	55.28	32.47	23.97	9.13	10.98	4.8
1949	1949	81.8	56.65	40.31	23.73	14.44	6.91	6.03	2.42
1971	1972	67.42	57.35	27.93	21.61	6.03	4.79	0.94	1.05
1975	1975	60.57	55.06	24.91	19.28	5.51	4.63	0.34	0.83
1982	1982	61.38	51.42	26.92	18.14	9.07	3.86	3.58	1.88
1989	1987	54.78	49.87	24.86	14.56	10.03	3.94	4.73	1.72
1994	1994	55.48	48.16	27.13	13.93	11.39	4.52	5.52	1.73
2000	2000	57.11	49.75	27.34	14.43	10.34	4.88	4.16	1.87
2006	2006	59.94	51.51	28.32	16.08	10.01	5.5	2.97	1.94
2012	2012	60.4	56.26	26.74	15.54	9.46	4.67	3.64	1.87
2018	2019	58.54	54.93	25.12	15.7	9.31	4.48	3.48	1.72
2024	2024	55.54	55.15	23.24	14.65	7.83	4.09	2.76	1.33

Tabel F- 3: Overzicht van de watervolumes (*V* in miljoen m³) en geuloppervlakte (*A* in km²) voor de verschillende referentievlakken van de Zoutkamperlaag in miljoen m³.

Jaren		Totaal < 0m NAP		< -1 m NAP		< -3 m NAP		< -5m NAP	
Centrale Waddenz.	Kom-berging	V	A	V	A	V	A	V	A
1926	1926	281.64	103.78	204.64	55.03	133.23	27.99	85.2	20.66
1949	1949	272.52	96.84	205.29	47.19	137.74	25.62	94.75	18.5
1971	1972	271.41	105.15	197.46	49.17	127.98	26.03	86.21	16.94
1975	1975	259.5	101.62	186.9	51.44	115.17	26.32	72.92	17.04
1982	1982	251.12	104.69	178.21	48.83	109.47	25.45	68.19	16.69
1989	1987	248.16	107.50	176.5	47.58	107.79	25.94	65.35	17.34
1994	1994	246.21	111.22	171.05	51.30	97.69	26.31	57.48	15.12
2000	2000	240.04	106.73	166.43	50.61	95.36	26.38	55.68	14.6
2006	2006	241.17	106.21	168.79	48.90	98.05	26.87	55.67	15.97
2012	2012	239.76	108.89	165.98	48.79	96.3	26.78	53.83	16.24
2018	2019	233.98	103.48	163.68	48.09	93.42	27.10	51.17	15.93
2024	2024	235.51	106.14	163.32	49.13	90.83	27.33	48.49	15.78

F.2 Plaatvolumes en oppervlakte

Tabel F- 4: Overzicht van de watervolumes (*V* in miljoen m³) en geuloppervlakte (*A* in km²) voor de verschillende referentievlakken van het Borndiep in miljoen m³.

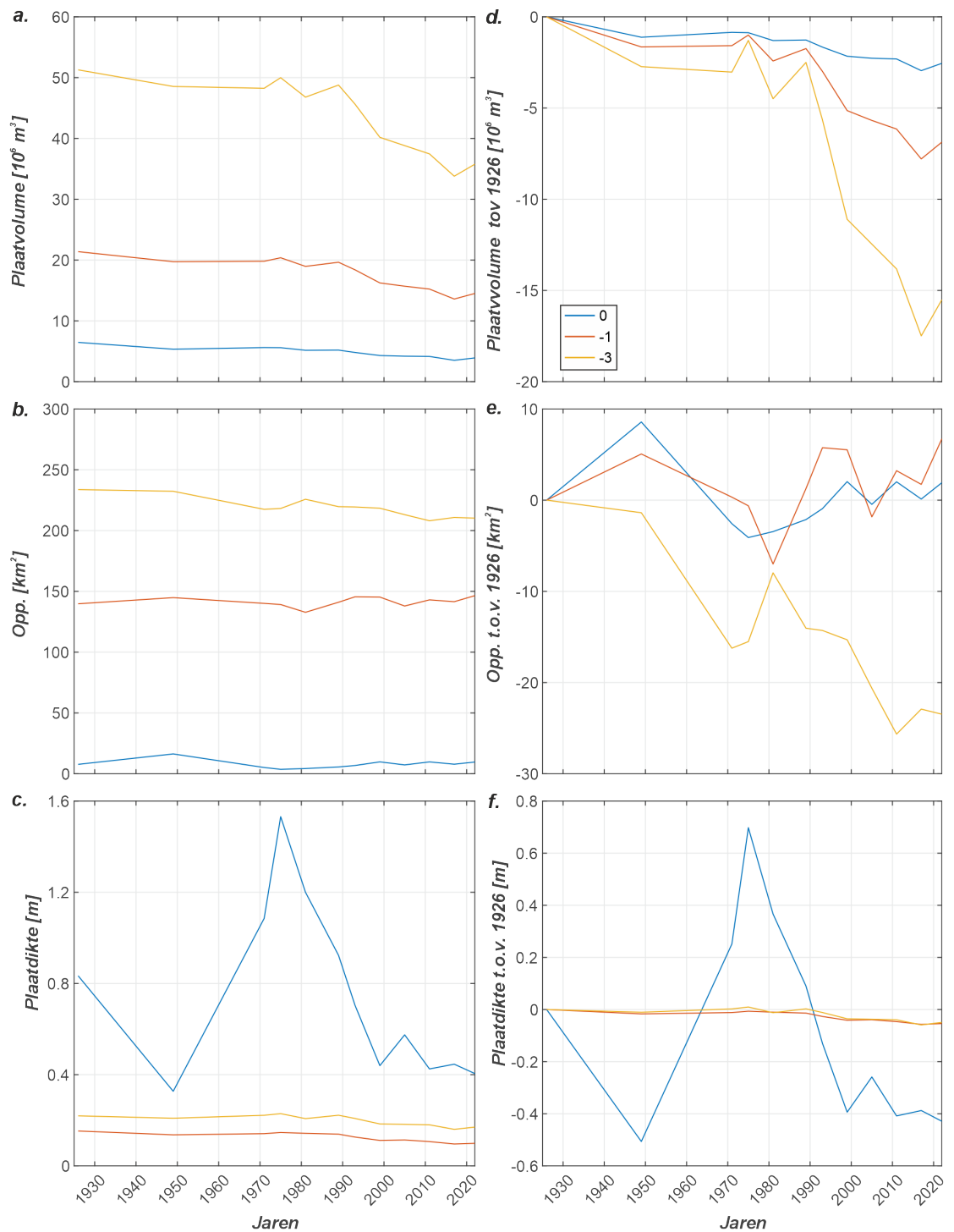
Jaren		Totaal > 0m NAP		> -1 m NAP		> -3 m NAP		Kwelder > 0m NAP	
Centrale Waddenz.	Kom-berging	V	A	V	A	V	A	V	A
1926	1926	55.62	63.28	174.69	195.51	692.75	289.44	53.6	55.53
1949	1949	55.55	71.57	187.96	200.27	703.53	287.74	52.58	55.25
1971	1971	58.73	66.29	188.03	201.41	693.92	278.77	58.03	61.12
1975	1975	58.61	66.36	188.06	202.04	698.05	281.06	58.11	62.71
1982	1981	58.45	64.65	179.41	193.51	695.79	286.48	57.77	60.35
1989	1989	60.25	66.92	190.54	202.66	709.39	281.3	59.43	61.30
1994	1993	62.26	67.66	196.44	206.58	715.47	280.45	60.67	60.84
2000	1999	63.80	72.1	201.94	207.85	722.87	280.95	61.33	62.32
2006	2005	65.97	72.54	200.39	203.39	715.01	278.53	64.12	65.25
2012	2011	66.12	75.65	206.28	209.01	717.39	274.06	63.85	65.89
2018	2017	64.46	72.58	198.69	206.38	711.54	275.67	62.71	64.71
2024	2022	69.30	77.54	209.40	214.54	730.84	278.26	67.11	67.88

Tabel F- 5: Overzicht van de watervolumes (*V* in miljoen m³) en geuloppervlakte (*A* in km²) voor de verschillende referentievlakken van het Pinkegat in miljoen m³.

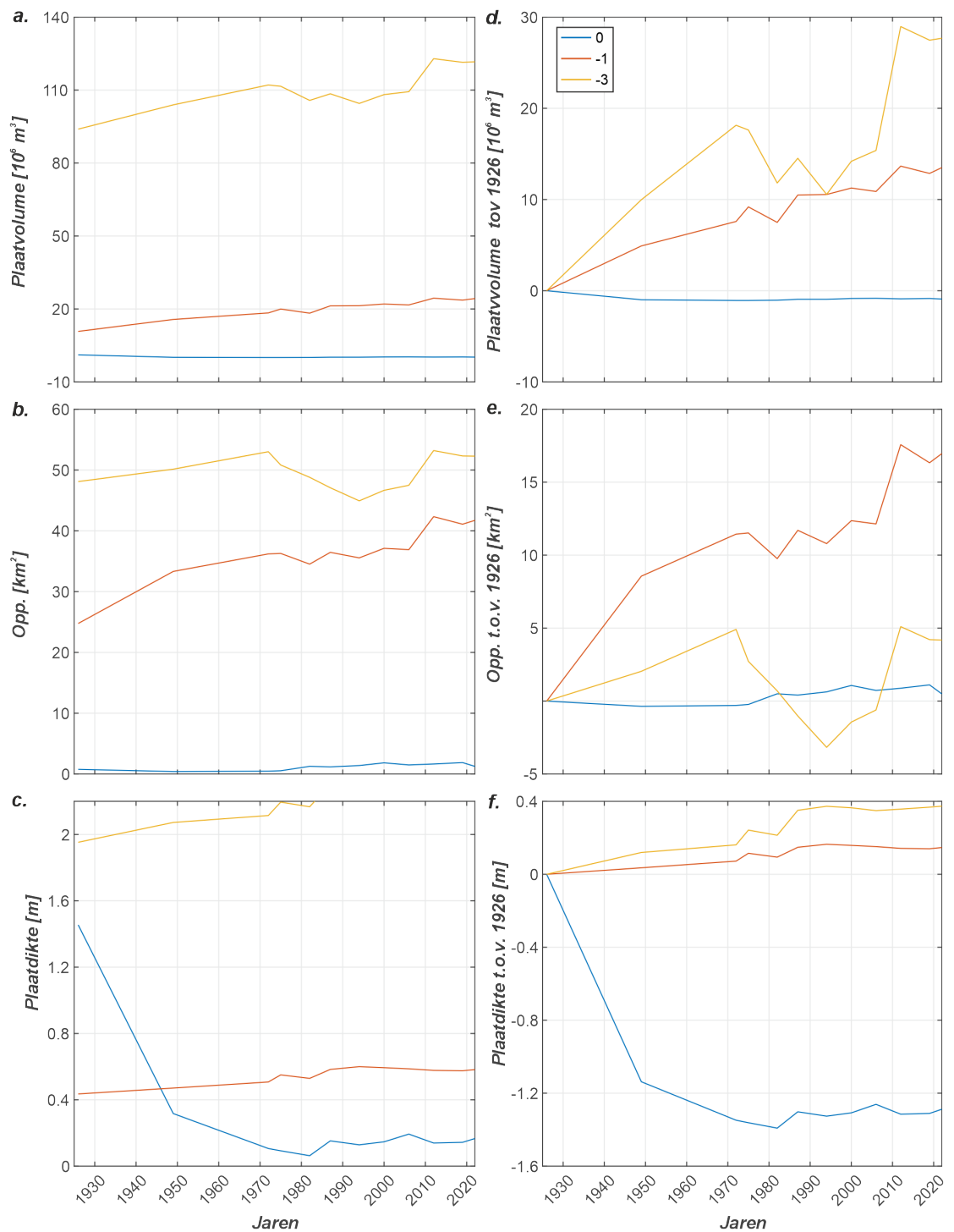
Jaren		Totaal > 0m NAP		> -1 m NAP		> -3 m NAP		Kwelder > 0m NAP	
Centrale Waddenz.	Kom-berging	V	A	V	A	V	A	V	A
1926	1926	1.43	1.57	11.89	25.56	96.64	48.90	0.31	0.8
1949	1949	3.9	6.19	25.47	39.34	125.74	56.16	3.77	5.78
1971	1972	4.17	6.17	30.34	44.05	139.76	60.87	4.12	5.7
1975	1975	3.82	6.06	31.42	43.98	138.55	58.75	3.77	5.52
1982	1982	3.49	6.68	28.96	41.79	130.99	56.08	3.41	5.41
1989	1987	3.66	6.36	31.89	43.60	133.37	54.22	3.48	5.18
1994	1994	3.75	6.73	32.79	43.45	131.8	52.87	3.57	5.33
2000	2000	3.48	7.23	32.22	44.09	132.26	53.63	3.21	5.39
2006	2006	3.71	6.67	32.50	44.32	134.99	54.91	3.42	5.17
2012	2012	3.89	7.14	36.36	50.59	151.35	61.46	3.66	5.49
2018	2019	3.46	6.56	34.83	49.08	148.6	60.31	3.19	4.68
2024	2024	3.36	5.94	34.56	48.85	146.16	59.41	3.15	4.68

Tabel F- 6: Overzicht van de watervolumes (*V* in miljoen m³) en geuloppervlakte (*A* in km²) voor de verschillende referentievlakken van de Zoutkamperlaag in miljoen m³.

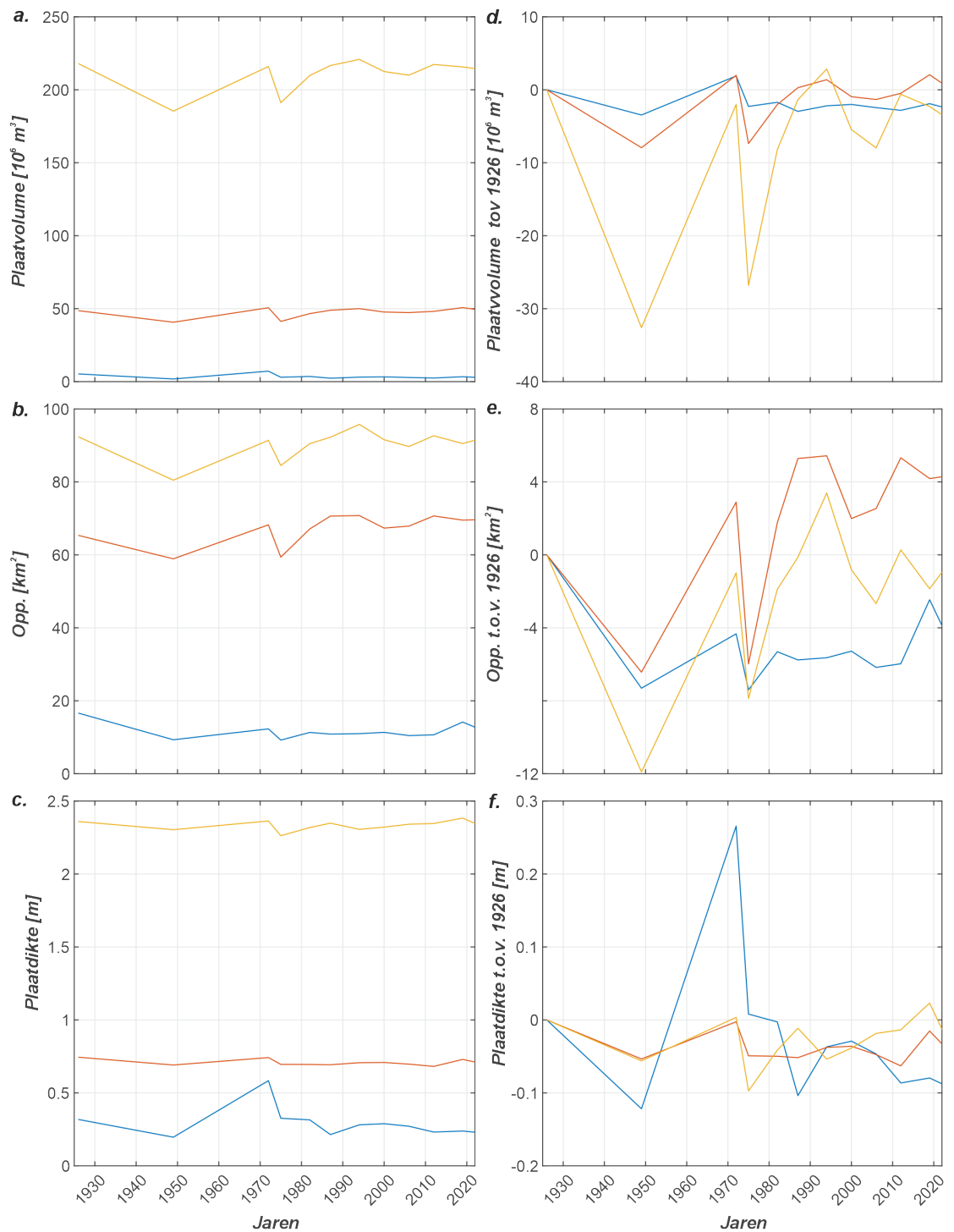
Jaren		Totaal > 0m NAP		> -1 m NAP		> -3 m NAP		Kwelder > 0m NAP	
Centrale Waddenz.	Kom- berging	V	A	V	A	V	A	V	A
1926	1926	10.54	29.28	66.61	78.04	261.33	105.08	5.25	12.65
1949	1949	12.56	29.31	71.49	78.97	256.26	100.53	10.73	19.99
1971	1972	17.49	28.26	76.95	84.24	274.28	107.39	10.31	15.96
1975	1975	18.18	31.49	78.69	81.68	273.20	106.81	15.17	22.26
1982	1982	20.87	36.40	89.05	92.26	302.50	115.65	17.3	25.08
1989	1987	21.27	37.98	95.09	97.93	317.35	119.54	18.94	27.11
1994	1994	23.67	39.32	99.05	99.24	326.77	124.24	20.58	28.33
2000	2000	22.97	40.13	96.22	96.25	318.89	120.48	19.69	28.78
2006	2006	23.63	41.09	98.56	98.60	322.43	120.51	20.79	30.63
2012	2012	21.44	37.77	94.33	97.88	317.98	119.93	18.97	27.11
2018	2019	23.40	42.49	99.07	97.88	320.74	118.87	20.02	28.32
2024	2024	22.39	40.05	96.39	97.05	316.26	118.85	19.45	27.3



Figuur D- 3: Overzicht van de (a) geulvolumes, (b) oppervlakte en (c) diepte en de verandering in (d) geulvolumes, (e) oppervlakte en (f) diepte sinds 1926 voor het Bordiep . Geulvolumes zijn uitgerekend t.o.v. 0m NAP, -1 m NAP, -3m NAP en -5m NAP.



Figuur D- 4: Overzicht van de (a) geulvolumes, (b) oppervlakte en (c) diepte en de verandering in (d) geulvolumes, (e) oppervlakte en (f) diepte sinds 1926 voor het Pinkegat. Geulvolumes zijn uitgerekend t.o.v. 0m NAP, -1m NAP, -3m NAP en -5m NAP.



Figuur D- 5: Overzicht van de (a) geulvolumes, (b) oppervlakte en (c) diepte en de verandering in (d) geulvolumes, (e) oppervlakte en (f) diepte sinds 1926 voor de Zoutkamperlaag. Geulvolumes zijn uitgerekend t.o.v. 0m NAP, -1m NAP, -3m NAP en -5m NAP.

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